

中国科学院上海应用物理研究所

年报

**2019-2020**

(第 29 卷)

《中国科学院上海应用物理研究所年报》

编辑委员会

## 前 言

2019-2020 年是中国科学院上海应用物理研究所调整学科方向、深化改革发展的关键年。继上海光源于 2018 年 10 月划转之后，我所调整发展思路，落实科研和产业化“两条腿走路”战略，全力推进钍基熔盐实验堆工程建设，谋划布局新发展规划；深入推进全面从严治党和反腐倡廉工作，以巡视整改促进研究所各项工作体制机制的完善，建立嘉定和武威新“一所两园区”人才队伍和工作模式，推进研究所与先进核能创新研究院融合发展。

### 一、深入推进全面从严治党和反腐倡廉工作，提升党对科技工作的领导

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，以党委中心组和支部主题党日为主要抓手，深入学习贯彻党的十九大及历次全会精神 and 习近平总书记关于抗疫、科技创新、进博会等重要讲话精神。结合院第六轮巡视要求，积极开展自查自纠，未巡先改；根据院巡视整改要求，举一反三，认真组织落实整改，将“改”字贯穿主题教育和全年工作始终。加强了党委在“三重一大”决策中发挥的作用。积极贯彻“基层党组织建设年”要求，完善党组织制度建设并加强制度实行力度。

加强领导班子和干部人才队伍建设。坚持建设学习型领导班子，加强领导力、决策力、执行力、凝聚力建设；开展管理部门调整与中层领导人员公开竞聘工作，积极推动管理部门负责人年轻化专业化。

### 二、研究制订“一三五”规划，系统谋划新一轮创新发展

上海光源划转后，2019 年启动并形成了应物所“十四五”时期的“一三五”发展规划，明确研究所定位为以能源安全为使命的综合性核科学技术研究机构，并提出了“十四五”时期新的重大突破和重点培育方向，形成了基于“核·能”的熔盐堆、钍铀燃料循环、核能综合利用、核技术应用“3+1 板块”学科布局，确立了科研与产业“两条腿走路”、应物所与核创院“融合发展”的战略，实现了上海光源划转后的平稳过渡。

积极谋划和争取“十四五”重大项目。完成并完善了国家重大科技基础设施“十四五”项目一“小型模块化钍基熔盐堆研究设施”项目建议书的编制，明确研究设施由世界首座 20MWe 小型模块化钍基熔盐研究堆、世界首个临堆高放研究设施、国际领先的钍基熔盐堆冷态研究设施三个子设施组成，采用面向应用、优化资源、科学布局、东西联动的创新模式，将“十四五”项目与张江综合性国家科学中心建设融合，研究堆和高放设施（核设施）建于甘肃、冷态设施（非核设施）建于上海。2020 年 7 月，项目建议书通过院条财局提交国家发改委审核和初评，将于 2021 年 2 月进入国家发改委的第二轮评审。

同时，积极谋划国家和地方军民融合项目、储能和制氢产业化示范项目等，为应物所成为世界一流的核科学技术研究机构奠定坚实基础。

### 三、科研工作取得重要进展

2019-2020年，应物所积极推进钍基熔盐堆核能系统（TMSR）先导专项的实施和先进核能创新研究院的建设，在优化发展战略、突破关键技术、打造核心能力、推进2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆（TMSR-LF1）工程建设等方面取得扎实进展。

1) TMSR 缩比仿真堆（TMSR-SF0）完成集成安装并启动调试及初步实验，取得了非能动余热排出系统验证试验数据，为TMSR-LF1实验堆工程提供了重要支撑。

2) 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆（TMSR-LF1）施工图设计完成，关键设备制造进入收尾阶段；取得建造许可证，园区建设全面启动，完成实验堆厂房主体结构施工并局部移交设备安装；启动下安全容器、堆本体离线安装工作；完成基盐制备台架建设，并于年内完成首批堆用冷却盐制备；许可证申请工作快速推进，完成运行许可第一轮技术审评，完成实物保护专篇审评、实物保护系统建设及核材料许可证申请上报，完成实验堆操纵人员培训。

3) 积极推进储能制氢技术示范。应物所承担的中科院“变革性洁净能源关键技术与示范”先导专项（A类）“核能非电综合利用”项目及其两个课题，完成了中期目标和考核指标，顺利通过中期检查评估，正积极推进后续任务及示范项目工作。研制成功国内首台套20kW高温制氢装置和超高温液下长轴熔盐泵；完成200kW高温制氢装置设计，启动设备加工制造。

4) 熔盐堆材料及放射化学研究取得重要进展。验证了GH3535合金在FLiNaK熔盐中依然保持良好的蠕变性能；在白光中子源开展 $\text{ThF}_4$ 、 $\text{UF}_4$ 的中子辐照实验，获取了 $^{233}\text{Pa}$ 和关键裂变产物，建立了熔盐体系关键核素研究平台及放射化学研究方法。成功确定TMSR-LF1燃料盐的氧容忍度。首次发现镧系硼化物对亚甲基蓝的还原现象。在FLiBe熔盐体系中实现了铀与镧系的电解分离。

5) X射线自由电子激光实验装置通过国家验收。2020年11月4日，国家重大科技基础设施X射线自由电子激光试验装置项目通过国家验收。国家验收委员会专家认为，X射线自由电子激光试验装置的各项指标均达到或优于批复的验收指标。

2019-2020年，争取各类项目共102项，经费总量为14.2亿元，其中竞争性经费5.12亿元。发表论文1812篇，其中SCI收录论文925篇，影响因子大于5的论文320篇。专利受理125件，授权专利111件，其中授权发明专利93件。

### 四、打造适应研究所发展的人才队伍

恪守“人才强所”的理念，加大青年人才培养力度，凝聚造就高水平创新人才队伍。根据主题教育关于人才问题的整改要求，制定了2020-2024人力资源发展规划，探索新时期“一所两园区”人事管理新模式。积极引进高层次人才，院“百人计划”引进人才1人，上海市千人1人，特别研究助理7人。通过“青促会”、“青年科技之星”评选等对青年人才的认可形式，通过“育新计划”为青年人提供自由探索的空间和经费支持的形式，激励广大青年科技人员在

实践中快速成长、脱颖而出实施培养国内优秀青年人才的“壮苗计划”。

2020年，强化核能相关专业人才培养，启动反应堆操作员培训计划。人才培养取得较好成果，1人获得国家自然科学基金优秀青年科学基金项目，1人获得第二届中科院“科苑名匠”称号，1人获得2020年度中科院青年创新促进会优秀会员称号，1人获中科院上海分院杰出青年科技创新人才奖，1人获得嘉定青年英才称号，1人获得2015-2019年度上海市先进工作者称号。

面向TMSR与低碳能源新产业链的培育，联合办学成果显著。先进核能创新研究院与武威职业技术学院合作的中科低碳新能源技术学院申报“氢能技术应用”专业获教育部批准，成为全国首个“氢能技术应用”专业教学标准的制定者和承办者，并于2020年完成首届招生，联合培养高水平技术技能人才，支持了所武威园区钍基熔盐堆系统和低碳能源系统项目的建设。

科教结合协同育人，提升研究生培养质量。根据所学科发展规划设置了教研室（组），实行研究所和教研室两级培养责任体系。重视学风建设，关注心理健康，开设《学术道德与学术写作规范》课程，完善研究生心理健康工作队伍，加强心理关爱。

至2020年底，我所学籍在读研究生共487名，其中博士研究生287名，硕士研究生200名，联合培养研究生147名。2019-2020年，3位同学获中国科学院院长特别奖，3位同学获中国科学院院长优秀奖，1位同学获中国科学院大学唐立新奖学金，2位同学获朱李月华优秀博士研究生奖。10位同学被评为国科大“三好学生标兵”，19位同学被评为“优秀学生干部”，145位同学被评为“三好学生”，10位同学获国科大“优秀毕业生”称号，13位同学获“上海市高校优秀毕业生”称号，3位同学获“梦想奖学金”，3位同学获“启明奖学金”，14位同学获博士研究生国家奖学金，8位同学获硕士研究生国家奖学金。

## 五、积极推进科技成果产业化

1) TMSR“溢出”技术的转移转化。上海联和日环能源科技有限公司与上海嘉定工业区开发（集团）有限公司成立上海氢程科技有限公司，并设立全资子公司—武威联和日环能源科技有限公司；上海深景医药科技有限公司完成公司注册资本实缴，进入正常运营发展阶段；青岛中科汉缆高分子材料有限公司完成公司注册资本实缴。围绕TMSR的发展和产业链布局，与上海建工集团签署一揽子合作研发协议，合作开展实验堆核安全设备安装技术研发。

2) 首台国产质子治疗示范装置研制工作进展顺利。加速器系统已完成设备安装和软硬件系统联调、加速器主要性能调试，加速器整体性能、主要参数全部达到和好于设计指标，满足治疗系统要求。在上海市战新资金和国家科技部重点研发计划支持下，加速器系统性能达到设计指标，治疗系统已完成固定治疗室全部94个能量的束流调试，准备临床试验。

## 六、优化管理体制机制、统筹各项工作协调发展

1) 完成军工保密体系建设，取得保密资质证书。根据保密资质建设要求，在人员配备、

制度建设方面全面跟进，样样落实。

2) 改革管理体制，探索核创院与应物所的“院所融合”机制。启动全所管理部门机构改革，融合重组研究所职能部门和先进核能创新研究院管理部，将两支管理队伍整合为五个管理部门和五个承担管理职能的业务部门。

3) 统筹抓好疫情防控，有序开展复研复学工作。2020年，面对年初突如其来的新冠疫情，成立了疫情防控领导小组和三个防控工作组。将职工学生的生命健康放在首位，根据防疫形势和任务及时应对，扎实落实工作职责和各项举措，采取一系列有力措施奋力打赢疫情防控阻击战。

面对百年未有之大变局，应物所将继续“乘风破浪”，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，贯彻落实国家创新驱动发展战略，深入实施中科院“率先行动”计划，勇担重任，聚焦主责主业，为“一带一路”建设提供能源解决方案，为建设科技强国和创新型国家而奋斗。

# 目次

## 反应堆物理部

热泵热机熔盐储能系统研究进展	卢恒 陈兴伟 贾国斌 郭燕雯 戴叶 (001)
smTMSR-LF-150 概念设计与物理研究进展	朱贵凤 严睿 郭威 邹杨 陈金根 周翀 马玉雯 邹春燕 康旭忠 张金红 (006)
30 MWt 研究堆堆芯物理设计方案	朱贵凤 严睿 邹杨 陈金根 邹春燕 康旭忠 (010)
728 工程石墨-熔盐零工率实验装置的物理模型复原研究	刘亚芬 严睿 (013)
2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆核设计	严睿 于世和 周波 杨璞 刘亚芬 朱贵凤 李明海 康旭忠 邹杨 (017)
超高温熔盐储能和固体填充床储能技术研究进展	袁晓凤 李启明 杨洋 贾国斌 戴叶 (021)
合金材料热中子散射研究	胡继峰 王小鹤 余呈刚 郭子安 蔡翔舟 陈金根 (026)
液态燃料钍基熔盐堆的钍铀循环方案	李晓晓 伍建辉 邹春燕 余呈刚 马玉雯 周俊 蔡翔舟 陈金根 (029)
深海微型熔盐堆方案设计研究进展	赵恒 崔德阳 陈兴伟 戴叶 (033)
TMSR-LF1 工程模拟机设计、实现及应用	戴明 程懋松 夏少鹏 田格瑄 刘峰瑞 (036)
TMSR 关键工程设计与安全分析软件研发进展	夏少鹏 程懋松 戴明 刘峰瑞 田格瑄 (041)
面向智慧核能的数字孪生技术及应用	程懋松 夏少鹏 田格瑄 (045)
TMSR-LF1 堆芯流量分配验证试验	田健 陈兴伟 张金红 周翀 邹杨 (049)
TMSR-LF1 非能动余热排出系统性能验证试验	傅瑶 袁晓凤 王允 梅牡丹 孙强 李启明 张金红 杨洋 徐博 周翀 (053)
2 MW 钍基熔盐实验堆 TMSR-LF1 热工水力设计	周翀 傅瑶 田健 李启明 徐博 孙强 王允 梅牡丹 杨洋 张金红 (056)

## 仪控工程技术部

基于 epics 的实时数据通讯研究进展	韩利峰 黄丽 刘文倩 陈志军 肖君 李丹清 陈永忠 (060)
基于载钎闪烁体的中子成像技术研究	黄跃峰 侯会良 (065)
基于 EtherCAT 国产化控制设备研究进展	李国辉 陈志军 韩利峰 陈永忠 李丹清 余嘉莉 (067)
基于光电二极管的低成本小型化粒子探测器	刘艳成 刘洪涛 (071)
TMSR 棒控棒位 (RGL) 系统研制	魏永波 李琴 后接 (073)
中子成像技术初步研究	黄跃峰 侯会良 (074)

## 放射化学与工程技术部

干法工艺示踪实验验证	窦强 付海英 孙理鑫 周金豪 牛永生 胡聪伟 罗艳 (075)
钍铀循环关键镧锆元素综合利用研究	龚昱 陈秀婷 王晨阳 李杨娟 刘西艳 熊志欣 黄卫 (079)
电化学技术在钍基熔盐堆燃料盐处理和化学监测中的应用	黄卫 蒋锋 余长锋 彭浩 龚昱 (081)
熔盐反应堆化学研究进展	程治强 赵中奇 耿俊霞 窦强 李晴暖 李文新 (083)
偕胺胍基吸附材料的设计开发及海水提铀研究	马红娟 许璐 王自强 张岚 李晴暖 (086)

## 材料研究部

- 数据库及材料分析组工作进展 ..... 任翠兰 戴建兴 李诚 温阿利 黄鹤飞 (088)
- 合金材料组工作进展 ..... 冷滨 叶祥熙 韩汾汾 高丽娜 俞国军 李晓丽 雷冠虹 许红霞 (091)
- 材料评估中心工作进展 ..... 陆燕玲 李德辉 周伯谋 曾广礼 叶林凤 王晚霞 汪松林 (095)
- 碳基材料在熔盐堆以及高温熔盐系统中的研究进展 ..... 贺周同 黄庆 唐辉 冯尚蕾 刘方刚 (098)
- 先进核燃料技术研究 .....  
..... 林俊 曹长青 严超 张锋 王鹏 黄鹤 侯可可 李健健 仲亚娟 李子威 雷前涛 张海青 朱智勇 (102)

## 应用加速器技术部

- 哈工大低能电子加速器项目详细设计 ..... 刘永好 (105)
- 一种能量和流强可调范围增强的电子加速器设计 ..... 何子锋 李德明 (107)
- 7 MeV 医用质子直线注入器的研制 ..... 谢修瑾 (110)
- 哈工大 1.2 MeV/10 mA 电子加速器控制系统设计 ..... 苏海军 郭洪雷 张金玲 李正 (112)
- 在线低能电子束辐照灭菌装置 ..... 何子锋 林作康 李林繁 周大勇 杨永金 黄建鸣 蒋海青 王永其 (114)
- 加速器运行组加速器运行情况与用户工作 ..... 邓琦 王永其 曹建清 王胜利 (117)
- 基于加速器的 BNCT 研究 ..... 何子锋 林作康 申淼 贾丽娜 (120)
- 国产首台质子治疗装置中治疗计划系统的剂量验证 ..... 孔海云 (123)

## 氙科学与工程技术部

- 热处理法去除退役核石墨中氙的理论及实验研究 ..... 邓珂 张钦 曾友石 楚鑫新 刘卫 (126)
- 钯银合金管分离熔盐堆尾气中的氙 ..... 黄豫 曾友石 张宁 吴胜伟 楚鑫新 刘卫 (128)
- 熔盐堆尾气中氙储存用 ZrCo 合金储氙性能研究 ..... 杨果 韩兴博 吕丽君 马兆伟 朱海云 刘卫 (131)
- 核设施周围不同环境介质中氙的空间分布规律 ..... 张钦 邓珂 曾友石 楚鑫新 刘卫 (132)
- 金属有机骨架材料对氙吸附分离的性能研究 ..... 吴小玲 周鹤 张宁 黄豫 郭冰 钱楠 楚鑫新 (135)
- ZrVFe 基合金吸附氙性能研究 ..... 吕丽君 韩兴博 杨果 马兆伟 朱海云 刘卫 (137)

## 熔盐机械工程技术部

- 熔盐堆高温机械设备力学分析与安全评定（施工设计阶段） ..... 张小春 (138)
- 熔盐堆用合金材料工艺研究进展 ..... 黎超文 梁建平 蒋力 玉昆 陈双建 李铭 袁晓丹 严益 王金龙 (142)

## 熔盐化学与工程技术部

- 化学安全技术研究进展 ..... 姚剑 马继飞 杜林 陈贵生 刘阳 刘忠英 姜迪 仝路路 李玉兰 (146)
- 辐照剂量可视化探测材料的开发 ..... 林健 陆黄杰 李子建 (149)
- 金属材料在高温熔盐自然循环腐蚀回路中的动态腐蚀 ..... 杨新梅 刘华剑 陈冰川 (151)
- 高温熔盐体系设计及其热物性研究 ..... 唐忠锋 阴慧琴 王子睿 李雪娇 李娜 刘伟华 刘崎 (154)
- 熔盐化工研究及工程化进展 ..... 汤睿 唐忠锋 (155)
- 熔盐质量控制 ..... 葛敏 刘洪涛 (157)

## 核与辐射安全技术部

钍基熔盐堆核与辐射安全·····蔡军 乔延波 (160)

## 建安工程技术部

2 MW 液态钍基熔盐堆实物保护系统设计与建设·····凌佳业 李子威 林俊 尹崇凯 李超 靳巍巍 (161)

## 氢能技术部

电解制氢技术研究·····王建强 (163)

## 附录

附录 1: 2019–2020 年博士、硕士学位授予一览表····· (166)

附录 2: 2019–2020 年论文发表一览表····· (178)

附录 3: 2019–2020 年专利授权一览表····· (240)

附录 4: 2019–2020 年国际学术会议报告表····· (252)

# 热泵热机熔盐储能系统研究进展

反应堆物理部, 卢恒 陈兴伟 贾国斌 郭燕雯 戴叶

由于东西部发展不平衡, 弃风、弃光现象严重, 同时风光本身具有间歇性和不稳定性的特点, 作为常规能源不够可靠, 需要储能技术的支撑。我国用电负荷不断攀升, 许多地区都陷入了用电高峰期拉闸限电、低谷期设备利用率低的尴尬局面, 调峰矛盾日益突出。与此同时, 在 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的目标下, 高可再生能源占比将进一步增加, 此时, 气候条件长期不利导致发电能力不足时, 需要依靠大容量储能弥补其不足。国家发展改革委、国家能源局在《能源发展“十四五”规划》中提出了“积极发展太阳能, 高效利用风能”重点任务, 新兴的热泵热机储能发电技术为任务实现提供了途径。西北地区风光资源丰富, 地广人稀, 开发储能发电技术有条件也有必要。热泵热机系统致力于解决风光发电在时间、空间上分布的不均匀性, 在用电低谷期储热并在高峰期转化为电能输出, 在高效的热电转换过程中达到“削峰填谷”的目的。

## 物理储能技术比较

储能技术通常分为两大类: 物理储能<sup>[1]</sup>和化学储能。相较于电池等化学储能手段, 物理储能规模大, 运行时间长, 周期平均费用更低。但因受到一些条件限制, 建设局限制较大。典型的有: 飞轮储能、抽水蓄能、压缩空气储能等。其他的物理储能技术中很少有能提供兆瓦级容量和长时间供电功能的, 且它们大都费用昂贵, 使用稀有、危险、有毒的材料。

热泵热机式储能系统使用熔盐作为蓄热介质。熔盐的流动性好, 性质稳定, 熔盐的工作温度范围宽 (260-1 000°C)、黏度低、蒸汽压小、比热容高、蓄热能力强、溶解能力强, 部分熔盐成本较低, 经济性好。当作为储能介质时, 具有能提高蓄热温度上限、安全可靠的优点, 在储能领域逐渐受到人们的重视。热泵热机中的高温熔盐传热具有稳定性, 当系统运行时, 两个熔盐容器中介质温度不变, 熔盐在高低温容器间流动传热。熔盐蓄热温度的选取对系统效率有着较大影响, 温度过低时在熔点温度发生相变, 传热系数等发生改变。当温度过高, 容易对设备造成腐蚀损伤。当使用 Solar salt 硝酸盐 (40%KNO<sub>3</sub>-60%NaNO<sub>3</sub>)<sup>[2]</sup>作为蓄热介质时, 熔点为

220°C, 最高蓄热温度可以达到 570°C, 成本较低, 但超过 600°C 会发生分解。熔盐介质能以液体状态工作并且对设备腐蚀性低, 如发电量 50 MW 的 ANDASOL 电站采用了 28 500 吨硝酸熔盐作为蓄热介质。提高效率最有效的手段是提高熔盐的蓄热温度范围, 而采取氯盐(NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>)作为蓄热介质时, 成本较低, 最高蓄热温度甚至超过 800°C, 故可用于更高温度范围的储能系统, 但需要解决腐蚀性较强的问题。氟盐的工作温度可以超过 800°C, 腐蚀性强且成本高。碳酸盐的热力学性质较稳定, 最高工作温度也可达 800°C。但化学稳定性较差, 容易发生化学分解氧化腐蚀设备。

热泵热机<sup>[3-6]</sup>储能技术采用的是正/逆布雷顿循环技术, 正向循环为热机系统, 可将功转化为热, 类似于“工业制造皇冠上明珠”的燃机。逆向循环为热泵系统, 将热能从低温热源转移到高温热源, 提高了能量的“品味”。热泵热机结合两者, 热机实现热电转换, 热泵实现风/光热转换。兼具热能储存和动力循环及供电功能。蓄热材料使用熔盐, 整体采用闭式结构, 以提高系统的转换效率。表 1 为 4 种物理储能技术的能量密度和功率密度, 热泵热机具有较高的能量密度和功率密度。若将热泵热机技术用于实际, 等体积内可储存能量非常高, 且输出功率较高。

表 1 4 种物理储能技术比较

项目	飞轮储能	抽水蓄能	压缩空气储能	热泵热机
储存介质	飞轮	水	空气	熔盐
工作流体	—	水	空气	二氧化碳
能量密度 /[kW·h)·m <sup>-3</sup> ]	54	1.4	10	88
功率密度 /[kW·(m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	135	5000	—	632

## 理想热力学过程

国际上, 自 GoogleX 实验室分离出 Malta 工作室提出概念设计中, 系统利用冗余电力产生热能和冷能。热泵从导热油中获取热量并传入熔融盐中。冷热能量存储在这些温度下, 直到电网再次需要用电。此时, 利用供热机将温差转换回电能。截止到 2021 年 5 月 19 号, Malta 与 Duke 公司尝试将北卡

罗来纳州退役的煤炭机组转化为储能系统，电功率为 100 MW，储热时间可达到 10 h.在国内，张琼<sup>[7]</sup>对热泵储电系统进行了详细的系统建模和数值仿真，分析了热能和冷能储释过程罐体长径比与保温层厚度对性能的影响。张谨奕<sup>[8]</sup>对热泵储电系统进行了热力学分析和参数敏感性研究，通过分析储热储冷效率等对性能的影响，得到了设计参数的敏感系数。上海应用物理研究所的殷子彦<sup>[9]</sup>提出了相变热泵储电技术并基于有限体积法，开发出系统的填充床一维混合扩散中心对称相变模型，比较了新型热泵储电技术与传统热泵储电的在性能上如储能密度和充电时间等的差别。工程热物理研究所研究了热泵储电系统中的填充床储热储冷设备的质量流不均现象，并通过实验提出了修正的系统效率表达式。结果表明，通过提高储热材料的热容和降低孔隙率，可以有效解决质量流量的不平衡从而获得更高的充放效率和储能密度。另一方面开展了基于有限热力学方法的热泵储电系统动态分析。研究了 10 MW/40 MWh 热泵储电系统循环过程系统压比、压缩/膨胀机效率、储能介质尺度、储能装备结构以及运行控制等因素对热泵储电系统的影响。

理想的热泵热机系统基于布雷顿/逆布雷顿循环原理，在运行时遵循两种模式。如图 1 所示，储能模式下，系统经历逆布雷顿循环，共 4 个过程，分别为等压吸热、绝热压缩、等压放热、绝热膨胀(④①②③)。而在放电模式下，系统经历布雷顿循环，分别为绝热压缩、等压吸热、绝热膨胀、等压放热(③②①④)。

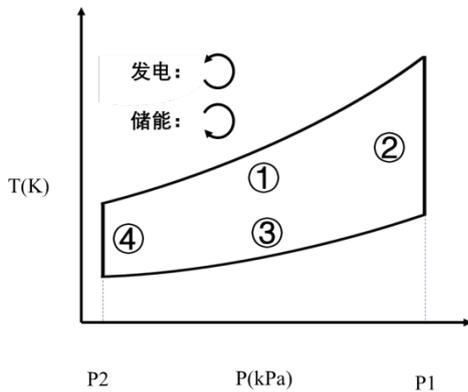


图 1 理想热泵热机的压力温度曲线

系统通常设置两个熔盐容器和两个冷却液容器。运行时，容器中介质温度不变，只在高低温容器间流动传热。能量转移过程如图 2 所示，储能时，冷却液的内能转移到高温熔盐，并且将热能储存在高温熔盐容器中。发电时，将高温熔盐内能转移到低温冷却液中，同时消耗内能带动热机运转发电。

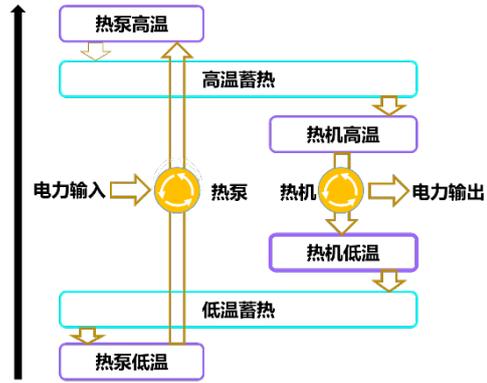


图 2 理想热泵热机的能量流程图

### 系统模型

如图 3 和图 4 分别为热泵热机发电模式和储能模式的流程图，换热时，为了匹配气体工作温度，需将储存介质温度提高至 700°C 以上，容器中的储存介质选用为氯盐 (NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>)。能量储存形式仍为显热型。透平、压缩机在两种模式下互相转换，它们机械耦合到电动发电机，工作时带动发电机转动发电。

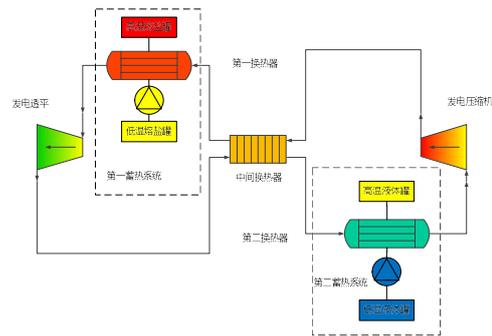


图 3 热泵热机发电模式流程图

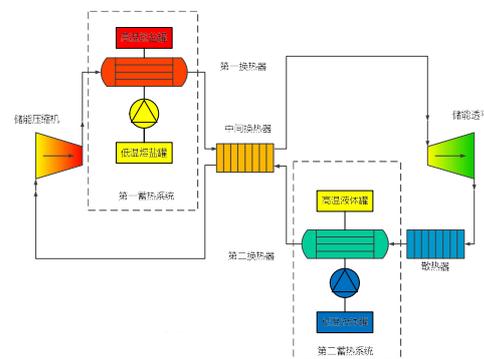


图 4 热泵热机储能模式流程图

如图 5 与图 6 分别为发电模式与储能模式下热泵热机热力学特征。

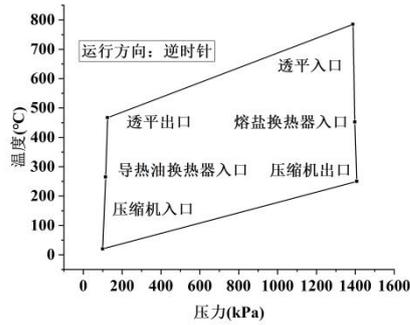


图5 热泵热机发电模式热力学特征

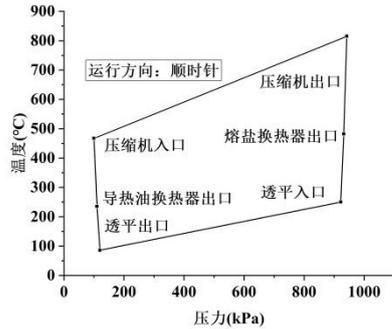


图6 热泵热机储能模式热力学特征

### 影响因素及效率分析

整个储能系统最高温度在发电模式的透平入口和储能模式的压缩机出口处，故压缩机和透平的性能直接关系到蓄热能力和发电容量。图7为压缩机/透平对总循环效率的影响。

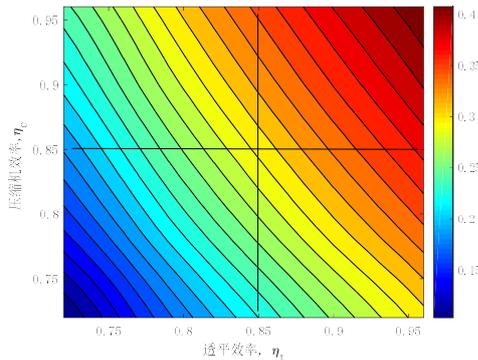


图7 总效率随压缩机和透平效率变化

对于总效率，等值线近似平行，当固定一个变量时，另一个变量随函数值近似呈现线性关系。透平效率每变化1个百分点，总效率变化约1.37个百分点。压缩机效率每变化1个百分点，总效率变化约0.92个百分点。

从原点到最大值的等值线逐渐变宽，则说明要提高相同的效率，需要压缩机和透平效率的提升更多。而达到一定效率后（压缩机/透平效率达0.95）后，要提高压缩机和透平效率，对材料的精度要求

越高，也越难实现。因此在考虑热泵热机系统效益时，极限开发压缩机和透平效率并不是最优选择，应综合实验结果和系统成本来衡量。

根据布雷顿循环的特性，一般选用气体作为工质，常用的有氮气(空气)、二氧化碳等。气体参与热泵热机循环时不会发生相变，能获得较高的热/功循环效率。表2为几种气体工质对效率的影响。

选用气体工质有氩气<sup>[10]</sup>、氮气<sup>[11]</sup>、氨气<sup>[12]</sup>、二氧化碳<sup>[13]</sup>及空气<sup>[14]</sup>。在理想情况下，单原子气体的气体绝热指数为1.66，双原子气体为1.41，多原子气体的气体绝热指数通常为1.30甚至更低(此处二氧化碳为1.30，氨气为1.29)。

表2 5种工质对效率影响

工质	发电熔盐释热/MW	储能过程熔盐吸热/MW	总效率
氩气	9.81	16.17	0.49
氮气	9.17	16.29	0.533
二氧化碳	8.34	16.27	0.58
氨气	7.79	15.94	0.61
空气	9.14	16.27	0.534

由表中可以发现，随着气体绝热系数逐渐减小，热泵热机系统的压比呈增大趋势，压比越大，流动阻力对系统影响越小，效率越高。在相同的输入功率和储能容量下，使用二氧化碳、氨气为工质的系统具有较大的系统循环效率。空气中含有约78%的氮气，其计算结果与纯氮气相比差距很小，在实际操作中可以考虑用空气代替氮气，以达到节约成本的目的。氩气、氮气、二氧化碳、氨气的效率值依次增大，氨气的效率值最高。使用二氧化碳的系统效率值没有氨气高，但差距仅为0.03，且二氧化碳的使用、保存和运输相较于氨气更为安全。为了保障系统的安全、高效，用二氧化碳作为工质是不错的选择。

提高效率最有效的手段是提高熔盐或导热油的蓄热温度范围。相对于水等其他的蓄热介质，熔盐蒸气压低、热容量大、化学稳定性高，使用熔盐能够输出连续、稳定的电能。

熔盐温度的选取在650-950摄氏度之间，在这段温度区间内，发电效率与总效率都随着高温熔盐温度的升高而升高，而储能效率则相反，如图8所示。温度每上升100摄氏度，总效率提高约4.30%，发电效率提高约5.22%。储能效率下降约9.44%。这是因为：当系统以恒定功率输入和输出（稳态）时，高温熔盐温度升高，发电模式下，压缩机与透平的进/出口的焓差变大；储能模式中，压缩机与透平出进出口焓差亦变大。引起两个模式的气体流量均减小，发电模式下熔盐释热量与储能模式下储热量均减小。

由定义：发电效率为熔盐释热量与输出净功之比。储能效率为熔盐吸热与输入净功之比。因此，发电效率增大，储能效率减小。发电效率增加的程度大于储能效率增加的程度，总效率也呈现增大的趋势。

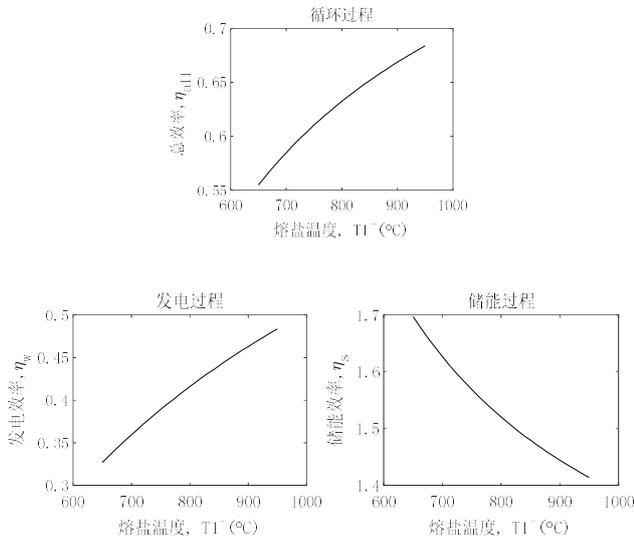


图8 总效率随导热油温度变化

工作介质流经蓄热系统、压缩机/透平、中间换热器及管道时，不可避免地会受到阻力损失和换热温差的影响。系统拟采用密封、绝热、低阻的管道，高效率的压缩机/透平，气体介质在换热器中直接与蓄热体进行换热，换热温差与阻力损失主要集中在换热器上。

图9和图10为换热器换热温差与流动阻力变化对效率的影响。可以发现，同一换热温差/流动阻力区间内，曲线均近似为线性并且平行，随着横坐标的增大，曲线均呈下降趋势。对于第一换热器，流动阻力每增加1 kPa，总效率降低约0.688个百分点，换热温差每增加1 K，总效率降低约0.176个百分点；对于第二换热器，流动阻力每增加1 kPa，总效率降低约0.0767个百分点，换热温差每增加1 K，总效率降低约0.189个百分点。

第一熔盐蓄热温度范围为448-800°C，若流动阻力为20 kPa。第一换热器因阻力降低的效率为13.76%，相当于78°C温差所带来的效率降低的量。由气体换热经验判断，这个值过大。同样，导热油蓄热温度范围在20-250°C，若换热温差为20°C，第二换热器因换热温差降低的效率为3.78%，相当于49.2 kPa阻力所带来的效率降低的量。热泵热机系统的最高压力刚到兆帕级，在气体侧这个值也是偏高的。

综合两图，在选取的区间内，第一换热器对流动阻力的变化较为敏感，第二换热器对换热温差的变化较为敏感。因此，本系统在选择换热器时，应

保证第一换热器在低流动阻力的基础上换热温差尽可能的小，第二换热器在低换热温差的基础上流动阻力尽可能的小。

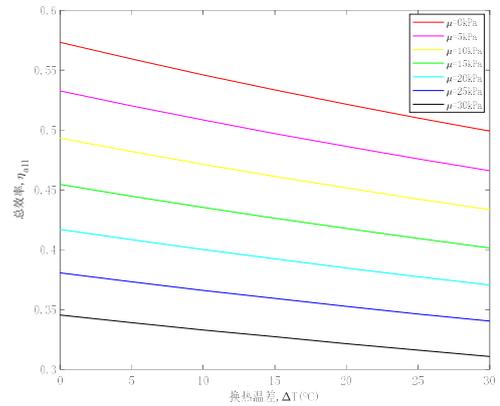


图9 第一换热器温差和阻力对总效率影响

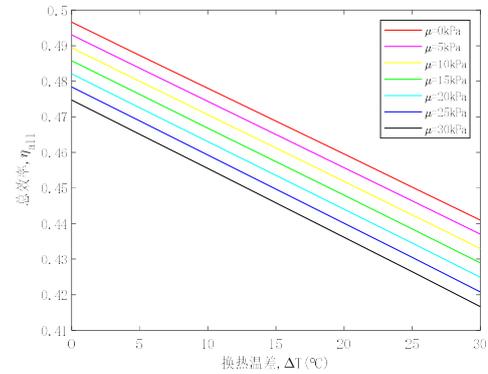


图10 第二换热器温差和阻力对总效率影响

### 参考方案设计

为达到理论上的高效率值，对优化后系统进行参考方案设计。考虑到实际工程情况，在对系统参数进行取值时，留有余量以应对特殊情况。

表3 热泵热机系统物理参考方案

参数名	参数
输入功率(MW)	10
储能容量(MWh)	50
工作介质	二氧化碳
蓄热介质	氯盐/导热油
发电/储能质量流量(kg/s)	15.47/38.64
熔盐蓄热温度(°C)	800/448
导热油蓄热温度(°C)	250/20
压缩机入口压力(kPa)	300
换热温差(K)/流动阻力(kPa)	10/10
总效率	75.28%

## 结语

热泵热机技术采用了熔盐作为蓄热介质，最高蓄热温度较高。与采用其他介质（空气、水）的储能技术相比，超高温熔盐介质储能储量大；由于熔盐独有的物理状态，安全性更高。可以预见，在 21-22 世纪，热泵热机蓄热储能技术是一项极具竞争力的储能技术，也是未来储能技术的重要研究方向。

系统中，透平效率每变化 1%，总效率变化约 1.37%。压缩机效率每变化 1%，总效率变化约 0.92%。氩气、氮气、二氧化碳、氨气的总效率均依次增大，分别为：49%，53.3%，58%，61%。高温熔盐温度每上升 100 摄氏度，总效率提高约 4.30%。对于第一换热器，流动阻力每增加 1 kPa，总效率降低约 0.688 个百分点，换热温差每增加 1 K，总效率降低约 0.176 个百分点；对于第二换热器，流动阻力每增加 1 kPa，总效率降低约 0.0767 个百分点，换热温差每增加 1 K，总效率降低约 0.189 个百分点。

热泵热机技术的理论与实际工程之间并不存在不可见的“鸿沟”，无论是技术的难度还是材料的要求，这项技术都极具可行性。现在还未进行大规模的应用，可能的原因是虽然其收益较高，但一次性投资较其他储能技术也相对较高。这项技术近年引起人们的注意，正逐渐成为储能技术研究的主流。随着“Malta”等相关研究项目的开展，该技术将日趋成熟。

## 参考文献

- 1 张雷, 姜茜. 物理方式电力储能系统的现状和发展[J]. 东方电气评论, 2018, **32**(01): 83-88
- 2 孟强, 陈梦东, 胡晓, 王乐, 杨岑玉, 徐桂芝. 管内熔融盐强制对流传热的数值模拟[J]. 储能科学与技术, 2019, **8**(03): 544-550
- 3 Desrues T, Ruer J, Marty P, *et al.* A thermal energy storage process for large scale electric applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, **30**(5): 425-432
- 4 Joshua D, McTigue, Alexander J, White Christos, N Markides. Parametric studies and optimization of pumped thermal electricity storage[J]. Applied En-ergy, 2015, **137**
- 5 Fan Ni, Hugo S, Caram. Analysis of pumped heat electricity storage process using exponential matrix solutions[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, **84**
- 6 Thess A. Thermodynamic efficiency of pumped heat electricity storage[J]. Physical Review Letters, 2013, **10**(11): 110-116
- 7 张琼. 新型热泵储电技术仿真研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2017
- 8 张谨奕, 王含, 白宁, 李京浩, 张玮. 热泵储电系统的热力学分析[J]. 热力发电, 2020, **49**(08): 43-49
- 9 殷子彦, 戴叶, 徐博, 邹杨, 谢雷东. 新型热泵储电系统的设计方案及其性能分析[J]. 可再生能源, 2019, **37**(05): 784-790
- 10 李晓凤. 添加剂对 CO<sub>2</sub> 跨临界热泵膨胀过程及系统性能影响的研究[D]. 天津大学, 2013
- 11 倪超, 程新路. 氮气的高温热力学性质研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2019, **56**(05): 890-896
- 12 吴雪松. 氨水混合液吸收氨气过程中的传热传质现象研究[D]. 北京工业大学, 2003
- 13 代宝民, 剧成成, 梁梦桃, 刘圣春, 孙志利, 齐海峰, 马一太. 机械过冷跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵供暖系统性能分析[J]. 制冷学报, 2019, **40**(04): 29-36
- 14 邱云明, 赵改清. 空气的绝热系数的测量[J]. 大学教育, 2013, **20**: 155-156

# smTMSR-LF-150 概念设计与物理研究进展

反应堆物理部，朱贵凤 严睿 郭威 邹杨 陈金根 周翀 马玉雯 邹春燕 康旭忠 张金红

2011年，中国科学院瞄准核能领域国家重大战略需求，启动了“未来先进核裂变能—钍基熔盐堆核能系统”战略性先导科技专项(TMSR 先导科技专项)，成立了 TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) 中心，计划用 20 年时间，全面掌握钍基熔盐堆的关键科学技术，开发具备发电、高温制氢、海水淡化、乏燃料焚烧等不同用途的钍基熔盐堆，实现钍基熔盐堆的商业应用。

小型模块化钍基熔盐示范堆是基于研究堆验证之后技术成熟的、面向商业化市场的堆型，而 smTMSR-LF-150 是小型模块化钍基熔盐示范堆系列中的 150MWt 功率版本。主要设计目标包括：(1) 实现钍的规模化利用。采用一次通过和离线批处理模式，钍燃料释放的裂变能贡献大于 20%；(2) 实现堆本体模块化，包括工厂组装、整体运输、现场拆装更换及高放射性的包容能力。(3) 实现核热高效利用，输出温度达到 700°C，采用闭式布雷顿循环，效率达 40% 以上；(4) 示范熔盐堆固有安全性，包括非能动功率自稳定控制、非能动余热排出、多重放射性包容等。

本文根据 smTMSR-LF-150 设计目标，介绍其概念设计和物理研究进展，包括燃料循环分析与选型、堆芯设计方案、堆本体模块化设计方案、高温热利用方案及安全设计理念。

## 钍铀燃料循环

TMSR 制定了循序渐进的钍铀战略目标和技术路线。其中 smTMSR 阶段的钍铀循环模式为堆内一次通过+离线批处理，见图 1。在堆内，经过初装盐燃料临界之后，在线补充钍燃料维持反应堆的长期功率运行，仅通过吹气排出裂变气体和难溶性裂变产物。达到堆寿命后，一次排出燃料盐，并经衰变冷却后运往后处理中心。在后处理中心，采用氟化挥发、减压蒸馏及电化学还原法等回收铀、载体盐和钍，经配比重构后，返回下一个新堆继续使用。

该模式在具体实施方面还存在较多技术选型问题，如载体盐的选取、燃料富集度选取、钍燃料的利用价值、离线回收的次数以及堆芯结构选型等。我们对上述问题进行了系统的分析比较，主要结果见图 2，主要结论如下：载体盐。比较了 LiF-BeF<sub>2</sub> 与 NaF-BeF<sub>2</sub> 基盐的中子学性能。相同情况下，LiF-BeF<sub>2</sub> 比 NaF-BeF<sub>2</sub> 的燃料利用率提高 40%，但初始氙产量 (99.995%Li-7) 高近 2 个多量级，平衡时

相当。NaF-BeF<sub>2</sub> 本身的平衡氙产量同样较大，达到 ~300 Ci/GW/d。

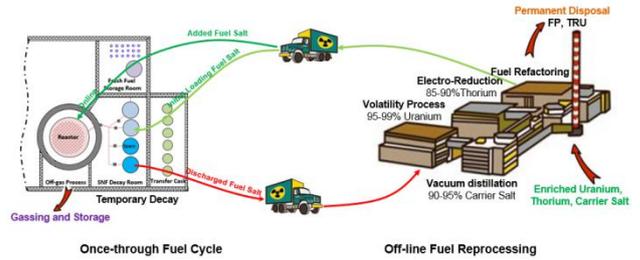


图 1 smTMSR 燃料循环模式示意图

铀富集度：研究认为燃料富集度越大，折算成天然铀的利用效率越高，富集度大于 10% 其效果达到饱和。考虑防核扩散问题，推荐采用 19.75% 富集铀，减低乏燃料处理量并与钍结合更佳。钍铀比例：钍的截面低，要充分转换钍，则需要在初装中一次装好钍。由图 2 所见，钍铀最终装载比例接近 1:1 较佳。钍的装量较低则转换优势不明显；装载过多，相当于降富集度，燃料利用降低。钍铀配比 1:1 方案比纯铀燃料的燃耗深度高 20%，显示出钍规模化利用的优势。

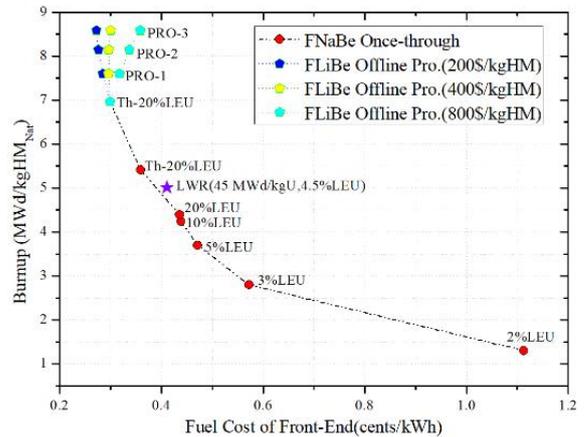


图 2 smTMSR 燃料循环方案选型比较

离线批处理。假设离线处理后钍、铀、载体盐全部回收，裂变产物及超铀元素永久处置。首次批量处理后燃料利用率改善约 9%，多次循环改善效果逐步下降。考虑后处理存在回收损失，其提高燃料利用效果不明显。批处理回收的燃料盐还存在容积控制和重金属控制的问题，因此还需慎重评估。如选择离线批处理回收，燃料盐的初次重金属摩尔比例可以选在 6% 附近，经三次利用及回收，最终摩尔

比在 12%左右；如不考虑离线批处理，燃料盐的初次重金属摩尔比例可以选在 10%附近，达到 12%溶解上限即可暂存或处置。

堆芯组件结构。堆芯组件结构对燃料循环利用有较大影响。研究比较了六棱柱中心开孔组件、四棱柱边上开槽组件以及六棱柱板型组件三种结构，六棱柱中心开孔组件由于其较大的空间自屏蔽效应展现了较高的燃料利用效果。在组件尺寸选择上，对边距在 12-24cm 范围内燃料利用效果较佳。

### 堆芯设计

smTMSR-LF-150 设计热功率为 150MW，燃料兼冷却剂为 LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>，慢化剂为石墨。堆容器直径 3.54 m，等效高度 3.6 m，总重量约 60 ton（不含堆内熔盐），可在工厂加工组装，可采用公路和铁路运输。堆芯活性区平均功率密度约 6.6 MW/m<sup>3</sup>，堆内石墨、合金容器可满足 10 年辐照寿命要求。smTMSR-LF-150 堆芯结构及参数见图 3 和表 1。

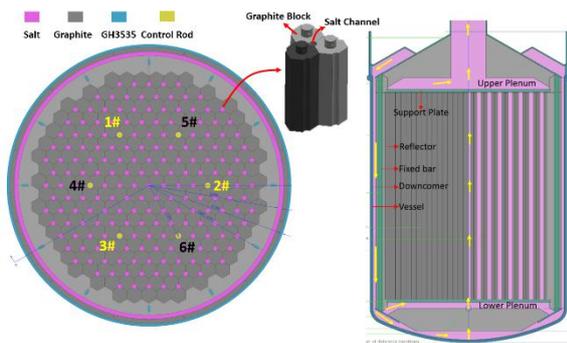


图 3 smTMSR-LF-150 堆芯结构示意图

表 1 smTMSR-LF-150 主要设计参数

参数	值
功率 MWt	150
堆容器尺寸/m	3.54×3.6
堆芯功率密度 MW/m <sup>3</sup>	6.6
堆本体寿命	10
堆芯进/出口温度/°C	660-700
燃料盐	LiF-BeF <sub>2</sub> -ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> 初始 68:26:5:1 末期 65:25:5:5
U-235 富集度	19.75%
Li-7 富集度	99.995%
燃料总体积 m <sup>3</sup>	10
燃料盐寿命/年	40
等效铀燃耗深度 MWd/kgU	~330
钚功率贡献	~40%
温度负反应性系数 pcm/K	-6~-2
堆芯内/外滞留时间 s	6/21
满功率有效缓发中子份额 pcm	248

反应堆本体由堆芯、控制棒系统、反射层、上下腔室、下降环腔、堆内构件及堆容器组成。堆芯等效直径 3 m，高度 3.2 m，由 241 个 18 cm 对边距石墨组件六棱柱排列构成。其中间隔的三个石墨组件顶角处开有直径 6 cm 的圆孔通道，用于形成燃料盐流道。在第四圈组件位置，对称布置了 6 根控制棒。控制棒孔道直径 10 cm，其中控制棒套管外直径 8 cm，预留 1 cm 厚度环形熔盐通道冷却周边石墨组件。堆芯外侧为石墨反射层，由 12 个扇形石墨梢环形围绕而成，等效厚度 19 cm。石墨组件及反射层由上下支撑板压紧固定。支撑板采用哈氏合金材料，厚 2 cm，为蜂窝状结构，嵌入在石墨组件凹槽内。支撑板坐落在堆容器支座上，支座用于承担堆芯的所有重量。反射层外为 1 cm 厚的堆芯围桶，采用哈氏合金材料，起到从径向上固定石墨梢作用，同时与堆容器之间形成稳定的下降环腔。下降环腔厚度 3 cm，为熔盐的下降通道。堆容器为哈氏合金材料，厚度 3 cm，包裹整个堆本体，为一回路边界。堆容器下封头与下支撑板之间构成下腔室，内有导流板及流量分配板，用于分配堆芯流量。堆容器上封头与上支撑板之间构成上腔室，用于熔盐搅混，降低熔盐热点温度。上下腔室等效厚度 20 cm。

燃料熔盐进口温度为 660°C，从换热器连接通道流入下降环腔，经下腔室进入堆芯熔盐通道内，并被核能加热到平均 700°C，最后在上腔室汇合并进入上升通道。

smTMSR-LF-150 中子通量分布见图 4。快中子通量在熔盐通道内出现较显著的峰值，从石墨组件壁面到组件中心具有较大的快中子通量梯度。堆芯热中子通量同快中子通量分布具有互补性，即在熔盐通道中有明显的下陷峰，尤其是在六根控制棒通道内。石墨所受到的最大快中子通量为 1.2×10<sup>14</sup>(cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)，堆芯控制棒套管受到的最大快中子通量为 9.0×10<sup>13</sup>(cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)，堆容器所受到的最大快中子通量为 3.5×10<sup>12</sup>(cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)。石墨和堆容器均能达到 10 年辐照寿命，而控制棒套管则还需考虑更耐辐照的材料。

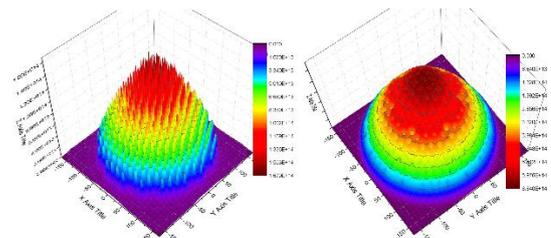


图 4 smTMSR-LF-150 快（左）热（右）中子通量

smTMSR-LF-150 设置两套停堆系统。其中第一停堆系统由 6 根控制棒构成，其中 1#、6#为调节棒，2#、4#为补偿棒，3#、5#为安全棒。调节棒用于自动调节正常运行时各反应性波动，兼具停堆功能；补偿棒用于补偿冷停堆深度到热态满功率的反应性变化，工况为升降功率和停堆；安全停堆棒用于事故工况下的紧急停堆，其采用和补偿棒、调节棒不同的驱动机构和棒体形式，满足驱动机构多样性的需求。第二停堆系统为排盐系统，包括冷冻阀、排盐罐及附属设备，在事故高温下自动熔通冷冻阀，通过重力将燃料盐自然地转移到排盐罐内，链式反应停止。smTMSR-LF-150 的反应性控制需求包括冷停堆深度 (-1 000 pcm)，冷态到热态，热态到满功率氦平衡的反应性变化 (约 1 600 pcm)，后备反应性 (约 500 pcm)。共计 3 100 pcm。计算调节棒单根价值约 1000pcm，满足自动调控要求；补偿棒两根价值 2 200 pcm，大于 1 600 pcm 需求；单根安全棒可实现热态停堆，两根安全棒可实现冷态停堆。

smTMSR-LF-150 的燃料运行方案如下：1) 初装临界方案。将基盐与铀盐按照一定比例配比混合固定，按照 1/2 原则逐步混合铀盐燃料。每次混合均匀之后进入反应堆内，直至达到冷态临界，此时燃料盐的配比为 68:26:5:0.99。在反应堆从冷态上升到热态期间，通过在线加料的形式补充铀盐，以补偿温度造成的反应性下降。热态满功率时的初装盐配比为 68:26:5:1，此时一回路燃料盐的体积为 10 m<sup>3</sup>。2) 加料运行方案。当反应堆满功率运行时，随时间补充铀燃料。每半个月补充一次，每次补充 5.6 kg~7.7 kgU。每次补充反应性提升 140 pcm~90pcm。3) 离线批处理。每当燃料运行 10 年后，将燃料卸出堆芯，并临时存储衰变 5 年。然后将乏燃料运往后处理中心厂进行干法处理，采用氟化挥发法回收铀，采用减压蒸馏回收基盐，采用电化学法回收钚。回收的燃料做为下一个堆的初装料使用。如图 5，经过 3 次批处理，等效燃耗深度达到 330 MWd/kgU，天然铀利用率约 1%，其中钚能的贡献平均占到 30%。

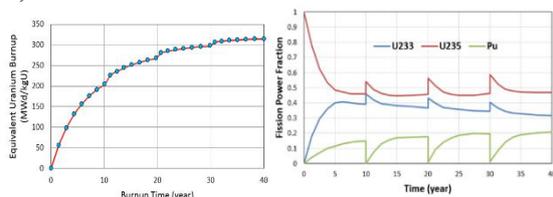


图 5 smTMSR-LF-150 燃料循环性能

### 堆本体模块化

smTMSR-LF-150 堆本体包含大量放射性，不适合组件更换，而堆本体辐照寿命远低于一般电站寿命，因此需考虑将燃料盐回路整体更换。对燃料盐

回路（堆模块）进行模块化设计一项重要且必要的工作。为了实现堆模块的工厂组装、整体运输和整体更换。我们对其设备及布置做了如下处理：

(1) 上下紧凑布局。采用换热器置于堆本体上方的紧凑布局方式，减轻对径向尺寸的要求，使其满足铁路运输的标准。换热器置于上方同样利于回路内部自然循环，在卡泵等事故下仍能带走部分堆芯热量，降低堆芯热点。

(2) 紧凑式换热器。为降低换热器尺寸，采用板式换热器，提高换热功率密度，使其与堆芯尺寸相匹配，同时减少堆外燃料盐用量。

(3) 三环路设计。为进一步减少轴向高度以及增加技术冗余度，采用一泵三环路设计，进一步提升布置紧凑性，增强周向流量分配的均匀性。

(4) 保护容器支撑。在燃料盐回路外增设保护容器，用于回路力学支撑以及燃料盐和放射性气体的密封包容。

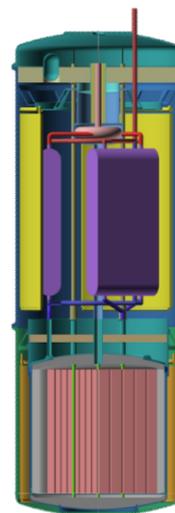


图 6 smTMSR-LF-150 堆模块布置

### 高温热应用

smTMSR-LF-150 输出温度达 700°C，可采用先进的布雷顿循环发电方式。除了燃料盐回路外，smTMSR-LF-150 采用 3 个回路实现其高温热传递及利用：

(1) 冷却盐回路。用于隔离堆模块与外界的相互影响，防止放射性外泄，降低发电系统对堆模块的高压冲击影响。冷却介质为 NaF-BeF<sub>2</sub>，熔点低，与燃料盐具有一定的兼容性。其进/出口温度为 600/680°C。

(2) 热存储回路。增加热存储回路使 smTMSR-LF-150 具备削峰填谷能力，增强其应用灵活性。储热介质为太阳盐或氯盐，进口温度为 290°C、出口温度为 650°C（氯盐）或 560°C（太阳盐）。

(3) 发电回路。采用布雷顿循环发电系统，介质为氦气或空气或二氧化碳，最终选择视其技术成熟度和应用场所而定。

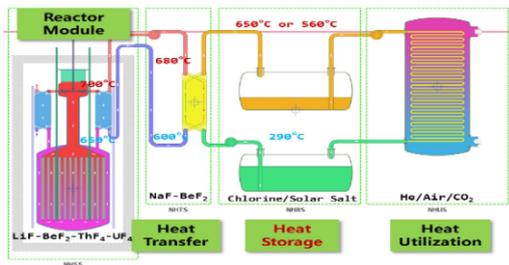


图7 smTMSR-150 高温热传递与利用

### 安全设计理念

充分利用熔盐堆自身的特点，从纵深防御三个层次提出 smTMSR-LF-150 安全设计理念：

**反应性控制。**设计使其触发的反应性引入较低，如采用在线加料，后备反应性在 1\$ 左右；满功率时绝大部分控制棒处于堆外，单根控制棒误拔出引入的反应性在 1\$ 附近，使其在源头降低功率激增的可能。设计使其温度反应性系数较负，结合燃料盐热熔较大的特点，使其温升较为温和。在主动控制方面，smTMSR-LF-150 设计了两套独立停堆系统，第一停堆系统中任意一根控制棒落棒即可实现热态停堆；在第一停堆系统失效之后，温升会自动触发排盐第二停堆系统，遏制事故的发展进程。

**余热导出。**smTMSR-LF-150 设计两套非能动余排系统。第一套为堆舱非能动余排系统，位于保护容器外，通过高温壁面辐射进行传热，为一备两用

设计。在正常运行时带走 2% 满功率热量。当传热回路失效后，衰变热即可从堆舱余排系统导出。第二套为排盐罐非能动余排系统，当堆舱余排系统失效或者需要排盐时启动。其主要通过在排盐罐内插换热管带走衰变热。

**放射性包容。**smTMSR-LF-150 的实体屏障包括：

(1) 燃料盐回路边界，由于其运行在近常压下，同时堆内设有氧控系统，使其不容易由于腐蚀导致边界泄漏。同时，smTMSR-LF-150 设有泄漏监测系统，预防并降低泄漏事故风险。(2) 保护容器。燃料盐回路泄漏的盐或气体密封在保护容器内，保护容器被余排系统不断冷却，具有较强的力学性能。(3) 燃料盐本身。燃料盐本身能够固溶绝大部分裂变产物和锕系核素，当其进一步泄漏到保护容器外时，遇到低温介质会凝固。(4) 地下建造。整个熔盐堆建在地下混凝土壁内，放射性物质不易通过大气在环境中迁移。

### 参考文献

1. 朱贵凤, 谈梦露. 150MW 钍基熔盐示范堆低富集铀驱动燃料循环研究[R]. TMSR-DRP-RP-TR-2018-004, 2018
2. 朱贵凤, 康旭忠, 邹春燕. 150MW 钍基熔盐示范堆核设计基准方案[R]. TMSR-DRP-RP-TR-2018-006, 2018
3. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments[M]. International Atomic Energy Agency, 2020
4. Guifeng Zhu, Yang Zou, Rui Yan, *et al.* Low enriched uranium and thorium fuel utilization under once - through and offline reprocessing scenarios in small modular molten salt reactor[J]. International Journal of Energy Research. 2019, 43(2), 1-16

# 30 MWt 研究堆堆芯物理设计方案

反应堆物理部, 朱贵凤 严睿 邹杨 陈金根 邹春燕 康旭忠

2011年, 中国科学院瞄准核能领域国家重大战略需求, 启动了“未来先进核裂变能—钍基熔盐堆核能系统”战略性先导科技专项(TMSR 先导科技专项), 成立了 TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) 中心, 计划用 20 年时间, 全面掌握钍基熔盐堆的关键科学技术, 开发具备发电、高温制氢、海水淡化、乏燃料焚烧等不同用途的钍基熔盐堆, 实现钍基熔盐堆的商业应用。

模块化钍基熔盐研究堆是继 2 MWt 钍基熔盐实验堆之后我所要开展的下一个工程项目, 是钍基熔盐堆系统工程热验证与热态实验的研究与验证平台。其目标是建成热功率 30 MWt、电功率 10 MWe、设计寿命不小于 50 年的小型模块化钍基熔盐反应堆, 主要开展如下研究工作: 高功率下熔盐堆的物理、热工与安全特性研究, 熔盐堆的钍铀燃料转换特性研究, 高中子通量、深燃耗下堆材料及关键设备的综合服役性能考验, 以及熔盐堆设计与安全标准建立等。

2020 年度本组根据总体组提出的研究堆设计目标开展了堆芯方案设计工作, 主要包括该阶段的堆芯布局设计、反应性控制设计、钍铀运行方案等, 以满足高功率熔盐堆物理、热工与安全验证及材料辐照、钍铀转换实验等需求。

## 研究堆堆芯设计方案

### 设计原则

研究堆的核设计原则主要有: 1) 热功率为 30 MWt, 堆芯满功率运行寿命为 10 年(可更换); 2) 初期以纯铀燃料试运行, 然后逐步加钍, 加钍量为百千克级, 实现钍铀混合燃料运行; 3) 反应性控制覆盖所有反应性引入的可能, 冷停堆深度小于 -1 000 pcm, 总温度反应性系数为负; 4) 设有实验通道, 提供特有的熔盐堆材料辐照环境; 5) 设有温度和高中子通量率测点, 用于安全保护和实验数据获取。

### 堆芯描述

研究堆设计核功率 30MW, 堆本体进/出口温度为 660°C/700°C。功率运行时燃料盐为 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>-ThF<sub>4</sub>, 其中 U-235 富集度为 19.75wt%, Li-7 丰度为 99.99at%。堆芯结构参考示范堆, 其设计尺寸根据高中子通量与低中子泄漏要求折中选取。堆芯采用圆柱体石墨结构, 直径为 2 790 mm,

高为 3 000 mm, 其结构示意图如图 1。堆芯包括堆芯活性区和外侧石墨反射层: 堆芯活性区等效直径为 2 200 mm, 高为 3 000 mm; 石墨侧反射层厚约 300 mm, 以降低堆芯中子泄漏率。堆芯活性区由 127 个六棱柱石墨组件及其中包含的熔盐通道组成。石墨组件对边距为 180 mm, 中心设置直径 60 mm 的燃料盐流道, 燃料盐体积占比约为 10%。研究堆的主要核设计参数见表 1。

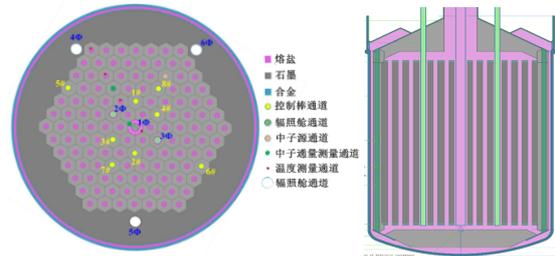


图 1 研究堆堆芯结构示意图

表 1 研究堆主要核设计参数

参数	值
功率	30 MWt
主容器尺寸 (D×H)	Φ2 980mm×4 200mm
活性区直径/高度	Φ2 200 mm/3 000 mm
堆芯进/出口温度	660°C/700°C
燃料盐	纯铀燃料运行: LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> 钍铀燃料运行: LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> -ThF <sub>4</sub> 19.75wt% U-235, 99.99at% Li-7
铀初装载量/钍装载量	700 kg/百千克级
燃耗深度	~70 MWd/kgU (10 年)
最大快/热中子通量	0.7/2.0×10 <sup>14</sup> n·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>
反应性控制	第一套停堆系统: 控制棒 (8 根) 第二套停堆系统: 排出燃料盐
燃料盐流道直径/个数	Φ60 mm/115 个
控制棒/辐照通道数	8/6 个

堆芯共设置 21 个功能通道, 包含 8 个控制棒通道、1 个中子源通道、2 个中子测量通道、4 个温度测量通道和 6 个辐照舱通道。控制棒通道直径为 100 mm, 内含 1.7 mm 厚度镍基合金套管, 用于隔离控制棒与

堆芯熔盐，套管外径为 70 mm。中子源通道与控制棒通道相同，中子源采用 Am-Be 源，源强为  $4.0 \times 10^7 \text{ n/s}$ 。中子通量测量通道直径为 80 mm，套管外径为 50 mm，用于堆芯功率监测、中子通量分布测量及能谱分析。温度测量套管外径为 20 mm，分布于不同径向熔盐通道内，用于监测堆芯径向和轴向温度分布。6 个辐照舱通道分布于堆芯活性区及反射层，用于不同中子通量及能谱环境的熔盐堆材料辐照实验。其中 1Φ 辐照通道位于堆芯中心，对应快中子通量最大区域（为  $7.2 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ），为熔盐接触型通道，其套管直径为 70 mm，厚度为 1.7 mm。其它 2Φ-6Φ 为熔盐非接触型通道，可通过隔热实现材料在较高温度下的辐照考验，其套管直径为 70-200 mm。

研究堆将开展高中子通量、深燃耗、高钍装载量环境下的钍铀转换、关键核素演化以及核数据研究。由此制定了钍铀混合燃料运行方案：1) 初始采用 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>，启堆阶段临界运行的燃料摩尔配比为 65.6%:28.5%:5.0%:0.9%。2) 钍铀混合燃料试运行阶段。纯铀测试之后，在线逐步加入钍燃料，开展不同钍装量情况下的钍铀燃料循环和堆运行特性研究。燃料盐为 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>-ThF<sub>4</sub>，最终燃料摩尔配比为 64.8%:28.1%:4.9%:1.1%:1.1%，钍装量约 850 千克。3) 钍铀混合燃料长期运行。在线加 LiF-UF<sub>4</sub> 燃料，补偿运行过程的燃耗反应性。研究堆 10 年满功率燃耗深度约为 70 MW/kgU。

### 中子能谱与中子通量

研究堆的中子能谱为热谱，堆内各材料区域归一化后的中子能谱见图 2。石墨反射层中的中子能谱最软，其次为堆芯活性区石墨内中子能谱，熔盐中的中子能谱略硬。

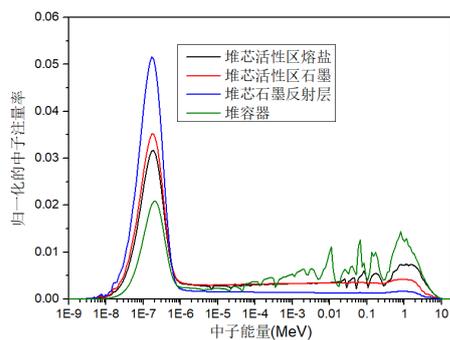


图 2 研究堆堆芯各区域中子能谱

研究堆中的热中子 ( $<0.625 \text{ eV}$ ) 和快中子 ( $>0.05 \text{ MeV}$ ) 通量分布见图 3。最大热中子通量位于石墨组件内，约为  $2.0 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。堆芯熔盐通道，尤其是控制棒通道和样品辐照通道等区域的热中子通量具有局部明显下降峰。整体上，由于石墨反射层的反射作用，在堆芯形成一个较大的热中子

通量陷阱。研究堆的轴向功率峰因子为 1.65，径向功率峰因子为 1.6，总功率峰因子为 2.64。快中子通量在熔盐通道中具有明显的局部峰值。熔盐通道直径越大，快中子通量峰值越大。最大快中子通量位于中心熔盐接触辐照通道内，约为  $7.2 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

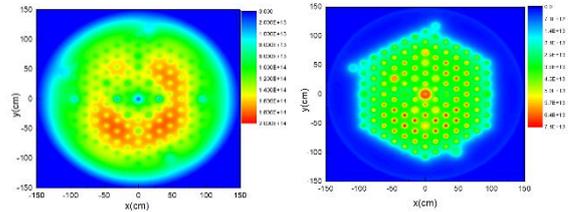


图 3 研究堆堆芯热（左）、快（右）中子通量分布

### 反应性变化因素

研究堆的反应性变化因素主要有温度反应性系数、氙毒、有效缓发中子份额流失、加料、燃耗和辐照样品移动等。

**温度反应性系数：**寿期初燃料盐、石墨温度反应性系数分别为 -6 pcm/K、-7 pcm/K。随着燃料装载量和燃耗深度的不断增加，堆芯中子能谱朝欠慢化区移动，满功率 10 年寿期末，燃料盐、石墨温度反应性系数分别上升为 -3.4 pcm/K、-3.9 pcm/K，整个寿期内始终维持着较大的负温度反馈。

**有效缓发中子份额：**在燃料熔盐不流动状态下，研究堆初始有效缓发中子份额为 670 pcm，主要由 U-235 贡献；满功率 10 年寿期末，由于 U-233 和 Pu-239 的积累，有效缓发中子份额有所降低，为 570 pcm。在燃料熔盐流动状态下，流动引起缓发中子份额损失，有效缓发中子份额在寿期初为 400 pcm，在寿期末为 340 pcm。

**氙毒：**研究堆中的氙产生于堆芯活性区的燃料盐中，会迁移分布于整个堆本体内，包括堆芯石墨。研究堆采用在线吹气处理方式，大部分氙气可以通过吹气清除掉。吹气处理下的氙平衡中子毒性在寿期初和寿期末分别为 600 pcm 和 560 pcm。

**加料与燃耗：**燃耗反应性的下降比较缓慢，平均 12 pcm/d。加料反应性引入与加料频率相关，设定每半个月进行一次加料，则每次加料引入的反应性约为 170 pcm。

**辐照舱移动：**辐照舱的取出与安装会对堆芯反应性造成一定影响。1Φ 辐照舱作为堆内固定组件，在寿期内不取出。根据假设样品计算，2Φ-6Φ 辐照舱的总价值在寿期初和寿期末分别为 3 760 pcm 和 3 500 pcm。

### 反应性控制

在反应堆运行过程中，反应性控制的需求在寿期初和寿期末分别为 7 430 pcm 和 6 520 pcm，具体

包括如下几方面：1) 在临界过程中需要借助补偿棒过渡到临界状态，需求为 1 000 pcm。2) 升功率（零功率到满功率）过程中的反应性补偿，主要由温度引起，在寿期初约为 1 300 pcm，在寿期末约为 730 pcm。3) 从满功率初始态到氙平衡态，补偿氙毒，寿期初和寿期末分别为 600 pcm 和 560 pcm。4) 考虑燃料流动造成的缓发中子流失，最大反应性损失在寿期初和寿期末分别为 270 pcm 和 230 pcm。5) 满功率工况下补充燃料的后备反应性，为 500 pcm。上述 5 部分的补偿棒总价值需求在寿期初和寿期末分别为 3 670 pcm 和 3 020 pcm。6) 辐照舱在转移过程中会造成较大反应性变化，需在停堆后进行操作，辐照舱更换的最大总反应性变化在寿期初和寿期末分别为 3 760 pcm 和 3 500 pcm。

研究堆设置两套停堆系统。其中第一停堆系统由 8 根控制棒构成，包含 4 根补偿棒（1#，2#，3#，4#）、2 根调节棒（5#，6#）和 2 根安全棒（7#，8#）。补偿棒用于补偿冷停堆深度到热态满功率后备反应性以及辐照舱装卸所引起的较大反应性变化，兼具停堆功能，总价值在寿期初和寿期末分别为 8100 pcm 和 7 500 pcm。调节棒用于自动调节正常运行时各反应性波动，包括在线加料、燃耗、温度和缓发中子流失等因素造成的反应性扰动，实现自动控制，兼具停堆功能；其总价值在寿期初和寿期末分别为 1 220 pcm 和 1 020 pcm。安全停堆棒用于事故工况下的紧急停堆，也用于冷停堆和热停堆工况下的停堆，其总价值在寿期初和寿期末分别为 3 100 pcm 和 3 060 pcm。安全棒采用和补偿棒、调节棒不同的驱动机构和棒体形式，满足驱动机构多样性的需求。控制棒外径为 60 mm，为镍基合金双圆环管道，中心为氦气冷却通道，圆环内为可燃毒物碳化硼。

研究堆采用带有冷冻阀的紧急排盐系统做为第二停堆系统（又称为备用停堆系统），将燃料盐从堆内排出从而中止链式反应，达到停堆目的。停堆程序如下：第一停堆系统的 8 根控制棒全部下插。若第一停堆系统失效，高温将自动熔通冷冻阀，燃料盐可依靠重力从堆芯中非能动排至排盐罐，从而实现自动停堆。

### 钍铀燃料运行

研究堆将开展钍铀混合燃料运行模式的性能研究，为示范堆钍利用提供可靠的数据支撑与运行经

验。研究堆燃料运行方案及流程如图 4 所示，主要分为纯铀运行、钍铀试运行及钍铀运行三个阶段，具体如下：

纯铀运行阶段：首次临界及到达满功率阶段采用纯铀燃料运行，不添加钍，燃料盐为 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>，临界运行时的燃料盐配比为 65.6%:28.5%:5.0%:0.9%，其中铀的质量为 700 kg，通过在线加料系统小量添加 LEU 维持临界运行。

钍铀试运行阶段：在纯铀运行完成之后，采用分批次加钍方案。通过逐步多次在线添加小量 LiF-ThF<sub>4</sub> 液态盐直至钍装量达到约 100kg 以实现钍的试运行；同时通过在线加料系统分批次补充适量 LiF-UF<sub>4</sub> 以维持堆芯临界。重复该过程，逐步增加钍的装量，最终实现燃料中钍铀摩尔占比为 1:1，此时燃料盐 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>-ThF<sub>4</sub> 摩尔配比为：64.8%:28.1%:4.9%:1.1%:1.1%。

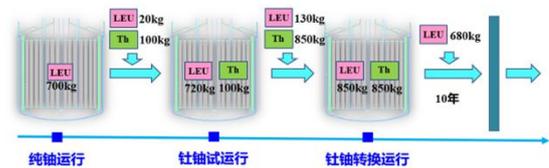


图 4 研究堆钍铀燃料循环运行方案

钍铀运行阶段：当钍的装量达到要求时，运行过程中不再添加钍，通过在线加料系统补充 LiF-UF<sub>4</sub> 燃料盐维持临界。满功率运行下，每半月补充的 19.75wt% 富集铀为 3 千克量级。10 年满功率运行所需在线添加的铀燃料质量为 680 kg。在第一个满功率运行的 10 年中，约消耗铀 151 kg，钍 16 kg，总的裂变产物约 130 kg（含 108 kg 固体裂变产物和 22 kg 气体裂变产物）。U-233 和 Pu-239 在 10 年运行过程中分别产生 15.7 kg 和 16 kg，消耗 8.2 kg 和 11 kg，10 年后剩余 7.5 kg 和 5 kg。U-232 在堆内的累积量仅约为克量级，其他同位素如 U-234 及 U-236 的累积量分别为 1.44 kg 和 20.1 kg，Pa-233 的质量为 0.28 kg。

10 年后卸载的燃料熔盐中，铀的等效富集度为 12.6wt%，经过后处理之后 Th、U 及载体盐将通过燃料盐重构在新的堆芯中继续利用。

### 参考文献

- 1 小型模块化钍基熔盐堆研究设施项目建议书研究堆-建设内容-物理设计, 2020
- 2 朱贵凤, 康旭忠. 研究堆核设计. TMSR-DRP-RP-TR-2019-046, 2019

# 728 工程石墨-熔盐零工率实验装置的物理模型复原研究

反应堆物理部, 刘亚芬 严睿

728 工程石墨-熔盐零功率装置为上世纪 70 年代（始于 1970 年 2 月 8 日）建立在我所的熔盐反应堆临界实验装置，用于验证熔盐反应堆的理论计算，取得熔盐静态与动态特性，反应性，控制棒刻度及温度效应和核燃料的转换率等必须的设计数据。至 1972 年 5 月底，完成了熔盐堆零功率实验的全部任务，获得了熔盐堆零功率装置的临界特性、中子通量分布规律、控制棒刻度动态变化以及钚铀转换比特性等重要实验结果，可为后续熔盐堆的设计和建造提供强有力的支撑和参考。

基于 728 工程石墨-熔盐零功率装置的四份关于实验的科学技术资料（临界实验、控制棒刻度实验、中子通量测量实验以及钚铀转换比测量实验），通过蒙特卡罗程序 MCNP 对装置的临界特性、中子通量分布、控制棒价值以及钚铀转换比进行核算，来实现该装置的物理模型复原，为 TMSR 专项中拟建熔盐堆的核设计及核设计程序提供有效并可靠的基准题。相关模型复原成果已在核能领域权威国际期刊上发表论文 3 篇，获得了同行专家的高度认可。

## 728 工程石墨-熔盐零功率装置



图 1 728 工程石墨-熔盐零功率装置

728 工程石墨-熔盐零功率装置主要由堆芯、反射层（包含上、下和侧反射层）以及屏蔽层构成。堆芯位于装置中心，外形上是一个直径约 120 cm，高约 129.6 cm 的圆柱，由 497 个直径为 3 cm、高为 120 cm 的燃料栅元或石墨慢化剂栅元组成，栅元成等边三角形排列，边长为 5 cm。堆芯周围包裹石墨反射层，含圆柱状的上、下反射层和八边形状的侧反射层。上、下反射层以及侧反射层最小厚度分别为 63 cm，61.5 cm 以及 63 cm。侧反射层中含有直径分别为 6.5 cm 和 4 cm 的两种孔道，用于安置探测器、控制棒和中子源。整个反应堆位于一个圆柱形的混凝土屏蔽体中，屏蔽体厚度为 70 cm。反射层与

混凝土屏蔽层之间的空腔可以起到一定隔热作用，或可以用石墨填充，以满足实验需求。

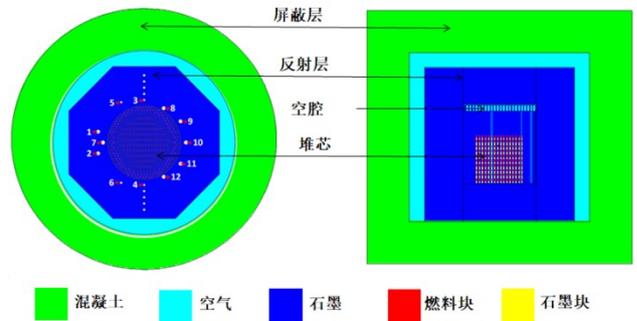


图 2 728 工程石墨-熔盐零功率装置的 MCNP 模拟图

装置中的栅元是由叠堆在石墨孔道中的燃料芯块或石墨芯块组成。共有三种燃料或慢化剂芯块：燃料芯块，增殖燃料芯块以及石墨芯块。燃料和增殖燃料芯块是将相应的粉末燃料封装在密闭的薄铝盒中。石墨芯块为高约 3.9 cm，直径约 2.0 cm 的石墨圆柱。每个燃料芯块含有  $UF_4$  约 1.6 g（其中  $^{235}U$  富集度为 90%）和  $BeF_2$  约 8.1 g，燃料粉末的平均密度约为  $0.979 g/cm^3$ 。每个增殖燃料芯块含 Th 约 7.34 g，平均密度为  $0.74 g/cm^3$ 。据技术资料估算得到燃料和增殖燃料芯块杂质 B 当量约为 0.3 ppm。用做慢化剂和反射层的石墨平均密度为  $1.7 g/cm^3$ ，石墨的杂质 B 当量估算值约为 4 ppm。燃料栅元可以采用燃料芯块堆叠，也可以采用燃料芯块和石墨芯块交替堆叠，然后装入深度为 120 cm 的石墨孔道中。不同活性区高度和燃料体积份额对应不同的燃料和石墨芯块的数量比。慢化剂栅元由石墨芯块堆叠而成，其几何尺寸和燃料栅元一致。此外，在堆芯的外围孔道中插入由增殖燃料芯块堆叠而成的增殖燃料栅元，形成一个用于研究钚铀循环的增殖区。用于测量通量和增殖比的活化箔放置于两块芯块之间。

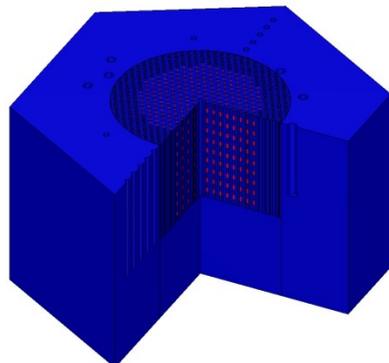


图 3 燃料芯块和石墨芯块交替堆叠于燃料栅元中

装置的反应性控制是通过使用 6 根镉棒来实现的。这 6 根镉棒是用厚度为 0.08 cm 的镉片包裹在铝棒上制成的，如图 4 所示。控制棒孔道位置在图 2 中侧反射层中标记为 1 到 6 号。1, 2 号孔道为停堆棒孔道，3, 4 号为备用停堆棒孔道，5, 6 号为补偿棒孔道和调节棒孔道。镉棒的直径随铝棒内径的变化而变化，用于控制棒校准的镉棒有 3 种，直径分别为 18.15 mm、21.71 mm 和 28.07 mm，对应的铝棒直径分别为 16.0 mm、18.0 mm 和 26.0 mm。用镉片包裹的控制棒部分长度为 120.0 cm，与燃料元件高度相同。表 1 给出了装置的主要参数情况。

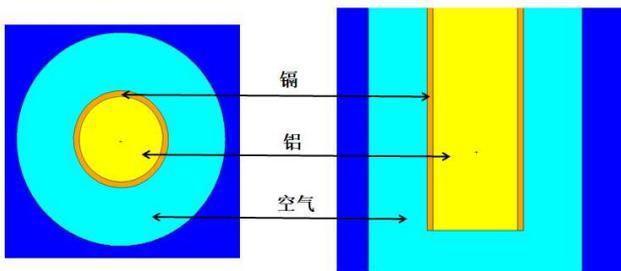


图 4 控制棒示意图

表 1 装置主要参数

参数	值
设计功率 /W	200
活性区半径 /cm	60
活性区高度 /cm	129.6
<sup>235</sup> U 装载量 /kg	5
UF <sub>4</sub> 装载量 /kg	7.4
盐装载量 /kg	455
反应堆总重 /t	500
高浓铀燃料元件数 /个	4651
总投资 /万元	255

## 使用程序介绍

装置物理模型还原采用的是蒙特卡洛程序 MCNP，版本号为 5-1.51/2004。MCNP 程序是由美国 Los Alamos 国家实验室研制的一套大型、通用、多功能三维多粒子输运的蒙特卡洛程序。可用于计算中子、光子、电子及耦合输运问题，也可用于计算临界系统（包括次临界和超临界系统）的本征值，是解决中子在介质中输运较为成熟、有效的方法，对于原子能、辐射防护、剂量学和辐射生物学等研究领域的计算也可以利用 MCNP 软件予以实现。

MCNP 程序是基于蒙特卡洛方法。蒙特卡洛方法亦称随机模拟法或统计实验法，其基本思想是：为了求解数学、物理、工程技术以及生产管理等方面的问题，首先建立一个概率模型或随机过程，使它的参数等于问题的解，然后通过对模型或过程的观察、抽样来计算所求参数的统计特征；最后给出

所求解的近似值，而解的精度可用估计值的标准方差来表示。

本文中 MCNP 计算采用的核数据来源于程序自带的核数据库，温度为室温。

## 实验栅元排布

临界实验根据不同活性区高度 ( $H_0$ ) 和石墨燃料比 ( $v_c/v_f$ )，展开了以下几种情况的临界特性测量：

- 1)  $H_0=80$  cm，活性区上方有 11 cm 空腔，装十段燃料块， $v_c/v_f=5.9, 8.2, 10.4, 12.8$ ；
- 2)  $H_0=104$  cm，活性区上方有 11 cm 空腔，装十三段燃料块， $v_c/v_f=8.2, 10.4, 12.8, 15.6$ ；
- 3)  $H_0=110.6$  cm，空腔用石墨填充，装十四段燃料块， $v_c/v_f=5.9, 8.2, 10.4, 12.8, 15.6$ 。

利用 MCNP5 模拟得到的以上五种栅元分布如图 5 所示：

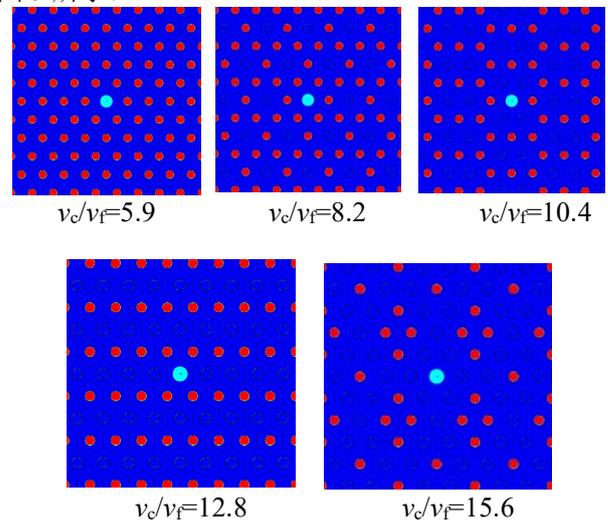


图 5 临界实验的五种栅元排布示意图

## 临界特性验证

根据实验数据，采用临界实验相同的参数，进行  $k_{eff}$  值验证计算得到  $k_{eff}=1.02145$ ，对比临界值 1.00，相差为 2.1%。

针对上节中的三种情况（标识为 Case 1~3）的临界燃料质量的实验结果与计算结果的比较如表 2 所示，其中， $M_c$  代表临界质量。结果表明，当反应器处于欠慢化状态时，临界燃料质量随着  $v_c/v_f$  的增加而明显减少。相反，当反应堆处于过慢化状态时，临界燃料质量会随着该值的增大而增大。图 6 显示了临界燃料质量的实验值与计算值在不同的石墨与 <sup>235</sup>U 核数比 ( $N_c/N_{U235}$ ) 的情况下的差异。Case 1 中，计算结果和实验结果直接的差别在  $H_0$  为 80 cm 时随着  $v_c/v_f$  值的增加（从 5.9 增加到 12.8）从 0.1% 增加到 1.2%。在  $H_0$  为 104 cm 时， $v_c/v_f$  值的从 5.9 增加到 12.8，该值从 0.8% 增加到 2.3%。Case 2 中， $v_c/v_f$

值的从 5.9 增加到 15.6, 该值从 0.4% 增加到 1.9%。而在 Case 3 中, 该差值变化不大, 在 0.2% 到 0.3% 之间震荡。 $v_c/v_f$  值越大, 该差值越大, 这是因为最外围燃料栅元的精确位置对反应性的影响在  $v_c/v_f$  值小的时候更大, 而实验报告中并未给出不同情况下的燃料栅元的精确排布, 使得计算模拟和实验时采用的燃料栅元排布并不能完全一致。

表 2 装置临界特性

	$H_0$ , cm	$v_c/v_f$	$M_c$ 实验值, g	$M_c$ 计算值, g
Case 1	80	5.9	2678	2678.7
		8.2	2530	2542.3
		10.4	2497	2521.6
	104	12.8	2521	2552.1
		8.2	2659	2678.8
		10.4	2581	2608.1
Case 2	112	12.8	2563	2605.9
		15.6	2629	2690.5
		5.9	2824	2835.8
	112	8.2	2629	2656.8
		10.4	2567	2601.3
		12.8	2536	2584.3
Case 3	112	15.6	2592	2662.9
		8.2	3939	3950.2
		10.4	3607	3620.4
	112	12.8	3406	3400.6
		15.6	3318	3325.2

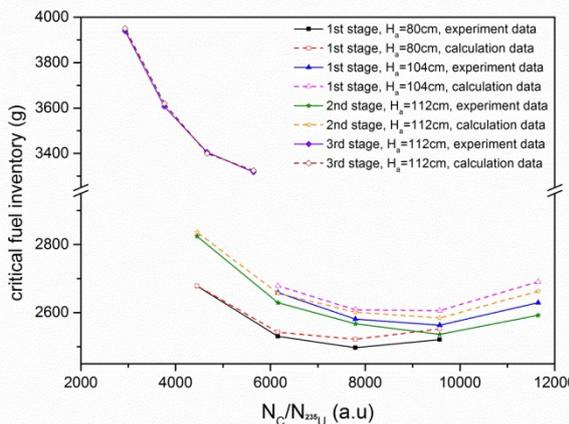


图 6 临界质量校核结果

### 控制棒刻度实验校核

根实验对三种不同半径的镉棒(控制棒)进行刻度, 采用方法为临界外推法, 即有镉棒时的临界外推质量和没有镉棒时的临界外推质量的相差为镉棒的反应当量。实验都是在装有钷的  $v_c/v_f=12.8$  ( $N_c/N_{U235}=4663$ ) 栅格上进行的, 没有镉棒时的临界外推质量为  $111.95 \pm 0.05$  根 ( $3410.45 \pm 1.52$  克)。镉棒为镉皮包裹在铝管上, 包裹长度为 120 cm, 上

端还有 114.8 cm 长的铝管, 镉皮厚度为 0.08 cm, 包裹在直径分别为 1.6 cm、1.8 cm、2.6 cm 的铝管上; 则实际镉棒的直径分别为 1.815 cm、2.171 cm、2.807 cm。一共 6 个镉棒孔道, 1、2 为停堆棒, 3、4 为后备停堆棒, 5 为补偿棒, 6 为调节棒。停堆棒孔径为 6.5 cm, 其他棒孔径为 4 cm。分别对比了这三种控制棒的积分价值, 所得曲线与实验资料校核结果对比如图 7 所示。直径为 1.815 mm 的停堆棒的积分价值校核结果同实验结果的对比偏差仅在 5.4%, 说明计算校核结果同实验结果吻合良好。

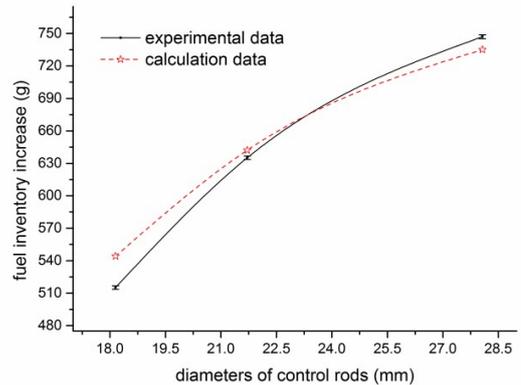


图 7 控制棒价值校核结果

### 中子通量测量实验结果校核

按堆芯结构布置, 分别针对三种情况进行了中子通量的测量:

- 1) Case 1: 没有再生区的  $v_c/v_f=5.9$  栅格 ( $N_c/N_{U235}=4454$ );
- 2) Case 2: 没有再生区, 但在上反射层内有一个约为 10 cm 高的空腔,  $v_c/v_f=5.9$ ;
- 3) Case 3: 有再生区,  $v_c/v_f=12.8$  ( $N_c/N_{U235}=4663$ )。

在这里仅给出针对 Case 1 实验数据进行校核的结果, 另外两种情况可参考文献——Annals of Nuclear Energy, 2019, 133:707-717。

图 8 和图 9 分别给出了 Case 1 的径向和轴向中子通量分布。通量的计算  $1\sigma$  的不确定性(MCNP5 统计不确定性)在活性区低于 2%, 而在反射层该不确定性在 2%~7% 的范围。实验中, 测量系统不确定度(约 2.6%)、计数统计不确定度(3%以下)和铝箔质量校正因子不确定度(1%~1.5%)是不确定度的重要组成部分。其中, 测量系统的不确定度主要由定标的不确定度和探测器分辨率的不确定度组成, 统计不确定度涉及到功率归一化带来的不确定度。此外, 在测量数据与计算结果的比较中, 还考虑了更多的不确定因素, 如建模的不确定性和测量装置的位置。

汇总的  $1\sigma$  不确定性在活性区在 3%~5% 之间, 在反射层为 4%~8%。相对中子通量分布结果表明, 测量值与计算值吻合较好, 各库直接计算结果吻合较好。

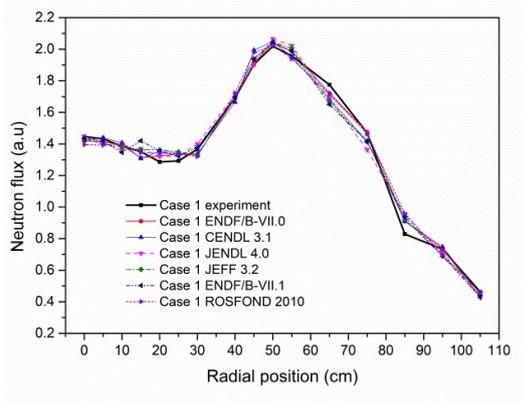


图 8 Case 1 径向中子通量校核结果

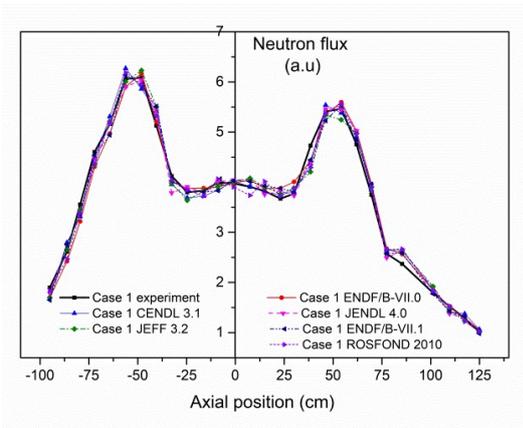


图 9 Case 1 轴向中子通量校核结果

### 钚铀转换比测量实验结果校核

根转换比定义为:

$$\begin{aligned}
 CR &= \frac{\text{钚}^{233}\text{的产生率}}{\text{钚}^{235}\text{的消耗率}} = \frac{\text{钚}^{232}\text{的辐射俘获}}{\text{钚}^{235}\text{裂变} + \text{钚}^{235}\text{俘获}} \\
 &= \frac{\text{钚}^{232}\text{俘获}}{\text{钚}^{235}\text{裂变}} \cdot \frac{\text{钚}^{235}\text{裂变}}{\text{钚}^{235}\text{裂变} + \text{钚}^{235}\text{俘获}} \\
 &= \frac{\text{钚}^{232}\text{俘获}}{\text{钚}^{235}\text{裂变}} \cdot \frac{1}{1 + \alpha(235)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

图 10 是实验测定和计算(使用 ENDF/B-VII.0)  $^{235}\text{U}$  俘获-裂变比的径向分布的比较, 该分布是在堆芯中心平面测量和计算的。未测量该比值的轴向分布, 各层均采用中心平面的结果。结果表明: $^{235}\text{U}$  俘获裂变比随半径的增大略有减小, 其平均值约为 0.227。这

个比率的计算平均值是 0.226。计算结果与实验数据的最大偏差为-1.83%, 发生在半径为 38 cm 处, 该位置通量密度最大。该比值的综合不确定度在 1.9% ~ 2.6%之间, 其主要来源包括  $^{235}\text{U}$  箔质量修正系数的不确定度、测量系统的不确定度和计数计算的统计不确定度。

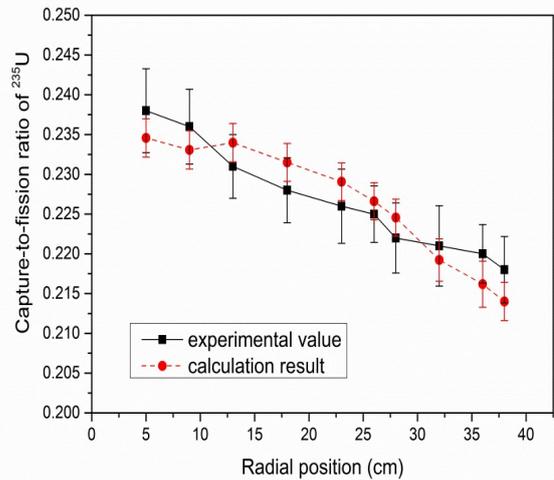


图 10  $^{235}\text{U}$  俘获-裂变比的径向分布的校核结果

将  $^{232}\text{Th}$  俘获率与  $^{235}\text{U}$  裂变率和俘获率之和进行相除, 实验得到的转化率为  $0.120 \pm 0.007$ , 计算值为  $0.118 \pm 0.003$ 。仿真结果与实验数据吻合(误差小于组合不确定度 0.008), 验证了模型和计算的正确性。

### 参考文献

- 1 Yafen Liu, Rui Yan, Yang Zou, Xuzhong Kang, Bo Zhou and Shihe Yu. Criticality Properties and Control Rod Worth of the Critical Experiment Device for MSR Research[J]. Nuclear Technology, 2018, (2):1-10
- 2 Yafen Liu, Rui Yan, Yang Zou, Xuzhong Kang, Bo Zhou and Shihe Yu. Neutron flux distribution and conversion ratio of Critical Experiment Device for molten salt reactor research[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 133: 707-717
- 3 L. SHI. Zero Power Experiment Device in Shanghai Institute of Nuclear Research[J]. Chin. J. Nucl. Sci. Eng., 1984, 2: 23
- 4 Yafen Liu, Rui Yan, Yang Zou, Shihe Yu, Bo Zhou, Xuzhong Kang, Jifeng Hu and Xiangzhou Cai. Sensitivity/uncertainty comparison and similarity analysis between TMSR-LF1 and MSR models[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 122: 103289-1:103289-11

## 2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆核设计

反应堆物理部，严睿 于世和 周波 杨璞 刘亚芬 朱贵凤 李明海 康旭忠 邹杨

2011 年中国科学院瞄准核能领域国家重大战略需求，启动了“未来先进核裂变能—TMSR 钍基熔盐堆核能系统”战略性先导科技专项，计划用 20 年时间，全面掌握钍基熔盐堆关键技术，实现商业应用。其第一步是进行 2 MW TMSR-LF1 液态燃料钍基熔盐实验堆建设，完成关键技术的系统集成与概念验证，为大型堆建设积累技术经验。按照工程进展 2021 年底达到临界，2022 年 3 月达到满功率。2020 年度本组根据堆总体要求，完成了施工图设计阶段的核设计工程任务，包括堆芯与反应性控制设计、燃料管理与首次临界方案设计、核测系统布局、燃料与衰变热分析、源项分析等，以及关键设备的物理监察、安分取证的技术支持等工作内容。

### TMSR-LF1 钍基熔盐实验堆的堆芯方案

反应堆进出口温度为 630°C/650°C。燃料为 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>，<sup>235</sup>U 富集度为 19.75%，<sup>7</sup>Li 丰度 ≥99.95at%。反应堆布局由内向外主要包括堆芯、熔盐-熔盐换热器及管道、主容器；由上向下主要包括上石墨层（其内含主泵泵坑及上部气空间）、上腔室、上支撑板、堆芯、下支撑板、下腔室、下石墨层。堆芯直径 2 304 mm，高 1 800 mm，位于上下支撑板之间，由打孔的石墨构件拼接构成，其中径向由中心 1 个六棱柱石墨构件和周边 12 个扇形石墨构件构成，轴向分 5 层。堆芯有 244 个燃料盐流道和 10 个 UNS N10003 合金通道，容纳控制棒和实验装置（图 1），其设计参数见表 1。

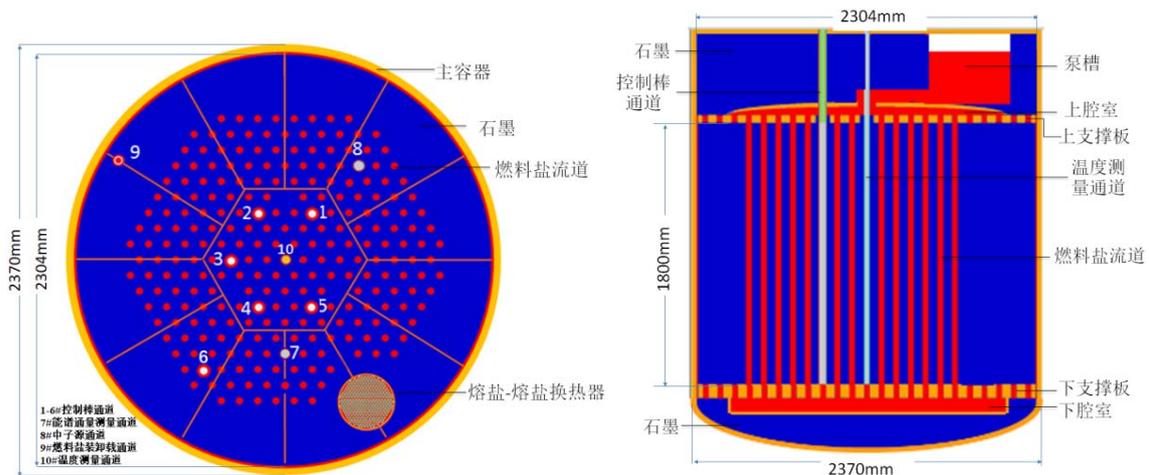


图 1 TMSR-LF1 堆芯方案

表 1 核设计参数

参数	值
反应堆热功率	2 MW
设计寿命	10 年
满功率运行天数	300 天
燃料	LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub>
<sup>7</sup> Li 丰度	≥99.95at%
<sup>235</sup> U 富集度	19.75wt%
堆芯进/出口温度	630°C/650°C
反应性控制	控制棒

### 反应性控制

采用 2 套共 6 根控制棒进行反应性控制，棒体为 B<sub>4</sub>C 毒物，有刚性整体式和柔性分段式两种，吸收体长度 1 800 mm，有效行程 1 800 mm。

控制棒（图 2）分组：TMSR-LF1 堆芯采用 6 根控制棒（1#、2#、3#、4#、5#、6#）进行反应性控制，设置为 2 套停堆系统。第一停堆系统包含 4 根控制棒，同时兼具正常运行时的反应性控制功能，包括功率调节、温度补偿、氙毒效应补偿、燃耗补偿、缓发中子流动效应、运行后备、以及实验样品等所引起的反应性变化的补偿；其中 3#、5#为补偿棒，主要功能为温度补偿，缓发中子流动效应补偿，

功率反应性补偿，长时间的燃耗补偿，运行后备补偿，及其他原因引起的反应性变化补偿，并执行停堆功能。6#为调节棒，用于功率调节补偿（温度+平衡氙毒）、短时间内的燃耗补偿、运行扰动补偿，并执行停堆功能。1#为安全棒，执行停堆功能；第二停堆系统包含 2 根控制棒，即 2#、4#安全停堆棒，执行停堆功能。第一停堆系统的控制棒为刚性整体式，第二停堆系统的控制棒为柔性分段式。所有控制棒独立运动，任何一根控制棒的动作不受其他棒的影响。

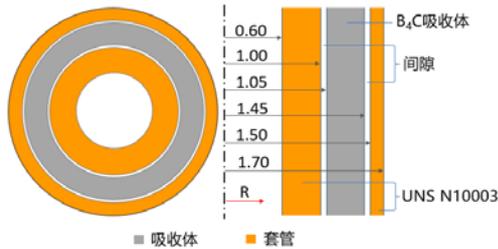


图2 控制棒结构

抽插棒程序：首先提升 2 根安全棒 2#、4#至上限位，提升安全棒 1#至上限位（在反应堆非停堆的各个状态，3 根安全棒均一直处于上位）。交替提升 3#、5#补偿棒至规定棒位。临界的过程为缓慢提升 6#调节棒至规定位置处（900mm），根据中子探测数据判断反应堆状态：（1）6#调节棒提升过程中反应堆达到临界；（2）6#调节棒提升至规定位置反应堆未临界，继续提升调节棒达到临界。升降功率的过程为通过提升/降低调节棒棒位，逐步提升/降低反应堆功率至目标功率。若提升/降低调节棒棒位过程中调节棒达到上/下限位，则通过手动提升/降低两根补偿棒中低位/高位补偿棒，同步降低/提升调节棒至规定位置。

停堆落棒程序：正常工况下，通过手动下插 6#调节棒将功率至零功率水平，然后将 6#调节棒和 3#、5#补偿棒完全插入至下限位，1#停堆棒完全插入下限位。事故工况下，两套停堆系统同时下落。核设计第一、二停堆系统可实现的停堆深度均大于 1 000 pcm，表 2-表 4 为两套停堆系统的价值及停堆深度。

表 2 第一停堆系统控制棒总价值

燃耗时刻 (EFPD)	控制棒总价值(pcm)	
	热态满功率	冷态零功率
0.0	6459	6174
2.0	6468	6180
60.0	6447	6190
120.0	6477	6198
180.0	6463	6197
240.0	6476	6194
300.0	6459	6210

表 3 堆芯寿期初第一停堆系统控制棒组价值

棒组	棒组价值(pcm)	
	热态满功率	冷态零功率
补偿棒(3#+5#)	3486	3317
安全棒 (1#)	2203	2213
补偿棒 (3#)	1917	1854
补偿棒 (5#)	1496	1481
调节棒 (6#)	441	416

表 4 插入第二停堆系统时的堆芯 keff（冷态无氙）

燃耗(EFPD)	堆芯 $k_{eff}$
0.0	0.97757 (0.00011)
2.0	0.97942 (0.00011)
60.0	0.97994 (0.00012)
120.0	0.97962 (0.00011)
180.0	0.97944 (0.00011)
240.0	0.97931 (0.00012)
300.0	0.97946 (0.00011)

## 核测系统

TMSR-LF1 启动中子源位置见图 3。反应堆启动中子源拟采用 Am-Be 源，其半衰期大于 400 年，中子源源强为  $3.8E+07$  n/s。

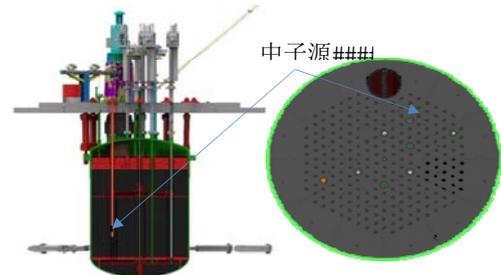


图 3 启动中子源放置位置

核测系统探测器主要用于反应堆周期保护、功率监测、功率控制和保护，分成两个量程来测量，其中包括 2 个源量程探测器和 2 个宽量程探测器。源量程探测器位置如图 4a 所示，以堆芯中心为原点，1#与中子源位置成  $152^\circ$ ，2#与中子源位置成  $165^\circ$ ，1#和 2#探测器相互成  $43^\circ$ 。1#轴向位置位于堆芯中心平面以下 600 mm。2#探测器轴向位置为堆芯中心平面。源量程探测器径向位置位于蛇纹石混凝土内紧贴混凝土内壁，探测器中心距离堆芯中心 3 325 mm。宽量程探测器位置如图 4b 所示，3#、4#为宽量程探测器，以堆芯中心为原点，3#探测器与中子源位置成  $110^\circ$ ，4#和 3#探测器位置成  $120^\circ$  夹角，两个探测器轴向位置都位于堆芯中心平面。宽量程探测器径向位置位于蛇纹石混凝土内，探测器中心距离堆芯中心 3 380 mm。

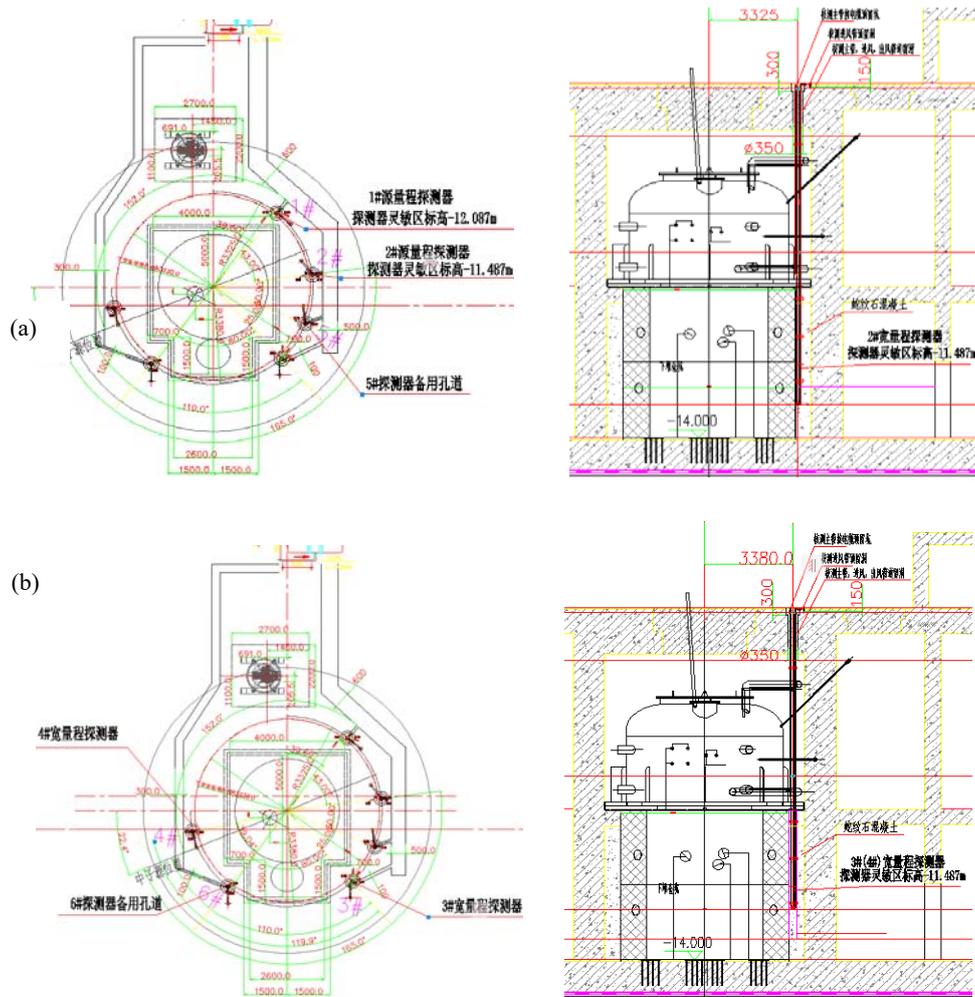


图4 核测系统布局, (a)源量程探测器布局, (b)宽量程探测器布局

### 燃料管理与首次临界

实验堆的熔盐有三种：

基盐：LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>(65.0%-30.0%-5.0mol%)；

添加盐：LiF-UF<sub>4</sub>(72%-28mol%)；

燃料盐：LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>。

其中，基盐和添加盐为装料实验前准备的原料盐，添加盐与基盐混匀后形成实验堆运行所需的燃料盐。燃料盐在反应堆实验过程中依据测量结果逐

步配置，即添加盐需分多次加入，通过调节燃料盐中铀浓度的方式达到临界和功率运行所需的燃料盐配比。TMSR-LF1 燃料管理策略为，满足等效满功率运行 300 天的设计目标，在首次临界试验和零功率试验阶段多次装料，直至价值最大的控制棒完成刻度，在后续运行阶段不再加料，运行结束后整体卸料。理论计算，完成所有加料后，燃料盐配比为 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>(65.29%-28.73%-4.79%-1.19%)， $k_{eff}$  约为 1.02。表 5 为初装堆时的燃料参数。

表 5 初装堆燃料参数

温度/°C	燃料盐成分	全提棒 $k_{eff}$
550	LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> 65.27%-28.83%-4.81%-1.09%	1.00029 (0.00012)*
550	LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> 65.29%-28.73%-4.79%-1.19%	1.02290 (0.00011)
650	LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> 65.29%-28.73%-4.79%-1.19%	1.01269 (0.00011)

\*注：(0.00012) \*表示蒙卡程序计算的统计误差

TMSR-LF1 设立了添加盐储罐、基盐储罐、燃料盐排放罐分别用于存储添加盐、基盐和燃料盐。各储罐分别配备气路和测量设备，与熔盐管路和隔离阀共同组成燃料装卸系统，图 5 为装卸料流程示意图。燃料装卸则分为添加盐加载、燃料盐混匀、燃料盐装载、燃料盐卸载等四类操作。

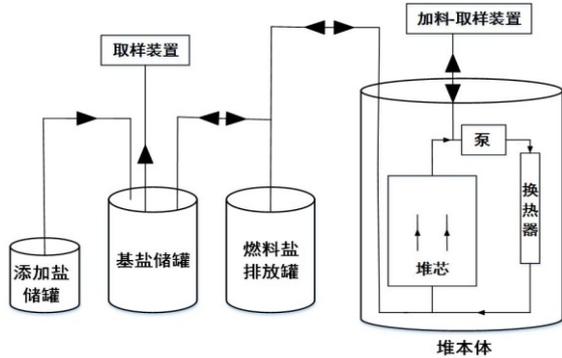


图 5 装卸料流程示意图

#### a) 添加盐加载

分为气压加载和胶囊加载两种方式。气压加载方式用于首次临界试验中的  $k_{eff} < 0.996$  次临界外推阶段的大量加料，可将添加盐从添加盐储罐定量地把液态添加盐转入基盐储罐内。胶囊加载用于首次临界试验中的临界过渡阶段 ( $k_{eff} \geq 0.996$ ) 和零功率实验阶段的小量加料，直接通过胶囊取样加料装置将固态添加盐加入堆内。

#### b) 燃料盐混匀

次临界外推阶段，燃料盐的混匀在堆容器外执行，在基盐储罐和燃料盐排放罐之间执行多次气压倒料，直至形成稳定的均相燃料盐。临界过渡和零功率实验阶段，燃料盐的混匀在堆容器内完成，由燃料盐在主容器内长时间的流动过程中逐步完成。

#### c) 燃料盐装载

燃料盐混匀完成后，将其转入燃料盐排放罐内。燃料盐装载过程中，主泵不运转。通过控制燃料盐排放罐和堆容器的压差，可将燃料盐以一定的速度装载至堆容器内。每批次装料结束后，进行该批次装量后的反应性测量，据此制定下一批次的装料量。

#### d) 燃料盐卸载

待反应堆停堆，燃料盐温度降低至  $550^{\circ}\text{C}$ ，衰变热低于  $4\text{kW}$ ，通过控制燃料盐排放罐和反应堆容器内的压差，可将燃料盐卸载至排放罐内存储。

## 反应性系数与固有安全性

燃料温度系数定义：为在其他条件不变的情况下，燃料盐温度每升高（或降低） $1^{\circ}\text{C}$ 所引起的堆芯反应性变化。功率反应性系数定义：单位功率变化所引起的反应性变化。TMSR-LF1 全寿期，堆芯温度反应性系数和功率反应性系数均为负值，体现了反应堆的固有安全性，见图 6。

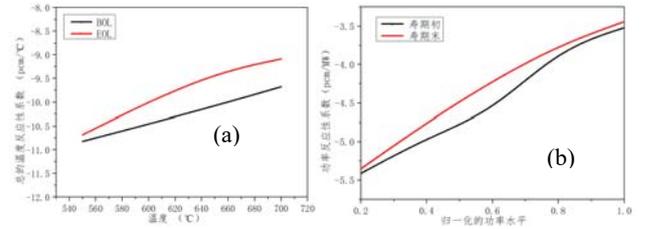


图 6 反应性系数, (a) 温度反应性系数, (b) 功率反应性系数

## 中子学参数

TMSR-LF1 寿期初不同区域（堆芯、石墨、燃料盐）的中子能谱见图 7a，能谱为典型的热中子谱。反应堆满功率运行 300d 各合金孔道的快中子注量见图 7b。TMSR-LF1 堆芯的中子通量密度分布（径向、轴向）见图 7c 和图 7d。

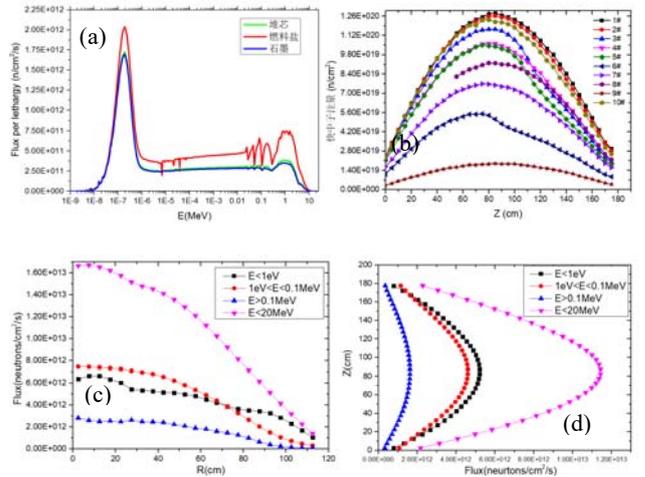


图 7 反应堆中子能谱与通量密度分布, (a) 各区域中子能谱, (b) 孔道轴向快中子注量, (c) 径向中子通量密度分布, (d) 轴向中子通量密度分布

## 参考文献

- 1 《2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆堆芯核设计报告》TMSR-LF1-SINAP-30-NDES-DS-0003-C 2020 年
- 2 《2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆最终安全分析报告》第五章 TMSR-LF1-SINAP-02-CENT-PA-1001-C 2021 年

# 超高温熔盐储能和固体填充床储能技术研究进展

反应堆物理部，袁晓凤 李启明 杨洋 贾国斌 戴叶

我国二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，力争 2060 年前实现碳中和。从目前能源结构来看是一个巨大的挑战，高比例的可再生能源接入对电网会产生严重的冲击。因此，作为推动可再生能源入网的关键技术，储能的发展已成为实现碳中和目标日益迫切的需求。

储热技术是新型储能技术中重要的组成部分，我们开展了超高温熔盐储能和固体填充床储能技术的研发。超高温熔盐储能技术，完成了超高温熔盐储能技术原型样机热工设计和系统部分联调，完成了示范装置系统和关键设备方案设计、初步设计阶段的热工设计与分析。固体填充床储能技术，建成了填充床固体储能技术原型样机，完成了嘉定园区实验装置（内置加热器）物理设计和验证实验、武威园区供暖装置（外置加热器）物理方案和初步设计。积极推进填充床固体储能技术示范应用，完成山西工业园区供蒸汽装置可行性研究报告。

## 超高温熔盐储能技术研究进展

2016 年 12 月，国家发改委发文《可再生能源发展“十三五”规划》，推动储能技术示范应用，提出配合国家能源战略行动计划。2017 年 10 月，国家发改委等五部委联合发文《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》，试验示范一批包括大容量新型熔盐储热装置在内的具有产业化潜力的储能技术和装备。

采用熔盐为蓄热介质的熔盐蓄热储能电站，占地面积小，不受地理条件限制。超高温熔盐蓄热储能电站，使用沸点温度 1000°C 以上且高温热稳定性好的氯盐作为传蓄热介质，实现 700°C 以上的高品质热输出，可以匹配更高效的热力循环发电机组，如超超临界蒸汽朗肯循环发电机组、超临界二氧化碳布雷顿循环发电机组、氦气布雷顿循环发电机组等，从而提升储能电站发电效率。

超高温熔盐蓄热储能技术与示范，该项目是由中国科学院 A 类战略性先导科技专项--变革性洁净能源关键技术与示范支持。超高温熔盐储能技术原型样机用于解决采用超高温熔盐储能带来的独特技术问题和挑战，系统配置示意图如图 1 所示，总体参数见表 1。沿用目前商用技术相对成熟的双罐储热技术。目前，已经完成实验装置热工设计和建造，系统部分联调包括除水除氧、预热升温、熔盐转运，如图 2 所示。

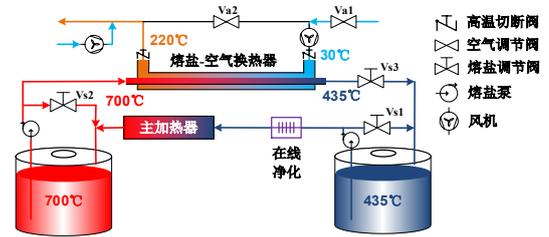


图 1 超高温熔盐储能实验装置系统配置示意图

表 1 超高温熔盐储能实验装置总体参数

名称	值
工作温度	435/700°C
蓄热容量	100kWh
蓄热效率	95%
换热器功率	20kW
主加热器功率	40kW
传蓄热熔盐	氯盐
设计寿命	5 年

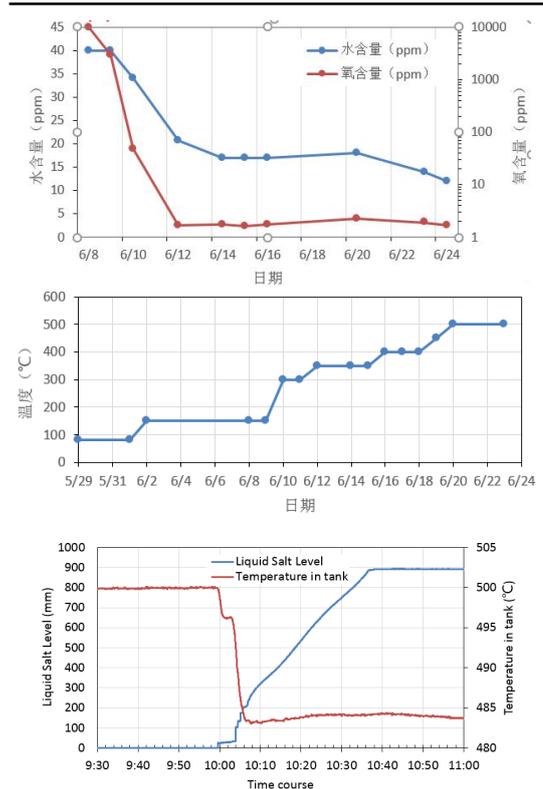


图 2 超高温熔盐储能实验装置系统联调，(a)水含量和氧含量监测，(b)预热升温曲线图，(c)低温罐注盐液位和温度监测

熔盐储能示范装置前期方案匹配氦气轮机发电。考虑氦气轮机研发进度，因此开展了备用蒸汽轮机发电方案的设计，熔盐储能示范装置匹配蒸汽轮机总体参数如表 2 所示，方案示意图如图 3 所示。

表 2 熔盐储能示范装置总体参数

名称	值
净蓄热容量 (MWh)	100
熔盐换热器额定功率 (MW)	10
熔盐电加热器额定功率 (MW)	10
低温罐/高温罐工作温度 (°C)	435/700
传/蓄热介质	氯盐
发电机组类型	蒸汽朗肯循环发电机组
发电机组装机容量 (MWe)	2.581
寿命 (年)	25

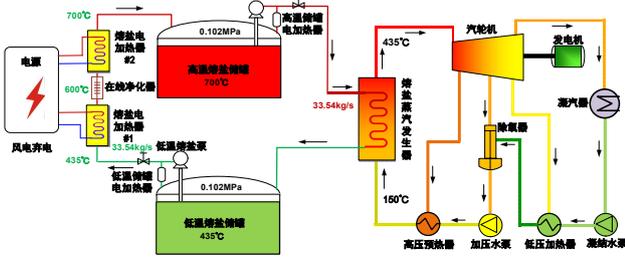


图 3 100MWh 超高温熔盐储能示范装置 (匹配蒸汽轮机)

熔盐加热系统额定功率 10 MW，由两个加热器组成。低温段加热器功率 6 MW，进口熔盐温度 435°C，出口熔盐温度 600°C。高温段加热器功率 4 MW，进口熔盐温度 600°C，出口熔盐温度 700°C。熔盐电加热器的电热管布置如图 4 所示。该结构下加热器的传热与流动的模拟分析如图 5 所示，6MW 和 4MW 加热管壁最高温度为 667°C 和 742°C，满足材料温度限值要求。

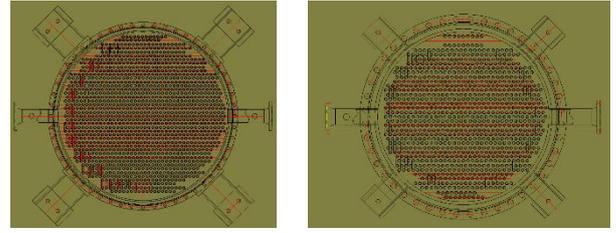


图 4 6MW 和 4MW 加热器电热管布置

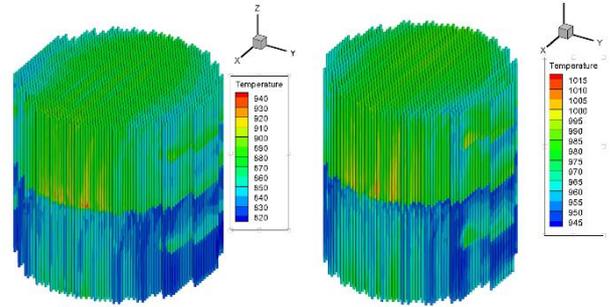


图 5 6MW 和 4MW 加热器加热管壁温度 (单位为 K)

根据示范装置熔盐蒸汽发生器的设计要求和特点，包括压力、工作温度、介质等，调研了适用于储能示范装置的换热器，采用一体式发夹结构。熔盐蒸发器额定功率 10 MW，结构如图 6 所示，包括预热、蒸发和过热三段。水蒸汽总压降 28 kPa，熔盐总压降 100 kPa。熔盐走壳侧，水/水蒸气走管侧。通过换热器外面的保温和伴热防止熔盐局部凝固和启动的预热。

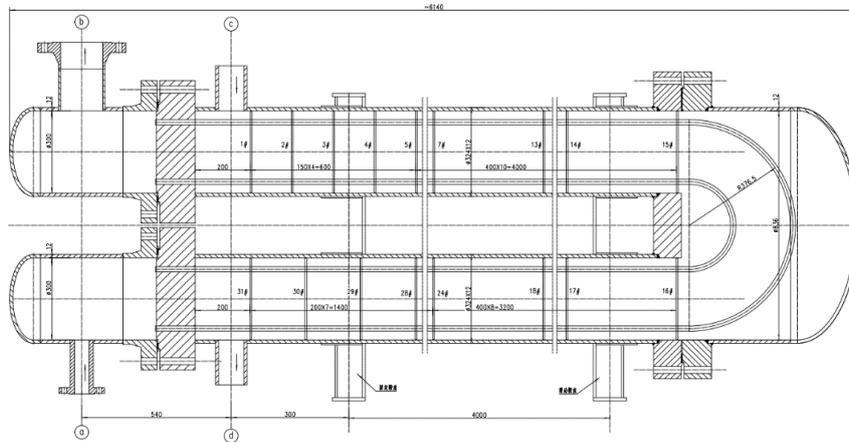


图 6 熔盐蒸汽发生器的结构图

熔盐储罐保温和基础隔热的优化结构参数见表 3。额定工况下，熔盐储罐保温和基础隔热的温度分布图如图 7 所示。

熔盐储罐预热采用热气体加热外罐壁和外置储罐加热器联合预热方案，如图 8 所示。高温罐侧壁和罐底热源功率为 372 kW 和 257 kW。低温罐侧壁和罐底热源功率为 213 kW 和 106 kW。熔盐储罐补热加热器采用外置储罐电加热器通过外部循环加热，非储罐底部开口安装方式。熔盐储罐电加热器采用电阻式电加热器，高温罐和低温罐加热器功

率为 160 kW 和 80 kW。

表 3 熔盐储罐保温和基础隔热的优化结构参数

材料名称	高温储罐	低温储罐
	厚度/直径 (m)	
保温层: 硅酸铝纤维	0.75	0.75
隔热材料 1: 重质耐火浇注料	0.15/14.04	0.15/13.648
隔热材料 2: 超轻质耐火砖	1/14.04	0.2/13.648
隔热材料 3: 重质耐火浇注料	0.15/14.04	0.15/13.648
隔热材料 4: 硅酸铝纤维	0.5/14.04	0.5/13.648
隔热层 1 至 3 侧壁: 硅酸铝纤维	0.17	0.07

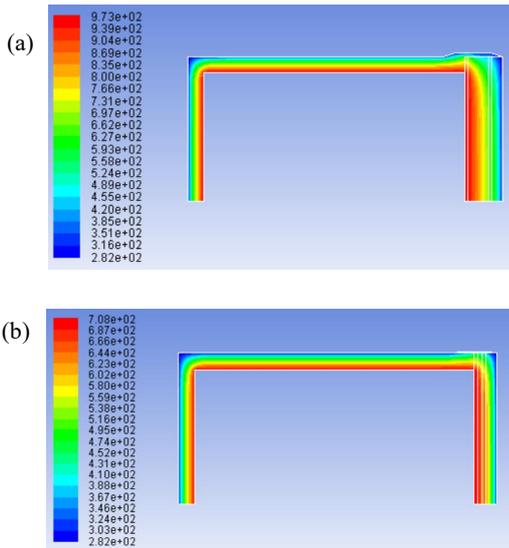


图7 额定工况下, 熔盐储罐保温和基础隔热的温度分布图, (a)高温熔盐储罐, (b)低温熔盐储罐

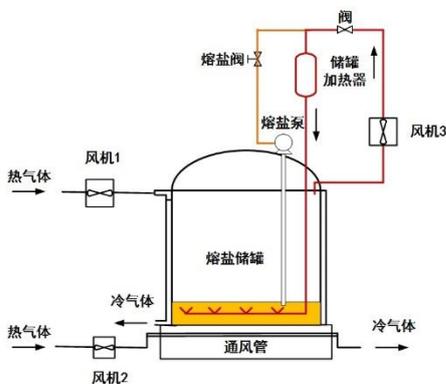


图8 储罐预热方案示意图

### 固体填充床储能技术研究进展

综合考虑储能材料的体积蓄热量、工作温度范围、与容器材料的相容性, 化学稳定性和成本, 固体蓄热材料综合性能较优。采用岩石作为蓄热介质的填充床蓄热, 目前都处于研究阶段。MIT 开展耦合核反应堆从而获得可变电力和热量的 GW 级低成本的碎石储热装置研究。西门子固体蓄热发电项目, 2017 年建成 5 MWh 实验装置, 2019 年建成 130MWh 示范装置。苏黎世联邦理工学院 (ETH

Zurich) 开展热能储存系统研究, 主要用于 CSP 蓄热。德国航空航天中心 (DLR) 开展 CellFlux 蓄热研究。采用卧式结构, 可减少泵功率和支撑结构, 从而可以降低成本。丹麦技术大学能源转换和储存系 (DTU) 能源转换和储存部搭建实验装置 “shoobox” 并开展实验研究。

开展填充床固体蓄热实验研究, 设计了净蓄热容量 700 kWh 填充床固体蓄热实验装置。嘉定园区固体蓄热实验装置方案示意图如图 9 所示, 电加热器采用电加热丝直接布置在填充床内方案, 可保证蓄热均匀, 且可省去蓄热管路及设备。调研并确定了蓄热材料, 蓄热器采用卧式结构, 减少支撑材料, 节约成本。换热器采用 U 型盘管翅片型式换热器, 其气体侧压降较小, 能直接采用目前市场上现有的风机。建成的实验装置如图 10 所示。

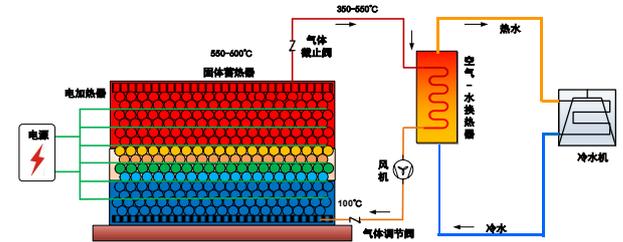


图9 嘉定园区固体蓄热实验装置方案示意图



图10 嘉定园区固体储能实验装置图片

同时开展了验证实验, 入口温度、出口温度、进风流量以及释热功率随时间变化如图 11 所示。释热量达到 700 kWh, 即释热功率 50 kW, 释热时间 14 小时, 满足总体设计指标。

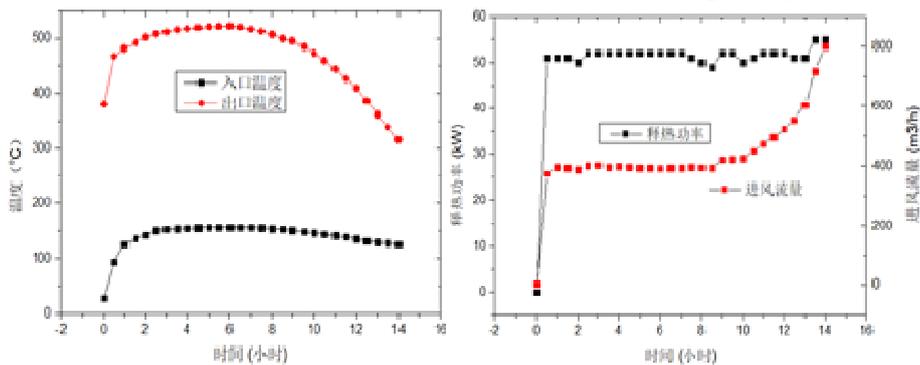


图11 嘉定园区固体蓄热实验装置的释热验证实验

根据武威园区试剂仓库、消防水泵房、净水站三个建筑总的供暖负荷及时间、峰谷电价及时段的要求，采用净蓄热容量 1.4 MWh 蓄热装置。其中气体电加热器采用外置式。固体蓄热器采用立式，圆柱体结构，方案示意图如图 12 所示。该项目由本所的产业基金项目支持。建成的武威园区固体蓄热供暖装置如图 13 所示。

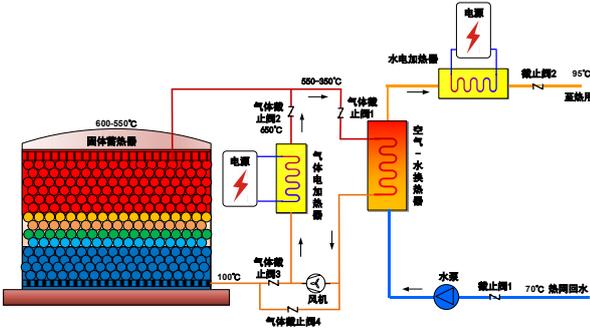


图 12 武威园区供暖装置方案示意图



图 13 武威园区固体储能供暖装置

武威园区固体储能供暖装置的准稳态后蓄热/释热过程填充床温度分布随时间变化如图 14 所示。由图中可知，该结构下蓄热 10 小时，能满足释热功率 100 kW，释热时间 14 小时要求。为了提高蓄热容量因子，降低了释热气体出口截止温度。为了保证换热器功率恒定，风机要求变频变流量运行。通过换热器变流量运行工况分析，换热器出口气体温度随着流量的增大而升高，但与额定工况的温度差不超过 10°C，对换热器稳定性影响很小。

固体蓄热器采用圆柱体结构，直径 3 m，总高 4.23 m。由下到上依次为底部气腔、底部均流层、蓄热体、顶部均流层、顶部气腔。蓄热工况下蓄热体入口流量最大偏差约-14.5%，蓄热体出口流量最大偏差约-3.3%。释热工况下蓄热体入口流量最大偏差约-10.9%，蓄热体出口流量最大偏差约 8.0%。该结构下的固体蓄热器流量分配较好。

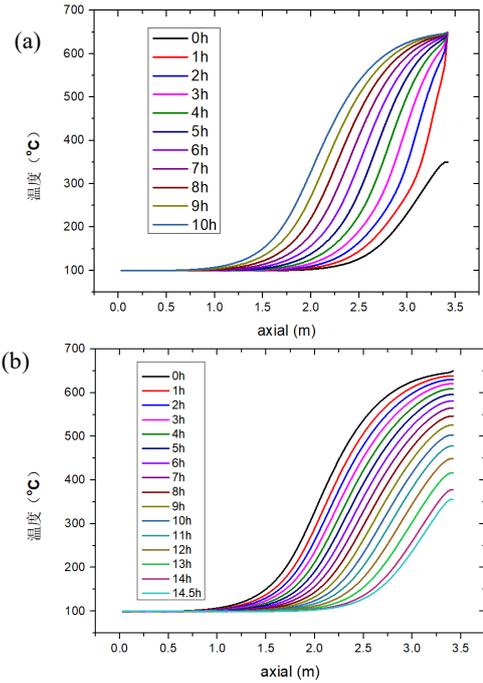


图 14 准稳态后(a)蓄热和(b)释热过程填充床温度分布随时间变化图

## 结语

储能一直是可再生能源发电领域的关键问题，是实现风电、光电和谐入网，发挥调峰优势的重要途径。因此，开展超高温熔盐储能和固体填充床储能技术的研发具有明显的现实意义。目前，两种新型储能技术都完成了原型样机的热工设计、建造、部分调试和实验。其中，超高温熔盐储能原型样机完成了系统部分联调，固体填充床储能原型样机完成了嘉定园区实验装置（内置加热器）验证实验。此外，超高温熔盐储能示范装置完成了系统和关键设备方案设计、初步设计阶段的热工设计与分析。固体填充床储能示范装置完成了山西工业园区供蒸汽装置可行性研究报告。后续继续开展原型样机的调试和实验，积极推进示范应用。

## 参考文献

- 1 国家发展改革委.《可再生能源发展“十三五”规划》，2016.12
- 2 国家发展改革委，国家能源局.《能源技术革命创新行动计划(2016-2030年)》，2016.3
- 3 Zhou Zhibin, *et al.* A review of energy storage technologies for marine current energy systems. *Renew Sust Eng Rev*, 2013, **18**: 390-400.
- 4 Hessami M, Bowly D R. Economic feasibility and optimisation of an energy storage system for Portland Wind Farm (Victoria, Australia). *Appl Energy*, 2011, **88**: 2755-2763.
- 5 R. Serrano-López, J. Fradera, S. Cuesta-López. Molten salts database for energy applications. *Chemical Engineering and Processing*, 2013, **73**: 87-102
- 6 杨世铭，陶文铨，传热学，高等教育出版社，1998

- 7 周俊杰, 徐国权, 张华俊. FLUENT 工程技术与实例分析. 中国水利水电出版社, 2010
- 8 温正, 石良辰, 任毅如. FLUENT 流体计算应用教程. 清华大学出版社, 2009
- 9 Charles Forsberg , Ali S. Aljefri ,100-Gigawatt-Hour Crushed-Rock Heat Storage for CSP and Nuclear, Solar Paces, 2020
- 10 Charles Forsberg, Multi-Gigawatt-Day Low-Cost Crushed-Rock Heat Storage Coupled to Nuclear Reactors for Variable Electricity and Heat, Transactions of the American Nuclear Society Summer Meeting, Paper: 32009, 2020
- 11 Siemens Gamesa renewable energy , Electric Thermal Energy Storage (ETES), 2017
- 12 G. Zanganeh, A. Pedretti, S.A. Zavattoni,etc, Design of a 100 MWhth packed-bed thermal energy storage, Energy Procedia, 2014, **49**: 1071-1077
- 13 Simone A. Zavattoni, Giw Zanganeh, Andrea Pedretti , Numerical Analysis of the Packed Bed TES System Integrated into the First Parabolic Trough CSP Pilot-plant Using Air as Heat Transfer Fluid, SolarPACES, 2017
- 14 Christian Odenthal, Wolf-Dieter Steinmann, Markus Eck ,The CellFlux Storage Concept for Increased Flexibility in Sensible Heat Storage, 9<sup>th</sup> International Renewable Energy Storage Conference, IRES, 2015
- 15 Stefano Soprani, Fabrizio Marongiu, Ludvig Christensen, *etc.*,Design and testing of a horizontal rock bed for high temperature thermal energy storage , Applied Energy, 2015, **251**: 113345

# 合金材料热中子散射研究

反应堆物理部, 胡继峰 王小鹤 余呈刚 郭子安 蔡翔舟 陈金根

在热能区, 中子能量与散射核运动能量和化学键结合能相当, 因此热中子散射不仅与慢化介质原子核有关, 还与物化性质密切相关, 此时用自由气体模型描述靶核不精确。同时, 此能区中子的波长与原子间距都在埃量级, 中子与固态晶体发生反应时将产生干涉效应。热中子与材料发生散射反应时, 有可能引起材料激发而失去能量, 也可能引起材料退激而获得能量, 称为热散射效应。热散射效应会影响反应堆有效增殖因子、反应性系数、中子能谱及中子空间分布等, 对中子学计算和安全设计存在影响。由于目前熔盐堆结构材料合金及部分组成金属在主要的 ENDF 库中缺乏热散射律文件, 因此有必要开展理论计算热散射截面的研究。利用热散射理论生成相关材料热散射律文件, 填补数据空白, 并可用于反应堆设计计算。同时基于 TMSR 白光中子源开展结构材料的全截面测量, 用于校验理论计算结果。

核数据是核工程输运过程模拟计算的最基本数据, 直接关系到核工程的可靠性、安全性和经济性<sup>[1]</sup>。2011 年日本福岛事故发生后, 第四代核能系统对核数据精确性和可靠性提出了更高要求: 核数据导致的有效增殖系数  $k_{\text{eff}}$  不确定度小于 0.5%, 温度反应性系数和空泡系数的不确定度小于 10%<sup>[2]</sup>。在热堆设计中, 大量的材料可将裂变中子快速慢化到热中子, 提高燃料的利用率。在慢化过程中中子散射数据起主要作用, 所以获得高精度、宽温度覆盖 (50K~1400K) 的材料热中子散射数据对第四代核能系统的研发与示范许可至关重要, 同时也可为现有轻水堆许可证的延期申请提供重要数据支撑<sup>[3]</sup>。石墨、轻水、重水等作为传统的反应堆慢化材料, 其热中子散射的实验和理论研究相对成熟, 而在第四代核能系统中, 如熔盐堆的氟锂铍 (FLiBe)、氟钠铍 (FNaBe)、支撑材料镍基合金等, 作为新型材料, 其成分、结构形态和动力学特性复杂, 理论研究成果和实验数据分歧大。因此, 需要开展镍基合金相关的热中子散射机理研究, 发展适用于不同形态和宽温度范围的熔盐热中子散射计算模型, 建立高精度的热中子散射数据库, 为满足熔盐堆物理设计的高可靠性和经济性奠定数据基础。

## 热散射截面理论计算

根据热中子散射理论, 双微分散射截面的计算需要采用费米黄金定则确定从某初始态散射到某末

态的中子数。将费米势引入跃迁矩阵元用以描述中子与原子之间的作用势。中间函数经过无量纲化后称为热散射律, 存储在 ENDF 数据库的 File7 中, 包含非弹性, 相干弹性和非相干弹性热散射律数据。目前选择的核数据处理软件为 NJOY<sup>[4]</sup>, 为简化计算该程序引入非相干近似, 高斯近似和立方晶体近似。

热散射律文件的生成需要输入材料的声子态密度, 通常采用晶格动力学分析晶格振动规律。计算力常数的方法主要有两种: 密度泛函微扰理论 (DFPT 或称线性响应方法) 和有限位移法。其中前者的计算速度快且更为精确。

本工作理论计算天然铁和天然镍的热中子散射截面。首先采用 Materials studio 的 CASTEP 模块<sup>[5]</sup> 计算声子态密度, 结果如图 1。图中的曲线之间无相对关系, 只描述两种材料各自的声子态密度规律, 最终在程序计算中会自动归一化。再利用 NJOY 程序中的 LEAPR 模块分别生成热散射律文件, 其中需要的输入常数, 束缚态的相干及非相干散射截面见表 1, 数据来源于 NIST<sup>[6]</sup>, 表中分别为束缚态相干和非相干散射截面, 总散射截面和吸收截面。

采用 NJOY 中的 MODER, RECONR, BROADR, THERMR 和 ACE 模块可将热散射律文件加工成为需要温度点的 ACE 格式截面, 供蒙特卡洛程序调用进行计算。天然铁和天然镍理论热散射截面结果如图 2。由于天然镍相干截面和非相干截面束缚态截面相近, 只保留其中一种将导致较大偏差。因此计算时分别计算了相干截面和非相干截面。图中空心圆标表示天然铁的截面, 空心三角代表天然镍的截面。

对于铁、镍等材料, 其晶粒取向是随机分布的, 相干弹性散射截面中的布拉格峰对应散射角等于  $90^\circ$  的情况, 即满足布拉格律  $n\lambda = 2d \sin \theta$  时,  $\lambda = 2d$ 。含有出射角度的微分相干弹性散射截面表达式如下:

$$\sigma_{\text{coh}}(E, \mu) = \frac{\sigma_c}{E} \sum_{E_i < E} f_i e^{-4W E_i} \delta(\mu - \mu_i)$$

式中的  $\sigma_c$  代表束缚核相干弹性散射截面,  $E$  代表入射中子能量,  $f_i$  代表结构因子以及常数系数的乘积, 指数部分的  $W$  代表德拜沃勒因子, 与晶体原子偏离平衡位置的均方有关,  $E_i$  代表第  $i$  个布拉格沿的能量,

式中的特征散射角余弦为  $\mu_i = 1 - \frac{2E_i}{E}$ , 当入射中

子束确定, 发生布拉格散射的晶面族确定后, 根据布拉格律, 散射中子的角度就是确定的。

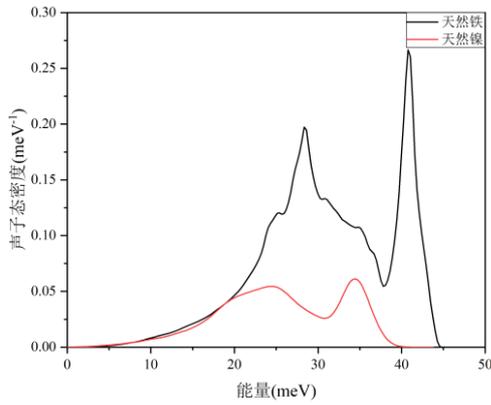


图1 天然铁和天然镍的声子态密度

表1 天然铁和天然镍束缚核散射参数

元素	$\sigma_c$	$\sigma_i$	$\sigma_s$	$\sigma_a$
Fe	11.22	0.40	11.62	2.56
Ni	13.3	5.2	18.5	4.49

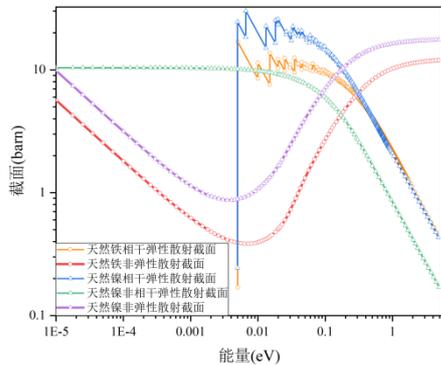


图2 293.15 K 天然铁和天然镍的热中子散射截面

### 基于 TMSR-PNS 的合金材料全截面测量

实验测量的全截面通常反映出射中子能量角度积分后的信息，可以获得相干弹性散射的布拉格峰，最直观地检验相关材料热中子散射理论数据正确性。同时，中子反应全截面是反应堆物理设计中中子的输运及扩散计算所必须的基础数据，其截面数据准确性关键到反应堆设计的中子学参数的可靠性，因此合金及相关材料的全截面实验对 TMSR 物理设计具有重要意义。

实验采用透射法，基于 TMSR-PNS 中子源对金属镍、铁和 GH-3535 合金样品进行了测量，得到了全截面实验数据。该截面包含散射截面和吸收截面。在热能区认为吸收截面是符合  $1/v$  律的规律变化的，基于 ENDF 评价数据库(如 ENDF/B-VIII.0)的吸收截面数据<sup>[7]</sup>，结合理论计算的热中子散射截面，得到理论计算的全截面。通过与实验测量的全截面对比，验证理论计算的正确性。

在室温下开展了直径为 60mm，厚度 8mm，纯度均为 99.9%的铁和镍样品的全截面测量。数据处理

时利用空靶计数将各测量靶的飞行时间谱归一化，根据刻度靶的银，铟，钴的特征峰位对能量和飞行时间关系进行刻度。利用刻度得到的飞行距离将飞行时间谱转化为能谱<sup>[8]</sup>，结合材料的面密度和透射率公式计算出截面值，实验结果如图 3 所示。从图中可看出，当低能中子满足 Bragg 散射条件时，中子发生衍射，与原子核发生散射概率增大，全截面迅速增大到某一个值。不满足 Bragg 散射条件时，截面值和能量呈现  $1/v$  规律变化，因此全截面出现了锯齿形结构。

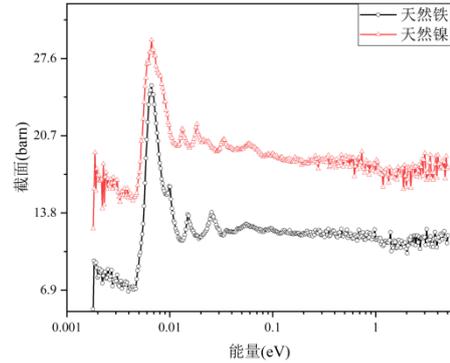


图3 室温下天然铁和天然镍全截面测量

由于材料的热中子散射数据与材料的结构有关，因此不能通过单质的镍和铁的热中子散射数据相加得到熔盐堆支撑材料 GH-3535 合金材料的热中子散射数据。同时，GH-3535 合金一直处于高温强辐照环境下工作，温度对热中子散射数据的影响也需要研究。因此基于 TMSR-PNS 中子源和自主研发的样品加热装置，初步开展了不同温度下 GH-3535 合金的全截面测量，测量结果如下图 4。

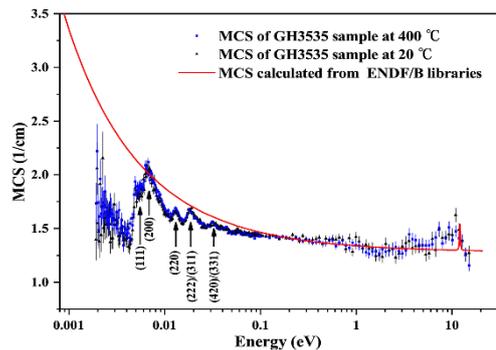


图4 高温 GH-3535 合金的全截面测量

从测量结果可以看出，温度对合金测量的热中子散射数据影响较小。结合 GH-3535 的原子结构，可明细看到热中子散射的布拉格峰结构。下一步将开展 GH-3535 复合材料的热中子散射理论数据研究，并与实验数据对比，建立高温合金材料的热中子散射数据库。

## 参考文献

- 1 葛智刚, 陈永静. 我国核数据发展现状与未来发展的思考[J]. 科学通报, 2015, **60**(32): 3087-3098
- 2 G. Aliberti, G. Palmiotti et al. Nuclear data sensitivity, uncertainty and target accuracy assessment for future nuclear systems [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2006, **33**(8)
- 3 C. Chapman, L. Leal, F. Rahnema, et al. Thermal neutron scattering evaluation framework. ND-2016
- 4 R. Macfarlane, D. W. Muir, R. M. Boicourt, A. C. Kahler, III, J. L. Conlin, The njoy nuclear data processing system, version 2016 (2017)
- 5 S. J. Clark, M. D. Segall, C. J. Pickard, P. J. Hasnip, M. I. J. Probert, K. Refson, M. C. Payne, First principles methods using castep, *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, 2005, **220**: 567-570
- 6 V. F. Sears, Neutron scattering lengths and cross sections, *Neutron News*3, 1992: 26-37
- 7 D. A. Brown, M. B. Chadwick, R. Capote, A. C. Kahler, A. Trkov, M. W. Herman, A. A. Sonzogni, Y. Danon, A. D. Carlson, M. Dunn, Endf/b-viii.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with cielo-project cross sections, new standards and thermal scattering data, *Nuclear Data Sheets*, 2018, **148**: 1-142
- 8 O. Aizawa, T. Matsumoto, H. Kadotani, Total neutron cross sections of magnesium, aluminum, silicon, zirconium, niobium and molybdenum in energy range from 0.001 to 0.3 eV, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1983, **20**: 713-721

# 液态燃料钍基熔盐堆的钍铀循环方案

反应堆物理部, 李晓晓 伍建辉 邹春燕 余呈刚 马玉雯 周俊 蔡翔舟 陈金根

钍和熔盐堆结合, 能够提供安全高效、长期稳定供给的洁净能源, 是助推我国能源独立战略的一个极具可行的解决方案。为此, 中国科学院开展了钍基熔盐堆 (TMSR) 核能系统项目。在小型模块化熔盐堆 (简称“小模熔盐堆”) 的研发过程中, 针对钍利用问题, 在充分考虑了燃料盐干法处理技术的研发进度及成熟度的前提下, 创新性地提出了“三步走”战略的燃料循环方案, 以稳步提高钍利用性能: 第一步通过在线吹气实现钍的初步利用 (钍能量贡献~20%), 同时将乏燃料进行暂存, 待后处理技术成熟后再进行处理, 以降低部署难度; 第二步通过乏燃料批处理 (批次回收铀、钍和载体盐) 实现钍能量贡献翻番 (~40%); 第三步通过在线处理 (主要是在线去除裂变产物, 同时批次回收铀、钍和载体盐) 实现钍的高效利用 (钍能量贡献~80%)。同时, 基于多目标、多准则的评估方法, 对小模熔盐堆的经济性、可持续性、安全性和防核扩散性等性能进行了综合评估。评估结果表明: 小模熔盐堆具有较强的综合竞争力, 其竞争力随着“三步走”钍利用方案的推进而逐步提高, 并且其满足四代核能系统的部署标准。此外, 通过对不同堆型 (小模堆、大型增殖堆和嬗变堆) 进行优化组合, 提出了熔盐堆的全闭钍铀循环方案。

钍燃料具有储量丰富、废料产量少、防核扩散性能好等优点, 是有望替代铀燃料的理想核燃料<sup>[1]</sup>。熔盐堆作为四代堆中唯一采用液态燃料的堆型, 其在线加料及后处理的特点有利于钍基核燃料闭式循环的实现, 是钍燃料利用的理想堆型<sup>[2]</sup>。研发钍基熔盐堆核能系统<sup>[3]</sup>, 符合我国能源自主供应、温室气体减排的重大战略需求。

钍基熔盐堆兼具钍铀燃料循环和流体燃料熔盐堆的特点<sup>[4]</sup>, 在核燃料增殖与嬗变、核废物管理、固有安全、防核扩散和经济性等诸多方面优势明显, 商业应用前景巨大。针对钍基熔盐堆的研发和部署, 在核燃料循环方面首先要解决“如何用钍”的问题<sup>[5]</sup>—明确钍的利用途径与方法, 建立可靠的钍利用分析方法和核数据库, 评估钍的利用性能与综合效益。为此, 针对以下六方面的技术问题进行了重点攻关<sup>[6]</sup>: 钍铀燃料循环模式和处理流程设计<sup>[7]</sup>、不同循环模式下的增殖性能和安全性能评估<sup>[7]</sup>、高能耗下钍基熔盐堆堆芯反应性和核素演化的高保真模拟<sup>[8]</sup>、钍铀循环核数据建立<sup>[9]</sup>、堆内钍基燃料盐的长期辐照效应和裂变产物累积问题探讨<sup>[11]</sup>以及钍燃料循

环过程中的防核扩散性能评估和模式优化<sup>[12]</sup>。最终, 结合燃料盐后处理技术发展进度和成熟度, 确定了钍基熔盐堆的核燃料循环方案依次为开循环 (钍利用第一步)、改进开循环 (钍利用第二步)、准闭循环 (钍利用第三步) 和全闭式钍铀循环。

## “三步走”战略的燃料循环方案

技术可行、经济安全及钍资源高效利用是小模熔盐堆钍铀燃料循环方案设计的核心思想。围绕这一核心思想, 结合小模熔盐堆快速部署的首要目标, 课题组按照技术成熟度及可实现性从高到低、钍利用性能从低到高的技术路线<sup>[13]</sup>, 制定了小模熔盐堆“三步走”钍利用策略(图 1), 为小模堆钍利用提供了一条科学合理的途径, 并有望未来 10-15 年内在国际上率先实现钍基熔盐堆的工业应用。

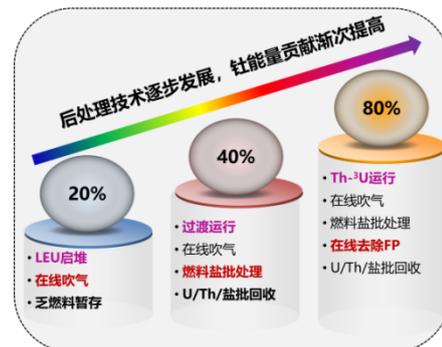


图 1 熔盐堆钍利用“三步走”战略

小模熔盐堆的钍利用“三步走”方案具体如下:

- 1) 第一步: 采用开循环模式实现小模熔盐堆的快速部署与钍的初步利用 (钍能量贡献~20%)<sup>[8]</sup>。在该阶段, 采用低富集铀 (<20%) 与钍混合的燃料启堆, 配备在线添料和在线去除裂变气体系统 (如鼓泡系统), 维持低剩余反应性的安全运行及较高的中子经济性; 考虑到堆芯石墨和结构材料的辐照寿命, 堆芯运行 5-10 年后, 堆芯罐进行整体替换, 乏燃料以暂存方式存储。该阶段将发展并夯实氟化挥发、减压蒸馏、电解沉积等技术, 并提高熔盐堆关键材料的耐腐蚀性, 为小模堆钍利用的第二步提供后处理技术和堆芯技术的保障。
- 2) 第二步: 采用改进开循环实现钍资源规模利用 (钍能量贡献~40%)。在该阶段, 使用较高富集度的富集铀与钍的混合燃料进行启堆, 以提高堆芯中的钍装载量; 运行 5-10 年后, 乏燃料整体

卸堆，采用氟化挥发、减压蒸馏、电解沉积等干法后处理技术进行离线批处理，回收 U、Th 及载体盐并重新装堆运行，分离剩余的次锕系元素（MA）和裂变产物（FP）进行堆外暂存；同时改进燃料盐干法后处理效率，并开展临堆高放环境下在线监测及防腐蚀等技术的研发，为钍利用的第三步奠定在线后处理基础。

- 第三步：采用准闭式循环实现钍资源高效利用（钍能量贡献~80%）。在该阶段，使用 U-233 与钍的混合燃料进行启堆，以实现纯钍铀循环；在运行过程中实行在线加料、在线吹气和在线去除裂变产物；运行数年后，燃料盐进行离线批处理，随后将除了暂存的次锕系元素外，其它所有重金属全部返堆再利用。

### “三步走”战略的燃料循环性能评估

小模熔盐堆燃料循环根据燃料周期可划分为燃料前道、堆芯运行及燃料后道三部分，每一部分都涉及多个环节，而每一环节均会对社会、经济、环境及资源利用等产生影响。如何量化评估这些影响，从而为改进燃料循环方案提供依据，是钍铀核燃料循环方案设计工作的另一重要内容。基于小模熔盐堆运行系统，构建了包括六大评估准则（安全性、经济性、防核扩散性、可持续性、核废料管理及研发部署风险）在内的钍铀燃料循环量化评估流程，对小模熔盐堆“三步走”钍利用方案的综合性能进行了量化评估(图 2)，为小模熔盐堆钍利用方案的设计提供了科学依据。

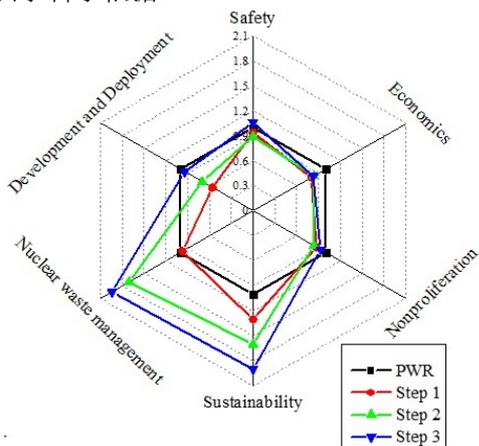


图 2 钍利用“三步走”的综合性能评估。PWR-压水堆；Step 1-第一步；Step 2-第二步；Step 3-第三步；Safety-安全性；Economics-经济性；Nonproliferation-防核扩散性；Sustainability-可持续性；Nuclear waste management-核废料管理；Development and deployment-研发部署风险。

在钍铀燃料循环量化评估流程中，基于多目标、多准则评估方法，通过合适的权重将安全性、经济性、防核扩散性、可持续性、核废料管理及研发部署风险六大评估结果整合起来，形成综合评估结果。

而在每一评估准则中，又将每个准则下的评估指标的原始结果根据指标相应的打分规则（依赖专家及其经验）转换成无量纲的指标值。图 2 给出了小模熔盐堆钍利用“三步走”的燃料循环性能评估结果，具体如下：

- 安全性：是指在建立及运行整个燃料循环过程中能够充分保护工作人员、公众及环境，具体包括资源开采及燃料制备安全、反应堆安全、燃料装置安全、燃料放置安全。虽然小模熔盐堆具有常压运行的优势，但是其较高的燃料富集度和燃料盐的腐蚀性等特点使得在钍利用第一步的综合安全性能值略低于 PWR；在钍利用第二步，由于燃料盐的离线批处理，使得其安全性能评估值略低于第一步；钍利用第三步使用 U-233 作为裂变燃料，增加了其安全性能，也使得第三步的小模熔盐堆的安全性能略优于 PWR。

- 经济性<sup>[14]</sup>：是指新燃料循环体系在研发、部署与运行过程所需要的资金以及相应财务风险，包括建设成本、燃料循环成本、运行维护成本、投资风险。小模熔盐堆的燃料循环成本随着“三步走”钍能量贡献的增大而略有降低，但较高的建设成本（熔盐、熔盐罐等）使得熔盐堆的经济性低于 PWR。然而，熔盐堆随着后续技术发展和部署增加，经济成本有望出现坠崖式下降。

- 防核扩散性<sup>[16]</sup>：是指目前未拥有核武器的主权国家、地区以及恐怖组织获得核武器及核材料的风险，包括核材料内在特性以及外在保护措施。一次通过的 PWR 燃料循环模式的防核扩散性能优于小模熔盐堆，然而随着钍利用“三步走”战略的推进，小模熔盐堆的防核扩散性能也不断增强，到了钍利用第三步，小模熔盐堆的防核扩散性能已与一次通过式 PWR 燃料循环模式相当。

- 可持续性：是指满足核燃料的长期稳定供应，同时降低核废料量与其管理需求、以及对环境气候的影响，具体包括核资源利用率、环境影响（土地、水及乏燃料处理过程涉及的放射性）以及气候影响。运行过程中较少的用水量使得小模熔盐堆的燃料可持续性能值比 PWR 高。随着钍利用第二步和第三步中离线批处理和在线后处理技术的运用，钍能量贡献增加的同时也提高了燃料利用率，进一步增强了小模熔盐堆的可持续性。

- 核废料管理<sup>[16]</sup>：是指对燃料循环运行过程中所产生的乏燃料及放射性废物进行有效管理，确保人类健康及环境在长时间尺度、不同源项及途径下受到充分保护，具体包括存储、运输、处置风险以及核废料管理及处置对环境的影响。小模熔盐堆由于使用钍燃料，其核废料管理性能优于 PWR。同时，随着钍利用第二步和第三步中离线批处理和在线后处

理技术的运用，重金属的加料量逐步减少，小模熔盐堆的核废料管理性能值也不断提高。

6) 研发部署风险<sup>[17]</sup>：是指一燃料循环系统发展到商业应用阶段所涉及到的金融、技术、工业以及法规方面的挑战。熔盐堆钍铀燃料循环在国内尚未实现商业部署，需发展全新堆芯技术，第一步的研发部署风险最高；第二和第三步时已经具备了成熟的堆芯技术，只需发展批处理和在线处理技术，其研发部署风险逐步降低。

综合上述各项评估结果，随着钍利用方案的推进，小模熔盐堆的综合性能呈现逐步改进趋势。在第三步，其综合性能可比拟传统压水堆 PWR。此外，小模熔盐堆的综合性能有望进一步提高，例如降低核燃料富集度、优化堆芯结构以提高中子经济性，优化后处理流程环节以改善经济性，在乏燃料中添加 Th-232 以及天然铀以明显提高防核扩散性能。

### 全闭式钍铀循环方案

基于目前的核燃料循环概念与模式（开环、改进的开环和闭环模式）以及熔盐堆的固有特点，结合钍基熔盐堆核能专项进阶式的钍资源利用战略，提出了基于熔盐堆的远期钍铀核燃料闭循环物理模式（图 3），即未来钍基核能公园的战略构想。钍基核能公园将液态燃料熔盐堆的强固有安全、高核燃料利用率、高增殖/嬗变等性能有机地组合在一个核燃料循环中，最终实现钍基核燃料闭循环及钍资源完全利用。在钍基核能公园的核燃料闭循环模式中，不同堆型（小模堆、大型增殖堆和嬗变堆）具有不同核燃料利用目标，组合实现高温输出、钍铀核燃料增殖、超铀元素焚烧及长寿命裂变产物嬗变等功能目标，通过在线加料和燃料盐的在线后处理（包括重金属核燃料的在线回堆和裂变产物的在线去除等）实现“钍进核废物出”的全闭钍铀循环。

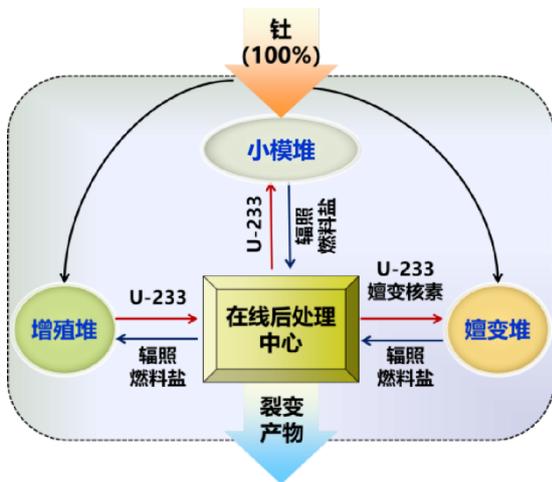


图 3 熔盐堆的全闭式钍铀循环方案

### 结语

为了实现熔盐堆上的核燃料利用最大化和核废料最小化，TMSR 核能研发中心以小模熔盐堆和钍基燃料盐干法批处理示范装置为载体，采取技术成熟度及可实现性从高到低、钍利用性能从低到高的技术路线，将率先在小模熔盐堆上开展钍利用“三步走”方案，使小模熔盐堆的钍燃料能量贡献分别达到 20%、40%和 80%，显著降低核废料放射性毒性并提高燃料利用效率，其后通过小模堆、大型增殖堆和嬗变堆的优化组合，实现全闭式熔盐堆钍铀循环方案（也称钍基核能公园，钍能量贡献达到 100%）。

TMSR 核能研发中心在中科院先导专项的基础上，已全面掌握 TMSR 的关键科学技术，拥有国际上最先进、最完备的实验设施和条件，后续将围绕小模熔盐堆“三步走”战略，开展适用于熔盐堆的关键技术、设备和新型材料等方面的研发，主要包括后处理工业级放大、高纯度熔盐量产制备与检测、高温镍基合金量产与加工、高致密核石墨制备工艺改进以及堆本体、回路、熔盐泵、氩控等系统的集成升级等，为小模熔盐堆钍利用性能的逐步提高提供技术保障。

### 参考文献

1. International atomic energy agency, Thorium fuel cycle-Potential benefits and challenges, IAEA-TECDOC-1450, IAEA, Vienna, 2005
2. Sylvain David, Elisabeth Huffer, Hervé Nifenecker. Revisiting the thorium uranium nuclear fuel cycle. Europhysics News, 2007, **38**(2): 24-27
3. 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能—TMSR 核能系统[C]. 可持续发展 20 年学术研讨会. 中国科学院, 2012
4. Dai Z.M. Thorium molten salt reactor nuclear energy system (TMSR). Molten Salt Reactors and Thorium Energy, Woodhead Publishing, 2017: 531-540
5. 张锐平, 汪永平, 张雪. 国外钍资源核能开发利用策略研究及对我国的启示[J]. 核科学与工程, 2011, **31**(4): 365-371
6. 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, **45**(9): 578-590
7. Cui D. Y., Xia, S. P., Li, X. X., et al. Transition toward thorium fuel cycle in a molten salt reactor by using plutonium. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(10): 152
8. Yu, C., Wu, J., Zou, C., et al. Thorium utilization in a small modular molten salt reactor with progressive fuel cycle modes [J]. Int J Energy Res. 2019, **43**: 3628 - 3639
9. Zou C. Y., Yu, C. G., Wu, J. H., et al. Transition to thorium fuel cycle in a small modular molten salt reactor based on a batch reprocessing mode [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, **138**: 107163
10. Xia S.P., Chen, J. G., Guo, W., et al. Development of a molten salt reactor specific depletion code MODEC [J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, **124**: 88-97

11. 王小鹤, 胡继峰, 陈金根, 等. 钍铀燃料循环专用核数据库 CENDL-TMSR-V1 的基准检验[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(8): 1466-1474
12. Xia S. P., Chen, J. G., Han, J. L., *et al.* The laplace transform method for solving the burnup equation with external feed[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, **130**: 47-53
13. Wu J.H., Ma Y.W., Yu C.G., *et al.* Nuclear non-proliferation review and improving proliferation resistance assessment in the future[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020: 1-24
14. 李晓晓, 伍建辉, 余呈刚, 等. 小型模块化熔盐堆钍利用方案[J]. 原子核物理评论, 2017, **3**: 672-676
15. Cost estimating guidelines for generator IV nuclear energy systems. The Economic Modeling Working Group Of the Generation IV International Forum, 2007, GIF/EMWG/2007/004
16. 马玉雯, 陈金根, 蔡翔舟, 等. 小型模块化钍基熔盐堆防核扩散性能初步定量评估[J]. 原子能科学技术, 2018, **52**(11):1994-2000
17. Wigeland, R., *et al.*, Nuclear fuel cycle evaluation and screening—final report: Appendix C, Evaluation criteria and metrics. 2014, Idaho National Laboratory Technical Report INL: Idaho National Laboratory Technical Report INL
18. IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. 2016, IAEA

# 深海微型熔盐堆方案设计研究进展

反应堆物理部, 赵恒 崔德阳 陈兴伟 戴叶

核能因其高能量密度和军民融合等特点, 是一种不可替代的骨干能源<sup>[1]</sup>。在海洋装置的能源供应中, 核动力一直是高科技战略性能源, 紧凑的、动力强劲的深海核电源可以为深海装置提供长期、稳定、高效、静音的能源供应。深海反应堆相比传统深海能源, 具备更大的功率和寿期, 适用于需要较大功率、长时间运行的深海无人系统。

热管式熔盐堆以液态燃料熔盐作为燃料, 在堆芯裂变产生高温核热, 使用热管进行非能动传热, 后端接温差发电(或斯特林发电系统)系统, 具备一次装料、长期运行、高功率密度、高稳定和低噪音等特点, 适合于深海核电源应用<sup>[2-5]</sup>。为了解决深海微型热管式熔盐堆应用中, 存在反应堆小型化、海洋环境适应性的问题, 须探索并研究堆小型化设计、热管传热、高温发电、无人控制等关键技术, 完成深海微型熔盐堆的方案设计<sup>[6-9]</sup>。

## 1 深海微型熔盐堆总体设计方案

深海微型熔盐堆以液态燃料熔盐作为燃料, 在堆芯裂变产生高温核热, 使用热管进行非能动传热, 后端接温差发电系统, 余热由冷却热管传递至堆舱, 最终散至海洋环境, 其示意图如图 1 所示。熔盐堆所在堆舱直径 1.4 m, 高 2.0 m, 堆舱内熔盐堆相关设备总质量 3.2 吨, 保守估计系统总质量 4 吨。

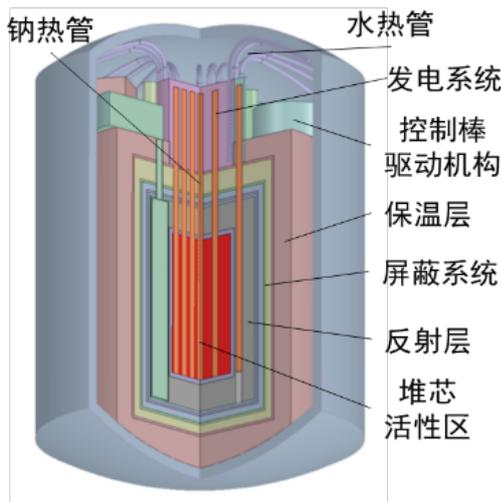


图 1 深海微型熔盐堆示意图

深海微型熔盐堆包括堆本体、温差发电系统、余热排出系统、仪控系统及辅助系统。堆本体中堆芯为核热产生的来源, 核热由热管传递至温差发电系统, 发电后产生的余热由余热排出系统带走, 传至堆舱壁面散入海洋环境。仪控系统及辅助系统提

供反应堆测量、控制、保护覆盖气体以及电力输出控制等功能。

深海微型熔盐堆堆本体包括堆芯活性区、热管、堆容器、反射层、反应性控制系统、以及堆芯屏蔽与保温。热管竖直放置, 其总长根据位置的不同为 1 m 至 1.6 m, 工作介质为钠。热管绝热段冷凝端、热端铜座及冷端铜座均位于保温层内。温差发电单元用于热管冷凝端, 包括热端铜座和冷端铜座, 热端铜座呈六角形塔式结构。冷却热管(水热管)插入冷端铜座, 将发电余热传递至反应堆堆舱上壁面, 并最终排入海水中。

## 2 反应堆核设计与堆芯中子物理分析

根据微型熔盐堆的应用需求、设计准则, 在已有设计基础上进行微型熔盐堆的核设计深化。深海微型熔盐堆的堆芯主要参数在表 1 中列出。根据橡树岭国家实验室的实验结果和对比分析, 燃料盐采用 72 mol%LiF-28 mol% UF<sub>4</sub> 的二元盐<sup>[10]</sup>, 熔点 490°C, 重金属(铀)的质量份额约为 64%, <sup>7</sup>Li 的丰度为 99.95%。选用了 2 MW 熔盐实验堆采用的哈氏合金作为热管管壁和堆容器的结构材料<sup>[11]</sup>。钠热管均匀插入堆芯燃料盐中将热量带出, 堆芯活性区的直径和高度分别为 35 cm 和 62 cm; 堆芯外围布置 2 cm 的哈氏合金, 主要作用是隔离燃料盐和 BeO 反射层; 合金上下及径向外围布置 12 cm 厚的反射层; 堆芯反射层均匀布置了 6 个控制鼓, 用于反应堆启动、功率调节和停堆。

针对深海微型熔盐堆堆芯设计, 建立中子物理模型并利用蒙特卡洛软件<sup>[12]</sup>进行了中子物理分析, 分析了反应堆的中子能谱、中子通量分布、功率分布、反应性随时间的变化(燃料)、反应性控制系统价值和温度反应性系数。

微型熔盐堆的中子能谱比 MSFR 和 MSBR 的能谱更硬, 堆内中子主要集中在快中子能区。

微型熔盐堆通过改变控制鼓中 B<sub>4</sub>C 吸收体相对堆芯的位置调节反应性。控制鼓的价值曲线从 0° 鼓角的负反应性, 逐渐增大到 180° 的正反应性, 其中剩余反应性为 0 的位置对应的鼓角约为 130°。180° 鼓角时对应的剩余反应性约为 919 pcm, 可以满足 50 kW 热功率微堆的运行需求。

温度反应性系数是微型熔盐堆固有安全性的重要来源。当堆内温度升高时, 微型熔盐堆流体燃料盐膨胀, 将部分燃料挤出堆芯, 导致有效增殖因子

下降，表现为负的温度反应性系数。微型熔盐堆具有足够的负温度反馈系数，可部分替代控制棒实现对反应性的有效调节和控制。微型熔盐堆的负温度反馈系数强于典型的熔盐快堆，主要原因是微堆的燃料盐体积更小，温度升高后熔盐膨胀量对总的熔盐质量的影响更大，其具体的温度反应性系数如表 2 所示。

表 1 深海微型熔盐堆主要参数

参数	数值
加热功率 /kW	50
发电功率 /kW	5
发电效率	10%
堆舱直径 /m	1.4
堆舱高度 /m	2.0
堆本体直径 /m	0.65 (活性区 0.35)
堆本体高度 /m	0.92 (活性区 0.62)
堆芯外围哈氏合金厚度 /m	0.02
径向反射层(BeO)厚度 /m	0.12
轴向反射层(BeO)厚度 /m	0.12
反射层外壳厚度 /m	0.01
热管直径 /m	0.032
热管中心距 /m	0.05
热管数量	堆芯 37+外围 6
屏蔽层厚度 /m	上 0.15 其它 0.1
纳米保温层厚度 /m	0.1

表 2 微型热管熔盐堆的温度反应性系数

参数	燃料密度系数	燃料多普勒系数	燃料总反应性系数
微型熔盐堆	-14.01	0.35	-13.91
熔盐快堆	-3.6	-1.6	-5.0

下图 2 为微型热管熔盐堆堆芯活性区功率密度分布，从图中可以看出，总的功率分布相对均匀，功率密度最大区域出现在堆芯活性区几何中心及外围临近热管区域，约为 1.12 到 1.28 W/cm<sup>3</sup>。热管区功率密度相对较低，主要是因为热管区没有燃料盐分布。计算得到的径向功率峰因子约为 1.15，轴向功率峰因子为 1.22，总功率峰因子为 1.4。这个水平的功率峰因子，通常无需考虑使用额外手段进行展平。

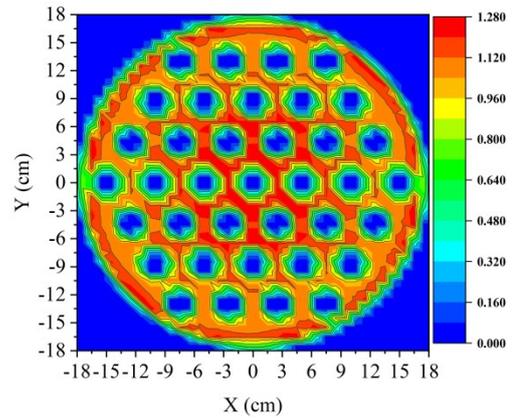


图 2 堆芯活性区 XY 方向功率密度分布

### 3 反应堆热工水力设计与分析

热管冷却反应堆采用热管将堆芯产生热量传导至二回路系统或热电转换装置，剩余的废热通过冷却器或辐射散热器排出至最终热阱（大气或环境）。反应堆活性区直径 0.35 m，高度 0.62 m。堆芯中 37 根直径 32 mm 的热管在堆芯呈正六边形布置，间距 5 cm。反射层内对称分布 6 根热管，管壁与哈氏合金外壳距离 14 mm。

热管用于将热量从堆芯传递至发电系统。热管竖直放置，其总长根据位置的不同为 1 m 至 1.6 m，工作介质为钠，加热段位于堆芯，长度 0.6 m，绝热段和冷凝段根据插入铜管的位置有所不同。热管外径 32 mm，管壁厚 2 mm，丝网厚 2 mm，丝网目数 80\*80，蒸气腔直径 24 mm。

热管冷凝段插入热端铜座中，热端铜座呈六角形塔式结构。塔式结构可以增加表面积，以满足温差发电片所需换热面积需求。温差发电片高温端贴于热端铜座外表面，低温侧贴于冷端铜座内表面，利用热端铜座和冷端铜座之间的温差来发电。冷却热管（水热管）插入冷端铜座，将发电余热传递至反应堆堆舱上壁面，并最终排入海水中。

#### 3.1 堆芯热工水力分析

堆芯活性区内熔盐温度分布较为均匀，熔盐最高温度为 906.52°C，与熔盐的许用温度沸点相差较大，满足设计要求及安全需要。与此同时，堆芯容器合金部件温度都低于 650°C，在合金的许用温度范围之内。

根据堆芯设计结果，开展堆芯热工水力分析。反应堆的堆芯活性区功率密度远高于其它部位，需要着重考虑堆芯活性区功率的导出。根据图 3 的仿真结果传热特性，5 号热管的传热热量密度最高。

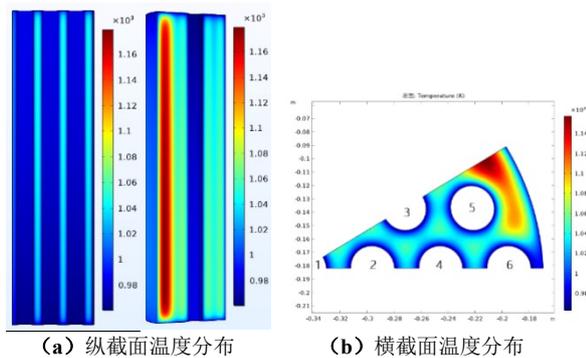


图3 堆芯活性区温度分布与热管编号

### 3.2 热管设计与分析

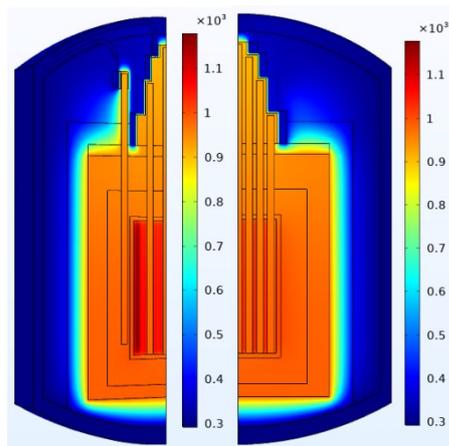
深海微型熔盐堆热管工作时为竖直方向，工作温度 600 至 700°C；单根热管传热功率不低于 2.0 kW（平均功率的 1.5 倍）。其设计方案如下：热管总长 1.3 m，工作介质为钠，加热段位于堆芯，长度 0.60 m，绝热段长度 0.35 m，冷凝段长度 0.35 m。热管外径 32mm，管壁厚 2 mm，丝网厚 2 mm，丝网目数 80\*80，蒸气腔直径 24 mm。

根据设计方案及钠的物性，得出以下分析结果：

- 1)600°C时，其声速极限为 8.3 kW，携带极限为 6.1 kW，毛细极限为 13.5 kW，沸腾极限为 211 MW；
- 2)700°C时，其声速极限为 30.7kW，携带极限为 11.2 kW，毛细极限为 12.0 kW，沸腾极限为 51 MW。热管的传热能力满足系统的设计需求。

### 3.3 堆舱热工水力分析

利用 CFD 分析软件 COMSOL<sup>[13]</sup>对反应堆堆舱温度场进行了计算与分析，主要研究反应堆舱内温度分布情况，分析结果如图 4 所示。



(a) 纵截面 1 (b) 纵截面 2

图4 堆舱温度场分布

图中可以看出，堆芯热量主要由热管导出，至温差发电片，最终经冷却热管导出。由于堆舱本身有海水作为冷却，舱内反应堆保温层外温度外各设备温度都在许用范围之内。通过发电片的总热量 48.9 kW,占据总热量的 97.76%。

## 4 结语

深海微型熔盐堆以液态燃料熔盐作为燃料，在堆芯裂变产生高温核热，使用热管进行非能动传热，后端接温差发电系统，发电后产生的余热由余热排出系统带走，传至堆舱壁面散入海洋环境。仪控系统提供反应堆测量、控制、保护覆盖气体以及电力输出控制等功能。

通过中子物理与热工水力分析可得，该系统有足够的负温度反馈系数，功率密度分布均匀，热管传热能力满足设计需求，同时具备一次装料、长期运行、高功率密度、高稳定和低噪音等特点，适合于深海核电源应用，具较高研究价值与应用前景。

## 参考文献

- 1 Rosenthal M W, Kasten P R, Briggs R B. Molten-salt reactors: history, status, and potential[J]. Nuclear Applications and Technology, 1970, 8(2): 107-117. DOI: 10.13182/nt70-a28619
- 2 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能: TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366-374. DOI:10.3772/j.issn.1673-6516.2016.05.021
- 3 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, 45(09): 578-590
- 4 秋德正, 张大林, 苏光辉, 田文喜. 新概念熔盐堆的固有安全性及相关关键问题研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(S1): 64-75
- 5 左嘉旭, 张春明. 熔盐堆的安全性介绍[J]. 核安全, 2011(03): 73-79
- 6 王建强, 戴志敏, 徐洪杰. 核能综合利用研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(04): 460-468
- 7 余红星, 马誉高, 张卓华, 柴晓明. 热管冷却反应堆的兴起和发展[J]. 核动力工程, 2019, 40(04): 1-8
- 8 徐洪杰, 戴志敏, 蔡翔舟, 王建强. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. 现代物理知识, 2018, 30(04): 25-34
- 9 陈伟, 张军, 李桂菊. 核电技术现状与研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2007(05): 81-86+106
- 10 Janz G J, Gardner G L, Krebs U, et al. Molten Salts: Volume 4, Part 1, Fluorides and Mixtures Electrical Conductance, Density, Viscosity, and Surface Tension Data[J]. Journal of Physical & Chemical Reference Data, 1974, 3(1): 1-115
- 11 Ren W, Muralidharan G, Wilson D F, et al. ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 6, Parts A and B - Considerations of Alloy N for Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactor[C]. Baltimore, Pressure Vessels and Piping Division, 2011: 725-736
- 12 X-5 Monte Carlo Team, A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-1987, Los Alamos (2003).
- 13 专业数值分析系统 COMSOL Multiphysics[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2008, (09): 40-44

# TMSR-LF1 工程模拟机设计、实现及应用

反应堆物理部，戴明 程懋松 夏少鹏 田格瑄 刘峰瑞

核电模拟机对核电站运行及人员培训等至关重要，是核电厂对操作员进行培训及考试的必备工具。HAF103 中提出必须使用模拟机对操作员进行培训，模拟机能否投入运行直接影响到操作员执照考试、核电厂装料许可，所以模拟机是关系到核电站工程建设能否顺利开展的关键设备<sup>[1]</sup>。除了用于操作员培训外，模拟机还能支撑各种安全分析、事故缓解措施验证、操作员人因工程设计验证、设备控制逻辑检验及参数标定、操作规程修改验证、核电厂对外展示窗口等重要功能<sup>[2]</sup>。

结合 TMSR-LF1 工程建设需求，综合考虑各种模拟机仿真方式在研发成本、周期、逼真度、后期维护等方面因素，确定了 TMSR-LF1 工程模拟机多种仿真方式相结合的设计方案，结合 TMSR-LF1 各系统的工程设计说明书<sup>[3-13]</sup>，经过实施、集成调试及测试后，TMSR-LF1 模拟机通过了专家组的技术验收，并已用于首批操作员培训及初级操作员热照考试。

## 1 TMSR-LF1 工程模拟机设计方案及实现

表 1 TMSR-LF1 模拟机仿真对象及实现平台

仿真对象	实体平台	仿真平台 (仿真方式)
主工艺系统	设备及常规仪表	Relap5(模拟) NuSIM(模拟)
辅助工艺系统	设备及常规仪表	NuSIM(模拟)
安全级 DCS	NuPAC	NuSIM(模拟)
非安全级 DCS	NuCON	NuCON 虚拟控制器(虚拟)
安全级 MMI	保护系统专用 安全盘台	与实物相同(实物) NuSIM(模拟)
非安全级 MMI	工程师站、大屏幕信息 系统、操纵员站、 NuCON 画面组态	与实物相同(实物)

实际的 TMSR-LF1 的 DCS 体系架构大致可分为四层，即工艺系统接口层、过程控制层、操作监控层和信息管理层。TMSR-LF1 工程模拟机根据上述实际 DCS 系统划分仿真系统，弱化了信息管理层，分为工艺系统模型、控制系统模型、人机接口。TMSR-LF1 工程模拟机采用多种仿真方式相结合的设计方案，其仿真对象及实现平台如表 1 所示。

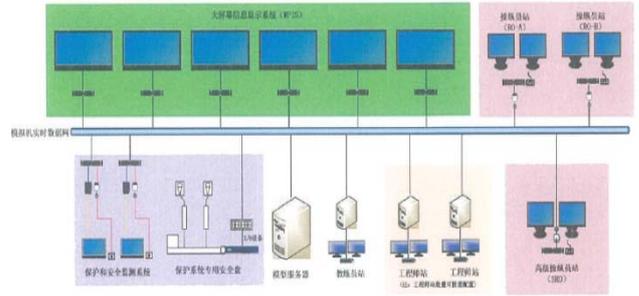


图 1 TMSR-LF1 模拟机系统架构图

模拟机硬件系统架构设计见图 1，模拟机主控室现场见图 2。该硬件系统主要由实时仿真数据网、计算模型服务器、工程师站、大屏幕信息系统、操纵员站、保护系统专用安全盘台、教练员站等部分构成。模块机仿真平台使用 NuSIM 一体化仿真建模工具软件，其系统软件架构见图 3。

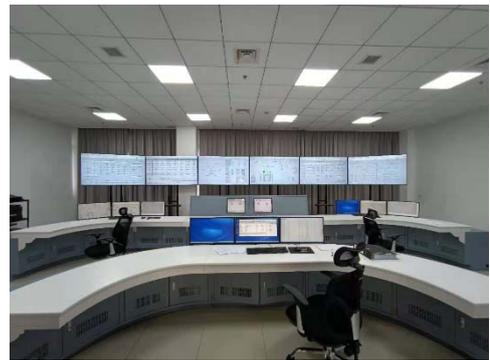


图 2 TMSR-LF1 模拟机主控室现场

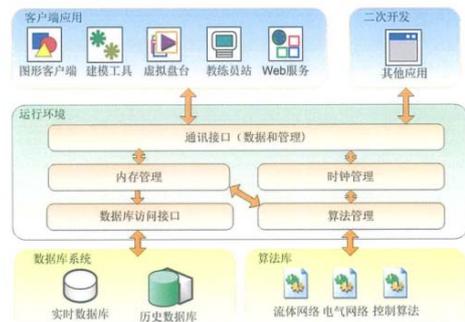


图 3 模型机软件组成

### 1.1 工艺系统模型

工艺系统模型使用物理方程和数值解法或相应的假设模拟出相应实物系统的物理现象。实物系统中设备的传感器、变送器和限位开关等常规仪表数据要通过 I/O 接口与控制系统进行双向交互。工艺系统的 I/O 接口通过 NuSIM 一体化仿真建模工具实现。工艺系统模型分为主工艺系统和辅助工艺系统。

### 1.1.1 主工艺系统

反应堆堆芯及一、二回路的主工艺系统模型使用改造后的 Relap5 实现,为此定制开发了 NuSIM 平台与 Relap5 程序的实时数据交互接口,不仅实现计算数据的双向数据传输,同时也实现了仿真模型的运行、冻结、保存工况、复位工况等仿真指令的传输。主工艺系统的模型节点图如图 4 所示。该部分的计算模型包括:燃料盐回路系统、冷却盐回路系统、空气冷却系统、非能动余热排出系统。液态熔盐的流体动态仿真包括泵的特性曲线、净压头的要求、系统的流动阻力,相应的重力压头和每个流道上泵的惯性等的联合作用。反向流动、自然循环都将进行模拟。堆芯活性区分为测量通道、控制棒通道、九层燃料盐、堆容器-反射层液隙、堆芯内部石墨环腔液隙。这些平行流道上的任何交叉连接都将反映在流量和压力计算中。

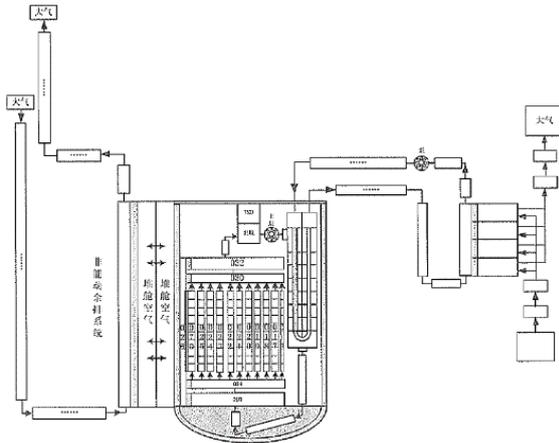


图 4 主工艺系统的模型节点图

### 1.1.2 辅助工艺系统

辅助工艺系统(包括气路系统、回路系统、功率控制系统、燃料盐装卸系统、电气系统等)使用 NuSIM 一体化仿真建模工具实现。NuSIM 对所有仿真模型模块运算进行周期性调度,这些模块提供了高精度、完全机理化的数学模型,包含专业的热力、电气、控制等模块库,这些算法模块能在满足质量守恒、动量守恒、能量守恒的原则下进行全工况实时仿真。

TMSR-LF1 的气路系统、回路系统及燃料盐装卸系统需要构建大型的多分支的流体网络,由能量守恒、质量守恒以及流体阻力公式可以建立液体网络的大型稀疏非线性方程组数学模型,通过拓扑结构分析进行预处理,采用高效率的稀疏矩阵直接算法进行求解。

功率控制系统通过 NuSIM 的控制模块来实现,主要模拟控制棒接收到控制系统发出的棒速和棒向移动指令后动作,并根据实时计算的棒位,插值计算每一根棒的积分价值,反馈到 Relap5 的堆芯点堆模型中。在插值计算棒积分价值时,同时考虑棒在冷态零功率和热态满功率两种不同温度情况下影响。

电气系统仿真要求实时计算用电网络各母线电压功率分布情况,主要运用牛顿-拉夫逊潮流计算方法快速得到相关电气网络参数。

### 1.2 控制系统模型

控制系统模型完成数据采集、数据处理、回路控制和网络通讯等实际工艺调控过程。它从人机接口读取操作员的操作命令,经过控制逻辑处理后输出现场执行机构驱动信号到工艺系统的 I/O 接口,工艺系统模型进行硬件设备的仿真并实时反馈执行情况到控制系统,控制系统再进行闭环调控,同时也将这些反馈数据传回到人机接口,从而实现对反应堆的实时操作。所有的数据交互采用唯一变量标签点对点的方式实现。控制系统包括安全级和非安全级。

参考相关压水堆核电机组全范围模型机开发经验,安全级 DCS 系统以模拟仿真方式通过 NuSIM 仿真软件进行建模实现。非安全级 DCS 系统使用虚拟控制器方案实现将实际机组控制逻辑导入 NuCON 虚拟控制器,通过数据通信接口程序,与 NuSIM 仿真模型实现双向数据通信。

### 1.3 人机接口

人机接口是一个友好的人机交互平台,它提供人机交互界面,并实现资源数据高度集成。通过人机接口,操作员可以直接、实时获得生产过程的实时运行数据,安全有效地对整个生产过程进行监视、操作和管理,包括故障诊断、质量评估等。人机接口包括画面组态生成的界面、工程师站、大屏幕信息系统、操作员站、保护系统专用安全盘台、历史数据站等。人机接口分为安全级和非安全级。

安全级人机界面通过 NuSIM 仿真建模工具,对安全级界面进行人工建模开发,实现其显示和操作功能。此外,模拟机将配备与主控室安全级开关功能和外观一致的仿真盘台开关,通过数据采集卡和网络通信方式,实现与模型服务器的数据交互。非安全级 DCS 系统界面使用真实机组界面,将实际机组的画面组态数据直接导入模拟机的工程师站系统,实现与真实主控制室一致的高逼真度仿真。图 5 所示为与真实主控制室一致的保护系统专用安全盘台。



图5 保护系统专用安全盘台

## 2 TMSR-LF1 工程模拟机应用

### 2.1 运行规程测试

TMSR-LF1 模拟机完成系统模型集成及测试<sup>[14-49]</sup>后,通过了专家组的技术验收,可以根据 TMSR-LF1 的实际运行规程进行典型工况的模拟,主要包括正常运行工况和事故工况模拟。正常运行工况包括空堆升温 and 降温、燃料盐装载和卸载、启堆及升降功率运行等。事故工况包括保护系统被触发自动停堆、燃料盐泵事故和燃料盐液位下降事故等。

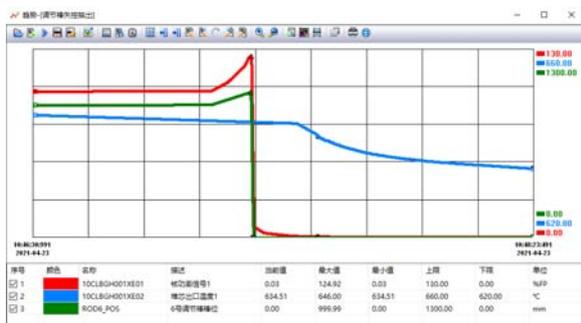


图6 反应堆从 90%FP 降功率到 80%FP 的过程

图 6 所示为反应堆从 90%FP 降功率到 80%FP 的过程,该图从操作员站的 NuCON 画面组态工具得到。通过不断插调节棒补偿温度引入的正反应性,通过降低负载功率来控制二回路冷却盐出口温度。当温度、风机流量、功率稳定时反应堆达到稳态。

图 7 所示为满功率运行条件下调节棒以 1cm/s 的速度失控提升事故模拟。通过教练员站插入调节棒失控提升的事故,事故引入后核功率开始急速提升,快速地达到了中子注量率高整定值,触发保护与监测系统的自动停堆,核功率快速下降,反应堆过渡到停堆状态。

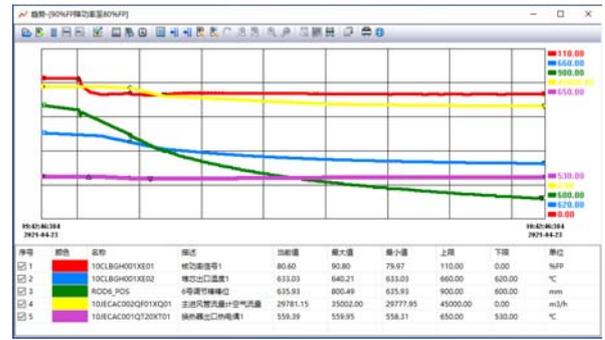


图7 满功率运行条件下调节棒以 1cm/s 的速度失控提升

### 2.2 控制系统测试

TMSR-LF1 工程模拟机作为集成平台向各系统专业组展示了相关设备的控制逻辑及操作界面,各专业组可直观的了解自身需求是否得到充分实现或者是否需要进一步优化,比如更改主导航界面以体现整个工艺系统完整性、给每个系统增加主显示界面、功率控制系统调整及光字牌报警优化等。

### 2.3 操作员培训

TMSR-LF1 工程模拟机于 2020 年底完成技术验收,随后投入到初级操作员培训。培训要求学员能够按照技术规范的要求,养成良好的协作精神和团队精神,在反应堆正常运行或者出现故障或事故的情况下,正确执行相关规程,从而保证核安全限值得到遵守。于 2020 年 2 月中旬作为考试项目之一支撑初级操作员热照考试。于 2020 年 3 月依据《2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆操纵人员培训资料》、《TMSR-LF1 模拟机培训——故障运行及事故应对》组织高级操作员模拟机培训。图 8 所示为操作员在模拟机上开展培训。



图8 操作员在模拟机上开展培训

## 3 结语

TMSR-LF1 工程模拟机采用多种仿真方式相结合的设计方案。模拟机主工艺系统使用改造后的 Relap5 实现。辅助工艺系统使用 NuSIM 一体化仿真

建模工具实现。控制系统仿真使用虚拟控制器方案实现。两个独立的PMS保护系统序列以模拟仿真方式通过NuSIM仿真软件进行建模实现。相关人机接口与实物相同,实现与真实主控室一致的高逼真度仿真。TMSR-LF1模拟机通过了专家组的技术验收,作为集成平台供各系统专业组进行了运行规程及控制系统测试,并已用于首批操作员培训、初级操作员执照考试及高级操作员培训。

## 参考文献

- 1 张海,华志刚,单福昌,卡拉奇核电厂2号机组全模拟DCS系统研发[J],中国核电,2021(14)
- 2 马建新,彭立,董晓峰.核电厂DCS模拟机中数据回放技术的设计与实践[J].核动力工程,2019,040(002):129-132
- 3 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆初步设计总说明书[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-22-INTG-0005-C,2018
- 4 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆芯核设计报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-22-NDES-DS-003-C,2018
- 5 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆热工水力设计说明书[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-22-THHY-DS-0001-C,2018
- 6 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆燃料盐回路系统初步设计说明书[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-22-JEB-DS-0001-C,2018
- 7 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆堆本体结构总体设计说明书[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-22-JAY-DS-0001-C,2018
- 8 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆辐射防护与监测系统初步设计说明书[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-22-CKU-DS-1001-C,2018
- 9 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆气路与氩系统设计说明书[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-22-KR-DS-0001-C,2018
- 10 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆最终安全分析报告(第十章 辅助系统)[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-02-CENT-PA-1001-C,2020
- 11 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆最终安全分析报告(第九章 电源系统)[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-02-CENT-PA-1001-C,2020
- 12 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆最终安全分析报告(第五章 反应堆)[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-02-CENT-PA-1001-C,2020
- 13 2Mwt液态燃料钍基熔盐实验堆最终安全分析报告(第十六章 最终安全分析报告)[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-02-CENT-PA-1001-C,2020
- 14 TMSR工程模拟机0-20%FP降功率运行测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0008-C,2020
- 15 TMSR工程模拟机0-20%FP升功率运行测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0007-C,2020
- 16 TMSR工程模拟机20-100%FP降功率运行测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0010-C,2020
- 17 TMSR工程模拟机20-100%FP升功率运行测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0009-C,2020
- 18 TMSR工程模拟机从常温空堆到高温空堆测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0002-C,2020
- 19 TMSR工程模拟机从高温空堆到常温空堆测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0003-C,2020
- 20 TMSR工程模拟机堆芯覆盖气泄露事故测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0008-C,2020
- 21 TMSR工程模拟机功率运行时计划停堆测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0011-C,2020
- 22 TMSR工程模拟机冷却盐泵故障事故测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0016-C,2020
- 23 TMSR工程模拟机冷却盐泄漏事故测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0014-C,2020
- 24 TMSR工程模拟机启动及启动时停堆测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0006-C,2020
- 25 TMSR工程模拟机燃料盐泵故障事故测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0015-C,2020
- 26 TMSR工程模拟机燃料盐卸载测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0005-C,2020
- 27 TMSR工程模拟机燃料盐液位下降事故测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0019-C,2020
- 28 TMSR工程模拟机燃料盐装载测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0004-C,2020
- 29 TMSR工程模拟机熔盐-熔盐换热器泄漏事故测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0017-C,2020
- 30 TMSR工程模拟机尾气处理系统泄漏事故测试规程[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0018-C,2020
- 31 TMSR工程模拟机保护系统被触发自动停堆事故规程报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-0012-C,2020
- 32 TMSR工程模拟机0-20%FP降功率运行测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1008-C,2020
- 33 TMSR工程模拟机0-20%FP升功率运行测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1007-C,2020
- 34 TMSR工程模拟机20-100%FP降功率运行测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1010-C,2020
- 35 TMSR工程模拟机20-100%FP升功率运行测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1009-C,2020
- 36 TMSR工程模拟机从常温空堆到高温空堆测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1002-C,2020
- 37 TMSR工程模拟机从高温空堆到常温空堆测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1003-C,2020
- 38 TMSR工程模拟机堆芯覆盖气泄露事故测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1008-C,2020
- 39 TMSR工程模拟机功率运行时计划停堆测试报告[R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1011-C,2020

- 40 TMSR 工程模拟机冷却盐泵故障事故测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 16-C, 2020
- 41 TMSR 工程模拟机冷却盐泄漏事故测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 14-C, 2020
- 42 TMSR 工程模拟机启动及启动时停堆测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 06-C, 2020
- 43 TMSR 工程模拟机燃料盐泵故障事故测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 15-C, 2020
- 44 TMSR 工程模拟机燃料盐卸载测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 05-C, 2020
- 45 TMSR 工程模拟机燃料盐液位下降事故测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 19-C, 2020
- 46 TMSR 工程模拟机燃料盐装载测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 04-C, 2020
- 47 TMSR 工程模拟机熔盐-熔盐换热器泄漏事故测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 17-C, 2020
- 48 TMSR 工程模拟机尾气处理系统泄漏事故测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-10 18-C, 2020
- 49 TMSR 工程模拟机保护系统被触发自动停堆事故测试报告 [R].Shanghai:SINAP,TMSR-LF1-SINAP-56-INTG-TQ-1012-C, 2020

# TMSR 关键工程设计与安全分析软件研发进展

反应堆物理部，夏少鹏 程懋松 戴明 刘峰瑞 田格瑄

软件中心 2019~2020 年度在建立了程序研发管理平台及研发质量保证体系的基础之上，针对 TMSR 工程设计需求，逐步开展中子物理、热工流体、熔盐化学等关键工程设计与安全分析软件的研发。新开发的以及新增功能的程序包括基于 OpenMP 和 MPI 混合并行的蒙特卡罗粒子输运程序 ThorHERON、组件少群参数计算程序 ThorLAT、节块法堆芯核设计程序 ThorCORE3D、基于精确几何熔盐堆堆芯热工水力程序 ThorPGCTH、堆芯子通道程序 ThorSUBTH、RELAP5/Mod4.0 的液态熔盐堆缓发中子先驱核输运模型扩展、液态熔盐堆核素演化程序 ThorMODEC 以及熔盐堆多态混合物质量输运程序 ThorTRANP。下面将分小节详细介绍各软件的研究现状。

## 混合并行蒙卡粒子输运程序 ThorHERON

蒙特卡罗方法是由 20 世纪 40 年代参与美国研制原子弹的“曼哈顿计划”的 S.M.乌拉姆和 J.冯诺伊曼首先提出。蒙卡与确定论方法本质区别在于以概率统计大数定律和中心极限定律为理论基础，将所求问题转化为概率模型，应用随机数和相应的抽样方法求得统计特征值作为问题的数值解。蒙特卡罗方法计算精度高、几何适用性强，广泛应用于粒子输运领域。基于 OpenMP 和 MPI 混合并行蒙卡粒子输运程序 ThorHERON 采用 surface 和 delta 粒子追踪方法，与 MCNP、Serpent 等程序一样采用连续能量 ACE 格式核数据库和 CSG(constructive solid geometry)进行几何建模，集成 TTA 和 CRAM 燃烧求解算法。目前具备全堆临界、外源、燃烧和少群截面参数产生功能，能为确定论程序提供高精度少群截面参数和动力学参数。

采用典型压水堆全堆模型对 ThorHERON 进行初步的正确性验证。图 1 为采用 ThorHEORN 的典型压水堆几何三维建模，表 1 为不同蒙卡程序的  $k_{eff}$  计算结果。可以看到，ThorHERON 与 MCNP5 和 OpenMC 的计算结果符合较好。其中，与 MCNP5 的相对偏差为 43pcm，与 OpenMC 的相对偏差为 64pcm，初步验证了 ThorHERON 的正确性。

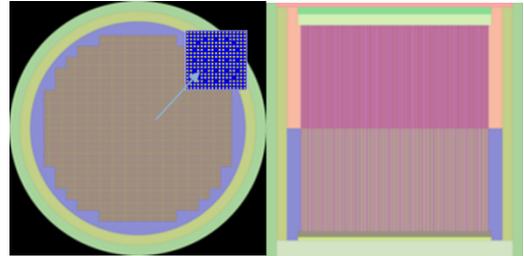


图 1 采用 ThorHEORN 的典型压水堆全堆几何三维建模

表 1 不同蒙卡程序  $k_{eff}$  计算结果

程序名称	$k_{eff}$
MCNP5	1.00023 ± 0.00006
OpenMC	1.00002 ± 0.00006
ThorHERON	1.00066 ± 0.00005

## 组件少群参数计算程序 ThorLAT

组件少群参数计算程序 ThorLAT 是反应堆堆芯工程核设计的重要软件之一，核心功能是通过输运计算给堆芯计算程序提供少群截面参数。

ThorLAT 基于 SHEM-361 能群结构的数据库而开发，采用子群法进行共振处理，其中子群参数通过拟合法求得，子群并群均匀化引入 SPH 等效处理，通过迭代法考虑共振核素间的影响，对于碰撞概率输运求解器可引入碰撞概率插值方法以提高子群法计算效率。除碰撞概率法求解器外，为考虑更大规模组件计算，引入 MOC 输运计算求解器，可用于共振计算或全能区输运求解，采用材料网格 ACA 方法加速 MOC 固定源迭代，采用 OpenMP 并行加速特征线生成、系数矩阵计算及 MOC 求解，引入能群分批处理降低特征线追踪 Cache 未命中以提高并行效率。为考虑熔盐堆的在线后处理燃烧计算，支持求解带伪衰变因子和添加速率的燃烧方程。

采用 VERA-2A、VERA-2F 和 VERA-4-2D 三个临界基准题进行程序的正确性验证， $k_{eff}$  和最大棒功率偏差的计算结果如表 2 所示。可以看到，ThorLAT 的三个基准题的计算结果与参考结果均符合较好，从而验证了 ThorLAT 的正确性。

表 2 ThorLAT 基准题验证结果

基准题名称	$\Delta k_{eff} / \text{pcm}$	最大棒功率偏差 / %
VERA-2A	-10	0.42
VERA-2F	-17	0.49
VERA-4-2D	104	1.97

## 节块法堆芯核设计程序 ThorCORE3D<sup>[1,2]</sup>

节块法堆芯核设计程序 ThorCORE3D 为基于节块法的堆芯核设计程序，用于四边形和六角形燃料组件的固态燃料熔盐堆和液态燃料熔盐堆的建模、堆芯设计和分析，具体功能包括：1) 堆芯参数搜索（临界搜索、控制棒棒位搜索）；2) 通量、功率以及缓发中子先驱核的计算；3) 各类反应性系数计算；4) 控制棒价值计算；5) 三维堆芯瞬态分析。

更进一步地，针对液态熔盐堆的在线添料和在线后处理的特性，ThorCORE3D 通过耦合一个基于泰勒展开的燃耗模块，实现了液态熔盐堆燃料管理分析的功能。

采用美国橡树岭国家实验室发布的 MSRE 运行历史数据计算结果、欧洲熔盐快堆 MSFR 燃耗算例对 ThorCORE3D 进行验证，结果分别如图 2 和图 3 所示。可以看到，无论是 MSRE 还是 MSFR，ThorCORE3D 的计算结果均与参考结果符合较好，充分验证了 ThorCORE3D 液态燃料熔盐堆的燃料管理计算功能。

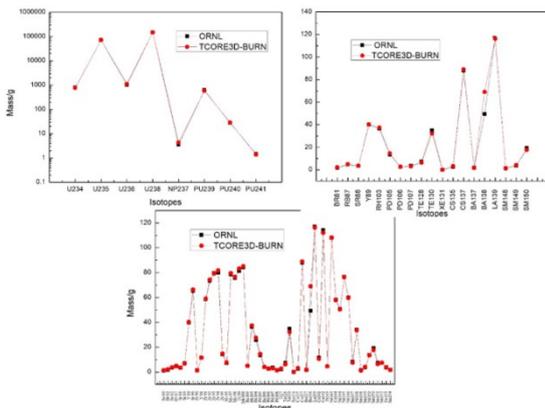


图 2 MSRE 停堆后燃料中核素质量分布结果对比

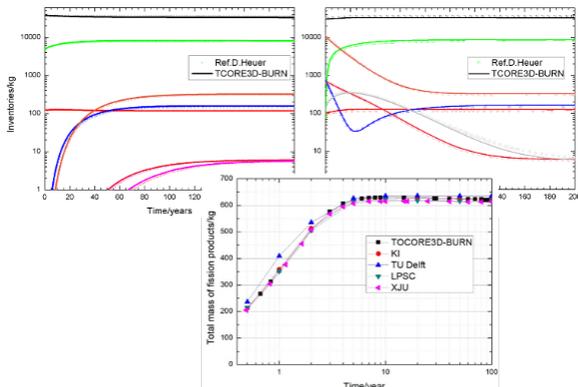


图 3 MSFR 堆内重金属及裂变产物质量演化结果对比

## 基于精确几何熔盐堆堆芯热工水力程序 ThorPGCTH

针对带有内热源流体液态熔盐堆的热工水力计算，开发了基于精确几何的熔盐堆堆芯热工水力程

序 ThorPGCTH。ThorPGCTH 采用多通道方法计算流体流动，而对固体区域的传热采用精细的 CFD 模型进行 3D 离散计算，因此程序能够在保持多通道程序计算速度快的同时兼顾了传统 CFD 程序对空间的解析精度。该程序可以用于堆芯的流量分布、温度分布、压力分布以及最热通道/热点的计算。

以 TMSR-LF1 堆芯模型进行初步的全堆热工水力计算测试。图 4 为 ThorPGCTH 采用的 3D 固体区域网格划分，图 5 为堆芯温度分布的计算结果。全堆热工水力计算的总耗时在分钟量级，与传统 CFD 程序相比，计算效率得到了极大提高，而精细的固体区域网格划分也保证了 ThorPGCTH 能够获得比传统多通道程序更高的计算精度。

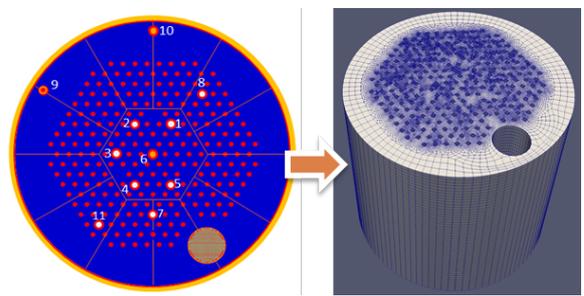


图 4 TMSR-LF1 堆芯固体区域 3D 精细网格划分

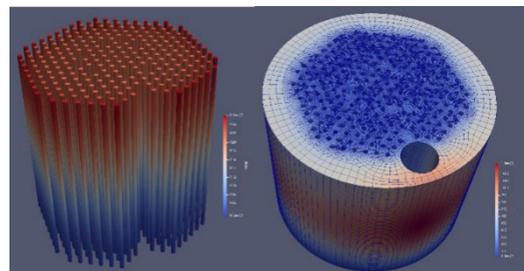


图 5 ThorPGCTH 堆芯温度计算结果。左图为燃料区域温度分布，右图为石墨区域温度分布

## 堆芯子通道程序 ThorSUBTH<sup>[3]</sup>

基于先进氯盐冷却快堆新概念设计和分析需求，以单相流子通道理论作为基础，求解质量守恒方程、径向和轴向动量、能量守恒方程和燃料元件热传导方程，开发了适用于氯盐快堆的堆芯子通道分析程序 ThorSUBTH。ThorSUBTH 针对熔盐的特殊性，换热模型、压降模型以及湍流交混模型均采用了适合熔盐的相关本构模型。

以氯盐冷却固态快堆 LFSR 为验证算例，采用 MIT 针对氯盐冷却快堆修改的 Subchan 子通道程序结果作为对比。图 6 所示为两程序计算得到的最热通道的压降和包壳温度随轴向变化对比，可以看到 ThorSUBTH 与 Subchan 的计算结果符合很好，初步验证了 ThorSUBTH 程序的正确性。

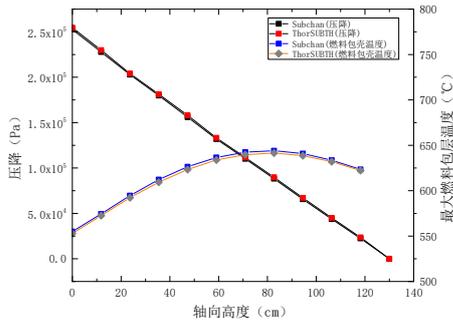


图6 最热通道的压降和包壳温度随轴向变化对比

### RELAP5/Mod4.0 的液态熔盐堆缓发中子先驱核运输模型扩展

在液态燃料熔盐堆中，堆芯产生的缓发中子先

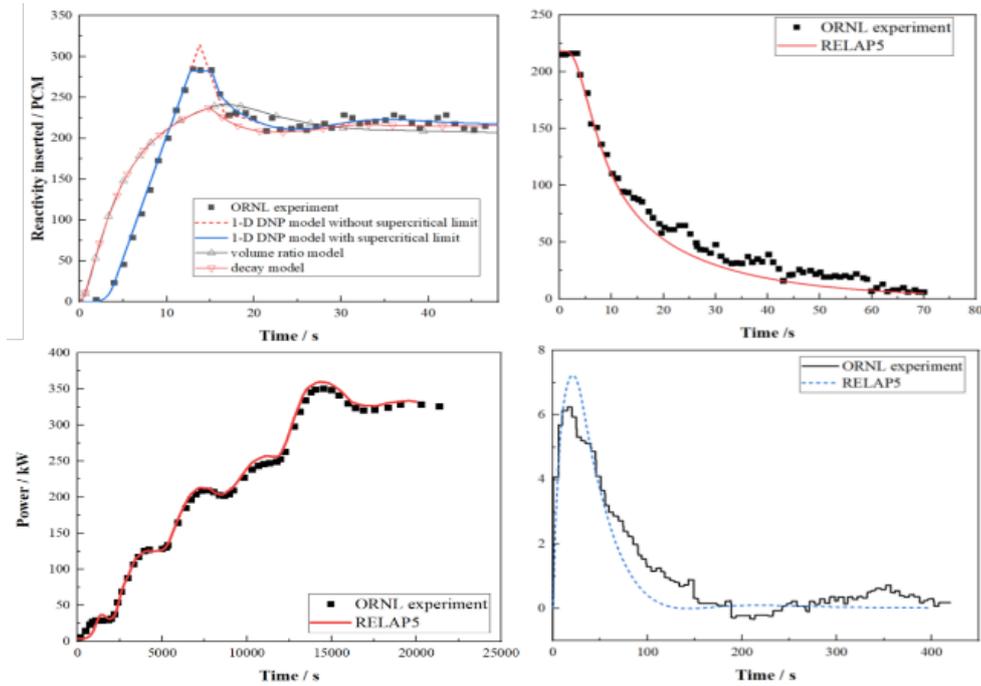


图7 左上：启泵过程控制棒引入的反应性变化。右上：停泵过程引入的反应性变化。左下：自然循环实验堆芯功率随时间变化。右下：1MW下堆功率对 24.8 PCM 反应性阶跃变化的时间响应变化。

### 液态熔盐堆核素演化程序 ThorMODEC<sup>[4,5]</sup>

液态熔盐堆高保真点燃耗程序 ThorMODEC 是针对液态熔盐堆的燃耗特点，结合近些年发展的高精度燃耗求解算法，开发用于复杂核素系统的液态熔盐堆核素演化软件。ThorMODEC 基于 ENDF/B-VIII.0 衰变库，支持库中所有 3820 个核素的衰变计算和燃耗计算。为了保证点燃耗计算的高精度，ThorMODEC 实现了各类先进点燃耗计算方法，包括切比雪夫有理近似方法 (CRAM)、围道积分有理近似方法 (QRAM) 以及线性子链分析方法 (TTA)。

对于液态熔盐堆特有的在线后处理特点，ThorMODEC 采用“伪衰变因子方法”来描述后处理速率；而对于液态熔盐堆的在线连续添料特点，ThorMODEC 则采用了增广矩阵方法和拉普拉斯逆

变换方法。针对在高阶多项式添料问题中，CRAM 和 QRAM 方法的计算精度会随着多项式阶数的增加而迅速丧失，通过研究进一步提出了帕德近似有理近似方法 (PRAM) 并在 ThorMODEC 中实现。

为了验证 ThorMODEC 中新引入的 PRAM 方法对于多项式添料问题的正确性，采用以下验证算例：以 1.0 mol 3% 富集度  $UO_2$  燃料在  $10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  中子通量中燃耗 100 天，在燃耗过程中持续以多项式函数的形式进行燃料添加。图 8 给出了不同 0~6 阶多项式添料的计算结果。可以看到，随着添料多项式阶数的增加，CRAM 方法的计算精度迅速下降，而 PRAM 方法则几乎不受添料率多项式的影响，证明了 ThorMODEC 程序中新引入的 PRAM 方法的正确性以及对于多项式添料问题的高精度特性。

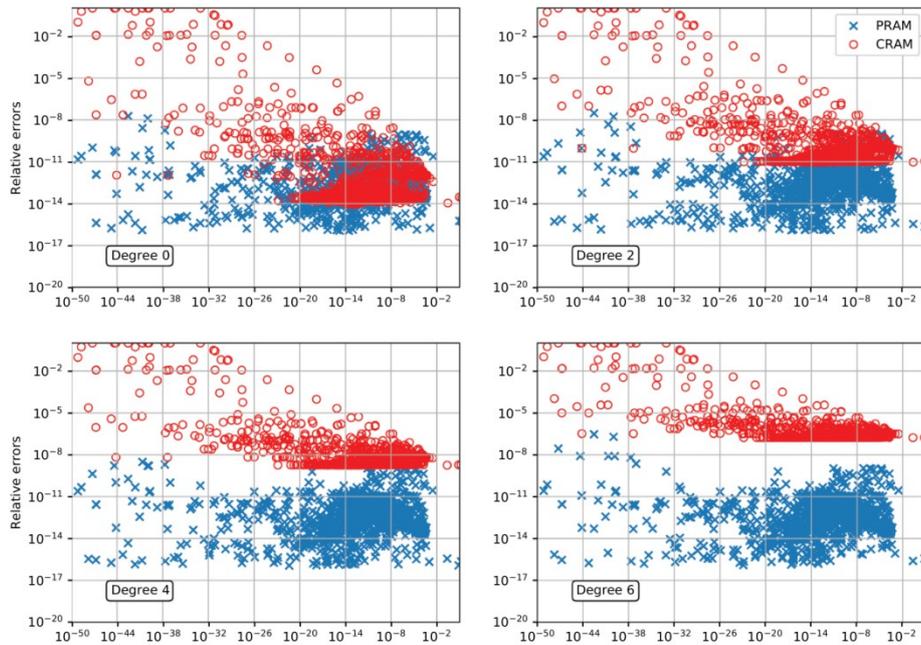


图8 0~6阶多项式添料问题中，燃耗时刻末的核素相对偏差

### 熔盐堆多态混合物质量输运程序 ThorTRANP

在液态熔盐堆中，熔盐燃料一方面发生着各类核反应（中子反应、衰变），另一方面燃料核素及其裂变产物在回路各部件间渗透、扩散、析出、沉积和对流输运。为了准确描述熔盐燃料中核素的演化和分布，我们开发了熔盐堆多态混合物质量输运程序 ThorTRANP。

目前，ThorTRANP 已实现了通用气体裂变产物核素的输运模型。在液态熔盐堆中，气体裂变产物的输运途径主要有四类，分别为随熔盐流动的对流

输运、液相-气相的扩散传质（熔盐-氦泡）、液相-固相扩散传质（熔盐-石墨/金属）以及气相-固相扩散传质（氦泡-石墨）。我们构建了这四类输运过程的控制方程，并在 ThorTRANP 中实现了任意区域划分的燃耗模型与气体裂变产物输运模型的耦合计算。

为了验证程序的正确性，使用 ThorTRANP 计算了 MSRE 稳态及瞬态试验的堆芯氙毒，并与 MSRE 的模拟结果及实际测量结果进行了对比，如图 9a 和 9b 所示。可以看到，ThorTRANP 的计算结果与试验测量结果符合较好，验证了 ThorTRANP 的正确性。

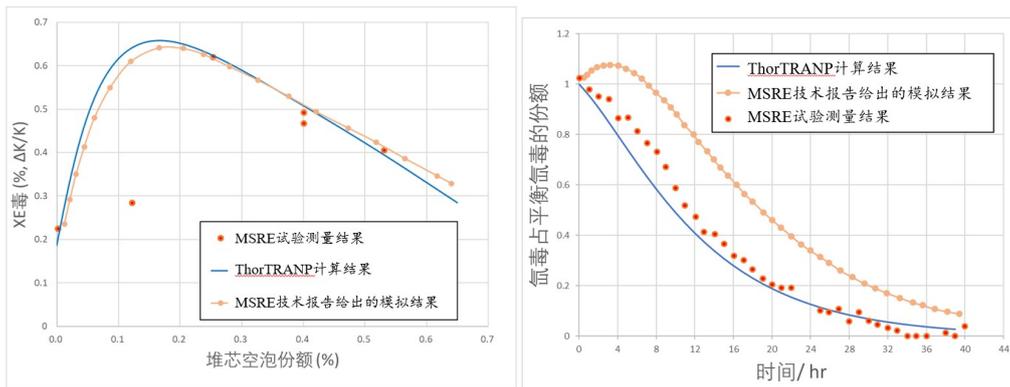


图9 (a) MSRE 稳态试验氙毒结果对比, (b) MSRE 降功率瞬态试验氙毒结果对比

### 参考文献

- 1 程懋松, 林铭, 左献迪, 戴志敏. 基于指数变换的三维六角形节块法动力学程序开发及验证[J]. 核技术, 2018, 41(6): 60604-060604
- 2 虞凯程, 程懋松, 戴志敏. 基于确定论方法的液态燃料熔盐堆燃料管理程序开发及验证[J]. 核技术, 2021, 44(4): 40603-040603

- 3 林铭, 程懋松, 戴志敏. 氟盐冷却快堆子通道程序开发及初步验证[J]. 核技术, 2019, 42(1): 010604
- 4 Xia, Shaopeng, *et al.* "Development of a Molten Salt Reactor specific depletion code MODEC." *Annals of Nuclear Energy*. 2019, 124: 88-97
- 5 Xia, Shaopeng, Maosong Cheng, and Zhimin Dai. "Solving Burnup Equations by Numerical Inversion of the Laplace Transform Using Padé Rational Approximation." *Nuclear Science and Engineering*, 2020, 194: 1143-1161

# 面向智慧核能的数字孪生技术及应用

反应堆物理部，程懋松 夏少鹏 田格瑄

在数字经济时代，数据化、智慧化是核能技术发展的方向。智慧核能是对数字电厂、智能电厂的进一步提升，运用物联网、大数据、人工智能、工业互联网、云计算、无线通信等技术，将智能设计、智能制造、智能建造、智能运维和智能安全充分融合，对核能系统设计、制造、建造、运维、经验反馈等过程中生成的海量数据自动收集、分类、计算、分析和深度挖掘，通过集成智能传感与执行、智能控制与优化、智能管理与决策技术，使核能系统具备自主学习、自适应、自趋优、自判断、自恢复、自组织的能力。智慧核能具有智能感知、信息融合、智能算法、智能决策、管控一体化的特点，并具备全生命周期自动持续优化和进化的能力。

## 面向智慧核能的数字孪生技术研究现状与趋势

近年来，国外对数字孪生技术的理论和应用层面的研究均取得了快速发展<sup>[1]</sup>。数字孪生技术在各领域的应用迅速发展，而无论国内还是国外，有关数

字孪生技术在核能行业的应用大都处于初步探索验证阶段。2020年5月13日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）正式宣布在“核能发电智能管理（GEMINA）”主题框架下资助2700万美元支持9个新项目的研发，致力利用人工智能、数字孪生、先进预测和控制、以及基于模型的故障检测技术，将下一代核电站的运行和维护成本降低10倍，提升核电站的运行效率、经济性和灵活性<sup>[2]</sup>。美国GEMINA项目基本情况如表1所示。

GEMINA 9个项目涉及4种堆型：BWRX-300、HTGR、FHR（4，8）和MSR（7，9）。从空间尺度来看，数字孪生相关的项目中既有全电厂的数字孪生（3，7），也有只针对关键部件的数字孪生（1，5，6，8）；从研究内容来看，主要包含数字孪生的开发（1，3，5，6，7，8）、进行实验获取构建数字孪生的关键数据（9）、利用数字孪生开展先进运维策略研究（1，3，5，6，7，8）三类。

表1 美国GEMINA项目简介

编号	项目承担机构	项目名称	资助金额(万美元)	反应堆类型
1	GE Research	AI-Enabled Predictive Maintenance Digital Twins for Advanced Nuclear Reactors	541.3	BMRX-300
2	Electric Power Research Institute	Build-to-Replace: A New Paradigm for Reducing Advanced Reactor O&M Costs	99.9	-
3	X-energy	Advanced Operation & Maintenance Techniques Implemented in the Xe-100 Plant Digital Twin to Reduce Fixed O&M Cost	600	Xe-100
4	ANL	Maintenance of Advanced Reactor Sensors and Components (MARS)	220	FHR
5	Framatome	Digital Twin-Based Asset Performance and Reliability Diagnosis for the HTGR Reactor Cavity Cooling System Using Metroscope	80.9	HTGR
6	MIT	High-Fidelity Digital Twins for BWRX-300 Critical Systems	118.7	BMRX-300
7	Moltex Energy	SSR APPLIED - Automated Power Plants: Intelligent, Efficient, and Digitized	350	SSR-W
8	University of Michigan	PROJECT "SAFARI"- Secure Automation For Advanced Reactor Innovation	519.5	FHR
9	MIT	Generation of Critical Irradiation Data to Enable Digital Twinning of Molten-Salt Reactors	90	液态燃料熔盐堆

2020年9月14日，法国EDF集团、法马通公司、法国替代能源和原子能委员会，以及来自学术界和法国核能部门的另外6个机构启动了数字堆结构化项目<sup>[3]</sup>。该项目为期4年，将以数字化方式克隆法国所有核反应堆机组。这些数字孪生堆将作为新一代操作人员的培训模拟器和工程研究的模拟环境。100多名专家将共同努力，根据每个核电站的设计，对法国核电站所有反应堆进行数字化。该项目将在法国电力公司巴黎萨克雷实验室研发基地进行整合。该项目直接有助于签订“核能部门战略合同”，以保证维持核能部门的技能和专门知识，并通过数字技术构建创新工艺。

国内，2021年1月5日，由中广核研究院牵头申报的“基于5G网络的智慧核电应用研究与示范”项目成功获批立项，成为中广核研究院在广东省重点领域研发计划的首个重大专项<sup>[4]</sup>。该项目由中广核研究院联合广东省新一代通信与网络创新研究院、南方科技大学、中国联通、工业和信息化部电子第五研究所等单位，围绕核电生产中作业管控、人员管理、应急救援、剂量监测、冷源监视等方面的重点问题，开展面向核电行业的5G专网组网和技术应用示范研究，研发针对核电行业的特殊5G应用终端和专用时间敏感网络设备，探索基于5G专网的人员与生产设备状态监测、实时风险预警与高精度作业

预测、人机协调与远程作业指导等场景应用，在兼顾信息安全的同时，输出 5G+智慧核电的技术指引和标准，实现 5G 与核电的智慧融合，助力核电安全水平与运营业绩提升。

一般认为，数字孪生技术特别适用于资产密集型且可靠性需求高的复杂系统。该技术已逐渐应用到诸多工业领域，又以制造业领域为典型。智慧核能是融合多种复杂设备和工艺流程的综合性复杂系统，可靠性和安全性要求高，与数字孪生技术的应用方向高度契合。然而，有关数字孪生技术在核能行业的应用大都处于初步探索验证阶段，当前数字孪生技术在智慧核能领域应用发展比较零散，没有建立数字孪生技术在智慧核能领域的应用实施框架。

### 面向智慧核能的数字孪生概念及发展

如图 1 所示，数字孪生的理念可追溯到 1969 年，而其明确的概念则普遍认为是在 2003 年由美国密歇根大学的 Michael Grieves 教授提出，当时被称为“与物理产品等价的虚拟数字化表达”，但由于当时技术水平和认知上的局限，数字孪生的概念并没有得到有效的重视<sup>[5-7]</sup>。在 2003-2005 年间，数字孪生一直被称为“镜像的空间模型”，2006-2010 年被称为“信息镜像模型”。美国空军研究实验室与 NASA 在 2011 年开展合作，提出了飞行器的数字孪生体概念，数字孪生才有了明确的定义。2012 年，NASA 发布“建模、仿真、信息技术和处理”路线图，数字孪生概念正式进入公众视野。2013 年，美空军发布《全球地平线》顶层科技规划文件，将数字线程和数字孪生并列视为“改变游戏规则”的颠覆性技术，并从 2014 财年起组织洛马、波音、诺格、通用电气、普惠等公司开展了一系列应用研究项目。就此，数字孪生理论与技术体系初步建立，美国防部、NASA、西门子等公司开始接受这一概念并对外推广。

随着工业 4.0，智能制造等技术和发展战略的不断出台，数字孪生技术逐步成为智能制造的一个基本要素，并得到了各方的普遍关注。洛克希德马丁公司于 2017-11 将数字孪生列为 2018 年未来国防和航天工业顶尖技术之首；英国国家基础设施委员会于 2017-12 发布《数据的公共利益报告》(Public Good report)，提出创建一个与国家基础设施相对应的数字孪生体，并于 2019-01 启动相关计划；2018 年，德国开始把数字孪生作为在德国工业 4.0 主攻方向和重要内<sup>[10]</sup>。Gartner 公司连续 3 年(2017-2019 年)将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一<sup>[11-13]</sup>。



图 1 数字孪生发展历程<sup>[8]</sup>

数字孪生发展历程可以划分为四个阶段<sup>[9]</sup>:

- 21 世纪之前，技术积累期，CAx 软件为数字孪生的出现奠定了技术基础。
- 2000-2015 年，概念提出期，美国军方机构开始提出数字孪生的相关概念。
- 2016-2020 年，应用萌芽期，工业软件巨头纷纷布局数字孪生业务。
- 2021-未来，快速发展期，数字孪生技术和产业生态都将迎来爆发期。

综合各类定义描述，面向智慧核能工程应用，软件中心概括数字孪生的定义如下：数字孪生技术充分利用精细化物理模型、智能传感器数据、运维历史、设计与实验等数据，集成核、热、流体、力学、化学、控制等多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成对核能系统的映射；数字孪生实例反映对应智能设备的全生命周期过程，能够实时更新与动态演化，进而实现对核能系统的真实映射。

数字孪生典型特征:

- **数据驱动**-本质是以数据流动实现物理世界的资源优化。
- **模型支撑**-核心是面向物理实体和逻辑对象建立机理模型或数据驱动模型，形成物理空间在数字空间的虚实交互。
- **软件定义**-关键是将模型代码化、标准化，以软件的形式动态仿真或监测物理空间真实状态、行为和规则。
- **精准映射**-通过感知、建模、软件等技术，实现物理空间在数字空间的全面呈现、精准表达和动态监测。
- **智能决策**-融合人工智能等技术，实现物理空间和数字空间的虚实互动、辅助决策和持续优化。

### 智慧核能总体技术框架

如图 2 所示，软件中心提出“615”智慧核能技术框架，即以高性能计算，结合 5G 物联网、工业互

联网和云边协同的 5G 云边协同智能网,高保真数字核电厂,核能大数据,VR/AR/MR 虚拟仿真技术和人工智能作为 6 大技术支撑基础,通过物理与数字电厂之间的数据协同实时交互,创建精确、全面的机理模型和数据混合驱动的智慧核能数字孪生,以智慧核能数字孪生为核心(1 个核心),部署智能设计、智能制造、智能建造、智能运维和智能安全 5 大方面的应用,对核能相关电厂和设施从研发、设计、制造、建安、运维、检修、延寿到退役的全生命周期进行实时集中监控、精确仿真、精准管理、在线推演、智能预测和指导。

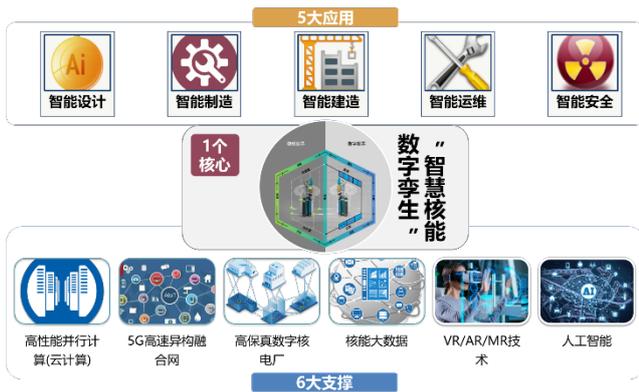


图 2 智慧核能总体技术框架

### 面向智慧核能的数字孪生架构

如图 3 所示,结合数字孪生的通用架构,软件中心提出了新一代智慧核能数字孪生建模与仿真平台架构。如图 4 所示,基于 TMSR 数字孪生建模与仿真平台反应堆数字孪生实施、部署和运行流程示意图。新一代智慧核能数字孪生建模与仿真平台主要由 5 个模块组成:基于多学科、多物理核多尺度的精准建模与仿真;三维虚拟场景核状态看板为主、以实时视频核增强现实为辅的数字孪生多层次可视化和交互;多源异构数字孪生大数据管理;基于区块链、5G 物联网和人工智能的综合感知系统;基于仿真、大数据和人工智能的在线推演、预测评估和优化。

数字孪生支持智慧核能从概念设计到运营阶段维护全过程。

- 1) 产品设计阶段。利用数字孪生可以提高设计的准确性,并验证产品在真实环境中的性能。包括数字模型设计、建模和仿真。
- 2) 工艺设计阶段。在“三维设计模型 + PMI + 关联属性”的基础上,实现基于三维产品模型的工艺设计。
- 3) 生产制造阶段。主要实现产品制造信息的采集和全要素重建。包括生产过程仿真、数字化生产线、关键指标监控和过程能力评估
- 4) 产品服务阶段。采集产品运行阶段的环境和工

作状态,并通过数据分析和优化来减少甚至避免产品的故障,改善用户对产品的使用体验。包括远程监控和预测性维修、优化产品运行指标和使用反馈。

- 5) 产品报废/回收阶段。此阶段主要记录产品的报废/回收数据。为下一代产品的设计改进和创新、同类型产品的质量分析及预测、基于物理的产品仿真模型和分析模型的优化等提供数据支持。

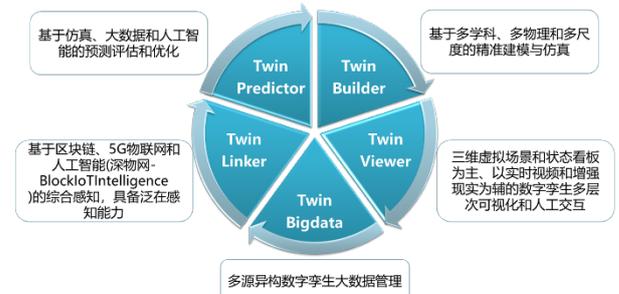


图 3 TMSR 数字孪生建模与仿真平台架构

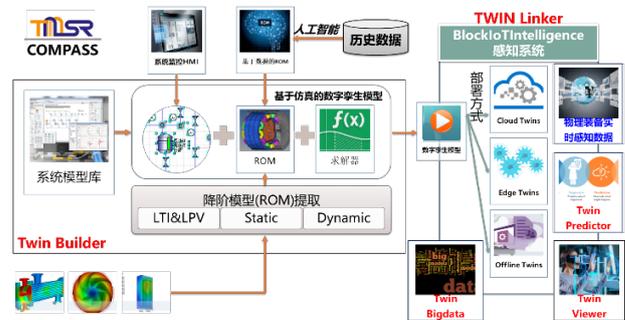


图 4 基于 TMSR 数字孪生建模与仿真平台的数字孪生实施、部署和运行流程示意图

### 应用案例-“十四五” TMSR 智慧核能建设方案

总体建设方案如图 5 所示,基于完整的熔盐堆设计、实验和运行数据,结合高性能并行计算集群、5G 高速异构融合网、高保真数字熔盐堆建模与仿真、核能大数据、VR/AR/MR 虚拟仿真技术和人工智能技术,构建 TMSR 研究堆高保真机理模型和高可靠运行数据混合驱动的熔盐堆数字孪生系统。依托 TMSR 数字孪生系统,对研究堆设计进行真实环境的在线评估和验证,对运行过程中系统和设备性能与故障、堆内燃料盐复杂物理与化学行为及构件服役行为进行实时集中监控、精确仿真、精准管理、和在线预测,确保研究堆安全与稳定运行。

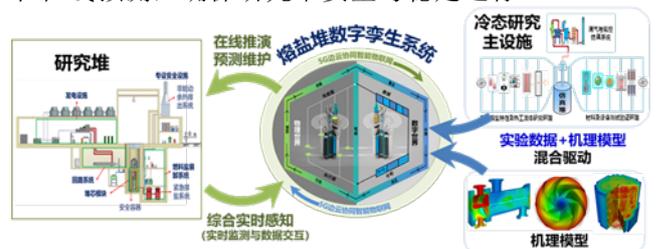


图 5 基于数字孪生技术的“十四五” TMSR 智慧核能方案

新一代熔盐堆数字孪生建模与仿真平台是 TMSR 数字孪生的核心。新一代熔盐堆数字孪生建模与仿真平台为工程设计人员提供统一、用户友好的可视化建模环境，并且采用 FMI 标准为各类设备及系统的仿真模型提供统一的接口和集成环境。基于新一代熔盐堆数字孪生建模与仿真平台，可以对熔盐堆进行基于系统和设备级的数字化建模，通过调用、链接系统模型库中通用或专用设备的仿真模型以及基于高保真降阶模型的 FMU 组件，进一步创建完整的基于机理模型与数据混合驱动的熔盐堆数字孪生模型。基于创建的熔盐堆数字孪生模型，可以对研究堆进行全方位、全生命周期的高保真实时和超实时仿真模拟计算，为设计人员、操作人员和运维人员提供支持。

### 参考文献

- 1 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17
- 2 Tao F, Zhang H, Qi Q L, *et al.* Ten questions towards digital twin: analysis and thinking [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 1-17
- 3 ARPA-E. GEMINA (Generating Electricity Managed by Intelligent Nuclear Assets) Project Descriptions[EB/OL]. (2021-05-13). <https://arpa-e.energy.gov/document/gemina-project-descriptions>
- 4 WNN.Project launched to digitally clone all French reactors[EB/OL].(2020-09-23).<https://world-nuclear-news.org/Articles/Project-launched-to-digitally-clone-all-French-rea>
- 5 Laboratory of Digital Twins, Pera Global Technology Co., Ltd.White paper on digital twin technology (2019)[R]. Beijing: Laboratory of Digital Twins, Pera Global Technology Co., Ltd.,2019
- 6 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 李欣, 刘秀, 万欣欣. 系统仿真学报, 2019(03)
- 7 GRIEVES M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development (S1477-9056), 2005, 2(1/2): 71
- 8 安世亚太科技股份有限公司数字孪生体实验室. 数字孪生体技术白皮书 (2019)[R]. 北京: 安世亚太科技股份有限公司数字孪生体实验室, 2019
- 9 中广核研究院有限公司.中广核研究院首次牵头广东省重点领域研发计划重大专项 [EB/OL].(2021-01-07). [https://www.sohu.com/a/443149211\\_707297](https://www.sohu.com/a/443149211_707297)

# TMSR-LF1 堆芯流量分配验证试验

反应堆物理部, 田健 陈兴伟 张金红 周翀 邹杨

2 MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆 (TMSR-LF1) 堆芯总热功率 2 MWt, 堆芯熔盐采用  $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  (65.30%-28.71%-4.79%-1.20%), 进口熔盐温度 630 °C, 出口熔盐温度 650 °C, 额定流量 50 kg/s<sup>[1]</sup>。正常运行时, 熔盐从下腔室底部中心进口进入下腔室, 经下腔室流量分配装置和堆芯支撑板上设置的各种孔道分别进入堆芯活性区通道, 熔盐穿过堆芯通道后经过堆芯上部压板上孔道进入上腔室, 燃料盐进入上腔室交混后从椭圆形上腔室顶部出口管道流出。在此过程中, 燃料盐大部分核裂变能在通过堆芯活性区通道时释放, 并且活性区不同区域通道内熔盐释热功率不同, 因此设计合理的堆芯活性区通道入口熔盐流量分配, 可以将堆芯热量有效带出, 降低堆芯热点温度, 保证反应堆安全运行<sup>[2]</sup>。

整体模型试验是获取反应堆水力特性直接、有效和可靠的途径<sup>[3-5]</sup>, 通过整体模型试验与数值模拟相结合, 能较准确地理解原型反应堆内部水力特性。

堆芯通道流量分配验证试验是在给定工况下, 测量得到模型堆芯各个通道内流体的流量, 然后各个通道内流体的流量与所有通道平均流量比较, 最终得到堆芯不同区域通道内流体流量分配均匀因子。比较试验测量结果与设计分析结果, 最终完成 TMSR-LF1 堆芯入口流量分配设计验证。

## 1 流量分配验证试验装置

通过相似准则分析, 可以确定试验模型结构和运行相关参数。反应堆水力模型的设计以流体力学第二相似定理为依据, 必须满足几何相似、运动相似、动力相似及边界条件相似。试验中, 影响流动特性的主要参数为堆内各处的流速  $V$ 、流体的密度  $\rho$ 、流体区域结构长度  $l$ 、当量直径  $d$ 、粗糙度  $\Delta$  和流体的粘性系数  $\mu$ 、流动压降  $\Delta P$ , 这些参数满足下式:

$$F(V, \rho, l, d, \Delta, \mu, \Delta P) = 0$$

经过量纲分析, 可将上式整理成欧拉数的表达式:

$$Eu = \Delta P / \rho V^2 = f(Re, l/d, \Delta/d)$$

在本次试验过程中, 暂不考虑粗糙度影响, 为使模型能体现原型流动特性, 需要保证几何相似、雷诺数相似, 同时也保证了欧拉数相似<sup>[6-7]</sup>。

为满足试验模型与 TMSR-LF1 几何相似, 试验模型采用 TMSR-LF1 1:1 等比例尺寸水力模型。

为方便试验顺利开展和测量, 本次验证试验流体介质采用常温液态水。通过水力分析确保堆芯活性区通道雷诺数相同, 可以得到模型参数和运行工况参数如表 1 所示。

表 1 试验模型参数和运行工况参数分析

名称	TMSR-LF1	试验模型
流体	$\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$	水
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2156 @ 640 °C	997 @ 25 °C
动力粘度(kg/(m s))	0.008 @ 640 °C	0.0009 @ 25 °C
几何比例	1	1
进口接管数量	1	1
出口接管数量	1	1
长度比例	1	1
流量(kg/s)	50	5.6
流量(m <sup>3</sup> /h)	83.5	20.2
熔盐通道流速(m/s)	0.073	0.0177
熔盐通道雷诺数	781	781
上腔室出口管雷诺数	69381	69318

堆本体试验模型内部主要的流道几何结构按 TMSR-LF1 堆芯尺寸 1:1 进行设计。为保证验证试验结果的有效性, 试验模型保留原型堆堆芯主要流体区域, 包括进口接管、下腔室、下腔室内部流量分配板、堆芯通道、功能通道、上腔室及出口接管等, 安装完毕的试验模型如图 1 所示。



图 1 堆芯流量分配试验模型

模型设计与加工过程中对堆芯通道流量分配结果影响较小的结构进行了简化, 包括 TMSR-LF1 堆芯石墨块之间的缝隙结构、堆芯通道进口位置与出口位置结构突变等。

试验回路系统布局图如图 2 所示, 该系统由水箱、冷却加热系统、循环水泵、稳压器、旁流支路、流量测量试验段、试验本体、流量与压差测量系统、

控制系统、回路管道与阀门组成。自来水经水处理系统净化后储存在水箱，水箱内的去离子水经温度调节装置调节至所需温度后，在循环泵的驱动下进入试验回路，通过流量计及管路阀门调节到给定的流量值，流经试验本体完成测量后送回水箱形成循环。

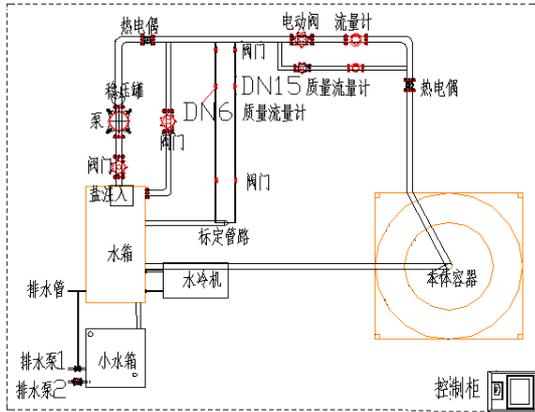


图2 堆芯流量分配试验回路示意图

## 2 试验测量

本试验中，在确定的工况下，试验模型堆芯通道内流体流速较小，流动压损较小（几 Pa），并且堆芯通道数量较大，管道间距离较小，常规流量计无法满足本验证试验流量测量要求。为此，本试验堆芯通道流量测量创新采用了电导率示踪测量法。

初始情况下，去离子水在回路内稳定运行，此时相距  $L$  的测点 1 和测点 2 处两个电极丝间电流很小；然后在回路中加入定量确定浓度充分交混的电解质溶液，当电解质溶液随流体流动到达测点 1 时，由于流体导电性增加，两个电极丝之间的电流会突然变化，记录测点 1 处电导率随时间变化曲线  $x_1$ ，当电解质溶液随流体流动到达测点 2 时，两个电极丝之间的电流也会突然变化，记录测点 2 处电导率随时间变化曲线  $x_2$ ，根据信号互相关性分析可以得到流体从测点 1 流到测点 2 所用时间  $\Delta t$ 。管道内两组电极丝间流体的流速可以表示成：

$$v_{12} = L / \Delta t$$

根据不同流速下电导率示踪法测量流速与管道内流体平均流速之间的标定关系  $f(v)$ ，可以得到通道内流体平均流速  $V$ ：

$$V = f(v)$$

再根据通道的流通截面积  $A$ ，可以得到管道内流体的流量：

$$Q = VA$$

由于电导率示踪法测量得到的是通道内电极丝区域流体流速，而非通道内流体平均流速，因此无法直接通过测量结果得到通道内准确流体流量，需要

与标准测量方法进行比较，确定示踪法流速测量结果与通道平均流量的关系。

通过单通道标定试验完成入口水温度  $25^\circ\text{C}$ ，不同流量工况下电导率示踪法流量测量标定试验。通道内流体平均流速通过标准流量计测量给出，测点流速通过电导率示踪法测量得到，通过多项式拟合得到通道内流体平均流量  $V$  与电极测点处流速  $v$  的应关系如下：

$$V = f(v) = 2.6267v^2 + 0.3792v + 0.0038$$

电导率流量测量法的优点在于电解质溶液的跟水性较好，可以很好的表征流体流速；此外，通过设计模拟堆芯通道内电极与数据获取系统，可以完成试验模型所有堆芯通道内流体流量同时测量，测量效率高，测量结果同时性好。

## 3 试验测量结果

对应于 TMSR-LF1 设计额定工况，模型试验工况为堆芯进口水温度  $25^\circ\text{C}$ ，进口流量  $20\text{ m}^3/\text{h}$ 。在此工况下，经过多次试验测量，得到 6 组有效数据。对径向距离相同、周向位置不同的所有通道内流量取平均，可以得到堆芯通道径向流量分配因子。

堆芯通道流量分配因子结果不确定<sup>[8]</sup>主要来自于以下两部分叠加：

- (1) 通道内流量测量不确定，为 4.16%；
- (2) 堆芯截面上距离中心径向距离相同、周向位置不同的通道内流量与此区域通道平均流量偏差。测量得到模型不同径向位置堆芯通道入口流量分配均匀因子结果和不确定度如图 3 所示。

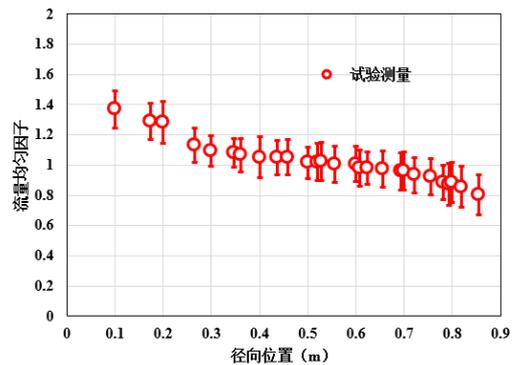


图3 额定工况下堆芯通道流量分配均匀因子测量结果

## 4 仿真分析与设计验证

额定工况下，TMSR-LF1 与试验模型上下腔室流体流动湍流效应相对比较明显，而堆芯通道内流体平均雷诺数小于 1000，同时流体在堆芯通道内流动路程较短，因此通道内流动状态为未充分发展层流。在计算流体力学仿真分析过程中，流动模型的选择是决定分析结果是否准确的重要因素，考虑到

流体在不同区域的流动状态，上下腔室分析采用湍流模型，堆芯通道分析选取了不同的流动模型：分别采用近壁面处理的湍流模型与层流模型进行分析。

采用不同流动模型的仿真分析结果与模型试验测量结果比较见图4。结果表明，上下腔室采用湍流模型，堆芯通道采用近壁面处理的湍流模型仿真分析结果与试验测量结果最大偏差5%。上下腔室采用湍流模型，堆芯通道采用层流模型仿真分析结果与试验测量结果差别最大偏差15%。

上述结果表明，计算流体力学软件可用于试验模型水力分析，试验模型堆芯水力分析过程中，在流动模型选择上，上下腔室采用湍流模型，堆芯通道采用近壁面处理的湍流模型仿真分析结果与模型试验结果符合更好一些。

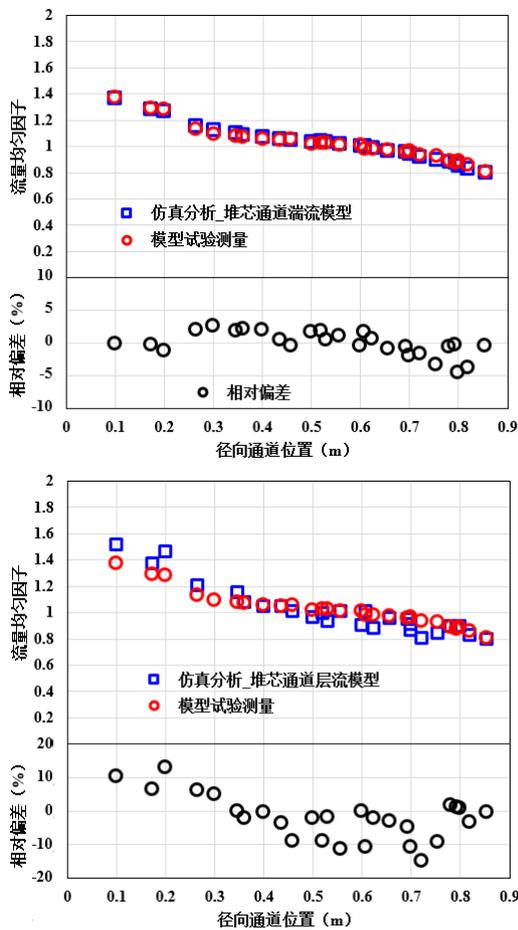


图4 模型仿真分析结果与试验测量测量结果比较

在 TMSR-LF1 堆芯热工水力设计过程中，分析工具采用计算流体力学软件( Fluent)，为简化计算，堆芯结构模型采用对称处理的 1/12 扇形柱体结构。由于堆芯通道内燃料盐流速较低，处于未充分发展层流状态，因此在分析过程中，堆芯通道流动采用近壁面处理的湍流模型和层流模型两种处理方式，并在强迫对流的基础上叠加考虑自然对流传热的影响。

TMSR-LF1 额定工况下，熔盐流量为 50 kg/s，入口温度 630℃，燃料熔盐在堆芯通道内释放绝大部分核热后，出口温度升至 650℃。模型试验中，额定工况下，堆芯入口水流量 20 m<sup>3</sup>/h，入口温度 25℃，流体不发热。

TMSR-LF1 堆芯热工水力设计中对堆芯通道采用不用流动模型得到的堆芯通道流量分配均匀因子分析结果与模型试验测量结果对比如图 5 所示。可以得到以下结论：

(1)采用不用流动模型得到的 TMSR-LF1 堆芯通道流量分配设计分析结果与模型试验测量结果基本相符合，其中，中心区域通道（通道径向位置与中心距离较小区域）内流体流量分配均匀因子较大，随着通道径向位置远离中心，通道内流体流量分配均匀因子逐渐减小，边缘区域通道流量分配均匀因子达到最小。

(2)中心区域 TMSR-LF1 堆芯通道流量分配均匀因子设计分析结果大于模型试验测量结果，其中湍流模型最大偏差 7%，层流模型最大偏差 10%；边缘区域 TMSR-LF1 堆芯通道流量分配均匀因子设计分析结果小于模型试验测量结果，其中湍流模型最大偏差 10%，层流模型最大偏差 13%。

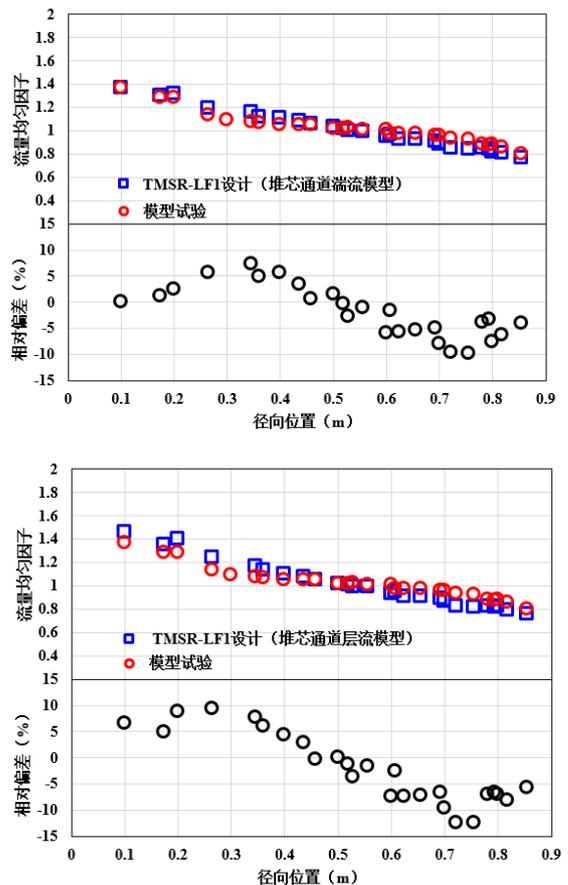


图5 额定工况下 TMSR-LF1 设计分析与模型试验测量结果比较

## 5 结论

通过整体模型验证试验，完成堆芯通道流量分配验证试验测量与结果分析，结论如下：

(1) 模型试验测量得到额定流量工况下模型堆芯通道流量分配因子范围为 1.4-0.8，位置从中心到边缘单调减小，测量结果最大不确定度 16.7%。

(2) 模型的 CFD 仿真分析结果与试验测量结果最大偏差 12%，此计算结果在试验测量的不确定度范围之内，表明计算流体力学分析可用于 TMST-LF1 堆芯水力分析。

(3) TMSR-LF1 堆芯通道流量分配设计与模型试验测量结果基本相符合，活性区中心区域通道流量分配均匀因子最大偏离 10%，边缘区域通道流量分配均匀因子最大偏离 13%。

## 参考文献

- 1 TMSR-LF1-SINAP-22-THHY-DS-0001-C, 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1)热工水力设计说明书
- 2 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-006-C, 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1)反应堆堆芯热工水力设计分析报告
- 3 杨来生, 宗桂芳, 胡俊. 秦山核电二期工程反应堆水力模拟实验模型的简化, 核动力工程, 2003, 24(2)
- 4 喻丹萍, 蒋贤国, 张建伟, 等. 中国先进研究堆全堆芯流致振动及流量分配试验研究, 原子能科学技术, 2008年, 42(增): 711-714
- 5 丁宗华, 张明, 林绍萱. CAP1400 反应堆堆芯入口流量分配试验研究, 原子能科学技术, 2018, 52(9)
- 6 姚伟达, 施国麟, 姜南燕, 等. 核电厂设备的流-固耦合动力学相似准则的推导和应用, 振动和冲击, 1997, 16: 140-145
- 7 丁宗华, 刘彬, 林绍萱. CAP1400 反应堆整体水力模拟试验件的设计, 发电设备, 2016, 30: 153-155
- 8 JJF1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示, 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2012

## TMSR-LF1 非能动余热排出系统性能验证试验

反应堆物理部，傅瑶 袁晓凤 王允 梅牡丹 孙强 李启明 张金红 杨洋 徐博 周翀

非能动余热排出系统属于专设安全系统，是核电站最重要的安全系统。非能动余热排出系统是 TMSR-LF1 反应堆设计基准事故的安全保护和缓解措施，余热排出能力的可靠性需满足专设安全设施的要求。为了验证非能动余热排出系统的排热能力，建立了 TMSR 综合试验平台中的缩比仿真堆（TMSR-SF0）试验台架，进行系统排热能力试验。

非能动余热排出系统设计中，堆芯内热量主要通过堆容器壁面热辐射等传递给布置在堆舱内的余排换热装置，堆容器壁面温度对系统排热能力影响很大。排热能力验证试验中，通过加热棒模拟堆芯加热功率，获得了多个堆容器壁温下的余热排出系统排热能力数据，验证了系统的排热能力。

### TMSR-SF0 缩比仿真堆



图1 TMSR-SF0 缩比仿真堆

TMSR-SF0 是以 TMSR-LF1 为原型的原理验证试验装置，由堆芯（采用管道型电加热器）、堆本体、回路、堆舱（分为下堆舱和上堆舱，含非能动余排装置）、测量与控制、气路等辅助系统组成。TMSR-SF0 装置 2018 年 10 月启动开工建设，2019 年 4 月开始冷态调试，2019 年 7 月开始热态调试，2020 年 2 月开始带盐运行，主要开展与 TMSR-LF1 相关的设计、安全、技术和设备等设计分析验证实验，包括热工水力研究、安全验证、程序验证、现象验证、设备设计分析验证、仿真机等。TMSR-SF0 试验平台现场图参见图 1。

缩比仿真堆非能动余热排出系统的系统结构图如图 2 所示，余排装置分为东西两套，每套由进风管、风门、换热装置、排气塔组成。西侧余排进风管处装有支路风机，支路风机可变频调节。非能动余热排出系统采用空气自然循环方式设计最大功率 13.7 kW，反应堆容器内热量通过热传导、自然对

流换热和热辐射等非能动方式，排入到堆舱中。堆舱中设有余排换热装置，冷空气通过冷却换热装置壁，将热量排入最终大气热阱。冷空气工作流程为：通过进风管到达余排换热装置，在余排换热装置内吸热后，进入出风管，最后通过排气塔排入大气。

非能动余热排出系统中的余排换热装置采用环腔结构，共两台（各半个环腔）配 2 个进出风门及进出风管对应的 2 台排气塔。风管进口处设有风箱，外部冷空气可以通过风箱直接进入非能动余热排出系统。出风管出风口设有风帽。出风管及排气塔外部设有保温层，进出风管及换热装置上设有温度、压力与流量测点。

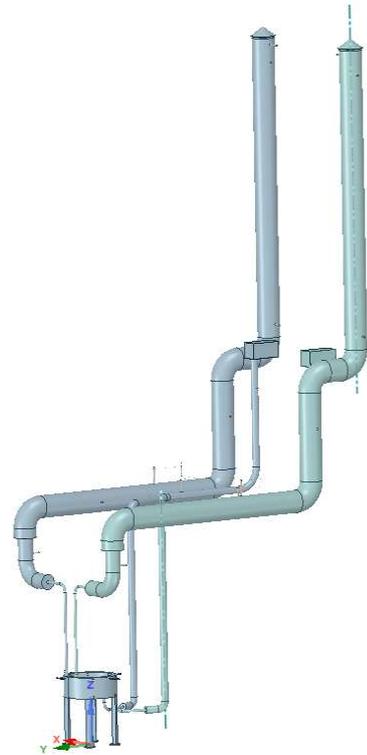


图2 TMSR-SF0 非能动余热排出系统结构示意图

非能动余热排出系统排热能力验证试验中，主要测量了装置进出口的空气温度，空气流量，进出口压差与换热装置温度。非能动余热排出系统中，在进出口管道内装有内插式热电偶，测量进出口空气温度。在进出口管道内也装有空气流量测量装置。空气流量测量采用热式质量流量计。热式质量流量计采用热差分原理，通过热传导来计算气体的质量流量。进出口之间的空气压差通过加长引压管的方式利用压差传感器来测量。具体测点布置参见图 3 与图 4。

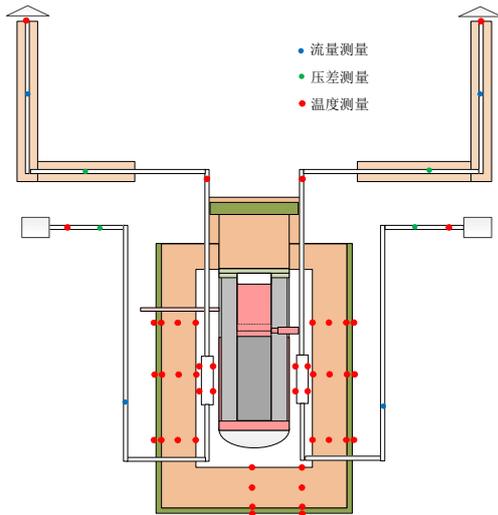


图3 TMSR-SF0 非能动余热排出系统测点布置示意图

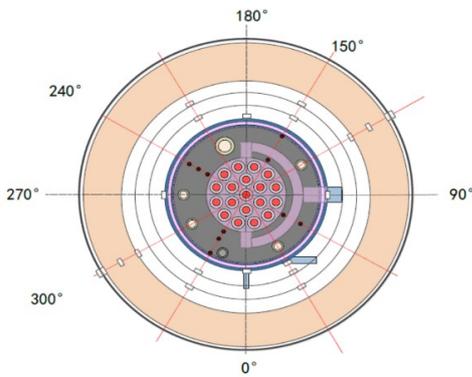


图4 TMSR-SF0 堆舱测点布置示意图

### 非能动余热排出系统排热能力试验

非能动余热排出系统排热能力验证试验基于 TMSR-SF0 试验平台开展，试验验证非能动余热排出系统空气自然循环设计结构下的排热过程；验证非能动余热排出系统的排热能力，对非能动余热排出系统的设计及其方法进行试验验证，为实验堆许可证的获取提供试验依据。

非能动余热排出系统模拟试验装置依托缩比仿真堆试验台架，采用以 TMSR-LF1 设计为原型的缩比方案，堆芯采用电加热棒模拟反应堆功率变化。

在非能动余热排出能力测量试验过程中利用进出口温差及流量可求得非能动余热排出系统的排热量。具体试验可分为 2 个阶段：1) 常温系统阻力系数试验；2) 排热能力试验。

2019 年 6 月至 7 月完成非能动余热排出系统阻力试验，2019 年 10 月至 2020 年 4 月完成非能动余热排出系统排热能力试验。

系统阻力试验中，非能动余热排出系统入口风管处装有变频风机，通过调整风机频率可调整空气进口流速，由此可以获得多个流速下的系统阻力。试验中主要测量参数有：进口空气温度，空气流量及进出口空气压差。

排热能力试验中，通过调整堆芯加热棒电流使加热功率与散热功率达到热平衡。试验中主要关注的参数状态有：加热功率恒定（控制加热棒电流保持不变），系统达到长时间稳态。试验中需要测量的主要有：进出口空气温度，空气流量及进出口空气压差，以及堆容器、堆舱温度。温度测点布置于下堆舱及非能动余热排出系统进出风管、换热装置等各个部分共计 74 个。流量测点布置在非能动余热排出风管及进风管上，共 2 个测点。压差测点位于进风管与出风管处。

通过试验，获得了系统管路的阻力特性，并获得了不同堆容器壁面温度下系统的排热能力参数。根据系统阻力试验与排热能力试验结果，参照非能动余热排出计算方法，分别对系统水力、传热计算进行了验证分析。理论计算中弯头（弯管）的阻力系数不同公式有一定差别，截面突扩、截面渐扩有两种不同算法。在计算中，参照调研结果分别选用了最大、最小两组不同的计算公式与方法，两组弯头、截面突扩、截面渐扩阻力系数。

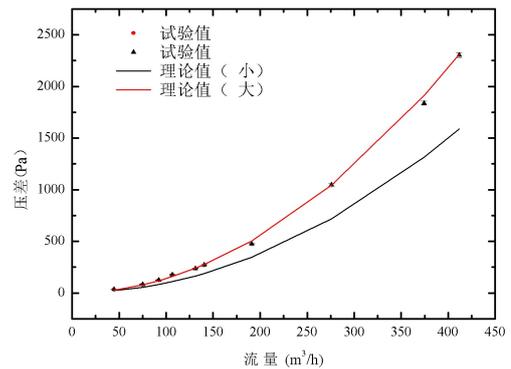


图5 系统阻力理论计算与试验结果对比

系统阻力试验与理论分析结果显示，理论计算选用最小阻力的计算方法得到的阻力值比试验值偏小，且随着流量增大理论与试验值偏差变大。最大阻力方法得到的阻力值与试验值吻合较好，后继排热能力验证试验中，系统阻力计算应选择阻力系数应选择较大的参数。

排热能力验证试验中对比分析中，先给单项水力计算、堆舱传热计算、余排换热装置冷却的结果，并根据试验结果分析给出了最佳估算的理论计算系数。最后综合给出了系统排热能力的试验结果并与最佳估算值和保守估算值（设计用）进行了对比。

通过试验获得了不同堆容器壁面温度下的非能动余热排出系统传热能力，理论最佳估计计算值与试验值各项参数吻合较好。并通过理论最佳估算模型评估了 TMSR-LF1 非能动余热排出系统排热能力，结果显示试验堆余热排出系统排热能力满足系统功能需求。

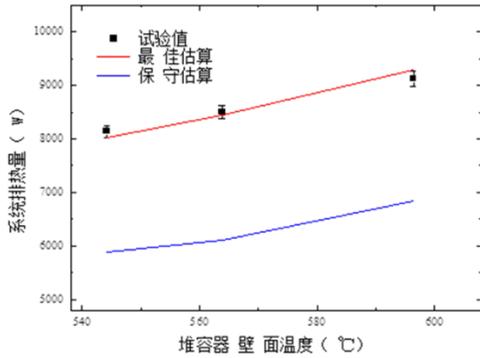


图6 余排系统传热量理论计算与试验结果对比-东侧

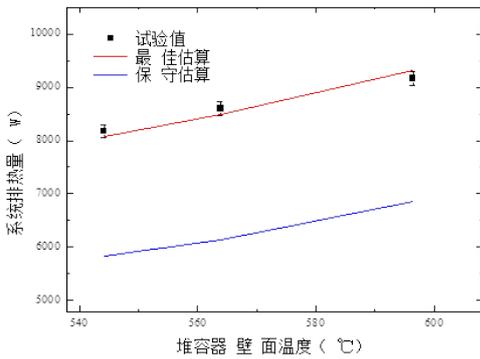


图7 余排系统传热量理论计算与试验结果对比-西侧

## 结论

非能动余热排出系统排热能力试验完成了系统阻力试验与排热能力验证试验。系统阻力试验中，通过调整支路风机频率获得了不同流量下的压差，获得了系统阻力特性参数。排热能力验证试验中，通过测量热平衡状态下的余热排出系统空气流量与进出口温度，获得了余排换热装置排热量。

对比了试验结果与理论计算结果，并对TMSR-LF1非能动余热排出系统进行了分析，有以下结论。

1) 系统传热量、水力计算、堆舱传热、换热装置换热过程物理模型与参数选择合适，试验结果与理论最佳估算计算结果吻合较好，各个主要参数参数偏差都在5%以内。

2) 非能动余热排出系统模拟试验装置设计中，采用了保守假设。根据保守假设进行系统设计，实际排热能力高于需求排热能力。

3) TMSR-LF1与模拟试验装置设计采用了与TMSR-SF0同样的设计方法，根据分析结果：600°C壁温下，满足系统需要的排热能力的功能要求，且有足够的裕量。

## 参考文献

- 1 E·约翰芬纳莫尔, 约瑟夫 B·弗朗兹尼,《流体力学及其工程应用》,钱冀稷等译,北京:机械工业出版社,2005, 234
- 2 路耀庆等,《实用供热空调设计手册》,北京:中国建筑工业出版社,2008,1097
- 3 杨世铭等,《传热学》,北京:高等教育出版社,1998,178.
- 4 弗兰克, P·英克鲁佩勒等,《传热和传质基本原理》,葛新石等译,北京:化学工业出版社,2011,342
- 5 《非能动余热排出系统排热能力验证试验方案》TMSR-LF1-SINAP-22-THHY-DS-0029-C
- 6 《非能动余热排出系统排热能力验证试验大纲》TMSR-LF1-SINAP-22-THHY-DS-0032-C
- 7 《TMSR-LF1非能动余热排出系统设计报告》TMSR-LF1-SINAP-22-THHY-DS-007-C
- 8 《2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆非能动余热排出系统排热能力验证试验报告》TMSR-LF1-SINAP-22-THHY-DS-037-C

## 2 MW 钍基熔盐实验堆 TMSR-LF1 热工水力设计

反应堆物理部, 周翀 傅瑶 田健 李启明 徐博 孙强 王允 梅牡丹 杨洋 张金红

2011年中国科学院瞄准核能领域国家重大战略需求, 启动了“未来先进核裂变能—TMSR 钍基熔盐堆核能系统”战略性先导科技专项, 计划用 20 年时间, 全面掌握钍基熔盐堆关键技术, 实现商业应用。其第一步是进行 2 MW TMSR-LF1 液态燃料钍基熔盐实验堆建设, 完成关键技术的系统集成与概念验证, 为大型堆建设积累技术经验。热工水力组承担 2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆 TMSR-LF1 热工水力设计分析工程任务, 完成了 TMSR-LF1 实验堆方案设计、初步设计、初步设计深化、施工图设计各阶段的热工水力设计与安全分析。TMSR-LF1 实验堆热工水力设计通过第四代核能系统国际论坛 (GIF) 熔盐堆专家组的评审及国内专家组评审, 通过 PSAR 安全评审专家组评审, 目前正在开展 FSAR 安全评审第二轮专家评审, 得到国内外专家的一致认可。

### 反应堆总体热工水力方案与参数

TMSR-LF1 反应堆的热功率为 2 MW, 采用燃料盐系统一体式布局。反应堆总体布局见图 1。反应堆的主要系统包括: 一体化堆本体系统、冷却盐回路系统、专设安全设施 (包括非能动余热排出系统和安全容器)、仪控系统、辅助系统等。TMSR-LF1 反应堆入口温度  $630.0^{\circ}\text{C}$ , 反应堆出口温度  $650.0^{\circ}\text{C}$ , 燃料熔盐流量  $50\text{kg/s}$ 。堆芯高度  $1800\text{mm}$ , 堆芯直径  $2300\text{mm}$ , 燃料盐通道直径  $40\text{mm}$ , 相邻燃料盐通道中心距  $100\text{mm}$ , 燃料盐通道 244 个, 其他功能通道 10 个。反应堆使用  $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  作为燃料盐, 使用  $\text{LiF-BeF}_2$  作为冷却盐。一体式反应堆主容器及堆内金属构件的结构材料为 ASME-N10003 合金, 堆芯活性区燃料通道、反射层及堆内固态填充体结构材料为低渗透率石墨。表 1 中列出了反应堆热工水力总体参数。

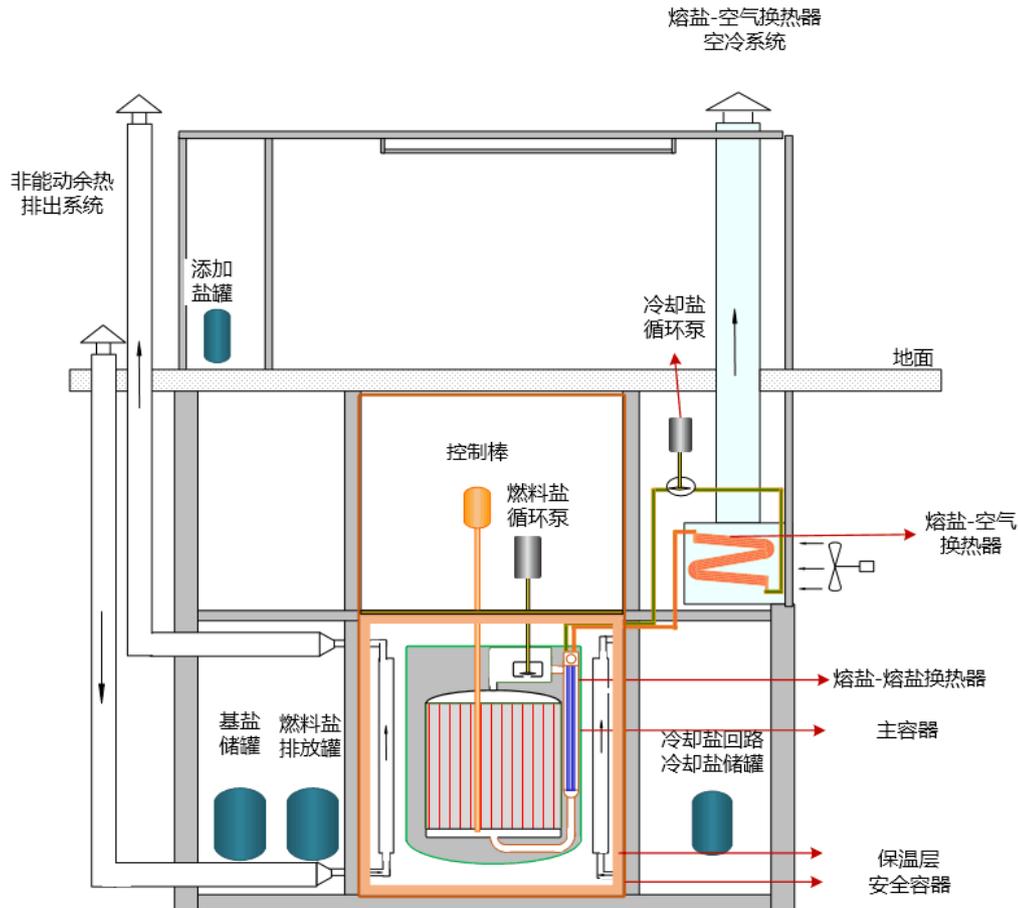


图 1 TMSR-LF1 反应堆总体布局示意图

表 1 反应堆总体热工水力参数

参数	数值
堆型	液态燃料钍基熔盐堆
热功率	2 MW
反应堆进口温度	630°C
反应堆出口温度	650°C
冷却盐回路冷端温度	560°C
冷却盐回路热端温度	580°C
燃料盐	LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub>
冷却盐	LiF-BeF <sub>2</sub>
燃料盐额定质量流量	50 kg/s
冷却盐额定质量流量	42 kg/s
非能动余热排出功率	2 套, 单套功率 20 kW, 共 40 kW

### 反应堆堆芯热工水力设计

TMSR-LF1 堆芯热工水力设计的目的是保证在反应堆正常运行期间, 为反应堆提供与堆芯产生热量能力相匹配的传热能力, 通过利用燃料盐自身的流动, 把燃料盐中产生的裂变能有效传递到冷却盐回路系统, 并最终通过空冷系统传递至大气热阱; 保证燃料盐及其压力边界上的合金结构材料在正常运行工况和预计运行事件下运行在安全范围内, 并为设计基准事故保留足够的安全裕量。

TMSR-LF1 堆芯热工水力设计基于 CFD 分析方法, 设计有效的堆芯水力结构, 实现堆芯各类通道燃料盐流量的合理分配, 展平堆芯燃料盐温度分布, 降低燃料盐热点温度; 保证堆芯燃料盐、堆芯石墨构件、堆内合金构件、控制棒组件及其它特殊通道组件、以及反应堆容器的温度满足热工水力设计准则, 并为事故工况保留足够裕量。

堆芯热工水力分析得到堆芯活性区出口燃料盐温度分布如图 2 所示。分析结果表明, 堆芯燃料盐通道与其它通道流量份额分配合理, 燃料盐通道入口流量分布与堆芯径向功率分布基本匹配。堆芯活性区出口燃料盐温度分布均匀性较好, 燃料盐温度、石墨温度、合金温度均明显低于其对应温度限值, 满足堆芯热工水力设计基准要求。

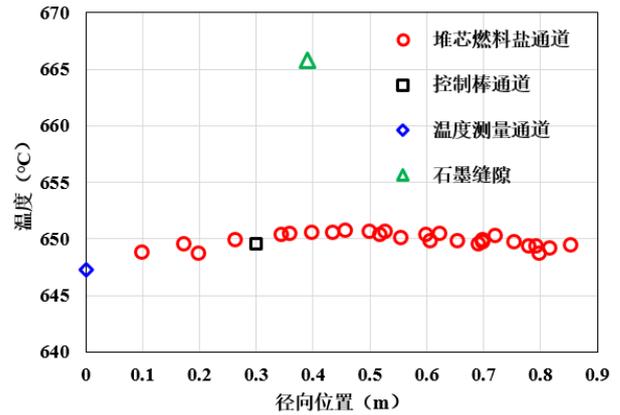


图 2 堆芯活性区出口燃料盐温度分布

### 非能动余热排出系统设计

TMSR-LF1 非能动余热排出系统设计采用空气作为冷却介质, 基于空气自然循环原理实现非能动热量导出, 其功能是在事故停堆后将堆芯衰变热导出至大气热阱。根据堆芯停堆衰变热瞬态曲线, 非能动余热排出系统排热量必须大于反应堆功率 1%。考虑到系统的冗余, 非能动余热排出系统包括两列结构完全独立的排热通道, 单个排热通道的设计排热功率  $\geq 20$  kW, 非能动余热排出系统总的设计排热功率  $\geq 40$  kW (TMSR-LF1 实验堆额定功率 2 MW 的 2%)。

非能动余热排出系统由进风管、换热装置、出风管和排气塔组成。TMSR-LF1 事故停堆后, 反应堆堆芯燃料盐携带的余热主要依靠热传导, 沿径向依次通过堆芯石墨构件、石墨侧反射层、反应堆容器, 再由反应堆容器通过热辐射和下堆舱内空气自然对流耦合传热的方式传递给环绕其周围的非能动余热排出系统换热装置, 换热装置中的空气被加热后, 在浮升力的作用下沿出风管和排气塔排入大气热阱, 大气环境中的冷空气则被源源不断地通过进风管吸入换热装置进行补充, 以此建立空气自然循环, 实现堆芯余热的非能动导出。非能动余热排出系统关键设计参数见表 2。

表 2 非能动余热排出系统关键设计参数

参数	数值
非能动余热排出系统设计排热能力	$\geq 40$ kW (2%额定功率)
非能动余热排出系统套数	2
单列非能动余热排出系统设计排热能力	$\geq 20$ kW (1%额定功率)
冷却介质/原理	空气/自然循环
空气入口设计温度	45°C
空气出口设计温度	373°C
空气自然循环流量	0.0622 kg/s (单套)

## 熔盐换热器热工水力设计

熔盐-熔盐换热器放置在 TMSR-LF1 反应堆容器内部，是 TMSR-LF1 的主要换热设备之一。熔盐-熔盐换热器的一次侧为燃料盐，二次侧为冷却盐，其功能是将燃料盐携带的核裂变热能传递给冷却盐。熔盐-熔盐换热器同时也是燃料盐循环系统的压力边界，起到包容燃料盐，防止放射性物质外泄的作用。

熔盐-空气换热器是 TMSR-LF1 实验堆的另一个主要换热设备。熔盐-空气换热器的一次侧为冷却盐，二次侧为空冷系统中的空气，其功能是将冷却盐携带的来自堆芯燃料盐的热量传递给空冷系统中的空气，并最终由空气排入大气热阱。熔盐-空气换热器的传热管束等结构部分属于冷却盐循环系统，空气流道结构部分属于空冷系统。空冷系统上设有主次两路风机，为熔盐-空气换热器提供一定流量的冷空气，并将被传热管束加热的空气排入大气热阱。熔盐-空气换热器和空冷系统共同作为 TMSR-LF1 实验堆的热负荷，通过调节空冷系统空气流量以改变熔盐-空气换热器管侧出口冷却盐温度，从而实现调整反应堆运行工况、控制反应堆系统热平衡、保证反应堆系统稳态运行的功能。

TMSR-LF1 熔盐-熔盐换热器采用 U 型管壳式设计，熔盐-空气换热器采用 S 型列管式结构设计，均为竖直放置，设计换热功率为 2 MW。TMSR-LF1 熔盐-熔盐换热器热工水力设计参数如表 3 所示，熔盐-空气换热器的热工水力设计参数如表 4 所示。

表 3 熔盐-熔盐换热器热工水力设计参数

参数	数值	
介质	燃料盐	FLiBe
进/出口温度 (°C)	650/630	560/580
质量流量 (kg/s)	50	42
压损 (kPa)	67	163
流速 (m/s)	0.78	3.04
总换热系数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	2764	
有效换热面积 (m <sup>2</sup> )	12.0	
设计余量 (%)	18	

表 4 熔盐-空气换热器热工水力设计参数

参数	数值	
介质	空气	FLiBe
进/出口温度 (°C)	45/195	580/560
质量流量 (kg/s)	13.17	41.84
压损 (kPa)	1.8	44.2
流速 (m/s)	16.6	1.36
总换热系数 (W/m <sup>2</sup> ·K)	124.6	
有效换热面积 (m <sup>2</sup> )	41.3	
设计余量 (%)	14.9%	

## 堆舱热设计分析

TMSR-LF1 实验堆堆舱分为上、下两个堆舱。反应堆本体、非能动余热排出系统的换热装置、燃料盐收集装置位于下安全容器内，下安全容器位于下堆舱混凝土墙体内。燃料盐泵电机和控制棒驱动机构等设备位于上安全容器内，上/下安全容器之间通过中间屏蔽钢板连接。

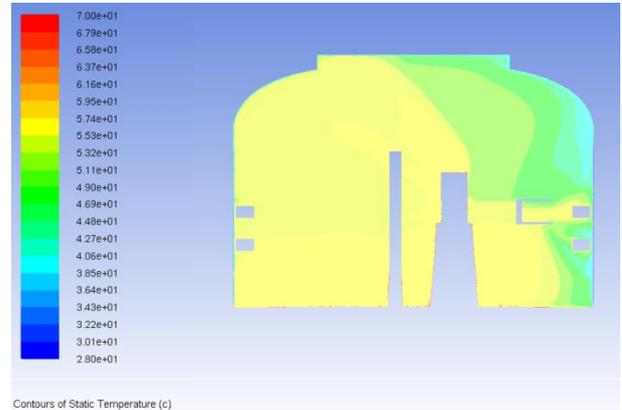


图 3 上安全容器内部空气温度分布

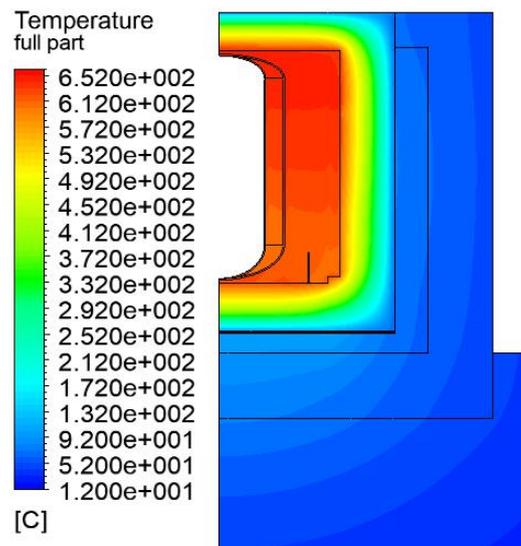


图 4 下堆舱整体温度分布

无论是反应堆正常运行时还是反应堆停堆后，高温的反应堆本体将持续向上/下堆舱传递热量。通过在下堆舱和下安全容器内部设置隔热保温结构，一方面能够减少反应堆通过上/下堆舱墙体向外界环境损失热量；另一方面能够保证上/下安全容器、上/下堆舱墙体结构材料不超过其温度限值，同时保证上堆舱内的燃料盐泵电机和控制棒驱动机构等设备运行在低温环境。上堆舱内空气平均温度的调节控制通过上安全容器通风冷却系统辅助完成。上安全容器通风冷却系统包括两部分：(1) 上安全容器外部采用强制通风冷却，尽可能降低安全容器整体温度；(2) 上安全容器内部设置强迫循环风机，强化

内部热量向安全容器转移，同时促进上安全容器内部气体温度均匀。上安全容器内部空气温度分布如图 3 所示，下堆舱整体温度分布如图 4 所示。

## 结语

目前，已完成 TMSR-LF1 实验堆方案设计、初步设计、初步设计深化、施工图设计各阶段的热工水力设计与安全分析，包括 TMSR-LF1 实验堆堆芯热工水力设计分析、非能动余热排出系统热工水力设计分析、熔盐-熔盐换热器与熔盐-空气换热器热工水力设计分析、堆舱热设计分析、反应堆系统瞬态与事故安全分析、设备跟踪与监察等。后续工作将重点开展反应堆热工水力调试运行与相关试验研究。

## 参考文献

- 1 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-002-C 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆热工水力设计参数汇总
- 2 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-006-C 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆反应堆堆芯热工水力设计分析报告
- 3 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-010-C 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆非能动余热排出系统设计报告
- 4 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-008-C 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆熔盐-熔盐换热器热工水力设计报告。
- 5 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-009-C 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆熔盐-空气换热器与空冷系统热工水力设计分析报告
- 6 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-012-C 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆下堆舱隔热保温设计分析报告
- 7 TMSR-LF1-SINAP-30-THHY-DS-014-C 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆上堆舱外部冷却设计分析报告

# 基于 epics 的实时数据通讯研究进展

仪控工程技术部, 韩利峰 黄丽 刘文倩 陈志军 肖君 李丹清 陈永忠

## 实时数据在微信小程序端的可视化

可视化监控系统是基于 epics 开发的项目中不可或缺的一部分。目前常见的 epics 实时数据可视化监控系统架构有客户端/服务器架构和浏览器/服务器架构, 它们在便利性方面有一定的局限性。而微信小程序在便利性方面具有明显优势。本文基于物联网 MQTT 协议, 实现了 epics 实时数据在微信小程序中的可视化。由云端建立的 MQTT 服务器作为代理端, web 端和微信小程序端作为客户端, 该可视化监控系统已在实际项目中实现并测试。

## 系统架构

本文基于物联网 MQTT 协议, 微信小程序和 web 端为客户端, 阿里云服务器上安装开源的 EMQX 服务器为代理服务器。Web 端 NodeJS+Express 框架搭建, 使用 node-epics 模块包实现 epics ioc 实时数据的同步, MQTT.js 模块包实现 web 端作为 MQTT 协议客户端。客户端微信小程序使用 MQTT.js 库接入 MQTT 代理服务器。对于一个特定主题, 通过 web 端将消息发布出来, EMQX 代理服务器中转, 微信小程序端订阅接收消息, 这样一套完整的从项目硬件设备实时数据传输到微信小程序的方案就实现了 (如图 1)。

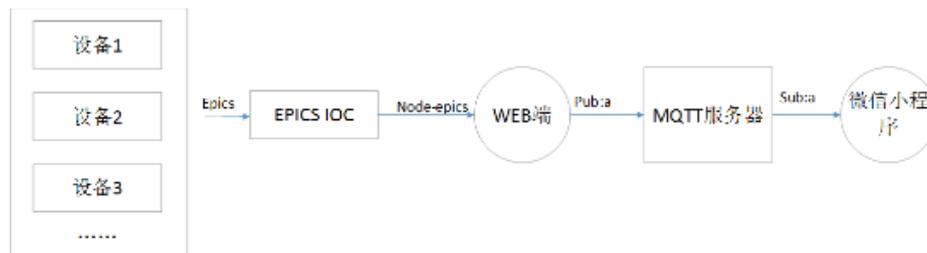


图 1 系统架构

## 服务器端

EMQX (Erlang/Enterprise/Elastic MQTT Broker) 是基于 Erlang/OTP 语言平台开发, 支持大规模连接和分布式集群, 发布订阅模式的开源 MQTT 消息服务器。Erlang/OTP 是出色的软实时 (Soft-Realtime)、低延时 (Low-Latency)、分布式 (Distributed) 的语言平台。EMQ X 是实现高可靠, 并支持承载海量物联网终端的 MQTT 连接, 支持在海量物联网设备间低延时消息路由: 1. 稳定承载大规模的 MQTT 客户端连接, 单服务器节点支持 50 万到 100 万连接。2. 分布式节点集群, 快速低延时的消息路由, 单集群支持 1000 万规模的路由。3. 消息服务器内扩展, 支持定制多种认证方式、高效存储消息到后端数据库。4. 完整物联网协议支持, MQTT、MQTT-SN、CoAP、LwM2M、WebSocket 或私有协议支持。微信小程序中的服务器接口必须采用 wxs 和 域名, 因此给服务器配置域名 wss://xxx.com, nginx 代理以便微信小程序调用。

## web 端

web 端用 NodeJS+Express 框架搭建, node-epics 模块包获取 epics ioc 实时数据, 并使用 MQTT.js 模块包实现 web 端为 MQTT 协议客户端。NodeJS 是一个基于 Chrome V8 引擎的 JavaScript 运行时, 是一个基于 Chrome V8 引擎的 JavaScript 运行环境, 使用了一个事件驱动、非阻塞式 I/O 模型, 让 JavaScript 运行在服务端的开发平台。Express 是一个简洁而灵活的 NodeJS Web 应用框架, 它提供了一系列强大特性和丰富的 HTTP 工具用来快速创建各种 Web 应用。使用 NodeJS+Express 框架可以快速地搭建一个功能完整的网站。Node-epics 模块包是用 JavaScript 语言开发的、面向 NodeJS 平台的、epics 客户端接口程序。通过调用 node-epics 模块包可以实现 epics ioc 在浏览器端的应用。MQTT.js 是 JavaScript 编写的, 实现了 MQTT 协议客户端功能的模块, 可以在 Node.js 或浏览器环境中使用。在 Node.js 中, 即可以以 -g 全局安装以命令行的形式使用, 又可以将其集成到具体项目中调用。

## 微信小程序客户端

微信小程序是小程序的一种，英文名 Wechat Mini Program，是一种不需要下载安装即可使用的应用，它实现了应用“触手可及”的梦想，用户扫一扫或搜一下即可打开应用。本文使用微信小程序作为 epics ioc 实时数据的监控的移动客户端。首先，在微信公众平台注册小程序账号并下载安装微信开发者工具。然后，在微信开发者工具中新建小程序并输入注册的小程序 APPID，新建一个微信小程序项目。最后，在开发者平台右侧开发-开发管理-开发设置-服务器域名，在方服务器域名处，点击修改，在 socket 合法域名处，添加 EMQX 配置的域名 wss://xxx.com 保存提交。因为微信小程序使用 mqtt 协议是通过 websocket 来实现，需要下载并复制 mqtt.js 这一个第三方库到小程序项目中。

## 最终实现

图 2 是 TMSR 仿真装置（SF0）数据在线监测控制界面。其中圆环形进度条显示其左侧对应实时数据阈值范围内进度（这里为了显示效果，阈值范围没有按照实际工程需求设置），每一个折叠板还可以点击展开对应系统或设备的相应数据。图 3 是各个折叠板展开后对应显示的系统或设备的实时监测数据。



图 2 监控界面

一回路熔盐泵		
电机频率	-0.750	Hz
电机流量	-0.179	A
电机转速	0.801	rpm
法兰温度	28.936	°C
堆芯温度	30.096	°C
堆本体		
加热功率	-0.001	KW
熔盐液位	0.023	cm
入口温度	29.650	°C
出口温度	28.920	°C
东侧余排		
散热功率	0.001	KW
空气流速	2.212	m³/h
入口温度	27.385	°C
出口温度	28.636	°C
西侧余排		
散热功率	0.000	KW
空气流速	0.915	m³/h
入口温度	27.914	°C
出口温度	--	--

图 3 折叠板展开

## 实时数据的三维可视化方案

在数字化的第四次工业革命背景下，数字孪生技术的发展与应用给各行各业提供了新的体验与驱动力。物质、能量和信息是构成现实世界的三大因素，映射到虚拟世界便为模型、行为和信息，两者之间的信息互通性为两大世界体系的平行发展、相互作用提供了前提。数字孪生就是去构建这样一个虚拟世界，利用现实世界中的数据，在虚拟世界中完成对实体设备的数字映射，从而反映其全生命周期过程<sup>[1]</sup>。随着互联网、大数据等新兴信息技术的成熟，诸多产业都尝试将数字孪生技术引入其领域。国家机床质量检验监督中心基于数字孪生技术，实现了数控设备互联互通及可视化监控系统的开发，从而直观地展示数控机床的互联互通信息与运行状态<sup>[2]</sup>；丁凯等<sup>[3]</sup>将多维多尺度智能制造空间与数字孪生技术相结合，实时叶轮的同步仿真与虚实联动控制；国网四川省电力公司电力科学研究院通过 unity 平台，将变电站设备的位置与告警信号的关联关系以及数据流向进行可视化展示<sup>[4]</sup>，提高了对变电站的管理效率。综上所述，目前数字孪生技术已与深度信息融合技术相结合，被广泛应用于工程建设、工业生产、工业控制等多个领域。

核电产业同样面临着与先进数字孪生技术相结合的产业革命。在核电设备的日常运行中，操作人员对现场设备开展监控工作，根据实时数据对核反应堆的运行情况进行监督和控制，但传统核工业监测系统面临两大难题：一方面，随着核反应堆设备规模的不断扩大，产生的过程变量随时间的增加呈指数型增长；另一方面，核反应设备属辐射环境，

这就使不可接近环境下工人的运维成为一大难题。为解决以上难题，将数字孪生技术应用于先进核能领域，从而实现在虚拟空间中对核电设备的监控。

### 数字核电系统架构

如图 4 所示，本系统采用标准的分布式架构进行设计研发，包括现实物理域的设备支持层、数据

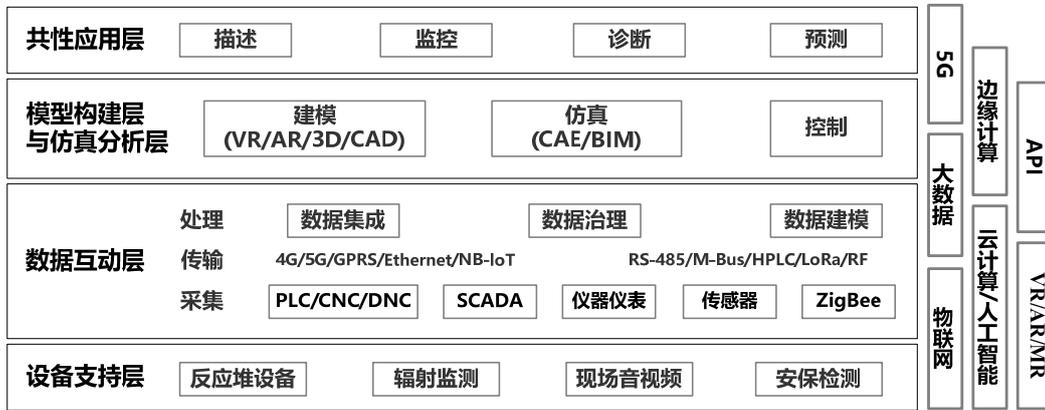


图 4 数字孪生系统架构

在图形化人机交互客户端开发方面，选用一款专业三维场景制作引擎 unity，其整合了场景渲染、人机交互 UI 控件及网络等技术，可为数字世界三个核心模块的构建提供技术支持。在模型方面，unity 可支持三维建模软件的模型导入，并支持 fbx 格式的模型存入 assets 资源库作为后续操作的源数据；在行为及数据交互方面，基于 node-epics 事件驱动结合 socket.io 套接字进行实时数据接口开发，实现数字孪生系统对现场反应堆数据更新事件的监听。引擎的贴图技术及光影渲染系统非常有利于虚拟场景的渲染，提升逼真度和沉浸感。由于 unity 具有强大的跨平台特性，项目完成后可一键发布至常用的主流平台上，使作品在多平台呈现，为开发者和操纵员提供便利。

在实时数据通信接口开发方面，由于核反应堆数据具有数据种类繁多、数据量大、数据安全性高等特点，商业监控系统不足以满足以上需求，故选用的数据互动层软件为 epics。epics 支持主流通讯协议及各类数据库，并且支持多语言的应用程序编程接口开发，其中 C#编程语言为打通 epics-unity 的数据交互通道提供了支持。综合以上 epics 的优势，本文将利用 epics 工业控制软件来处理实时数据，以此确保数字孪生监控系统的实时性和稳定性。

### 人机交互操作

数据交互功能是监控运维平台的关键，人机交互构建了用户和虚拟场景之间的互动通道，并负责整个平台的协调和良好运行。unity 的事件管理系统

互动层的测量与控制实体、以及使用数字孪生体的用户域。现场设备数据通过以太网传入数据互动层，并通过输入输出服务器传输到仿真分析层，经过建模、仿真处理后，呈现在最上层的共性应用层，供监控人员进行描述和监控。同时，该系统具备双向数据传输的功能，共性应用层可通过此数据传输通道实现对现场设备的远程控制。

通过 eventsystem 组件来循环获取输入状态，然后依赖 baseinputmodule 和 baseraycaster 模块将用户的操作转化为射线投射，以此来确定目标，并回调 eventsystem 发送输入事件到具体对象，最后目标对象以事件的方式 (message 系统) 接收到通知，并进行后续响应操作。

本文系统通过获取交互设备的输入状态进而控制 camera 属性，以此实现漫游功能。首先，获取相机物体的 transform，组件自身的 transform 类可用于存储对象的位置、旋转、缩放等参数，并对其进行操作处理；其次，利用公有访问对移动速度、旋转视角、缩放视角等参数进行定义，public 类会使对象参数可在 inspector 面板进行配置，每次运行时都会读取 editor 模式下设置的值覆盖设定值；最后，通过 input.getmousebutton()及 input.getkey()函数获取鼠标和键盘的输入状态，每次检测到输入时，便调用相机物体的 transform 属性值，并结合 vector3()函数对其进行关于设定参数的属性调整，从而实现外部设备控制相机在世界空间中的位置，从而控制视觉画面在场景里自由的平移、旋转、缩放。

此法实现漫游功能简单易操作，将脚本文件挂载到所需要控制的相机上即可在 inspector 面板实现参数设定，运行项目可实现以第一人称在场景中漫游。

### 前端系统展示

基于 SF0 熔盐堆缩比仿真装置设计的数据监测与可视化系统主要包含 4 个虚拟场景界面，包括仿

真堆本体、高温循环泵、非能动余热排出系统、熔盐回路系统等，各场景之间通过界面上的提示控件 button 进行跳转切换。

图 5 为反应堆回路系统包括燃料盐回路系统和冷却盐回路系统，熔盐通过在燃料盐回路的循环流动，将反应堆堆芯产生的热量通过熔盐-熔盐换热器有效传递至冷却盐回路。冷却盐回路系统主要包括

冷却盐循环泵、熔盐-熔盐换热器、熔盐-空气换热器、管路和相关阀门等，熔盐在此回路通过熔盐-空气换热器将热量最终传递至环境中或功率转换系统，实现对热量的后续利用。反应堆回路系统的三维数字模型以纵轴为中心进行旋转展示，可直观显示反应堆回路组成与分布，并展示燃料盐和冷却盐介质分别在相应回路系统中的循环与换热动作。

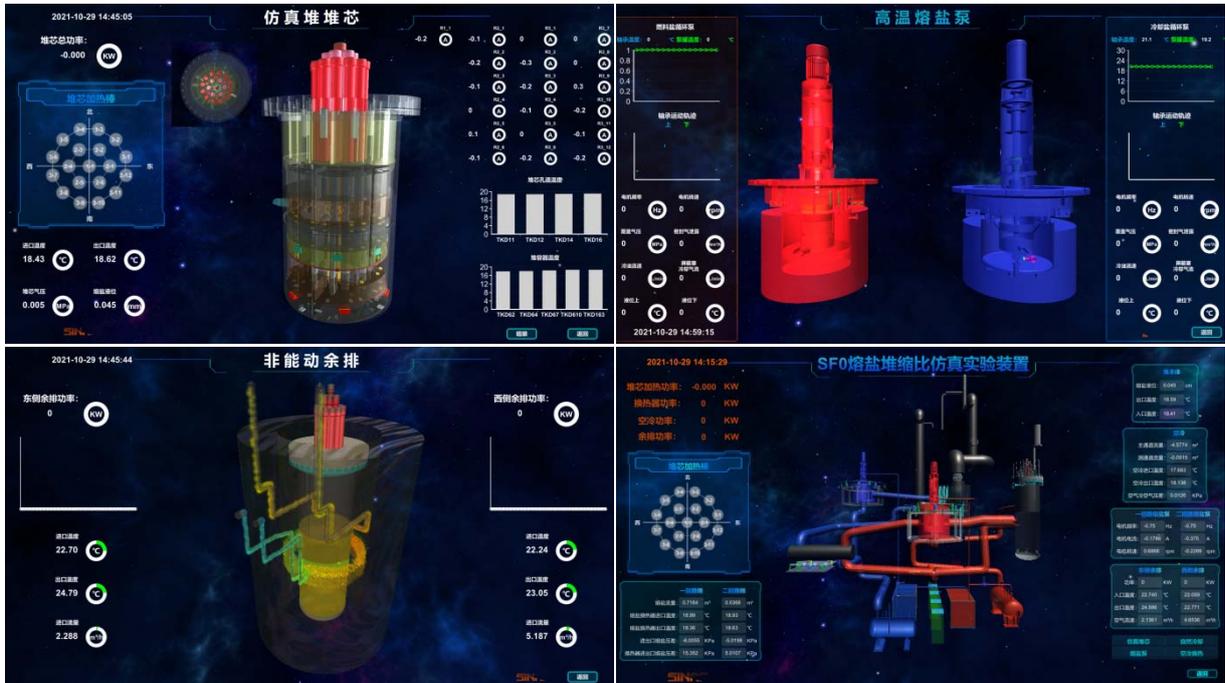


图 5 SF0 熔盐堆缩比仿真实验装置监测界面

使用此方案构建的数据孪生系统可发布为适用于不同操作系统的可执行文件，无需安装额外软件便可进行运行测试。系统界面将三维立体模型与数据面板相结合，具备动画效果与特效渲染，可直观反映堆芯部件组装过程与熔盐流动情况。UI 层结合图元技术实现板块化设计，集成基础数据与视频数据，系统渲染帧率可依据需求自行设定，本系统设定帧率步进为 0.02 秒，渲染周期为 5 帧，数据更新周期达到 100 毫秒，可在不影响展示效果的前提下节约计算机资源。

## 结语

本系统致力于实现物理世界与虚拟世界之间的实时数据交互接口开发，将各功能模块进行设计、优化与组合，能够有效解决当前核工业监控系统智能化程度相对较低的问题，实现在线监测和报警功能。该系统不仅具备良好的三维可视化效果，为操作员带来了全新的人机交互体验，并实现了反应堆重要数据采集、反应堆实时数据传输等功能，为核反应堆的运行和保护提供了保障，以确保装置能安全、可靠和经济地运行。该可视化终端具有操作简

单、方便携带、用户沉浸感强、数据实时性高等优点，具备良好的推广价值，同时为 websocket 技术在数字孪生监控系统的应用提供了可借鉴的解决方案，并为智慧核工业系统的开发提供了参考。

在下一阶段的工作中，将进一步实现此数字孪生系统与多种工业控制软件及物理仿真软件的接口开发，并对接多种新兴技术，如云计算平台、大数据等，实现跨区域的能源系统数字孪生，扩大系统适用范围、丰富系统功能。

## 参考文献

- 1 吴丽梅, 韩利峰, 黄文博, 李嘉曾, 李丹清, 张立园, 陈永忠. 实时 Web 技术在辐射监测系统中的应用[J]. 计算机应用, 2018, 38(S2): 337-340
- 2 张根灿, 蒋舸扬, 李德明, 刘永好. 基于 EPICS 的质子注入器远程控制及监测系统的构建[J]. 核技术, 2018, 41(03): 53-57
- 3 鲍春雷. “基于 Web 的加速器远程监控系统的研发”[D]. 中国科学院高能物理研究所硕士论文, 2009
- 4 任维娟. “基于 Web 的远程监控系统的研究及实现”[D]. 中国科学院高能物理研究所硕士论文, 2010
- 5 李洛峰, 王春红. 基于 Web 的 EPICS 数据实时监测系统的研究与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(07): 767-771

- 6 Haripriya, A.P. and Kulothungan, K. (2019) Secure-MQTT : An Efficient Fuzzy Logic-Based Approach to Detect DoS Attack in MQTT Protocol for Internet of Things. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019,
- 7 ROBBIEC.node-epics[EB/OL].(2014-11-18)[2019-03-03]. <https://github.com/RobbieClaken/node-epics>.
- 8 <https://developers.weixin.qq.com/community/develop/article/doc/000cc42f6a85d0dcbbfa2020a51413> 微信开放平台
- 9 [https://www.worldlink.com.cn/zh\\_tw/osdir/vant-weapp.html](https://www.worldlink.com.cn/zh_tw/osdir/vant-weapp.html) vant-weapp 官网
- 10 <https://developers.weixin.qq.com/miniprogram/dev/framework/> 微信开发者文档
- 11 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, **23**(8): 1603-1
- 12 黄祖广, 潘辉, 薛瑞娟, 等. 基于数字孪生的数控设备互联互通及可视化[J]. 制造技术与机床, 2021(1): 128-132.
- 13 丁凯, 张旭东, 周光辉, 等. 基于数字孪生的多维多尺度智能制造空间及其建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, **25**(6): 1491-1504.
- 14 段翔兮, 邹琬, 高剑, 等. 基于 unity3D 的监控告警信息展示系统的设计与实现 [J].四川电力技术, 2020, **43**(3): 78-84.

# 基于载钷闪烁体的中子成像技术研究

仪控工程技术部, 黄跃峰 侯会良

中子能贯穿大部分重元素, 如 Pb, U 等, 对 H, B 等轻元素吸收系数却很大, 在含氢材料检测、放射性材料检测具有明显优势<sup>[1]</sup>, 中子成像技术在核工业、航空航天、高能物理、电子工业等领域被广泛应用并发挥重要作用。中子成像作为无损检测技术的一种, 可以弥补 X 光照相等其他无损检测技术的不足, 在文物鉴定考古、安全检查、硼中子治癌的影像辅助等领域均有重要应用。小型中子成像系统可用于反应堆中管道回路的无损检测和运行功率及中子通量的监测, 对于反应堆运行与安全具有重要应用价值。在不同位置放置多个成像装置, 利用堆芯自身的伽马中子辐射场对堆芯进行照相, 进而得到堆芯的中子通量及运行功率等信息, 可以将堆芯内中子伽马分布通过三维影像重构, 具有实时性、曝光快、不破坏堆芯结构的优点, 对于反应堆运行检测及特殊工况下的监测具有重要意义<sup>[2][3]</sup>。

课题组依托国家自然科学基金课题“GdI<sub>3</sub> 晶体中子伽马甄别及成像技术研究”(基金号 11775290), 开展了成像晶体制备、成像方法、成像设备等一系列探索与研究, 使用新型载钷闪烁体配合新型国产 SiPM 组成中子成像探测器, 配合自主研发的信号采集与信息处理电路, 目前初步实现中子成像效果, 在不搭配精细光路的情况下, 达到了 3 mm 分辨率的中子成像效果。

## 中子成像设备样机

中子成像设备样机采用模块化的设计方式, 各个组成部分采用高速接插件连接, 方便维护与调试。样机由成像用中子探测器(由 SiPM 阵列、高压电源、载钷闪烁体组成)、主板、主控板(FPGA 计数板)和信号处理板几部分组成, 其中的中子探测单元使用载钷闪烁体作为转换体, 配合 SiPM 作为光电转换器件, 使用 FPC 排线与主板连接(见图 1)。主板起到连接各个组件的作用, 同时为整个系统提供电源, 探测器通过主板上的 FPC 接插件与主板连接, 主板上还有高速接插件与主控板相连, 配有板载 16 个信号处理模块接口<sup>[4]</sup>。

使用该样机对 Am-Be 中子源的中子场进行了初步的成像验证实验, 分别用打孔铝板 and 钷条进行了测试。由于实验用的 Am-Be 中子源中子产额很低, 实际探测到的热中子仅为  $20 / \text{cm}^2 / \text{s}$  左右, 采用简单的图像处理方法对本底进行了扣除。打孔铝板的

实际成像效果如图 2 所示, 钷条的实际成像效果如图 3 所示。

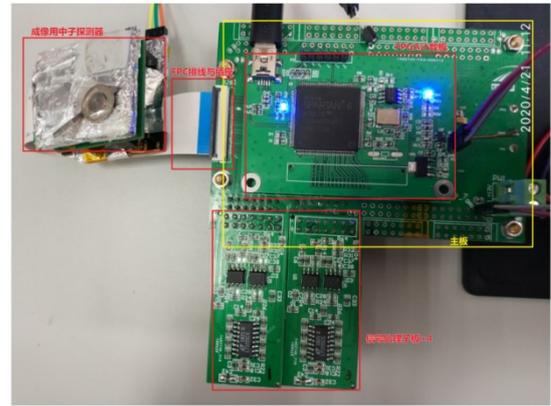


图 1 中子成像样机实物

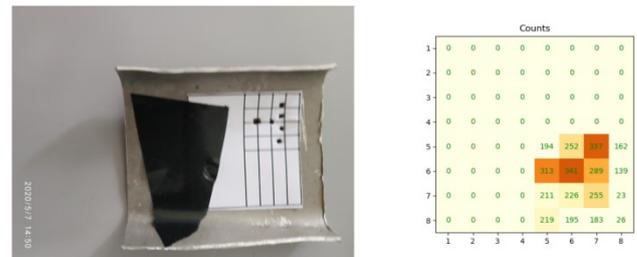


图 2 多孔铝板成像结果 (左) 打孔铝板, (右) 打孔铝板成像结果

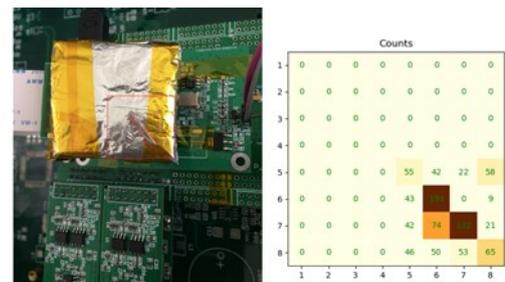


图 3 细钷条成像结果 (左) 细钷条与探测器的摆放位置, (右) 钷条成像结果

图示的成像效果表明, 基于该方案成像的各个像素点相互独立, 灵敏度高, 在中子通量小的中子场中具备较好的成像效果, 初步验证了该中子成像样机方案的可行性。由于前期出于成本考虑, 仅使用了  $4 \times 4$  SiPM 阵列, 闪烁体与 SiPM 直接贴合, 没有光耦等复杂光路设计, 使得分辨率受单个 SiPM 尺寸 ( $3 \times 3 \text{mm}$ ) 的限制。考虑到后续升级, 主板上还留有多个信号处理板的位置, 后续将扩展到  $8 \times 8$  SiPM 阵列, 同时设计更加精细的光耦提高分辨率。

## 参考文献

- 1 郭广平, 陈启芳, 郭冠华. 中子照相技术及其在无损伤检测中的应用研究[J]. 失效分析与预防, 2014, **9**(6): 388-393
- 2 BEAUMONT J S, MELLOR M P, VILLA M, *et al.* High-intensity power-resolved radiation imaging of an operational nuclear reactor[J]. Nature communications, 2015, **6**(1): 1-6
- 3 魏国海, 韩松柏, 陈东风, 等. 中子照相技术在核燃料元件无损检测中的应用[J]. 核技术, 2012, **35**(11): 821-826
- 4 侯会良, 黄跃峰, 程懋松, 戴志敏. 小型智能程控 SiPM 电源设计与验证[J]. 核技术, 2020, **43**(6): 60402-060402

# 基于 EtherCAT 国产化控制设备研究进展

仪控工程技术部, 李国辉 陈志军 韩利峰 陈永忠 李丹清 余嘉莉

## 1. 基于翼辉操作系统的 EtherCAT 控制器软件开发

国产控制系统在火电、化工和核能等领域已能替代国外整体方案, 针对控制系统的核心控制器操作系统主要依赖进口的问题, 提出在完全自主化翼辉国产实时操作系统 (SylixOS) 上, 基于 epics 开发了 EtherCAT 的控制软件。该控制软件目的在于开发一套基于国产操作系统的高性能的实时控制软件, 从而摆脱商业控制软件的授权使用限制, 实现控制软件的自主可控性。通过 RealEvo-IED 集成开发环境开发基于翼辉操作系统的 EtherCAT 驱动, 利用 etherlab.org 的 EtherCAT master 开源内核模块, 在 dls\_epics\_ethercat 基础之上, 利用 VDCT 加入控制逻辑, 实现了对工业设备的传感器进行模拟、数字和信号采集, 并利用模拟信号输出和继电器输出对设备进行控制。通过加入控制逻辑, 能够实现工业设备的自动化控制。

### 硬件平台

EtherCAT 主站通过 EtherCAT 报文和多个从站之间通信。EtherCAT 主站硬件使用标准以太网控制器, 本软件选用灵江工控的 PCM3-N2800 控制板。从站使用德国 BeckOff 公司的模块。测试的从站模块型号有: beckoff EK1100\*1、EL1034\*2、EL2624\*2、EL3054\*2、EL3054\*1。

### 软件构成

软件架构分为以下几个层面:

1. 硬件支持层: 灵江工控的 PCM3-N2800 控制板;
2. 内核模块层: 主要主站功能模块、通用以太网驱动模块;
3. 用户使用层: 数据帧发送与接收, 数据帧处理、实现控制逻辑。

### 系统编译及移植

(1) 使用的软件版本如下所示:

- SylixOS 内核版本: 1.8.9;
- EPICS BASE 版本: 3.14.12.8;
- 异步驱动版本: 4-35;
- Ethercat Master 版本: 6-4-3

(2) 移植前评估工作。一个第三方中间件可能

需要其余中间件的支持, 这就要求在移植前准确评估所有依赖的中间件, 从而确定工作量。根据 SylixOS 兼容 98% 的 POSIX 标准, 所以尽可能移植 Linux 平台的中间件。

- (3) Linux 环境下中间件配置、编译、安装
- (4) 控制系统管理

### 系统测试

利用源表模拟输出 4-20 毫安的液位信号, 当输入电流小于 16mA 时, EL2624 继电器输出通道打开 (如图 1), 运行注水电机。当输入电流大于 16mA 时, 通道关闭, 注水电机关闭 (如图 2)。



图 1 继电器输出通道打开

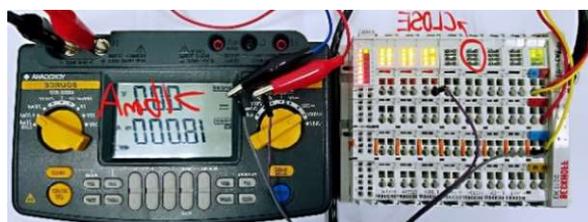


图 2 继电器输出通道关闭

## 2. 一种 EtherCAT 从站的硬件设计

EtherCAT 是由德国 BECKHOFF 公司开发的实时工业以太网解决方案。它具有延时低、响应快和可靠性高的特点, 由主站和从站组成。主站可以采用嵌入式控制器或电脑来实现, 需配备标准以太网控制器, 从站采用专用的从站协议控制器来实现<sup>[1]</sup>。

EtherCAT 的主要特点如下:

- 1) 网络拓扑形式: 可以组成环形、星形、线形等任意形式的拓扑结构, 最多 65535 个节点组成结构没有任何限制。
- 2) 结构简单、成本低: 任何带有标准以太网控制器的单元都可以作为 EtherCAT 主站, 从简单的 I/O 节点到复杂的设备都可以作为 EtherCAT 从站, 且不需要配置交换机。

3)卓越性能:数据传输速度可以达到 100Mbit/s, 数据刷新周期小于 100us, 各个从站节点设备的同步精度小于 1us。

### EtherCAT 从站组成

EtherCAT 从站设备同时实现通信和控制应用两部分功能, 包括物理层、数据链路层和应用层三个核心部分。我们前期设计研制的上海同步辐射装置(SSRF)的 150 MeV 电子直线加速器, 已在规定的的时间和经费下, 成功完成调束, 达到设计值, 并通过了长期运行的考验。此外, 由中国国家自然科学基金委支持的光阴极微波电子枪测试平台, 也已调试完成, 并通过了基金委组织的验收。

### EtherCAT 从站物理层

EtherCAT 从站物理层接口有 MII 和 EBUS 两种, MII (Media Independent Interface) 需要使用以太网 PHY 芯片, MII 接口也是标准的以太网物理层接口; EBUS 是倍福定义的数据传输标准, 是基于 LVDS (Low Voltage Differential Signal) 的, 无需额外的物理层芯片, 从而避免了物理层的附加传输时延, 但是只适合短距离传输。

### EtherCAT 从站数据链路层

数据链路层部分由从站控制器 ESC (EtherCAT Slave Controller) 来实现, ESC 可通过 ET1100、LAN9252、AX58100 或 FPGA 来完成。ESC 上的过程数据接口 PDI (Process Data Interface) 可分为 32 位的数字量 I/O、SPI 总线、8/16 位的异步/同步微控制器接口, 过程数据和参数是通过 ESC 上的 DPRAM 来交互的。

### EtherCAT 从站应用层

应用层部分由微处理器 MCU (Micro Control Unit) 来实现, MCU 可通过 DSP 或 STM 来完成。应用层部分主要实现从站设备的状态机、过程数据交互、非周期数据交互的邮箱协议, 其性能取决于设备功能应用部分。

### 硬件设计

本方案采用 AX58100 作为 EtherCAT 从站控制器, STM32F407 芯片作为从站微处理器, 为此可以将整个从站系统分为 ESC 模块 (从站控制器部分) 和 MCU 模块 (微处理器部分) 两大模块。ESC 模块的功能是实现 EtherCAT 数据链路层的功能, 通过硬件机制完成主站和从站之间的数据交换; MCU 模块的功能是实现应用层功能, 可以采集应用设备的反馈数据。

### ESC 模块硬件设计

AX58100 芯片是亚信 ASIX 于 2018 年 7 月推出新一代 2/3 端口 EtherCAT 从站控制芯片。其集成两个支持 100Mbps 全双工操作与 HP Auto-MDIX 功能的快速以太网 PHY。AX58100 支持 CANopen (CoE), TFTP (FoE), VoE 等标准 EtherCAT 协议适用于过程控制、运动控制、智能控制、数据采集和机械制造等各种实时工控产品应用, 提供了经济有效的解决方案。如图 3 所示是 AX58100 接口分布, 提供一个三通道 PWM 控制器或一个步进控制器, 一个用于闭环控制的增量/霍尔编码接口, 一个 SPI Master 接口用于 SPI 装置数据采集和输出, 32 个适用于工业实时 I/O 控制应用的数字控制 I/O, 以及一个 I/O Watchdog 提供监测 I/O 状态来做适当处置以确保产品功能的安全性。AX58100 提供两种过程数据接口 (PDI), Local Bus 接口和 SPI Slave 接口, 可通过这些接口将 AX58100 连接到外部传统 MCU 以支持 EtherCAT 功能。AX58100 有两个内存空间, 分别对应到 ESC 内存和 Function 缓存器, 设计人员可以透过芯片选择脚位来决定存取哪一个内存空间。内部网桥会根据设定的同步条件来自动同步 ESC 内存与功能缓存器的内容, 提供 EtherCAT Master 来远程控制 AX58100 的功能(PWM, SPI Master 等)。AX58100 将 ESC 和应用程序中断事件反应在中断状态缓存器, 并透过条件或边缘中断触发模式来通知外部 MCU/DSP 来管理这些 ESC 和应用程序中断事件[2]。

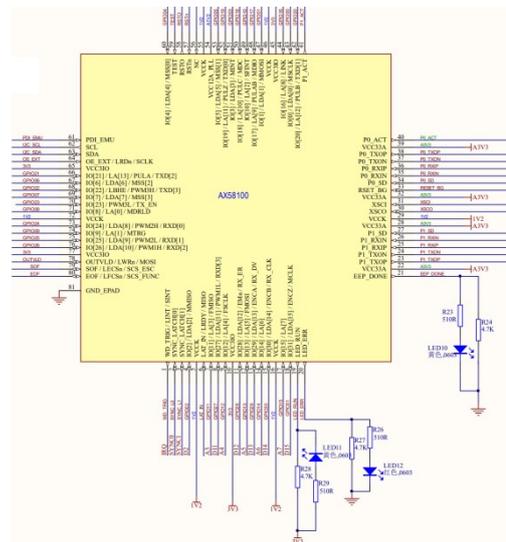


图 3 AX58100 接口分布

图 3 中, AX58100 的 PDI 接口采用 Local Bus 接口, 通过该接口使 AX58100 与 MCU 通信, 此接口模式下, 79 号引脚 SOF/LECSn/SCS\_ESC 为 AX58100 从站模式片选, 64 号引脚 OE\_EXT/LRDn/SCLK 为 Local Bus 读信号, 78 号引脚 OUTVLD/LWRn/MOSI 为 Local Bus 写信号, 68

号引脚 IO[22]/LBHE/PWM3H/TXD[3]为高字节使能, 6号引脚 LAT\_IN/LRDY/MISO 为 Local Bus 就绪输出, 1号引脚 WD\_TRIG/LINT/SINT 为 Local Bus 中断输出, LA[0]~LA[13]为 Local Bus 的 14 位地址线, LDA[0]~LDA[15]为 Local Bus 的 16 位数据线, AX58100 的片选、读写控制、地址与数据均通过 FSMC 方式与 MCU 连接[3]。19号引脚 LED\_RUN 用于指示选择片外 EEPROM 容量, 该引脚经 4.7KΩ 电阻接控制地, 存储器芯片为 AT24C64, 因此 EEPROM 容量为 64Kbit; 20号引脚 LED\_ERR 用于指示端口模式为 2 端口或 3 端口, 该引脚经 4.7KΩ 电阻接控制地; 21号引脚 EEP\_DONE 用于指示 EEPROM 的加载状态, 该引脚经 4.7KΩ 电阻接控制地。AX58100 与 AT24C64 之间使用 I2C 接口, 62号引脚 SCL 连接 AT24C64 的 6号引脚 SCL, 作为时钟线, 63号引脚 SDA 连接 AT24C64 的 5号引脚 SDA, 作为数据线。AX58100 的 EEPROM 电路如图 4 所示。

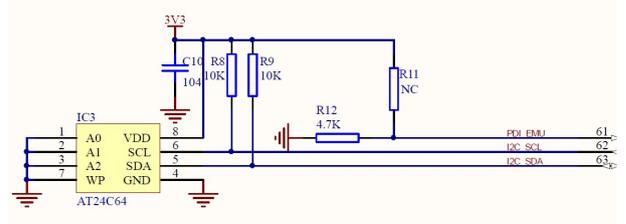


图 4 AX58100 的 EEPROM 电路

AX58100 内置的两组高速以太网 PHYs 分别为 P0 和 P1 端口, 本项目设计的 EtherCAT 从站的网络接口电路如图 5 所示。对于 P0 端口, 38号引脚 P0\_TXOP 和 37号引脚 P0\_TXON 为差分信号发送引脚, 36号引脚 P0\_RXIP 和 35号引脚 P0\_RXIN 为差分信号接收引脚; 对于 P1 端口, 24号引脚 P1\_TXOP 和 23号引脚 P1\_TXON 为差分信号发送引脚, 26号引脚 P1\_RXIP 和 25号引脚 P1\_RXIN 为差分信号接收引脚。HFJ11-2450E-L12RL 为网络变压器。

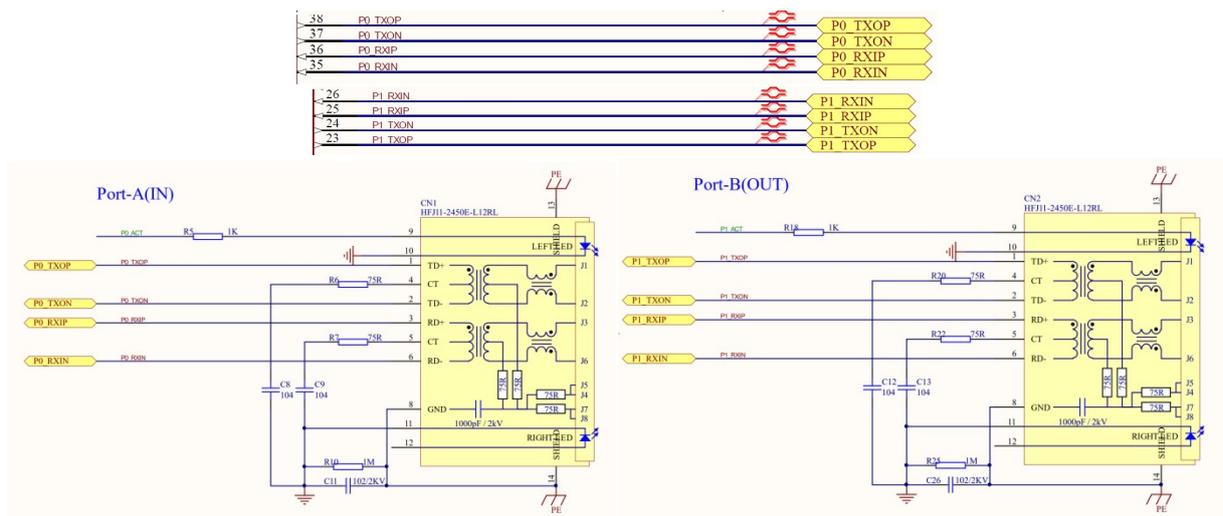


图 5 AX58100 网络接口电路

## STM 模块硬件设计

基于 EtherCAT 协议, 采用 STM32F407ZET6 为处理器, STM32F407 处理器是 ST 公司推出的一款基于 Cortex-M4F 内核的芯片, 支持两种 USB (即高速 USB\_HS 和全速 USB\_FS)、安全数字输入 / 输出接口 (SDIO)、串行外设接口(SPI)、内部集成接口 (I2C)、最高达 1MB 的嵌入式 Flash 接口、控制器区域网络 (bxCAN)、12 位 ADC 与 DAC 控制器、192kB 静态随机存取存储器 (SRAM) 及灵活静态存储控制器 (FSMC)。STM32F407ZET6 芯片接口分布如图 6 所示。STM32F407 器件系统架构如图 7 所示, Cortex-M4F 是一款 32 位高性能、能够用于实现 EtherCAT 从站协议的嵌入式应用的内核[4]。

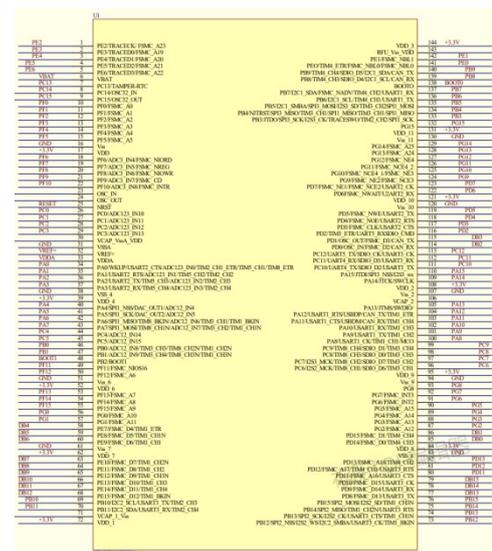


图 6 STM32F407 接口分布

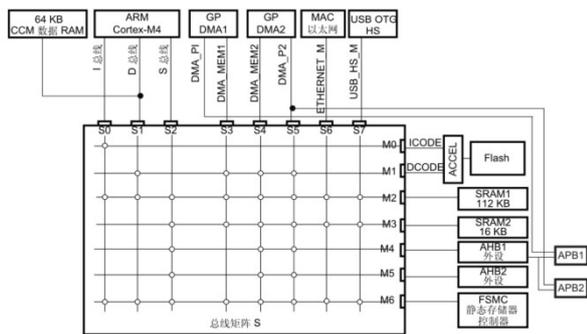


图7 STM32F407 器件系统架构框图

USB 供电电源电路如图 8 所示。USB 采用四线制，一根为 DM，一根为 DP，一根接 5V 电源。电源两端设置 0.1  $\mu\text{f}$  的电容稳定电压。

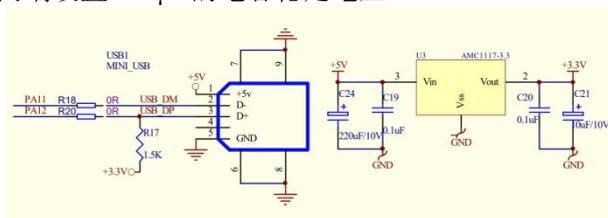


图8 USB 供电电源电路

I2C 与 EEPROM 芯片连接。I2C 采用双线制，即串行数据线 SDA 和时钟线 SCL，设计如图 9 所示。EEPROM 芯片有 8 个引脚，通过 SDA 和 SCL 实现对数据的读写功能，AO、A1、A2、GND 均做接地处理，VCC 接 3.3V 电源。

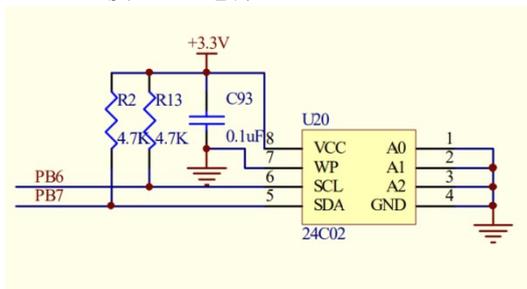


图9 EEPROM 电路原理图

## 结语

结合 AX58100 和 STM32F407 芯片的工作原理，对 EtherCAT 从站展开硬件电路的设计，在采用

AX58100 作为 EtherCAT 从站控制器，STM32F407 芯片作为从站微处理器的架构下，重点设计了 AX58100 的外围电路，包括 EEPROM 电路和网络接口电路；设计了 STM32F407 的外围电路，包括 USB 供电电源电路和 EEPROM 电路，为 EtherCAT 从站的应用奠定了基础。

## 参考文献

- 1 MOON A. Exclusive: Google suspends some business with Huawei after Trump blacklist source[N]. New York : Reuters, 2019-05-19
- 2 牛海明, 张洪敏. 国产分散控制系统的可靠性实现技[J]. 中国电力, 2016, 49(11): 100-104
- 3 廖树佳. 国产 DCS 系统的发展及应[J]. 科技经济导刊, 2016(16): 37-37
- 4 焦进星 . SylixOs 的来龙去脉[J]. 软件和集成电路, 2018(7): 68-69
- 5 何泳成, 王春红, 吴焯 . EPICS IOC 与 EtherCAT 设备通信的一种方法[J]. 核技术, 2014, 37(11): 6-9
- 6 陈丹丹. 软件移植实践[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 6.
- 7 黄聪会, 陈靖, 张黎, 等 . 软件移植理论与技术研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(6): 2024-2027
- 8 KRAIMER M. EPICS : porting iocCore to multiple operating systems[C]//Proceedings of the 2000 International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Tri-este, Italy: [s. n.], 2000: 33-35
- 9 KRAIMER M R, ANDERSON J B, HILL J O, et al. EPICS : a retrospective on porting iocCore to multiple operating systems [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems. San Jose: [sn.], 2001: 33-35
- 10 郇极, 刘艳强. 工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 1-4
- 11 唐灿波. 基于 EtherCAT 的高速互联平台及其在风电场变电站的应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.
- 12 胡定一. 基于 STM32 的永磁同步电机伺服驱动器设[D]. 大连: 大连理工大学, 2020
- 13 Martin Rostan, Joseph E., Stubbs, Dmitry Dzilno. EtherCAT enabled Advanced Control Architecture[C]. IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 2011: 112-117
- 14 北京翼辉信息技术有限公司 . SylixOS 应用开发手册 [EB/OL]

# 基于光电二极管的低成本小型化粒子探测仪

仪控工程技术部, 刘艳成 刘洪涛

Si PIN 型光电二极管 (Si PIN Photodiode), 通常用于探测光信号的变化, 在许多行业得到了广泛的应用。相对于 Si(Li) 漂移探测器, Si PIN 探测器不需要低温保存, 也不需要工作在低温下。事实上, 从内部结构上看, PIN 型光电二极管和用于测量射线用的 Si PIN 探测器并没有本质的区别。由于 Si PIN 光电二极管已经有大量成熟的商业化产品, 有些价格非常便宜。因此, 我们采用 Si PIN 型光电二极管制作粒子和射线探测仪。

## Si PIN 光电二极管的选型

市面上常用的 Si PIN 光电二极管有两种表面封装方式: 玻璃窗金属罐型和树脂封装型。玻璃窗封装的 Si PIN 光电二极管将 Si PIN 封装在一个金属罐内, 窗口采用玻璃。本次实验中, 我们采用日本滨松 (Hamamatsu) 公司生产的 S1223 Si PIN 光电二极管。S1223 光电二极管的暗电流为 0.1 nA, 结电容为 10 pF, 反向极化最高偏置电压为 +30 V。

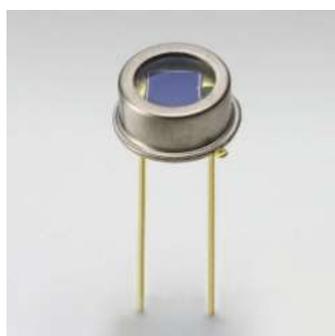


图 1 S1223 Si PIN 光电二极管

## 电荷灵敏前置放大器

光电二极管产生的信号幅度非常低, 因此为了方便对 Si PIN 产生的信号进行采集, 有必要在采集前对信号进行放大。在电荷灵敏前置放大器中, 我们采用具有 JFET 输入级 500 MHz 带宽的低噪声 OPA656 对信号进行放大, OPA656 特别适合高速和低噪声的信号放大。同时, 我们采用 100 MΩ 的偏置电阻, 以降低 Johnson 噪声。为了减小工作中的光电二极管的结电容, 我们采用了最大 +30 V 的反向电压。电荷灵敏前置放大器的电路如图 2 所示:

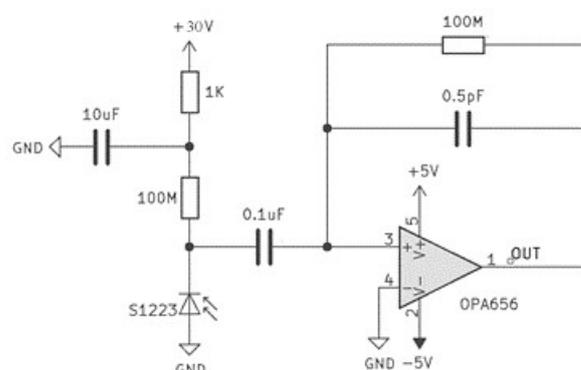


图 2 电荷灵敏前置放大电路

## 电源供电和电源芯片的选择

在探测仪的电源部分, 我们采用了由电脑 USB 供给 +5 V 的电源。从图 2 描述可以看出, 探测仪需要 ±5 V 和 +30 V 的电源, 因此, 对于光电二极管需要的 30V 电源, 我们选择 MAX5028 电源芯片, 将 USB 提供的 +5 V 转换为 +30 V。而对于 OPA656 需要的 ±5 V, 我采用 MAX17067、MAX889 和 LT3032 电源芯片, 将 USB 提供的 +5 V 转换为 ±5 V, 以满足 OPA656 正常工作的需求。

## 信号采集和整体架构

信号采集部分, 我们选用低成本成熟的商业化 USB 声卡作为信号采集卡, 整体框架如图 3 所示。

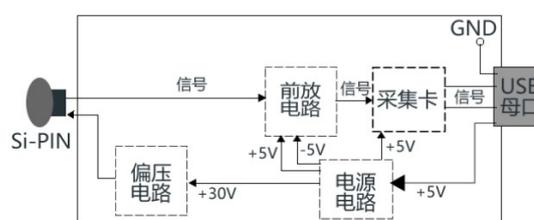


图 3 探测仪整体架构

信号通过 USB 母口和 USB 线上传到电脑。至此, 探测仪的硬件部分, 通过外壳封装之后就完成了。封装之后的探测仪如图 4 所示。

为了测试信号的情况, 我们对探测仪获取的信号进行了分析。采用  $Am-241$  作为放射源产生脉冲信号, 从图 5 可以看出, 我们的探测仪得到了信噪比较好的脉冲信号。



图4 探测仪成品：（左）USB 接口面；（右）探测面

### 脉冲信号的采集和分析

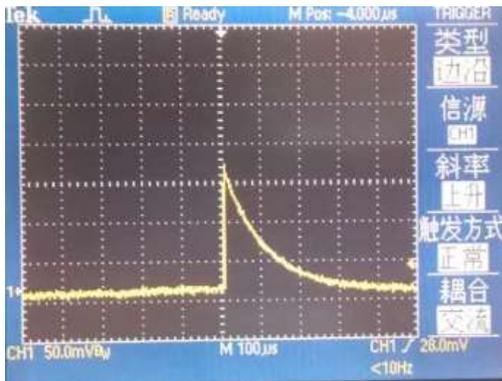


图5 探测仪获取的脉冲信号

### 上位机软件

基于 Python 和 PyQt5, 我们编写了上位机软件, 处理来自探测仪的脉冲信号。如图 6, 在软件中, 我们通过算法完成了传统核测仪器中的“多道分析器”的硬件功能。

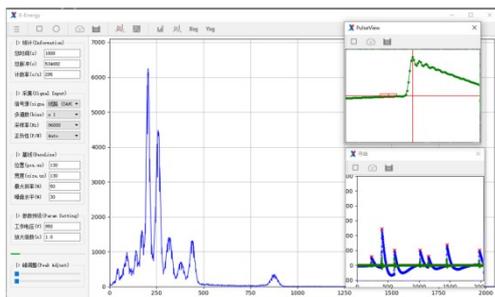


图6 探测仪上位机软件波形处理和 multidata 分析

在软件中, 首先获取脉冲序列, 在脉冲序列中, 有的脉冲幅值高, 有的脉冲幅值低。通过寻峰, 我

们可以获得脉冲总数, 再通过获取时间, 两者的比值即为探测仪的计数率。然后, 我们再划分一定数目的道(bins), 如 1024, 即 1024 道。通过寻峰之后, 对于每一个峰, 我们通过索引, 就可以获取峰所对应的脉冲序列中的幅值。再根据幅值的大小, 填入道最接近值的“道”中, 通过累加每个道中的填入数目, 我们就可以得到对应的能谱。图 7 所示即为通过上述算法获取的 Am-241 alpha 能谱图。

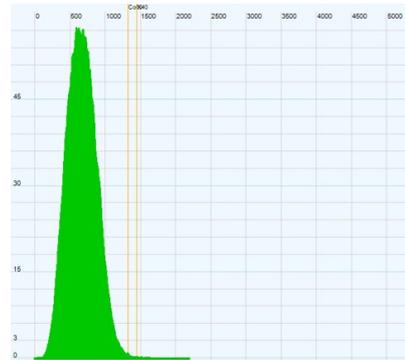


图7 上位机软件通过多道分析之后获得的 Am241 alpha 能谱

### 结语

通过价格低廉的成熟的商业化产品 Si PIN 光电二极管, 我们制作的低成本小型化的放射性粒子探测仪。通过算法, 我们用上位机软件中的功能代替了传统仪器中的“多道分析器”硬件, 通过验证, 我们发现在上位机软件中实现“多道分析”的功能是可行的, 对于后续仪器的开发奠定了基础。

该研制的小型化探测仪, 未来应用在多种场合, 如电子直线加速器 shower 电子的监测, 从而监测电子束流的状况。通过本次实验验证, 我们认为, 这种方法既节省了成本, 又能满足一定的功能需求, 因此, 我们认为, 这种方法对于研制具有一定功能的小型化核测便携式设备具有重要的借鉴意义。为未来开发低成本小型化便携设备提供了一种方法和方案。

### 参考文献

- 1 E. Emirhan, A. Bayrak, *et al.* A low cost X-ray imaging device based on BPW-34 Si-PIN photodiode. Nuclear Instrments and Methods in Physics Research A. 819 (2016) 1-5
- 2 <http://physicsopenlab.org/2017/09/27/charge-sensitive-preamplifier/>

# 中子成像技术初步研究

仪控工程技术部, 黄跃峰 侯会良

中子成像设备样机采用模块化设计的方式, 各个部分采用高速接插件连接, 方便维护与调试, 由中子探测单元、主板、主控板 (FPGA 计数板) 和信号处理板组成。其中中子探测单元使用载钷闪烁体作为转换体, 配合 SiPM 作为光电转换器件, 使用 FPC 排线与主板连接。主板起到连接各个组件的作用, 同时为整个系统提供电源, 探测单元通过主板上的 FPC 接插件与主板连接, 主板上还有高速接插件与主控板相连, 板载 16 个信号处理模块接口。样机实物如图 1 所示。

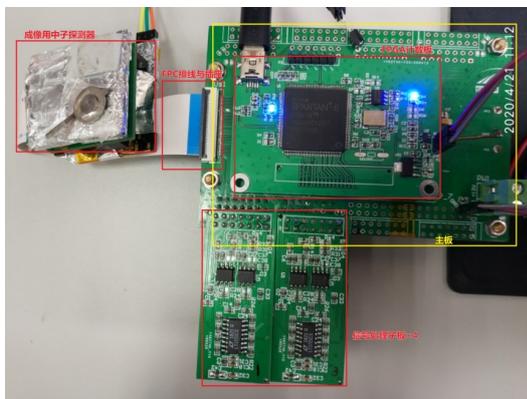


图 1 中子成像设备样机实物

在 Am-Be 中子源的中子场中使用该样机进行了初步成像实验。分别用打孔镭板和镭条进行测试, 由于实验用的 Am-Be 中子源中子产额很低, 实际探测到的热中子仅为  $20/\text{cm}^2/\text{s}$  左右, 使用了简单的图像处理方法对本底进行了扣除。打孔镭板的实际成像效果如图 2 所示, 镭条的实际成像效果如图 3 所示。

从成像效果看初步验证了该方案的可行性, 基于该方案的中子成像设备各个像素点相互独立, 灵敏度高, 在中子通量小的中子场中同样具备较好的成像效果。由于前期出于成本考虑, 仅使用了  $4 \times 4$  SiPM 阵列, 闪烁体与 SiPM 直接贴合没有光耦等复杂光路设计, 使得分辨率受单个 SiPM 尺寸 ( $3 \times 3 \text{ mm}$ ) 的限制。考虑到后续升级, 主板上还留有多个信号处理板的位置, 后续将扩展到  $8 \times 8$  SiPM 阵列, 同时设计更加精细的光耦提高分辨率。

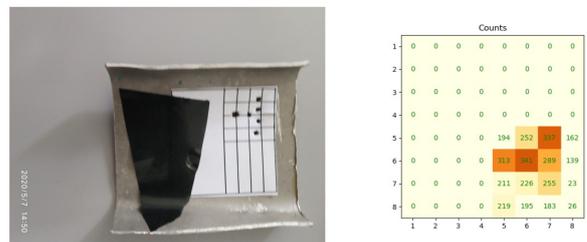


图 2 多孔镭板成像结果, (左) 打孔镭板, (右) 打孔镭板成像结果

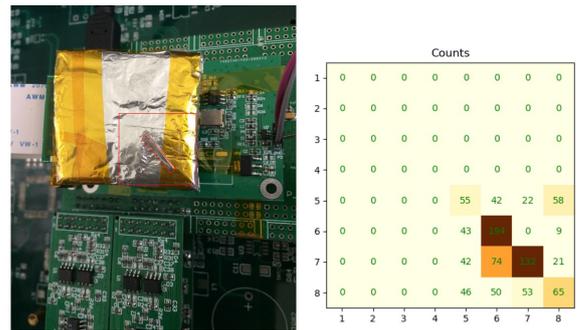


图 3 细镭条成像结果, (左) 细镭条与探测器的摆放位置, (右) 镭条成像结果

# TMSR 棒控棒位 (RGL) 系统研制

仪控工程技术部, 魏永波 李琴 后接

棒控棒位系统 (RGL) 是反应堆中十分重要的系统, 其核心功能是在确保反应堆安全的前提下, 通过最佳的提\落棒程序控制反应性, 来满足反应堆长期运行的需要。TMSR 是一种新型反应堆, 其物理特性及工况特点决定其控制系统的技术要求和传统的三代压水、沸水堆及四代高温气冷、钠冷、铅冷堆不同。因此, 控制棒运行的精确性, 响应的快速性, 控制的可靠性均是设计 TMSR 棒控棒位系统 (RGL) 的重要考虑因素。与此同时基于 RGL 系统样机功能测试研究, 为 LF1 设备设计研制加工测试提供了指导。

## RGL 系统研究

RGL 系统按照控制、测量功能的侧重不同分为 TMSR 棒控子系统和 TMSR 棒位测量子系统。TMSR 棒控子系统框架的上层硬件采用高性价比、模块化、兼容性强、可扩展的 ATCA 硬件构架, 满足高速数据传输的需求; 局域网架构采用双环网设计, 提高网络系统的可靠性; 设备控制器采用西门子 S7-400H 冗余 PLC, 提高系统的可靠、稳定性; 驱动器采用自行研制的现场总线通讯的冗余驱动设计; 步进电机采用自行研制的耐高温、大力矩步进电机, 能满足高温、辐照工况下高精度位置控制要求。TMSR 棒位测量子系统架构和 TMSR 棒控子系统类似, 不同在于其设备控制器主要实现位置、温度测量等功能。采用冗余的旋变测量系统设计; 极限位置采用自行研制的接触式、高温限位开关。

## RGL 系统样机测试研究

RGL 系统样机 (简称样机, 下同) 测试主要是对样机的关键设备、部件、软件功能进行测试。在常温条件下, 样机在连续 5 组 8 小时稳定性测试中, 驱动机构将控制棒稳定在  $1459.50 \pm 0.50$  mm 间<sup>[1]</sup>。在冷态台架上进行 2464 mm 全行程落棒测试, 样机的落棒时间小于 6s<sup>[2-3]</sup>。在冷态台架上样机能够驱动 125 公斤控制棒以最大 20mm/s 速度稳定运行。利用 NI DAQ 采集卡接收落棒触发信号和棒位信息, 测试样机电延迟时间小于 140 ms<sup>[4]</sup>。样机在室温或 40℃ 更高环境温度下, 电机带动驱动机构在 10

mm/s、20 mm/s 速度运行时, 自身温升不大于 10℃<sup>[5]</sup>。采用钴源对电机进行累计辐照  $2.2 \times 10^6$  Gy 剂量实验, 辐照实验结束后, 步进电机的相电阻、相一地阻抗测试正常, 电机运行正常, 力矩测试正常<sup>[6]</sup>。另外, 软件功能实现了西门子 S7-400H 冗余 PLC 和 EPICS 之间通讯、大数据量传输。

## LF1 设备研制加工测试研究

TMSR-LF1 棒控棒位系统在 RGL 系统样机的基础上进行了优化设计, 系统包含第一、第二两套停堆系统控制棒控制, 主要工作集中在控制软件、界面、通讯调试、测试方面。现已完成对 LF1 棒控棒位的控制、棒位监测, 独特的分布式 PLC 控制设计, 使单根控制棒故障、检修时, 不影响其他棒的控制、测量。首次实现西门子 PLC 和国核 NUCON 的 Modbus TCP 通讯, RGL 测量数据和 PCS 之间实现交互。具备控制棒电机的电压、电流实时性能监测, 及提棒卡棒监测, 以及温度、限位、棒位多变量的组合报警功能。



图 1 LF1 棒控棒位 (RGL) 机柜

## 参考文献

- 1 TMSR-RE-CR-TR-2015-CRDM-0401. 控制棒驱动机构稳定性测试报告[R]
- 2 TMSR-RE-CR-TR-2014-12. 控制棒驱动机构原型样机测试大纲[R]
- 3 TMSR-RE-CR-TR-2014-CRDM-0401. 控制棒驱动机构内部测试报告[R]
- 4 TMSR-RE-CR-TR-2015-CRDM-0403. 控制棒驱动机构机电延迟测试报告[R]
- 5 TMSR-RE-CR-TR-2015-CRDM-0404. 控制棒驱动机构电机运行温升测试报告[R]
- 6 TMSR-RE-CR-TR-2014-17. 辐照测试技术规格书[R]

# 干法工艺示踪实验验证

放射化学与工程技术部, 窦强 付海英 孙理鑫 周金豪 牛永生 胡聪伟 罗艳

基于钍基熔盐堆(TMSR)液态燃料的技术特点, 干法后处理技术被认为是实现钍铀燃料循环、载体盐  $7\text{LiF}$  回收复用的首选技术方案。为掌握干法后处理的关键技术, 建立适合 TMSR 燃料盐处理流程, TMSR 团队采取了由冷态到热态、由分工艺到贯通、逐步放大规模的研发方式开展 TMSR 燃料盐干法批处理工艺线的攻关工作。

在乏燃料后处理技术的开发过程中, 通常都是先在冷态条件下开展工艺可行性研究和工艺参数的测定, 随后进行工艺处理线的贯通和优化研究, 为后续的工艺放大和热态下工艺流程验证奠定实验基础。目前, 干法组团队已完成氟化挥发、减压蒸馏两项关键干法技术的可行性研究, 获得了主要的工艺参数。在此基础上开展公斤级规模的氟化挥发、减压蒸馏工艺冷态贯通实验, 通过冷态贯通实验对干法工艺线的工艺参数、技术指标和关键辅助技术(如工艺过程在线监测、熔盐定量输运等技术)进行了集中的验证和初步优化。

对冷态贯通实验的结果进行综合分析后, 发现虽然预定研究目标均已实现, 但同时也暴露出了一些亟待解决的问题: 1) 冷态贯通实验使用的模拟燃料盐中需添加多种代表性的裂变产物氟化物, 以研究裂变产物在工艺线中的走向和分布, 获得产品中裂变产物的去污性能。但由于市售的裂变产物的稳定同位素氟化物种类有限, 贯通实验仅考察了稀土、碱土、碱金属类产物的分离行为; 2) 由于冷态实验的样品分析主要依赖于 ICP-AES、ICP-MS 等分析手段, 因此, 模拟燃料盐中裂变产物的添加浓度均要达到数千 ppm 水平, 比堆内裂变产物的真实浓度要高 3~4 数量级, 因此, 模拟燃料中裂变产物的分离行为与真实燃料体系可能仍然存在着一定差异; 3) 冷态贯通实验中主要工艺单元间熔盐等关键物料的运输稳定性还需进一步提高, 熔盐物料的液态输运以及相关硬件设计是关系到工艺线稳定运行的技术关键。这些问题只有得到有效解决, 才能实现对干法工艺线较全面的验证和优化。

因此, 拟利用所内的已有资源——白光中子源开展铀和钍氟化物靶件的辐照和干法工艺线示踪实验。辐照后的钍铀靶件中不仅含有种类齐全的锕系元素、裂变产物氟化物, 而且其浓度水平更低, 对于验证干法工艺的可行性和可靠性都有重要意义。更为重要的是, 干法示踪实验不但可对前期掌握的干法工艺参数进行更加全面的验证, 而且可考察关

键核素 ( $^{233}\text{Pa}$ 、 $^{239}\text{Np}$ 、贵金属类裂变产物等) 在流程中的分布和走向, 积累放射性干法实验的操作和分析经验, 将为 TMSR 燃料处理流程的优化和热验证方案的确定奠定重要的实验基础。

## 1 氟化挥发

利用白光中子源开展铀和钍氟化物靶件的辐照, 辐照后的钍铀靶件中含有种类齐全的锕系元素、裂变产物氟化物。在  $\text{FLiBe-ZrF}_4$  熔盐体系中, 开展了氟化挥发技术处理辐照后的  $\text{UF}_4$  并回收铀的实验研究, 重点考察次锕系及裂片元素走向及分布, 并尝试使用放射性检测技术在线监测氟化过程, 为氟化挥发工艺的优化和处理真实燃料盐提供理论基础和技术支持。

**氟化过程:** 整个氟化分离过程共计 5 h, 氟化后熔盐中 U 含量为 130 ppm, U 转化率大于 99.9%。实验过程中对反应釜和吸附柱进行  $\gamma$  能谱在线监测, 结果显示: 随着氟化反应和氟化产物解吸附反应的推进, 监测目标物料中  $^{237}\text{U}$  和  $^{239}\text{Np}$  的  $\gamma$  活度均呈明显下降趋势, 和红外检测结果趋势一致(见图 1 和 2), 且  $^{237}\text{U}$  的  $\gamma$  活度检测不存在延时, 可见  $\gamma$  能谱检测有望应用于氟化挥发在线监测。

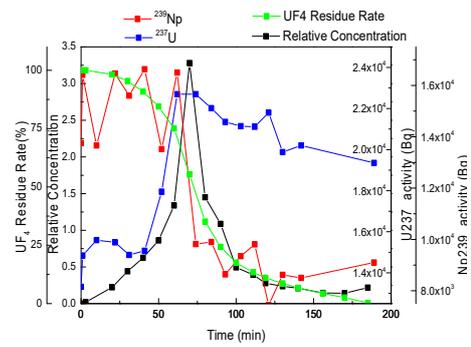


图 1 氟化反应阶段反应器出口气体中  $\text{UF}_6$  相对浓度、 $\text{UF}_4$  转化率和  $^{237}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Np}$  活度与时间的关系

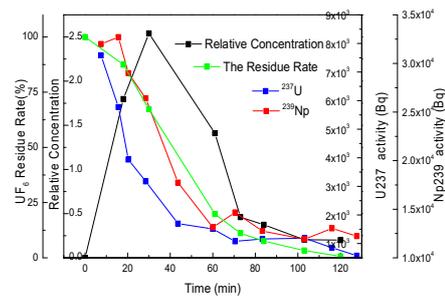


图 2 解吸附阶段吸附柱出口气体中  $\text{UF}_6$  相对浓度、 $\text{UF}_4$  转化率和  $^{237}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Np}$  活度与时间的关系

**原料溶解:** 原料 UF<sub>4</sub>、LiF-ThF<sub>4</sub> 和氟化前熔盐粉末进行称量并进行  $\gamma$  检测, 基于测量结果进行时间修正, 计算原料及初始熔盐中各核素总  $\gamma$  活度并进行比较, 结果见图 3。UF<sub>4</sub> 和 FLiTh 在熔盐中的溶解较好。锕系核素 (<sup>239</sup>Np, <sup>237</sup>U 和 <sup>233</sup>Pa) 熔融前后活度变化不显著, 在熔盐中较稳定。裂变产物 <sup>140</sup>Ba, <sup>141</sup>Ce, <sup>141</sup>Ce, <sup>140</sup>La, <sup>95</sup>Zr 为亲盐核素, 在熔盐中分布较稳定, 溶解前后活度变化不大。而裂变产物 <sup>131</sup>I 随着熔盐加热熔融, 部分挥发逸出, 在熔盐中活度仅为原料活度的 60%。

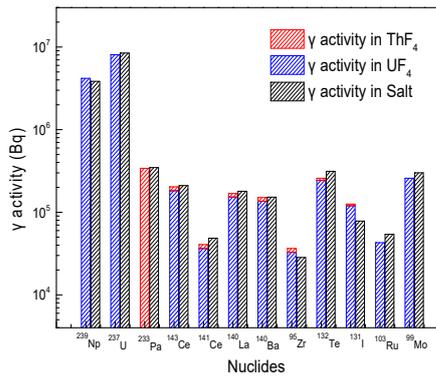


图 3 UF<sub>4</sub>、ThF<sub>4</sub> 和氟化前熔盐中核素  $\gamma$  活度

**核素分布及衡算:** 对氟化挥发工艺中各种关键

核素的分布行为进行研究, 结果显示(详见图 4 和 5): 氟化物沸点较高的核素 <sup>140</sup>Ba, <sup>141</sup>Ce, <sup>143</sup>Ce, <sup>140</sup>La, <sup>95</sup>Zr 和 <sup>233</sup>Pa 几乎全留在燃料盐中, <sup>95</sup>Zr 和 <sup>233</sup>Pa 也仅有不到 1% 进入了 400°C NaF 吸附阱中。核素 <sup>131</sup>I, <sup>132</sup>Te 的氟化产物沸点低, 因此在氟化后燃料盐中没有残留, 但在各个阶段的尾气和产物收集器中均有发现。核素 <sup>103</sup>Ru 的氟化产物沸点介于 <sup>131</sup>I, <sup>132</sup>Te 之间, 氟化后约有 18% 留在燃料盐中, 其余均分布在 400°C NaF 吸附阱中。核素 <sup>239</sup>Np, <sup>237</sup>U 和 <sup>99</sup>Mo 氟化产物的物性相似, 核素 <sup>239</sup>Np 在燃料盐中无残留, 在 NaF 吸附阱和吸附柱中分别发现有 10.6% 和 8.6% 的残留, 各个阶段尾气中也有发现。核素 <sup>99</sup>Mo 在燃料盐中无残留, 在 NaF 吸附阱和吸附柱中分别发现有 4.7% 和 2.0% 的残留, 在解吸附阶段尾气中也有发现。核素 <sup>237</sup>U 在燃料盐以及 NaF 吸附剂中的残留均小于 0.2%, 在解吸附阶段尾气中有极少量发现。本工作对于了解关键核素在流程中的行为具有积极意义。

**去污研究:** 氟化挥发工艺 U 产物对核素 <sup>140</sup>Ba, <sup>141</sup>Ce, <sup>143</sup>Ce, <sup>140</sup>La, <sup>103</sup>Ru, <sup>95</sup>Zr, <sup>233</sup>Pa 和 <sup>132</sup>Te 去污效果较好, 去污系数 > 10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>。去污系数数值与前期冷态实验结果以及文献报道相近。<sup>131</sup>I, <sup>99</sup>Mo, <sup>239</sup>Np 氟化物沸点较高, 且 NaF 吸附剂不能将其完全吸附除去, 因此这些核素的去污较差。

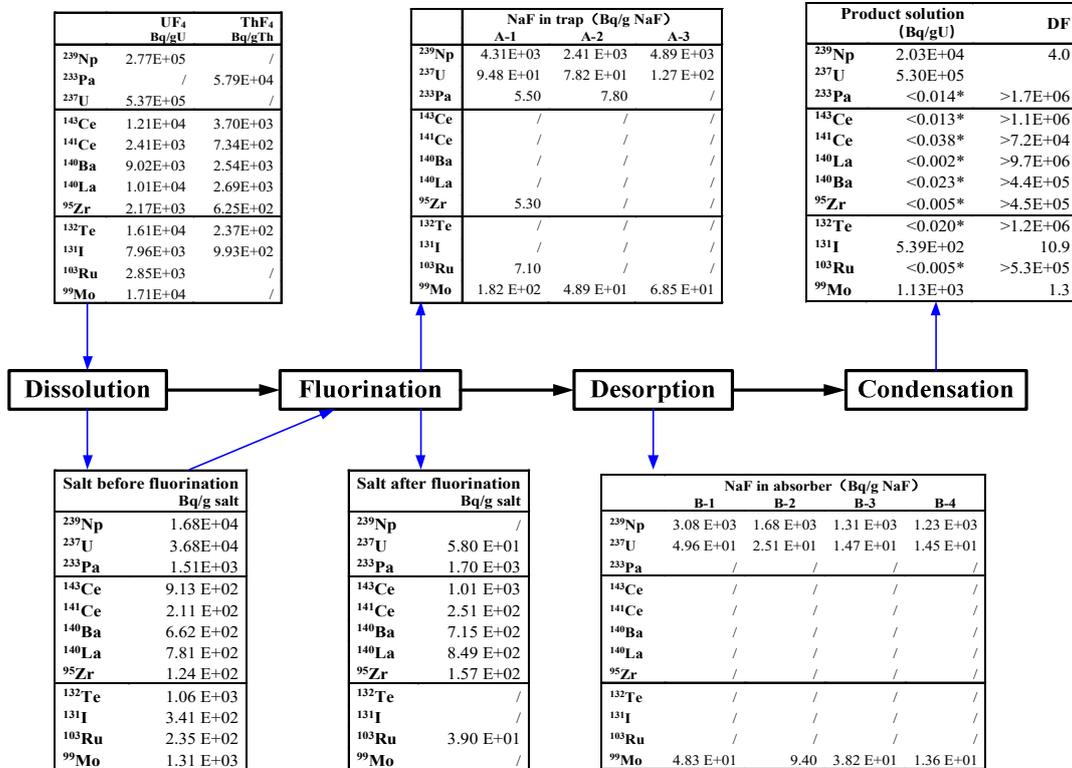


图 4 UF<sub>4</sub>、ThF<sub>4</sub> 原料, 氟化前后熔盐, NaF 吸附剂以及产物中核素的比活度

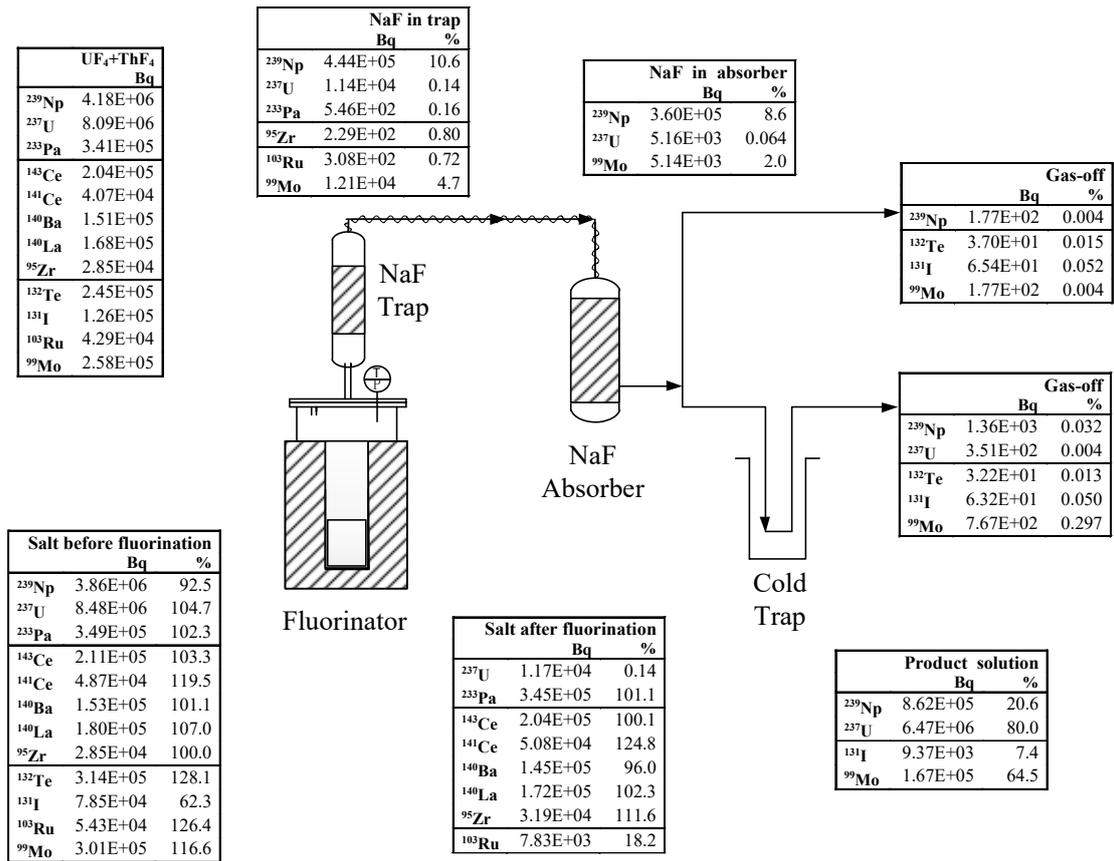


图5 UF<sub>4</sub>、ThF<sub>4</sub>原料，氟化前后熔盐，NaF 吸附剂以及产物中核素的活度及其占原料中的比例

## 2 熔盐蒸馏

利用氟化挥发后的燃料盐开展了熔盐减压蒸馏工艺示踪实验，重点研究了多种锕系元素、裂变产物在蒸馏过程中的走向，进一步评估了载体盐蒸馏回收的技术可行性。燃料盐蒸馏回收实验过程共计 4 h，实验后重点分析了蒸馏收集盐和残余盐的化学组成和其中各核素的放射性活度。选择 LiF 熔盐为参照，利用 ICP-MS 分析各主要组分的含量，分析表明燃料盐中 ThF<sub>4</sub> 基本蒸馏前 0.21 mol%，蒸馏后残余盐中 ThF<sub>4</sub> 的含量为 0.69 mol%，说明 ThF<sub>4</sub> 没有

蒸发，ThF<sub>4</sub> 的相对挥发度仅为 0.04，而 BeF<sub>2</sub> 和 ZrF<sub>4</sub> 的相对挥发度分别为 3.2 和 5.0，该结果与 ORNL 蒸馏物性实验结果相一致。

蒸馏前后各核素的能谱图见图 6，图 6b 很难观测到 <sup>141</sup>Ce，<sup>140</sup>Ba，<sup>140</sup>La，等稀土类裂变核素，进一步分析收集盐中各种裂变产物核素的去污因子，<sup>141</sup>Ce 为 (6.2±1.0) ×10<sup>2</sup>，<sup>143</sup>Ce 为 (5.3±1.0) ×10<sup>2</sup>，<sup>140</sup>Ba 为 (4.3±0.5) ×10<sup>2</sup>，<sup>140</sup>La 为 (2.4±0.2) ×10<sup>2</sup>，这表明即使在浓度极低情况下熔盐减压蒸馏技术仍然能够实现载体熔盐的高效纯化与分离。

表 1 锕系核素的比活度

Nuclide	T <sub>1/2</sub> /day	activity concentration (Bq/g salt)		
		Crude salt	Residual salt	Receiver
<sup>239</sup> Np	2.356	2436.3	10039.4	ND
<sup>233</sup> Pa	26.98	327.34	ND	263.98
<sup>237</sup> U	6.75	1684.6	7522.8	65.7

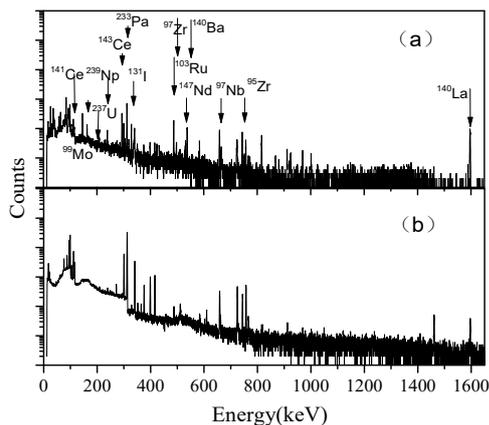


Fig. 6 含辐照 UF<sub>4</sub> 和 ThF<sub>4</sub> 的 FLiBe-ZrF<sub>4</sub> 蒸馏前后的能谱图 (a)原始盐, (b) 收集盐

减压蒸馏工艺中锕系元素 U, Pa 和 Np 的活度见表 1, 可以看出 U 和 Np 主要在残留盐中, 极少部分挥发进入收集盐, 而 <sup>233</sup>Pa 展示出了独特的分离行为和物料走向: 剩余盐中 <sup>233</sup>Pa 含量极低, 而蒸馏收集盐中 <sup>233</sup>Pa 的活度却很高, 说明经历了氟化挥发处理后 <sup>233</sup>Pa 更加易于挥发, 这一现象有望为发展新的 <sup>233</sup>Pa 干法在线分离方法提供技术思路。

本工作成功地进行了氟化挥发、减压蒸馏示踪实验操作和样品放射性分析, 确定了放射性核素在熔盐中浓度极低时, 其在干法工艺线中的走向和分布, 验证了放射性在线监测技术的可行性, 为 TMSR 燃料处理流程的优化和热验证方案的确定提供实验基础。

## 致谢

本工作得到国家自然科学基金(No.NSFC21771188)、中国科学院战略性科技先导专项-钍基熔盐堆核能系统(No.XDA02030000)、中国科学院前沿科学重点研究项目-钍铀燃料循环特性和若干关键问题研究(No.QYZDY-SSWJSC016)资助。

## 参考文献

1. G.I. Cathers, R.L. Jolley, H.F. Soard, Use of fused salt-fluoride volatility process with irradiated uranium decayed 15-30 days, ORNL-3280 1962, 29
2. L. Sun, Y. Niu, C. Hu, C. Wang, Q. Dou, Q. Li, Influence of molten salt composition on the fluorination of UF<sub>4</sub>, Journal of Fluorine Chemistry, 2019, **218**: 99-104
3. E.L. Compere, E.G. Bohmann, S.S. Kirslis, F.F. Blankenship, W.R. Crimes, Fission product behavior in the molten salt reactor experiment, 1975
4. L.E. Trevorrow, T.J. Gerding, M.J. Steindler, The fluorination of neptunium(IV) fluoride and neptunium(IV) oxide, Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 1968, **30**: 2671-2677
5. Z.Q. Zhao, J.F. Hu, Z.Q. Cheng, J.X. Geng, W.X. Li, Q.Dou, J.G. Chen, Q.N. Li, X.Z. Cai, Distribution and behaviour of <sup>233</sup>Pa in 2LiF-BeF<sub>2</sub> molten salt, RSC Advances, 2021, **11**: 7436-7441
6. J. R. Hightower, Jr., L. E. McNeese, Measurement of the Relative Volatilities of Fluorides of Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Ba, Sr, Y, and Zr in Mixtures of LiF and BeF<sub>2</sub>, ORNL-TM-2058, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, 1968
7. J. W. Kigh-tower, L. E. McMeese, B. A. flannaford, H. B. Cochran, Low pressure distillation of a portion of the fuel salt from the molten salt reactor experiment, ORNL-4577, Oak Ridge National Lab. Tenn., 1971

# 钍铀循环关键镧铀元素综合利用研究

放射化学与工程技术部, 龚昱 陈秀婷 王晨阳 李杨娟 刘西艳 熊志欣 黄卫

本课题组针对钍铀循环中的关键镧系和铀系元素, 开展了钍铀循环关键元素的再利用化学研究, 包括基于光谱和质谱方法的镧系和铀系配位化学研究和一系列新型镧系和铀系化合物的合成、性质与潜在应用研究。

## 基于光谱和质谱方法的镧系和铀系配位化学研究

多电荷金属配合物离子的气相化学研究能从分子水平确定特定金属离子和配体分子的性质对整个配合物在结构、成键和反应性等方面的影响。目前人们已经对碱土/过渡金属与简单配体结合形成的气相双/三电荷配合物离子进行了大量实验与理论研究, 阐明了其组成、结构和化学反应规律<sup>[1]</sup>。

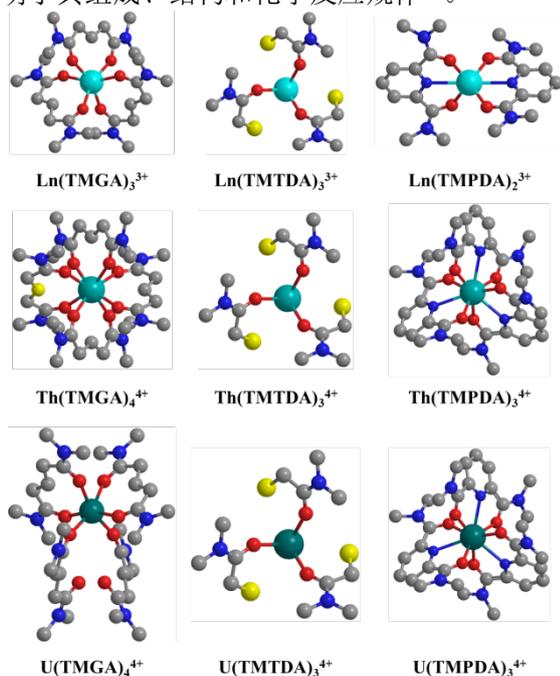


图1 B3LYP/6-31G(d)/SDD 水平下优化得配合物的结构

我们利用离子阱质谱耦合的 ESI 技术制备一系列多电荷镧/铀系金属—二酰胺配合物离子。研究对象包括镧系 (III) 金属<sup>[2-4]</sup>、铀酰 (VI)<sup>[5]</sup>、钍/铀(IV)<sup>[6-8]</sup>离子和双齿、三齿中性二酰胺配体, 分别考察了金属离子性质、配体结构及溶剂分子和反阴离子类型对气相多电荷金属配合物离子的形成与稳定性的影响。实验结果表明, 三齿二酰胺 (N,N,N',N'-四甲基-3-氧杂戊二酰胺 TMOGA、N,N,N',N'-四甲基吡啶-2,6-二酰胺 TMPDA) 比双齿二酰胺 (N,N,N',N'-四甲基戊二酰胺 TMGA、N,N,N',N'-四甲基-3-硫杂戊

二酰胺 TMTDA) 对三/四价镧/铀系金属离子在气相中的稳定性作用更强, 非质子化溶剂比质子化溶剂更有利, 与金属结合能力较弱的反阴离子更有助于气相多电荷金属配合物离子的形成。

利用离子阱质谱的 CID 手段对所形成的多电荷镧/铀系金属—二酰胺配合物离子进行了解离反应研究。对反应规律进行归纳总结得出, 各配合物离子的解离途径不尽相同, 所发生的主导反应主要取决于金属离子氧化还原性和配体齿合度及去质子化难易程度两个因素。

利用 DFT 理论计算对实验中对多电荷镧/铀系金属—二酰胺配合物离子进行了结构优化。在 B3LYP/6-31G(d)/SDD 水平下, 获得 Ln(TMGA)<sub>3</sub><sup>3+</sup>、Ln(TMTDA)<sub>3</sub><sup>3+</sup>和 Ln(TMPDA)<sub>2</sub><sup>3+</sup>等配合物离子的最稳定结构, 揭示了配位模式对它们的气相稳定性的影响, 解释了质谱实验中解离行为的差异。

氧的存在对镧系元素与铀系等裂变元素的分离具有很大影响, 为此有必要深入理解镧系或铀系金属元素与氧的成键特征或相互作用机制。通过高温拉曼光谱开展了不同氟化物熔盐对溶于其中的镧系元素和裂变产物元素氟化物的配位结构研究, 并通过引入 O<sup>2-</sup>发现了不同金属氟化物形成的氟氧化物; 结合理论计算的分析, 了解了不同金属氟化物在不同氟化物熔盐 (包括 FLiNaK、FLiBe、KF 等) 中的配位结构, 以及与 O<sup>2-</sup>的反应规律, 建立了熔盐组成和关键元素配位结构的直接关系<sup>[9]</sup>。以上研究结果将为钍铀循环过程中干法后处理技术的发展提供科学依据。

## 新型镧系和铀系化合物的合成、性质与潜在应用研究

以铀系元素 Eu 的胺基化合物为前体, 通过 Eu[N(SiMe<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>3</sub> 与氧转移试剂 Me<sub>3</sub>NO 的反应, 合成了一种全新的两核 Eu 化合物 Eu<sub>2</sub>(OCH<sub>2</sub>NMe<sub>2</sub>)<sub>2</sub>[N(SiMe<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>4</sub>, 通过晶体学、NMR、XANES 和磁分析等确定了配合物的整体结构及 Eu 中心所保持的 +3 价氧化态, 并发现反应过程中 Me<sub>3</sub>NO 同时经历了一种前所未有的 sp<sub>3</sub> C-H 键活化与氧原子转移 (OAT), 导致中心对称的双核 Eu 配合物的形成。用 Me<sub>3</sub>PO 与 Eu[N(SiMe<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>3</sub> 反应, 得

到一个简单的  $\text{Eu}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_3(\text{OPMe}_3)$  加合物。与  $\text{Me}_3\text{NO}$  相比,  $\text{Me}_3\text{PO}$  没有发生 C-H 键活化和 OAT 是由于较高的势垒和较低的产物稳定性阻止了氧转移产物的形成<sup>[10]</sup>。通过  $\text{Ce}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_3$  和氧转移试剂  $\text{Me}_3\text{NO}$  反应, 得到了一种全新的两核化合物  $\text{Ce}_2(\text{OCH}_2\text{NMe}_2)_2[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_4$ , 反应过程中,  $\text{Me}_3\text{NO}$  同时经历了  $sp^3$  C-H 活化与 OAT, 导致中心对称的双核 Ce 配合物的形成, 其中氧原子与铈离子以桥连的形式相结合。用  $\text{Me}_3\text{PO}$  与  $\text{Ce}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_3$  反应, 得到一个简单的  $\text{Ce}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_3(\text{OPMe}_3)$  加合物。通过 X 射线单晶衍射对两个化合物的结构进行了确定。另外, 发现这两种全新的铈的金属氧化物都具有光致发光现象, 可用于少量水的检测。这些实验结果首次证明镧系配合物可以实现氧转移试剂的 C-H 活化, 为镧系元素在有机化合物 C-H 键的活化和功能化方面的应用提供了新思路。

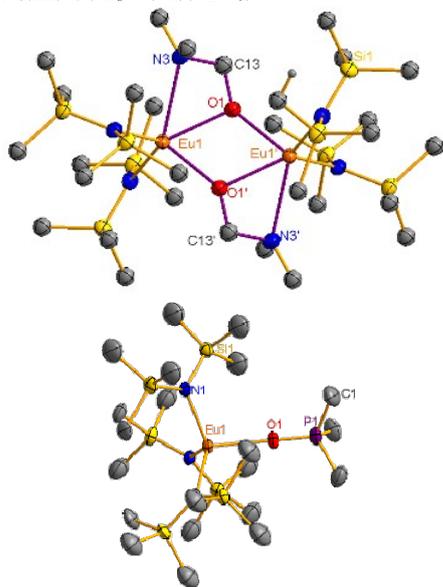


图 2  $\text{Eu}_2(\text{OCH}_2\text{NMe}_2)_2[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_4$  和  $\text{Eu}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_3(\text{OPMe}_3)$  配合物结构

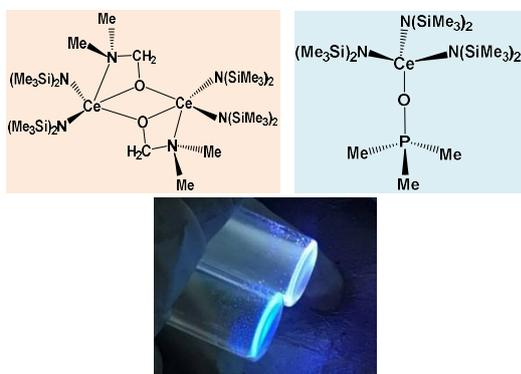


图 3 铈金属氧化物结构和光致发光现象

通过熔盐合成方法<sup>[11-12]</sup>, 开展了镧系元素金属硼化物材料的可调控制备研究, 系统研究了反应前

驱体种类和比例、温度和时间等因素对硼化物物相、形貌和结构的影响, 了解了硼化物在熔盐介质中的生长规律, 实现了镧系硼化物的可调控制备, 分别获得了纳米棒状的四硼化钐、纳米立方体状的六硼化钐、六硼化铈和六硼化钕等硼化物<sup>[13-14]</sup>。在此基础上, 开展了该类材料对废水中污染物的处理性能研究, 发现了镧系硼化物对多种有机染料污染物的吸附、降解行为和还原现象, 阐释了作用机制, 拓展了镧系硼化物在环境领域的应用。以上研究结果将为钍铀循环裂变产物核素功能材料的再利用提供必要的科学依据。

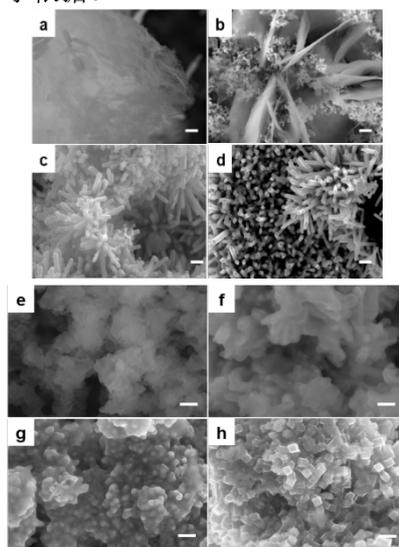


图 4 钐的硼化物合成及微观结构

## 参考文献

- 1 陈秀婷等. 核化学与放射化学, 2017, 39: 1-12.
- 2 Chen X T, *et al.*, J Am. Soc. Mass Spectrom, **2017**, 28: 1696-1701.
- 3 Chen X T, *et al.*, J Phys. Chem. A, **2017**, **121**: 9429-9434.
- 4 Chen X T, *et al.*, Inorg. Chem., 2020, **59**: 14486-14492.
- 5 Chen X T, *et al.*, Inorg. Chem., 2019, **58**: 5695-5702.
- 6 Chen X T, *et al.*, J Am. Soc. Mass Spectrom, 2018, **29**: 2327-2332.
- 7 Chen X T, *et al.*, J Am. Soc. Mass Spectrom, 2019, **30**: 2623-2631.
- 8 Chen X T, *et al.*, J. Am. Soc. Mass Spectrom, 2021, **32**: 700-706.
- 9 Wang C, *et al.*, J. Phys. Chem. B, 2020, **124**: 6671-6678.
- 10 Li Y J, *et al.*, Dalton Transactions, 2019, **48**: 17158-17162
- 11 Portehault D, *et al.*, Angewandte Chemie International Edition, 2011, **50**(14): 3262-3265.
- 12 Gouget G, *et al.*, Faraday Discussion, 2016, **191**(0): 511-525.
- 13 Liu X, *et al.*, Journal of Alloys Compounds, 2021, **867**: 159174.
- 14 Liu X, *et al.*, ACS Applied Nano Materials, 2019, **2**(9): 5704-5712.

# 电化学技术在钍基熔盐堆燃料盐处理和化学监测中的应用

放射化学与工程技术部, 黄卫 蒋锋 余长锋 彭浩 龚昱

本课题组以 TMSR-LF1 燃料盐为研究对象, 采用电化学技术开展了 FLiBe 熔盐体系中铀系和钍系元素的电化学分离行为研究, 同时利用电化学分析方法建立燃料盐氧化还原性的调控和检测方法。此外, 还深入探索了熔盐堆燃料盐中核燃料沉淀的形成规律、影响因素及其作用机制。

## 钍基熔盐堆燃料的电化学分离技术研究

采用电化学循环伏安法研究了 FLiBe 熔盐中 ThF<sub>4</sub>, UF<sub>4</sub>, LaF<sub>3</sub>, CeF<sub>3</sub>, PrF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, SmF<sub>3</sub>, EuF<sub>3</sub>, TbF<sub>3</sub> 在多种金属电极上的电化学行为研究, 完成了它们在镍电极, 铜电极和铝电极上的氧化还原电位

序列测量, 为钍铀与稀土元素的电解分离提供实验数据支撑。开展了 FLiBe-LaF<sub>3</sub>-CeF<sub>3</sub>-HoF<sub>3</sub>-UF<sub>4</sub> 体系中铀的电解分离实验, XRD 测试结果表明成功分离出铀产物, 且不含有 La, Ce, Ho 稀土元素。

开展了 LiCl-KCl 熔盐体系中铀系元素和钍系元素电化学分离研究, 结果表明选取合适的电极并施加适当的电位, 能够实现铀系元素和钍系元素的分离。对分离产物 XRD 和 ICP-OES 分析结果表明, 钍, 铀能够以金属态的形式分离出来, 而钍系元素留在熔盐体系中。与 Gd, Ce, Tm 等稀土元素离子相比, Th 更优先从熔盐中析出在铝电极表面, 与 Al 形成 Th-Al 合金<sup>[1-2]</sup>。

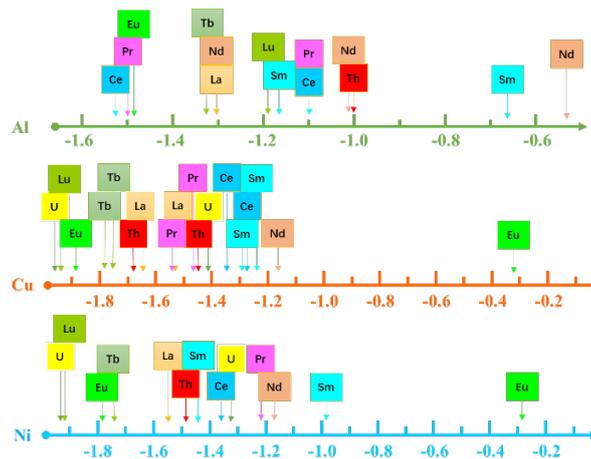


图 1 FLiBe 熔盐中钍铀和稀土在活性电极上的析出电位表

表 1 LiCl-KCl-MF<sub>x</sub> 体系中铀/钍系元素在不同金属电极上还原电位

电极		银电极	铜电极	镍电极	铝电极
LiCl-KCl					
UF <sub>4</sub>	U <sup>4+</sup> → <sup>3+</sup>	-1.21	-1.16	-0.55	-1.39
	U <sup>3+</sup> → <sup>0</sup>	-1.53	-1.64	-1.68	
TmF <sub>3</sub>	Tm <sup>3+</sup> → <sup>2+</sup>	-1.97	-2.03	-2.17	-1.55
	Tm <sup>2+</sup> → <sup>0</sup>	-1.80	-1.80	-1.83	
CeF <sub>3</sub>		-1.90	-1.98	-1.83	-1.47
SmF <sub>3</sub>	Sm <sup>3+</sup> → <sup>2+</sup>	-1.02	-2.16	-1.04	-1.73
	Sm <sup>2+</sup> → <sup>0</sup>		-0.89	-2.42	
ThF <sub>4</sub>		-1.72	-1.71/-1.3	-1.61	-1.65/-1.26
GdF <sub>3</sub>					-1.58

开展了 LiCl-KCl 熔盐体系的金属电解精炼-电解产物蒸馏-电解产物熔炼工艺实验, 将金属作为阳

极进行电解精炼, 得到的产物转移至自行设计的蒸馏釜内, 采用减压蒸馏的方式除去产物夹带的熔盐,

去除效果良好，然后再转入高温熔炼炉内进行融化，铸锭成形。该工艺可为后续电解产物的再利用提供技术基础。

利用热室电化学电解装置，开展了 LiCl-KCl 熔盐体系钍、铀的电解分离研究，采用恒电位电解方法成功实现从熔盐中分离出钍、铀电解产物。以上结果为电化学分离技术在熔盐堆燃料盐干法处理中的实用化迈出了关键一步。



图2 热室内熔盐电解法分离钍铀实验装置

### 熔盐堆燃料盐氧化还原性的调控和检测

采用金属还原剂（金属 Li/Be）调控燃料盐（LiF-BeF<sub>2</sub>-UF<sub>4</sub>-ZrF<sub>4</sub>: 65.3-28.7-4.8-1.2, mol%）中 U<sup>4+</sup>/U<sup>3+</sup> 比值，并重点研究了采用电化学循环伏安法检测燃料盐中 U<sup>4+</sup>/U<sup>3+</sup> 比值，建立了燃料盐 U<sup>4+</sup>/U<sup>3+</sup> 比值的调控技术和电化学分析方法，电化学检测值与预调值误差范围可缩小到 10% 以下。以上研究结果将为开展 TMSR 钍基熔盐堆燃料盐中 U<sup>4+</sup>/U<sup>3+</sup> 比值的调控与检测提供了良好的实验研究基础。

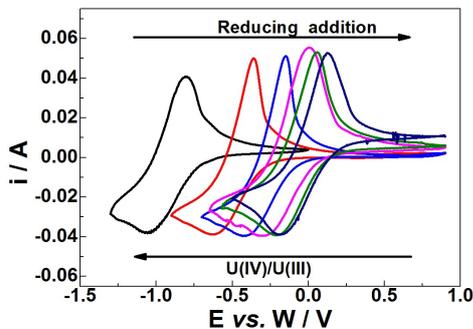


图3 还原剂加入与 U<sup>4+</sup>/U<sup>3+</sup> 比值的电化学测量

成功研制了适用于热室的燃料盐电化学测量的装置，直接在热室内使用取样胶囊作为高温燃料盐实验反应器，利用该装置加热取样胶囊及燃料盐。热室内电化学测试装置的电极通过导线与热室外电化学工作站相连接，电极的升降高度可由机械手便捷控制。完成了热室内燃料盐电化学测量装置的安装和测试，首次实现了热室内高温熔盐电化学装置的机械手远程操作。



图4 热室内电化学装置机械手操作和内外通讯实验验证

### 熔盐堆燃料盐在堆运行过程中的化学行为研究

通过电化学技术结合多种化学分析方法，开展了熔盐堆燃料盐体系中氧与铀系和锆离子之间的相互作用研究，发现了核燃料分布不均与熔盐沉淀现象；首先阐明了氧在熔盐中的存在形态及化学行为，然后经过对熔盐本体相及沉淀相的综合分析，揭示了燃料盐体系中关键氧化物的沉淀-溶解行为规律及核燃料沉淀的抑制机制，以上研究结果将为熔盐堆运行化学的研究和应用提供理论基础与技术支持[3]。

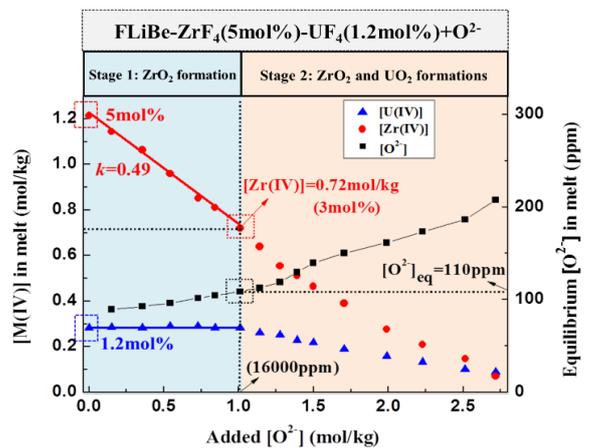


图5 FLiBe-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> 熔盐体系中的氧化物沉淀机制

### 参考文献

- Zhu, T. J., *et al.*, Separation and Purification Technology, 2020, 235
- Zhu, T. J., *et al.*, Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(2)
- Peng, H., *et al.*, Journal of Nuclear Materials, 2020, 531

# 熔盐反应堆化学研究进展

放射化学与工程技术部, 程治强 赵中奇 耿俊霞 窦强 李晴暖 李文新

## 引言

熔盐反应堆属于液态堆, 以流动的金属氟盐(例如 LiF, BeF<sub>2</sub>) 作为燃料载体和冷却剂, 核燃料以氟化物形式(例如 UF<sub>4</sub>, ThF<sub>4</sub>) 溶解在载体盐中。在熔盐堆运行过程中, 锕系元素、裂变产物和反应堆结构材料在高通量中子、 $\gamma$ 射线和高温氟盐的共同作用下发生各种核反应与化学反应, 由此会产生许多属于核化学与放射化学的问题和挑战, 例如核燃料沉淀、裂变产物沉积和结构材料腐蚀等。为保证熔盐堆运行的稳定、高效和安全, 有必要系统掌握堆内锕系元素和裂变产物的存在形态与行为分布, 由此也产生了放射化学学科的一个新分支领域, 即熔盐反应堆化学。

上世纪 60 年代, 美国橡树岭国家实验室(ORNL) 研制并成功运行了熔盐实验堆(MSRE), 但到 70 年代初, 熔盐堆项目的研制就被终止。由于历史原因, ORNL 在 MSRE 运行期间少有关于熔盐堆化学的系统研究资料被报道。我们课题组多年来环绕熔盐反应堆开展了燃料盐的放射化学干法处理技术的研究。最近, 随着基于加速器白光中子源的投入使用, 启动了熔盐堆化学的研究项目, 利用中子源装置进行了铀钚氟化物辐照实验, 并将辐照后样品与 FLiBe 熔盐在石墨坩埚中加热熔融, 然后通过熔盐、石墨、合金试样作为检测样品, 采用 $\gamma$ 能谱技术研究了与熔盐堆运行相关的锕系元素(<sup>233</sup>Pa, <sup>237</sup>U, <sup>239</sup>Np) 和裂变产物(<sup>95</sup>Nb, <sup>131</sup>I) 在熔盐中的化学行为与分布, 下面对目前的实验研究进展作简要介绍。

## 锕系元素

<sup>233</sup>Pa 是 <sup>232</sup>Th-<sup>233</sup>U 转换链中的关键核素, 半衰期为 27.0 天, 然而较长的半衰期延缓了 <sup>233</sup>Pa 向 <sup>233</sup>U 的转换周期, 增加了 <sup>233</sup>Pa 在堆内的积累。再加上 <sup>233</sup>Pa 的中子俘获截面大(41 b,  $1b=10^{-28}m^2$ ), 比 <sup>232</sup>Th 的 7.4 b 还高出数倍。两种效应的叠加引起 <sup>233</sup>Pa 和中子的大量损失, 最终导致 <sup>233</sup>U 增殖系数的下降。为了实现熔盐堆对钍资源的核能利用, 需要将堆运行时产生的 <sup>233</sup>Pa 进行及时分离, 因此有必要了解和掌握熔盐中 <sup>233</sup>Pa 的基本化学性质。鉴于上述考虑, 本课题组在实验室初步观察了 <sup>233</sup>Pa 在 FLiBe 熔盐中化学行为与分布情况<sup>[1]</sup>。

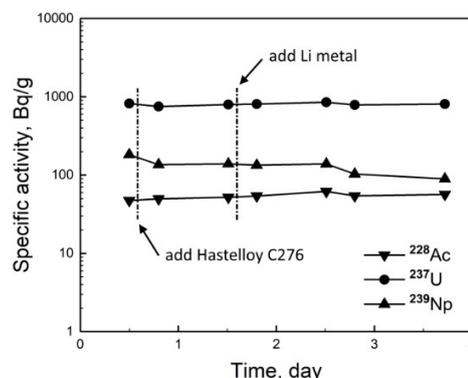


图 1 FLiBe 熔盐锕系核素的比活度变化

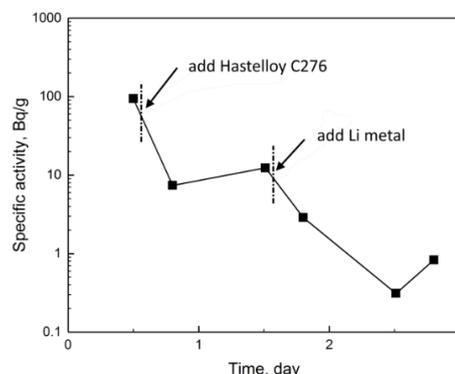


图 2 FLiBe 熔盐中 <sup>233</sup>Pa 的比活度变化

结果显示, 实验期间熔盐中锕系核素 <sup>237</sup>U 和 <sup>239</sup>Np 的比活度几乎保持恒定, 并且不受哈氏合金与熔盐氧化性的影响, 表明 <sup>237</sup>U 和 <sup>239</sup>Np 均可以在熔盐中稳定存在(如图 1 所示)。而 <sup>233</sup>Pa 则不同, 一方面它在石墨坩埚上表现出轻微的沉积, 另一方面添加哈氏合金和金属 Li 使得熔盐中 <sup>233</sup>Pa 比活度快速下降 1-2 个数量级(如图 2 所示), 分析结果表明 <sup>233</sup>Pa 的还原沉积是导致熔盐中 <sup>233</sup>Pa 活度下降的主要原因, 结合熔盐的深度分布发现, 绝大部分被还原的 <sup>233</sup>Pa 沉降在熔盐底部<sup>[1]</sup>。另外, <sup>233</sup>Pa 在哈氏合金表面也存在少量沉积, 其原因可能与熔盐的氧化还原状态、合金成分等有关。为避免在钍基熔盐堆(TMSR) 内发生类似的还原沉积过程, 后续将对 <sup>233</sup>Pa 在 FLiBe 熔盐中的化学行为作进一步深入研究。

## 裂变产物

<sup>95</sup>Nb 是高产额裂变产物 <sup>95</sup>Zr 的衰变子体, 具有独特的性质和行为。ORNL 研究人员发现, 当 MSRE 以 <sup>233</sup>UF<sub>4</sub> 为燃料运行时, 熔盐堆内 <sup>95</sup>Nb 的分布与氧化还原电位存在显著相关性, 并提出 <sup>95</sup>Nb 有望用于熔盐堆运行时的氧化还原电位指示剂。然而, 在

MSRE 现场测量中得到的  $^{95}\text{Nb}$  数据比较凌乱、分散、缺乏系统性，为拓展  $^{95}\text{Nb}$  作为氧化还原指示剂的应用，课题组系统考察了  $^{95}\text{Nb}$  在 FLiBe 熔盐中的分布与行为特点。

结果指出，在未改变熔盐氧化性时，少量  $^{95}\text{Nb}$  会沉积在石墨坩埚上，而大部分  $^{95}\text{Nb}$  可稳定存在于熔盐中<sup>[2]</sup>。（添加金属 Li）降低熔盐氧化性后，熔盐中  $^{95}\text{Nb}$  发生还原沉降，且下降程度与 Nb 浓度具有关联性，该结果从实验上验证了 ORNL 早先提出的  $^{95}\text{Nb}$  作为熔盐氧化还原指示剂的论断。然而，通过熔盐的搅动发现沉降在底部的  $^{95}\text{Nb}$  可能以悬浮的金属颗粒态再次分布于熔盐，并造成取样熔盐中  $^{95}\text{Nb}$  比活度显著升高，说明在流动熔盐中仅根据  $^{95}\text{Nb}$  比活度判断氧化还原电位存在局限性。

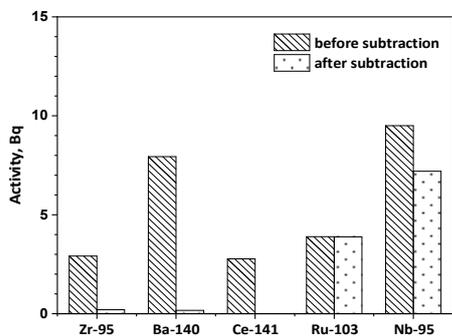


图3 哈氏合金上裂变产物的沉积

意外的是，在熔盐氧化性降低后，发现哈氏合金上出现明显的  $^{95}\text{Nb}$  沉积（见图3），这提示  $^{95}\text{Nb}$  的沉积可能与氧化还原电位也存在相关性，为此进一步研究了熔盐氧化性对合金上  $^{95}\text{Nb}$  沉积的影响。实验结果如图4和图5所示，（由于化学还原引起的）哈氏合金上  $^{95}\text{Nb}$  沉积量与熔盐中  $^{95}\text{Nb}$  比活度变化差值呈现正相关性，并且合金上  $^{95}\text{Nb}$  对  $^{103}\text{Ru}$  的相对沉积系数与熔盐中  $^{95}\text{Nb}$  比活度也具有很好的关联，这意味着根据哈氏合金上  $^{95}\text{Nb}$  的活度检测有望实现熔盐堆燃料盐氧化还原状态的定量监测<sup>[3]</sup>。当然，为了确认该方法的准确性和可行性，在未来的钍基熔盐堆上进一步开展相关验证研究是必要的。

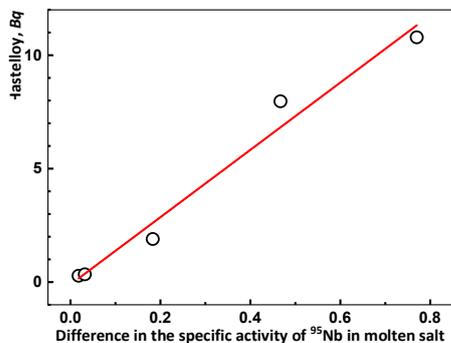


图4 哈氏合金上  $^{95}\text{Nb}$  沉积活度与熔盐中  $^{95}\text{Nb}$  比活度变化的函数关系

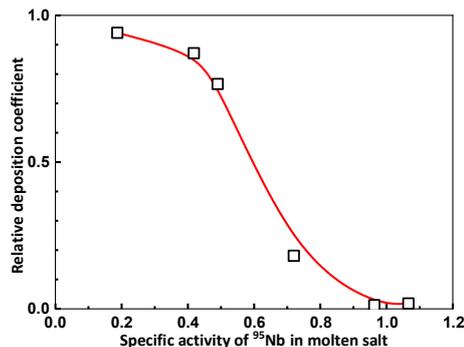


图5  $^{95}\text{Nb}$  与  $^{103}\text{Ru}$  的相对沉积系数与熔盐中  $^{95}\text{Nb}$  比活度的函数关系

碘 (I) 是一个主要的裂变产物，它们的产额高，覆盖的质量数宽，还是多个缓发中子先驱核和高毒性裂变产物  $^{135}\text{Xe}$  的先驱核，因此 I 的行为和分布与熔盐堆高效率运行和安全性有更紧密的联系。ORNL 认为在 MSRE 熔盐的氧化还原电位下，I 与亲盐类裂变产物类似，能够以 I 形式稳定地存在于熔盐中，然而燃料盐的定量分析表明，I 的放射性活度范围很大，测量值仅为源项值的 30-60% 之间，对于大部分 I 的去向及其产生原因并不清楚，为此，课题组围绕裂变产物 I 在熔盐中的行为与分布也作了相关研究<sup>[4]</sup>。

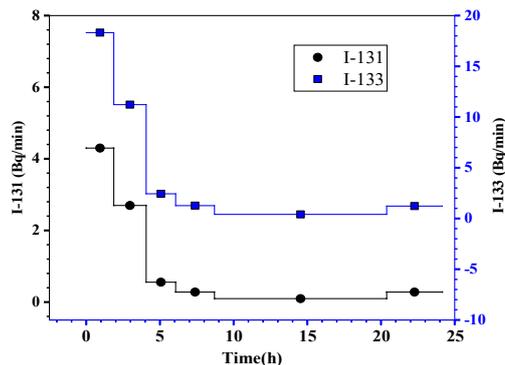


图6 Ni 箔上  $^{131}\text{I}$  和  $^{133}\text{I}$  活度变化

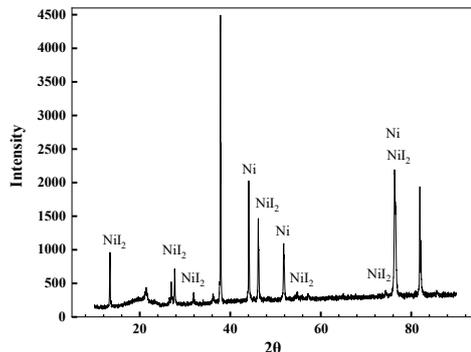


图7 Ni 箔上 I 的化学形态

实验发现，辐照过的  $\text{UF}_4$  与 FLiBe 混合后一开始加热就有相当量的  $\text{I}_2$  从熔盐中释放，更重要的是碘的释放具有典型的一过性的特征，即碘的释放集中在加热一开始的短时间段内，分析指出产生一过性释放的原因应该来自裂变碎片热原子之间发生的

氧化还原反应。如图 6 和图 7 所示，释放的  $I_2$  在 Ni 收集箔上形成  $NiI_2$ 。在初始碘释放后，剩余的碘 ( $I^-$ ) 又稳定存在于熔盐，其活度在继续加热过程中没有明显的降低。该结果合理解释了 ORNL 早年在 MSRE 运行时出现的碘行为的困惑和异常。除此之外，还研究了金属 Li 还原剂和  $NiF_2$  氧化剂对碘的一过性释放量的影响，研究结果提示，熔盐中  $^{131}I$  与亲盐类裂变产物的活度比有望作为钚基熔盐堆运行的一种有效的诊断技术，用于评估熔盐堆熔盐氧化还原电位状态变化。

综上所述，熔盐中的锕系核素与裂变产物随氧化还原性质的变化呈现丰富各异的化学行为与分布，更加重要的是，初步的观察结果揭示了若干与熔盐堆设计、运行和安全性相关的，需要进一步重点研

究的方向和内容。毫无疑问，加速器白光中子源和干法处理技术的集成将为熔盐堆化学与放射化学开创广阔的发展和创新空间。

#### 参考文献

- 1 Zhongqi Zhao, Jifeng Hu, Zhiqiang Cheng, *et al.*, distribution and behaviour of  $^{233}Pa$  in 2LiF-BeF<sub>2</sub> molten salt, RSC advances, 2021, **11**: 7436.
- 2 Zhiqiang Cheng, Xiaohe Wang, Zhongqi Zhao, *et al.*, distribution and behavior of fission product  $^{95}Nb$  in FLiBe salt, Radiochimica acta, 2021, **109**(4), 311.
- 3 Zhiqiang Cheng, Zhongqi Zhao, Junxia Geng, *et al.*, a new method for monitoring the redox potential of fuel salt based on the deposition of  $^{95}Nb$  on Hastelloy C276, Radiochimica acta, 2021, **109**(5), 357.
- 4 Geng Junxia, Zhongqi Zhao, Zhiqiang Cheng, *et al.*, transient release of radioactive iodine from the fission of UF<sub>4</sub> in 2LiF-BeF<sub>2</sub> salt, RSC advances, 2021, **11**: 22611.

# 偕胺肟基吸附材料的设计开发及海水提铀研究

放射化学与工程技术部, 马红娟 许璐 王自强 张岚 李晴暖

本课题组针对海水提铀中的关键科学问题(材料合成技术、吸附容量、吸附选择性、经济成本、工业化生产),开展了海水提铀用多孔吸附材料的研究,包括基于两步共接枝聚合方法的多孔吸附材料研究和基于 X 射线光谱的铀酰配位化学研究。

## 基于两步共接枝聚合方法的多孔吸附材料研究

我们首次通过利用低剂量预辐射共接枝结合硝酸铀铵引发共接枝聚合技术将高结晶度和高机械强

度的超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维改造成一种具有互连开孔纳米通道结构和含有大量偕胺肟基(PAO)纳米颗粒的高表面积、高孔隙率、超高使用寿命和超高吸附性能的可大规模制备的功能性纤维型吸附剂(AO-OpNpNc),而且 AO-OpNpNc 纤维吸附材料所具有的特异性形态结构能够最大程度地提高纤维比表面积和丰富的铀螯合位点,以至于提高偕胺肟基的利用效率,使 AO-OpNpNc 纤维具有超高的铀吸附能力<sup>[1]</sup>。

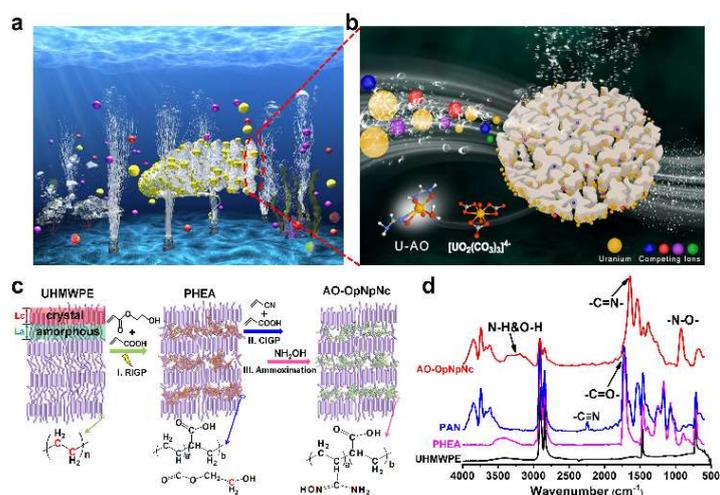


图 1 开发 AO-OpNpNc 的策略。(a) 概念图: 易于放置、可打捞、低成本和超高铀容量 AO-OpNpNc 纤维是大规模海水提铀的更为现实的方法。(b) AO-OpNpNc 纤维的纳米通道结构中的偕胺肟与铀酰螯合的机理。AO-OpNpNc 纤维相互连接的开放式多孔结构和纳米通道可为大量海水进出材料内外部进行连续的传质提供动力,从而实现了超高的铀吸附能力。(c) 制备 AO-OpNpNc 纤维的示意图: 无定形区(非结晶区) UHMWPE 纤维中的接枝共聚和氨肟化过程。(d) UHMWPE, PHEA, PAN 和 AO-OpNpNc 纤维的 FT-IR 光谱。

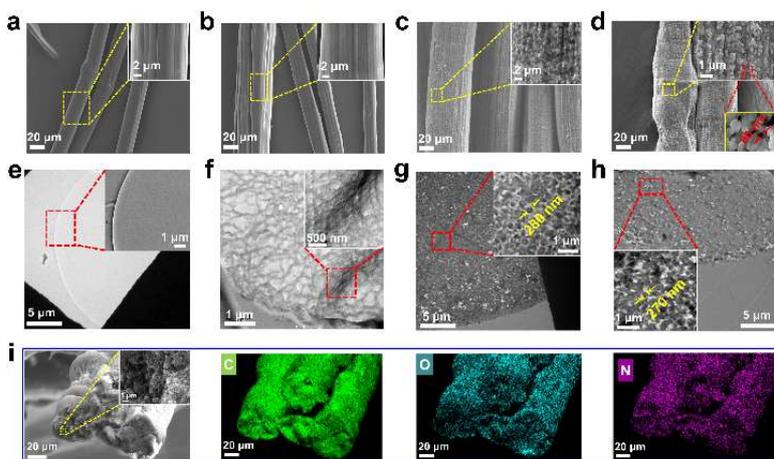


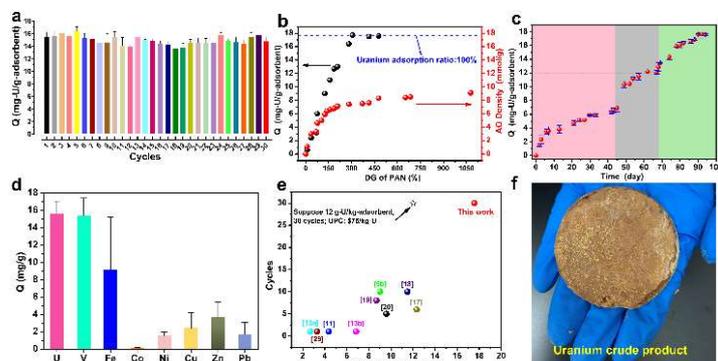
图 2 形态结构表征。(a) UHMWPE, (b) PHEA, (c) PAN 和 (d) AO-OpNpNc 纤维的 SEM 图像。(e) UHMWPE, (f) PHEA, (g) PAN 和 (h) AO-OpNpNc 纤维的 TEM 图像。(i) AO-OpNpNc 纤维的 EDS 图。AO-OpNpNc 纤维的 SEM 和 TEM 图像显示了互连的开孔结构, PAO 纳米颗粒(270±2 nm)和纳米通道结构。

AO-OpNpNc 是迄今为止报道的机械性能最好和使用寿命最长的最有望用于海水提铀工业化生产

的纤维型吸附材料。AO-OpNpNc 在天然过滤海水中,对铀的吸附容量为每克吸附剂 17.57 mg-U, 使用寿命

命为 30 个吸附-解吸循环,因此每千克铀的吸附成本为 80.70-86.25 美元。不局限于实验室研究成果,我们通过中试放大反应批量制备 5 公斤高性能纤维吸附材料在我国海南省三亚市近海提取了约 30 g 铀,使得我国海水提铀技术达到国际先进水平,为我国

海水提铀进一步产业化生产提供了技术支撑。这种新型的纤维吸附材料具有无额外驱动力、易放置、可打捞、低成本和超高铀吸附容量优异特性,是最有望实现海水提铀工业化的吸附材料之一。

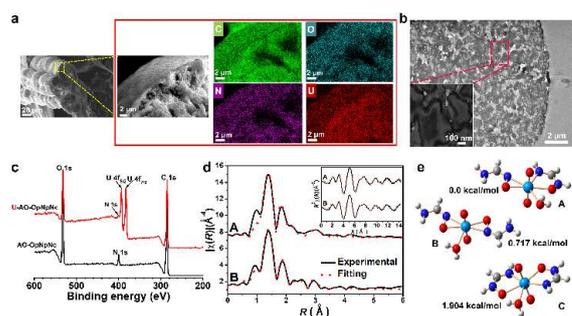


**图 3** 铀吸附能力和使用寿命评估。(a) 在初始铀浓度为 330 ppb,同时存在竞争离子的模拟海水中对 AO-OpNpNc 纤维进行 30 个吸附-脱附(全文检查)循环。(b)不同 DGs 的 AO-OpNpNc 纤维对应不同 AO 密度,铀吸附能力和铀吸附率。(c)与天然海水接触不同时间后, AO-OpNpNc 纤维的铀吸附能力。(d)天然海水中吸附 90 天后铀和竞争离子的吸附容量。(e)比较铀在各种代表性吸附剂上的吸附能力。(f)从海洋中回收 5.6 g 粗制铀的照片。

### 基于 X 射线光谱的铀酰配位化学研究

探清铀酰离子与偕胺肟基团的配位机理,有助于研究人员从本质出发,设计更利于与铀酰离子进行配位的配体基团,不断优化吸附实验条件,探索出吸附效率和吸附选择性更好的海水提铀用吸附材料。我们利用扩展边 X 射线吸收精细结构(EXAFS)光谱探索了 AO-OpNpNc 纤维吸附材料中的聚偕胺肟基团与铀酰离子的配位方式,EXAFS 数据经过傅里叶变换等步骤,可以获得 R 空间径向分布图,对 R 空间拟合获得了铀吸收原子的配位原子类型、配位数、原子间距等信息,从而建立了精细的短程有序的偕胺肟-铀酰配合物模型,利用 DFT 理论计算对实验中偕胺肟-铀酰配合物模型进行了结构优化。在 B3LYP/6-31G(d)水平下进行了 DFT 计算,结果表明 AO-OpNpNc 纤维吸附材料中的聚偕胺肟基团与铀酰离子的配位方式中 chelating model 最稳定,揭示

了 AO-OpNpNc 纤维吸附材料中的聚偕胺肟基团与铀酰离子的配位方式。



**图 4** 钆的硼化合物合成及微观结构

### 参考文献

- Xu X, Xu L, Ao J, *et al.* Ultrahigh and economical uranium extraction from seawater via interconnected open-pore architecture poly (amidoxime) fiber[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, **8**(42): 22032-22044.

## 数据库及材料分析组工作进展

材料研究部, 任翠兰 戴建兴 李诚 温阿利 黄鹤飞

数据库与材料分析组 2019-2020 年度在持续完善 TMSE 材料数据库的建设的的基础上, 根据现有 TMSR 材料数据库工程数据及文献调研数据, 在数据分析、建模的基础上进行材料(合金、熔盐等)结构和性能分析; 完善和发展同步辐射技术表征合金材料的辐照和腐蚀行为的方法, 为 TMSR 堆材料研究提供理论依据和方法学支持。

### 1. 金属离子束辐照初级辐照损伤数据分析及优化<sup>[1]</sup>

结构材料的辐照性能评价对其发展和应用具有重要意义。离子束辐照, 尤其是自离子辐照被广泛用于研究材料的中子辐照损伤。然而, 基于加速器的离子束具有能量单一、动量单一的特点, 导致辐照后材料中位移损伤随深度分布的梯度很大, 且存在点缺陷失衡效应(空位、间隙原子在空间的浓度分布不均匀); 而堆环境下, 由于被中子散射的初级碰撞原子动量分布较为均匀, 材料中点缺陷的分布

概率也大致相同。离子辐照的初期辐照损伤对于材料的辐照缺陷演化具有重要影响, 导致后续材料结构和宏观性能与中子辐照后样品的结构及性能(如偏析、肿胀)有明显不同。因此, 我们针对离子束辐照的初级辐照缺陷分布进行分析, 结合机器学习、数值模拟等方法优化材料的初级辐照损伤。首先, 建立了“Radiation polarization theory”用以理解不同辐照环境(中子辐照和离子辐照)下材料的缺陷分布以及对环境的响应; 在此基础上, 建立精确的样品旋转方法(图 1a), 通过优化样品的倾斜角和旋转轴, 在其较为宏观的尺寸内优化离子束辐照带来的点缺陷失衡效应, 并且在同一区域内获得较为均匀的辐照损伤(空位或 DPA)分布(图 1c-d)。通过估算, 样品的旋转频率在 kHz 量级(对应辐照剂量率为 $\sim 10^{-4}$  DPA/s)可以有效分散离子束的动量(方向)。该工作以金属铁的自离子束辐照为例进行分析验证。该工作从离子束辐照初级辐照损伤角度为优化材料离子束辐照提供新的思路。

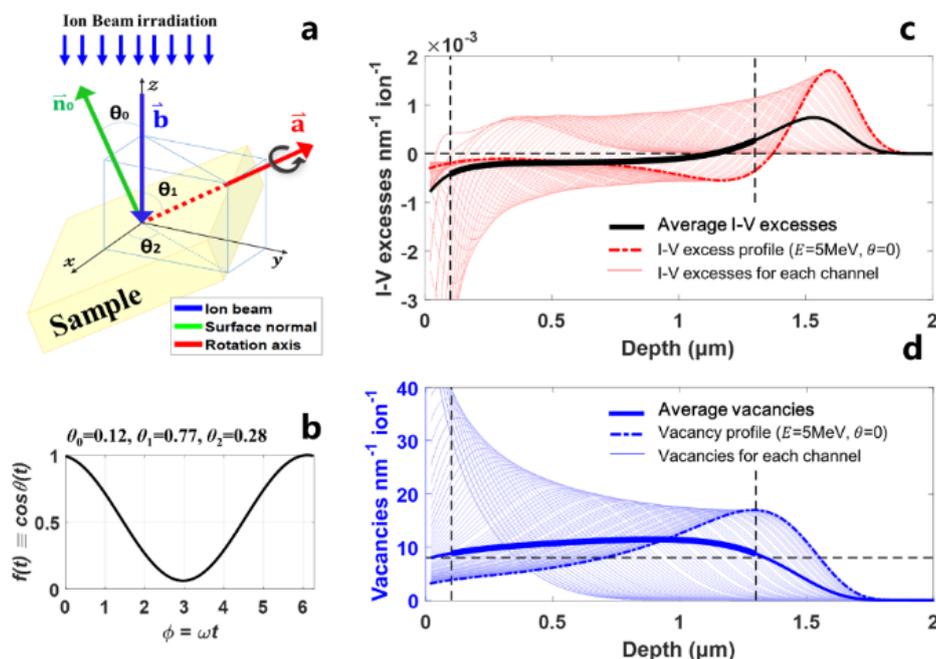


图 1 (a)样品旋转示意图, (b)优化后的样品倾斜角和旋转轴, (c)优化后的缺陷不均匀性分布, (d)优化后的空位分布<sup>[1]</sup>。

### 2. 金属镍离子辐照数据分析及辐照增强扩散行为<sup>[2]</sup>

辐照环境下材料增强扩散行为是理解辐照后材料结构和性能演化的基础。离子束辐照环境下材料的扩散行为难以精确测量, 主要是由于诸多材料参数难以精确获取, 例如有效缺陷阱浓度或缺陷阱强度。一般地, 人们在估算辐照增强扩散系数时, 并未考虑材料中缺陷阱浓度随温度的变化关系。然而,

已有文献表明, 辐照后材料中缺陷(空洞、位错等)的浓度、大小、及密度是随温度变化的量, 因此需要进一步研究。本工作中通过对金属镍在中子、镍离子、镍离子+预注入氢、镍离子+同时注氢等条件下金属镍的结构性能等参数进行汇总分析, 获得金属镍自离子辐照条件下材料中有效缺陷阱浓度随温度、辐照剂量率的变化规律(图 2b), 并基于此优化了金属镍辐照增强扩散系数(图 2a)。进一步采用优

化后扩散系数探讨了注入离子分布随辐照温度、时间的演化规律。相关结果帮助人们进一步理解金属镍及合金在离子束辐照条件下的增强扩散行为，进而为优化离子束辐照实验设计提供理论依据。

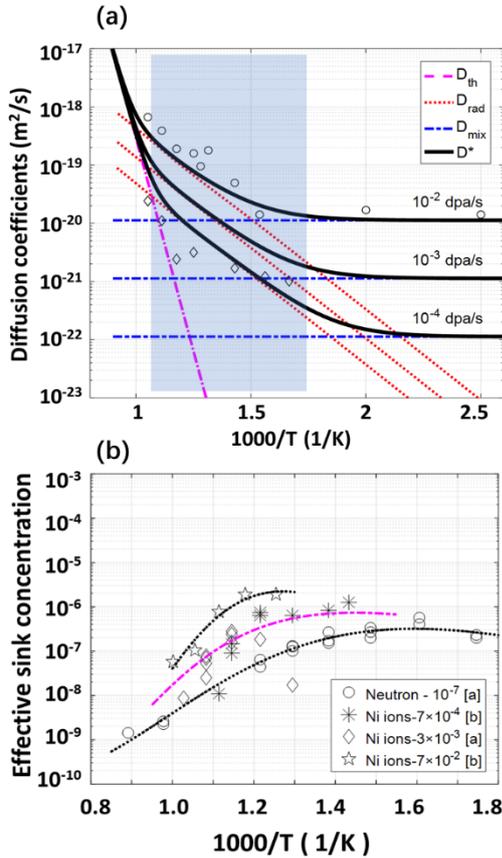


图 2 (a) 金属镍扩散系数随温度和辐照剂量率的变化, (b) 有效缺陷浓度随温度的变化规律<sup>[2]</sup>。

### 3. 裂变产物碲在金属中扩散行为及机制研究<sup>[3]</sup>

合金结构材料的原子扩散行为及机制对于理解其在服役环境下的行为，例如腐蚀、辐照等具有重要的理论参考意义。本工作中，在发展基于第一性原理计算的高通量计算方法的基础上，从原子尺度上探索了裂变产物碲 (Te) 在金属铁体相中的稳定性和扩散机制，并和常见裂变产物 (Nb、Mo、Tc、Ru 和 Sb) 和合金元素 (Cr、Al、Mn、Fe、Co、Ni 和 Cu) 的相关性能进行对比。对于裂变产物 Te 的

稳定性，由于较大的原子尺寸，Te 原子倾向于位于存在于取代位，其形成能为 1.03 eV，远低于间隙位的形成能 (8.10~9.12 eV)。Te 与单空位之间存在较强的吸引作用，且容易导致空位聚集在其附近。Te-V2 团簇的扩散结果表明，空位的进一步引入对碲的扩散势垒没有显著影响。Te-V 对和 Te-V2 团簇下 Fe 原子的扩散势垒均受到较大影响。Te 扩散的指前因子  $D_0$  与其他合金元素相当，但 Te 扩散的激活能  $Q$  比其他合金元素低得多。Te 与空位较强的相互吸引作用是 Te 扩散激活能较低的主要原因。基于 Arrhenius 公式的扩散系数的计算结果显示，Te 在 700-1300 K 温度范围内具有较高的扩散系数。

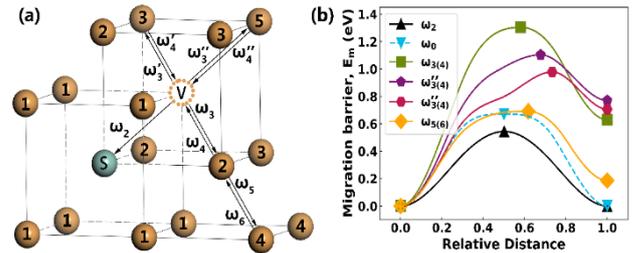


图 3 (a) Bcc 金属扩散九频模型示意图, (b) 碲元素在金属铁中的扩散路径及扩散能垒<sup>[3]</sup>。

### 4. TMSR 用含钍燃料盐的结构及物性数据<sup>[4]</sup>

TMSR 采用含钍-铀的熔融氟化盐作为燃料和冷却剂，燃料盐的结构和物性数据对于 TMSR 的堆芯设计、安全评估、材料服役性能评估具有重要的理论意义和应用价值。计算机模拟结合实验分析，可以获得燃料盐在其相图空间和大范围时间段的物性数据。本工作中，在对目前材料数据库熔盐子库数据分析的基础上，采用分子动力学方法开展大量的计算工作，获得含钍的多个混合熔盐体系的结构和物性，包含基本物性参数 (密度、配位数、热容、谱学等) 及动力学性能 (扩散系数、粘度系数) 等参数 (见表 1、图 4)。此外，初步获得含铀化合物 (LiF-UF<sub>4</sub>) 的结构参数，通过调整铀离子与其它离子的相互作用势函数获得合理的结构性能数据，为计算 LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> 燃料盐的物性奠定基础。

表 1 本工作中单质盐、燃料盐体系、成分及预测结构性能

Systems	$X_{ThF_4}$ (%)	Structures and properties
LiF, NaF, KF	/	Structures:
LiF-NaF-KF (46.5:11.5:42)	/	Micro-structures
ThF <sub>4</sub> -LiF	5, 25, 50, 75	Radial distribution function
ThF <sub>4</sub> -NaF	5	Coordination
ThF <sub>4</sub> -KF	5	
ThF <sub>4</sub> -LiF-NaF-KF	5	Properties :
		Viscosity
ThF <sub>4</sub> -LiF-BeF <sub>2</sub>	5	Diffusion coefficient

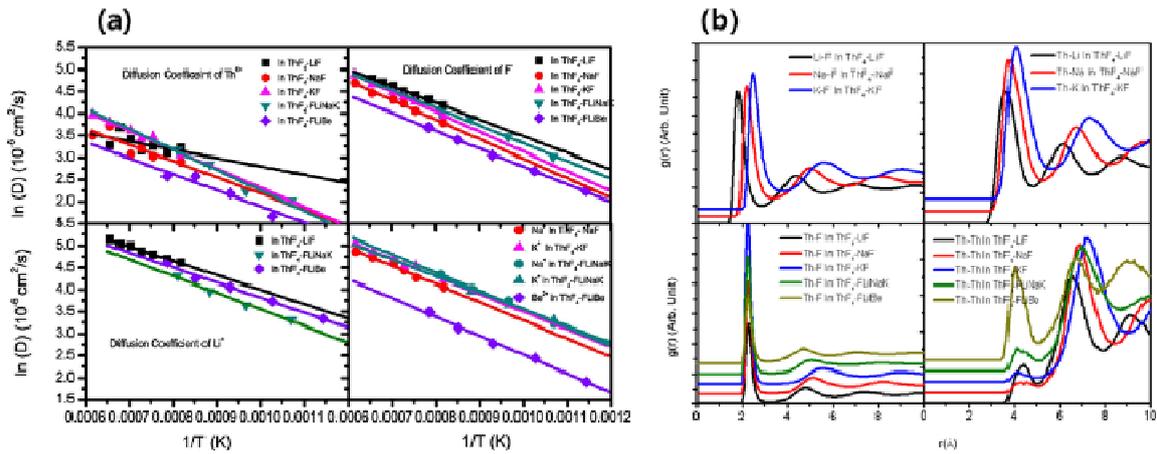


图 4 (a) 不同熔盐体系的粘度数据分析, (b) 不同熔盐体系的结构 (径向分布函数) 数据分析<sup>[4]</sup>。

## 5. 辐照加速镍基合金熔盐腐蚀的“氧化机制”<sup>[5]</sup>

镍基合金构件长期服役在中子辐照和熔盐腐蚀的环境下, 辐照损伤缺陷可能会影响或改变合金的抗熔盐腐蚀性能, 进而影响反应堆的安全运行。熔盐堆用镍基合金辐照腐蚀协同损伤是本领域关注的热点问题之一。近年来, 已有报道熔盐堆环境下辐照促进合金腐蚀 (Cr 元素的流失) 会严重危害合金在反应堆中的服役性能, 然而辐照引起微观化学成分变化对合金腐蚀行为的影响机制尚不明确。本工作利用同步辐射 X 射线吸收精细结构光谱 (XAFS)

技术, 并结合电子探针显微分析 (EPMA) 和透射电子显微镜 (TEM) 等分析手段研究了辐照和熔盐腐蚀协同作用对合金中 Cr 原子局域结构的影响 (图 5)。结果表明, 辐照引起 Cr 的配位数减少, 导致 Cr 周围空位增加, 使其更容易与熔盐中的氧化性杂质反应, 形成了在氟化物熔盐中极不稳定的  $\text{Cr}^{3+}$  氧化物并进一步溶解, 这是辐照促进合金腐蚀的重要原因。这一研究从原子尺度揭示了辐照促进镍基合金熔盐腐蚀的机制, 也为高中子辐照剂量下的熔盐堆堆芯构件的服役安全性评估提供了依据。

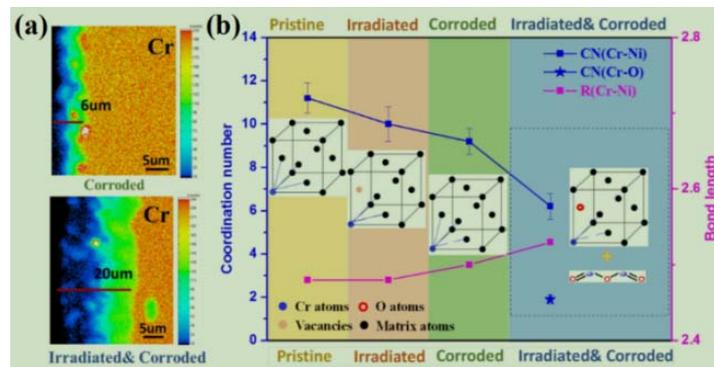


图 5 (a) 原子探针结果显示辐照&腐蚀样品的贫 Cr 层 (腐蚀深度) 远高于仅腐蚀样品的贫 Cr 层, (b) XAFS 分析结果表明辐照促进合金中 Cr 原子溶出形成易溶解的  $\text{Cr}^{3+}$  氧化物是辐照促进腐蚀的主要原因<sup>[5]</sup>。

综上, 数据库与材料分析组 2019-2020 年度在材料数据分析的基础上进行材料 (合金、熔盐等) 的结构和性能研究。首先, 对于材料的离子束辐照行为, 优化金属离子束辐照初级辐照损伤分布, 为离子束辐照技术的进一步优化提供理论指导; 同时通过辐照后材料结构参数分析, 优化金属镍的辐照增强扩散系数。其次, 获得熔盐堆中主要裂变产物在合金中的扩散行为机制并和主要合金元素进行了对比。再次, 在对现有熔盐数据分析的基础上, 对冷却剂用盐及含钍燃料盐的结构和物性数据进行模拟并获得物性数据。此外, 进一步完善用同步辐射技

术表征合金材料的辐照和腐蚀机制的方法, 并揭示辐照加速熔盐腐蚀的“氧化机制”。

### 参考文献

- 1 C.-L. Ren, Y. Yang, Y.-G. Li, P. Huai, Z.-Y. Zhu, J. Li, npj Comput. Mater., 2020, **6**: 189
- 2 X.-Y. Chen, A.-L. Wen, C.-L. Ren, C.-B. Wang, W. Zhang, H.-F. Huang, Z.-W. Chen, P. Huai, Nucl. Sci. Tech., 2020, **31**: 79
- 3 Z.-D. Zhang, C.-L. Ren, M.-L. Tan, Y.-Q. Yang, Y.-R. Yin, C.-Y. Wang, H. Han, P. Huai, Comput. Mater. Sci., 2020, **181**: 109571
- 4 J.-X. Dai, W. Zhang, C.-L. Ren, X.-J. Guo, J. Mol. Liq., 2020, **318**: 114059
- 5 G.-H. Lei, C. Li, Z. Jiang, H.-F. Huang, Corros. Sci., 2020, **165**: 108408

# 合金材料组工作进展

材料研究部, 冷滨 叶祥熙 韩汾汾 高丽娜 俞国军 李晓丽 雷冠虹 许红霞

合金材料组的工作聚焦于筛选研发满足熔盐堆不同工况需求的合金材料, 评估改善合金在服役过程中的损伤行为, 以及推进熔盐堆合金材料及相关技术的转化应用。2019-2020 年度主要的工作包括: 评估 TMSR-LF1 实验堆合金在燃料及冷却剂熔盐中的腐蚀行为; 研发具有更好的耐高温性能的熔盐堆结构合金; 筛选适用于氟、氯化物熔盐环境的耐磨合金; 研究力学化学协同效应及裂变产物扩散对熔盐堆合金的损伤机制; 开展熔盐热扩散表面改性 (FTD) 技术实用化验证。

## TMSR-LF1 实验堆用合金的腐蚀评估

TMSR-LF1 液态燃料熔盐实验堆采用 GH3535 (Ni-16Mo-7Cr) 合金作为主要结构材料, 采用 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> (65.3-28.7-4.8-1.2 mol.%) 熔盐作为燃料及一回路冷却剂, 使用 LiF-BeF<sub>2</sub> (67-33mol.%, 简称 FLiBe) 熔盐作为二回路冷却剂。为了保证反应堆的服役安全性, 我们利用静态浸泡熔盐腐蚀实验对该合金在这两类熔盐中的腐蚀行为进行了评估。

结果显示, 合金在 650°C FLiBe 熔盐中腐蚀后, 由于 Fe、Ni 在表面的沉积导致合金略微增重, 增重速率随腐蚀时间增加而减小, 表明盐中引起沉积的 Fe、Ni 元素在腐蚀较短的时间内已经基本耗尽, 不会影响合金长期腐蚀行为。腐蚀 1000h 后, 合金仍保持致密, 没有明显的腐蚀孔洞, 表面 Cr 流失深度约 5 $\mu$ m, 折合腐蚀速率约 14.8 $\mu$ m/a。合金在 700°C 燃料盐中腐蚀后, 重量几乎没有发生变化 (1000h 腐蚀失重不足 0.05mg/cm<sup>2</sup>)。燃料盐中腐蚀 1000h 后合金的截面显微分析 (图 1) 显示, 合金结构完整, 没有明显的腐蚀缺陷, 合金表面 Cr 流失深度也约 5 $\mu$ m, 折算得腐蚀速率约 14.8 $\mu$ m/a, 于 FLiBe 熔盐中相同。由此可见, 合金在两种熔盐中均表现出良好的耐腐蚀性能, 满足 LF1 腐蚀小于 25 $\mu$ m/a 的设计要求。

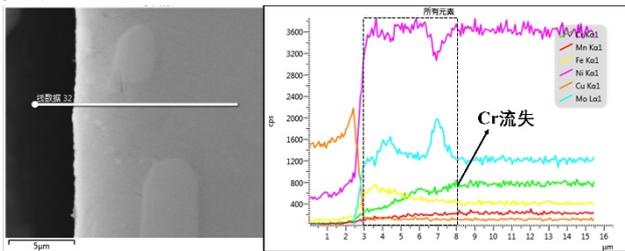


图 1 GH3535 合金在 700°C 燃料盐中腐蚀 1000h 后的截面形貌及元素分布

## 超高温耐熔盐腐蚀合金研发

针对运行温度在 800°C 及以上的超高温熔盐堆对合金高温力学性能和耐熔盐腐蚀性能提出的双重挑战, 我们采用了在成熟超高温合金表面堆焊覆层提高其耐熔盐腐蚀性, 以及替换 GH3535 合金的主要固溶元素提高其高温力学性能两条技术路线进行合金研发。

针对覆层技术, 我们在高温合金 Inconel 617 上采用堆焊工艺制备了厚度约为 4.5mm 的纯 Ni 覆层, 并评估了覆层与基体的结合强度以及长期时效稳定性。结果显示, 复型合金材料的室温剪切强度为 359MPa, 850°C 剪切强度为 185MPa, 堆焊层与基体在界面处为冶金结合, 结合强度及堆焊后复型合金材料的延展性能良好。在 850°C 下长期时效后 (至 3000h), 随着焊接残余应力的释放及再结晶, 复型合金中的堆焊层硬度略有下降, 但成分及相组成保持稳定 (图 2)。此外, 覆层中 Cr 浓度及扩散速率很低 (850°C 下扩散速率为  $1.5 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{s}$ ), 因此有望满足耐熔盐腐蚀的需求<sup>[1]</sup>。

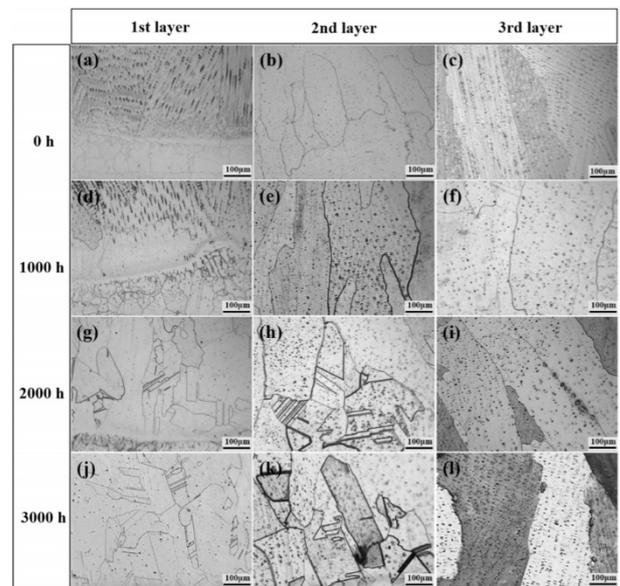


图 2 Ni-617 复型合金在 850°C 下长期时效过程中表面覆层的显微组织随时间的变化<sup>[1]</sup>。

对于 Ni-W-Cr 合金, 我们比较了 Ni-26W-6Cr 合金以及 GH3535 合金的耐熔盐腐蚀性能, 并系统研究了 Ni-xW-6Cr 的氧化机理。熔盐腐蚀实验的结果表明, Ni-26W-6Cr 合金及 GH3535 合金在 800°C

FLiNaK 熔盐下的腐蚀深度相近，因此 Ni-26W-6Cr 合金也具有和 GH3535 合金相当的优异耐熔盐腐蚀性能。此外，我们还通过扩散理论和第一性原理对 Cr、W、Mo 在合金中的腐蚀深度进行了估算，与实验结果吻合。基于该结果，我们从实验和理论两个角度深入阐明了 Ni-W-Cr 合金体系的熔盐腐蚀机理<sup>[2]</sup>。在高温氧化方面，传统氧化理论表明高 W 低 Cr 对合金的耐高温氧化性能有害，并且目前对于 W 含量超过 20 wt.% 的低 Cr 合金的高温氧化行为没有相关文献报道。我们结合同步辐射及电子显微分析方法，系统表征了 Ni-(0-30wt.%)W-6Cr 合金在 850°C 空气中高温氧化 100 h 后表面形成的氧化物分布(图 3)。结果显示，Ni-25W-6Cr 合金表现出最佳的耐氧化性能，在 W 含量低于 25wt.% 时，Ni-xW-6Cr 合金的耐氧化性能随 W 含量增加而增强是因为 W 引起的第三组元效应导致氧的内扩散减弱，从而促进 Cr 的外氧化形成致密的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及其衍生物 NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>；而过量的 W (30wt.%) 会竞争消耗 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 并抑制 NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 形成，同时形成的疏松 CrWO<sub>4</sub> 可以在氧化层中为氧气和金属离子的扩散创造通道。因此，从耐高温氧化性能角度出发，Ni-xW-6Cr 合金中的最佳 W 含量范围应为 25-30 wt.%<sup>[3]</sup>。

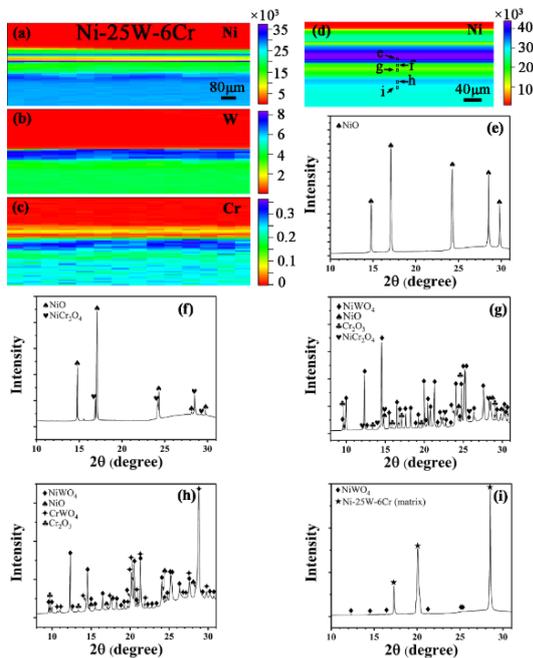


图 3 通过  $\mu$ -XRF 确定的 Ni-25W-6Cr 氧化后截面的元素分布(a) Ni, (b) W, (c) Cr, (d) Ni, (e) - (i) 是(d)中黑框区域的  $\mu$ -XRD 图谱<sup>[3]</sup>

### 适用于熔盐环境的耐磨合金筛选

随着熔盐堆及储能系统设计的成熟化、复杂化，各种设备对合金材料性能的需求逐渐多样化。不同于建造容器、管道使用的结构合金，轴承、机械阀等部件对合金的耐磨性能有很高要求。由于高温氟、氯化物熔盐环境对合金氧化膜的溶解度高，对合金

中活性元素的腐蚀性强，传统耐磨合金在这两类熔盐中未必能够适用。因此，我们对开展了多项实验来筛选合适的耐磨合金材料。

100 kW 储热实验装置和 10 MW 储热示范装置采用长轴熔盐泵，需要使用多个熔盐液下轴承。泵的主体材料为 316H 不锈钢，其表面硬度低，无法满足轴承耐摩擦磨损的要求。因此，我们初步评估了 316H 表面堆焊耐磨合金的可行性，并确定了堆焊工艺参数和实施方案。根据氟、氯化物熔盐对 Cr 元素的选择性腐蚀机制，我们从常用的高温耐磨合金中选取具有最低 Cr 含量的 Tribaloy T400 (Co-28Mo-8Cr-2.6Si wt.%) 作为备选材料之一，并利用兰州化学物理所的高温真空摩擦磨损试验机进行了高温摩擦磨损评估，确定 T400 和 ST6 (Co-28Cr-4W-1C wt.%) 配对作为摩擦副。在此基础上，在 730°C 下的 NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub> 缓蚀盐中进行了 400h 的静态腐蚀评估。结果显示(图 4)，T400 无论是单独腐蚀还是和 316H 和 ST6 异质腐蚀均表现出优异的耐熔盐腐蚀性能，没有明显的腐蚀现象；ST6 与 T400 异质腐蚀时会出现稍微严重的腐蚀现象，腐蚀深度为 40 $\mu$ m 左右，但仍为轻度腐蚀。考虑到不锈钢基体上堆焊 T400 的工艺至今无公开报道，我们通过摩擦磨损、硬度试验及显微分析对工艺进行了优化。随着热输入量的提高，堆焊稀释率提高导致表面的 Cr、Fe 的含量提高，影响耐熔盐腐蚀性能，并且容易产生较大的热变形，因此优化热输入为 840-1080 J/mm。堆焊后的表面硬度均大于 400HV，是 316H 的硬度 2 倍以上，其磨损量远小于 316H，自摩擦系数也小于 316H。

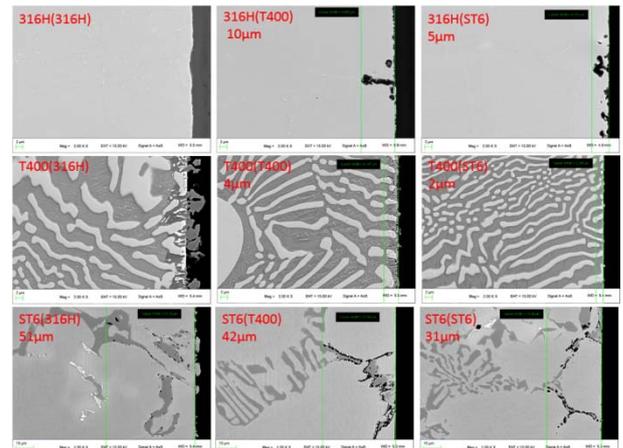


图 4 730°C 下 NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub> 熔盐中单独和异质腐蚀 400h 后 ST6、T400 和 316H 的截面形貌

此外，针对将来熔盐堆中对耐磨合金的可能需求，我们还评估了 T400 在氟化物熔盐中的腐蚀行为及与 GH3535 的异质腐蚀效应。结果显示，T400 的耐氟化物熔盐腐蚀性能显著低于 GH3535，且 GH3535 的存在会通过电偶效应进一步加剧 T400 腐

蚀。此外，氟化物熔盐会对富含 Co、Cr 元素的 T400 合金基体的产生选择性腐蚀。这会导致合金中强化相的剥落，进而会降低耐磨性能；还会造成 Co 向盐中的溶解，在中子辐照条件下可能引起过量放射性。因此，该合金难以应用于熔盐堆环境<sup>[4]</sup>。

### 熔盐堆合金的损伤机制研究

熔盐堆合金的服役环境复杂，除了受力变形、熔盐腐蚀及中子辐照引起的直接损伤之外，裂变产物在合金内部的扩散，以及应力和腐蚀的协同效应有可能引起合金的脆化开裂，导致合金提前失效。因此，我们针对这两种损伤机制开展了专项研究。

引起熔盐堆合金脆化开裂的一种典型裂变产物是 Te。为了评估合金在堆内长期服役过程中的显微组织演变对 Te 的扩散行为的影响，我们研究了 GH3535 合金在 700℃ 时效 10000h 后的 Te 扩散行为。结果表明，晶界上析出  $M_{12}C$  型碳化物导致晶界附近富 Cr，促进了晶界上  $Cr_3Te_4$  和  $Ni_3Te_2$  的析出，对 Te 的扩散起到了一定钉扎作用，但对 Te 在合金晶界上的整体扩散深度和速率影响不大， $M_{12}C$  抑制 Te 扩散的作用也并不显著<sup>[5]</sup>。针对裂变产物 Sb 是否也会造成合金发生晶间开裂的问题，我们评估了合金在 700℃ 及不同含量的 Sb 气氛下组织和力学性能的变化规律。结果表明，Sb 主要在合金表面与 Ni 发生反应形成  $Ni_5Sb_2$  反应层， $Ni_5Sb_2$  在表面的大量形成导致合金基体内  $\mu$  相形成（图 5）；Sb 含量的增加只会造成表面反应层的加厚，但 Sb 在合金晶界上的扩散深度不变；Sb 对合金造成的拉伸性能损伤主要归因于反应层加厚导致的有效承载面积降低，危害比 Te 更小<sup>[6]</sup>。此外，我们还尝试通过在 GH3535 合金中添加微量稀土元素的方法来提高合金的耐 Te 性能，发现 La 的添加能有效抑制 Te 向合金中的扩散，而 Ce 添加对 Te 的抑制效果不明显。

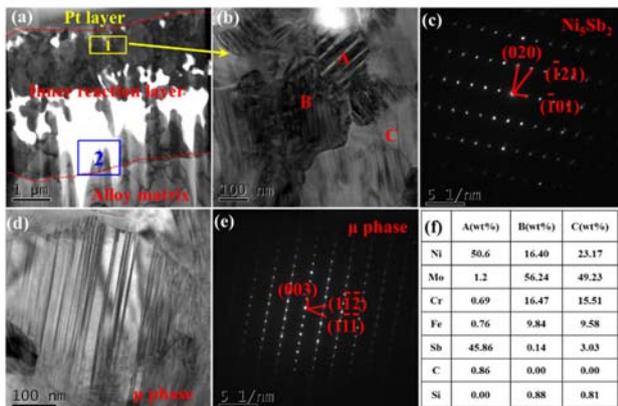


图 5 8 mg/cm<sup>2</sup> Sb 添加条件下，GH3535 合金在 700℃ 下扩散退火 100h 后的表面物相分析<sup>[6]</sup>

为了评估应力和腐蚀的协同效应对 GH3535 合金的影响，我们利用自主研制的熔盐环境原位力学试验机，在 700℃ FLiNaK 熔盐中开展了 270MPa，

235MPa 和 190MPa 应力加载下的蠕变持久实验。结果显示，合金在熔盐中没有出现明显的应力腐蚀开裂（SCC）现象，蠕变性能与在大气中的基本一致。但是，相对于纯氩气环境，熔盐会加速合金蠕变缩颈阶段的断裂速率，两种环境下的最小蠕变速率、延伸率和断裂寿命也存在差异。通过对断裂后合金的截面形貌分析（图 6），我们发现合金在两种环境中的裂纹分布位置的差异导致了蠕变行为的差别。在氩气环境中， $M_6C$  相周围萌生空洞后进一步裂纹扩展的数量较多，包括在晶界上析出的二次碳化物和晶内的一次相；在熔盐环境中，裂纹萌生点主要分布在晶界上，断口很多都为楔形裂纹。此外，为了研究酸根杂质离子的加速腐蚀效应引起 SCC 的可能性，我们利用预加不同载荷的 C 型环样品，研究了 GH3535 合金在含有 500ppm  $SO_4^{2-}$  离子的 FLiNaK 盐中的腐蚀行为，发现  $SO_4^{2-}$  离子能够加速合金腐蚀，导致合金表面形成  $Cr_2O_3$  氧化物，并在合金颞部生成 MnS，但是不会引起 SCC 现象<sup>[7]</sup>。

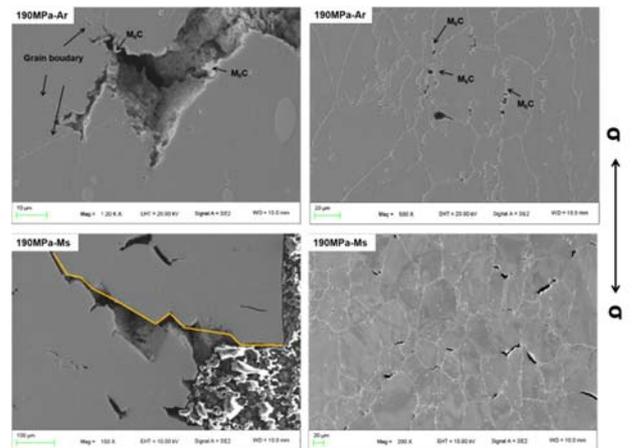


图 6 700℃、190MPa 载荷条件下，合金在 FLiNaK 熔盐及氩气中的表面及内部蠕变裂纹形貌<sup>[7]</sup>

### 熔盐热扩散表面改性(FTD)技术实用化验证

FTD 技术是通过氟化物熔盐中溶解的金属原子渗入材料表面从而实现改性的技术。相较传统 TD 技术，FTD 具有快速高效、工件热变形小、厚度精准可控等特点。在所产业基金的支持下，我们在前期原理验证的基础上，开展了产业化前的实用化验证。目前已经安装完成一套专用的 FTD 系统，该系统是国内首套可规模化处理小型零部件的卤化物熔盐热处理系统（图 7），可进行各种金属元件、碳类元件、陶瓷元件等的表面处理。

基于该处理系统，目前已实现规模化处理的工业元件有：不锈钢换热片（图 8）、陶瓷基片、金属冲头和刀头。其中，金属冲头和刀头的处理，已经获得国内金属精加工行业某龙头企业的认可，投产后，有望为企业年节省耗材费用近亿元，同时在

生产效率上领先于竞争对手。陶瓷基片可实现年处理 5 万片以上，在陶瓷覆铜板、陶瓷电热膜、薄膜电阻等产品中有应用潜力，有望解决我国电子行业一些卡脖子问题。



图 7 卤化物熔盐热处理系统。



图 8 熔盐热处理后的不锈钢换热片

综上，合金材料组 2019-2020 年度获取了 TMSR-LF1 实验堆工程所需要的合金腐蚀数据；对超高温熔盐堆候选材料 Ni-617 复型合金和 Ni-W-Cr 合金进行了深入研发；对适用于氟、氯化物熔盐环境的耐磨合金进行了评估筛选及工艺优化；研究了裂变产物 Te、Sb 扩散，以及力学化学协同效应对 GH3535 合金的损伤机制；开展了 FTD 系统的研制和 FTD 技术在多种工业原件上的应用验证。

#### 参考文献

- 1 Gao L N, Han F F, Chen S J, *et al.* Effect of Isothermal Aging on Microstructure Evolution of Ni Claddings on Inconel 617[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, **30**: 2389-2398
- 2 Ai H, Ye X X, Jiang L, *et al.* On the possibility of severe corrosion of a Ni-W-Cr alloy in fluoride molten salts at high temperature[J]. Corrosion Science, 2019, **149**: 218-225
- 3 Gao R, Ye X X, Yan S, *et al.* Effects of tungsten content on the high-temperature oxidation behavior of Ni-xW-6Cr alloys [J]. Corrosion Science, 2019, **149**: 87-99
- 4 Wu Y P, Leng B, Li X L, *et al.* Corrosion behavior of a wear resistant Co-Mo-Cr-Si alloy in molten fluoride salts[J]. Journal of Nuclear Materials, 2020, **542**: 152529
- 5 Han F F, Wang X D, Jia Y Y, *et al.* Effect of grain boundary carbides on the diffusion behavior of Te in Ni-16Mo-7Cr base superalloy[J]. Materials Characterization, 2020, **164**: 110329
- 6 Han F F, Liu M, Jia Y Y, *et al.* Investigation on intergranular embrittlement behavior of Ni-16Mo-7Cr alloy induced by fission product Sb[J]. Corrosion Science, 2020, **177**: 109013
- 7 Jia Y Y, Han F F, Li Z F, *et al.* Effect of  $\text{SO}_4^{2-}$  ion impurity on stress corrosion behavior of Ni-16Mo-7Cr alloy in FLiNaK salt[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, **547**: 152809

# 材料评估中心工作进展

材料研究部, 陆燕玲 李德辉 周伯谋 曾广礼 叶林凤 王晚霞 汪松林

材料评估中心 2019-2020 年度严格按照 CNAS 管理要求, 负责核能材料与检测平台 70 余台(套)设备的运行维护, 为所内外提供材料分析检测服务。同时承担了 LF1、小模堆等 UNS N10003 合金工程数据获取和合金数据库建设任务, 为熔盐堆材料研发和工程建设提供了有力的技术支撑。积极发展材料现代分析测试技术, 形成了多项 ASTM、GB 测试标准, 有力推进了熔盐堆材料标准化建设进程。

## 实验室运行及 CNAS 资质维护

材料评估中心在成立之初就着手开展 CNAS 认可资质的申请工作, 并以核能科学分析测试中心高温材料室名义于 2017 年 3 月取得 CNAS 认可资质。2019 年 2 月, 完成 CNAS 复评审。2019 年 5 月, 获复评审认可证书(图 1)。CNAS 认可资质的取得, 极大促进了我所实验室管理能力的提高和检测能力的提升。截至目前, 中心已获 CNAS 认可项目 27 项, 涉及标准 40 个(表 1), 占我所 CNAS 认可项目的半数以上。认可项目涵盖金属材料、石墨及碳材料、固体材料及 C-C 复合材料和 SiC-SiC 复合材料等, 检测领域覆盖钍基熔盐堆用结构材料的常规力学和物理性能检测, 有力促进了我所先导专项“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统”的建设。

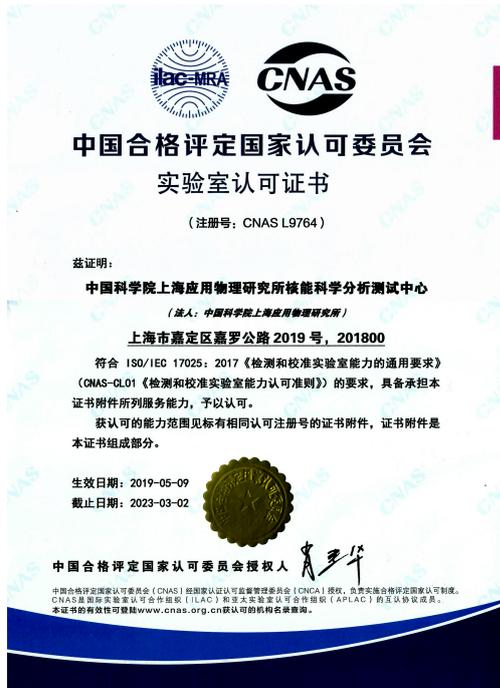


图 1 实验室认可证书

表 1 中心获 CNAS 认可情况

序号	领域	涉及项目(项)	涉及标准(个)
1	金属材料	11	22
2	C-C 复合材料和 SiC-SiC 复合材料	4	4
3	石墨及炭材料	5	5
4	固体材料	7	9

CNAS 认可资质的取得, 不但规范了我所实验室管理, 提升了我所的检测能力, 还在一定程度上提升了我所的知名度。同时, 中心注重所外业务拓展, 不断发掘新用户, 对外检测业务逐年攀升。截至目前, 中心每年所内外测试费持续维持在 600 万元以上, 所外客户包括上海交大、复旦大学、上海大学、上硅所、钢研纳克、核动力院、核八所、中电科 23 所、中船 725 所、中航商发、恩坦华汽车等 112 家机构, 并与远熙检测和启津检测公司达成长期合作协议。相信随着对外服务的不断拓展, 中心客户群体和业务量都将会较大程度的提升。

## 熔盐堆材料评价标准建立

蠕变损伤和疲劳损伤的交互作用会大大降低材料的持久寿命和疲劳寿命。然而, 由于没有统一的国家标准, 各个试验单位的测试规程和要求并不相同, 获取的数据在规范性、可靠性和可比较性上存在不足。中心在总结试验规范和要求的基础上, 结合前人经验和国内外先进成果, 牵头制定了 GB/T38822-2020《金属材料 蠕变-疲劳试验方法》国家标准, 2020 年 12 月 1 日实施。该标准填补了我国金属材料蠕变-疲劳试验领域标准的空白, 不仅为钍基熔盐堆压力容器、主管道等重要构件的设计安全性评价以及寿命评估提供重要支撑, 也为国内开展金属材料同时存在蠕变载荷和交变载荷条件下的试验提供了统一依据。

作为熔盐堆中的另一种重要材料, 核石墨广泛应用于核设施构件, 作为慢化剂、反射层、堆芯结构材料和熔盐流道。这些构件在高温、强辐射环境下服役, 评价其辐照和氧化后的抗拉强度对于反应堆的设计和安全评估十分重要。用传统试验方法如 ASTM C749 或者 DIN 51914 获取石墨的抗拉强度, 需要较大的试样, 而辐照仓和氧化设备往往空间有限, 难以进行人造石墨的辐照和氧化处理, 给获取辐照和氧化之后的人造石墨抗拉强度造成很大困

难。为此，材料研究部提出了一种新的测量石墨抗拉强度的方法—劈裂拉伸法。该方法采用较小的石墨试样，通过拉伸劈裂的方法获取核石墨的抗拉强度，解决了辐照仓小无法辐照其他标准试样的困难。该方法于 2019 年经美国材料实验协会认可并公布，形成 ASTM D8289-19 《Standard test method for tensile strength estimate by disc compression of manufactured graphit》。上述标准的制定，有力推进了熔盐堆材料标准化建设进程。

### 仪器设备功能开发研究进展

2020 年 8 月，材料评估中心承担的“基于纳米压痕仪的复合材料界面结合强度原位测试装置”仪器设备功能开发技术创新项目通过了验收，并获 2020

年度上海材料与制造大型仪器区域中心“优秀项目”。

SiCf/SiC 复合材料作为未来堆结构材料的重要储备材料，其力学性能失效分析与评估尤为重要。据国际通用的压头顶出法测试原理，在原有纳米压痕仪的基础上，通过设计新的压入装置对直径  $\geq 10\mu\text{m}$  的纤维进行连续施载，采用多个不同尺寸 U 型槽设备样品台及显微成像系统，构建复合材料界面结合强度原位测试装置。该装置打破了原有设备无法测量微纳米尺度纤维增强复合材料界面结合强度的局限，实现了可视化观测测试过程及有效测量纤维直径  $\geq 10\mu\text{m}$  的 SiCf/SiC 复合材料界面结合强度的目标(图 2)。

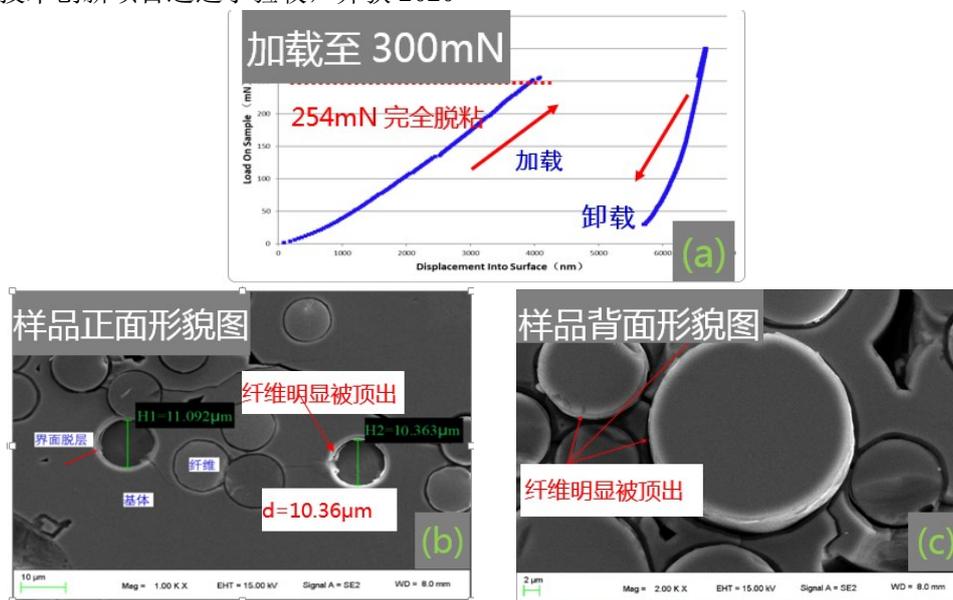


图 2 (a)位移-载荷曲线,(b)纤维被顶出正面图,(c)被顶出纤维背面图

该项目为中科院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能-钍基熔盐堆核能系统”堆用控制棒套管材料—SiCf/SiC 复合材料材料筛选、制备工艺、技术参数控制提供了强有力的技术支持及指导。通过该项目，不仅拓展了设备的功能，也提高了设备的共享率，装置在满足所内工程任务的研发的基础上，同时也为兄弟院校项目验收提供了服务支撑。

### 熔盐堆材料高温力学性能评估

结构材料的高温力学性能评价对其发展和应用具有重要意义。2019-2020 年度，中心继续推进熔盐堆用 UNS N10003 合金（Hastelloy N 和 GH3535 合金）的长期高温（650、700、750 和 800℃）蠕变持久性能测试，目前该合金 650℃ 最长蠕变试验运行时间已超过 4 万小时，获得的相关工程数据可以支撑熔盐堆 15 年设计寿命；在完成蠕变试验机改造的基础上，开展了 GH3535 合金不同温度（650℃、700℃

和 750℃）的蠕变裂纹扩展实验，分析温度对蠕变裂纹扩展的影响，获得了蠕变裂纹起裂时间、裂纹扩展速率、蠕变断裂韧性等数据；开展了 TMSR-LF1 堆用中子源包壳材料 MP35N 合金 550℃ 拉伸、蠕变持久性能测试；开展了 GH3535 合金 700℃ 疲劳试验，获得其初步的设计疲劳曲线。以上工作均为熔盐堆设计、安分等提供了重要的材料工程数据。

其中，通过对 GH3535 合金进行 650℃ 蠕变裂纹扩展行为研究<sup>[1]</sup>，得到蠕变裂纹起裂时间 ( $t_i$ )，蠕变裂纹扩展速率 ( $da/dt$ ) 和应力强度因子 ( $K_n$ )、断裂参量 ( $C^*$ ) 的关系曲线，蠕变断裂韧性 ( $K_{c_{mat}}$ ) 和  $t_i$  的关系。结果表明  $da/dt$  适合采用  $C^*$  进行关联，而  $t_i$  更适合采用  $K_n$  进行关联，分别在双对数坐标下成线性关系。并与 NSW 裂纹扩展模型、Ainsworth 蠕变断裂韧性的预测结果进行比较，分析 GH3535 合金的容限能力。发现 NSW 模型平面应力预测结果与测试结果相近，平面应力预测结果偏于保守(图 3a)，

$K_{mat}^c$  随时间增加而降低, Ainsworth 估算方法略高于试验结果; GH3535 合金虽然呈现沿晶断裂机制, 裂纹张开位移较小, 但具有较好的容限能力 (图 3b)。上述工作为人们进一步理解 GH3535 合金的高温力学性能, 尤其是带有缺陷的材料性能评估提供了重要支撑。

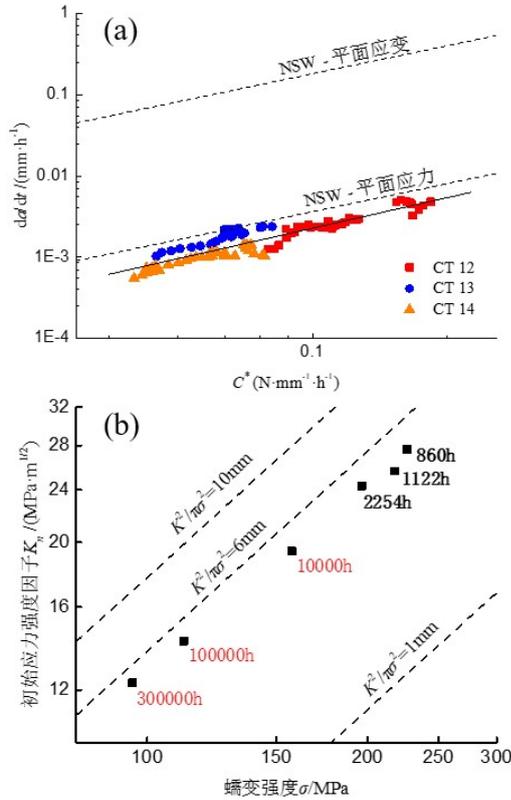


图 3 (a) NSW 模型预测值与试验结果对照图; (b) 有效应力强度因子  $K_n$  与蠕变强度  $\sigma$  的关系图<sup>[1]</sup>

### 喷丸强化对高温合金氧化性能的影响<sup>[2]</sup>

在 TMSR 中, 压力容器、热交换器和回路管道等构件始终处于高温、氟化物熔盐腐蚀和中子辐照等多重极端环境下。为了保证熔盐堆用结构材料高温腐蚀性能, 其 Cr 元素含量仅为 7wt%, 一般认为, 材料的 Cr 元素含量达到 12wt% 才可以形成连续致密的氧化膜, 表明 GH3535 的高温抗氧化性能尚有待进一步提高。喷丸处理时, 使用喷丸介质 (例如陶瓷, 金属, 合金等) 击打材料表面, 同时引入较大的压应力并通过产生塑性变形来形成细晶粒层。通过改变材料的表面状态达到优化材料性能的目的。中心研究了喷丸处理对 GH3535 合金中元素分布与扩散速率的影响。结果表明, 喷丸处理后氧化增重明显小于未喷丸样品 (图 4)。喷丸后在合金表层引入高密度位错组织与“细晶层”, 晶界与位错等都可以作为 Cr 元素的快速通道, 加速 Cr 元素的扩散并形成富 Cr 氧化物。之外, 喷丸处理导致合金表面形成较大的界面面积以及更低的扩散活化能, 有效增

强 Cr 向外扩散到合金表面形成保护层, 使得氧化物优先在外表面生长,  $Cr_2O_3$  层更快形成, 缩短瞬态氧化期 (图 5)。

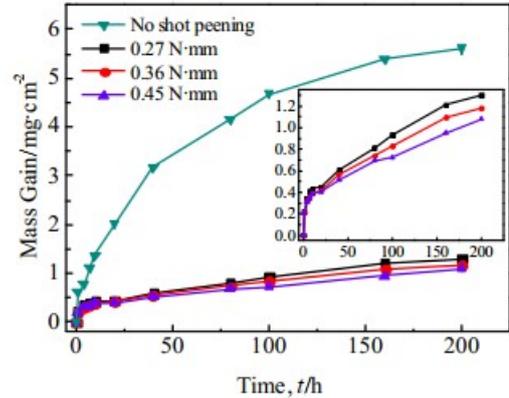


图 4 GH3535 合金 900°C 氧化动力学曲线<sup>[2]</sup>

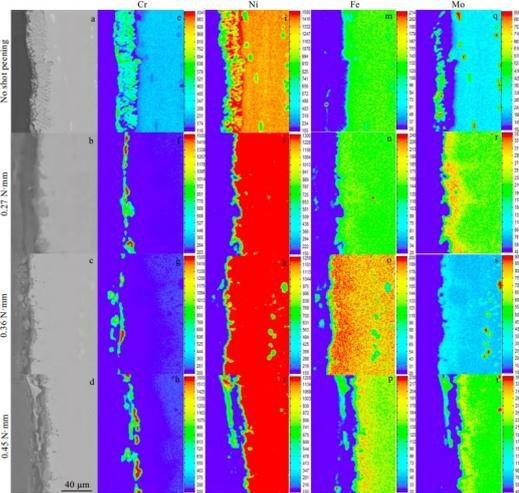


图 5 不同喷丸强度 GH3535 合金 900°C 氧化 200 h 后横截面 EPMA 元素分布<sup>[2]</sup>

综上, 材料评估中心 2019-2020 年度完成了 CNAS 复评审, 获认可项目达到 40 项, 为 TMSR 先导专项提供了一系列材料工程数据及有效检测报告, 对外营业额不断提升。建立了熔盐堆材料的高温评定方法, 完成两项标准制定, 并已公布实施。在熔盐堆用高温合金及石墨材料的性能评估上开展了大量的工作。合金材料长期力学数据已超过 4 万小时, 可支撑熔盐堆 15 年设计寿命。重点研究了合金材料的蠕变裂纹扩展性能, 探讨了温度对 GH3535 合金蠕变裂纹扩展速率的影响。

### 参考文献

- 1 樊光程, 王晚霞, 谈建平. GH3535 合金的蠕变裂纹扩展性能研究[J]. 压力容器, 2020, 37(07): 1-8.
- 2 汪松林, 张继祥, 陆燕玲, 樊光程, 董安平, 周兴泰. 喷丸处理对 GH3535 合金 900°C 恒温氧化行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(10): 3519-3527

# 碳基材料在熔盐堆以及高温熔盐系统中的研究进展

材料研究部, 贺周同 黄庆 唐辉 冯尚蕾 刘方刚

熔盐堆采用石墨作为其中子慢化剂和反射体材料。熔盐可能浸渗到石墨孔隙中, 导致石墨结构、性能以及堆芯热工水力参数的变化, 甚至影响堆的运行安<sup>[1-2]</sup>。为避免熔盐浸渗, 熔盐堆要求石墨孔隙尺寸小。在该原则指导下, 上海应物所与国内石墨生产厂家沟通合作, 开发了几款超细颗粒石墨产品, 经过测试可以达到阻止熔盐浸渗的目的。通过招标, 钍基熔盐实验堆 TMSR-LF1 采用了一款国产超细颗粒石墨产品。工作组通过对材料制备和性能测试过程的全面见证和评估, 确保了石墨质量达标并为堆芯的设计提供了充足的数据支持。根据实验堆 TMSR-LF1 的设计, 辐照损伤不是其石墨面临的主要问题。然而, 未来熔盐堆的中子注量率很高, 且石墨服役在中子注量率最大处, 辐照问题将凸显出来, 成为制约石墨服役寿命的关键因素。长寿命核石墨的开发是近期以及下一步工作的关键。石墨与熔盐的相容性研究是熔盐堆的特色, 早期已经建成石墨与熔盐相容性实验装置。近两年, 在该装置上开展了应力状态下的熔盐相容性研究, 并进一步升级了实验装置, 实现了动态实验研究的能力。除了熔盐堆相关的石墨研究工作之外, 近年来还开展了石墨非核应用的尝试。熔盐储热在能源领域具有很好的应用前景。目前熔盐储罐多为金属材料, 但金属材料普遍存在耐腐蚀性、耐久性差、成本高等问题。亟需一种成本低、寿命长、高温性能稳定的熔盐储罐来代替金属储罐, 促进熔盐储能的发展, 碳材料作为熔盐存储材料具有潜在可行性。为此开展了石墨熔盐储罐的设计和实验验证工作。

## TMSR-LF1 堆芯核石墨验收

TMSR-LF1 采用核石墨作为慢化体与反射体材料。根据我们的前期研究, 在明确了核石墨材料的技术指标的前提下, 对核石墨材料进行了招标, 并最终由中钢集团新型材料(浙江)有限公司中标, 为 TMSR-LF1 提供堆芯核石墨构件。在进行构件加工前, 需要对核石墨材料的生产过程按照质量保证大纲进行监督, 并对最终产品进行检测、验收。

这项工作 在 2019-2020 年的主要进展是获得批次数据。需要按照设计规范要求(ASME)对材料进行检测。核石墨作为反应堆最为重要的材料之一, 需要系统地评估材料性能, 并收集数据用于反应堆的设计及分析。根据采购合同, 我们对四块核石墨参照 ASME 标准进行了解剖取样, 共取样近 700 个。

其中抗弯强度、抗压强度、弹性模量、热导系数、热膨胀系数各 96 个; 抗拉强度、断裂韧性等样品各 48 个; 另外还有硼当量及孔径分析样品。为了充分掌握石墨坯料各处的性能, 对石墨的解剖进行了系统规划。块号为 8NS018AM14-FWD05 的石墨坯料的解剖过程见图 1。



图 1 块号为 8NS018AM14-FWD05 的石墨坯料的解剖过程

对四块石墨坯料进行检测, 并对获得的数据进行了系统地分析, 其中关键是均匀性分析。对石墨的均匀性评价一般采用 weibull 分布进行, 其中抗拉强度的二参数 weibull 分布也是该批次石墨的验收指标。我们对所取样品的密度、抗拉强度、抗压强度等性能进行了二参数 weibull 分布拟合, 确定石墨批料的均匀性满足合同要求。解剖取样样品的抗拉强度二参数 weibull 分布见图 2。

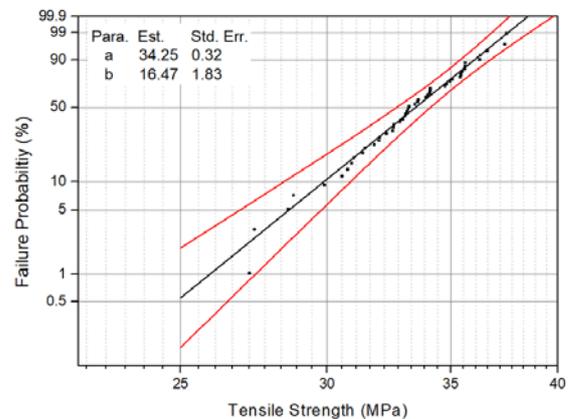


图 2 解剖取样样品的抗拉强度二参数 weibull 分布

解剖样品测量所获得的数据共 2000 余条, 作为 TMSR-LF1 的重要数据, 目前都已经整理并录入到核石墨数据库中。

## 长寿命核石墨研发

熔盐堆的石墨元件服役在中子注量率最大的区域，中子辐照损伤是决定石墨元件服役寿命的关键因素。通常采用堆内中子辐照+辐照后表征的方法评估一款石墨的辐照寿命。但是中子辐照资源有限、周期漫长、费用高昂，严重阻碍了熔盐堆用石墨的研发和优化。为此，研发方便快捷的石墨辐照行为评价方法势在必行，将为 TMSR 筛选合格的国产石墨产品。

专业组从两个角度研究石墨辐照行为的评价方法：一个是基于离子束辐照片状石墨翘曲效应的评估方法；一个是从微结构演化和对比研究的角度评估石墨的辐照稳定性。下面将分别叙述。

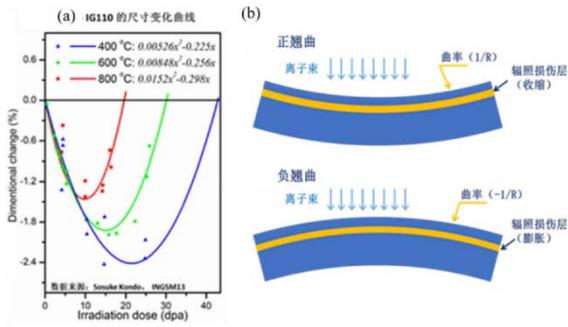


图3 (a)核石墨在不同温度下受辐照后的尺寸变化规律, (b)离子束辐照后石墨薄片的翘曲规律

在辐照环境中，由于辐照缺陷的演化石墨的体积随着辐照剂量的增加先收缩后膨胀（图3(a)），当体积膨胀恢复到原来尺寸时的辐照剂量即定义为石墨的辐照寿命。由于离子辐照的特点，离子束辐照产生的损伤主要集中在离子射程末端，导致该区域石墨的体积先收缩后膨胀，其它区域的石墨体积变化很小，这种变化使石墨发生翘曲。特别是当石墨样品较薄时，离子束辐照会使样品发生明显的翘曲（图3(b)）。当辐照损伤层体积收缩时，整个样品正翘曲；当辐照损伤层膨胀时，样品负翘曲。可以通过对比待测石墨由正翘曲变直时的离子束辐照剂量来计算核石墨的辐照寿命。一方面，可以与已知寿命的核石墨材料对比大致确定待测石墨的辐照寿命；另一方面，经理论分析，样品的辐照寿命与样品由正翘曲变直时的离子束辐照剂量成正比。

我们对离子束辐照后石墨的翘曲规律进行了大量的实验测量，验证了采用离子束辐照可以导致石墨薄片翘曲，并且采用测量样品翘曲的方法可以测量核石墨的辐照寿命。如采用两款石墨薄片（IG110和T220）样品同时进行离子束辐照，发现两款石墨在相同温度、相同的离子束辐照条件下翘曲行为有明显区别，符合理论预期；同时，同一款石墨在不同的温度下辐照，其翘曲行为也有明显不同，且与

理论计算结果一致（图4）。按照现有模型的计算出来的IG110的辐照寿命与公布的同温度的IG110的辐照寿命一致。

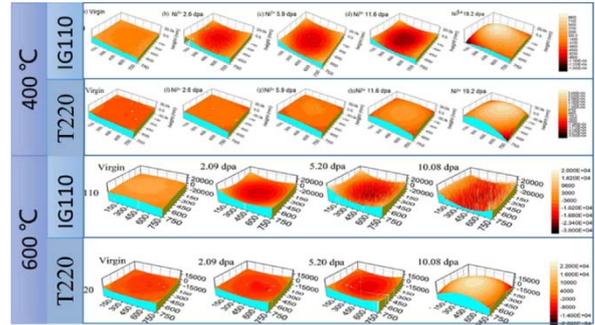


图4 400°C和600°C时, IG110和T220在相同的辐照条件下的翘曲行为对比

除了基于离子束辐照片状石墨翘曲效应的评价方法，还从石墨微结构的角度研究石墨辐照寿命差异的根源。石墨的原材料及制备工艺决定了其微观结构，微观结构又进一步决定了其宏观性能，包括其辐照损伤行为。然而石墨微观结构十分复杂，给石墨材料的筛选和评价带来挑战。另一方面，石墨质软，样品制备时容易引入人为损伤，掩盖石墨原始的微观结构。为此，优化了石墨样品抛光的方法，彻底消除了人为损伤，利用扫描电镜可以直接观察石墨中亚微米、甚至纳米尺度的微观结构，兼得大视场和高分辨率的优点，为石墨微结构的统计分析和对比研究打下了基础。

进一步对石墨微结构进行了离子辐照，研究了石墨微结构在辐照过程中的演化行为，并明确了不同微结构对于石墨辐照行为的利弊关系（图5）。

结构	石墨结构(微裂纹)	煅烧纹	喹啉不溶物	取向杂乱微晶
TEM				
SEM				
离子辐照后				

图5 辐照前后石墨特征微结构的表征

收集获取了多款国际商业核石墨的中子辐照数据。尽管数据存在一定的离散特征，分析发现核石墨的辐照行为有明显的差异。通过微结构表征和对比研究，明确了几款典型核石墨（IG-110、NBG-18、NBG-17）辐照寿命差异的根源<sup>[3]</sup>。在此基础上，对两款国产超细颗粒石墨产品进行了微结构表征，发现国产超细颗粒石墨中微观结构的缺点，有待改进。进一步的石墨筛选，需要综合考虑熔盐堆对石墨孔径的要求、石墨辐照寿命、石墨综合性能及分布均匀性、石墨坯料尺寸及成品率等各方面的因素。

## 核石墨与熔盐的相容性

核石墨与熔盐相容性研究工作于 2014 年开始开展，包括石墨与熔盐相容性装置研制，不同气压（0-1 MPa）、温度（600-700°C）及时间（1-2000 h）条件下 TMSR 候选核石墨与 FLiBe 熔盐的相容性试验，获取了 FLiBe 熔盐在不同牌号石墨中的浸渗规律和临界浸渗压强值，以及熔盐浸渗前后石墨微观结构表征等工作。

2019-2020 年度主要工作包括：（1）应力环境下核石墨 FLiBe 熔盐浸渗行为研究；（2）熔盐搅拌装置研制。

应力环境下核石墨的 FLiBe 熔盐浸渗行为工作用于模拟熔盐堆内核石墨构件之间的挤压、温度梯度引起的应力等载荷环境，研究在应力-FLiBe 熔盐共同作用下石墨裂纹扩展及熔盐浸渗行为。该研究采用 C 型环石墨样品，并加载应力，然后开展石墨样品 FLiBe 熔盐浸渗试验（图 6）。试验结果表明，在一定应力-熔盐环境下会导致石墨裂纹扩展，而单独的应力或熔盐环境没有发生石墨裂纹扩展现象；应力改变石墨的孔隙结构，受压部位熔盐浸渗量小于受拉部位（图 7）。

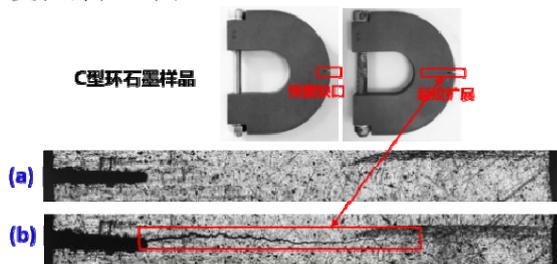


图 6 应力-FLiBe 熔盐环境下，预置裂纹 IG-110 石墨裂纹扩展图

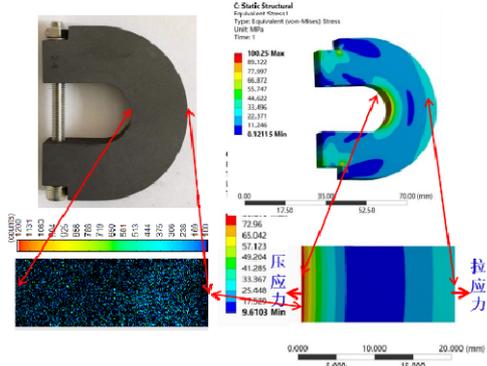


图 7 FLiBe 熔盐在石墨中的分布-对应应力计算分布图

熔盐搅拌装置研制，目的在于开展熔盐冲刷石墨掉粉行为研究。之前在静态石墨与熔盐相容性试验中有观察到石墨掉粉现象，石墨粉尘主要分布于凝固后盐的表面，经熔盐浸泡后石墨样品有一定程度的失重。该现象表明石墨在熔盐环境下会发生掉粉行为。2020 年度完成了熔盐搅拌装置研制工作，

在现有石墨与熔盐相容性装置基础上进行了改造。主要改造项目为：（1）将样品升降杆由升降功能改造为升降与旋转切换功能；（2）相关配套设施安装及调试工作（水冷装置、气路系统等安装）。此外，针对该装置申请了相关发明专利，装置示意图如图 8 所示。计划于 2021 年开展熔盐冲刷环境下石墨掉粉试验。

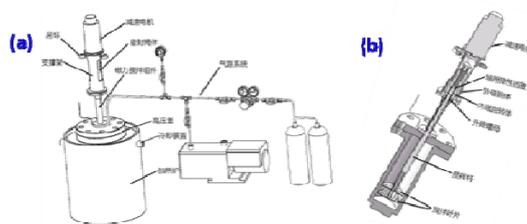


图 8 熔盐搅拌装置示意图 (a)装置整体示意图 (b)高压釜及搅拌装置剖面图

## 碳材料用于高温熔盐存储

大型石墨一体式成型成本大、对设备要求高，拼接式工艺具有成本低、调整灵活、工艺简单等优点，因此本研究中使用拼接工艺制备熔盐储罐、验证高温熔盐存储性能，同时选定合适的粘接剂。

本研究中将等静压石墨加工成 6 块弧度为 60° 内径 130 mm 外径 190 mm 底部和带有卡槽的顶部石墨块、18 块中部石墨块和一块内径为 260 mm 外径 330 mm 的底部石墨块，并拼接形成外径 380 mm，高度 500 mm 的石墨储罐，如图 9 所示。

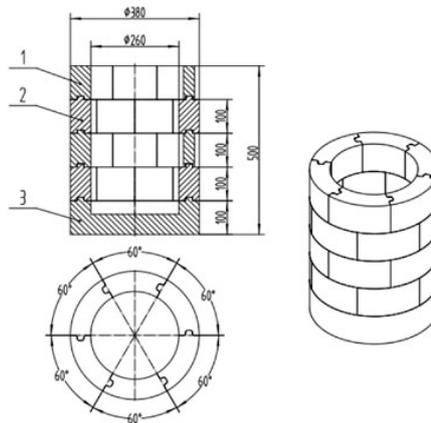


图 9 拼接式石墨储罐结构示意图

石墨块加工完成后需选定粘接剂对储罐进行粘接，本研究从工业用碳素胶泥、聚酰亚胺溶液树脂基、酚醛树脂基等粘接剂中最终选定酚醛树脂配合碳粉等填充材料作为粘结剂。当树脂和填充料的比例为 8:3 时，粘接剂的综合性能最佳（大于 10 MPa），粘结剂的黏度适宜；经过 1200°C 真空热处理，强度

依然很高（大于 5 Mpa）；同时由于树脂在高温下形成玻璃碳，表面更为致密，能有效的阻隔熔盐对连接处的侵入和腐蚀。

将选定的粘结剂均匀的涂抹在石墨块连接处，使用经酚醛树脂充分浸润的碳纤维布缠绕在石墨储罐外围，并施加一定的预紧力；将拼接好的石墨储罐分别在室温、80°C、150°C、300°C下进行固化 48h、48h、24h、24h 和 1000°C氩气保护下碳化 2h；在石墨储罐内表面涂敷热固性树脂，氩气保护下 1000°C碳化，形成致密的玻璃碳涂层；最终拼接式石墨储罐如图 10 所示。最后将氟盐装入储罐并在 500°C以上的温度下长时间运行。

采用拼接式工艺制备的碳材料熔盐储罐具有成本低、高温性能稳定、尺寸调整灵活，经充分验证后，尺寸放大的碳材料熔盐储罐可用于熔盐反应堆熔盐储罐的制备、太阳能集中储热（CSP）高温熔盐储罐的制备及其它熔盐存储领域，具有较高的经济价值和良好的应用前景。



图 10 用于高温熔盐存储石墨储罐

#### 参考文献

- 1 Z. He, L. Gao, X. Wang, B. Zhang, W. Qi, J. Song, X. He, C. Zhang, H. Tang, H. Xia, X. Zhou, Improvement of stacking order in graphite by molten fluoride salt infiltration, *Carbon*, 2014, **72**: 304-311
- 2 H. Tang, W. Qi, Z. He, H. Xia, Q. Huang, C. Zhang, X. Wang, J. Song, P. Huai, X. Zhou, Infiltration of graphite by molten  $2\text{LiF}\text{-BeF}_2$  salt, *J. Mater. Sci.*, 2017, **52**: 11346-11359
- 3 Q. Huang, X. Q. Han, P. Liu, J. J. Li, G. H. Lei, C. Li, Ion beam assisted characterization of quinolone-insoluble particles in nuclear graphite, *Nucl. Sci. Tech.*, 2020, **31**: 98-98

# 先进核燃料技术研究

材料研究部, 林俊 曹长青 严超 张锋 王鹏 黄鹤 侯可可 李健健

仲亚娟 李子威 雷前涛 张海青 朱智勇

钚基熔盐反应堆有两种备选的燃料类型: 固态燃料元件和液态熔盐燃料。其中, 固态燃料是以 TRISO(Tri-structural isotropic)包覆燃料颗粒为基础的球形或其他形状的石墨基体燃料元件, 液态燃料则是采用不同比例和组分的氟化物混合熔盐, 例如  ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  四元熔盐。在前期研究的基础上, 本课题组于 2019 年和 2020 年度进一步研究了新的先进燃料制备工艺以及相关规律, 并将它们拓展应用到了更广泛的技术领域。

## TMSR-LF1 核材料衡算

按照国家对核材料管制的要求, TMSR-LF1 必须建立核材料衡算系统, 并在此基础上申请核材料许可证。TMSR-LF1 是全新的第四代反应堆堆型, 从核燃料的角度看, 它与国内外现有核设施具有极大的差异, 因为其核燃料是不能直接计件的散料, 不仅燃料的形式复杂多样(例如  $\text{UF}_4$  粉末,  ${}^7\text{LiF}\text{-UF}_4$  添加盐,  ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  燃料盐等), 而且涉及邻堆混料(添加盐混配和燃料盐混合)的混合工艺和管路输送等工艺过程。TMSR-LF1 核材料衡算系统的设计和建设在国内外都属首次。

根据 TMSR-LF1 的实际情况, 在设计核材料衡算整体方案的基础上, 细化了核材料测量、账目系统、实物盘存和平衡结算等方面的技术要求和管理制度。根据实验结果, 确定了管道核材料滞留量的测试方法和装置需求, 委托研制了符合要求的核材料滞留量无损测量系统。与此同时, 提出关键技术参数和逻辑关系图, 委托开发了 TMSR-LF1 核材料记录与报告的账目管理软件系统。在经过多个版本的迭代升级后, 该软件于 2020 年 4 月通过了专家评审。这些工作为 TMSR-LF1 核材料许可证的申请奠定了重要基础。

## 液态燃料制备技术

完善了 TMSR-LF1 添加盐制备研究实验室, 优化了添加盐制备装置的气路系统, 使 HF 气体流量波动大幅下降, 从而能够有效地控制  ${}^7\text{LiF}\text{-UF}_4$  添加盐制备的实验过程和产品质量。利用该实验装置开展了添加盐制备工艺研究、物性测试用的燃料盐制备和添加盐在线加料实验等工作。工艺研究实验表明, 通过优化工艺条件, 在  $\text{UF}_4$  原料中含有较大质量百

分含量的  $\text{UO}_2$  (折合成氧含量为数千 ppm) 时, 添加盐产品中的氧含量也能在  $\text{H}_2/\text{HF}$  除氧 36 小时之后降至 200 ppm 左右。另外, 添加盐产品中的金属杂质主要来自原料, 验证了工艺条件的可靠性。

提出了熔盐堆液态燃料的一种新型制备工艺, 它基于高温熔盐电化学与熔盐气液反应相耦合的技术, 利用金属(Th、Be、U、Zr 等)电极的电化学溶解反应将  $\text{UF}_4$  转化为强还原性的  $\text{UF}_3$ , 后者与强氧化性的  $\text{UF}_6$  气体发生反应生成  $\text{UF}_4$  产品。根据这一原理, 可以构建出一个具有强还原性和弱腐蚀性的反应体系, 并利用尾气中的残留  $\text{UF}_6$  含量和熔盐中的  $\text{U}^{4+}/\text{U}^{3+}$  比值的在线检测结果(图 1), 对反应进程和反应体系的氧化还原电位进行调控。原理验证实验表明了上述工艺设计的可行性: 金属 Th、Be、Zr 均可以通过电化学反应快速、可控地将  $\text{UF}_4$  转化为  $\text{UF}_3$ , 而  $\text{UF}_6$  也可以与  $\text{UF}_3$  定量地发生反应。

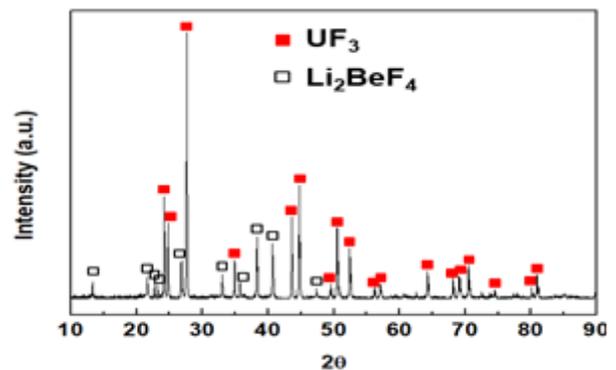


图 1 金属 Be 与  $\text{LiF}\text{-BeF}_2\text{-UF}_4$  反应产物 XRD 图

## ATF 先进燃料制备

基于前期研究经验, 承接了“高性能事故容错燃料芯块制备及性能测试”外协项目。利用熔盐电沉积方法, 制备出了大颗粒单晶  $\text{UO}_2$ , 并对其粒度、微观结构、硬度、热导率、离子束辐照后结晶度变化等指标进行了表征。 $\text{UO}_2\text{Cl}_2$  在  $\text{Li}\text{-KCl}$  熔盐中电化学研究结果表明,  $\text{UO}_2^{2+}$  在 Pt 电极上最终还原为  $\text{UO}_2$ , 在一定条件下可获得  $\text{UO}_2$  单晶, 其平均粒径可以达到约 300  $\mu\text{m}$ , 其拉曼光谱如图 1 所示。

在制备出  $\text{UO}_2$  单晶的基础上, 进一步研制了  $\text{UO}_2$  单晶-Zr、 $\text{UO}_2$  单晶-SiC 和  $\text{UO}_2$  单晶-纳米金刚石等多种复合燃料芯块(图 2), 并对它们开展了微观结构表征、物理性能测试及高温氧化测试等研究。

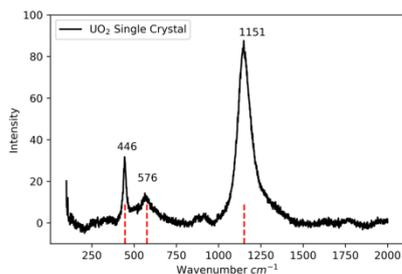


图2 UO<sub>2</sub>单晶拉曼光谱



图3 从左至右: UO<sub>2</sub>-Zr, UO<sub>2</sub>-SiC, UO<sub>2</sub>-纳米金刚石复合芯块

### 新型包覆颗粒制备

TRISO 颗粒具有固有的安全性,可广泛应用于固态燃料熔盐堆、先进高温气冷堆等新型反应堆中,在近年来得到大量研究的事故容错燃料(ATF)中,它也是一个重要的选项。为了进一步提高 SiC 包覆层的性能,一种有效的方式是采用细晶粒 SiC 包覆层,因为它能更有效地抑制 Ag 离子的扩散,并具有更好的力学性能、抗氧化性能和抗腐蚀性能。

在高温流化床化学气相沉积实验中,通过改变沉积温度和前驱体载带气体,研究了温度等条件对 SiC 包覆层晶粒尺寸与成分的影响。当沉积温度较低时, SiC 包覆层晶粒尺寸降低,但也可能造成产物中含有 Si 杂质。通过调整载气中 H<sub>2</sub> 的含量,可以在较低温度下制备得到细晶且纯相的 SiC 包覆层。所得细晶 SiC 包覆层的晶粒尺寸约为 150nm,内部含有较高密度的堆垛层错(图 4)。经检测,细晶 SiC 包覆层在硬度与杨氏模量上均优于大晶粒 SiC 包覆层<sup>[1]</sup>。

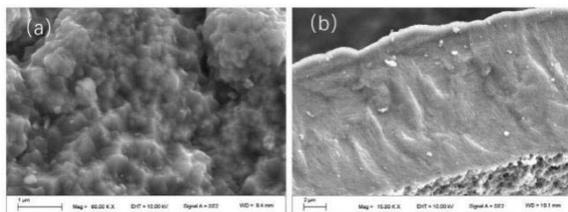


图4 细晶 SiC (a) 表面 SEM 图和 (b) 断面致密 SEM 图

研究了工艺条件对 SiC 包覆层微观结构和成分的影响规律和机理<sup>[2]</sup>。以 SiC 包覆层形貌与结晶性差别最大的 1200°C 与 1500°C 两个温度条件作为研究对象(图 5),首次提出 SiC 层在低温与高温下具有完全不同的生长方式:在低温下首先形成 SiC 小液滴,小液滴沉积在基底表面后,逐渐聚集长大并最终形成覆盖整个基底表面的 SiC 层;在高温下 SiC 首先

形成小晶粒,小晶粒沉积在基底表面之后继续吸收小分子进行生长,最终各晶粒长大并互相接触形成 SiC 层。生长机理的不同源于不同温度下 SiC 的形核率、结晶性、晶粒生长速率等的不同,最终导致 SiC 包覆层在形貌与成分上存在较大的差异。

另外,研究了金属钨包覆燃料颗粒的制备(),它是深空探测核热推进的最有潜力的一种燃料形式。实验表明,在核芯上可以包覆一层致密、纯相、厚度均匀的钨层。通过沉积工艺的改进,获得了晶粒较小的钨层(200-400 nm);细晶化的金属钨包覆层具有更优的力学性能和对裂变产物的阻挡能力,从而具有更大的应用潜力。

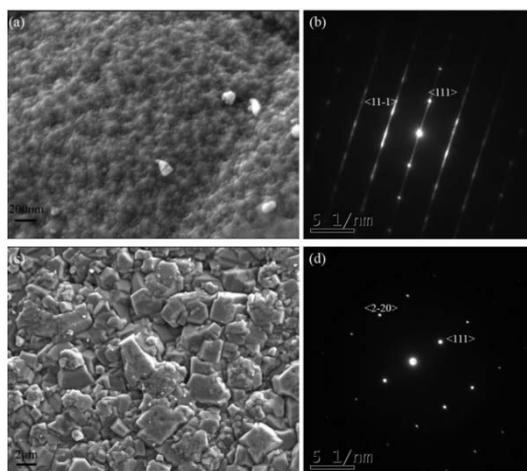


图5 SiC 在不同温度生长机理不同造成的结构差异

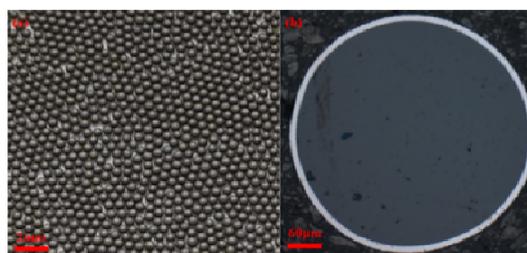


图6 钨包覆燃料颗粒

### 固态燃料元件制备

在此前研究球形燃料元件制备的基础上,开展了柱状燃料的研制工作。该燃料元件内部是弥撒于基体石墨中的 TRISO 颗粒燃料区,外部是基体石墨材料。有别于传统的准等静压工艺,采用了注塑的方法进行制备。组装过程无需高压,避免了压制过程中 TRISO 颗粒之间因为相互挤压而破裂,而且 TRISO 颗粒装载量可调,制备方法简单,可有效提高制备效率和降低成本。由于采用密堆积方式放置 TRISO 颗粒,燃料区填充因子可达 60%;制备过程中无外力,有效降低了压制过程中造成的 TRISO 破损现象;无燃料区石墨的抗压强度为 40 MPa,热导率为 30 W/mK。

## 陶瓷基复合相变材料研究

利用燃料元件研制技术,开展了共晶盐/陶瓷中高温复合相变材料(composite phase change material, CPCM)的制备和性能研究。目前,中低温( $\leq 300^{\circ}\text{C}$ )相变储热技术发展相对成熟,而适用于核能和太阳能热存储的高温无机盐类(氯盐、碳酸盐和硝酸盐等,相变点  $300\text{-}1000^{\circ}\text{C}$ )相变储热技术相对滞后。多元氯盐具有较大的潜热值、蒸汽压较低、液态粘度小、相变温度合适等优点,其缺点是腐蚀性较强、热导率较低以及对结构材料要求较高等。陶瓷材料耐腐蚀性强、具有较好的导热性和耐高温性能,因而可以被用作氯盐的封装材料,制备出共晶盐/陶瓷中高温复合相变材料。与传统的冷压工艺相比,放电等离子烧结(spark plasma sintering, SPS)工艺制备-烧结一体成型,具有烧结压力高、烧结样品的致密度高、热能利用率高、烧结速度快、烧结时间短等特点。

采用 SPS 烧结工艺制备了多种不同质量比的 NaCl-MgCl<sub>2</sub> 共晶盐/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷中高温 CPCM,利用 EPMA 分析了 CPCM 的元素分布、化学组成和共晶性,为共晶盐/陶瓷 CPCM 的制备和表征提供了新颖的实验依据<sup>[3]</sup>。主要结论有:经过  $550^{\circ}\text{C}$  烧结后,NaCl-MgCl<sub>2</sub> 共晶盐/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量比为 2:3 的中高温 CPCM 的失重率最小,可有效地降低高温相变过程中的泄露和挥发;SPS 烧结的 CPCM 具有致密的微观结构,致使  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷之间的热通路构建的比较紧密,降低了传热热阻,提高了 CPCM 的整体热导率;CPCM 具有良好的化学稳定性,各元素的分布比较均匀,表明 NaCl-MgCl<sub>2</sub> 共晶盐具有良好的共晶性;中高温 CPCM 的熔点为  $408.7^{\circ}\text{C}$ ,相变潜热为  $142.6\text{ J/g}$ ,在  $500\text{-}650^{\circ}\text{C}$  具有良好的热稳定性。

利用有限元模拟分析了 CPCM 相变过程的温度分布以及相分布,模拟了 NaCl-MgCl<sub>2</sub> 共晶盐的温度-相变时间变化曲线。计算结果表明,CPCM 在  $t=26.99\text{ min}$  时完成相变,而 NaCl-MgCl<sub>2</sub> 共晶盐在  $t=45.55\text{ min}$  时完成相变。对比发现,CPCM 的相变时间大大缩短,表明吸放热速率有了明显的提高。

## 离子束辐照研究

SiC 及其复合材料具有良好的高温力学性能、高温化学惰性、低感生放射性和强抗腐蚀能力等特性,是熔盐堆设备的备选材料之一。在熔盐堆中, SiC 材料面临高温、熔盐腐蚀、高剂量中子辐照等多重环境的考验,因此辐照损伤对其高温腐蚀性能的影响是不可忽视的关键科学问题。利用离子束辐照模拟中子在 SiC 中引入辐照损伤,再将其放置于静态高温 FLiNaK 熔盐( $650^{\circ}\text{C}$ )中进行腐蚀,采用 TEM、SEM、AFM、Raman 和 XPS 等多种表征手段,研究了辐照损伤对 SiC 材料熔盐腐蚀性能的影响<sup>[4]</sup>。研究表明,未经辐照的 SiC 样品具有优异的抗熔盐

腐蚀性能,而离子束辐照明显地促进了 SiC 在高温 FLiNaK 熔盐中的腐蚀。实验还发现,常温低剂量辐照( $< 0.3\text{ dpa}$ )的 SiC 样品几乎没有腐蚀现象,但是,当剂量达到  $3\text{ dpa}$ 、SiC 样品出现非晶化时,辐照显著地促进了 SiC 的腐蚀(Si 和 Xe 离子辐照下都发现此现象),这说明辐照促进 SiC 腐蚀的过程存在 dpa 阈值。对腐蚀样品表面和截面的分析表明,O 元素参与到了辐照促进 SiC 腐蚀的过程中,因此控制 O 杂质的含量是解决辐照促进 SiC 腐蚀的一个关键。

针对 GH3535 合金焊缝高温辐照数据缺乏的问题,利用离子辐照方法开展了 GH3535 合金焊缝辐照性能评价和高温 He 脆研究<sup>[5]</sup>。实验表明,在  $650^{\circ}\text{C}$  下,焊缝和 HAZ 的硬度随辐照剂量的增加而逐渐增加,而母材的硬度则逐渐饱和。在  $1\times 10^{17}\text{ ions/cm}^2$  剂量下,三个区域的硬化程度依次为:焊缝>HAZ>母材。辐照产生的氦泡是 GH3535 合金焊接接头硬化的主要原因。在相同的辐照条件下,焊缝、HAZ 和母材中氦泡的平均直径分别为  $2.74\pm 0.51$ 、 $2.80\pm 0.58$  和  $2.36\pm 0.54\text{ nm}$ ,相应的氦泡数密度分别为  $15.4\times 10^{23}$ 、 $10.8\times 10^{23}$  和  $9.69\times 10^{23}/\text{m}^3$ 。焊接接头中本征位错线的不同结构影响了晶粒中氦气泡的成核和生长。焊缝和 HAZ 中的高密度位错是造成氦泡演化与母材不同的主要原因。

针对增材制造材料辐照行为数据的缺失,采用较为成熟的选区激光熔化(SLM)及传统(TM)316L 不锈钢为研究对象,针对在未来先进堆中可能存在的高温氦脆问题进行了相应研究<sup>[6]</sup>。研究结果表明,SLM 316L 不锈钢展现出了更为优异的抗高温氦致硬化的性能。缺陷的微观统计与计算证实,这一表现是因为众多本征结构(残余位错胞壁、纠缠位错、晶界等)极大降低了氦泡的密度,削弱了由氦泡造成的硬化。

## 参考文献

- 1 Yang X, Zhang F, Guo M, *et al.* Preparation of SiC layer with sub-micro grain structure in TRISO particles by spouted bed CVD[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, **39**: 2839-2845.
- 2 Yang X, Zhang F, You Y, *et al.* Growth process and mechanism of SiC layer deposited by CVD method at normal atmosphere[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, **39**: 4495-4500.
- 3 Zhong Y, Zhao B, Lin J, *et al.* Encapsulation of high-temperature inorganic phase change materials using graphite as heat transfer enhancer[J]. Renewable Energy, 2019, **133**: 240-247.
- 4 Li J, Yan L, Huang H, *et al.* Corrosion behavior of ion-irradiated SiC in FLiNaK molten salt[J]. Corrosion Science, 2020, **163**: 108229.1-108229.7.
- 5 陈倩, 林俊, 张柯, 等. 高温 He 离子辐照 GH3535 合金的损伤效应[J]. 原子能科学技术, 2020, **54**: 688-695.
- 6 Fu C, Li J, Bai J, *et al.* Effect of helium bubbles on irradiation hardening of additive manufacturing 316L stainless steel under high temperature He ions irradiation[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, **550**: 152948.

# 哈工大低能电子加速器项目详细设计

应用加速器技术部，刘永好

我所于 2019 年承接了哈尔滨工业大学的三台低能电子加速器及其束线项目，该项目属于哈工大于 2014 年获得国家发改委正式批准的国家重大科技基础设施“空间环境地面模拟实施”的子项目，分别为：1.2MeV/10mA 电子加速器及其束线，1.0MeV/100  $\mu$ A 电子加速器及其束线，200keV/50mA 电子加速器及其束线。其中 1.2 MeV/10 mA 和 200 keV/50 mA

电子加速器将用于综合舱的辐照，1.0 MeV/100  $\mu$ A 电子加速器将用于器件舱的辐照。

## 技术要求

三台加速器项目均属于定制类加速器及其束线，其主要技术参数要求如下表一：

表 1 三台加速器主要技术参数要求

技术参数/设计指标	1.2MeV/10mA	1.0MeV/100 $\mu$ A	200keV/50mA
最高能量 (MeV)	$\geq 1.2$	$\geq 1.2$	$\geq 200\text{keV}$
最低能量 (MeV)	$\leq 0.6$	$\leq 0.5$	$\leq 50\text{keV}$
能量稳定度	$\leq 2\% @ 1.0\text{MeV}$	$\leq 2\% @ 1.0\text{MeV}$	$\leq 2\% @ 200\text{keV}$
电子束能散	$\leq 2\% @ 1.0\text{MeV}$	$\leq 2\% @ 1.0\text{MeV}$	$\leq 2\% @ 200\text{keV}$
最高流强	$\geq 10\text{mA} @ 1.0\text{MeV}$	$\geq 100\mu\text{A} @ 1.0\text{MeV}$	$\geq 50\text{mA} @ 200\text{keV}$
最低流强	$\leq 100\mu\text{A} @ 1.0\text{MeV}$	$\leq 1\mu\text{A} @ 1.0\text{MeV}$	$\leq 1\text{mA} @ 200\text{keV}$
束流发射度 (90%)	$\leq 15\text{ }\pi\text{mmrad}$	$\leq 15\text{ }\pi\text{mmrad}$	$\leq 30\text{ }\pi\text{mmrad}$
机械结构	卧式	卧式	水平
辐照样品大小	1000mm*1000mm	50mm*50mm	1000mm*1000mm
辐照样品与束流中心夹角	45°	90°	45°
辐照均匀度 (整样品)	$\leq \pm 10\%$	$\leq \pm 5\%$	$\leq \pm 10\%$
辐照方式	2 维扫描	2 维扫描	2 维扫描
扫描频率	$\geq 100\text{Hz}$	$\geq 100\text{Hz}$	$\geq 100\text{Hz}$

目前三台加速器及其束线已完成详细设计，进入项目实施阶段。

## 加速器工程设计

两台大于 1.0 MeV 的加速器采用特殊定制的最高带载运行高压为 1.2 MV 的地那米型高频高压加速器结构，以发挥其结构紧凑、储能低、高压稳定以及高可靠性等优点，以及我技术部的经验。两台加速器采用同样的设计，采用卧式结构，SF<sub>6</sub> 钢筒内径缩小至  $\Phi 1\ 320\text{ mm}$ ，并对电晕环、高压电极和高频电极等倍压系统进行定制设计。为满足出束范围和调节精度需要，电子枪采用直流栅控电子枪，其供电由钢筒底部的电动机通过绝缘转轴带动位于高压电极内的发电机提供，高压电极内的设备控制采用光纤控制。为适应缩小的结构，高频变压器采用螺线管式高频变压器替代环形高频变压器。高频机也采用小功率定制版设计。地那米加速器系统主要

由电子枪、加速管、倍压系统、高频变压器、高频机和绝缘气体系统等组成。

200 keV 加速器采用空气绝缘的高压平台加直流高压加速管的设计：设计对地绝缘的-200 kV 高压平台，由商品化高压电源供电作为主加速电源；电子枪浮在该高压上，-200 kV 电位通过加速管各绝缘环间的均压电阻分布到地，形成电子束的加速电场通道；为保证更低能量下的电子枪束流引出，其吸极采用独立供电；加速管外增设电晕环，已降低电极表面场强，避免放电和击穿；高压平台内设备采用高压隔离变压器供电，并通过光纤进行控制。

## 束线工程设计

用于综合舱辐照的两台加速器（1.2 MeV 和 200 keV 加速器）位于建筑的二层，对坐落在一层的综合舱进行 45° 辐照，因此两台加速器均包括总长 10 余米的水平段和 45° 倾斜段束流输运线。设计中采用二极磁铁实现束流的弯转，且 200 keV 加速器采用

了双聚焦二极磁铁，以更好地与上下游螺线管聚焦线圈匹配；1.2 MeV 倾斜段采用四极磁铁进行束流聚焦。两台加速器束线都设计了一定数量的校正磁铁，并在弯铁前后设计了荧光靶和法拉第筒，以在调束时可以对束斑大小和位置进行测定以优化束流光学参数，以及对束流大小进行测定和标定；束流在输运线末端进入扫描芯管，由扫描磁铁将束流均匀照射在综合舱内 1m×1m 的样品台上，还专门设计了扫描均匀度测量装置对扫描均匀度进行测定。

由于综合舱的真空较差 ( $6.0 \times 10^{-3}$  Pa)，因此输运线真空设计必须考虑该因素，以避免较差的真空引入加速管影响加速器稳定运行。设计中综合考虑了束流光学和基于经验的真空管道尺寸需求，通过增设真空阻断，并合理设计真空获得设备的抽速和

布局，设计过程的计算和仿真均表明，可以获得较为满意的真空分布。

200 keV 加速器 50 mA 电子束的低能(如 50 keV)稳定运行也是设计遇到的一个难点，由于电子速度很低，空间电荷效应和外界磁场（如地磁场）影响均不容忽视，设计中对两者的影响都进行了考虑，优化了束流光学，并提供足够束流轨道校正的裕度等措施，以期获得满意的结果。图 1 为三台加速器及其束线的三维效果图。

哈工大三台低能电子加速器及其束线项目已进入实施阶段，按进度须于 2021 年底前完成全部加工和预安装，具备发货条件，2022 年 3 月进行现场安装调试，2022 年 7 月完成正式验收。

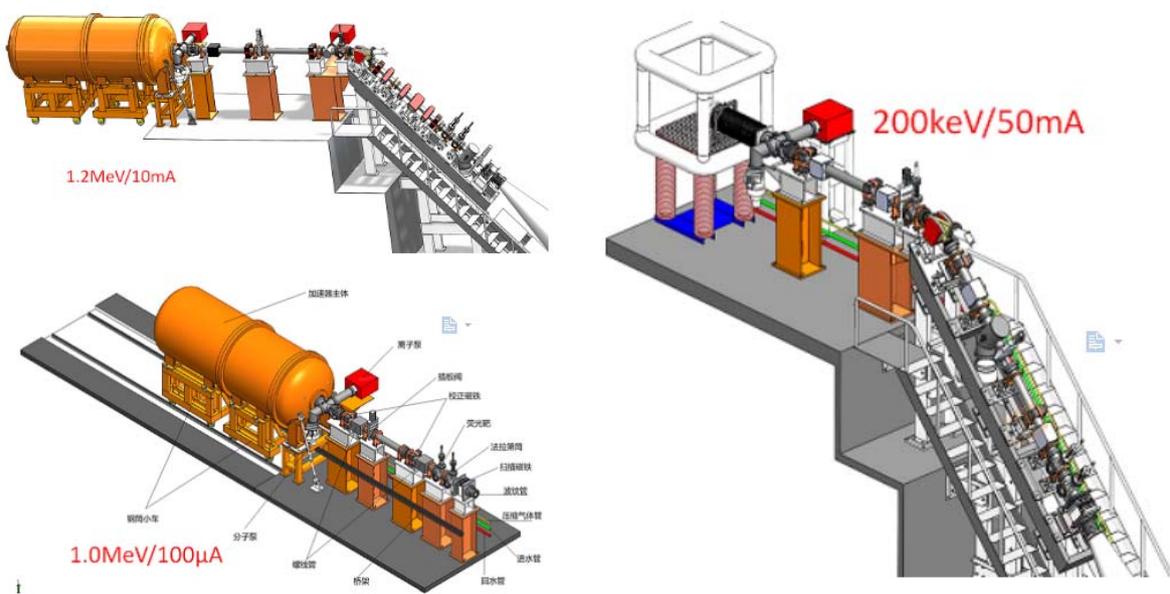


图 1 三台加速器及其束线的三维效果图

## 参考文献

1 “空间环境地面模拟装置—200keV 电子加速器及束线详细设计 V2.0”，内部文件

2 “空间环境地面模拟装置—1.2MeV 电子加速器及束线详细设计 V2.0”，内部文件

3 “空间环境地面模拟装置—1.0MeV 电子加速器及束线详细设计 V2.0”，内部文件

# 一种能量和流强可调范围增强的电子加速器设计

应用加速器技术部, 何子锋 李德明

加速器是反应堆材料、高能物理及半导体物理等粒子辐照研究的重要设备, 为开展空间电子辐照研究, 各研究机构已建造或正在建造专门的实验装置来模拟空间的质子、重离子、电子等不同粒子多能量段的辐照环境。这类装置需要模拟电子束等离子体的能量约为  $10\text{-}10^6\text{ eV}$ , 样品表面的电子注量率需要小于等于  $5 \times 10^6/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。考虑加速器技术的实际可行性, 通常采用  $1\text{ MeV}$  及  $200\text{ keV}$  电子加速器产生相应能量段的电子束。对于  $200\text{ keV}$  电子加速器的设计, 如果能兼容产生  $5\text{ - }200\text{ keV}$  以及几十  $\text{mA}$  到  $1\text{ nA}$  将更有利于开展相关模拟实验。

## 1 加速器设计

该  $5\text{-}200\text{ keV}/5\text{nA}\text{-}50\text{mA}$  电子加速器采用空气绝缘。参考空气的击穿场强  $30\text{ kV/cm}$ , 高压仓、加速管的外部结构的最大电场按  $15\text{ kV/cm}$  设计。加速器主体采用卧式结构, 包括两个高压电源, 高压仓, 两段加速管及 2 级扩束拦截衰减单元。两个电源分别是加速电源和减速电源, 而两个加速管分别是升能加速管段和降能加速管段。带电粒子经过两个高压电源提供的电极电位设置, 能量的变化范围从最低  $5\text{ keV}$  到最高  $200\text{ keV}$ 。对于流强的调节, 要求具备 7 个数量级的流强调节能力, 热阴极电子枪是电子加速器产生电子束的常规部件, 其容易产生几十乃至几百  $\text{mA}$  的直流电子束, 但同一把枪兼容 4 个量级以上的可调流强输出很困难。热阴极电子枪的流强改变主要靠调整阴极温度, 引出电压和占空比, 应用这些手段可以扩展电子枪的控制范围, 但仍难以达到 4 个以上量级的稳定可调输出。特别说明调整占空比的方法, 在某些特别要求直流输出的情况, 不符合粒子引出状态的需要。因此增加了扩束拦截单元, 一般设置在加速管的末端, 用于进一步衰减流强, 扩大加速器流强的输出范围, 从最大  $50\text{ mA}$  的束流可以逐级达到  $\text{nA}$  级别的可控输出。

## 2 电子束的能量调节

### 2.1 能量调节原理及过程

采用加速器产生的电子束, 由于直接获得  $20\text{ keV}$  以下的电子束是一项比较困难的工作, 因此在

加速管后端设置一端减速电极系统可以有效的实现低能下的电子束的引出, 增大能量的调节范围。加速器的电源分为加速电源和减速电源, 电源及内部的电路连接如下图 1 所示。在高压仓设置灯丝电源, 栅极电源, 阳极电源和控制极电源, 这些电源的公共地位于  $200\text{ kV}$  高压电源的输出端。通过光纤隔离控制相应的电压和电流参数, 获得加速管的稳定工作状态。在高压仓外有  $-200\text{ kV}$  高压加速电源和  $+50\text{ kV}$  高压减速电源。可以看到  $-200\text{ kV}$  加速电源不与大地直接相连, 其地电位设置在  $+50\text{ kV}$  减速电源的输出端。

在输出  $50\text{-}200\text{ keV}$  能量束流时, 减速电源不输出, 加速电源输出  $-50\text{--}200\text{ kV}$  高压。这时, 电子束从电子枪引出后, 经过升能加速器管后能量为  $50\text{-}200\text{ keV}$ 。此时, 降能加速管不工作, 表现为一段漂移管。在要求输出  $5\text{-}50\text{ keV}$  能量束流时, 加速电源保持  $-50\text{ kV}$  的高压输出, 而减速电源输出  $+45\text{--}0\text{ kV}$  高压。这时, 前段升能加速管出来  $50\text{ keV}$  的电子束将经过后段降能加速管的减速。调节减速电源的输出电压, 可以使电子束在降能加速管中实现减速, 最终在出口获得所需要的低端能量输出。在这个过程中, 加速高压电源的地电位是随着减速电源输出相应抬高的。各引出能量下, 电极电位的设置如图 2 所示。

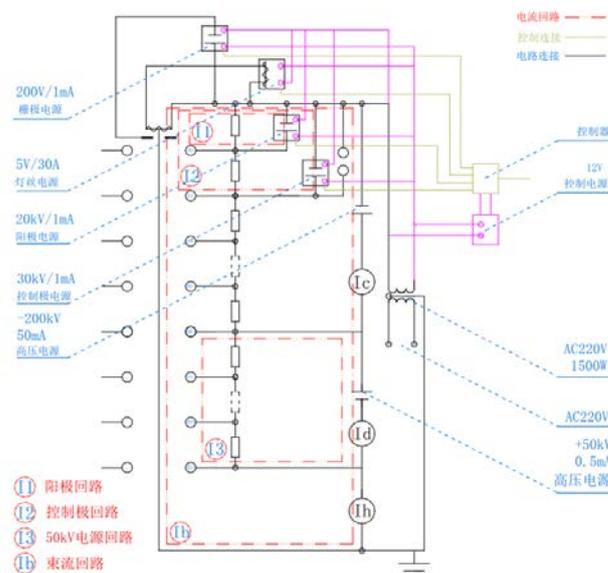


图 1 加速器电路及控制原理图

各引出能量下电极电位设置

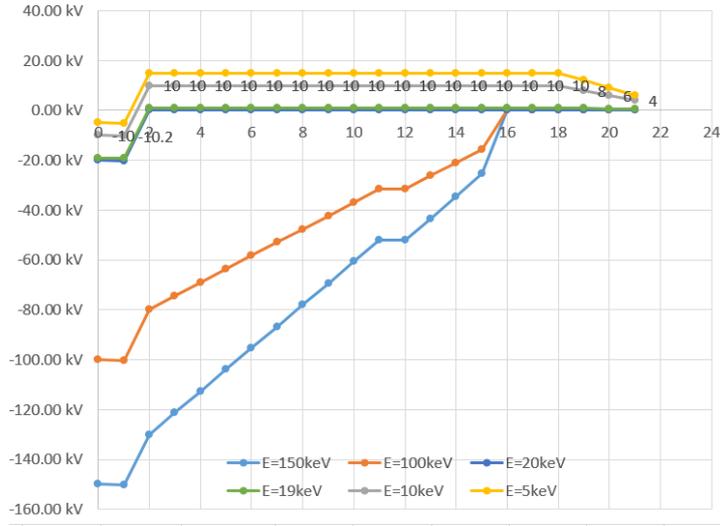


图2 束流引出能量和电极电位的设定

## 2.2 电子枪电场分布计算

该加速器采用大气绝缘方式的陶瓷加速管，其电场分布要满足真空部分和大气部分相应的绝缘水平。为模拟加速管处于真实场景中的情况，仿真时在右边缘设置一层PML用于模拟无限远处的电场分布，其电场分布如下图3所示。

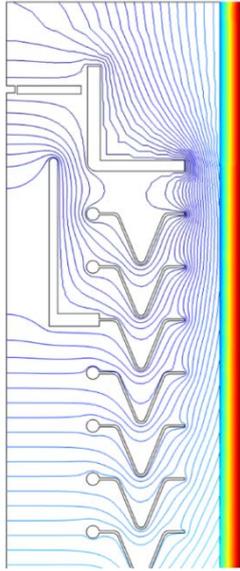


图3 加速器电场分布

## 3 电子束的流强调节

### 3.1 流强调节原理

在输运线尺寸空间富裕的情况下，利用螺线管对带电粒子束的扩束作用以及可变孔径光阑对束流的拦截作用，可进一步对带电粒子源引出的流强进行逐级衰减和调节，满足更大量级之间流强的高精度调节。对于采用N级扩散拦截单元的输运线段，

第i级的衰减系数为 $A_i$ ，采用相同单元时总的衰减系数为A：

$$A = \prod_{i=1}^N A_i = \prod_{i=1}^N \left( \frac{r_i}{R_i} \right)^2 = \prod_{i=1}^N \left( \frac{r_i L_s}{r_{i-1} L} \right)^2 \quad (1)$$

其中 $r_i$ 表示i级扩束拦截单元的可变孔径光阑半径， $R_i$ 为带电粒子通过第i级扩束拦截单元的螺线管发散后在第i级扩束拦截单元的出口平面投影的半径， $L_s$ 为扩束拦截单元螺线管长度的一半， $L$ 为相邻的两个扩束拦截单元螺线管的距离。每一级的衰减系数可以通过改变螺线管焦距 $f$ 获得调整：

$$f = \frac{4[B\rho]^2}{B^2 l} \quad (2)$$

其中 $[B\rho]$ 表示动量为 $p$ 、电荷为 $q$ 的粒子的磁刚度，由粒子的属性决定， $l$ 表示该螺线管的有效长度， $B$ 为螺线管产生的峰值磁场， $B = \mu_0 n I$ ，经过推导可得：

$$A_i = \left[ \frac{r_i}{r_{i-1}} \frac{1}{(L + L_s) L_s \frac{\mu_0^2 n_i^2 \eta_i}{4[B\rho]^2} I_i^2 - 1} \right]^2 = \left[ \frac{r_i}{r_{i-1}} \frac{1}{M_i I_i^2 - 1} \right]^2 \quad (3)$$

其中 $M_i = (L + L_s) L_s \frac{\mu_0^2 n_i^2 \eta_i}{4[B\rho]^2}$  可视为常量，(3)式中

可以看到，通过调节每级孔径的相对变化和螺线管的工作电流大小，可以对该级的衰减系数做相应调整。

### 3.2 流强调节的仿真结果

该加速器采用 2 级串接扩展拦截单元，总衰减系数  $A=A_1A_2$ ，其仿真的结果如下图 4 所示：

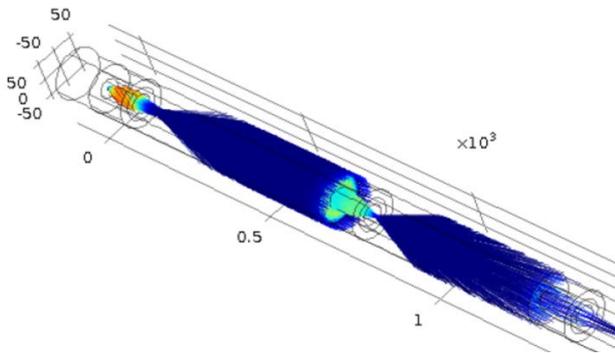


图 4 流强调节的粒子仿真计算结果

### 4 结语

降能输出过程中，包括 200 kV 主电源在内的关键部件以减速电源的输出电位为地电位，意味着加速电源需要处于至少 50 kV 的隔离状态。给加速器

系统的建造带来一定的复杂性，但可以避免束流辐照的靶端处于高电位，这有利于开展相关实验。另一方面，该加速器的设计是针对电子束，但是对离子束的情况也可以采取类似的设计获得相应能区和流强的束流。

### 参考文献

- 1 封国宝,崔万照,刘纯亮,等. 空间电子辐照介质材料带电效应研究进展[J]. 空间电子技术, 2018, **15**(1): 1-8
- 2 FENG Guobao, CUI Wanzhao, LIU Chunliang, et al. Research Progress in Charging Effects of Dielectric Due to Space Electron Beam Irradiation[J]. Space Electronic Technology, 2018, **15**(1): 1-8
- 3 何子锋, 欧阳联华, 李德明, 带电粒子束的流强调节装置: 中国, 201711003720.3
- 4 何子锋, 欧阳联华, 李德明, 杨永金, 吴新时, 张金玲, 黄建鸣, 郭洪雷, 刘永好, 王胜利, 苏海军, 带电粒子加速装置: 中国, 201810988935.3

# 7 MeV 医用质子直线注入器的研制

应用加速器技术部，谢修瑾

## 上海先进质子治疗示范装置

上海先进质子治疗示范装置（Advanced Proton Therapy Facility, APTRON）坐落于嘉定区瑞金北院质子中心，是由中国科学院上海应用物理研究所承建的国产首台质子治疗示范装置。加速器部分由质子直线注入器和周长为 24.6 m 的质子同步加速器组成，可提供 70-250 MeV 能量区间的质子束流。在加速器末端设有一个眼束线和实验束治疗室、一个固定束治疗室和三个旋转束治疗室，如图 1 所示。



图 1 上海先进质子治癌示范装置总体布局图

出于项目进度的考虑，APTRON 使用了来自美国 ACCSYS 公司的 7 MeV 直线注入器，如图 2。该注入器由离子源、射频四极加速器(Radio Frequency Quadrupole)、 Alvarez 型漂移管直线加速器(Drift Tube Linac)、功率源系统和控制系统等组成<sup>[1]</sup>。



图 2 进口自美国 ACCSYS 公司的直线注入器

## 30 keV ECR 离子源

国产质子直线注入器采用 ECR 离子源，使用一套 2.45 GHz 微波功率源作为离子源的激励源。在离子源出口处依次设有抑制电极、地电极、第一透镜、踢束器、导向电极、第二电极和电子阱，将 30keV 的质子束引向 RFQ 的入口，其外观如图 3 所示。



图 3 ECR 离子源

## 3MeV RFQ 加速器

RFQ 是将由质子源产生的直流质子束实现聚束、聚焦和加速的加速结构，利用 RFQGen 软件对 RFQ 的束流动力学进行了设计，并用 TraceWin 软件进行了模拟。其主要参数变化和束流动力学结果如图 4 所示。

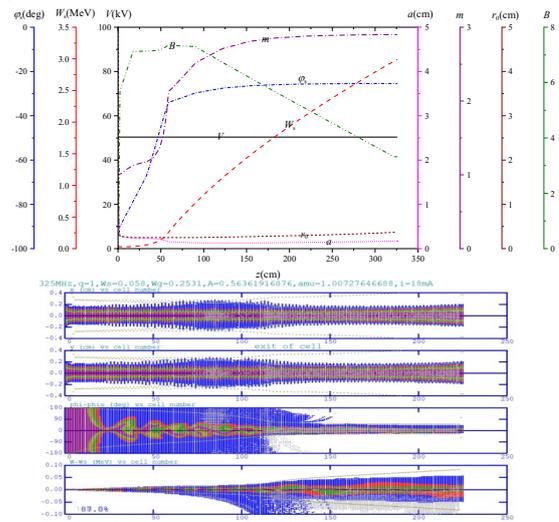


图 4 RFQ 主要参数变化和束流动力学结果

## APF 型漂移管加速器

交变相位聚焦原理是由 I. M. Kapchinsky 在 1970 年代提出，其主要思想是在 DTL 加速器轴向设置一系列同步相位交替正负变化的加速单元。由于负同步相位提供纵向聚焦和横向散焦作用，正同步相位提供纵向散焦和横向聚焦作用，使得该种加速器在无聚焦元件的条件下获得类似于交变梯度聚焦作用，提供束团在横向和纵向运动的稳定条件。

由于 APF 原理的本身特征，其相位变化规律对束流的聚焦和加速至关重要。我们参考了日本 Y.Iwata 的相位变化公式<sup>[2]</sup>，利用 BEAMPATH 开源代码，自主开发了 APF 优化算法和设计程序，完成

了 APF 型加速器的物理设计和误差分析。在物理设计的基础上，我们又完成了电磁设计和机械设计，已加工完成。其机械设计图如图 5 所示。

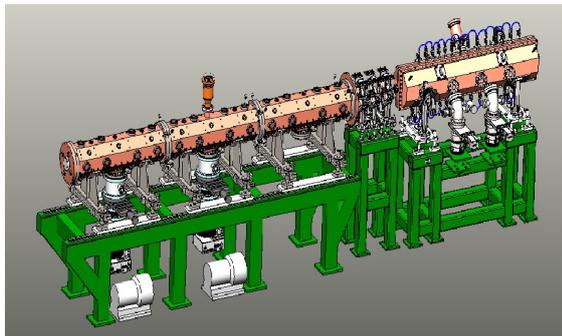


图 5 国产质子直线注入器机械设计图

通过对腔体的冷测，我们得到了 APF 加速器的纵向场分布<sup>[3-4]</sup>，经过计算研究，确认腔体的频率和场分布满足动力学要求，如图 6 所示。与传统的 Alvarez 型 DTL 相比，APF 型 DTL 在结构上更紧凑；同时，由于省去了复杂困难的磁中心准直工艺，显著降低了制造成本，有助于质子治疗装置的产业化和普及化。

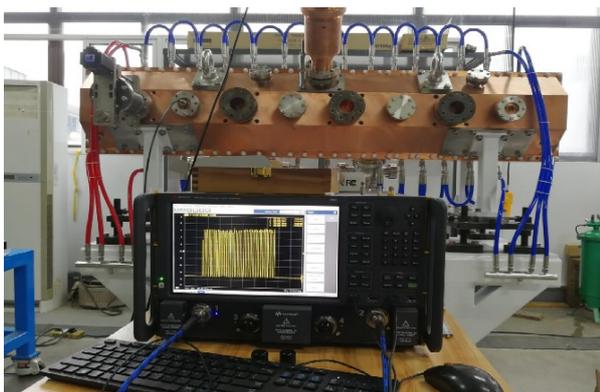


图 6 APF 型 DTL 腔体冷测与纵向电场分布图

## 束流测量系统

为了测量质子直线注入器的流强、能量和发射度，我们设计了一套束流测量系统。利用 ACCT 测量束流的流强，并同时采用了双狭缝和变聚焦法测量束流的发射度，采用二极铁狭缝法测量束流的能量和分布。束流测量系统的束流包络计算结果和机械设计如图 7 所示。

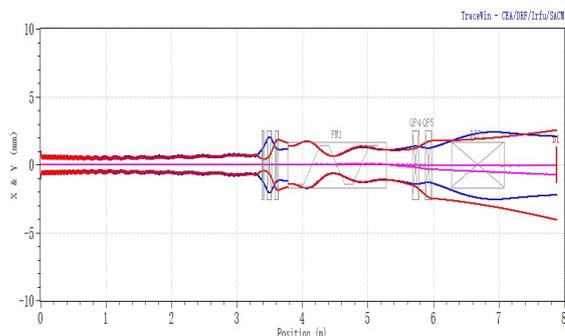


图 7 束流测量系统物理设计与机械设计

## 结语

质子直线注入器除束测系统以外均已完成加工，目前正在紧张的调试之中。预计在 2021 年内出束。

## 参考文献

- 1 T. P. Wangler, RF Linear Accelerator [M]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008
- 2 Y. Iwata, S. Yamada, T. Murakami, *et al.*, Alternating-phase-focused IH-DTL for an injector of heavy-ion medical accelerators. Nucl. Instrum. Meth. A, 2006, **569**: 685-696
- 3 X. C. Xie, Y. H. Pu, F. Yang, *et al.*, Design of a 7-MeV APF DTL with robust considerations, Nucl. Instrum. Meth. A, 2018, **908**: 49-59
- 4 X. C. Xie, Y. H. Pu, J. Qiao, *et al.*, The 7-MeV APF DTL for proton therapy, 29<sup>th</sup> Linear Accelerator Conf.

# 哈工大 1.2 MeV/10 mA 电子加速器控制系统设计

应用加速器技术部, 苏海军 郭洪雷 张金玲 李正

哈尔滨工业大学“空间环境地面模拟装置”是国家“十二五”重点规划项目, 我所应用加速器技术部为其中的综合辐照平台提供三台电子加速器的设计和制造任务。这三台加速器是为大科学装置提供电子束辐照源, 为了实现多种辐照要求, 提出了许多新的要求, 比如增加了较长的束运线, 辐照仓跟加速器的真空系统是连通的, 电子束流强范围大等, 这些要求在原来的地那米加速器系统中均没有涉及, 因此给物理设计提出了新的要求, 控制系统也做了重新设计。下面介绍其中一台 1.2MeV/10mA 电子加速器的控制系统。

## 1 控制系统设计要求

综合辐照平台中的几台加速器, 都是不同公司或研究所参与设计和制造, 所以没有统一控制系统, 但提出了需要具备 OPC 和 Modbus 协议接口, 以满足将加速器数据上传到上层系统的需求。

综合整个大科学装置系统的功能和需求, 这里采用基于 Windows 系统的 WinCC 软件, 它具有分布式、开放、易扩充、多平台等特点, 具有 OPC 协议接口, 可以非常方便地接入空间环境地面模拟装置的控制系统; 同时支持 Modbus TCP 协议, 以满足用户使用 Modbus TCP 接口获取本系统的相关运行参数, 并实施相关控制指令。

按照本加速器的各个分系统的划分, 控制系统主要实现以下任务:

- 高频子系统。包括重要器件的连锁保护信号, 电压、电流和频率测量信号, 执行器件的开关信号等。
- 校正磁铁的电源。包括束运线上的聚焦电源和导向电源的参数监测和参数设置等。
- 真空系统。包括机械泵、分子泵、离子泵的开关控制, 真空度的测量等。
- 电子枪系统。包括对灯丝电流的控制和对束流大小的调节策略等。
- 束测系统装置。包括 Profile 和法拉第筒的测量和控制等。
- 钢筒内部连锁和测量。包括关键器件的冷却连锁保护, 打火连锁保护等。

## 2 控制系统网络

该系统的分布式控制基本结构如图 1 所示, 分为两级:

第一级: 操作员接口计算机, 安装在中控室, 有加速器运行人员负责操作。

第二级: 设备控制器, 安装在加速器设备大厅内, 通过局域网进行信息通讯, 由主站 PLC-1 负责统一控制。

根据现场的网络需求, 这台加速器只分配到 2 个 IP 地址。为了能够利用好这两个 IP 地址, 其中 1 个 IP 分给控制室的监控电脑, 另一个 IP 分给设备厅内的路由器, 所有现场控制器均在这个路由器扩展的局域网内实现控制。设备厅内的网络是光纤接入, 因此路由器的 WAN 选择光纤接入, LAN 选择 RJ45。

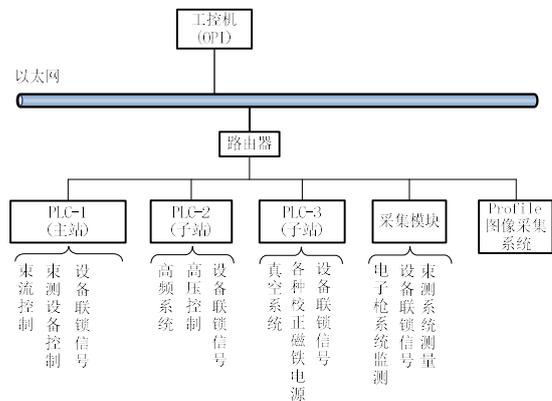


图 1 加速器控制系统基本结构图

在路由器下面, 设有三个 PLC, 三个采集模块, 两个工业相机, 它们都通过网线连接到路由器。因为工业相机对网络的要求较高, 这里选用工业级的千兆路由器。

### (1) PLC-1:

作为主控制器, 负责设备连锁、束测设备控制、束流和高压控制等功能, 并将其他子站和采集器的数据汇总过来, 一起上传中央控制器的监控电脑。

### (2) PLC-2:

作为一个子站, 主要负责对高频机的控制, 其中包括高压闭环控制、高频机的连锁检测等。

### (3) PLC-3:

作为一个子站, 主要负责真空系统、束运线上的校正磁铁电源等的控制和监测。

### (4) 采集模块:

这里选择采集模块, 主要负责法拉第筒和荧光靶的控制, 通过 Modbus TCP 与 PLC-1 进行通信。

## 3 电子枪子系统控制

为了满足电子加速器的宽范围出束要求, 不再

采用原来的电位器调节方式。新的电子枪系统，采用发电机供电，通过整流、逆变等一系列处理后，为电子枪系统上的所有器件供电。

电子枪系统包括电动机、发电机、整流及 DC/DC、逆变器、灯丝电源、栅极电源、灯丝变压器和灯丝等设备，除了电动机外，其他设备均位于高压端。为了能够控制这些对象，这里采用光纤的方式，在满足了隔离高压的同时，把控制信号传递到高压端。

电子枪的控制对象图见图 2。发电机输出端经过整流和 DC/DC 模块，为栅极电源和采集模块供电；经过逆变器，输出 AC220V，为灯丝电源供电。PLC-1 通过光纤跟高压端的采集模块进行通信。PLC-1 通过光纤，获得栅控电源的电压输出值和灯丝电源的电流输出值；也可以通过光纤，改变栅控电源的电压值和灯丝电源的电流值，进而对束流进行调节。

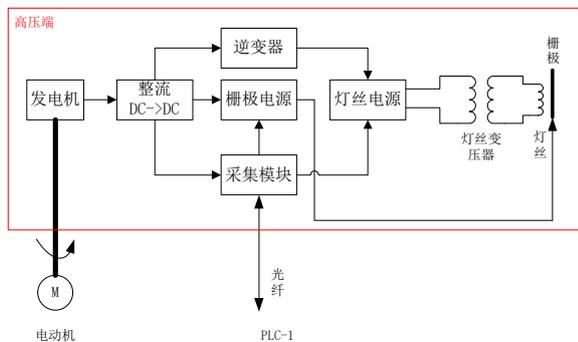


图 2 电子枪的控制对象图

#### 4 Profile 子系统

本加速器有比较长的束运线，且有一个 45 度的偏转，因此在两个直线段上分别布置了 Profile，用来探测束斑的大小和中心位置。考虑到使用现场提供压缩空气，这里选用气缸来推动荧光靶上下移动，并设有上、下限位开关，这样能够保证荧光靶准确移动到指定位置。

对束斑进行拍照，需要选择工业相机，并能够通过网络传输到监控电脑上。这里选用海康威视的工业相机，能够观看视频，对指定图像进行拍摄，还能进行许多图像水印标记，操作非常方便。

针对控制系统的需要，利用 Java 编写了一个程序，实现了以下功能：

- (1) 观看相机传输上来的实时图像；
- (2) 抓取指定的图片；
- (3) 在图片加上水印刻度，用来测量束斑的中心和大小。

#### 5 结论

以上几个系统的设计，都是为了满足综合辐照平台需求而重新设计的，均不同于地那米加速器原控制系统。在实验室测试环境下，已经实现了基本功能。期待在后续的现场，能够跟加速器其他子系统一起调试，实现既定的功能。

#### 参考文献

- 1 1 V/10 mA 电子加速器技术开发合同。
- 2 1 MeV/10 mA 加速器控制系统初步设计方案。

# 在线低能电子束辐照灭菌装置

应用加速器技术部, 何子锋 林作康 李林繁 周大勇 杨永金 黄建鸣 蒋海青 王永其

该项目的目标为研究电子束辐照对医用口罩过滤效率、灭菌效果及材料性能的影响, 以此优化电子束能量、流强等参数, 研制用于口罩生产过程在线灭菌的电子辐照灭菌装置, 并在生产线上建立示范装置。根据研究目标, 项目组在工程研发中围绕核心的应用指标, 如传输速度、吸收剂量以及剂量不均匀度等开展研究设计并完成装置的加工和调试。

## 剂量研究及整体设计

项目组利用本所现有的β辐照平台测试电子束对口罩样品的辐照效应, 测量口罩经不同能量和流强的电子束辐照后的吸收剂量。剂量研究中采用E-scan 丙氨酸剂量读出器和布鲁克丙氨酸薄膜剂量计, 其准确性和有效性已经得到中国计量科学研究所的认证。

该装置总体方案如图1所示, 其核心部件包括加速器系统, 屏蔽系统, 束下传输系统以及控制系统, 各系统相应的部件封装在一个方形包壳内形成一个自屏蔽装置。需要加工的物体, 经过传输带入口, 进入射线消杀处理区域, 再从传输带出口送出即完成工艺所要求的累积剂量, 满足消杀要求。

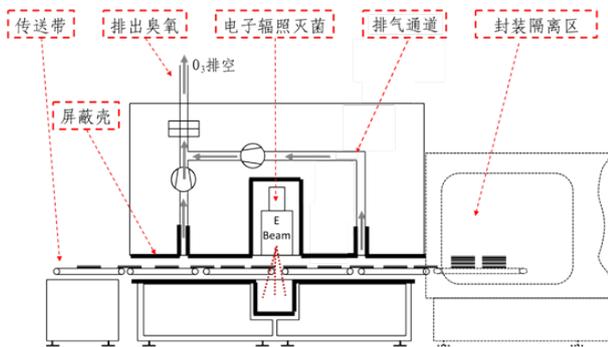


图1 低能电子束辐照灭菌装置总体方案

## 加速器系统

加速器输出指标为50-200 keV/20 mA, 其关键系统如高压发生器、电子枪、扫描引出部件如图2所示。电子束发生器采用直流高压型电子加速器, 扫描式结构, 加速电压为50-200 kV。高压通过高压电缆馈入真空腔体, 加速器为双电极结构, 通过控制阴极温度(2600°C-2900°C)控制流强, 调节阳极后端线圈控制整个束流光路和束斑大小, 经扫描拓宽后引出。引出束流50-200 keV/20 mA, 扫描宽度400 mm, 由1台输出功率5 kW的高压电源供电, 加速器运行真空为 $10^{-4}$ Pa, 配480 L/h的循环水冷机。

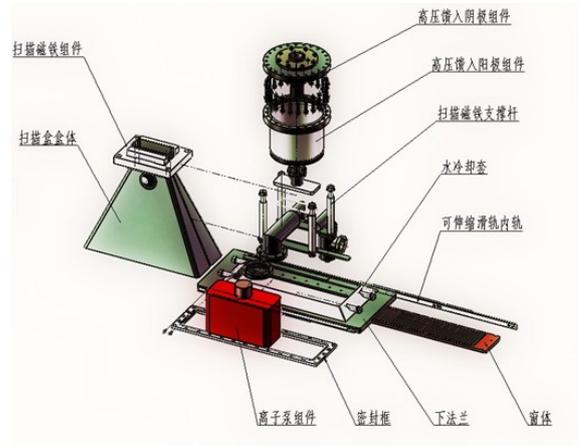


图2 加速器设计图

## 屏蔽体

屏蔽体的设计(图3)针对电子能量为200 KeV的单能电子, 束流功率为4 kW, 转化为束流强度为 $1.25 \times 10^{17}$  e/s。其主要包括两部分, 一部分是电子束流方向所在区域, 包括屏蔽箱体, 屏蔽门、垃圾桶、加速器支撑架, 整体尺寸是一个长宽高为1m×1m×2m的长方体; 另一部分是传送装置所在的辐照区域, 是一个凸形的通道结构, 通道宽度为0.7 m, 通道高度为0.54 m。通道底部距离地面高度约为0.5 m 采用支架支撑, 其内部增加X射线吸收挡板。

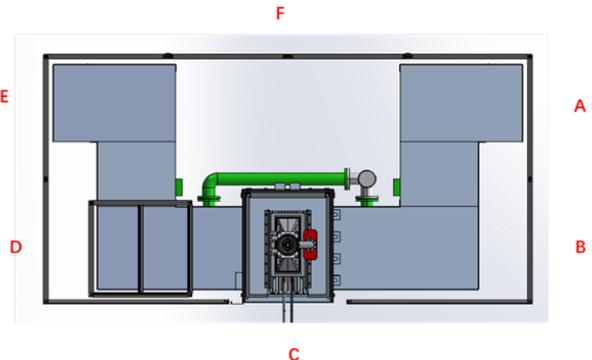


图3 屏蔽效果测试点

隧道屏蔽材料主要是铅和不锈钢。综合考虑屏蔽和支撑强度, 选择厚度为4 mm 不锈钢基壳内部包铅块的结构。铅块厚度根据安全分析来确定, 从5 mm 到20 mm 不等。通道内都是0.5 cm 厚的铅挡板。束流垃圾桶内部挡板非常密集, 垃圾桶与挡板一样高, 四周用钢柱支撑顶部的加速器。垃圾桶两侧各有一个涵洞作为通风管道, 涵洞是用2 cm 厚的铅板。据计算和测量的实际结果, 屏蔽体外部以及通道进出口10 cm 远处的辐射剂量都低于1 μSv/h。

表 1 测试点剂量测试结果

束功率	A	B	C	D	E	F
180 keV/20mA	0.29	0.26	0.45	0.34	0.25	0.11
200 keV/10 mA	0.20	0.21	0.32	0.19	0.31	0.11

传送装置

传送装置如图 4 所示，由皮带、转弯机和不锈钢网带组成，共包含四个皮带、四个转弯机和一个不锈钢网带。由于转弯机器与皮带之间无法完全做到无缝对接，存在 4~5 cm 的缝隙，我们使用不锈钢过渡板防止口罩被缝隙卡住。



图 4 传送带设计图

每个传送带安装独立电机，电机功率 200 W。安装位置在传送带底部中间，确保每个传送带都有足够空间安装在通道槽中央位置，使用齿轮带动。安装钢丝网传送带时候，需要先把传送带板面穿过垃圾桶上方窗口再安装支架。传送带速度可调，调节范围为 0.25 m/s~0.5 m/s，使用变频器来进行调节，使用 TGATL 爱德利变频器 (A-SHBA-BCDA03)。由于电机功率较小，并且传输物品几乎没有重量，每个变频器可以控制三台电机，共用三个同样型号变频器，分别沿着顺序来控制，也即皮带-转弯机-皮带-转弯机-网带-转弯机-皮带-转弯机-皮带共三组信号，最终变频器给控制柜三个 RS485 接口，一个电源线。

控制系统

在线低能电子束辐照灭菌装置控制系统的主要功能包括：对高压电源、扫描电源、电子枪灯丝、束下传输设备等主要设备的运行参数的监控，装置的中关键位置的温度监测，冷却水流量监测，设备灭菌的过程控制以及对相关设备的安全连锁。其控制需求及相互关系如图 5 所示。

该设备布局紧凑，控制信号集中；核心设备电子枪工作电压为 30 kV~225 kV；装置在进行生产工作中需要关注操作人员人身安全和设备安全运行，这对控制流程设计中的安全连锁也提出了很高的要求，出现危及人身安全和设备安全的情况设置了相应的安全连锁处理流程。

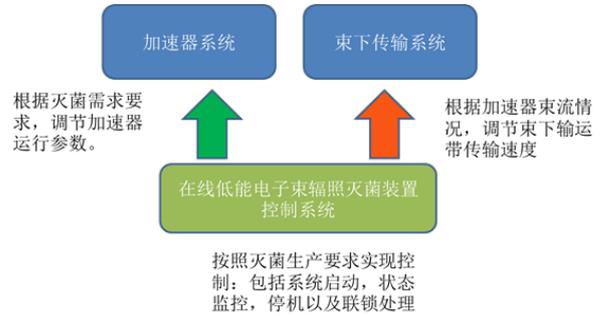


图 5 在线低能电子束辐照灭菌装置控制系统控制需求

运行效果及验收情况

实际检测评估了口罩通过装置时吸收剂量。利用胶带将丙氨酸剂量计固定于口罩表面，在线低能电子束辐照灭菌装置平稳运行状态时，将附有剂量计的口罩置于束下传送带上，随着传送带的运行，批次通过辐照区域，得到辐照后剂量测试数据如表 2 所示。结果表明当在线低能电子束辐照灭菌装置加速器能量为 180 keV，束流为 10 mA，束下传送带运行速度为 0.25 m/s 时，口罩样品通过辐照区域，测量剂量为 35 kGy。各批次吸收剂量的均匀度和处理速度满足项目要求指标。

表 2 SINAP 低能电子束灭菌装置参数

序号	性能指标	参数
1	电子束能量	50-200 keV
2	电子束流强	DC20mA
3	扫描宽度	≥400mm
4	装置表面 10 cm 处剂量率	≤1.0 μSv/h
5	总功耗	不高于 20 kW
6	连续运行时间	正常运行不少于 5 天。
7	工作温度	10 至 40 °C
8	工作湿度	20 至 50%RH
9	处理速度	≥200 pcs/min
10	吸收剂量	35.8 kGy/s
11	剂量不均匀度	±4.7%

## 参考文献

- 1 在线低能电子束辐照灭菌装置辐照试验剂量测试报告，李林繁，蒋海青，2020-12-28
- 2 在线低能电子束辐照灭菌装置物理设计方案，何子锋，2020-06-30
- 3 电子辐照消毒装置屏蔽体及束下装置设计报告，林作康，2020-08-27
- 4 在线低能电子束辐照装置控制系统方案，周大勇，2020-06-30

# 加速器运行组加速器运行情况与用户工作

应用加速器技术部，邓琦 王永其 曹建清 王胜利

## 1 加速器运行组介绍

随中国科学院《“率先行动”计划》的推进，上海光源成为建设中科院上海大科学中心的重要组成部分，其装置及团队已从我所分离出去。为重新整合和部署我所加速器力量，持续推进加速器学科建设，成立了加速器运行组，将所内现有在运行的多台加速器进行统一运行管理。目前在运行的加速器主要有 4MV 静电加速器和 100KV 同位素分离器。另外还有 10MeV 皮秒+20MeV 飞秒电子直线加速器目前已基本停止运行，基本处于真空保护状态。

4MV 静电加速器是上世纪八十年代，我所为发展核科学与核分析技术，从美国静电公司(NEC)引进的，可以加速质子， $\text{He}^+$ 离子， $\text{Ne}^+$ 离子， $\text{Ar}^+$ 离子， $\text{Kr}^+$ 离子， $\text{Xe}^+$ 离子等各种离子到几个 MeV 的能量。当初引进时用来做卢瑟福背散射(RBS)，质子激发 X/γ 射线荧光分析(PIXE/PIGE)，低能核反应分析等各种核分析技术的研究和应用。4 MV 加速器运行至今，为我所核科学技术的发展做出了不小的贡献。

钍基熔盐堆核能系统(TMSR)研究开始之后，为进行核反应堆结构材料的抗中子辐照性能研究，开始使用 4MV 加速器提供的 MeV 级能量离子束来辐照核材料。离子辐照因为入射带电离子能与靶材料原子发生库仑作用，可以比中子更快地造成辐照损伤<sup>[1]</sup>，从而缩短实验时间。用离子辐照模拟中子辐照损伤也是国际上做核材料抗中子辐照性能研究的通行做法。

100 KV 同位素分离器是我所自主研发的实验室型电磁同位素分离器，兼做离子注机使用。由于

百千伏级高压平台可以暴露在大气中，采用距离隔离即可，受空间尺寸影响较小，因此配备了一台灵活性较大的离子源，可以产生几乎所有元素的离子。1992 年建成以来，运行近 30 年，在离子溅射、离子注入材料改性、离子辐照，以及碳纳米材料研究等领域发挥了重要作用，并取得了一批研究成果。TMSR 项目开始之后，也用于核材料的离子辐照。100KV 加速器的特点和优势是可以提供的元素种类十分丰富，几乎包括所有元素，常用的有  $\text{Ni}^+$ ， $\text{Fe}^+$ ， $\text{C}^+$ ， $\text{Ag}^+$ ， $\text{Ti}^+$ 等等。

2019 到 2020 年度，4MV 静电加速器和 100KV 同位素分离器的主要运行任务就是为核材料的抗中子辐照性能研究提供满足要求的 MeV 级和百 KeV 级能量的离子束，同时兼顾其他高校和科研院所的离子束应用研究。

## 2 加速器运行情况

本周期内 4MV 加速器共有效运行约两千小时，除了为所内核能材料离子束辐照效应研究提供机时外，还为清华大学，上海大学，上海理工大学，安徽光机所等几家所外单位提供了机时。由于加速器的平稳有效运行，加速器运行机组获得了中国科学院上海材料与制造大型仪器区域中心颁发的本年度“先进机组”称号。

4MV 加速器包含加速器主体和五条束线(图 1)，是涵盖了真空，高压，电子学，电磁场与机械制造等多个学科的一台综合性中大型科学仪器。加速器的日常运行与维护工作涉及到各学科相关的方方面面知识。

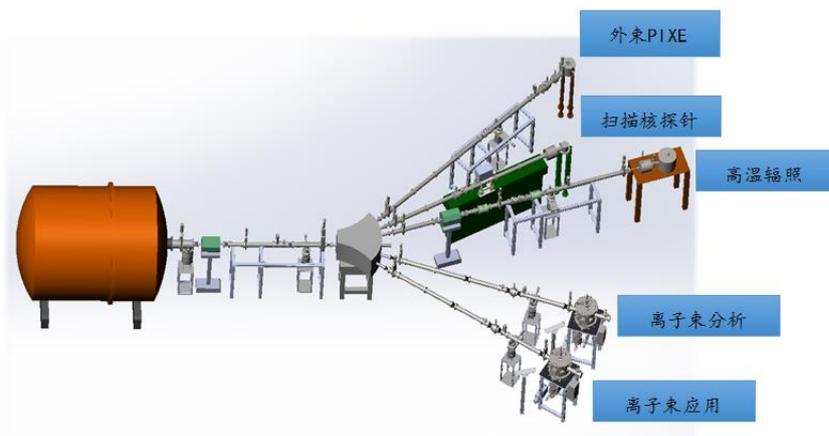


图 1 4 MV 加速器布局图

为保证加速器的正常运行，本年度进行了一系列的维护和故障排除工作，主要包括：平均每两个月更换一次离子源引出电极，并用氢氟酸清洗离子源放电管；输电链磨损，更换了新输电链（图2）；更换损坏的充电电压馈入电阻；为提升终端电压稳定度，更换了TPS系统高压放电针头等。100KV加速器在这一周期内共有效运行约一千六百小时，所内主要用户是堆材料与工程技术和熔盐部，所外主要用户有湖南大学，上海技术物理研究所，上海高等研究院和中国科学技术大学等。

对100KV加速器（图3）进行了一系列维护工作。更换了旧的离子源+25V/60A灯丝电源，采用全新的数字稳流电源，并用光纤进行远控。维修了损坏的分子泵电源。清洗离子源放电室和阳极绝缘环，更换损耗断裂的钨丝等等。

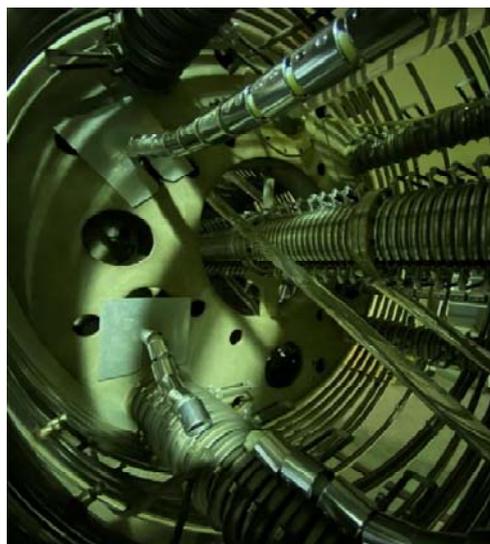


图2 4 MV 加速器内部输电链更换



图3 100 KV 加速器

### 3 用户工作

本年度利用4MV静电加速器的用户，进行的研究工作主要有以下这些：

(1) 反应堆用高温候选合金的 $\text{He}^+$ 离子辐照效应研究；

(2) 316L 不锈钢 $\text{He}^+$ 离子辐照效应研究；

(3) C-C 复合材料 $\text{He}^+$ 离子辐照效应研究；

(4) CDS 镍基合金 $\text{He}^+$ 离子辐照效应研究；

(5) Ni/Hastelloy X 复合板 $\text{He}^+$ 离子辐照效应研究；

(6) 安徽光机所荧光晶体材料 $\text{Ar}^+$ 离子辐照研究；

(7) 清华大学 SiC 单晶 $\text{He}^+/\text{H}^+$ 辐照研究；

(8) 上海理工大学 304L 不锈钢质子辐照研究；

(9) 上海大学 FeCuNiAl 材料 $\text{He}^+$ 辐照效应研究；

(10) 西北核技术研究所掺杂 Si 芯片 $\text{He}^+$ 离子辐照效应研究等等。

另外，利用离子束分析靶室（沟道效应）还进行了“基于晶格约束的新型聚变反应研究”。使用1 MeV左右能量的 $\text{D}^+$ 离子束沿晶轴方向入射到充氙的单晶钷中，测量D-D聚变反应参数。建立晶格约束聚变研究实验平台和关键参数（ $\epsilon$ 、 $\rho$ 、 $d$ 、 $\sigma_f$ ）的测量方法，构建带电粒子在晶体沟道中的运动学及聚变反应模型，研究沟道聚变增强效应的机制（图4）。

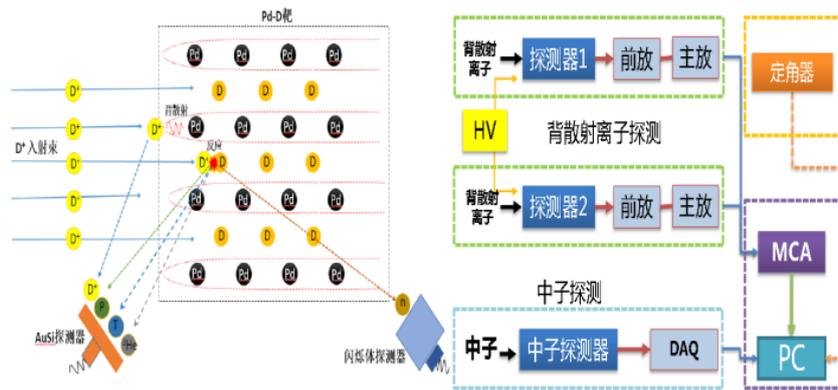


图4 沟道增强聚变效应探测原理图

在 100KV 加速器平台上进行的工作同样也是以核材料的离子辐照效应研究为主。同时还有纳米金刚石薄膜的制备方面的研究工作。利用该平台首次实现了高迁移率 n 型纳米金刚石薄膜的制备，迁移率较文献报道结果提高了 30 多倍。被国内外同行广泛应用于提高纳米金刚石薄膜的导电性能和场发射性能，引领和拓展了本领域的发展

(Carbon 159, 2020, 9)。

### 参考文献

- 1 郁金南, 核材料科学与工程: 材料辐照效应, 第 1 版 北京: 化学工业出版社

# 基于加速器的 BNCT 研究

应用加速器技术部, 何子锋 林作康 申淼 贾丽娜

硼中子俘获疗法 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) 是一种二元放疗靶向治癌的高新技术, 将与肿瘤有特异性亲合力的含  $^{10}\text{B}$  药物 (BSH/BPA) 注入患者体内, 以超热中子束照射肿瘤部位发生核反应杀死肿瘤细胞。限制 BNCT 发展的主要因素之一是前期研究利用的反应堆中子源难以大规模推广利用。目前 BNCT 的研究方向, 主要集中在研究经济性良好、易于大范围推广的基于加速器驱动中子源硼中子俘获治疗 (AB-BNCT)。项目组按研究内容划分四个子课题分别对 BNCT 中子学, 加速器, 中子靶及含硼靶向药开展研究。

## 中子学

中子学子课题利用 MCNPX 蒙卡程序, 通过对质子打靶的中子产额和能谱、中子靶能量沉积、确定了质子加速器能量、流强等参数。对几类不同的靶材可行性方案, 研究了锂靶成分对中子产额影响, 中子靶放射性活度及天然锂靶产氦分析, 为中子靶材选择提供理论依据。还开展了中子慢化体 BSA 研究, 并对 BNCT 癌症体模剂量开展分析研究, 同时利用白光中子源开展 BSA 材料组合慢化效果实验研究等。

通过模拟分析, 目前上海应用物理研究所设计 AB-BNCT 中子源拟选方案为 2.5 MeV 质子加速器, 输出质子轰击锂靶。该能量下, 单位流强质子产生的中子源强为:  $9.74 \times 10^{11}$  n/mA。入射质子束流半径 5 cm, 固态锂靶设计厚度 100  $\mu\text{m}$ , 液态锂靶设计液膜厚度 >200  $\mu\text{m}$ 。对于质子束流强 15 mA, 可产生强度为  $1.46 \times 10^{13}$  n/s 的中子源; 治疗过程中, 中子靶放射性活度最大值为  $1.44 \times 10^{13}$  Bq。

采用近似 FLUENTIAL 材料组合, 完成了 BSA 慢化体设计, 通过模拟分析获得了符合 IAEA 五项指标的治疗中子束。基于目前设计的 BSA 方案, 中子通过该慢化体后, 获得的输出治疗中子束品质指标参数如下表。所设计慢化体可以将前述质子打靶产生的中子束, 慢化成为可用于 BNCT 的超热中子束, 且慢化效果达到 IAEA 设定的治疗中子束品质要求的 5 项参数标准, 即 1-超热中子通量达标, 2-快中子剂量率达标, 3- $\gamma$  剂量率达标, 4-热中子率达标, 5-流强/通量比达标。

表 1 输出治疗束参数

治疗束参数	IAEA 指标值	目前方案值	是否达标
超热中子通量 (n/cm <sup>2</sup> /s)	$\geq 1\text{E}+09$	1.16E+09	是
快中子剂量率 (Gy·cm <sup>2</sup> /nepi)	$\leq 2\text{E}-13$	1.77E-13	是
gamma 剂量率 (Gy·cm <sup>2</sup> /nepi)	$\leq 2\text{E}-13$	9.60E-14	是
热中子/超热中子率	$\leq 0.05$	3.44E-03	是
单向流强/通量比	$\geq 0.7$	9.98E-01	是

## 加速器

加速器子课题在地那米电子加速器的基础上开展质子加速器技术研究。该型加速器 (图 1) 的高压发生器 (1.0-5.0 MV, 最大 120 kW) 能加速较大的束流 (>50mA), 电源主体利用了结构电容, 储能低, 固有的电压稳定性高, 具有优异电源特性。此外, 其结构简单, 体积较小, 建造和运维成本低, 国内大部分工业型辐照应用大多采用该型加速器, 具有较强的用户基础及接受度, 在应用推广上优势巨大。

开展工程研制的主要内容包括卧式 2.5 MV 高压发生器, 紧凑型强流微波离子源, 强流直流加速管。其 2.5 MV 高压发生器由单端固定梁结构支撑高压电极及相关部件组成, 为离子源及加速管提供电位, 加速粒子以形成大功率质子束。质子束引出后经过输配线到达各应用靶站, 按打靶需求形成高均匀度的打靶束斑截面。

加速器子课题对单端固定悬臂结构的应力应变及振动模式, 对强流离子束空间电荷效应作用下的束流动力学进行模拟计算。确定了卧式主体的机械固定结构为平行绝缘板框架, 该方案在端部 200 kg 载荷下, 端部垂直方向的位移小于 5 mm。建立了全尺寸的加速管参数化模型, 确定采用电位梯度改进型方案, 其长度确定为 2560 mm, 加速电压 2.5 MV, 流强输出为 15 mA 时, 加速管出口处束斑直径小于 20 mm。

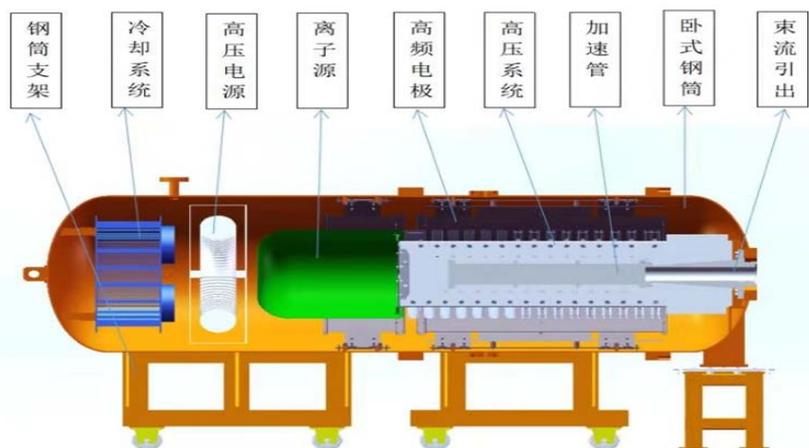


图 1 2.5MeV/DC15mA 大功率卧式质子加速器

## 靶的研究

中子靶子课题开展了液态锂靶的数值模拟及水模拟回路的研制，以及金属锂的制备工艺研究。

用于 2.5 MeV 质子束打靶的锂靶有固态锂靶和液态锂靶两种。其中固态锂靶一般通过真空沉积法在铜基体材料上沉积所需厚度的锂膜。一方面，由于离子效应，导致靶寿命较短和运行不稳定；另一方面，由于固态锂金属熔点低（180℃）、导热性差，必须设计高效冷却设备确保其运行温度低于锂的熔点，以防止锂膜融化和蒸发，避免  $^7\text{Be}$  同位素扩散、减少  $\gamma$  辐射污染。而流动的液态锂靶（图 2）可以解决这些问题，是较为理想的 BNCT 中子靶方案。采用 fluent 软件对喷嘴结构进行的模拟计算表明，为形成稳定液膜，喷嘴曲率半径为 70 mm，液态锂模拟回路运行要求进口速度大于 1.2 m/s，最大温度范围是 270 - 340℃。但考虑到液态锂回路的运行温度在 200℃左右，直接设计高温回路成本和代价较大，而水在 20℃的运动粘度（ $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）与 225℃下锂的运动粘度（ $1.04 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）相当。我们设计了水流模拟回路，其测试段和水槽采用透明的丙烯酸树脂，便于直接观察水流形态。通过研究不同流速下液膜的形状，进而改进喷嘴结构和流速大小获得稳定液膜形成条件，从而获取液态锂回路设计经验和参数。Fluent 计算完成了液态锂靶模拟回路及关键设备喷嘴结构的设计和优化，通过实验证明所设计的喷嘴在一定流速范围内（ $0.43 \text{ m}^3/\text{h}$ ）可形成稳定液膜。

在锂制备方面，研究了  $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$  转化为  $\text{LiCl}$  工艺条件，通过  $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$  与盐酸反应结晶获得不含结晶水的  $\text{LiCl}$  产品，完成实验室电解制备克级金属锂装置设计及工艺参数研究。完成公斤级金属锂电解装置、尾气吸收系统搭建；完成锂电槽组装工作及电解锂实验室安全评审。



图 2 液态锂靶模拟回路

## 含硼药物

BNCT 技术有效实施的前体是现将含硼药物注入患者体内并在肿瘤内特异性浓集，故  $^{10}\text{B}$  药物是影响 BNCT 成败的关键要素之一。课题组开展临床试验常用药二羧硼基苯丙氨酸（BPA）的制备研究、新型含硼靶向药物的制备与生物效应评价研究以及含硼药物放射性标记与评价研究。

由于癌细胞摄取 L 构型的 BPA 高于 D 构型 BPA 或者 DL 构型的 BPA，目前临床上主要应用 L-BPA 进行癌症治疗。因此本研究主要建立 L-BPA 的制备技术。研究采用 B-11 替代昂贵的 B-10 建立 L-BPA

的制备方法（图 3）。纯化得到了各步反应的中间体和终产品，并完成了结构确证，为制备  $^{10}\text{B}$  BPA 奠定了工艺基础。

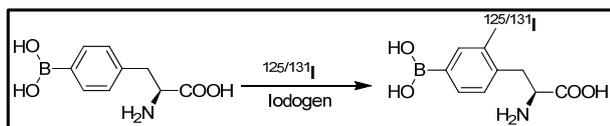


图 3  $^{125}\text{I}$ -BPA 标记方法

采用 Iodogen 氧化法制备了  $^{125}\text{I}$ -BPA，该法标记率和放化产率均较高。研究发现， $^{125}\text{I}$ -BPA 的标记随着 BPA 的浓度的降低而降低。当 BPA 高浓度时， $^{125}\text{I}$ -BPA 的标记率接近 100%，而低浓度的 BPA，会产生大量的游离碘， $^{125}\text{I}$ -BPA 的标记率较低。

该研究对  $^{125}\text{I}$ -BPA 进行了体外稳定性评价，在脑胶质瘤和肺癌动物模型上进行了 SPECT/CT 显像评价。

### 参考文献

- 1 中子靶物理设计报告，林作康，杨璞
- 2 含硼靶向药物研究报告，贾丽娜，刘春霞，李瑞芬，沈华
- 3 锂靶系统模拟回路设计报告，赵乾坤，申淼
- 4 BNCT 用高压加速管及输运线初设报告，何子锋
- 5 用于 BNCT 的大功率直流质子加速器卧式主体结构初步设计，杨永金

# 国产首台质子治疗装置中治疗计划系统的剂量验证

应用加速器技术部，孔海云

本文主要介绍国产首台质子治疗装置中治疗计划系统剂量验证的结果。按照“北京医疗器械检测所”的检测要求和“质子碳离子指导原则”对治疗计划系统的通过标准，我们测试了三种复杂程度的样例。测试结果表明，由固定治疗室模型计算的剂量分布与实际测量的剂量分布偏差均小于检测通过的标准。目前，固定束治疗室治疗计划系统已经通过检测。

## 1 国产首台质子治疗装置简介

由于质子的布拉格峰特性，质子治疗对保护除肿瘤外的正常组织有明显优势<sup>[1-4]</sup>。国产首台质子治疗装置采用自己研发的同步加速器，能量范围为 70 MeV-235 MeV，总共 94 个能量。共有四个治疗室，分别是固定束治疗室、眼束治疗室，180 度旋转治疗室和 360 度旋转治疗室。除了眼束治疗室采用双散射技术之外，其他治疗室都采用笔形束点扫描技术<sup>[5]</sup>。治疗过程中，由加速器切换不同的能量层。同一个能量层之间通过扫描磁铁控制照射点的位置。治疗头内的电离室控制照射的 MU 数(MU 对应质子数)，照射控制系统为自主研发，治疗室内安装了六维机器人治疗床和用于病人定位的激光和 X 光影像系统。肿瘤信息系统 OIS 采用医科达 MOSIAQ。质子治疗计划系统采用 RaySearch 公司的 Raystation 科研版。

质子治疗计划系统是医生和物理师根据病人肿瘤的 CT、MRI 等制定治疗方案的一个软件。对于我们“国产首台质子治疗装置”采用的质子笔形束点扫描治疗系统，治疗计划将给出照射野、治疗床角度、旋转机架角度、治疗需要采用的能量、照射点的权重和位置、病人摆放的位置、等中心位置等信息。治疗计划系统主要包括病人靶区勾画、计划优化、剂量引擎和剂量评估几个模块。计划优化部分通过不断迭代优化计算出最接近处方目标的照射方案，从而给出照射的能量、扫描点的位置和权重。剂量引擎即根据照射方案计算出剂量分布，包括质子笔形束算法和蒙卡算法。

我们需要给治疗计划系统 Raystation 建立和我们机器束流和治疗头相匹配的束流模型，才能够做治疗计划。并且，需要将治疗计划系统计算的剂量分布与实际测量的剂量分布进行对比，进行剂量验

证，二者偏差小于“北京医疗器械检测所”规定的范围才能通过验证，用于临床治疗。

我们固定治疗室已经采集了束流的 IDD 曲线，空气中不同位置的束斑和绝对剂量刻度等束流信息，输入了治疗头 snout 和治疗床等机器参数，建立了名为 RJH-SAPT-B 的模型。我们将用此模型做治疗计划，并在固定治疗室进行束流照射测量。

## 2 三个测试案例

根据“北京医疗器械检测所”的检测要求，本次测试包括简单复杂度、中等复杂度和高复杂度三种测试案例，分别用简单立方体水靶（包括低能 70.6MeV-143.5MeV 和高能 187.8MeV-235.0MeV 两个计划）、双楔形模体（中能 91.2MeV-181.8MeV）和半个头模（高能 166.6MeV-232.7MeV）三个案例进行测试。总共四个测试计划。这四个计划涵盖了我们机器的所有能量范围 70.6MeV-235MeV。这三种复杂度测试案例在固定治疗室的实际摆位如图 1 所示。



图 1 三种测试案例实际测量摆位（固定治疗室）

治疗计划采用 Raystation 10B 版本，分别对以上三种案例做四个治疗计划。每个治疗计划分别用质子笔形束算法和蒙卡算法进行剂量计算。并分别将这两种算法计算的剂量分布与实际测量值进行对比，验证这两种算法。

实际测量时，我们采用了 PTW 水箱、IBA 水箱、PTW 的电离室 Markus 测量束流深度方向的绝对剂量。束流深度方向每测量一个点的剂量结束之后，移动步进电机到下一个测量点，束流重新照射一遍，电离室 Markus 再测量该点的剂量。对于横向（垂直于束流方向），剂量采用 IBA 水箱和 MartriXX 点阵电离室测量。由于是点阵电离室，束流照射一次即能完成横向剂量分布的测量。

### 3 治疗计划系统剂量验证通过标准

根据“质子碳离子指导原则”中对治疗计划系统的检测要求<sup>[6]</sup>。需要对三种复杂程度的案例进行测试，比较治疗计划的剂量和实际测量的剂量。不同复杂程度的案例误差通过标准不同。剂量分布曲线分为四个区域。如图 2 所示。每个区域允许的剂量误差范围也不同。

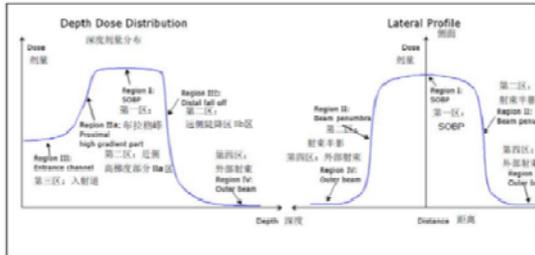


图 2 质子剂量分布曲线区域划分

我们需要分别测量和比较沿束流方向和垂直于束流方向的剂量分布。质子束流在靶区中的剂量分布是由不同能量的 IDD 曲线由不同权重叠加形成扩展的布拉格峰(spread-out Bragg peak, SOBP)<sup>[7]</sup>。SOBP 平坦区覆盖肿瘤处，使得肿瘤照射到均匀的剂量。SOBP 平坦区定义为第一区。深度方向剂量曲线后沿下降区域和横向剂量曲线半影区剂量下降非常快，曲线比较陡峭，这也是质子的特性和优势，这样可以最大程度的保护正常组织。深度方向剂量分布曲线前端上升和后端下降区域、横向剂量分布曲线的半影区定义为第二区。深度方向剂量分布曲线入射道处定义为第三区。剂量下降接近 0 的区域定义为第四区。

将照射采用最低能量的 IDD 曲线布拉格峰的位置对应到靶区前端。最低能量布拉格峰前沿剂量的 40% 对应深度位置定义为深度方向剂量曲线二区与入射道三分界点。将照射采用最高能量的 IDD 曲线布拉格峰的位置对应到靶区后端。最高能量布拉格峰后沿剂量 1% 对应的深度位置定义为深度方向剂量曲线二区与四区分界点。

根据“质子碳离子指导原则”的检测标准，我们将案例一简单立方体水靶（包括低能和高能两个水靶计划）定义为简单复杂度测试用例。由于双楔形板是由均匀介质 PMMA 制作而成，将水箱前面加双楔形板的测试案例定义为中等复杂度测试用例。由于半个头模由人体头部的仿真材料骨头和软组织构成，属于非均匀介质，因此将水箱前面加半个头模的测试案例定义为高复杂度测试用例。

表 1 给出了每个测试案例治疗计划与实际测量值之间的剂量误差百分比通过标准。表中的每个区

与图 2 中剂量分布曲线的每个区对应。我们对每个区域至少测量 3 个点，对每个区域计算剂量偏差的最大值和平均值。对于二区高剂量梯度区域，我们可以采用 DTA 准则。即相同剂量的位置偏差小于或等于 3mm 也算通过。

表 1 治疗计划和实际测量剂量偏差通过标准

TPS 计算剂量与实际测量剂量偏差	第一区	第二区	第三区	第四区
简单复杂度	任意点 $< \pm 5\%$ 平均值 $< 5\%$	任意点 $< \pm 10\%$ 或 DTA $< 2\text{mm}$	任意点 $< \pm 5\%$ 平均值 $< 5\%$	任意点 $< \pm 5\%$ 平均值 $< 5\%$
中等复杂度	任意点 $< \pm 5\%$ 平均值 $< 5\%$	任意点 $< \pm 15\%$ 或 DTA $< 3\text{mm}$	任意点 $< \pm 5\%$ 平均值 $< 5\%$	任意点 $< \pm 6\%$ 平均值 $< 5\%$
高复杂度	任意点 $< \pm 6\%$ 平均值 $< 5\%$	任意点 $< \pm 15\%$ 或 DTA $< 3\text{mm}$	任意点 $< \pm 6\%$ 平均值 $< 5\%$	任意点 $< \pm 7\%$ 平均值 $< 5\%$

### 4 治疗计划与实际测量对比

我们以低能水靶和双楔形板的测试案例为例，比较深度方向和横向治疗计划与实际测量的剂量分布曲线。

对于低能水靶的治疗计划，处方剂量设置为 200cGy，束流垂直于模体表面一个照射野。照射靶区为 10cm×10cm×10cm 的立方体。计划等中心位于水箱前表面。在固定治疗室实际摆位时，需要用激光灯将 PTW 水箱的前表面定位在等中心处，与治疗计划保持一致。

将 PTW 的 Markus 电离室放入水箱中，通过控制步进电机移动，使电离室 Markus 移动到水中不同深度位置来测量深度方向剂量分布曲线。由于测量值是物理剂量，治疗计划需要将处方生物剂量除以系数 1.1 转换成物理剂量，然后进行比较。治疗计划优化完成后，给出照射方案后，需要用蒙卡算法和质子笔形束算法分别计算剂量分布，两种算法分别与实际测量值进行对比验证。

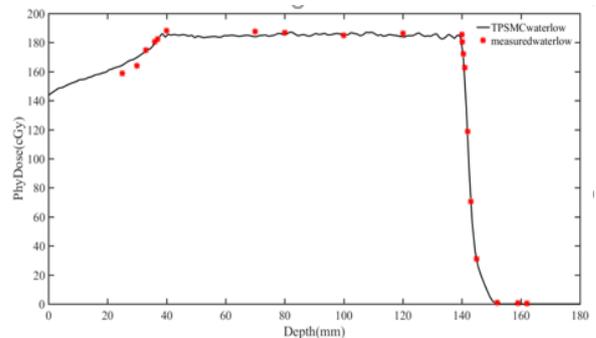


图 3 低能水靶深度方向蒙卡算法与实测剂量对比

如图 3 所示，黑色实线为治疗计划蒙卡 MC 算法计算得到的沿射野中心轴线的剂量分布曲线，红色点为 Markus 电离室实际测量值。从图中可以看出，二者符合地非常好，靶区剂量平均偏差为 1.66%，小

于检测要求的 $\pm 5\%$ 。其它各个区的剂量偏差均符合标准表 1 的要求。

垂直于束流方向，我们采用 IBA 水箱和 MartriXX 点阵电离室进行测量。MartriXX 点阵电离室测量得到的只是相对剂量分布。我们需要用 Markus 测量中心点的剂量来标定 MartriXX 点阵电离室，从而得到横向的绝对剂量值。如图 4 所示，黑色实线为治疗计划蒙卡 MC 算法计算得到的沿垂直于束流横向 Y 方向的剂量分布曲线，左右两侧剂量下降为半影。从图中可以看出，我们的机器束流半影比较小，这对保护肿瘤之外的正常组织比较有利。红色点为 MartriXX 点阵电离室测量得到的剂量值。二者也符合的非常好。所有区域的剂量偏差均符合通过标准表 1 的要求。

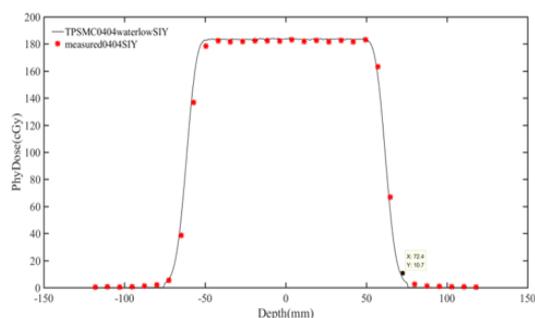


图 4 低能水靶横向 Y 方向蒙卡算法与实测剂量对比

对于双楔形板的案例，我们将楔形板固定在水箱前表面，使得束流穿过厚度不均匀的均匀介质 PMMA。治疗计划处方剂量设置为 200cGy，束流垂直于模体表面一个照射野。照射靶区为 10cm $\times$ 10cm $\times$ 10cm 的立方体。治疗计划分别用蒙卡算法和笔形束算法做剂量计算。

等中心位于距离水箱前表面 10cm 等效水深处。用激光灯对双楔形模体进行摆位，实际摆位需要与治疗计划中双楔形模体的 CT 扫描图像保持一致。还需要计算 10cm 等效水深对水箱的位置，然后用激光灯摆位，由于 IBA 的小水箱放在治疗床上，需要通过治疗床移动来精确定位水箱位置。

同样，我们用 PTW 的 Markus 电离室测量深度方向的剂量分布，用 MartriXX 点阵电离室测量垂直于束流横向的剂量分布。深度方向的治疗计划和测

量剂量分布对比见图 5，垂直于束流横向 Y 方向剂量分布对比见图 6。

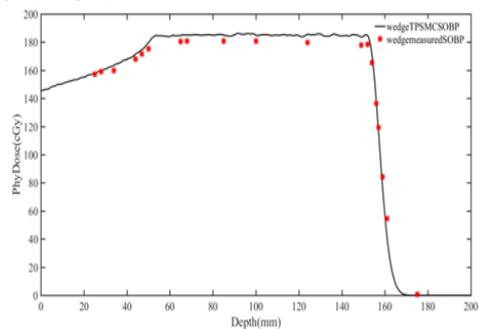


图 5 双楔形深度方向蒙卡算法与实测剂量对比

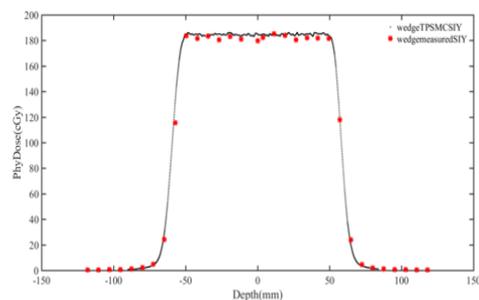


图 6 双楔形横向 Y 方向蒙卡算法与实测剂量对比

图 5 和图 6 中黑色线为治疗计划计算的剂量，红色点为测量剂量。从图中可以看出，双楔形板案例中深度方向的测量剂量略微比治疗计划剂量偏低一些，靶区治疗计划与测量剂量的平均偏差为 2.69%，小于检测要求 $\pm 5\%$ 。且其它各区剂量偏差都符合通过标准表 1 中的要求。

## 参考文献

- 1 St Clair WH, Adams JA, Bues M, *et al.* Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2004, **58**.
- 2 Mohan R, Grosshans D. Adv Drug Deliv Rev, 2017, **109**
- 3 Vogel J, Carmona R, Ainsley CG, *et al.* Neurosurgery. 2018, **84**
- 4 刘世耀，质子和重离子治疗及其装置，第一版，科学出版社，2012
- 5 H.Paganetti and T.Bortfeld. in New Technologies in Radiation Oncology, edited by T. B. W. Schlegel and A. L. Grosu ( Springer - Verlag, Berlin, 2006)
- 6 医疗器械检测标准国家/行业标准“质子碳离子指导原则”附录 IX 治疗计划系统要求
- 7 Harald Paganetti. Proton therapy physics. U.S:CRC Press. 2011: 2-2

# 热处理法去除退役核石墨中氚的理论实验研究

氟科学与工程部，邓珂 张钦 曾友石 楚鑫新 刘卫

核石墨是各类反应堆中重要的慢化、反射、结构材料。据 IAEA 统计，截止 2018 年全世界范围内有将近 20 万吨的退役核石墨需要处理<sup>[1,2]</sup>。此外，在高温气冷堆、熔盐堆等第四代反应堆中还将继续大量使用核石墨，因此核石墨的退役始终是反应堆退役工作中的一项重大问题。氚是核石墨比活度最高的核素，它易与环境中的含氢分子发生同位素交换，极易泄漏，因此氚是核石墨退役过程中需要急需去除的核素<sup>[3]</sup>。热处理法除氚的选择性高，二次污染少，可操作性强，是现阶段公认的效率最高的除氚方法<sup>[4]</sup>。本课题组将理论计算与实验结合，对石墨中氢同位素的吸附位置、解吸路径展开深入研究，旨在寻找石墨中所有氢的吸附位置，研究氢同位素在石墨中

的吸附与解吸机理，为核石墨除氚工艺的制定提供理论依据。

## 1 基于第一性原理的理论计算

课题组基于第一性原理计算了核石墨晶粒边缘上氢同位素的吸附位置<sup>[5,6]</sup>，结果如图 1 所示。理论模拟结果表明，石墨晶粒边缘上存在四种吸附位置：锯齿型边缘（ZZ）、扶手椅型边缘（AC）以及各自对应的重构结构（ZZR、ACR）。根据计算所得的解吸路径及对应的解吸能垒，我们计算出了位于石墨晶粒边缘的氢同位素的解吸温度，结果如表 1 所示。

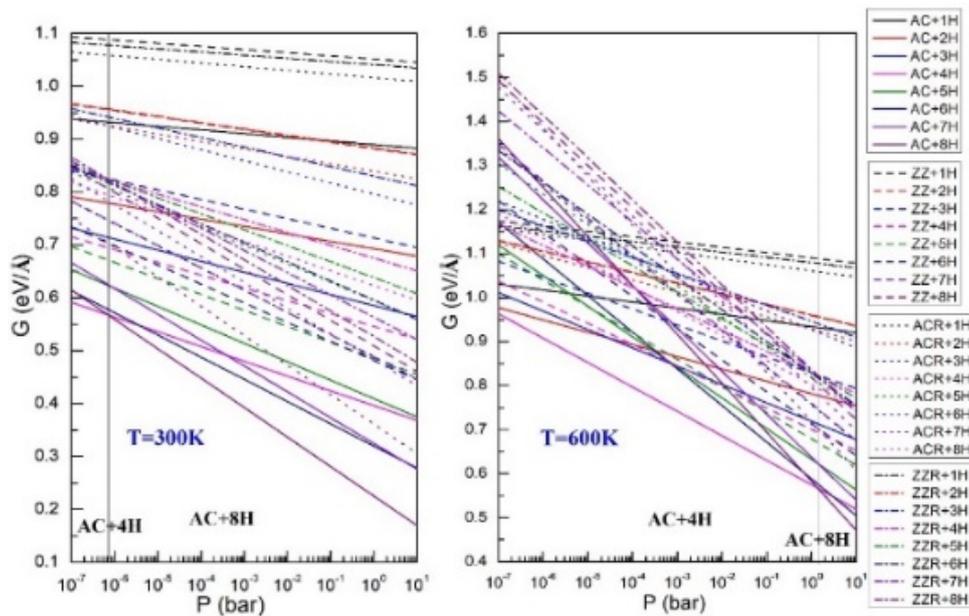


图 1 石墨晶粒边缘上氢同位素的吸附位置

表 1 石墨晶粒边缘氢同位素的解吸能垒及对应的解吸温度

吸附位置	解吸能垒 (eV)			对应的解吸温度 (°C)		
	H	D	T	H	D	T
AC	1.214	1.312	1.356	237	278	297
ACR	3.142	3.232	3.272	1047	1085	1102
ZZ	1.107	1.155	1.176	192	212	221
ZZR	3.102	3.104	3.105	1030	1031	1032

## 2 实验研究

课题组通过核石墨中氢同位素的吸附及解吸附实验验证了理论计算得到的结果。首先,我们自主研发了一套用于研究核石墨去污的实验装置及实验方法,保证了高温环境下氢同位素的精准测量。利用该套设备,探究了三种不同核石墨中氚的吸附及解吸附行为。氢同位素在核石墨中的吸附可分为稳定吸附与不稳定吸附两大类。不稳定吸附的氢同位素在吸附完之后可通过常温吹扫的方式被解吸出来,

因此这部分的氢同位素在核石墨储存、搬运的过程中有泄漏的风险。而稳定吸附的氢同位素则需要高温热处理来解吸,这部分的氢同位素需要在退役核石墨去污的过程中重点关注<sup>[6]</sup>。

通过核石墨中的氚的解吸实验,我们找到了至少四种主要解吸位置(图 2)。其中,3 号解吸位置对应了理论计算中找到的重构后的边缘上的吸附位置,且该位置解吸的氚的量最多,表明边缘重构后的结构上吸附的氢同位素最多。

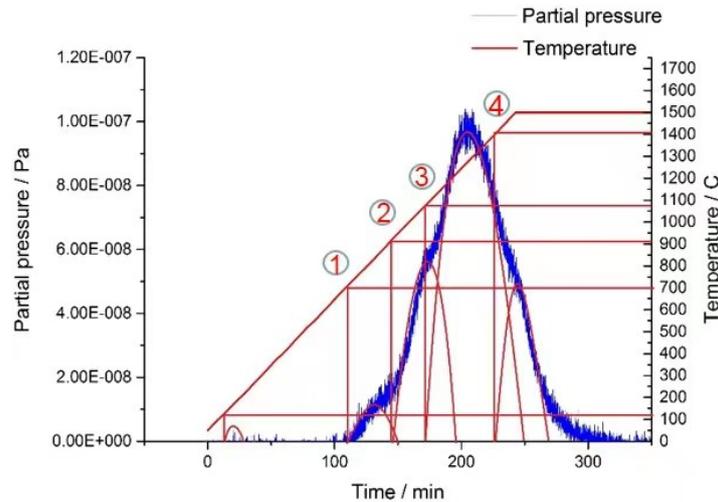


图 2 核石墨中氚的热解吸能谱 (TDS)

## 参考文献

- 1 Li J, Dunzik-Gouga ML, Wang J. Recent advances in the treatment of irradiated graphite: A review. ANN NUCL ENERGY, 2017, **110**: 140-147
- 2 IAEA. Characterization treatment and conditioning of radioactive graphite from decommissioning of nuclear reactor: IAEA-TECDOC-1521, 2006
- 3 Bushuev AV, Verzilov YM, Zubarev VN, Kachanovskii AE, Matveev OV, Proshin IM, et al. Quantitative determination of the amount of 3H and 14C in reactor graphite. ATOM ENERGY, 1992, **73**(6): 959-62
- 4 Li H, Yang C, Fang C, Feng B. Experimental study on the adsorption and desorption of tritium in the graphite materials for HTR-PM. PROG NUCL ENERG, 2015, **85**: 676-681
- 5 Wu XJ, Fei ZJ, Liu WG, Tan J, Wang GH, Xia DQ, et al. Adsorption and desorption of hydrogen on/from single-vacancy and double-vacancy graphenes. NUCL SCI TECH, 2019, **30**(4)
- 6 Deng K, Zhang M, Wu X, et al. Adsorption and Desorption of Tritium in Nuclear Graphite at 700°C: A Gas Chromatographic Study Using Hydrogen[J]. Nuclear technology, 2019, **205**(2): 1-11

# 钯银合金管分离熔盐堆尾气中的氙

氙科学与工程技术部, 黄豫 曾友石 张宁 吴胜伟 楚鑫新 刘卫

熔盐堆运行过程中产生的氙和  $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{133}\text{Xe}$  等气态放射性产物会随着吹扫气进入尾气处理系统<sup>[1-4]</sup>。为了分离和去除熔盐尾气中的氙, 可以利用钯银合金对氢同位素的选择渗透性来实现。

以钯银合金制成的钯银合金管为研究对象, 研究其分离熔盐堆尾气中的氙, 期望通过实验了解钯银合金管对氙的分离性能, 检验其在熔盐堆尾气环境下 (Ar 为载气) 对氙的分离纯化能力。由于氙的稳定同位素 H 的化学性质与其相似且不具有放射性、易操作, 考虑用  $\text{H}_2$  模拟氙。然后利用数值模拟方法模拟  $\text{H}_2$  在钯银合金管中的渗透过程<sup>[5,6]</sup>, 分析气体流速、氢分压对渗透过程的影响, 并优化钯银合金管

的结构以提高对氙的分离渗透性能。

## 1. 实验装置介绍

实验流程图如图 1 所示。将基于钯银合金管的分离器置于加热炉内, 工作温度为  $480^\circ\text{C}$ 。原料气 ( $\text{H}_2$  气或 Ar- $\text{H}_2$  混合气) 从分离装置的左侧 (进气端) 进入, 经钯银合金管的分离,  $\text{H}_2$  从右侧 (渗透端) 流出, 并用皂泡流量计测量渗透侧  $\text{H}_2$  的流量, 由此得到钯银合金管对  $\text{H}_2$  的渗透量。未经渗透的 Ar 气和剩余的  $\text{H}_2$  气从残气端排空。实验结束后, 通入 Ar 气对整个实验装置进行吹扫清洗。

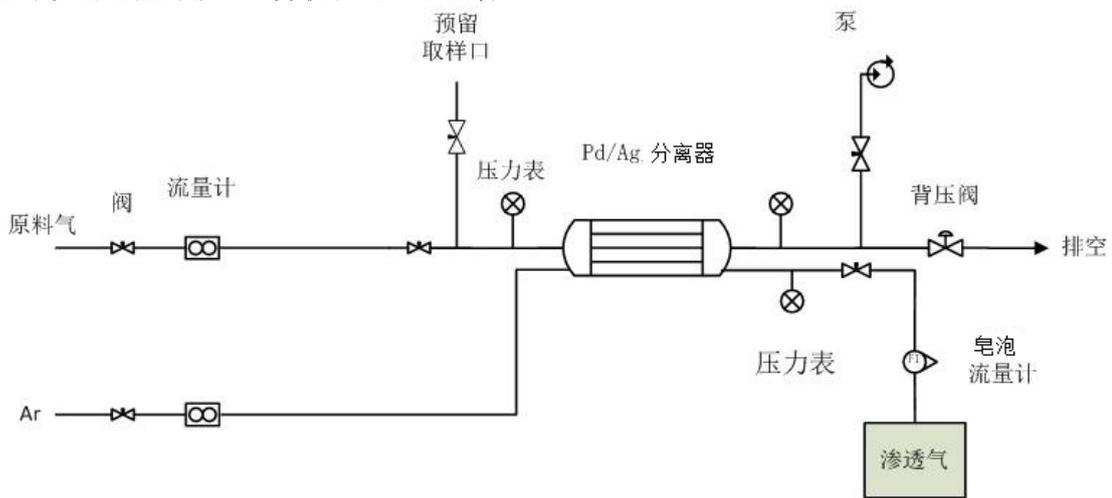


图 1 钯银合金管分离  $\text{H}_2$  的实验流程图

## 2. 实验结果与讨论

钯银合金管的渗氢量与两侧的氢分压差相关。此外, 通过比较 Ar- $\text{H}_2$  混合气与纯  $\text{H}_2$  在相同氢分压差下的渗透, 可以得到非氢组分 Ar 气对钯银合金管渗氢量的影响。

实验过程中保持混合气体总流量为 100 sccm 不变, 通过 KOFLOC 质量流量控制器调节 Ar 气和  $\text{H}_2$  气的流量, 使  $\text{H}_2$  在混合气体中的体积比例为 50%、60%、70%、80%、100%。由于渗透端与外界相通, 可以近似认为渗透端的氢分压为 1 atm (100 kPa), 然后通过背压阀调节进气端总压强, 使不同体积比的 Ar- $\text{H}_2$  混合气在渗氢实验过程中膜两侧的氢分压差保持相同。图 2 是在  $480^\circ\text{C}$  的工作温度下得到的钯银合金管的渗氢量与两侧氢分压差及混合气中  $\text{H}_2$  体积分数的关系。

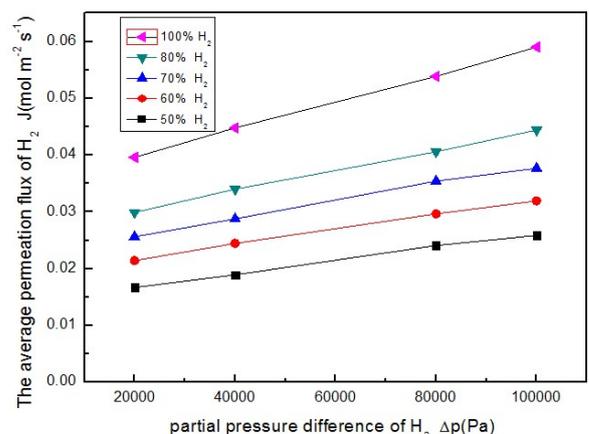


图 2 不同 Ar- $\text{H}_2$  体积比条件下, 钯银合金管的  $\text{H}_2$  渗透量与氢分压差及混合气中  $\text{H}_2$  体积分数的关系

从图中可以看到, 钯银合金管的渗氢量随膜两侧氢分压差的增加而增加。而在膜两侧氢分压差相同的条件下, 混合气中 Ar 气含量对渗氢量的影响显

著并随着 Ar 气含量的增加，渗氢量减少。这说明在混合气的渗氢过程中，Ar 气的存在会影响 H<sub>2</sub> 的渗透。

对 Ar-H<sub>2</sub> 混合气在钯银合金管的渗氢过程进行模拟，可以得到 H<sub>2</sub> 气体积含量为 50%，60%，70%，80%，90% 时，钯银合金分离器（钯银合金管外部）内 H<sub>2</sub> 气浓度分布图，如图 3 所示。

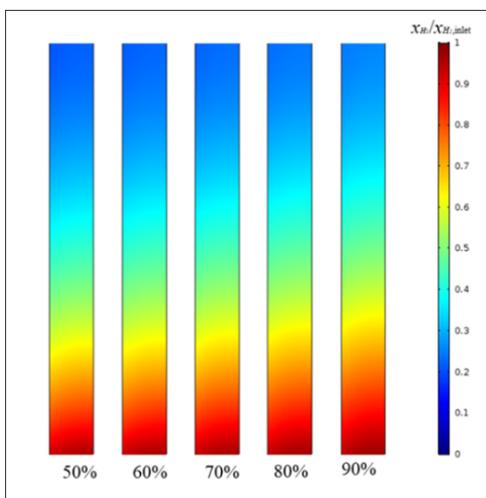


图 3 不同 H<sub>2</sub> 体积含量下，钯银合金分离器内 H<sub>2</sub> 浓度分布（480°C，进气流速 100 sccm， $\Delta p=20$  kPa，渗透系数  $\phi=5 \times 10^{-4}$  mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>·Pa<sup>-0.5</sup>）

图中右侧的图示代表 H<sub>2</sub> 浓度相对于分离器入口处 H<sub>2</sub> 浓度的比值，取值范围在 0 到 1 之间，以不同颜色表示。红色区域代表 H<sub>2</sub> 浓度较高，蓝色区域代表 H<sub>2</sub> 浓度较低。Ar-H<sub>2</sub> 混合气从分离器下端（进气端）进入，经钯银合金管渗透后，残余气体从上端流出。从 H<sub>2</sub> 浓度分布的云图上可以看出，越靠近底端，H<sub>2</sub> 浓度越高，自下而上，H<sub>2</sub> 浓度逐渐降低。结合钯银合金分离器模型的结构，下端是分离器的进气端，说明 Ar-H<sub>2</sub> 混合气体进入后 H<sub>2</sub> 首先集中在入口处，并通过钯银合金管进行渗透；而沿着分离器轴向往上，H<sub>2</sub> 浓度不断降低，这部分的钯银合金管几乎没有 H<sub>2</sub> 的渗透。从左至右，随着混合气中 Ar 气的体积分数减小，分离器内发生渗氢过程的区域增大，有利于 H<sub>2</sub> 的渗透。

用 H<sub>2</sub> 体积分数为 80% 的 Ar-H<sub>2</sub> 混合气进行实验，得到的渗氢量与进气流速的关系如图 4 所示。图中反映的是 480°C，膜两侧的氢分压差为 100 kPa 的条件下，渗氢量随混合气体进气流速的变化。从图上可以看出，钯银合金膜的渗氢量随进气流速的增加而明显上升，说明进气流速对混合气渗透的影响较大。

对该 Ar-H<sub>2</sub> 混合气的渗透过程进行模拟，得到的结果如图 5 所示。图 5 反映的是进气流速从 100 sccm 上升到 500 sccm 时，钯银合金分离器（钯银合金管外部）内 H<sub>2</sub> 浓度的变化情况。

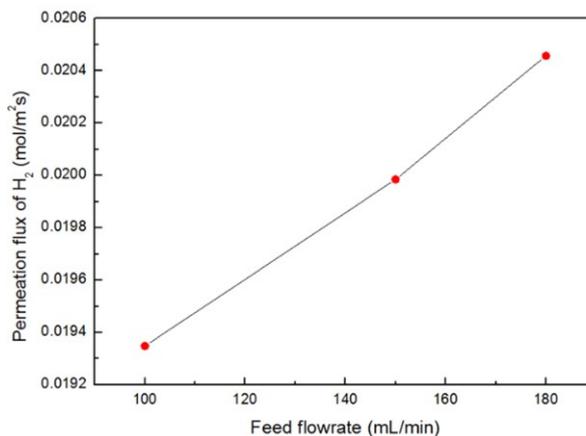


图 4 Ar-H<sub>2</sub> 混合气条件下，钯银合金分离器渗透量与进气流速的关系（H<sub>2</sub>: 80 vol%，480°C， $\Delta p=100$  kPa）

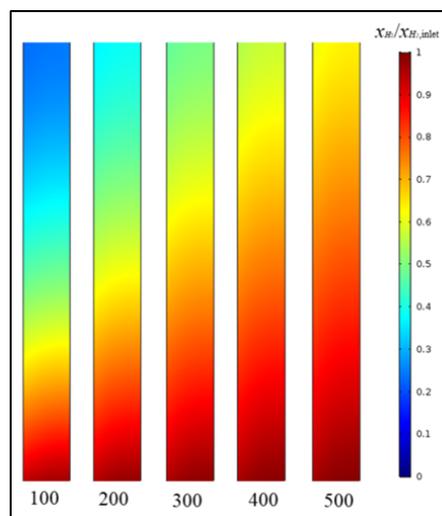


图 5 不同进气流速下，钯银合金分离器内 H<sub>2</sub> 浓度分布（480°C，渗透系数  $\phi=5 \times 10^{-4}$  mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>·Pa<sup>-0.5</sup>， $\Delta p=20$  kPa， $V_{H_2}=80\%$ ， $V_{Ar}=20\%$ ）

从 H<sub>2</sub> 浓度分布图上可以看出进气流速为 100 sccm 时，H<sub>2</sub> 主要集中在钯银合金分离器的进气端，远离进气端的区域 H<sub>2</sub> 浓度较低。此时分离器内部产生严重的浓差极化效应<sup>[7]</sup>，影响了分离器的渗透性能。当进气流速上升到 500 sccm 时，H<sub>2</sub> 几乎能覆盖钯银合金分离器的整个区域，此时分离器内浓差极化效应明显减弱。从另一方面来说，分离器内部的浓差极化效应虽然得到改善，但增加流速后，大量 H<sub>2</sub> 未经钯银合金管渗透就流出分离器，影响 H<sub>2</sub> 的分离效率。因此，为提高 H<sub>2</sub> 的分离效率，在进气流速增加的情况下需增加分离器的设计长度以保证 H<sub>2</sub> 的渗透。

### 3. 钯银合金分离器的应用

结合实验和模拟结果，我们设计了适用于熔盐堆尾气中氙分离的钯银合金分离器，然后在此基础上研制了系统样机并成功应用于 TMSR 综合仿真实验平台。该样机实现了对 Ar-H<sub>2</sub> 混合气中 H<sub>2</sub> 的分离与纯化，对 H<sub>2</sub> 回收率 > 90%，分离后得到的 H<sub>2</sub> 纯度 > 95%。

## 参考文献

- 1 Smith PG. DEVELOPMENT OF FUEL AND COOLANT-SALT CENTRIFUGAL PUMPS FOR THE MOLTEN-SALT REACTOR EXPERIMENT. 1970 Contract No.: TM-2987
- 2 Robertson RC. MSRE DESIGN AND OPERATIONS Part I. Oak Ridge, Tennessee: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1965
- 3 Lake JA. The fourth generation of nuclear power[J]. Progress in Nuclear Energy. 2002, **40**(3-4): 301-307.
- 4 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理. 2016, **45**(9): 578-590
- 5 Chen W-H, Hsia M-H, Chi Y-H, Lin Y-L, Yang C-C. Polarization phenomena of hydrogen-rich gas in high-permeance Pd and Pd-Cu membrane tubes[J]. Applied Energy. 2014, **113**: 41-50
- 6 Chen W-H, Lin C-H, Lin Y-L, Tsai C-W, Chein R-Y, Yu C-T. Interfacial permeation phenomena of hydrogen purification and carbon dioxide separation in a non-isothermal palladium membrane tube[J]. Chemical Engineering Journal. 2016, **305**: 156-168
- 7 侯京伟, 彭述明, 胡胜, 熊亮萍, 龚宇. 钯膜分离氢氦过程中浓差极化现象[J]. 强激光与粒子束. 2015, **27**(1): 1-5

# 熔盐堆尾气中氚储存用 ZrCo 合金储氚性能研究

氚科学与工程技术部, 杨果 韩兴博 吕丽君 马兆伟 朱海云 刘卫

氚是以氟锂铍盐为冷却剂的熔盐堆固有放射性产物之一且数量可观<sup>[1]</sup>, 它是一种放射性氢同位素, 其排放会污染环境; 同时, 氚是国控战略物资, 其适宜的核物理性质被广泛应用于工业、农业、军事和生命科学等研究领域, 因此对熔盐堆产生的氚进行回收存储具有重要的战略意义及经济意义。ZrCo 合金具有合适的放氚温度、快的吸/放氚速率、存储时优良的稳定性、室温下低的平衡氢压以及对空气或常见杂质气体的抗毒化作用较强等, 被国际热核组织 (ITER) 研发团队定为储氚的重要候选材料<sup>[2-4]</sup>。本课题组致力于熔盐堆尾气中氚储存技术及其合金优化的实验和理论研究, 目前工作包括合金储存氢同位素时发生的同位素效应以及杂质气体毒化对合金存储氢同位素影响的机理研究。

## ZrCo 合金的氢同位素效应研究

对  $ZrCoH_3$ 、 $ZrCoD_3$  和  $ZrCoT_3$  的物性计算得到,  $ZrCoT_3$  中的 T 原子和  $ZrCoD_3$  中的 D 原子在 4c2 和 8f1 位置的结合能小于  $ZrCoH_3$  中的 H 原子, 表明氟化物和氟化物的稳定性要高于氢化物。对于在 8e 位置的原子, 氘和氚原子的稳定程度同样高于氢原子, 说明同位素对合金的稳定性有重要的影响。

实验研究同位素效应对 ZrCo 合金储氢性能的影响。发现合金吸氚的平台压明显高于吸氢的平台压, 同时吸氚总量略低于吸氢总量, 放氚阶段的平台压略高于放氢平台压, 因此合金吸放氚在测试温度区间内呈现出正同位素效应。进一步分析吸放氚过程中热力学参数的变化, 发现放氚过程中, 同位素效应比较明显且放氚有明显的滞后。研究氢同位素对合金歧化动力学发现在高温条件下, 合金与氢气/氚气反应生成了  $ZrH_2$  相 ( $ZrD_2$  相) 和  $ZrCo_2$  相, 且随着温度的升高, 合金发生歧化反应的速率变快。氢同位素对 ZrCo 合金的歧化作用是: 氚的歧化程度低于氢的歧化程度, 推至氘的歧化程度最低。

## 氧毒化对 ZrCo 合金吸氢影响的理论研究

氧原子的预吸附对 ZrCo(110) 表面氢原子的吸附存在影响, 主要表现在优先占据稳定吸附位置, 降低邻近氢原子在稳定吸附位置的吸附能, 氧原子存在能够降低氢原子向体相内部的扩散势垒, 但其存在不利于大量的氢原子吸附。元素替代在一定程度上能够抑制合金的氧中毒, 在 Ti、Hf、Nb 和 Pd 中, Pd 元素的替代抗氧毒化效果较为明显。通过计

算发现氧毒化 ZrCo 合金主要是由于氧原子极强的电负性和氧化性能优先稳定吸附在合金表面的活性位点, 而后原子再向 ZrCo 合金次表面及体相扩散时, 由于氧原子需要克服的能量势垒高于氢原子, 导致氧原子很难继续扩散到合金内表面从而暴露出新鲜表面供其它氢原子继续吸附与扩散, 从而使合金表面形成由氧化物组成的钝化层, 阻碍氢分子的合金表面吸附及解离。

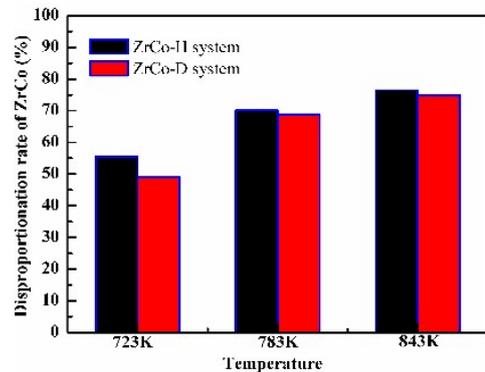


图1 ZrCo-H<sub>2</sub>D<sub>2</sub> 系统在不同温度下的歧化程度

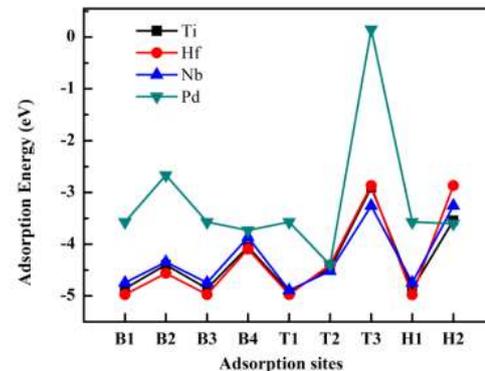


图2 不同合金元素替代 ZrCo(110) 表面上 Zr 原子时, O 原子吸附于表面的吸附能

## 参考文献

- 1 Lyu X W, *et al.* Analysis of tritium production in a 2 MW liquid-fueled molten salt experimental reactor and its environmental impact[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, 27(4)
- 2 BHATTACHARYYA R, *et al.* Solid state storage of hydrogen and its isotopes: An engineering overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 872-883
- 3 HAYASHI T, *et al.* Development of ZrCo Beds for ITER Tritium Storage and Delivery[J]. Fusion Science and Technology, 2002, 41(3P2): 801-804
- 4 赵林杰, 肖成建, 龙兴贵, 陈志林, 侯京伟, 龚宇, 冉光明, 王和义, 彭述明. 聚变能源中的氟化学与氟工艺研究进展及展望[J]. 核化学与放射化学, 2019, 41(01): 40-45

## 核设施周围不同环境介质中氚的空间分布规律

氚科学与工程技术部，张钦 邓珂 曾友石 楚鑫新 刘卫

核能作为一种清洁能源，受到各国政府的重视。目前，我国已是世界上正在建设核电机组最多的国家，未来我国的核电发电量将会占据更高的发电比例，在不久的将来，我国有望成为继美国之后的全球第二大核电国家<sup>[1]</sup>。在和平利用核能的同时，越来越多的人也开始关注放射性物质对环境的影响。

如图 1 所示，氚在核设施周围环境中分布广泛。氚可以通过水循环进入生态圈的每一部分。核设施排放出的含氚废气废液会随着降雨、径流等途径沉

积进入土壤，其中的 HT 会在土壤微生物的作用下，迅速氧化成氚化水(HTO)<sup>[2-7]</sup>。HTO 会被植物吸收，在植物中通过光合作用形成有机氚(OBT)，掉落的植物叶片在土壤中腐烂也会将有机氚带入土壤中<sup>[8]</sup>。动物和人类可以通过呼吸、食入等途径吸收氚，形成 HTO 和 OBT，对人类的健康造成威胁。由于氚极易进入人体，近年来氚在环境中的分布和迁移越来越受到人们的关注。

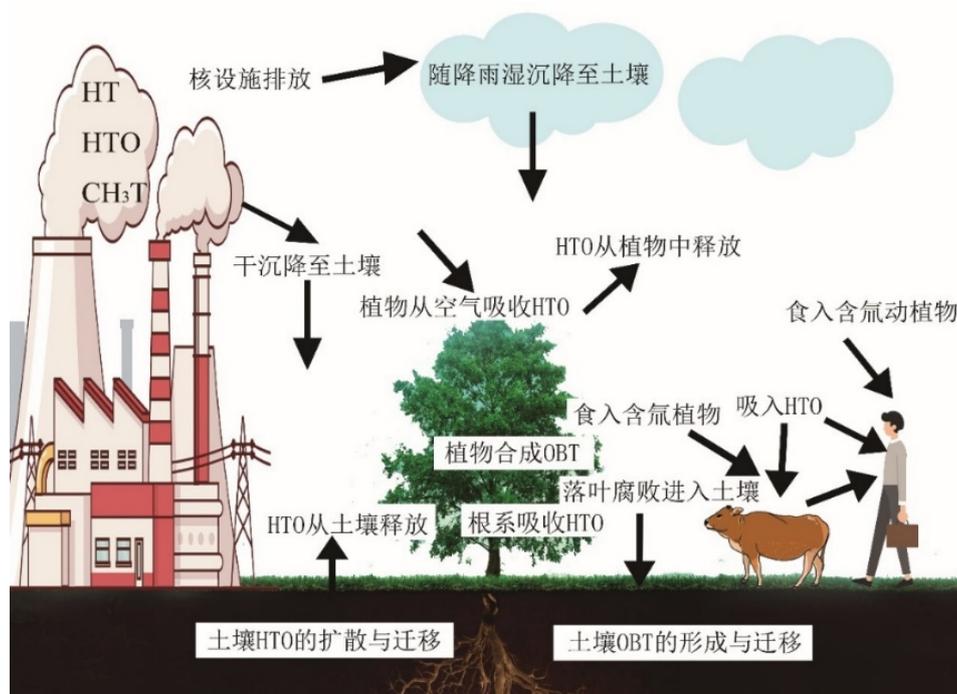


图 1 氚在环境介质中的迁移转化示意图

秦山核电基地中秦山三期核电厂是我国目前唯一的一座重水堆核电厂，重水堆在运行时会比其他类型的反应堆释放更多的氚，所以，秦山核电基地是我国研究核设施排放的氚对环境影响的理想地点。本研究选取了秦山核电基地周围不同采样点处表层土壤、草、树叶、空气 4 种介质，采样点位置如图 2 所示，分别测量了其中的 HTO 和 OBT 活度，得到了不同环境介质中氚的分布。

根据监测结果来看，各采样点处不同环境介质中的 HTO 的活度分布与 OBT 的活度分布相似，与距离核设施远近、是否有山体影响、是否处于主风位置都有一定的关系。不同的两个采样年份里，不

同环境介质中的 HTO 在采样点 A、B、C 三处均呈现出随着距离秦山三期越远，活度越低的规律。对于采样点 D 和采样点 E 来说，由于距离秦山一期较近，不同环境介质中的 HTO 的活度与 P I 采样点处 HTO 活度有关。随着距离的增加，采样点 E 处的 HTO 活度比采样点 D 处的要低。根据图 2 所示的采样点位置，采样点 F 位于秦山二期的西面偏南，其不同环境介质中的 HTO 活度可能受到秦山二期的影响，而根据图 3 所示，采样点 F 的各环境介质中 HTO 活度与 P II 采样点处的 HTO 活度相关，其活度受秦山二期影响较大。据图 4 可得，各环境介质中的 OBT 活度的空间分布与 HTO 活度空间分布类似。

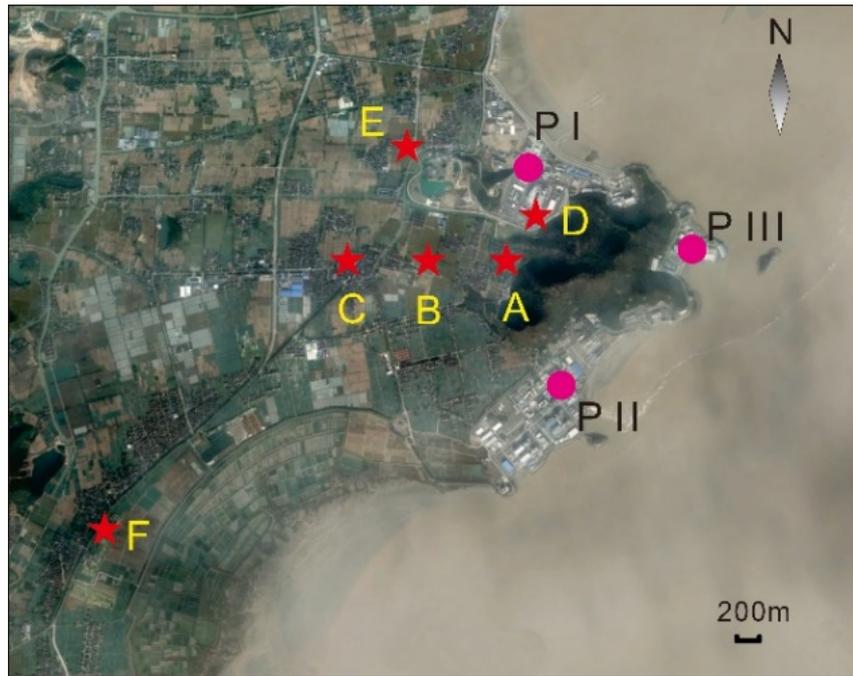


图2 采样点设置

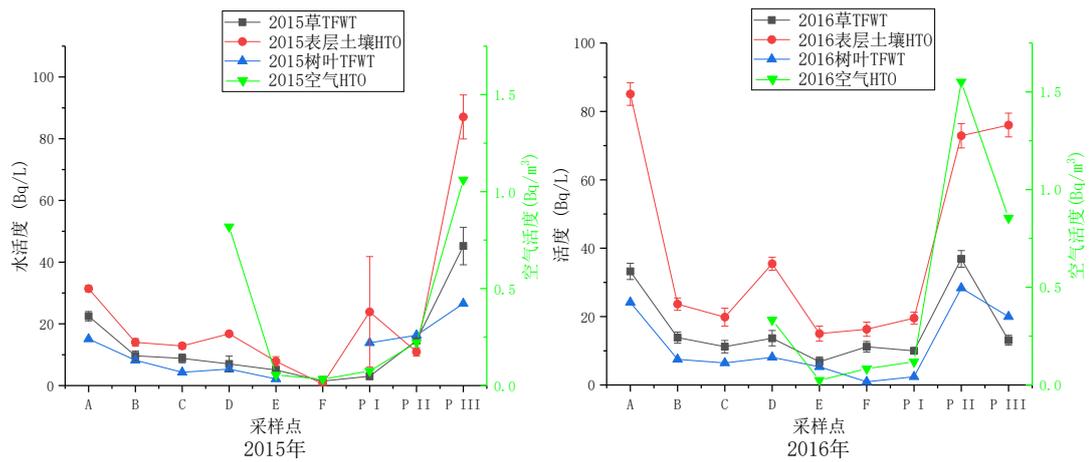


图3 不同采样年份各采样点环境介质中 HTO 分布

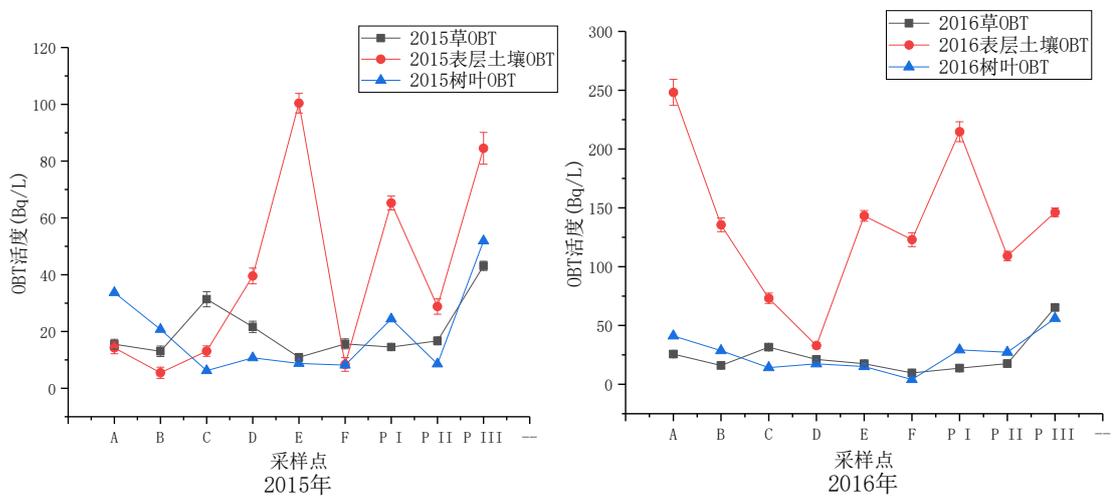


图4 不同采样年份各采样点环境介质中 OBt 分布

通过对秦山核电基地周围不同环境介质中 HTO 和 OBT 活度的空间分布特征分析,可以更好地了解不同形态氚在不同环境介质中的迁移、分布情况,以便有针对性的进行氚的治污工作。

### 参考文献

- 1 国家能源局. 中国核工业创建 65 周年 在建核电规模世界第一 [EB/OL](2020). [http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c\\_138720424.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720424.htm)
- 2 GARLAND J A, COX L C. The absorption of tritium gas by english soils, plants and the sea[J/OL]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1980, **14**(1): 103 - 114.
- 3 ICHIMASA M, ICHIMASA Y, AZUMA Y, 等. Oxidation of molecular tritium by surface soils.[J/OL]. *Journal of Radiation Research*, 1988, **29**(2): 144-151
- 4 MCFARLANE J C, ROGERS R D, BRADLEY D V. Environmental tritium oxidation in surface soil[J/OL]. *Environmental Science & Technology*, 1978, **12**(5): 590-593
- 5 OTA M, YAMAZAWA H, MORIIZUMI J, 等 . Measurement and modeling of oxidation rate of hydrogen isotopic gases by soil[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007, **97**(2-3): 103-115
- 6 YOKOYAMA S, NOGUCHI H, ICHIMASA Y, 等 . Re-emission of heavy water vapour from soil to the atmosphere[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, **71**(3): 201-213
- 7 MURPHY JR C E. Tritium transport and cycling in the environment[J]. *Health Physics.*, 1993, **65**(1979): 683-697
- 8 PAPKE H, FÖRSTEL H. Formation rate of nonexchangeable organically bound tritium from tritiated soil water[J]. *Health Physics*, 1991, **60**(6): 773-779

# 金属有机骨架材料对氪氙吸附分离的性能研究

氟科学与工程部, 吴小玲 周鹤 张宁 黄豫 郭冰 钱楠 楚鑫新

放射性惰性气体处理是全球核电行业研究的热点, 现核电站对放射性氙同位素主要的处理方法是使用活性炭填充床将放射性氙同位素进行衰变滞留一段时间后, 直接排入大气。然而氙同位素价格昂贵, 从空气中回收提纯成本很高, 对于核电站的衰变滞留后直排行为, 具有一定程度的资源利用不足且会造成一定的环境影响。因此, 有必要对氙同位素进行回收利用, 将放射性氙同位素变废为宝, 应用于更多的行业中, 使核电成为真正意义上的清洁能源。

对于惰性气体吸附剂的研发, 国内外学者进行了大量的研究, 从最初的沸石分子筛系列, 到活性炭系列, 近年来, 金属有机骨架材料 (Metal-organic

Frameworks, MOFs) 显示出了广阔的前景。研究人员通过不同的合成制备方法研制出上万种不同拓扑结构的 MOFs 材料, 通过对材料的性能实验与理论计算研究, 使此类新型材料赋予不同的应用场景。然而, 由于 MOFs 材料具有高孔隙率, 可能导致内部结构的坍塌, 为了更好的适应核工业尾气的放射性环境, 同时又能够对放射性气体进行好的吸附效果, 有必要进行针对性的研究。

本研究使用水热合成法(装置见图 1)制备了两种 MOFs 材料, 一种为钴基含氟 MOFs, 一种为钙基 MOFs, 分别使用单晶与粉末 XRD, TGA, 物理吸附仪与气相色谱等对两种材料进行表征与氪氙吸附性能测试 (静态与动态)。

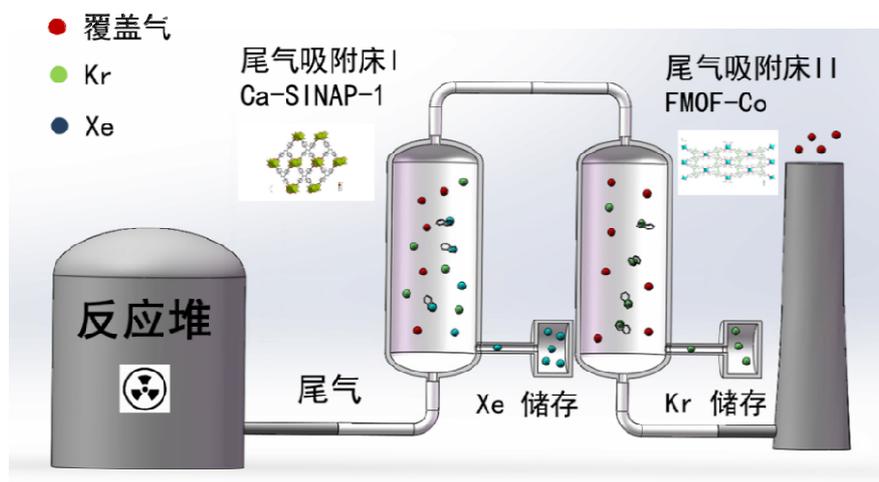


图 1 水热合成装置图

图 2 可以看出, 钴基含氟材料具有良好的热稳定性与化学稳定性, 可根据不同温度的调节来调节其氪氙吸附量。表现出不同的可逆 Kr 和 Xe 选择性, 在 100 KPa (303 K~233 K) 下, Kr/Xe 的分子选择性为 0.46~6.29, 通过调节不同的温度可以控制 Kr 的选择性。钙基 MOF 材料可以耐 50 kGy gamma 辐照与 400 kGy 的 beta 辐照, 辐照示意图如图 3 所示, 且在 pH2~13 的范围内可以保持晶型结构, 其热稳定性较好, 在 550 摄氏度下可以保持晶型结构不分解。在 293 K 下, 钙基 MOFs 材料对氪氙的亨利分离系数为 10.32, 高于几种经典的 MOFs 材料, 吸附量为 2.83 mmol/g, 负载一定浓度的银离子后, 增强了对 Xe 的吸附效果, 吸附量增加 16% (3.33 mmol/g)。这是由于银离子对 Xe 产生了较大的极性效应, 增加了 Xe 与载银钙基 MOF 的相互作用力。建立了载银

MOFs 材处理 Xe 的实验方法, 为液态燃料钚基熔盐实验堆提供新型惰性气体吸附潜力材料。

综上所述, 可以将核电尾气的处理分为两部分进行, I 吸附床为氪氙的分离与储存, II 吸附床为氪氙的分离与储存, 保证了放射性尾气的处理要求, 同时也满足了对放射性氪氙的回收利用。

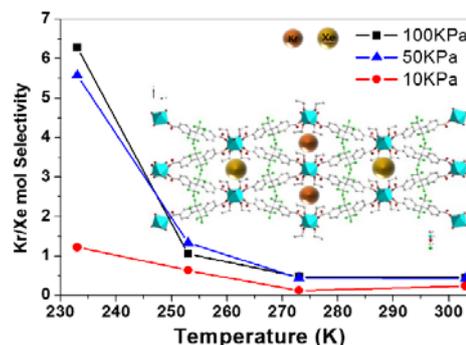


图 2 氪氙吸附量随温度的变化

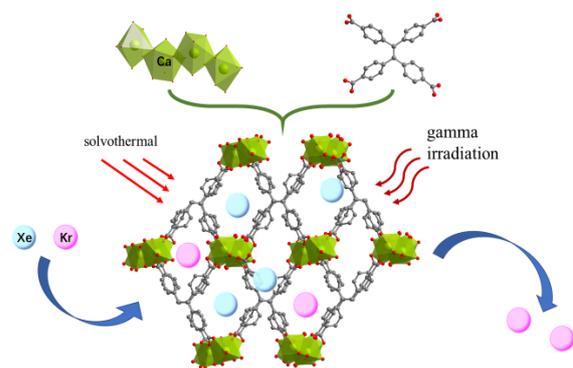


图3 gamma 辐照示意图

### 参考文献

1. Rowsell J L C, Yaghi O M. Metal-organic frameworks: a new class of porous materials[J]. *Microporous Mesoporous Mater.* 2004, **73**(1-2): 3–14
2. Férey G. Hybrid porous solids: past, present, future[J]. *Chem. Soc. Rev.* 2008, **37**: 191–214
3. Liu L, Yao Z, Ye Y, *et al.* Integrating the pillared-layer strategy and pore-space partition method to construct multicomponent MOFs for C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> separation[J]. *J. Am. Chem. Soc.* 2020, **142**(20): 9258–9266
4. Shi Z, Tao Y, Wu J, *et al.* Robust metal-triazolate frameworks for CO<sub>2</sub> capture from flue gas[J]. *J. Am. Chem. Soc.* 2020, **142**(6): 2750–2754
5. Liu X W, Gu Y M, Sun T J, *et al.* Water resistant and flexible MOF materials for highly efficient separation of methane from nitrogen[J]. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019, **58**(44): 20392–20400
6. Li Z J, Ju Y, Yu B, *et al.* Modulated synthesis and isorecticular expansion of Th-MOFs with recorded high pore volume and surface area for iodine adsorption[J]. *Chem. Commun.* 2020, **56**: 6715–6718
7. Elsaidi S K, Mohamed M H, Helal A S, *et al.* Radiation-resistant metal-organic framework enables efficient separation of krypton fission gas from spent nuclear fuel[J]. *Nat. Commun.* 2020, **11**(1): 3103
8. Yan Z, Gong Y, Chen B, *et al.* Methyl functionalized Zr-Fum MOF with enhanced Xenon adsorption and separation[J]. *Sep. Purif. Technol.* 2020, **239**: 116514
9. Kenzo M, Seigo K, Satoshi Y, *et al.* Adsorption of noble gases on silver-mordenite[J]. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2003, **40**(9): 695–697
10. Jian L, Denis M S, Thallapally P K, *et al.* Enhanced noble gas adsorption in Ag@MOF-74Ni[J]. *Chem Commun.* 2014, **50**: 466–468
11. Wu X L, Li Z J, Zhou H, *et al.* Enhanced adsorption and separation of xenon over krypton via an unsaturated calcium center in a metal-organic framework[J]. *Inorg. Chem.* 2021, **60**: 1506–1512
12. Banerjee D, Simon C M, Thallapally P K, *et al.* Metal-Organic Framework with optimally selective xenon adsorption and separation[J]. *Nature Communications.* 2016, **7**: 11831
13. Munakata K, Tanaka, K, Yamatsuki, S, *et al.* Dynamic of adsorption of Kr and Xe on MS5A and activated charcoal[J]. *J. Chem. Eng. Jpn.* 2001, **34**(7): 853–861

# ZrVFe 基合金吸附氚性能研究

氚科学与工程技术部, 吕丽君 韩兴博 杨果 马兆伟 朱海云 刘卫

钍基熔盐堆以其安全性、高效性等特点被认为是最有潜力的第四代反应堆堆型之一, 但是它在运行过程中会产生数量可观的氚<sup>[1]</sup>。氚是一种放射性核素, 未经处理排放到环境会造成一定的污染, 尤其随着核能的发展, 含氚废水的环境排放及生物学效应越来越引起关注<sup>[2]</sup>。针对含氚尾气的处理, 有研究表明 Zr 基非蒸散型吸气剂具有极低的室温吸氢平台压、快速的吸氢速率和较大的吸氢容量, 同时结构简单, 经济方便, 安全系数高, 不产生氚水等特点, 可被大量用于含氚尾气的吸附<sup>[3]</sup>。由于含氚尾气的吸收和存储容量有限, 在达到吸附容量的上限之前, Zr 基非蒸散型吸气剂将被转运到专门的工厂进行高温脱附, 将吸收的氚释放出来进行专业回收, 这相比较常用的氧化方法<sup>[4]</sup>将氚去除更加简便和安全。基于此, 课题组针对典型的 ZrVFe 型合金吸附剂开展了相关研究。

## Zr<sub>x</sub>V<sub>5</sub>Fe(x=3-9)合金吸氢性能研究

Zr 含量对 Zr<sub>3</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金性能的影响规律进行研究表明, Zr<sub>x</sub>V<sub>5</sub>Fe(x=3,5,7,8,9)合金由 $\alpha$ -Zr 和 C15-ZrV<sub>2</sub> 相组成。随着 Zr 含量的增加,  $\alpha$ -Zr 相含量逐渐增加, C15-ZrV<sub>2</sub> 相含量逐渐降低。C15-ZrV<sub>2</sub> 相的晶胞体积先增大后减小,  $\alpha$ -Zr 相的晶胞体积先减小后增大。背散射电子图像表明,  $\alpha$ -Zr 相分布在 C15-ZrV<sub>2</sub> 相基体中, Zr<sub>7</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金的 $\alpha$ -Zr 相分布更为均匀。Zr<sub>7</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金的平均颗粒尺寸最小并且相分布最为均匀, 使得其吸氢动力学最快。除 Zr<sub>3</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金外, 其它合金均具有明显的 $\alpha$ -Zr 和 C15-ZrV<sub>2</sub> 相的平台压力区, 在 623 K 条件下合金的平台压力随 Zr 含量的增加而逐渐减小。Zr<sub>7</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金中 C15-ZrV<sub>2</sub> 和 $\alpha$ -Zr 吸氢相的脱氢温度低于 Zr<sub>x</sub>V<sub>5</sub>Fe (x = 3,5,8,9) 合金中相同吸氢相的脱氢温度。

## Zr<sub>7-x</sub>Ti<sub>x</sub>V<sub>5</sub>Fe(x=0.3,0.9,1.5,2.1)合金吸氢性能研究

对 Ti 替代 Zr<sub>7</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金中 Zr 元素的吸氢性能进行研究, 发现 Ti 对 Zr 的替代未改变 Zr<sub>7</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金的相组成, Zr<sub>7-x</sub>Ti<sub>x</sub>V<sub>5</sub>Fe (x = 0.3,0.9,1.5,2.1)合金同样由 $\alpha$ -Zr 和 C15-ZrV<sub>2</sub> 相组成。随着 Ti 含量的增加, C15-ZrV<sub>2</sub> 相的晶胞体积先增大, 在 Zr<sub>5.5</sub>Ti<sub>1.5</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金内达到最大值后减小。 $\alpha$ -Zr 相的晶胞体积呈现相反的变化趋势, 但是 $\alpha$ -Zr 相的晶胞体积的差异较小。研究结果说明 Ti 对 Zr 的替代使得吸放氢样品的平均颗粒尺

寸增大, 降低了 Zr<sub>7</sub>V<sub>5</sub>Fe 合金的吸氢动力学, 但提高了吸氢容量, 因此 Ti 的掺杂更适用于对吸氢容量要求较高而对吸氢速率要求较低的长时间工作场合。

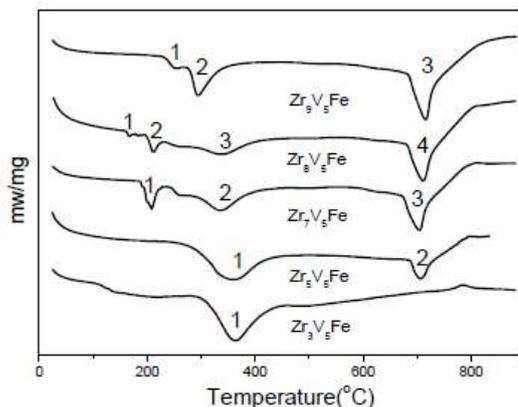


图1 Zr<sub>x</sub>V<sub>5</sub>Fe (x=3,5,7,8,9) 退火合金吸氢相的 DSC 放氢曲线

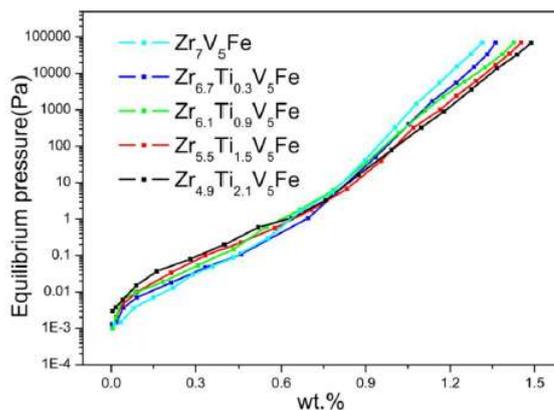


图2 Zr<sub>7-x</sub>Ti<sub>x</sub>V<sub>5</sub>Fe (x = 0, 0.3, 0.9, 1.5, 2.1) 退火合金在 623 K 的 PCT 曲线

## 参考文献

- 1 Lyu X W, Xia X B, Zhang Z H, et al. Analysis of tritium production in a 2 MW liquid-fueled molten salt experimental reactor and its environmental impact[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, 27(4).
- 2 张蒙, 崔凤梅, 涂彧, 等. 氚水的环境排放及生物学效应研究进展[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27(4): 302-305.
- 3 Zhang T, Zhang M, Hu R, et al. Hydrogen absorption behavior of a Pd-coated Zr70Fe5.4V24.6 getter material against gaseous impurities[J]. Vacuum, 2015, 122: 222-229.
- 4 黄豫. 基于氢同位素研究钯银合金分离熔盐堆中的氚[D]. 中国科学院大学.

# 熔盐堆高温机械设备力学分析与安全评定（施工设计阶段）

熔盐机械工程技术部，张小春

熔盐堆机械设备在高温下运行的安全性与经济性至关重要，利用合理、准确的高温构件全寿命安全评估方法对构件进行结构力学分析与优化设计，是确保高温设备安全经济可靠运行的重要手段。针对 TMSR 项目中高温熔盐机械设计工程需求，解决高温结构关键力学问题，为 TMSR 工程中结构系统的安全可靠，提供设计、评估及结构优化技术支持。全面研究美国 ASME 系列规范，将 ASME-III-5 High Temperature Reactors<sup>[1]</sup>高温规范应用于 TMSR 熔盐堆核岛机械设备的应力分析、应变与变形分析及蠕变与疲劳分析中，完成了 TMSR 熔盐堆高温机械设备（压力容器、熔盐泵、回路管道系统等）在施工设计阶段的力学分析、安全评定及结构优化设计，使结构设计定型，推进工程进入加工制造及后续建造阶段。

## 高温服役设备力学分析与安全评定

反应堆结构力学是核电设备设计不可或缺的重要组成部分，依据分析法设计标准，对反应堆系统、结构、设备和管道等在不同载荷组合工况下进行详细的稳态/瞬态应力分析、抗震分析、变形分析、疲劳分析、蠕变分析、屈曲失稳分析等，并利用高温

结构完整性评估限值要求，将结构完整性分析综合于高温设备结构优化设计之中。

对于熔盐堆高温服役环境，建立了高温反应堆在设计阶段力学分析、设计优化及完整性评价技术体系（图 1），在堆材料与高温服役设备间搭建了一座桥梁。TMSR-LF1 机械设备结构力学分析主要包括：流-热-固耦合分析，堆本体主容器及其支承载力学分析，控制棒系统结构力学分析，金属堆内构件及石墨堆内构件应力分析，回路系统管道力学分析，熔盐泵及其支承载力学分析，换热器力学分析，其它关键设备如阀、储罐结构力学分析，安全专设非能动余热排出换热装置及其管道力学分析等，对于处理复杂结构在复杂工况下的高温设备分析，以有限元法进行数值分析。图 2 为典型设备温度场、应力场分析结果。对 TMSR-LF1 熔盐堆高温机械设备结构各处的应力、应变与变形、蠕变疲劳情况进行全面的安全分析，并按照高温规范 ASME-III-5 High Temperature Reactors 限值要求进行安全评定，确保设备结构在机械、热、核与化学的环境影响下，仍能保持结构完整性，实现设备功能性、操作性与可靠性要求。

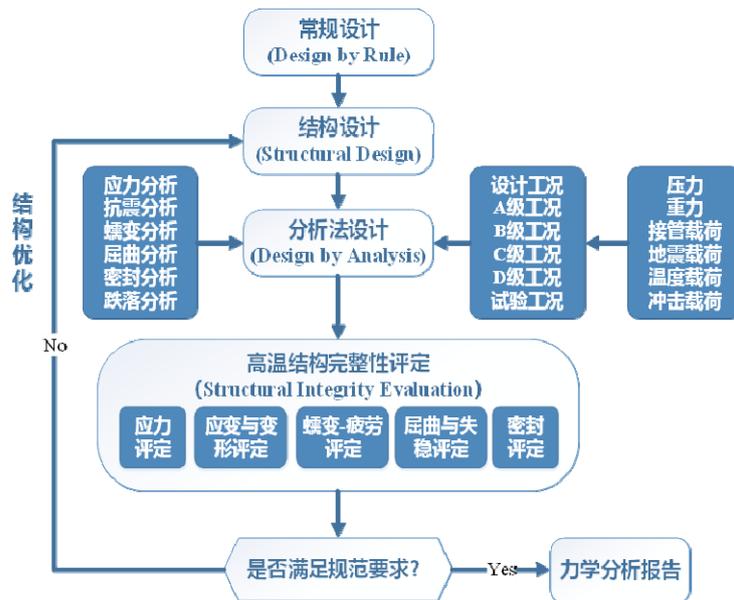


图 1 高温结构力学分析与评定流程

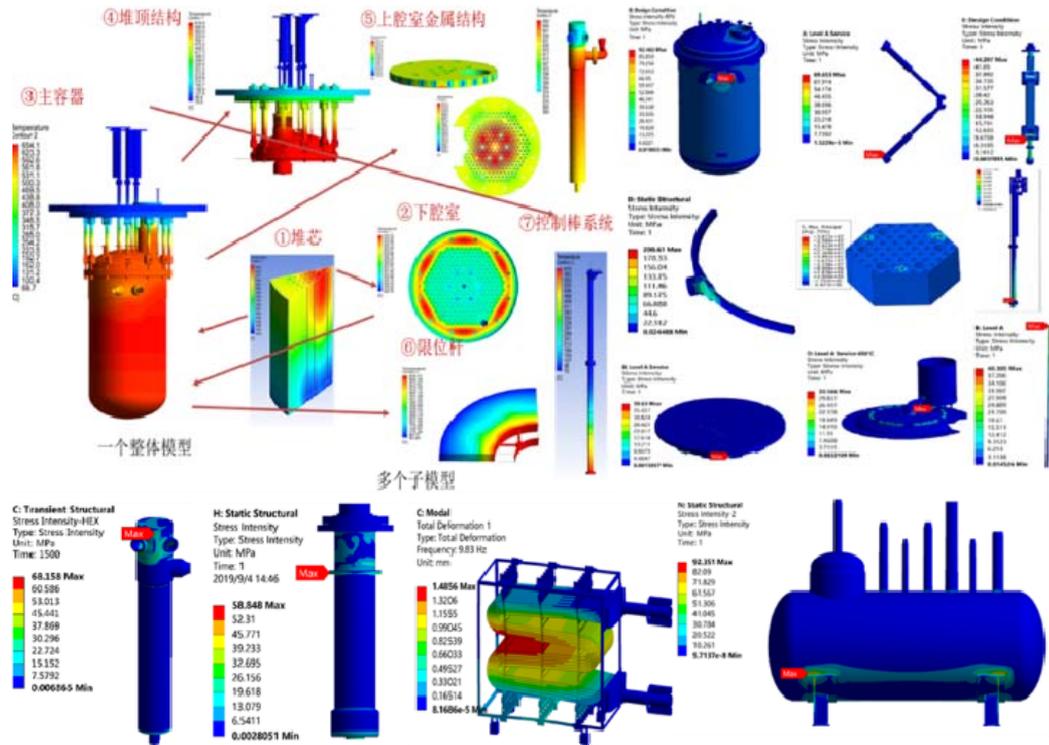


图2 典型设备温度场、应力场分析结果云图

## 研究堆抗震设计基准及抗震设计分析

针对 II 类研究堆抗震设计无理论依据和法规标准可依问题<sup>[2-3]</sup>,在核安全局指导原则下,遵循简化、安全、经济性等原则,吸取核电厂及工业化工领域设备运行经验,研究提出 LF1 抗震设计基准<sup>[4]</sup>: TMSR-LF1 厂房按民用建筑抗震设计规范进行抗震设计,地震力按本地区基本地震作用加 1 度取值,按本地区基本烈度加 1 度采取抗震措施,具体取值为按 50 年超越概率 63%地震作用的两倍进行弹性设计,按 50 年超越概率 2-3%地震作用进行局部非线性弹塑性验算,按 50 年超越概率 2%地震作用的两倍进行不倒塌弹塑性验算; TMSR-LF1 设备按照中震弹性设计,并进行鉴定。具体取值按照 50 年超越概率 10%的基本地震动参数(第一设防水准)进行抗震设计,并按照 50 年超越概率 2%的罕遇地震动参数(第二设防水准)进行校核;通过计算设备抗震设防基准下的厂房楼层谱,对放置于厂房内的安全级设备进行抗震设计。

根据 TMSR-LF1 物项在地震期间和(或)地震后是否需要其执行安全功能以及安全功能失效的后果,将物项抗震类别分为两类:特殊抗震要求类与一般抗震要求类。物项依据抗震分类实施抗震设计,物项的抗震设计应满足整体安全要求。

### (1) 特殊抗震要求类

所有安全级物项,按特殊抗震要求类设计。特殊抗震要求类物项应按第一设防水准(50 年超越概率 10%地震动)进行设计,并按照第二设防水准(50

年超越概率 2%地震动)进行校核,保证该类物项在遭受罕遇地震动作用下仍能保证设备结构完整性;对于具有停堆功能并维持安全停堆状态的能动物项,在地震后需保持可用性。

### (2) 一般抗震要求类

除特殊抗震要求类以外的物项,按一般抗震要求类设计。在一般抗震类物项结构设计时应满足:不致因其在地震期间失效或者相互作用而损伤特殊抗震类物项结构的完整性。一般抗震类物项可以根据其重要性进行抗震性能校核,其抗震要求应在设计技术规格书中给予规定。

按 TMSR-LF1 结构、系统和设备部件的组成、刚度、质量及阻尼特性充分地组合为各种分析模型。包容或支承特殊抗震要求类系统和部件的主要厂房结构为“抗震系统”,被“抗震系统”包容或支承的系统和部件,如回路总体结构系统(燃料盐循环回路系统、冷却盐循环回路系统及其支承介质)、堆本体系统(堆容器、堆内构件及其支承介质)、以及其它系统和部件组成各种“抗震子系统”<sup>[5-6]</sup>,目前完成 TMSR-LF1 抗震系统与抗震子系统的抗震验算,已写入 FSAR 第二章“安全目标与工程设计要求”中,并提交核安全局审核。图 3 为回路系统抗震分析耦合模型,将堆本体系统与冷却盐循环系统结构进行耦合,采用响应谱分析法计算总体结构系统在地震下的动力特性,获得管道应力及设备接管载荷;图 4 为一体化堆本体系统抗震分析模型,将反应堆主容器、燃料盐循环回路系统及堆内构件之间进行耦合,

采用时程分析方法，获得堆本体系统各部件地震响应位移、响应加速度时程及地震载荷，为堆本体系统设备及部件抗震安全评价提供地震输入；图 5 为堆芯石墨散体结构系统抗震分析模型，采用多刚体动力学方法和附加质量法考虑构件之间的接触及流固耦合效应，通过堆本体系统抗震分析获得石墨堆内构件与堆本体结构连接位置处的地震时程加速度，作为石墨堆内构件抗震分析的地震输入。

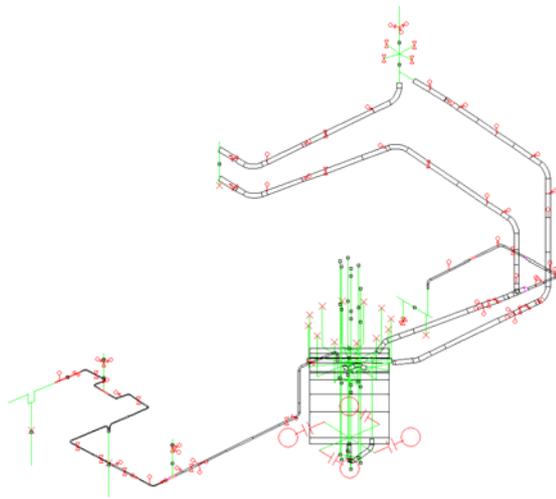


图 3 回路系统抗震分析模型

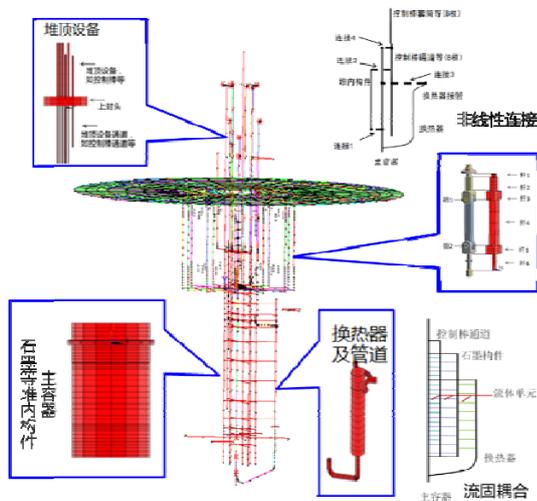


图 4 堆本体系统抗震分析模型

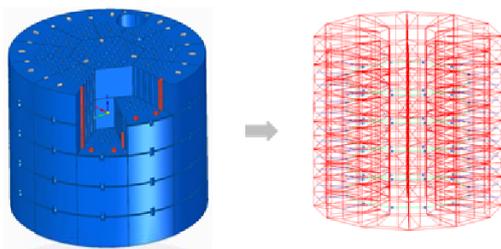


图 5 堆芯石墨抗震分析模型

TMSR-LF1 堆本体各设备及部件的抗震设计限值依据 ASME-III 核设施建造规范进行。对于高温堆

本体金属承压结构(>425℃)，采用 ASME-III-5-HBB 来评定，设备正常运行工况/预计运行事件工况载荷与第一设防水准地震动载荷叠加下的应力采用 HBB-3200 A/B 级使用限值进行评价；设备极限事故工况下的载荷与第二设防水准地震动载荷叠加下的应力采用 HBB-3200 D 级使用限值进行评价。

### 其他系统与特殊抗震要求类系统的相互作用

TMSR-LF1 实验堆特殊抗震要求类系统主要包括属燃料盐压力边界的安全级设备与部件（包括一体化的堆本体系统及燃料盐装卸系统）、非能动余热排出系统等。

对于与特殊抗震要求类系统相连的其他系统，如冷却盐回路系统、中子源系统等，在系统抗震分析中建立完整耦合结构，考虑其在地震期间的相互作用力进行分析验算与抗震设计，保证了非特殊抗震要求类系统在地震期间相互作用不会影响到特殊抗震要求类系统结构的完整性。对于不与特殊抗震要求类系统相连的其他系统，如厂房构筑物结构系统，按照地区抗震设防烈度为 7 度，重点设防类（乙类）提高一度考虑地震作用进行设计，根据我国《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup>，即使遭受本工程厂址的罕遇地震动（本项目安全停堆地震动），这些结构也不致发生倒塌事故，从而不会危及特殊抗震要求类系统的完整。

考虑到设计图纸与竣工图纸一般存在差异，施工过程中及竣工后，将根据现场实际情况对其它系统与特殊抗震要求类系统的相互作用进行排查与校核。

### 高温管道及设备的位移监测试验

TMSR 的回路管道工作温度很高，虽然在设计过程中进行了细致的力学分析和计算，已经考虑了高温热补偿问题，但系统设计时所采用的温度场、计算模型与实际的运行温度场、实际设备安装落位情况有可能存在偏差，导致设计计算得到的热位移值与实际热位移值存在一定偏差，实际运行时的异常热位移及限值容易导致管系变形、支吊架失效或是设备损坏。为预防这类情况的发生，确保 TMSR 回路系统的安全性和可靠性，同时对回路系统的力学分析和计算进行验证和修正，需对部分管道及设备的热位移进行持续的监测。

在 TMSR-SF0 冷态调试阶段和升温调试阶段，通过多次的现场勘测和图纸比对，核查了全部管道支承的类型和实际安装位置。在此过程中发现 4 处管道支承存在位置偏差，其实际安装位置与竣工图给出的坐标不符，其中 1 处存在位置偏差的支承，其上部支架与二回路泵的保温层金属蒙皮底部存在

接触；3处管道支承的坐标与分析模型中的不符，竣工图中给出的坐标为临近管道节点的坐标；另有3个支承的位置与分析模型中的不同，实际安装点为模型中相邻管道节点；发现二回路泵的进口管的一个管段贯穿钢平台处的孔洞过小，影响管道的热位移；熔盐-熔盐换热器的水平限位板与换热器支承平台之间的间隙过小，在升温调试中出现了异常限位，阻碍了熔盐-熔盐换热器的水平热位移。具体发现的支承问题参见图6。

通过大量的现场监测和分析，一、二回路泵及双熔盐换热器的热位移实测值与计算值吻合良好，有效的证明了有限元计算分析的可靠性和准确性。同时，各管道及设备支承均按设计要求发挥了作用。在升温调试中，还及时发现了熔盐-熔盐换热器的水平限位板的异常限位问题，并及时指导拆除了该水平限位板，有力的保障了台架的安全运行。该测试与分析经验将应用于TMSR-LF1的安装与调试工作中。



图6 TMSR-SF0管道位移监测过程中发现各类支承问题

## 结语

在核电主设备设计中，对各部件结构的应力分析和应力评定、力学测试等(反应堆结构力学)是核岛设备设计不可或缺的重要组成部分，应力分析和应

力评定是核电站最终安全评审必须提供的支持性材料。

在高温力学分析与结构评定方面，面向TMSR项目中高温熔盐机械工程需求，提出了抗震设计基准与设计准则<sup>[4]</sup>，建立及完善了高温力学分析与评定方法技术路线体系。对于TMSR金属结构，建立了UNS N10003合金高温蠕变理论模型与非弹性蠕变损伤计算方法<sup>[8]</sup>，对于TMSR石墨，针对熔盐堆石墨堆芯的散体结构及其熔盐环境两大技术难点，建立了熔盐堆石墨堆芯散体结构非线性多刚体碰撞动力学模型及抗震分析方法<sup>[9-10]</sup>。全面掌握ASME高温规范体系及结构完整性分析与安全评定技术，完成了TMSR机械设备及管道力学分析与安全评定，满足高温复杂结构强度、高温蠕变、断裂等方面的设计需求，为长寿命、高可靠性的高温机械设备及管道系统结构设计提供了依据与保障。

## 参考文献

- 1 High Temperature Reactors, Division 5, Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components, ASME BPVC, 2017
- 2 孙峰, 栾海燕, 潘蓉. I、II类研究堆构筑物抗震设计初探[J]. 工业建筑, 2016, 12(S1): 165-168
- 3 朱秀云, 潘蓉, 朱京圣, 张鸥. 研究堆构筑物抗震设计中的地震反应谱对比分析[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(4): 822-828
- 4 TMSR-LF1抗震设计准则. TMSR-LF1-SINAP-21-SANA-TQ-0006-C
- 5 PLAN, S.R. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, in NRC-NUREG-0800-SECTION3.7.2. 2013, U.S.
- 6 IAEA, Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants, in IAEA SAFETY STANDARDS SERIES, No. NS-G-1.6, 2003
- 7 GB50011-2010, 建筑抗震设计规范
- 8 X.Y. Wang, X. Wang, X.C. Zhang, S.F. Zhu. Creep damage characterization of UNS N10003 alloy based on a numerical simulation using the Norton creep law and Kachanov-Rabotnov creep damage model[J]. Nuclear Sci Tech, 2019, 30(4): 65
- 9 Maoyuan Cai, Chaochao Huang, Xiao Wang. A Preliminary Study on Seismic Behavior of the Graphite Reflector in Molten Salt Reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 330: 282-288
- 10 Huiqing Fan, Chaochao Huang, Xiaochun Zhang, Xiaoyan Wang, Shifeng Zhu, Maoyuan Cai, Xiao Wang. Computational- and experimental-based analysis of the load capacity of dowel-brick structure of graphite component in TMSR[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 355: 110346

# 熔盐堆用合金材料工艺研究进展

熔盐机械工程技术部, 黎超文 梁建平 蒋力 玉昆 陈双建 李铭 袁晓丹 严益 王金龙

2019-2020 年度合金工艺组的研究工作主要聚焦于合金材料的焊接工艺、复合加工工艺以及基于工艺优化的碲腐蚀防护三方面研究。通过参数优化, 发展出了适用于 GH3535 合金焊接接头的焊后热处理工艺, 显著提升了接头的持久性能; 发展了 GH3535/316H 和 Ni/316H 的爆炸复合板以及热轧复合板的制造工艺, 并评估了其力学性能; 研究了变形工艺对 GH3535 合金抗碲腐蚀性能的影响机制, 并发展了具有良好抗碲脆性能的 Ni-Nb 覆层。

## GH3535 合金接头焊后热处理工艺研究

GH3535 合金中初生碳化物在 1300°C 以上会转变为共晶碳化物, 而焊接的温度范围从室温到熔点 (1450°C 以上) 包含了碳化物共晶转变的温度点, 因此焊接热影响区和焊缝区均存在共晶碳化物。另外, 由于元素偏析、组织的不均匀性和焊后残余应力等使得合金焊接接头成为薄弱区域, 持久性能相对较低, 亟待工艺优化进行改善。为此, 深入研究 GH3535 合金焊接和焊后热处理过程中碳化物的演变行为, 并研究焊后热处理对焊接接头的显微硬度、拉伸性能、持久性能和微区残余应力的影响, 获得焊后热处理微观组织和力学性能的变化规律, 从而揭示焊后热处理碳化物的转变过程及其机理以及微观组织演变和力学性能变化之间的关系, 最终获得了提升合金接头性能的焊后热处理工艺参数<sup>[1,2]</sup>。

首先, 系统地研究焊后热处理温度对 GH3535 合金焊缝组织演变及力学性能的影响。随着焊后热处理温度的升高, 焊缝硬度逐渐降低, 屈服强度先快速后缓慢降低, 抗拉强度略有升高的趋势, 而延伸率显著增加。其中, 870°C 和 950°C 焊后热处理试样的延伸率较焊态试样有明显的增加。焊后热处理过程中纳米级 M<sub>2</sub>C 碳化物的溶解和位错的湮灭应该是导致合金焊缝显微硬度和屈服强度降低的主要原因。而在焊后热处理过程中, 焊缝枝晶界位置析出的 M<sub>6</sub>C 碳化物的尺寸和数量明显增加, 使得焊缝的延伸率显著增加。随着焊后热处理温度的升高, 焊缝的持久寿命和延伸率均先缓慢增加后显著增加。870°C 和 950°C 焊后热处理试样的持久寿命分别为 1674.2 h (焊态的 5.7 倍) 和 3347.7 h (焊态的 11.5 倍), 如图 1 所示。枝晶界碳化物在高温和应力的作用下明显的长大, 从而进一步阻碍晶界滑移, 使得持久性能增强, 延伸率提高。

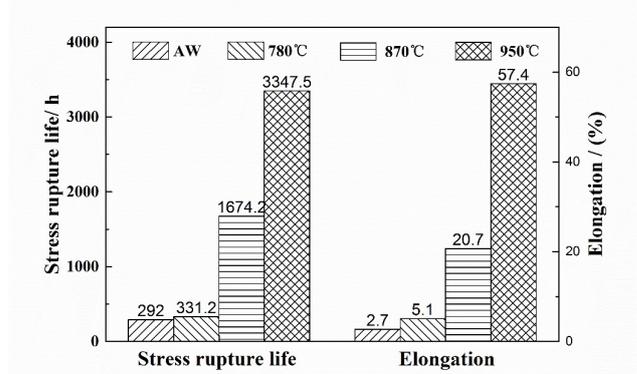


图 1 GH3535 熔覆金属热处理前后 650°C/220MPa 持久性能<sup>[1]</sup>

其次, 研究了在 870°C 温度下进行焊后热处理, 保温时间对 GH3535 合金焊接接头组织演变及力学性能的影响。焊接接头晶界碳化物随着热处理保温时间的增加数量增多。经过 870°C 焊后热处理 0.5 h 后, 焊接接头屈服强度降低了 43 MPa (焊态 272 MPa) 而延伸率增加了 69.6% (焊态 24.0%)。在焊接热循环的作用下, 焊态焊缝的枝晶界和枝晶内的亚晶界上有应力集中容易成为裂纹源。经过 870°C 焊后热处理, 焊缝的残余应力降低, 且焊缝区组织主要是粗大的枝晶, 焊接接头未被焊接热影响的母材, 其屈服强度较低, 在拉伸过程中, 这部分母材首先发生屈服和进入塑性变形阶段, 使得断裂在母材区发生。经过 870°C 焊后热处理 0.5 h 后, 焊接接头的持久寿命和延伸率显著增加, 随着热处理保温时间的增加, 其持久寿命和延伸率均先增加后减小, 如图 2 所示。焊接接头的持久性能经过 870°C 焊后热处理后有所提高, 这是焊接接头局部应力应变降低和晶界碳化物析出钉扎位错、阻碍晶界滑移共同作用的结果。

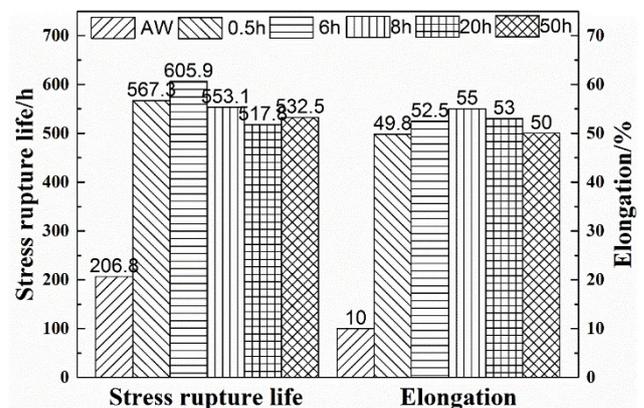


图 2 870°C 不同焊后热处理时间焊接接头持久性能<sup>[1]</sup>

## 复合板材料制造工艺研究与性能评估

新一代熔盐传蓄热技术的发展一个主要方向是工质温度更高，甚至达到 800-1000°C，因此熔盐对金属材料的腐蚀更加严重，超高温传蓄热技术对材料提出了更高的要求，目前除了昂贵的镍基合金别无选择，面临着如下两大难题：1) 随着熔盐技术的发展逐渐由中温的硝酸盐向更高的氟盐、氯盐、碳酸盐发展，进而对金属结构材料提出耐熔盐腐蚀、高温服役可靠性的要求。2) 若选用 Hastelloy N 或者 Inconel617 等昂贵镍合金，则极大增加了整套传蓄热装置的成本。为此，通过开展 GH3535/316H 和 Ni/316H 的爆炸复合板以及热轧复合板的制造工艺研究，以期获得兼具优异性能和经济性的复合板材料。

首先，发展了 GH3535/316H 爆炸复合板制造工艺，获得了界面结合良好的复合板。结果表明，爆炸焊界面宏观形貌成波浪状，且在界面处观察到过渡区，半岛及岛状结构。界面微观结构表征表明过渡区为涡旋结构发生局部熔化后的凝固组织。过渡区位置可观察到基体再结晶区，细晶区，柱状晶区，等轴晶区以及孔洞缺陷，如图 3 所示。两基体导热系数的差异导致过渡区内靠近两基体的部分显示出不同的晶粒形貌。界面应变分析结果表明距离界面由远到近应变逐渐增大。GH3535 基体中的再结晶区及过渡区内具有相对于基体很低的应变。通过 ECCI 表征了界面附近 316H 基体内的位错亚结构，结果表明晶粒内形成了大量位错塞积而成的复杂网络且与界面接触的基体呈现出沿界面弯曲的纤维组织。针对爆炸复合的 GH3535/316H 开展了进一步的热疲劳测试<sup>[3]</sup>。

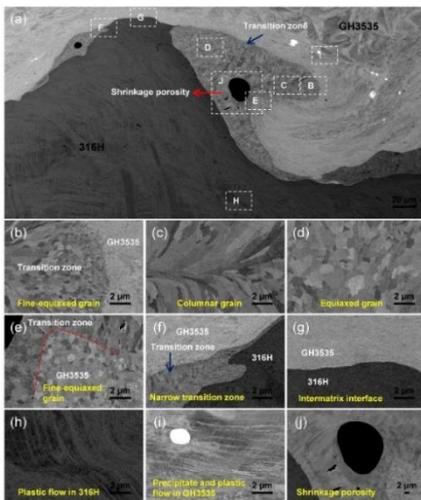


图 3 GH3535/316H 爆炸复合板界面的形态分析, (a) 全局形态, (b-j) 局部区域的组织细节<sup>[3]</sup>

其次，研究了 GH3535 以及纯镍(N4)-316H 复合板轧制实验，通过逐渐加大压下量的方法设计轧制

工序，研究轧制过程中的界面微观组织形貌演变、元素扩散机制以及界面氧化物生成机制，然后针对性地研究了热处理工艺参数对复合板力学性能的影响，在此基础上开展以 GH3535 合金作为复层的复合板轧制实验，以尝试获得满足高温熔盐环境应用的双金属复合板。通过对比基层和复层的抗氧化性能，确定采用 N4 和 GH3535 合金板材置于内侧、316H 不锈钢板材置于外侧的对称组合组坯方式。针对 N4-316H 复合板轧制工艺共设计 7 个道次，分别在轧制 3、5 和 7 道次后停止轧制并取样研究。实验结果表明，N4-316H 复合板在 3 道次到 5 道次间处于物理接触阶段与物理化学阶段，无明显可见的扩散作用与冶金结合特征。至轧制 7 道次时为扩散阶段，主要元素在此阶段进行了充分扩散，最终形成冶金结合的状态<sup>[4]</sup>，如图 4 所示。

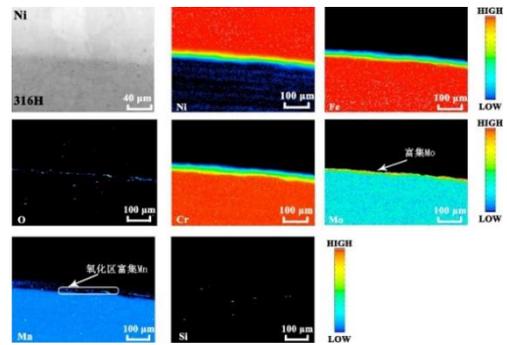


图 4 7 道次轧制后电子探针 (EPMA) 元素面扫分析<sup>[4]</sup>

选用不锈钢去应力处理、纯镍退火处理、不锈钢固溶处理三种热处理工艺对 N4-316H 复合板进行热处理，并研究了三者对 N4-316H 复合板拉伸性能和剪切性能的影响。不锈钢去应力处理可以使 N4 组织适当回复再结晶，一定程度上消除 316H 的热轧应力；而采用纯镍退火处理可以细化 N4 晶粒，完全消除其内应力，并部分消除 316H 的内应力；不锈钢固溶处理可以使 316H 回复为稳定的等轴奥氏体晶粒，消除加工硬化，提高延伸率，但较高的热处理温度会导致 N4 晶粒过度生长。纯镍退火处理后复合板的性能较为理想，两种板材拥有较为接近的力学性能，因而可以使复合板的力学性能更好。最后该项以三种实际工况条件下处理后的 GH3535-316H 复合板试验了其耐熔盐腐蚀性能并进行了对比，腐蚀后的结果显示：长时间时效处理后 GH3535-316H 复合板耐熔盐腐蚀最好，只经过固溶处理状态次之，冷热循环处理后 GH3535-316H 复合板的耐熔盐腐蚀性能最差。

## 基于工艺优化的 GH3535 合金耐蚀防护研究

耐蚀和耐脆是液态熔盐堆中合金结构材料最为严重的损伤形式之一。尤其是换热管等处于高温

端的薄壁件的碲脆开裂损伤将严重影响熔盐堆的服役安全。前期研究者已经提出合金改良和熔盐改性等抗碲脆方案,但是成本高且应用周期长。基于此,开展基于成熟的GH3535合金进行工艺优化来增强其抗碲脆性能的研究,主要包括合金组织调控和抗碲覆层开发两方面工作。

首先,开展了热轧态与固溶态GH3535合金的对比性研究,明确热轧处理的改善性作用。针对两种合金,从表面和截面对腐蚀产物的类型和成分特征进行分析,如图5所示;对不同腐蚀不同状态合金的碲的沿晶扩散行为进行表征,统计其扩散深度;对于晶界上和碳化物相界上碲的存在形式进行表征和评估;采用室温拉伸试验对不同腐蚀不同状态合金进行拉伸,统计碲致裂纹的密度和平均深度。最终分析汇总上述的不同状态合金的碲腐蚀行为和开裂行为的差异,结合扩散模型和热力学模型评估其反应路径,对比研究变形态组织对碲腐蚀和开裂行为的作用机制。结果表明由于热轧试样表面 $\text{Cr}_3\text{Te}_4$ 和 $\text{MnTe}$ 呈连续分布,且所占比例高,一次碳化物和基体的高密度相界面捕捉碲原子,把碲原子从晶界处分散到其他位置,因此热轧试样更具有耐碲腐蚀性能,为今后表面局部变形耐碲扩散工作提供实践性指导<sup>[5-6]</sup>。

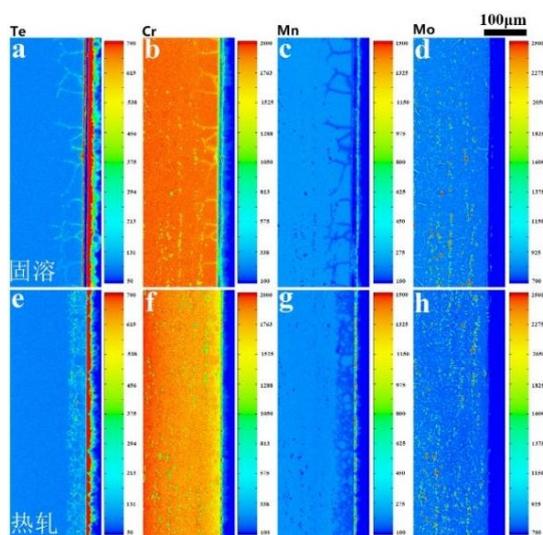


图5 在固溶(a、b、c、d)和热轧(e、f、g、h)试样截面上Te、Cr、Mn、Mo元素的分布<sup>[4]</sup>

其次,研发了Ni-Nb二元覆层材料,具有良好的抗碲脆效果,有望以爆炸复合、热轧复合等各种覆层或涂层工艺对现有的GH3535合金构件进行保护。为了研究Nb含量对Ni-Nb合金的抗碲脆效果,制备了四种不同Nb含量的样品开展碲腐蚀实验。研究表明Ni-Nb合金在低氧分压管跟高氧分压管中被Te腐蚀后表面都形成了一层连续的 $\text{Ni}_3\text{Te}_2$ 反应层,当Nb含量增加时反应层上出现少量 $\text{NbO}_2$ ,不同的

是,低氧分压管中反应层厚度随着Nb含量增加而增加,同时在反应层内逐渐出现长棒状析出物,高氧分压管中,样品表面的 $\text{Ni}_3\text{Te}_2$ 反应层随着Nb含量增加逐渐消失,靠近表面的基体内逐渐出现大量的 $\text{NbO}_2$ 。Ni-Nb合金Te沿晶界渗透的深度随着Nb含量的增加,呈现减小的趋势,同时Nb在晶界的偏析也越多(图6),说明Nb的加入能够有效地抵抗Te的沿晶扩散能力,在所研究的Nb含量范围内,Nb含量越多抗碲脆能力越强。因此,Ni-4Nb有望成为一种具有良好熔盐腐蚀抗力和抗碲脆能力的覆层材料<sup>[7]</sup>。

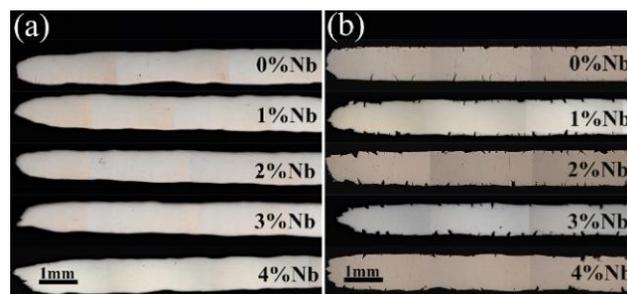


图6 低氧分压管中不同Nb含量Ni-Nb拉伸试样标距段裂纹形貌:(a)无Te,(b)Te腐蚀<sup>[7]</sup>

## 结语

综上,合金工艺组在2019-2020年度针对熔盐堆中关键工程问题开展系统的研究,主要成果如下:

- (1) 优化了GH3535合金焊后热处理工艺,显著提升了焊接接头的高温力学性能;
- (2) 发展了GH3535/316H和Ni/316H复合板的爆炸焊接工艺和热轧复合工艺,并开展了组织分析和性能评估,展现出上述复合板的应用潜力;
- (3) 针对GH3535合金开展了热轧处理,显著提升了其抗碲脆能力,同时发展出一种Ni-4Nb覆层材料,推动了熔盐堆用合金碲脆问题的解决。

## 参考文献

- 1 Wang, Wanxia Jiang, Li Li, Chaowen Leng, Bin Ye, Xiang-Xi Liu, Renduo Chen, Shuangjian Yu, Kun Li, Zhijun Zhou, Xingtai. Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of Hastelloy N superalloy welds[J]. Materials Today Communications, 2019, 19: 230-237
- 2 王晚霞. Hastelloy\_N合金焊后热处理碳化物转变机理研究[D], 中国科学院大学, 2019
- 3 Jia Xiao, Ming Li, Li Jiang, De-jun Wang, Xiang-Xi Ye, Jian-ping Liang, Ze-zhong Chen, Na-xiu Wang, and Zhi-jun Li. Fine Structure Characterization of Explosively Welded GH3535/316H Bimetallic Plate Interface[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020
- 4 范金辉, 李鹏飞, 梁建平, 徐长征, 蒋力, 叶祥熙, 李志军, 梁晓军. 镍-不锈钢复合板轧制过程中的界面研究[J]. 材料研究学报, 2020
- 5 Wu, Bo-Heng Jiang, Li Ye, Xiang-Xi Li, Chao-Wen Liang, Jian-Ping Liu, Fang Li, Zhi-Jun. On the origin of tellurium

- corrosion resistance of hot-rolled GH3535 alloy[J]. Corrosion Science, 2020, **170**: 108644
- 6 Jiang, Li Fu, Cai-Tao Leng, Bin Jia, Yan-yan Ye, Xiang-Xi Zhang, Wen-Zhu Bai, Qin Xia, Shuang Li, Zhi-Jun Liu, Fang. Influence of grain size on tellurium corrosion behaviors of GH3535 alloy[J]. Corrosion Science, 2019, **148**: 110-122
- 7 王伟. Nb 添加对合金碲腐蚀和碲脆行为的影响[M], 中国科学院大学, 2020

# 化学安全技术研究进展

熔盐化学与工程技术部，

姚剑 马继飞 杜林 陈贵生 刘阳 刘忠英 姜迪 仝路路 李玉兰

化学安全技术研发主要围绕熔盐堆工程及化学安全保障，并开展相关科研工作。

工程任务主要围绕 TMSR-LF1 以及高温电解制氢开展，关注其中的化学安全技术，主要包括了 TMSR-LF1 中化学安全系统以及高温电解制氢安全系统的建设。

安全保障任务主要围绕我所嘉定和武威两个园区的化学安全工作开展，为所内科研工作和日常生活的顺利进行提供保障。

科研任务主要围绕上述两项主体工作的需求、结合本技术组的能力和具备的条件开展，主要包括高温熔盐粒径分布特征研究、铍盐毒理研究以及稳定同位素溯源方法研究。

## 1. TMSR-LF1 化学安全系统

本年度 TMSR-LF1 化学安全系统主要完成了系统的施工图设计和优化，以及关键设备的采购、加工、验收、安装和调试工作。

其中，为处理基盐及冷却盐制备产生的含有高纯氢气和大量氟化氢的特殊工艺尾气，有针对性的研究了尾气处理设备的高效处理技术、材料的耐腐蚀性能以及处理过程中的氢气安全。采用-12℃的冷凝缓冲罐对工艺尾气中的氟化氢进行一定程度的冷凝沉降去除，再结合碱液吸收塔使得其处理效率达到 95%以上。设备实物见图 1。



图 1 基盐制备尾气处理系统实物图

## 2. 高温电解制氢安全系统

本年度主要完成了 20-KW 高温电解制氢安全系统的设计、设备采购、安装和运行工作，以及 200-KW 高温电解制氢装置氢安全系统的建设(图 2)。

通过建立制氢系统的故障树和道化学指数风险评估等，开展了氢气安全分析的定性化、量化研究。针对制氢装置的特点，建立了适用的 Hazop 安全分析和后果分析评价体系。

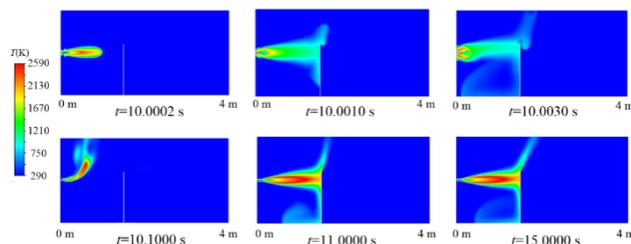


图 2 氢气储罐区防爆墙-压力影响分析

### 3. 化学安全相关科研内容

本组的科研工作主要以任务为导向，包括高温熔盐粒径分布特征研究、铍盐毒理研究以及稳定同位素溯源方法研究等。

#### 3.1 高温熔盐颗粒的粒径分布特征研究

在基于干法减压蒸馏装置搭建的高温熔盐颗粒粒径分布研究平台上<sup>[1]</sup>，研究了不同工况条件下尾气中不同体系熔盐颗粒的粒径分布特征，为工程中含熔盐尾气的去除提供实验数据支撑<sup>[2]</sup>。

研究表明，常温常压时，FLiBe 熔盐颗粒大部分集中在  $>2.50 \mu\text{m}$  的大粒径范围，而高温下集中在  $0.26\sim 2.50 \mu\text{m}$  范围内，同时发现有无气体吹扫对熔盐颗粒的粒径分布无明显影响（图 3）。

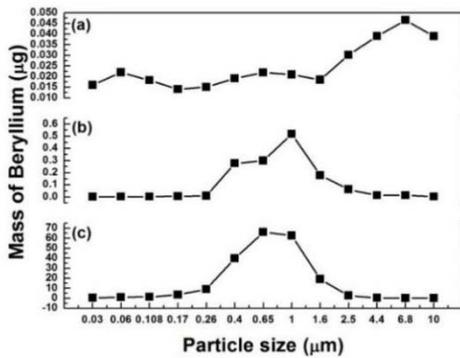


图 3 不同工况尾气中 FLiBe 熔盐颗粒的粒径分布特征。(a)常温常压，(b)高温密闭，(c)高温氦气吹扫

对两种高温熔盐颗粒通过氦气吹扫在尾气中的粒径分布进行研究，发现 FLiBeZr 大部分集中在  $0.06\sim 0.40 \mu\text{m}$  的细粒径范围，与之不同的是，FLiBe 熔盐颗粒集中在  $0.26\sim 1.00 \mu\text{m}$  范围内（图 4）。

#### 3.2 水溶性铍化合物对小鼠肺部所造成的急性毒性损伤的研究

铍化合物具有很强的吸入毒性，而熔盐堆以 FLiBe 为燃料载体盐和冷却盐，在实验过程中我们不可避免会接触到铍化合物。因此，为了公众健康和环境安全，深入研究铍化合物的毒理是十分必要的。

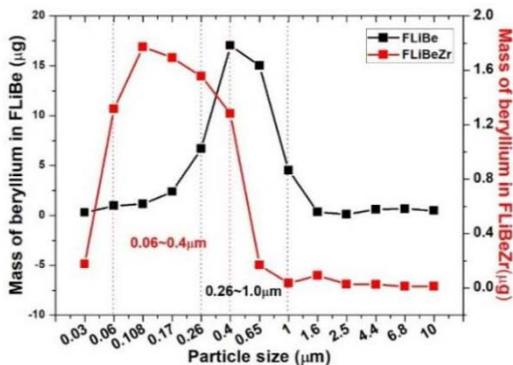


图 4 氦气吹扫工况尾气中 FLiBeZr 和 FLiBe(以 Be 计)的粒径分布

研究表明，在低剂量条件下， $\text{BeF}_2$  和  $\text{BeSO}_4$  并没有使小鼠产生明显的呼吸损伤；但在中和高剂量条件下，可溶性铍盐不仅会改变膜的通透性，破坏钙动态平衡，损伤上皮-毛细血管屏障，使机体产生炎症反应从而形成急性肺水肿，还会产生并积累活性氧从而打破机体氧化和抗氧化的平衡，此时 Be 元素主要沉积在肺部，其次是肾脏、肝脏以及骨骼中；此外， $\text{BeF}_2$  实验组的致死率、炎症反应和氧化应激反应明显要高于  $\text{BeSO}_4$  实验组。

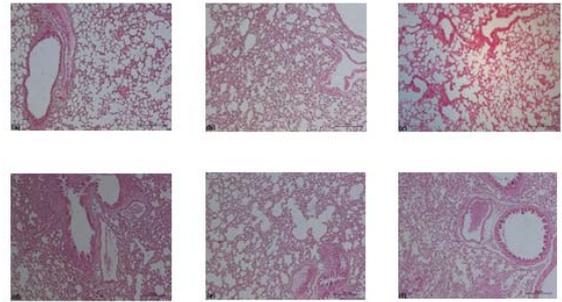


Figure A is the pathological section of the lung of mice in the control group, B is  $\text{BeF}_2$  low-dose group, C is  $\text{BeSO}_4$  low-dose group, D is  $\text{BeF}_2$  middle-dose group, E is  $\text{BeSO}_4$  middle-dose group, F is  $\text{BeSO}_4$  high-dose group

图 5 72 小时后不同剂量处理组小鼠的肺部切片

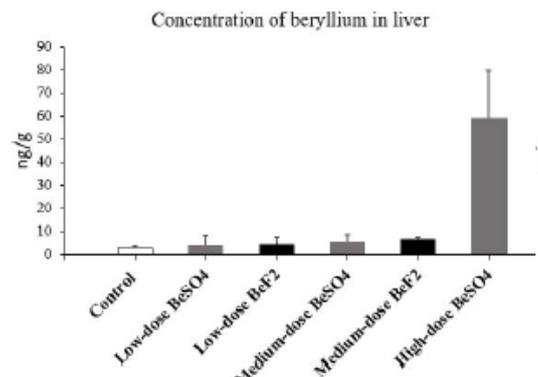


图 6 72 小时后不同剂量处理组小鼠肺部铍的含量

#### 3.3 基于稳定同位素和特征矿物元素对明胶骨原料溯源方法的研究

核技术在环境中的应用是我们组传统的研究方向。明胶是一类重要的食品药品中间体，动物骨骼是其重要原料<sup>[3]</sup>。近年来，随着世界范围内动物疫情和原材料以次充好等问题的频发，对骨原料进行产地溯源在保障明胶安全、加强质量控制及保护地理标志产品等方面具有重要意义。然而，目前国内外明胶骨原料的溯源体系尚未建立，对其溯源方法的研究也鲜有报道，这不仅给明胶产品带来了安全风险，也极大限制了骨原料的进出口贸易。我们组通过测定中国三个主产区骨样中的 3 种稳定同位素组成和 18 种矿物元素含量，结合单因素方差分析、聚类分析、主成分分析、判别分析等统计学方法，分析了三地骨样中各指标的组成差异，探讨了提取各

溯源指标中产地特征因子的有效方法，建立了多种骨原料产地分类模型<sup>[4]</sup>。

研究发现，骨样中的稳定同位素和矿物元素在地区间均有明显的特征分布（图 7），产地分类模型

的判别正确率分别可达 95.7%和 100%，充分证明了上述方法在其产地溯源的有效性。研究结果为明胶骨原料溯源体系的建立提供了新的思路，对加强明胶产品的质量安全控制具有重要意义。

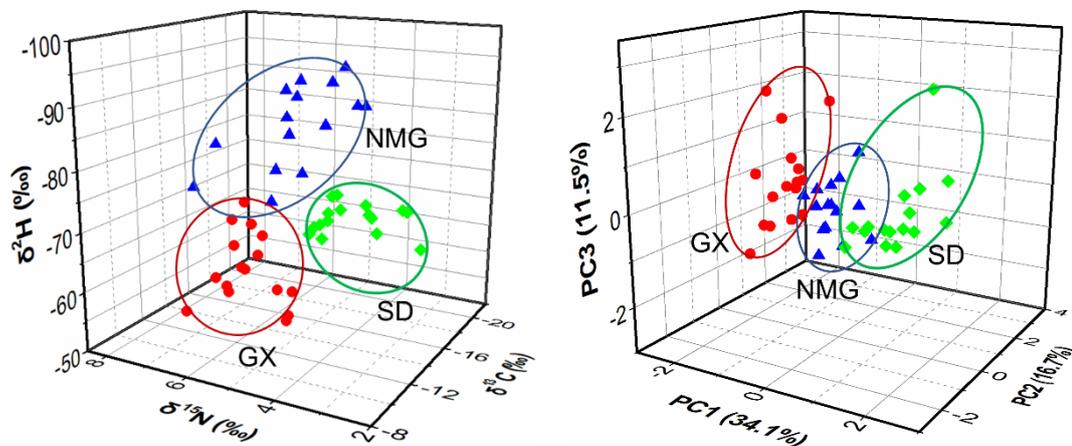


图 7 骨样中的稳定同位素和矿物元素在地区间均有明显的特征分布, (a)稳定同位素三维散点图, (b)矿物元素主成分三维散点图

### 参考文献

- 1 付海英, 耿俊霞, 杨洋, 等. 乏燃料干法后处理中的熔盐 减压蒸馏技术[J]. 核技术, 2018, 41(4): 040001
- 2 刘立志, 付海英, 刘忠英, 马继飞, 杜林, 唐晓星, 钱渊, 姚剑\*, 李玉兰\*. 高温 FLiBe 熔盐颗粒粒径分布特征研究. 核技术, 2020, 43(10)
- 3 Said M. Role and function of gelatin in the development of

- the food and non-food industry: A review[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 492: 012086
- 4 Di Jiang, Lin Du, Yanchuan Guo, Jifei Ma, Xiaoyun Li, Ling Han, Yisheng Xu\*, Yuan Qian\*. Potential Use of Stable Isotope and Multi-element Analyses for Regional Geographical Traceability of Bone Raw Materials for Gelatin Production [J]. Food Analytical Methods, 2020, 13(3): 762-769

# 辐照剂量可视化探测材料的开发

熔盐化学与工程技术部, 林健 陆黄杰 李子建

随着核能在我国能源格局中比重的持续增长和核科学与技术的快速发展, 核辐射防护和辐照灭菌等领域对于快速、精准的辐射剂量检测技术的需求与日俱增<sup>[1-6]</sup>。传统的电离室、闪烁体、半导体材料的辐射剂量计, 虽各自具备一定的优点, 但是依赖专业的实验设备对辐射剂量进行终端读取, 无法实现辐射剂量的实时、快速检测。例如, 热释光剂量计需要通过设定的温度曲线加热剂量片释放射线能量, 通过热释光剂量读出器进行剂量读取, 检测时间较长、无法做到实时读出剂量和实时剂量率的测量, 并且依赖昂贵、专业的实验设备对辐射剂量进行终端读取。闪烁体剂量计利用射线引起的闪烁体发光, 通过光电倍增器件将光信号转换成电信号, 对脉冲信号进行处理进而经过计算转换成剂量(率)值。但是转换过程中往往存在误差造成读取的剂量值不精确, 并且在高剂量辐射场中存在信号堆积现象, 不适合在高剂量辐射场中使用<sup>[7-14]</sup>。

因此本组率先将红绿蓝(RGB)三原色检测理念引入辐射剂量探测, 选用具有高射线阻滞系数的镧铜金属离子和三联吡啶羧酸配体制备出了一系列金属有机框架材料, 用于核辐射剂量的可视化检测。其中, 合成了一例罕见的集光致变色和光致荧光变色于一体的钍基纳米簇材料 Th-SINAP-100。该材料基于配体的荧光在不同剂量(1 到 80 kGy)辐射下发生从紫色、蓝色、蓝绿色、到绿色的转变, 相应的 RGB 颜色值中的 G 和剂量呈现优异的线性关系, 因此可直接用于辐射剂量的可视化定量(图 2a)。与目前商用美国 GEX 辐射定性指示标签相比, 辐照剂量检出上限提高了 8 倍。

本课题组还将此类材料的应用场景拓展到辐照成像中, 制备出了一大类镧系金属配位聚合物(ACS Appl. Mater. Interface, 2021, 13, 2745; Inorg. Chem. 2021, 60, 1359)。其中, TmTPC-1 由于有机配体分子间独特的  $\pi-\pi$  相互作用, 使其在 UV 或 X 射线作用下颜色由辐照前的无色变成辐照后绿色。利用此独特的双光致变色效应, 将该材料与聚偏氟乙烯(PVDF)制成混合基质薄膜, 可用于 X 射线的高分辨率成像(图 2b), 为柔性辐射探测领域的材料设计提供了新思路。

## 材料开发的关键技术路线

(1) 在辐射剂量计领域, 选用原子序数和质量数较高、具有更高辐射阻滞效率的镧铜系金属; 选

用联吡啶类光致发光基团配体, 构筑新型的金属有机杂化材料, 设计具有高灵敏度、高分辨率、宽检测限以及可视化定量的固体辐射剂量计, 目前还比较稀缺。对于金属有机杂化材料的结构可设计性, 可定向设计不同结构的剂量计材料, 对于不同射线剂量范围的检测具有颜色变化的响应。

(2) 由于辐射光致发光/变色材料在探测技术中新产生的荧光峰(RPL 峰)/吸收峰和原荧光峰/吸收峰能够被明显地区分, 相比于其他类型的传统固体剂量计材料, 有本征的吸收/荧光变色效应以及可视化定量识别辐射剂量的优势。

所设计材料技术优势包括(1)通过选择原子序数、辐射阻滞效率更高的金属节点构筑辐照光致发光/变色材料, 解决了传统材料阻滞效率低、发光量子产率低、灵敏度不够高、检测限范围窄的问题。(2)在金属有机杂化材料中引入联吡啶类光致发光/变色基团, 辐照产生新的光致荧光发射峰及吸收峰, 实现发光/变色晶体材料的颜色可视化微调, 解决了传统材料需要依赖专业的光学设备进行辐照剂量定量的问题。(3)通过构筑金属有机辐照光致发光材料, 利用结构可设计性原理, 设计出对不同射线的剂量范围具有不同变色响应的材料, 适用于不同的辐射探测环境。

针对探测材料的开发及技术路线如图 1 所示:

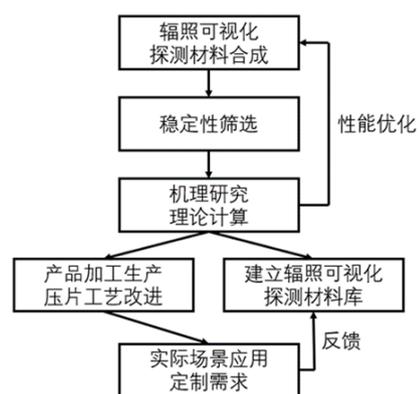


图 1 辐照探测材料开发技术路线

## 材料合成表征及测试

选择三联吡啶类衍生物, 探索其构型、官能团不同导致的光致发光/变色效应差异, 选取具有光致发光/变色性能三联吡啶类发光基团作为荧光发射中心与金属中心结合, 设计正交实验, 通过水热或

溶剂热等方法合成结构多样的金属有机杂化晶格材料，通过 X-射线单晶衍射获得晶体结构并解析，测试材料的热稳定性、辐照稳定性等。再进行辐照光致发光/变色性能测试，利用 X、 $\gamma$ 、 $\beta$  射线等对配体或材料样品进行辐照，在不同辐照剂量下测量晶体材料的紫外可见吸收光谱和荧光光谱变化，分析紫外吸收谱或荧光光谱特征峰的位移以及强度变化规律，进行线性拟合。

主要测试：TGA-DSC、 $^{60}\text{Co}$  放射源、电子加速器、X 射线闪烁体装置、X-射线单晶衍射、粉末 XRD、Craic UV-visible-NIR Microspectrophotometer system、IR、元素分析、SEM 等。

### 辐照变色机理研究

尝试获得辐照前后材料的单晶结构变化趋势（成键方式、键长、键角， $\pi$ - $\pi$  相互作用等），通过 EPR 分析辐照电离后是否产生自由基导致光学变化，以及自由基类型对光学变化的影响，利用红外光谱，拉曼光谱，粉末衍射等分析辐照前后的结构成键变化，再结合 DFT 计算、能级理论等计算模拟方法分析，讨论配体间以及配体与金属间的电子跃迁、分子间的相互作用等机理。通过理论结合试验的方式研究材料辐照光致发光/变色的机理。

### Th-SINAP-100 辐照剂量的可视化定量及 TmTPC-1 辐照成像研究

基于金属中心与配体光致变色基团的双向选择设计，将射线阻滞金属 Th 团簇节点和辐照变色基元通过自组装形成具有光致变色或光致荧光变色的金属有机杂化晶体材料。基于此材料，提出了一种基于红绿蓝（RGB）三原色的全新变色读出的方法，并根据该方法制作了辐照变色指示标签和膜材料（图 2a 和图 3）。研发辐照剂量可视化定量剂量计材料，可解决传统辐射剂量计依赖专业的实验设备、读取流程冗长复杂、探测精度不够的问题。该工作 Visible Colorimetric Dosimetry of UV and Ionizing Radiations by a Dual-Module Photochromic Nanocluster 目前已被 Nat. Commun. (NCOMMS-20-35587B)接收，申请了相关专利（申请公布号：CN111830550A）。

TmTPC-1 则具有灵敏的辐照变色效应，进一步设计了辐照变色晶体膜材料，进行了 UV 成像实验，并在上海光源 BL14W1 线站进行 X-射线源辐照检测。该研究极大地丰富剂量计材料的多样性，此便携式晶体膜材料适用于多种实际辐照环境（图 2b）。

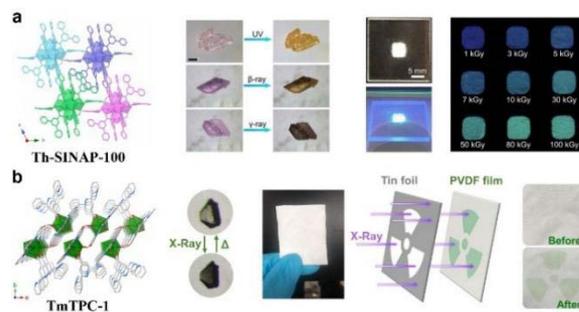


图 2 (a) Th-SINAP-100 辐照剂量的可视化定量; (b) TmTPC-1@PVDF 混合基质薄膜用于 X 射线的高分辨率成像。

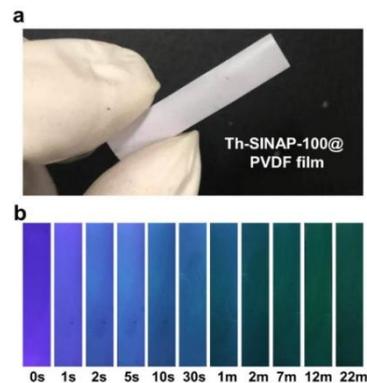


图 3 Th-SINAP-100 晶体变色膜

### 可视化辐射探测材料研究意义

新型的金属有机杂化晶格材料引入可视化辐射探测材料领域，相较于传统的复合材料、无机掺杂材料，金属有机杂化晶格材料结构设计性强，因此材料的辐照光致发光/变色性能的可设计性更强，对辐照剂量的光致发光/变色响应更灵敏，为新型辐照光致发光/变色材料的研发提供了新的思路。通过结构的调控实现材料对吸收剂量的变色响应，实现颜色可视化定量微调，解决了传统材料需要依赖专业的光学设备进行辐照剂量定量的问题。

### 参考文献

- 1 Tao, Y., *et al.* ACS Appl. Mater. Interfaces., 2020, **12**: 22499-22506
- 2 Xie, J., *et al.* Angew. Chem. Int. Ed., 2017, **56**: 7500-7504
- 3 Li, X., *et al.* J. Am. Chem. Soc., 2020, **142**: 6625-6637
- 4 Thirimanne, H.M., *et al.* Nat. Commun., 2018, **9**: 2926
- 5 Wei, H., *et al.* Nat. Commun., 2019, **10**: 1066
- 6 Zhang, Y., *et al.* Nat. Commun., 2020, **11**: 2304
- 7 Knoll, G.F. Radiation Detection and Measurement., 2010, Wiley
- 8 Liang, C., *et al.* Angew. Chem. Int. Ed., 2020, **59**: 11856-11860
- 9 Morad, V., *et al.* J. Am. Chem. Soc., 2019, **141**: 9764-9768
- 10 Wang, Y., *et al.* J. Am. Chem. Soc., 2019, **141**: 8030-8034
- 11 Chen, Q., *et al.* Nature, 2018, **561**: 88-93
- 12 Kim, Y.C., *et al.* Nature, 2017, **550**: 87-91
- 13 Butson, M.J., *et al.* Mater. Sci. Eng. R Rep., 2003, **41**: 61-120
- 14 Devic, S., *et al.* Phys. Med., 2016, **32**: 541-556

# 金属材料在高温熔盐自然循环腐蚀回路中的动态腐蚀

熔盐化学与工程技术部, 杨新梅 刘华剑 陈冰川

高温熔盐在熔盐堆等先进核能系统和太阳能光热发电系统中具有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。高温熔盐具有腐蚀性, 是影响结构材料使用寿命的关键因素。镍基合金、不锈钢等金属材料在高温熔盐中的腐蚀主要是由杂质驱动的腐蚀<sup>[5-8]</sup>, 与金属元素-熔盐界面的化学反应密切相关, 这种界面的化学反应驱动金属材料内部的金属元素向表面扩散并被腐蚀进入熔盐。根据扩散公式, 随着温度升高扩散系数增加。因此不同温度区域金属元素扩散速率的差异以及腐蚀产物在熔盐中平衡溶解浓度差异可能会导致不同温度区域腐蚀速率差异。高温区域的腐蚀通常比低温区严重。部分区域腐蚀加剧可能会产生较严重后果, 例如腐蚀产生孔洞导致泄露和断裂, 流动熔盐使腐蚀产物由高温端向低温段迁移并发生沉积导致局部区域发生堵塞, 例如图 1 所示的管道, 腐蚀产物在冷端沉积导致管道直径缩小~75%<sup>[9]</sup>, 如图 1 所示。

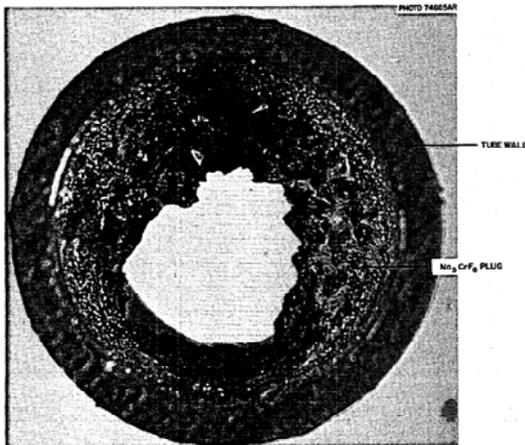


图 1 腐蚀产物在冷端沉积<sup>[9]</sup>

熔盐堆和熔盐太阳能光热发电系统是非恒温流动熔盐体系。熔盐杂质、温度、熔盐流速、系统密封性等多重因素的耦合作用是影响材料在熔盐中腐蚀的主要因素。因此, 熔盐化学与工程技术部熔盐腐蚀组通过分析熔盐堆和熔盐太阳能光热发电系统的运行工况, 设计了能够模拟运行工况的动态腐蚀装置, 并在该装置上开展了动态腐蚀研究, 为熔盐堆和熔盐储能工程提供了关键的工程数据。

## 1. 自然循环动态腐蚀装置研发

图 2 是一台自主研发的自然循环腐蚀装置, 主要由回形管道、熔盐罐、加热与温控系统、气路与

真空系统、熔盐转运系统、取样系统组成。熔盐密度随着温度升高而线性减小, 由热端和冷端管道中熔盐密度不同产生重位压头差使熔盐在回路中产生环形流动。采用实验检测和热工水力计算确定熔盐在图 2 所示装置回形管道中是流动状态。管道的形状、尺寸、熔盐粘度和密度、系统最高温度和最大温差是影响熔盐流速的主要因素。在最高温度 660℃, 最大温差=100℃, FLiBe 盐在图 2 所示回形管道中的平均流速为 3.9 cm/s。ORNL 自然循环腐蚀回路的温差为 0.762 -3.556 cm/s<sup>[10]</sup>。



图 2 自主研发的自然循环动态腐蚀装置

通过实验验证确定该装置在正常运行时的温差非常稳定, 每一个监测点的温度波动范围仅±1℃。但是发生由腐蚀产物导致的堵塞后, 回路的温差会发生变化, 导致冷端温度降低。研究结果表明通过调节热端温度可以调节最大温差范围为: 20-150℃。该装置可以模拟熔盐流动与温差环境, 可以用于研究温度差异与熔盐流动协同效应对金属材料和非金属材料在高温液态介质(氟化物熔盐、氯化物熔盐、硝酸盐、液态金属等)中腐蚀的影响机制研究。目前已研制了 9 条自然循环动态腐蚀装置, 如表 1 所示。该装置已被用于 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐、NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub> 熔盐的动态腐蚀研究(如表 2 所示), 其中 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐动态腐蚀装置已连续运行了 6 000 多小时, 目前仍然在安全运行, 揭示该装置具备了模拟温差和熔盐流动环境的能力, 可以被用于温差腐蚀研究, 是一种稳定、可靠的动态腐蚀实验装置。

表 1 已研发的自然循环动态腐蚀装置

熔盐种类	数量	已连续运行时间
FLiBe	1	>11000 小时
NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub>	8	>7000 小时

表 2 在自然循环装置中已开展的动态腐蚀研究

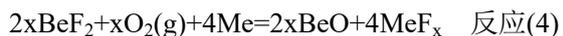
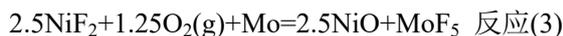
开展的动态腐蚀研究	腐蚀时间(小时)
GH3535 在 FLiBe 熔盐中的动态腐蚀研究	1 000
GH3535 在 FLiBe 熔盐中的动态腐蚀调控	1 000
不锈钢在 FLiBe 熔盐中的动态腐蚀研究	1 000
覆盖气压力变化对镍基合金在 FLiBe 熔盐中动态腐蚀的影响	3 000 (正压、常压、负压)
焊接试样在 FLiBe 熔盐中的动态腐蚀	1 000
焊接试样在 FLiBe 熔盐中的动态腐蚀	3 000
高温合金在 FLiBe 熔盐中的动态腐蚀	1 030
NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> 动态腐蚀	1 000-5 000
在动态腐蚀装置覆盖气体、液-气界面、熔盐中腐蚀差异	100-1 000

## 2. 高温熔盐动态腐蚀研究

图 3 是镍基合金 GH3535 在 FLiBe 动态腐蚀装置高温端腐蚀后的截面形貌，显示低温区样品腐蚀后包含腐蚀层和沉积层。图 4 的元素分布图显示低温区腐蚀试样包含两个腐蚀区域：(1) Ni 元素富集，Cr、Fe、Mo 元素流失的区域；(2) Cr、O 元素富集，Fe、Ni、Mo 元素流失的区域，揭示低温区的 GH3535 合金发生了两个腐蚀过程：

(1) 由熔盐中镍离子驱动的腐蚀：

镍离子与金属元素反应，如反应 (1) 和 (2) 所示，驱动熔盐中 Cr、Fe 元素流失。熔盐中镍离子不能与 Mo 元素发生腐蚀反应。但是如果存在 O<sub>2</sub>，镍离子可以与 Mo 元素反应，如反应(3)所示。如果存在 O<sub>2</sub>，熔盐中 BeF<sub>2</sub> 也会驱动 Cr、Fe、Ni、Mo 腐蚀，如反应 (4) 所示。



(Me=Cr、Fe、Ni、Mo)

(2) 由铬离子和 O<sub>2</sub> 驱动的腐蚀：

如反应(5)所示，铬离子、O<sub>2</sub> 与金属元素反应形成金属离子和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，使腐蚀区域的 Cr 和 O 元素增多、金属元素 (Fe、Ni、Mo) 减少。采用 XRD 分析发现冷端腐蚀样品表面的沉积物含有 BeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>，可能主要由反应 (4) 形成的 BeO 和反应 (5) 形成的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应形成。



(Me=Fe、Ni、Mo)

图 5 是镍基合金 GH3535 在 FLiBe 动态腐蚀装置高温端腐蚀后的截面形貌，显示 GH3535 腐蚀损伤层深度~3μm，比图 3 所示高温区域的腐蚀严重。图 6 是镍基合金 GH3535 在 FLiBe 动态腐蚀装置高温端腐蚀后的元素分布图，显示元素扩散层深度为~4μm，其中包含两个元素扩散区域：(1) Ni 元素富集，Cr、Fe、Mo 元素流失的区域；(2) Mo 元素富集，Cr、Fe、Ni 元素流失的区域。图 6 所示元素深度分布揭示高温区域 GH3535 也发生了两个腐蚀过程：

(1) 由镍离子驱动的腐蚀（与低温端腐蚀机制相同）

(2) 由钼离子驱动的腐蚀：

低温端镍基合金中的钼元素向外迁移，与铬离子和 O<sub>2</sub> 反应形成钼离子。钼离子随熔盐流动迁移至高温端与镍基合金中的 Cr、Fe、Ni 元素反应形成钼单质和金属离子（如反应 (6) 所示），使镍基合金中的金属元素向外扩散进入熔盐。

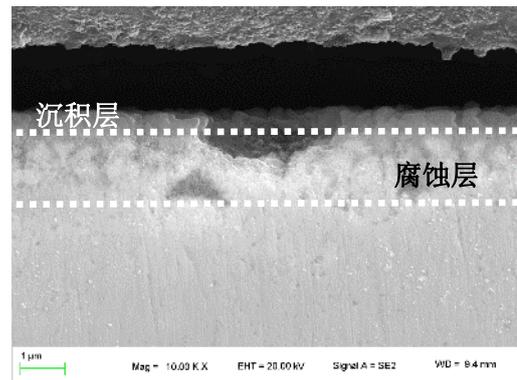


图 3 低温区 GH3535 腐蚀后截面形貌

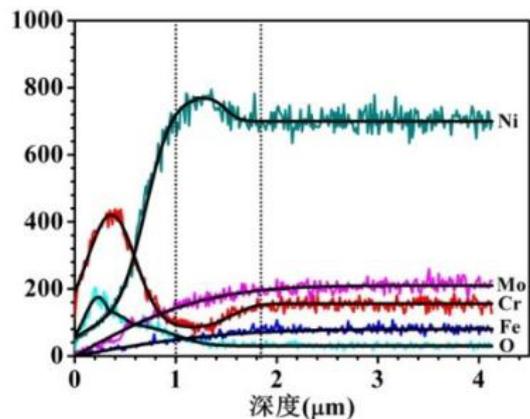


图 4 低温区 GH3535 腐蚀后截面元素分布图

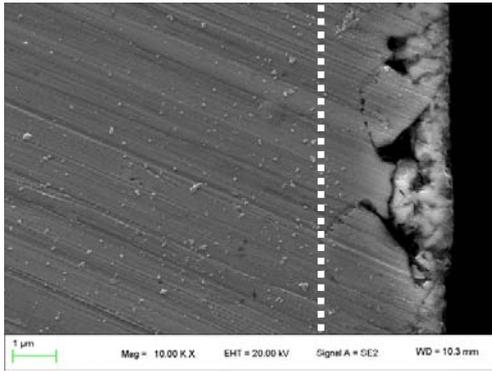


图5 高温区 GH3535 腐蚀后截面形貌

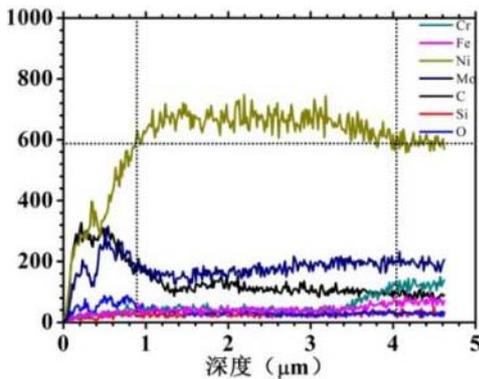


图6 高温区 GH3535 腐蚀后截面元素分布图

上述结果揭示在熔盐流动系统中低温区的腐蚀与高温区的腐蚀不同：

(1) 高温区域的腐蚀比低温区域腐蚀严重：通过反应动力学计算发现随着温度升高反应性增加，因此对于由相同机制驱动的腐蚀，高温区域会比低温区域的腐蚀严重。

(2) 高温区域没有发生明显沉积，低温区域表面存在明显沉积层。

FLiBe 熔盐的腐蚀性较弱，经过近 7000 小时动态腐蚀实验过程中未发现由腐蚀产物沉积造成管道堵塞问题。氯化物熔盐的腐蚀性较强，在氯化物熔盐动态腐蚀装置中曾发生过由较多腐蚀产物在冷端沉积造成管道堵塞问题，如图 7 所示。因此在熔盐堆和熔盐太阳能光热发电系统中应警惕由腐蚀产物在冷端管道沉积产生的堵塞问题。同时，在我们研究中发现 在 FLiBe 熔盐中会形成腐蚀产物—— $\text{BeCr}_2\text{O}_4$ ，在  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2$  熔盐中会形成  $\text{MgO}$ ，因此在熔盐堆和熔盐太阳能光热发电系统中应警惕由流动熔盐中颗粒物对结构材料的冲/磨蚀。



图7 腐蚀产物在冷端沉积造成管道堵塞

### 参考文献

- 1 S. Delpech, C. Cabet, C. Slim, G. Picard, Molten fluorides for nuclear applications, *Mater. Today*, 2010, **13**: 34
- 2 D. F. Williams, L. M. Toth, K. T. Clarno, Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high-temperature reactor (AHTR), 2006, report ORNL/TM-2006/12
- 3 A. Maccari, D. Bissi, G. Casubolo, F. Guerrini, L. Lucatello, G. Luna, A. Rivaben, E. Savoldi, S. Tamano, M. Zuanella, Archimede solar energy molten salt parabolic through demo plant: a step ahead toward the new frontiers of CSP, *Energy Procedia*, 2015, **69**: 1643
- 4 W. Ding, T. Bauer, Progress in research and development of molten chloride salt technology for next generation concentrated solar power plants, *Engineering*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.027>
- 5 V. Pavlik, M. Kontrík, M. Boca, Corrosion behavior of Incoloy 800H/HT in the fluoride molten salt FLiNaK+ $\text{MF}_x$  ( $\text{MF}_x=\text{CrF}_3, \text{FeF}_2, \text{FeF}_3$  and  $\text{NiF}_2$ ), *New J. Chem.*, 2015, **39**: 9841
- 6 H. Yin, J. Qiu, H. Liu, W. Liu, Y. Wang, Z. Fei, S. Zhao, X. An, J. Cheng, T. Chen, P. Zhang, G. Yu, L. Xie, Effect of  $\text{CrF}_3$  on the corrosion behaviour of Hastelloy-N and 316L stainless steel alloys in FLiNaK molten salt, *Corros. Sci.*, 2018, **131**: 355
- 7 Y. Zhu, J. Qiu, J. Hou, W. Liu, H. Chen, H. Ai, G. Yu, J. Wang, X. Zhou, Effects of  $\text{SO}_4^{2-}$  ions on the corrosion of GH3535 weld joint in FLiNaK molten salt, *J. Nucl. Mater.*, 2017, **492**: 122
- 8 F. Ouyang, C. Chang, J. Kai, Long-term corrosion behaviours of Hastelloy-N and Hastelloy-B3 in moisture-containing molten FLiNaK salt environments, *J. Nucl. Mater.*, 2014, **446**: 81
- 9 J. W. Koger, A. P. Litman, Compatibility of Hastelloy N and Croloy 9M with  $\text{NaBF}_4\text{-NaF-KBF}_4$  (90-4-6mol%) fluoroborate salt, 1969, Report ORNL-TM-2490
- 10 J. W. Koger, Alloy compatibility with LiF- $\text{BeF}_2$  salts containing  $\text{ThF}_4$  and  $\text{UF}_4$ , 1972, Report ORNL-TM-4286

# 高温熔盐体系设计及其热物性研究

熔盐化学与工程技术部, 唐忠锋 阴慧琴 王子睿 李雪娇 李娜 刘伟华 刘崎

熔融盐(简称“熔盐”)具有使用温度范围广、工作压力低、经济性好、传储热性强及化学性能稳定好等优点,作为一种理想的中高温传蓄热工质在熔盐反应堆核能系统、太阳能热发电、储能等领域具有广阔的应用前景。但系统的应用场景不同直接导致其对熔盐体系选择和热物性的需求不同。熔盐直接决定着系统的工作温度、输出功率、发电效率和安全性,因此开展高温熔盐体系设计和热物性研究是工程设计、安全分析、正常运行的重要前提,至关重要。

钍基熔盐堆(TMSR-LF1)用高温熔盐方面主要开展燃料盐  $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  和冷却剂  $\text{LiF-BeF}_2$  等熔盐体系设计优化、物性测试方法优化和数据评估等内容,设计研发了十多种 TMSR-LF1 用高温熔盐配方,完成 3000 多个数据测试与评估。针对太阳能热发电和储能用熔盐介质方面,开展了高温氯化物熔盐体系、硝酸盐熔盐体系及高温互异体系的设计优化、制备工艺、物性测试方法优化和数据评估等内容,设计了 30 多种功能化储能盐,开发了制备工艺及物性测试方法。优化 60 吨/年氯化熔盐净化制备放大工艺,建成 60 吨/年的  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2$  净化制备生产装置,试生产 3.5 吨高纯低腐蚀的  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2$  熔盐,通过取样实测比对,实现其热物性的精准测试和评估。以上研究结果为熔盐堆临界、安全运行提供了数据,是实现熔盐堆安全运行的保障和重要前提。储能用熔盐测试结果为太阳能热发电和储能提供了候选体系,实现其应用拓展。

## 高温熔盐体系的设计

通过相图( Calculation of PhAse Digram),并借助第一性原理计算、经验预测和实验测试方法等手段建立了高温熔盐体系设计与优化的最佳方法。设计了针对不同应用场景的多元高温熔盐体系。开发  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2$  熔盐与 Solar Salt 熔盐相比,具有更高的相变焓、较低的储能成本,为熔盐储能中蓄热介质的选择提供了备选(见图 1)。

## TMSR-LF1 用燃料盐及冷却剂的热物性研究

高温下燃料盐测试无标准品、无成熟测试设备、高温实验操作困难,给物性数据获取带来极大难度。 $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  涉钍、涉放,且  $\text{ZrF}_4$  蒸气压较大、 $\text{UF}_4$  遇水易沉淀,这对燃料盐的测试调整更大。成功建立物性测试方法,实现不同配方。

$\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  燃料盐的密度、粘度、比热及导热等测试,测试结果见表 1。

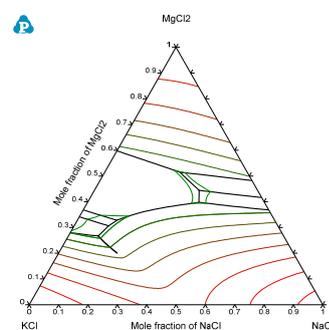


图 1  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2$  体系的相图

表 1 燃料盐  $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  物性测试数量汇总

$\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$ 测试数量(个)	密度	粘度	比热	导热
配方 1	1013	47	21	5
配方 2	461	54	21	5
配方 3	298	95	21	5
配方 4	400	---	21	---
配方 5	395	---	21	---
合计(个)	2567	196	105	15

## 太阳能热发电及储能用熔盐的热物性研究

基于应有场景的低成本高性能要求,采用低成本工业级  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,通过配方设计优化和物性测试分析,得到  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2$  配方,满足其需求(见图 2)。

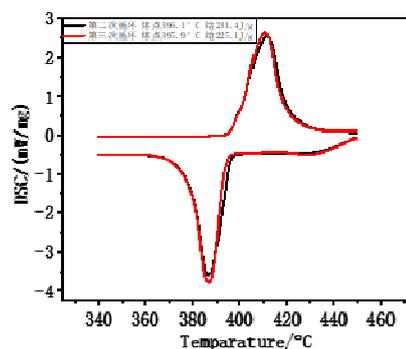


图 2 工业级  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  制备  $\text{NaCl-KCl-MgCl}_2$  的 DSC 曲线

## 参考文献

- 1 Corrosion Science, 2020, **166**: 108473
- 2 Corrosion Science, 2020, **168**:108581
- 3 Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, **210**:110504.
- 4 Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, **218**: 110756.
- 5 Calphad, 2020, **70**: 101783

# 熔盐化工研究及工程化进展

熔盐化学工程与技术部, 汤睿 唐忠锋

熔盐以其独特的化学稳定性、较好的材料相容性、较低的蒸汽压等特点, 使得其在高温低压工况下具有优良的服役性能, 成为熔盐堆和高品位热能存储与转化中的介质材料。熔盐化工课题组围绕高温熔盐的工程化制备与应用这一主题, 开展高温液相体系的非均相(气液、固液)传质机制和反应动力学行为研究; 开发核级氟盐、高纯级氟盐等高纯熔盐的制备与纯化工艺, 并研制适用于高温气液反应的氟盐和高纯级氟盐的制备提纯中试生产线; 通过中试生产线的调试, 验证了反应动力学模型, 为熔盐制备工艺进一步工程放大提供基础。

## 高温熔盐的传质行为和反应动力学研究

依据熔盐堆的需求, 选取 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐作为研究对象, 采用理论计算的方法研究了其微观结构和扩散特性; 采用实验和反应工程分析相结合的方法研究了其与氟化氢气液非均相反应的动力学行为。

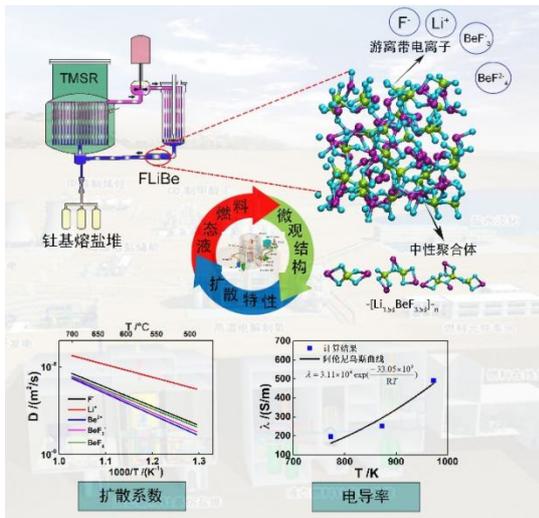
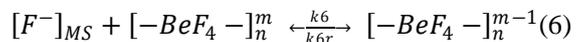
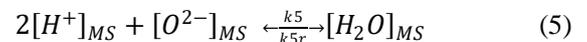
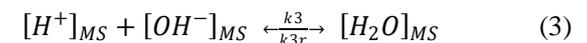
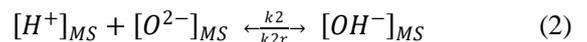
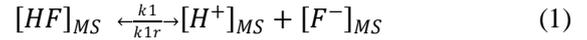


图1 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐的微观结构及其扩散特性

通过基于 BLYP 交换关联函数和 GTH 膺势的 CPMD 分子动力学模拟, 研究了 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐在不同温度下的结构特性和扩散行为。分析了 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐网络结构中各种配体的形成机理并获得数量比例, 在考虑网络结构的影响下, 计算了自扩散系数和电导率(如图1所示)。结果表明 Be<sup>2+</sup> 具有较强的络合能力, 易形成中性网络聚集体, 且其数量随温度的增加而减少; 液态 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐中除了包含聚集体, 还包含游离的 F<sup>-</sup>、Li<sup>+</sup>、BeF<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 BeF<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 而非完全游离的 F<sup>-</sup>、Li<sup>+</sup> 和 Be<sup>2+</sup>。基于微观结构分析获得的游离 F<sup>-</sup>、Li<sup>+</sup>、BeF<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 BeF<sub>4</sub><sup>2-</sup> 带入能斯特-爱因斯坦

方程计算电导率, 所得电导率与实验结果相近, 其与温度的关系式符合阿伦尼乌斯模型。对 LiF-BeF<sub>2</sub> 净化体系进行反应工程分析,

采用基于碰撞反应理论的准基元方法, 分析了熔盐净化过程的反应过程:



其中步骤(1)和(6)为热力学控制, (2)~(5)为动力学控制

$$(1) \text{ 的化学平衡 } K_1^\ominus = \frac{c_{H^+} \cdot c_{F^-}}{c_{HF}}$$

$$(6) \text{ 的化学平衡 } K_6^\ominus = \frac{c_{[-BeF_4^-]_n^{m-1}}}{c_{F^-} \cdot c_{[-BeF_4^-]_n^m}}$$

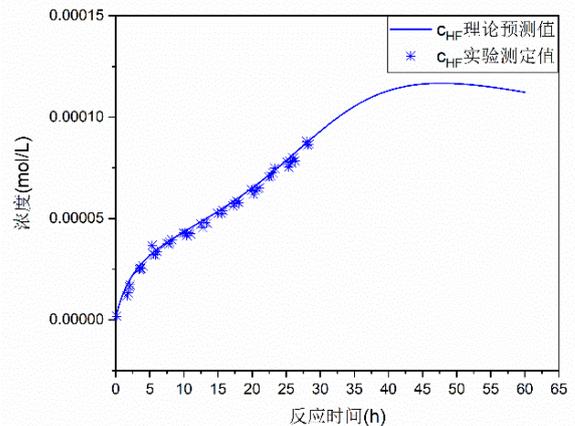
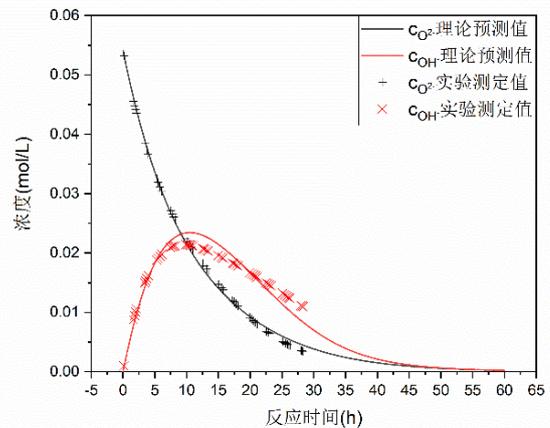


图2 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐净化体系关键物质浓度随时间变化的理论预测曲线及实验数据对比图

通过实验数据关联，求解线性方程组，获得了关键物质随时间变化的常微分方程组通式：

$$\frac{dc_{[O^{2-}]}}{dt} = 0.387c_{[OH^-]} - 0.096c_{[O^{2-}]^2} \quad (7)$$

$$\frac{dc_{[OH^-]}}{dt} = 0.096c_{[O^{2-}]^2} - 0.387c_{[OH^-]} - 1699.3c_{HF} \cdot c_{OH^-} \quad (8)$$

$$\frac{dc_{[HF]}}{dt} = 5.27 \times 10^{-3} - 2.56 \times 10^{-5}t - 48.53c_{[HF]} + 1699.3c_{[H^+]}c_{[F^-]} \quad (9)$$

$$\frac{dn_{H_2O}}{dt} = 1699.3c_{HF} \cdot c_{OH^-} \quad (10)$$

通过上述常微分方程组成功预测任意时刻熔盐净化体系内关键物质的浓度变化，获得反应动力学曲线（如图 2 所示），解决了工艺放大设计过程中的参数选取问题。

对于氯化物熔盐制备过程中，高温固液反应动力学问题，通过基于不同净化时间采样分析结果，采用微分法确定了净化反应过程的宏观反应级数和反应常数，以此建立了净化反应过程的宏观动力学模型（公式 11），为该工艺的工程放大提供基础。

$$\frac{1}{c_A^2} - 6.74 \times 10^{-7} = 4.542 \times 10^{-6}t \quad (11)$$

### 高温熔盐制备净化工艺开发及中试生产线建设

高温熔盐制备净化的工艺目的是除去其中的腐蚀性杂质，其中部分氧化性杂质很难通过原料制备阶段的常规方法除去，在高温工况下，这些氧化性杂质溶解其中，熔盐化工专业组通过开发高温气液、固液和液液反应的工艺将其中的氧化性杂质以固相沉淀、气相挥发的形式除去。表 1 显示了典型的 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐经过经过工艺处理后，所得产品的质量，经过腐蚀评估，完全处于腐蚀限值范围内。

表 1 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐净化后关键杂质含量与腐蚀限值

	Cr	Ni	Fe	Mo	Ca	Mg	Al	Ba	Na	Si	O
限值	30	20	150	5	100	100	100	50	300	150	200
测量	5.0	8.0	4.7	0.5	25.7	2.4	18.9	23.5	61.9	13.6	107

高温熔盐制备净化工艺涉及的化学反应体系相对于传统化工而言，属于一个全新的课题，因此不仅要解决其中的化学反应工程问题，而且对于工程放大后需要解决的反应器的研制及连接形式、超高温液相物料在反应器之间的物料传输、在线取样及过程监控、产品转运、原料及废料的处理等系统集成技术是高温熔盐制备技术工程化不可或缺的关键

技术。

在工艺基础上分别设计研发了百公斤级氯化物熔盐和氟化物熔盐制备净化中试装置。

百公斤级氯盐制备净化中试装置生产了高纯低腐蚀的超高温氯化物熔盐 3.5 吨，批次抽检后样品在第三方实验室进行了测试和定期抽检，样品中的杂质含量满足设计要求。抽检后样品的腐蚀测试结果表明，该熔盐对 316 不锈钢合金的年腐蚀率小于 60 微米。装置实物如图 3 所示



图 3 氯化物熔盐制备净化中试生产线装置图（上：百公斤级装置；下：吨级装置）

百公斤级氟化物熔盐制备净化中试生产线服务于 TMSR-LF1，主要用于制备反应堆的冷却剂 LiF-BeF<sub>2</sub> 熔盐及核燃料溶剂 LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub> 熔盐。熔盐化工专业组完成了该装置的设计、建造、安装调试，成功获得了工程放大工艺验证及操作参数，并取得杂质离子含量合格的冷却盐。相关工作作为 TMSR-LF1 重要工程进展在所主页报道，装置照片如图 4 所示。



图 4 百公斤级氟化物熔盐制备净化中试装置图

# 熔盐质量控制

熔盐化学与工程技术部, 葛敏 刘洪涛

熔盐质量与反应堆安全息息相关。熔盐质量控制与监测贯穿着熔盐生产工艺研究、净化制备、堆内服役及回收重构全过程。现阶段, 熔盐质量控制的主要研究内容包括熔盐离线分析方法开发和在线检测技术研发, 以满足 TMSR-LF1 建设过程中熔盐质量控制的需求, 同时为后期商业堆熔盐质量的在线监测积累技术基础。此外, 本组还搭建了高温核磁共振检测系统, 用于熔盐微观结构研究, 为熔盐质量控制提供理论依据和新的思路。

## 熔盐离线分析方法开发

无机材料分析技术和标准多种多样, 但是堆用氟化物熔盐却处于无标准前处理方法、无标准分析方法和无标准参考物质的三无状态。离线分析方法开发的任务是建立熔盐前处理流程, 开发相关分析方法, 并进一步开展方法标准化和标准物质研制。目前针对 TMSR-LF1 原料盐和冷却盐, 已建立了氧、阴阳离子和元素含量等多种定量分析方法。

**氧含量分析方法:** 前期基于惰气熔融红外吸收光谱法, 建立了氟化物熔盐中总氧含量的定量测试方法, 对于 LiF 和 FLiNaK 中 0.02wt% 水平总氧含量的检测不确定度在 15% 左右。由于原料和生产工艺的原因, ZrF<sub>4</sub>、FLiBe 和 FLiBeZr 等氟化盐中可能存在 ZrO<sub>2</sub> 和 BeO, 其熔点分别为 2700°C 和 2380°C。采用已有方法, 高熔点氧化物中的氧不能完全释放, 影响检测结果的准确度。为此, 从分析功率、助熔剂、积分时间等方面对已有分析参数进行了优化。实验结果表明, 在分析功率 4000W 和镍篮助熔条件下, FLiBe 中 0.15wt% BeO 和 FLiBeZr 中 0.1wt% ZrO<sub>2</sub> 的测量回收率在 90%~110% 范围内, 符合定量分析要求。在此基础上, 通过多次重复性实验、实验室内外人员比对等方式进行了方法确认, 精密度和正确度满足工程样品分析需求。目前已形成内部规范, 应用于生产过程 TMSR-LF1 冷却盐中氧含量检测。

**元素分析方法:** 熔盐的元素分析包括主量和痕量元素分析, 用于生产过程中快速定量熔盐的配比和杂质含量。基于电感耦合等离子体光谱(ICP-OES)和质谱(ICP-MS)技术, 针对原料盐 LiF、BeF<sub>2</sub>、ZrF<sub>4</sub>、冷却盐 FLiBe、基盐 FLiBeZr 和添加盐 FLiU 开展了样品前处理和 ICP 检测干扰消除的研究。根据熔盐组成和物化性质的不同, 研究消解方式、体系、时间和温度对检测结果的影响, 确保氟化盐中的难溶物如稀土元素完全溶解, 挥发物如硼损失最

低。从加标回收率看, 样品前处理方法是可靠的。根据干扰来源的不同, 研究不同熔盐体系产生干扰的原因, 采取相应措施, 如选择合适谱线, 优化分析参数, 匹配基体等消除干扰影响。通过选择激发能相近的内标元素进行校正的方法, 初步解决了主量元素定量分析时发射光谱强度随时间波动的问题。在上述研究的基础上, 建立了原料盐 LiF、BeF<sub>2</sub>、ZrF<sub>4</sub> 和冷却盐 FLiBe 中杂质元素定量分析方法, 开展了实验室内方法确认, 并积极与外部实验室进行数据比对, 测量结果一致, 验证了分析方法的准确度和可靠性。

围绕原料盐 LiF、BeF<sub>2</sub>、ZrF<sub>4</sub> 和冷却盐 FLiBe 的质量检测, 目前已发布 19 份内部分析规范。在工艺研究上用于判断生产工艺优劣, 明确工艺优化方向, 验证优化工艺参数; 在工程上用于 LF1 原料盐氟化锂和氟化铍的质检, 基盐产品均匀性分析, 冷却盐质量检测。

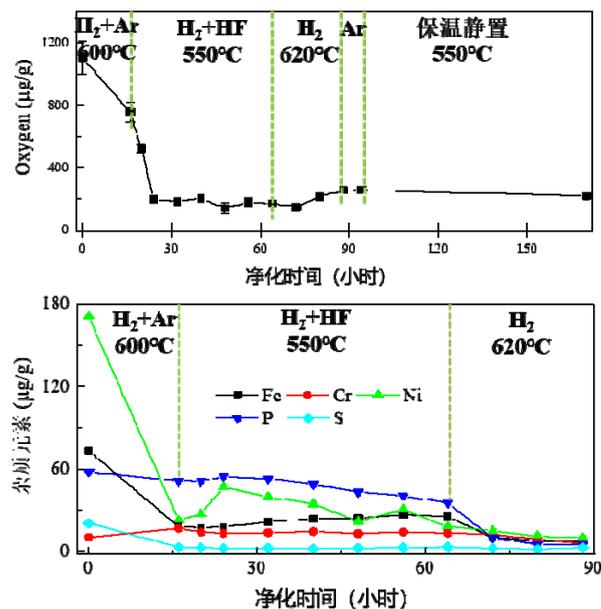


图1 H<sub>2</sub>-HF 法制备 FLiBe 熔盐过程质量监测

为进一步提高检测数据的准确度与可靠性, 围绕质量控制六要素“人机料法环测”, 开展了检测实验室认可与计量认证工作, 获得了 CMA 资质, 提高了规范性和准确性。同时, 借助检测中心平台, 定期组织熔盐分析相关能力项参加外部的实验室比对、测量审核和能力验证, 均获得满意评价。基于计量认证质量体系, 建立了武威熔盐分析实验室, 为 LF1 熔盐生产和堆运行中熔盐质量分析提供技术保障。

## 熔盐在线检测技术研发

熔盐质量在线检测的困难与挑战在于对高温、强腐蚀、高放射性密闭容器中熔盐的质量进行在线检测。目前在研的在线或原位检测方法包括紫外-可见/红外光谱法，激光诱导击穿光谱法和质谱法，为实现在线检测技术的从无到有积累技术基础。

激光诱导击穿光谱法 (LIBS)：一种化学多元素分析方法，主要用于熔盐成分和浓度的实时在线定性定量分析，其原理有利于远程控制。在前期对实验参数（激光脉冲能量、延迟时间、焦深）优化、样品温度对光谱的影响以及液态熔盐中元素定标研究的基础上，通过设备改造将 LIBS 仪器与腐蚀回路结合起来，开展回路中熔盐质量的在线检测工作，目前已完成设备搭建（图 2）。

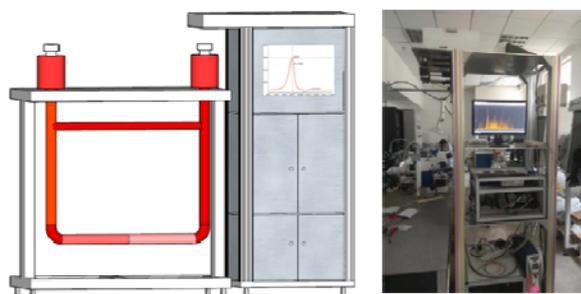


图 2 腐蚀回路熔盐在线检测设备示意图和装置图

红外光谱法：作为红外激光光谱技术之一，可调谐半导体激光吸收光谱在熔盐质控中主要用于监测气体中痕量组分的含量。作为熔盐净化过程中关键的工艺气体，HF 气体中的水含量直接影响着熔盐净化效果。由于 HF 气体的强腐蚀和强吸水性，常规的气体分析设备无能为力。通过实验摸索和研究设计，基于可调谐半导体激光吸收光谱技术成功研制了微量水分析系统，其光吸收检测池采用了内腔式隔离设计（图 3），隔离了 HF 气体对检测器件的腐蚀，同时也避免了环境中的水分对检测的干扰。

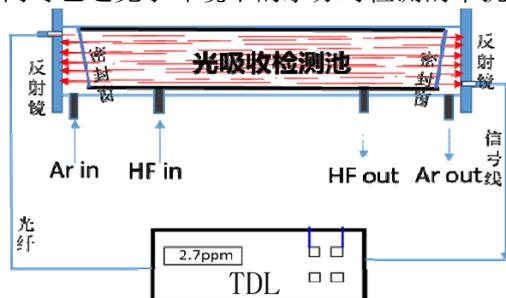


图 3 可调谐半导体激光吸收光谱仪

与实验室内熔盐净化装置结合，实现了对工艺过程中高纯 Ar、无水 HF 气体及含 HF 尾气中微量水的检测。实验所用瓶装氩气中水含量为 2.0 ppm，六次测量相对标准偏差为 15%；无水氟化氢气体中水含量为  $41.8 \pm 0.3$  ppm；根据 HF 尾气中微量水含量

推测出质量约为 200g 的 FLiBeZr 在净化过程中共去除约 0.274g 水（以氧计，共 0.12%），与净化前后熔盐样品氧含量检测数据基本吻合。在 2019 年 7 月至 10 月期间，成功将该分析系统应用于熔盐泵热工水力台架流经回路储罐的尾气中水含量的在线连续监测。2019 年 12 月又将其应用于仿真堆 (SF0) 回路覆盖气中水含量的连续监测。这些工作为后续 LF1 工程气体中水含量在线监测奠定了基础。

紫外-可见光谱法：主要用于分析、测定并推断熔盐的组成、含量和结构。在前两代高温紫外光谱仪设计发展基础上，为进一步集成化，设计了更为小巧便捷的样品加热装置（见图 4），采用铜质比色皿支架，并将其直接与加热器固定，以保证传热效率和均匀性。同时缩短光路以减小紫外光在空气中因吸收导致的能量损失，整套光路系统可通过一块  $80 \times 20 \text{ cm}^2$  的光学平板进行固定。集成化的光谱使高温熔盐实验可在手套里完成，避免熔盐与空气接触；同时光谱仪整体性能保持不变：光源波长范围：200 nm~2500 nm；温度控制范围：25~800℃。

基于第三代高温原位紫外可见光谱仪，开展了熔融态下氟化物熔盐中氟负离子的运动模式研究。实验和理论计算表明，650℃ 熔融状态 FLiNaK 在 200~300nm 处的强吸收峰，源于自由 F 的电子跃迁。而 FLiBe 由于形成了  $[\text{BeF}_4]^{2-}$ ，F 的电子被固定，难以在紫外-可见区域跃迁，因此 600℃ 熔融状态的 FLiBe 紫外-可见吸收光谱在 200~300nm 处仅有弱峰，推测源于少量未配位 F 的电子跃迁。

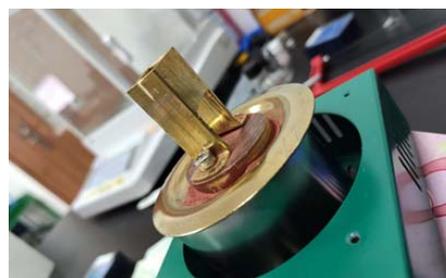


图 4 第三代高温原位光谱仪加热炉

质谱法：是通过制备、分离和检测气相离子来鉴定化合物的高特异性和高灵敏度的检测技术，单次分析即可提供丰富的结构信息。高温熔融状态下，熔盐以蒸汽形式挥发出来形成含有氟化盐、钍、铀等气相团簇物的气溶胶，不仅腐蚀设备材料，且在回路中蒸汽气溶胶遇冷冷凝后还会堵住气路管道，给回路运行带来安全隐患。基于此，与复旦大学合作将原位蒸发和飞行时间质谱技术结合，研制了一套高温熔盐气相组分检测系统，用于硝酸盐热分析解机理研究。为进一步实现高温熔盐蒸汽的在线实时监测，设计了 EI (Electron Impact) 电离源反射式高分辨飞行时间质谱。目前已完成零件加工和设备

搭建，正在进行调试。图 5 为调试过程中测试的空气中的气相质谱，分辨率达到 900。

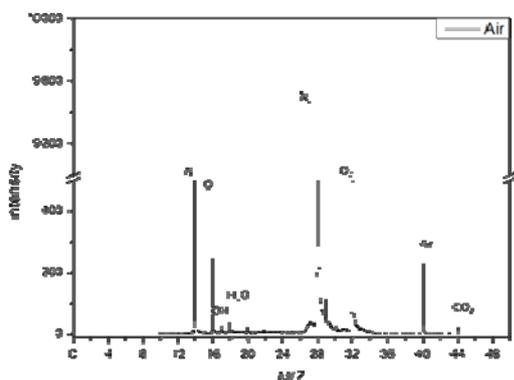


图 5 调试过程在线检测空气的质谱图

### 熔盐微观结构研究

熔盐微观结构研究可揭示不同层次的微结构与宏观性能的相互关系。通过搭建高温核磁共振检测系统，实现了对液态氟化物熔盐微观结构的研究。研究结果可为熔盐物化性质调控、净化工艺优化等提供理论基础，也展示出高温核磁共振技术在熔盐离子微观结构研究中的重要潜在应用价值。

高温核磁共振检测系统采用激光加热方式提升样品温度（图 6）。由激光器产生的高功率激光通过光纤传导至核磁共振检测探头中，经聚光镜及反射镜照射至样品池底部，实现对样品的激光加热。

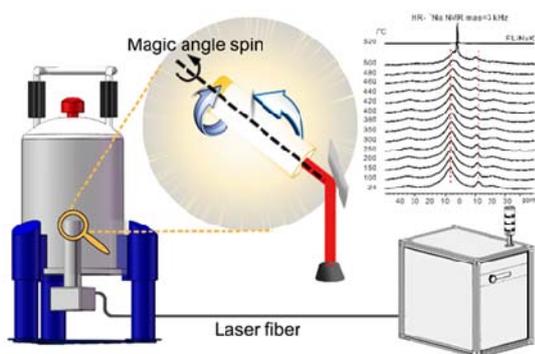


图 6 激光加热高温核磁共振系统结构示意图

熔盐样品通常具有很强的吸水性，因此自主设计开发了一种新型高温熔盐密闭样品池，采用内外双层结构以提高待测样品的密闭性，防止样品吸水氧化等；同时底部采用凹槽设计，提高激光集热效率，并防止散射对其他探头元件造成损伤。

利用高温核磁共振检测系统，发现了 FLiNaK 三元盐熔融相变过程中的离子掺杂行为，并结合理论计算对核磁共振信号进行了归属。定量实验证实该掺杂行为的掺杂量约 1.9%；此外，利用多种不同核磁共振方法对掺杂离子的动力学行为进行了探讨，掺杂后离子的运动能力得到了明显提升，与晶格间的相互作用力明显降低。

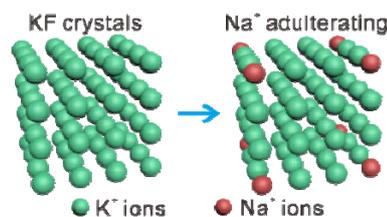


图 7 FLiNaK 盐中 Na-K 离子掺杂结构

利用核磁共振检测系统，还对 FLiNaKZr 四元盐体系中 Zr-F 微观结构进行了初步研究。利用  $^{19}\text{F}$ 、 $^{23}\text{Na}$ 、 $^7\text{Li}$  等检测方法对不同  $\text{ZrF}_4$  含量的熔盐进行分析表征，得出以下结论：1) Zr 离子在体系中优先与 KF 络合，KF 消耗完之后，继续与 NaF 络合，最后才与 LiF 形成配合物；2) Zr-F 配位主要包括以下几种结构： $\text{K}_3\text{ZrF}_7$ 、 $\text{Na}_3\text{ZrF}_7$ 、 $\text{Na}_7\text{Zr}_6\text{F}_{31}$ ，随  $\text{ZrF}_4$  含量的改变而发生变化，见图 8。

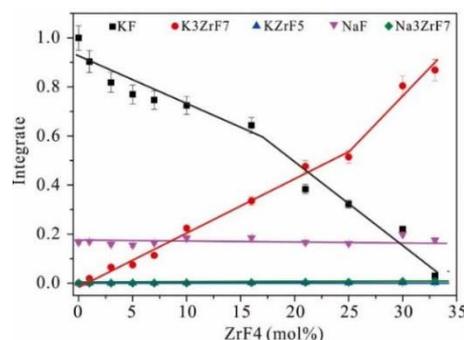


图 8 不同  $\text{ZrF}_4$  含量下 FLiNaK 盐中离子结构的演化曲线

利用固体核磁技术初步研究了铍金属在高纯 FLiNaK 中的溶解行为，探索其溶解机理。取金属 Be 与 FLiNaK 熔融 14 小时后的样品进行  $^{19}\text{F}$ 、 $^9\text{Be}$ 、 $^7\text{Li}$ 、 $^{23}\text{Na}$  及  $^{19}\text{F}$ - $^9\text{Be}$  二维实验（图 9），收集熔融过程中的挥发物质并检测其中 Li、Na、K 和 Be 含量。实验结合理论计算表明，金属 Be 在熔融 FLiNaK 中会快速置换出  $\text{K}^+$ ，生成较为稳定的  $\text{K}_2\text{BeF}_4$  配合物，之后 Be 会继续与  $\text{Na}^+$  反应，置换出金属 Na。后续将采用高温系统进一步研究金属铍的溶解行为。

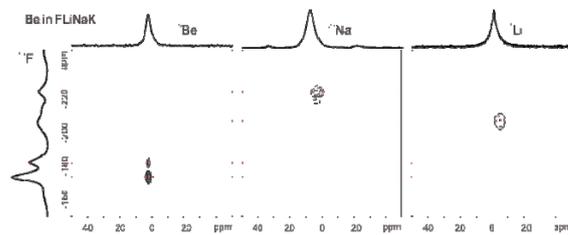


图 9 FLiNaK-Be 样品的二维 NMR 谱图

采用高温核磁共振等技术研究氟化物熔盐的微观结构，了解并逐步阐明多元混合熔盐中离子或团簇的演化过程和运动模式，可为全流程熔盐质量控制包括前期成分设计、生产和使役中的质量监测和性能调控、重构回收处理甚至绿色循环利用等提供理论依据，开拓新的方法和思路。

# 钍基熔盐堆核与辐射安全

核与辐射安全技术部，蔡军 乔延波

根据钍基熔盐堆的特点，本部门在核与辐射安全方面主要开展熔盐堆安全许可、安全分析及辐射安全、放废处理系统的设计与研究，同时承担嘉定与武威两园区的辐射运维、辐射安全监督等工作。本年度开展了 2MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆 (TMSR-LF1) 运行阶段安全许可证申请、核与辐射安全系统工程设计与建设、小型模块化钍基熔盐堆研究设施十四五项目申报、钍基熔盐堆安全技术研究工作，完成了 TMSR-LF1 施工图设计阶段的安全分析，开展施工图设计及主要设备的加工制造，启动设备的安装；并完成了 TMSR-LF1 应急响应预案的编制，已正式提交国家核安全局，同时完成 TMSR-LF1 运行阶段环境影响评价报告初稿，启动公众意见征询。

## TMSR-LF1 运行阶段安全许可

TMSR-LF1 首次装投料前必须向国家核安全局提交最终安全分析报告(FSAR)、环境影响评价报告、应急预案等相关技术文件，通过国家核安全局组织开展的技术审评后才能获得运行许可证。

在 FSAR 报告方面，本年度编制完成了 FSAR 报告第二章安全目标和工程设计要求、第三章场址特征、第十二章放射性废物管理、第十三章辐射防护、第十六章安全分析、第十九章退役等相关章节内容，参与编制完成第七章专设安全设施、第十七章安全有关的技术说明书等相关章节内容。这些 FSAR 报告于 2020 年 6 月 30 日正式提交国家核安全局，截至目前已完成第一轮问题单答复、第一次审评对话。

在环境影响评价方面，本年度完成了 TMSR-LF1 施工期非放环境监测及运行前环境辐射本底调查研究工作。目前已完成了 TMSR-LF1 运行阶段环评报告（征求意见稿），并完成运行环评公众参与的第一次公示工作，正在进行第二次公示工作（征求意见稿公示）。在应急预案方面，完成了应急预案的编制，正式提交国家核安全局进行技术审评。

## TMSR-LF1 核与辐射安全系统设计与建设

本年度内开展了辐射安全系统、放射性废物管

理系统的施工图设计及关键设备的加工与制造、部分设备的安装等相关工作。

在施工图设计方面，完成了 TMSR-LF1 放废管理系统工艺设备、管道、电气及仪控等施工设计图纸 62 套，并通过了专家评审；完成施工图设计阶段的屏蔽计算报告，即将完成贯穿孔洞的局部屏蔽施工图设计。

在设备的加工制造方面，完成了辐射屏蔽门、废液贮存罐和手套箱、固体废物分拣压缩装置、空气过滤器、放射性废液分析检测设备等主要设备的加工制造及出厂测试。

在设备的安装方面，主要是完成了与土建交叉施工的设备安装，包括辐射屏蔽门及放废处理中心地下非标罐体设备、废液工艺管道等安装。完成了辐射屏蔽门(主体装置厂房 0m 层 1 扇屏蔽门外)、废液预埋管道、放废处理中心地下负一层废液贮存罐等大型设备安装。

## 钍基熔盐堆核与辐射安全技术研究

本年度围绕钍基熔盐堆继续开展核安全、辐射安全和放废安全等相关研究工作。在新型熔盐堆的许可申请及事故分析方面，初步分析了新型熔盐堆的始发事件清单，并开展反应性事故、堆芯排热减少事故、堆芯排热增加事故、未能紧急停堆的预期瞬态(ATWS)等事故分析，完成四个典型事故的分析。在辐射安全技术方面，开展了气载放射性物质迁移行为和分布特征研究、新型屏蔽材料研究、放射性气体准确测量技术研究、新型中子探测器研究和熔盐堆应急技术和策略等方面的研究工作。在放废处理技术研究方面，采用超临界水氧化技术对核电厂废润滑油进行处理，开展有机废液超临界水氧化处理工程样机研制，并获得第二十二届中国国际高新技术成果交易会“优秀产品奖”；开展了不同温度下制备的放射性含氟浓缩液磷酸盐水合陶瓷固化体性能规律，实验验证了氟磷灰石玻璃陶瓷固化高放废盐的可行性，确定了 Th 基/Ce 基 MOF 玻璃固化技术路线，合成了一系列 Th 基 MOF 和 Ce 基 MOFs 用于高放废液的核素分离。

## 2 MW 液态钍基熔盐堆实物保护系统设计与建设

建安工程技术部, 凌佳业 李子威 林俊 尹崇凯 李超 靳巍巍

能源和资源的稳定供应是保障我国长期可持续发展的必要基础。大力发展核电, 已成为我国能源中长期发展规划的战略重点之一。目前核电工业使用的燃料基本都是铀燃料, 由于能源需求的高速增长, 对核燃料需求越来越大, 而我国铀资源贫乏, 而钍资源丰富, 钍燃料(吸收中子转化为易裂变钍-233)的有效利用是保障国家能源安全、促进节能减排的重要手段。

熔盐堆(Molten Salt Reactor, MSR)是第四代先进反应堆中唯一的液态燃料反应堆。液态燃料熔盐堆将燃料溶于氟盐冷却剂中, 其中液态氟化盐既用作冷却剂, 也作为核燃料的载体, 使用钍-铀核燃料循环的熔盐堆称为钍基熔盐堆(TMSR)。钍基熔盐堆具有本征安全性、核燃料长期稳定供应、核废料最小化、物理防核扩散、小型模块化等特点<sup>[1]</sup>。2011年, 中科院启动“未来先进核裂变能—钍基熔盐堆核能系统”战略性先导专项。由中国科学院上海应用物理研究所为依托单位建设 2MW 液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1), 选址甘肃省民勤县红沙岗。2 MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1)属于第四代先进核能系统, 是国内首创, 采用一体化、模块化的设计理念, 有效缩减了反应堆系统的总体积, 具有高安全性和良好的经济性, 将实现钍基熔盐堆的系统集成及验证, 为小型模块化钍基熔盐示范堆的设计和建设提供技术支持及经验。

依据《中华人民共和国核材料管制条例》(HAD501)及其实施细则的要求<sup>[2]</sup>, 持有核材料单位必须有保护核材料的措施, 建立安全防范系统。中国科学院上海应用物理研究所依照国家法规要求, 开展 2 MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆实物保护系统的设计与建设工作, 以满足国家对核材料管制的要求, 为 2 MW 液态燃料钍基熔盐堆建设运行服务。

### TMSR-LF1 实物保护系统设计

#### (1) 实物保护等级

2 MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1)位于甘肃省武威市民勤县红沙岗镇。

厂址坐落于甘肃省武威市民勤县红沙岗化工智慧产业园, 位于民勤县城西北方位约 60 km 处, 厂址西南距金昌市直线距离约 60 km, 厂址东南距武威市直线距离约 120 km, 厂址处地理位置坐标为北纬 38°57'31", 东经 102°36'55"。厂址地理位置见图 1。



图 1 TMSR-LF1 厂址地理位置图

钍基熔盐堆核能系统实验平台项目主要建设为实验堆主体装置厂房、放射性废物处理中心厂房、实物保护系统和辅助工艺系统等。根据当地公安部门和国家安全部门提供的当地敌情、社情分析确定, 国家主管部门 2018 年 11 月批准的本项目实物保护系统设计基准威胁, 并据此开展 TMSR-LF1 实物保护系统设计。

TMSR-LF1 使用的核材料原料为四氟化铀, 总质量为 505kg (以铀计), 富集度为 19.75%。因此, 根据《中华人民共和国核材料管制条例实施细则》(HAD501/01)的规定, 本项目核材料的实物保护等级为二级<sup>[3]</sup>。

TMSR-LF1 是堆芯热功率为 2 MWt 的反应堆, 且独立存放和处理高放废液放射性物质存量小于危险量 D2 值的 10000 倍。因此, 根据《核设施实物保护》(HAD 501/02-2018)规定, 本项目核设施的实物保护等级为二级<sup>[4]</sup>。

#### (2) 系统设计

按照实物保护的等级, 设施实物保护系统划分为两个区域: 控制区和保护区。如图 2 所示, 核材料库房及堆芯所在的主体装置厂房、放射性废物处置中心, 保卫控制中心作为实物保护系统的保护重要部位, 据此开展保护系统实体屏障、出入口、技防人防系统设计, 以达到层层设防、纵深防御、均衡保护的保卫目的。

实物保护系统控制区、保护区周界实体屏障设计中连续均衡以达到层层设防、纵深防御、均衡保护的保卫目的控制区周界的实体屏障采用单层铁丝网围栏, 保护区周界的实体屏障为间隔 6 m 的双层铁丝网围栏, 上述的重要部位位于 LF1 厂房实体屏障由 200 mm 厚的建筑物混凝土墙体构成, 并保证六面坚固<sup>[4]</sup>。

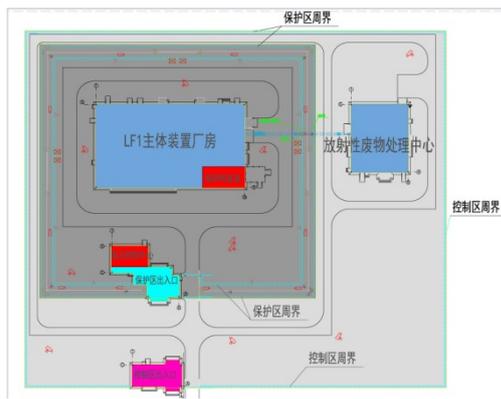


图2 TMSR-LF1实物保护系统总平面示意图

实物保护系统控制区出入口、保护区出入口、保卫控制中心、保护区内重要部位的出入口均设置有出入口设施，控制和记录人员或车辆的通行。制卡室设置在控制区出入口，进行人员出入授权。控制区、保护区与保卫控制中心出入口速通门、电动滑门、旋转栅门等设备依据人员或车辆授权经人脸识别、读卡并键入密码等检查手段通行。

实物保护系统的技防设施包括：由红外/微波/激光扫描探测器，门磁报警、动态图像报警等构成入侵报警子系统；由高清摄像机、云台摄像机、球形摄像机、红外摄像机及视频显示工作站等设备构成视频监控子系统；由有线电话及无线对讲等设备构成的安保通信子系统；照明、供电、信息网络安全等子系统。所有子系统在保卫控制中心进行信息集中管理和联动控制，使设施具有全面、有效、综合的安全技术防范能力。

实物保护系统人防保卫力量主要由园区保卫人员和园区警务站构成，园区保卫人员分为武装守护及普通安保人员，负责由园区安保监控、巡逻任务与武装执勤，警务站负责解决公众安全、犯罪、破坏和交通事故。当地公安与武装警察部队作为外部应急响应力量。上述多种响应力量相互协调配合共同保卫设置安全。

### (3) 有效性分析

TMSR-LF1实物保护系统依照厂区纵深布局，设计周界围栏、出入口、技防、人防等实物保护设施，形成控制区保护区两层完整的保护层。根据设计基准威胁的确定外部入侵敌手的人数、武器和破坏行为，通过模型分析程序(SAVA)对TMSR-LF1实物保护系统设计参数进行分析，获得实物保护系统通过最薄弱路径外部入侵保护目标的截住概率和对入侵敌手的累计延迟时间。结果表明实物保护系统设计的截住概率大于外部入侵截住概率有效性指标0.85，实物保护系统对于外部入侵敌手的延迟时间大于园区保卫响应力量的反应时间。即实物保护系统的有效性达到设计目标，确保实物保护系统可

以成功抵御设计基准威胁的入侵，为TMSR-LF1的安全运行提供安全可靠的条件。据此，《2MW液态燃料钍基熔盐实验堆实物保护系统设计专篇》获得国家主管部门的批复。

### TMSR-LF1实物保护系统建设进展及存在问题

根据实物保护系统设计专篇与TMSR-LF1设施本体的设计施工进展，于2019年11月完成实物保护系统招投标工作，12月签订合同，2020年3月底启动实物保护系统建设工作。

**技防：**现阶段LF1主体装置厂房所有预埋套管已完成敷设；保护区出入口、控制区出入口内已完成布管穿线，并已开展设备安装工作；室外电缆井及连接套管施工基本完成，控制区围栏施工完成50%；

**人防：**安装实物保护系统设计专篇的要求，开展武装守卫及安保人员服务单位的招投标工作，已完成武装守卫招投标技术规格书、枪弹库技术规格书等文件的编制，11月进行招投标工作，后续武装守卫及安保人员到场后进行培训、考核等工作。

目前TMSR-LF1实物保护系统建设中同时存在一些问题，主要表现为：

(1) 为确保TMSR-LF1顺利如期建成，工程建设周期短，时间紧迫。设施土建施工与实保系统建设、设备安装交叉施工，增加了施工难度，影响实保系统设备安装进度。

(2) 由于TMSR-LF1园区武装保卫力量不是由武装警察，而是由安保公司的武装守卫及安保人员开展工作，如何针对武装保安进行核设施实物保护人员防护响应力量进行有效的培训与管理也面临新的挑战。

### 结语

本文介绍了2MW液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1)实物保护系统等级确立，实物保护区设置，实物保护系统周界、出入口、入侵探测系统、视频符合等技防设施设计与人防保卫力量设计，对系统设计的有效性进行评估，表明实保系统设计达到设计目标，能满足设施核安保安全保卫与国家核材料管制的要求，为2MW液态燃料钍基熔盐堆顺利建设运行服务。

### 参考文献

- 1 钍基熔盐堆核能系统, 蔡翔舟、戴志敏、徐洪杰, 物理, 9(45): 579-582, 2016
- 2 中华人民共和国核材料管制条例, HAF501(1987)
- 3 中华人民共和国核材料管制条例实施细则 HAF501/01
- 4 核设施实物保护 HAD 501/02(2018)
- 5 2MW液态燃料钍基熔盐实验堆实物保护系统设计专篇 (c版)

# 电解制氢技术研究

氢能技术部，王 Jian 强

前言：本年度氢能技术部主要承担了中国科学院“变革性洁净能源关键技术与示范战略性先导科技专项”中“高温电解制氢技术与应用”课题的研究，在材料、电池、电堆和系统方面取得研究进展。在材料方面，利用新型、高效的熔盐法开展了铁基钙钛矿氧电极和质子传导型的电解质材料体系的研发，实现了公斤级/批次规模的批量制备。研究电极材料的结构变化，研究结果发表在 Nature Communications 等高水平期刊上。在上海应用物理研究所建成了百千瓦级产能电解池生产线和测试平台。发展了环保、低成本的电解池支撑体技术，提升了电解池的电流密度。相关技术申请了发明专利，并实现了成果转化。优化电解池堆的结构设计方案，在合金连接体表面制备尖晶石结构保护涂层来提高连接体性能，进而提高电解池堆的寿命。5kW 级电解池堆经过 2600 小时的恒流电解测试后性能衰减率仅为 0.5%/kh，达到了国际先进水平。发展了多电解池

堆集成技术，建成了国内首套 20kW 级高温电解制氢装置，可以开展制氢-储氢-加氢一体化技术验证。完成了 200kW 高温电解制氢装置整体方案设计，包含电堆模组、气体管理、热管理、控制及安全防护等模块。对工艺流程图进行了分析，得出了最佳的物热平衡参数，并确定了主要工艺设备参数，完成了核热氢耦合系统物理与工程设计。

二、材料研究：利用新型、高效的熔盐法开展了铁基 SOEC 钙钛矿氧电极 LSF、LSCF、LSFN 和质子传导型 SOEC 的电解质 BZCY 等材料体系的研发，实现了公斤级/批次规模的批量制备。发展了原位 X 射线吸收谱学 (XAS) 表征技术，研究电极材料在极化条件下的电子结构和局域结构的演变过程，加深了对反应机制和材料设计优化方面的理解，研究结果发表在 Nature Communications 等高水平期刊上 (图 1)。

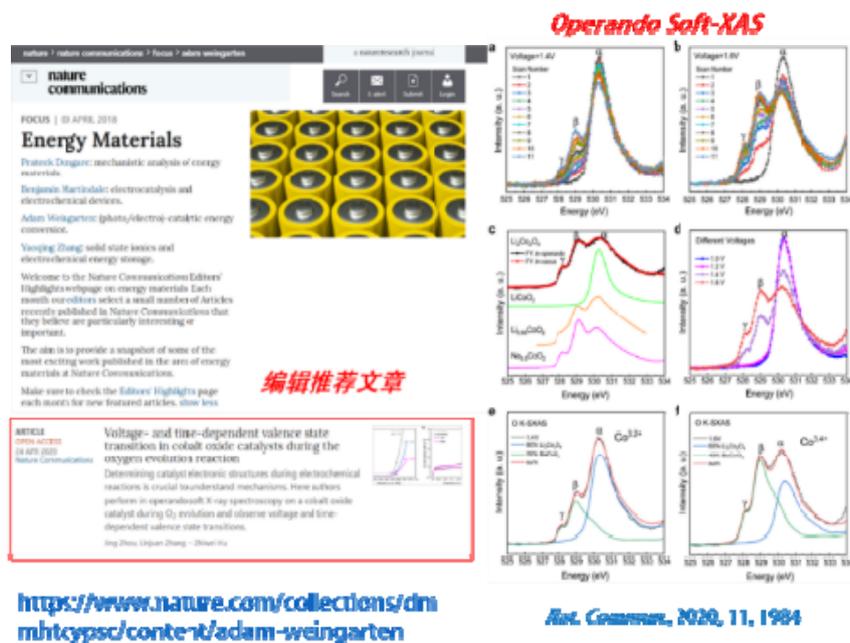


图 1 原位电化学软 X 射线吸收谱实验

三、电池研究：建成了基于流延-丝印-烧结技术路线的百千瓦级产能的 SOEC 电解池生产线和多通道电解池测试平台，用于开发高性能 SOEC 电解池。发展了环保、低成本的水基流延技术来制备 SOEC 电解池支撑体，利用“高压叠层”、“醇浴”等技术优化了丝网印刷工艺，将单体 SOEC 电解池的电流密度提高到了 1.7A/cm<sup>2</sup>@1.3V@750°C。优化后的电解

池稳定运行时间超过 1000h，理论衰减速率仅 0.025 V/kh。经过 12 万次的间歇电解测试后，电解池性能仍保持较高水平。SOEC 电解池开发相关技术申请了发明专利，并实现了成果转化，目前与企业合作的年产万片、MW 级产能 SOEC 电解池生产线项目已开工建设 (图 2)。

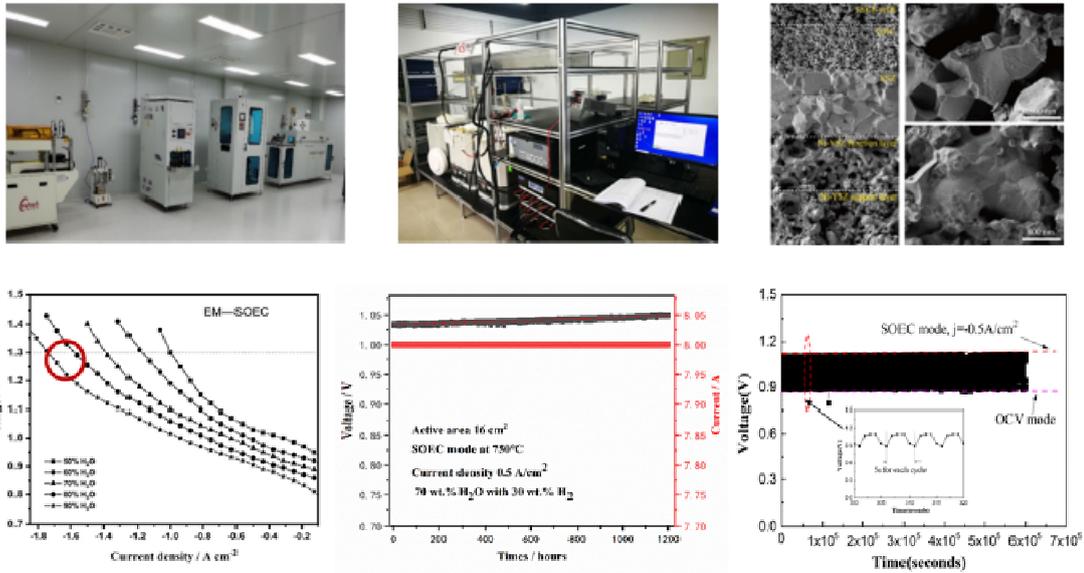


图2 SOEC 电解池研究平台与实验结果：(a)百千瓦级产能 SOEC 生产线、(b)多通道 SOEC 电解池测试平台、(c)SOEC 电解池微结构、(d)电解池性能曲线、(e) 恒电流电解稳定性测试、(f) 间歇电解工况下电解池寿命测试

四、电堆研究：优化 SOEC 电解池堆的结构设计方案，并基于等离子体喷涂技术在合金连接体表面制备尖晶石结构保护涂层（MnCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>）来提高连接体的抗氧化性、导电性以及抑制基体内的 Cr 元素向外扩散，进而提高电解池堆的寿命。基于 5kW-SOEC 电解池堆开展了高温电解制氢技术的可靠性验证，经过 2600 小时的恒电流电解测试后 SOEC 电解池堆性能衰减率仅为 0.5%/kh，达到了国际先进水平。

五、系统研究：发展了多电解池堆集成技术，综合考虑气体流量分布、温度辐射与压力平衡等因素并进行优化，将 4 个 5kW 电解池堆集成为 1 个 SOEC 模组。建成了国内首套 20kW 级高温电解制氢装置（图 3），可以开展制氢-储氢-加氢一体化技术验证。利用 Aspen plus 软件开展了整个 20kW 高温电解制氢装置的工艺流程模拟与理论效率计算。

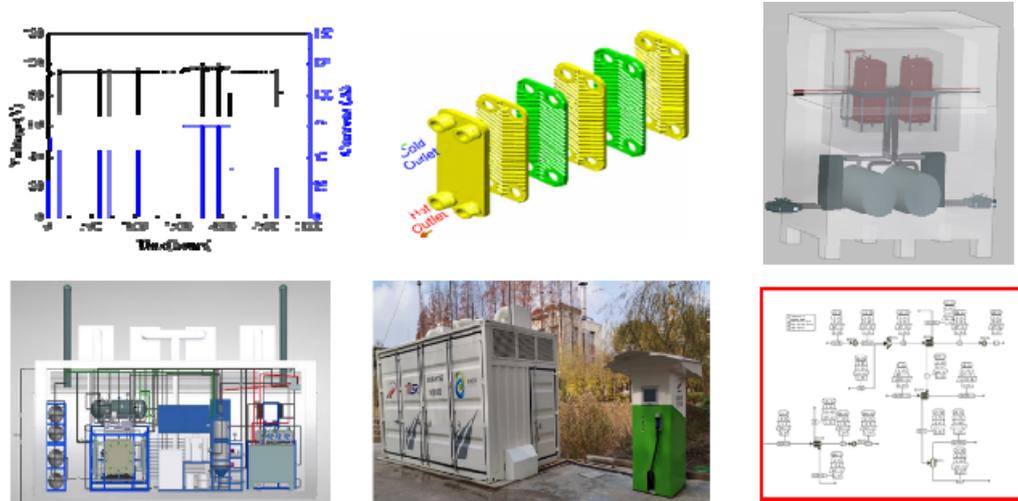


图3 20kW 高温电解制氢装置的研制：(a) SOEC 电堆的可靠性测试、(b)关键部件板式换热器设计、(c) 以 20kW-SOEC 模组为核心的系统热箱、(d)设备布局图、(e)实物照片、(f)仿真模拟结果

六、示范项目：在 20kW 高温电解制氢装置的基础上完成了 200kW 高温电解制氢装置整体方案的初步设计。200kW 高温电解制氢装置包括包含 SOEC 模组单元、气体管理单元、热管理单元、控制单元及安全防护装置等模块。通过功能分区和模块化集成策略，使 200kW 高温电解制氢装置在建造过程中的质量、安全、周期和费用都得到了保障，可以在多

种环境条件下稳定运行，增强了装置的适应性。利用 ASPEN PLUS 和 HYSYS 软件对 200kW 高温电解制氢装置的工艺流程图进行了模拟分析，得出了最佳的物热平衡参数，并确定了主要工艺设备参数，目前正在开展相关设备的研制工作。完成了由核热侧回路与长距离热运输回路组成的核热氢耦合系统物理与工程设计。前者可以将核反应堆中的高温热

引出到反应堆外，后者的作用主要是将高温核热输送给 200kW 高温电解制氢验证装置。本系统可从钍基熔盐堆中获取 80kW 的高温核热，熔盐传热回路长度达 930 米。目前已完成了整套核热氢耦合系统关键设备的设计，并启动了核热侧回路系统中冷却盐循环泵、熔盐-熔盐换热器、熔盐-空气换热器、连接管路及支承、加载管道隔离阀、机械阀、冷却盐储罐等设备与长距离热传输系统中熔盐泵、套管换热器、熔盐-蒸气发生器等关键设备的加工制造。基于核电厂对危险化学品安全评价标准和方法，对 200kW 高温电解制氢装置的安全距离和最大可能储氢量进行了保守分析，最终确定了制氢系统的选址。此外开展了高温电解制氢系统的风险评价，利用故障树法和道化学指数法开展了制氢系统安全系数的定性与定量分析。根据计算得出的系统氢气泄漏扩散、火灾伤害和蒸汽云爆炸事故发生的后果，确定了安全事故发生时的危害程度与危害范围，为制定

20kW 与 200kW 高温电解制氢装置（图 4）的安全监控与防护措施提供了设计依据。



图 4 200kW 高温制氢装置概念设计图

#### 参考文献

- 1 Jing Zhou, Linjuan Zhang, Yu-Cheng Huang, Chung-Li Dong, Hong-Ji Lin, Chien-Te Chen, L. H. Tjeng, Zhiwei Hu, Voltage- and time-dependent valence state transition in cobalt oxide catalysts during the oxygen evolution reaction, *Nature Communications*, 2020, 11, 1984

## 附录 1

## 2019-2020 年博士、硕士学位授予一览表

## PhD and MD Programs Completed at SINAP IN 2019-2020

2019

No.	学位	姓名	专业	论文题目	研究方向	导师
1	博士	覃静宇	粒子物理与原子核物理	驱动蛋白颈链骨架氢键强度的水相关性研究	纳米科学和单分子生物物理	方海平
2	博士	唐晓星	无机化学	大气颗粒物中重金属分析的 ICP-MS 联用技术方法及应用	现代质谱分析	刘卫
3	博士	王玉廷	粒子物理与原子核物理	丰质子核 $^{22}\text{Al}$ , $^{21}\text{Mg}$ 的 $\beta$ 缓发 (双) 质子衰变实验研究	实验核物理	方德清
4	博士	方钢	粒子物理与原子核物理	气体在纳米水层中扩散的理论研究	纳米科学与单分子生物物理	方海平
5	博士	马玉华	核技术及应用	树木年轮中不可交换有机氟的加速器质谱测定方法学	氟科学与工艺	李燕
6	博士	侯权	核技术及应用	高温固体氧化物电解池模拟分析	核技术及应用	朱志远
7	博士	李宗斌	核技术及应用	紧凑型微波能量倍增器的研究	加速器物理及微波技术	赵振堂
8	博士	王晓艳	核能科学与工程	UNS N10003 合金高温蠕变理论模型与数值模拟研究及应用	核反应堆高温结构完整性研究	王晓
9	博士	焦小伟	核能科学与工程	熔盐自然循环系统可靠性研究	反应堆安全	陈莹
10	博士	苏兴治	无机化学	金属基材料表面氟化物熔盐热扩散法制备碳化物涂层的研究	金属材料的表面涂层	谢雷东
11	博士	何龙	核能科学与工程	熔盐堆稳态和瞬态核热耦合模型建立及安全特性研究	反应堆热工水西	蔡翔舟
12	博士	赵学超	核能科学与工程	加速器驱动的次临界熔盐嬗变堆的物理特性研究	钍铀燃料循环	蔡翔舟
13	博士	张洁	核能科学与工程	固态熔盐堆负荷跟踪模式运行控制研究	热工水力	蔡翔舟
14	博士	李炬	核技术及应用	交变相位聚焦交叉指磁波质子漂移管直线加速结构研究	加速器及相关技术	赵明华
15	博士	高杰	核技术及应用	镍及镍基合金内氦泡演化行为研究	核科学技术在核能材料方面的研究	李燕
16	博士	周晨升	粒子物理与原子核物理	高能重离子碰撞中的 $\phi$ 介子自旋排列	放射性核束物理与重离子物理	马余刚
17	博士	杨一舟	粒子物理与原子核物理	溶液中阳离子通过水合离子- $\pi$ 作用对碳基纳米材料的特性影响的理论研究	水科学与技术	方海平

18	博士	牛强	核能科学与工程	氟盐冷却球床堆堆积规律及等效导热系数的研究	反应堆热工水力	王纳秀
19	博士	夏少鹏	核能科学与工程	液态熔盐堆高精度燃料算法及钍铀增殖研究	钍铀燃料循环物理研究	蔡翔舟
20	博士	周利民	核技术及应用	水中纳米气泡的气体状态与稳定机理的探究	界面物理	胡钧
21	博士	陈畅其	核技术及应用	液态熔盐研究堆应急准备与响应的初步研究	事故应急响应研究	夏晓彬
22	博士	孙浩亮	核技术及应用	新型二维过渡金属薄膜材料的制备与研究	半导体材料及应用	宋飞
23	博士	房勇汉	核能科学与工程	钍基氟盐冷却高温堆燃料球中子学性能优化研究	钍铀燃料循环	蔡翔舟
24	博士	李波	核技术及应用	同步辐射光束线辉光放电清洗研究	等离子体清洗, 真空系统设计	薛松
25	博士	王康	粒子物理与原子核物理	质子诱发的原子核巨偶极共振模式研究及丰质子核 $^{23}\text{Si}$ 的 $\beta$ 缓发(双)质子衰变实验研究	原子核物理	沈文庆
26	博士	代江兵	无机化学	多功能 DNA 纳米结构的构建及生物成像	纳米材料和纳米毒理学	王丽华
27	博士	邓先概	粒子物理与原子核物理	中能重离子碰撞中输运性质以及电磁场效应研究	理论物理	马余刚
28	博士	杨雄	核能科学与工程	核石墨材料特性及熔盐堆核石墨构件初步应力分析	核石墨在 TMSR 中的应用	曾广礼
29	博士	夏洋洋	核技术及应用	上海光源储存环束流负载效应的研究	加速器高频控制	赵振堂
30	博士	叶永金	粒子物理与原子核物理	以正负粒子对为探针探究相对论重离子碰撞中磁场的存在	粒子物理与原子核物理	马余刚
31	博士	关成志	核技术及应用	用于可逆固体氧化物电池的铁酸镧电极性能研究	固体氧化物电解池技术	朱志远
32	博士	艾华	无机化学	高温熔盐腐蚀的异质效应和离子价态研究	高温熔盐和材料的相容性研究	谢雷东
33	博士	姜增公	核技术及应用	基于微纳结构的新型光阴极及加速技术研究	加速器技术及应用	顾强
34	博士	钱茂飞	粒子物理与原子核物理	短周期永磁波荡器磁场优化的物理与技术研究	粒子加速器物理	周巧根
35	博士	马玉雯	核能科学与工程	小型模块化增殖焚烧型快堆的钍铀循环性能研究	核能科学与工程	蔡翔舟
36	博士	雷冠虹	核能科学与工程	熔盐环境对 GH3535 合金高温 He 行为影响的研究	反应堆材料与工程	闫隆
37	博士	邓珂	核技术及应用	基于氢同位素研究核石墨中氚的去污工艺	氟科学与工艺	刘卫

38	博士	周金豪	无机化学	熔盐堆燃料盐干法后处理中冷冻壁技术应用研究	核燃料干法后处理	李晴暖
39	博士	李冰	核技术及应用	生物大分子微小晶体数据采集及处理方法研究	同步辐射技术	何建华
40	博士	杨迎国	光学	聚焦微结构的高性能钙钛矿太阳能电池材料和器件研究	钙钛太阳能电池研究	高兴宇
41	博士	林道	无机化学	钴基电解水析氧催化剂的制备、表征及性能研究	无机纳米催化材料与制氢	王建强
42	博士	刘林	无机化学	AFM 研究微绒毛、细胞膜微丝骨架及应用	AFM 研究细胞膜形貌与功能	李宾
43	博士	叶德楷	无机化学	复杂生化系统中的分子传输调控及生物传感应用	生物传感	宋世平
44	博士	王晓梅	无机化学	新型羟基吡啶酮基促排剂对内污染铀、钍的促排效果及机理研究	铜系核素促排	王建强
45	博士	郑鑫	无机化学	离子液体接枝尼龙 6 的制备及其结构、性能与应用的研究	高分子辐射加工	李景辉
46	博士	艾则孜·麦麦提明	无机化学	高性能聚烯烃基形状记忆及发泡材料的微纳层次结构调控	聚合物产品工程, 辐射加工, 形状记忆高分子, 超临界二氧化碳发泡	吴国忠
47	博士	程洁	无机化学	基于原子力显微镜的凝血因子 VIII 界面取向研究	纳米材料和纳米生物学	吕军鸿
48	博士	马兆伟	核技术及应用	熔盐堆鼓泡器中气泡动力学研究	氟科学与工程	刘桂民
49	博士	宫鹏鹏	核技术及应用	三次谐波腔的调谐环路设计与实现	核技术及应用	刘建飞
50	博士	张开庆	核技术及应用	软 X 射线自种子自由电子激光设计与新原理研究	自由电子激光	王东
51	博士	张钦	核技术及应用	核设施周围土壤中有机氟的分布规律研究	氟科学与工程	刘卫
52	博士	杨果	核技术及应用	ZrCo 储氟合金抗歧化机理及掺杂改性的理论研究	氟科学与工程	李燕
53	博士	陈健	核技术及应用	SXFEL 腔式束流位置测量系统关键技术研究	束流测控	冷用斌
54	博士	齐争	核技术及应用	基于束流操控的超快双色 X 射线自由电子激光研究	自由电子激光, 加速器物理	赵振堂
55	博士	曹罕杰	核技术及应用	含铀混合氧化物的 XAFS 和 HERFD-XAS 结构研究	同步辐射 XAFS 及其应用	黄宇营
56	博士	罗密	核技术及应用	同步辐射 X 射线谱学在置换固溶体微观结构中的研究	同步辐射 X 射线谱学	姜政

57	博士	陈方舟	核技术及应用	数字化束流信号处理器在逐束团电荷量及工作点测量中的应用技术研究	核技术及应用	冷用斌
58	博士	曹珊珊	核技术及应用	基于腔式探头的束流到达时间及电荷量测量关键技术研究	自由电子激光束流诊断技术研究	冷用斌
59	博士	韩章柱	粒子物理与原子核物理	相对论重离子碰撞中的自旋与手征动力学研究	理论核物理	徐骏
60	博士	殷亚茹	粒子物理与原子核物理	熔盐环境下镍基合金表面行为机制的理论研究	镍基合金-熔盐界面作用的理论研究	怀平
61	博士	贾波磊	粒子物理与原子核物理	质子治疗多极扫描磁铁的研究	质子治疗多极扫描磁铁	赵振堂
62	博士	汪金国	核技术及应用	基于电光调制方案的高精度束流到达时间测量研究	信号与信息处理	刘波
63	博士	王飞翔	光学	X 射线时空一阶光子关联成像研究	X 射线成像光学	肖体乔
64	博士	朱宏艳	光学	两性性嵌段共聚物的溶液与界面自组装	自组装	王劼
65	博士	李卓	光学	高分辨 X 射线光谱仪原理与设计	X 射线光学	李宾
66	博士	陶旭磊	光学	单次 X 射线曝光的高空间分辨相干衍射成像方法研究	X 射线显微	邵仁忠
67	博士	宋三召	无机化学	高温熔盐法合成金属氧化物及其分解水性能研究	无机材料的合成及性能研究	王建强
68	博士	鲁爽	无机化学	DNA 辅助的纳米金三角片分离纯化及相关性质研究	DNA 纳米技术	樊春海
69	博士	靖薪薪	无机化学	框架核酸介导的仿生矿化	DNA 纳米技术	樊春海
70	博士	周海斌	无机化学	抑制性神经递质介导成年小鼠中枢神经系统的基因编辑	纳米材料及其毒理学	王丽华
71	博士	刘文静	无机化学	基于 DNA 折纸的单分子力谱研究	界面单分子反应研究	李宾
72	博士	李艳丽	无机化学	含钽化合物的电子结构与化学键研究	电子结构、化学键	刘洪涛
73	博士	刘江波	无机化学	基于 DNA 纳米技术的细胞膜界面调控	纳米生物学	宋世平
74	博士	陈秀婷	无机化学	金属二酰胺配合物离子的气相结构与反应研究	铜系/铜系金属配位化学	龚昱
75	博士	谢荣	无机化学	基于框架核酸的高阶结构组装及金属化研究	DNA 纳米技术	王丽华
76	博士	李想	无机化学	多元熔盐储能材料的相图热力学计算及热物性研究	熔盐化学	谢雷东

77	博士	高延静	无机化学	基于脂质体与 DNA 的酶动力学与细胞应用研究	单分子酶学	宋世平
78	博士	钟阳	核能科学与工程	熔盐堆结构材料力学研究与分析	材料力学	曾广礼
79	博士	薛万冬	核能科学与工程	LiF-NaF-KF 熔盐中碳化硅与镍基合金之间腐蚀诱导的相互作用研究	材料腐蚀与防护	周兴泰
80	博士	王晚霞	核能科学与工程	Hastelloy N 合金焊后热处理碳化物转变机理研究	反应堆结构材料	周兴泰
81	博士	杨晨光	无机化学	超临界二氧化碳间歇发泡改性聚丙烯的机理及性能研究	高分子材料发泡	吴国忠
82	硕士	王楚航	核技术及应用	塔式太阳能热发电系统熔盐回路瞬态模拟分析	热工水力与瞬态分析	余笑寒
83	硕士	黄婉玉	核技术及应用	373MW 熔盐堆排盐罐非能动余热排出系统换热元件设计与优化研究	反应堆热工水力	徐洪杰
84	硕士	聂巍	粒子物理与原子核物理	X 光散度对多切片扫描相干衍射成像质量的影响	相干衍射成像	朱志远
85	硕士	李青远	核技术及应用	一种百兆瓦级小型模块化熔盐堆堆芯流场分配装置的设计研究	反应堆热工水力	徐洪杰
86	硕士	谭海容	高分子化学与物理	复杂条件下聚醚醚酮的辐照效应研究	高分子材料辐照效应研究	吴国忠
87	硕士	吴丽梅	信号与信息处理	基于 B/S 架构的 EPICS 实时监控系统的研究与实现	软件开发	陈永忠
88	硕士	芦鑫淼	无机化学	靶向非小细胞肺癌表皮生长因子受体 (EGFR) 的特异性分子影像探针的研究	放射性药物	张岚
89	硕士	王瀚生	粒子物理与原子核物理	中能核反应的同位旋驰豫过程研究	理论核物理	沈文庆
90	硕士	高蓉	核技术及应用	合金氧化物在熔盐高温应用环境中的行为	合金高温腐蚀	周兴泰
91	硕士	王威	信号与信息处理	上海光源光束线站同步控制技术的研究	大型实验物理装置的控制	王劼
92	硕士	莫宸冉	无机化学	基于超声空化的纳米气泡产生方法与性质研究	纳米气泡	胡钧
93	硕士	朱博文	无机化学	基于 DNA 纳米管的原位 X 射线小角散射表征研究	DNA 纳米结构	诸颖
94	硕士	陈俊	核技术及应用	高温熔盐泵液下轴承表面织构研究	熔盐回路系统设计及关键设备研制	傅远
95	硕士	屈斯诗	核能科学与工程	基于软 X 射线的光子相关谱装置构建	082701 核能科学与工程	邵仁忠
96	硕士	袁慧	电磁场与微波技术	高性能单频频率合成源	电磁场与微波技术	刘建飞

97	硕士	廖泳琪	信号与信息处理	宽范围高精度电子枪控制系统研究	加速器控制	李德明
98	硕士	张立园	信号与信息处理	基于 WEB 的 TMSR 熔盐泵实验平台数据库管理系统的设计与实现	数据库开发	刘桂民
99	硕士	吕刘帅	核技术及应用	镍基合金环形焊接模拟及其在结构失效评估中的应用	核反应堆压力容器焊接结构完整性研究	王纳秀
100	硕士	千跃奇	光学	机器学习与自由电子激光的应用研究	机器学习与自由电子激光	刘波
101	硕士	南玺	信号与信息处理	离子对氧化石墨烯表面上纳米尺度下水分子蒸发的影响	纳米科学	万荣正
102	硕士	杨甜宏	无机化学	氟化物掺杂 LiCl-KCl 熔盐的蒸馏行为研究	熔盐放射化学	龚昱
103	硕士	秦越强	无机化学	电化学方法研究 FLiNaK-CrF3/CrF2 氧化还原缓冲熔盐体系对 316L 不锈钢的缓蚀作用	熔盐电化学	左勇
104	硕士	韩冬	无机化学	氟盐体系 U4+ 的氧化及 UO22+ 的电化学行为研究	熔盐电化学	李晴暖
105	硕士	阮玮琪	信号与信息处理	光束线站的运动位置传感器信号实时解析与控制系统研究	FPGA 前端设计与嵌入式系统	李瑞
106	硕士	张诗雨	无机化学	高温熔盐金属空气电池及其电解质和电极材料的研究	高温熔盐电池	王建强
107	硕士	丁冬	核能与核技术工程	核石墨概率失效方法评定	反应堆材料与工程	曾广礼
108	硕士	孙彤	生物工程	基于 DNA 折纸的单分子链霉亲和素物化性质研究	生物物理学	李宾
109	硕士	殷子彦	核能与核技术工程	一种基于熔盐/储冷介质的热泵热机式储能系统物理设计	熔盐储能	谢雷东
110	硕士	赵金婵	电子与通信工程	仿真堆仪控工程管理数据库的设计与开发	数据库软件开发	后接
111	硕士	郭曼珊	电子与通信工程	基于 X 射线相位衬度成像的 TRISO 燃料颗粒无损分析	核燃料无损分析	林俊
112	硕士	李嘉曾	电子与通信工程	钍基熔盐堆历史数据归档系统的研究	数据库技术与应用	韩利峰
113	硕士	华永祥	电子与通信工程	基于荧光靶图像的单体光位置变化测量研究	光束线站控制	龚培荣

## 2020

No.	学位	姓名	专业	论文题目	研究方向	导师
1	博士	张春健	粒子物理与原子核物理	相对论重离子碰撞中集体运动及关联与涨落的研究	相对论重离子碰撞物理	徐骏

2	博士	王婷婷	粒子物理与原子核物理	中能重离子碰撞中粒子动量关联函数与挤出发射时的集体流及核修正因子的核子数标度率研究	重离子物理	马余刚
3	博士	刘鹤	粒子物理与原子核物理	基于 NJL 模型的夸克同位旋矢量相互作用研究	高能核物理	徐骏
4	博士	孙凡飞	无机化学	原位 XAFS 在不同催化体系中的发展与应用	原位 XAFS 方法发展	姜政
5	博士	刘永芳	核技术及应用	紧凑型高性能脉冲调制器的研究	粒子加速器功率源技术	谷鸣
6	博士	孟君	粒子物理与原子核物理	真实反应环境中金属纳米颗粒结构的理论研究	计算材料学	高崑
7	博士	郭豪杰	无机化学	深海噬菌体 NrS-1 DNA 聚合酶结构和功能研究	生物大分子晶体学	何建华
8	博士	丛海霞	无机化学	钍基熔盐堆燃料及干法处理中的分析方法研究	放射化学	张岚
9	博士	刘思佳	核能科学与工程	小型模块化氟盐冷却高温堆的物理设计与研究	反应堆中子物理、热工水力及安全分析	徐洪杰
10	博士	耿和平	光学	基于加速器的带轨道角动量 X 射线相关探索研究	加速器物理与技术	赵振堂
11	博士	林铭	核技术及应用	长寿命氟盐冷却快堆物理-热工耦合程序开发及应用	反应堆物理	戴志敏
12	博士	王晓凡	核技术及应用	储存环光源和自由电子激光的辐射新机制研究	储存环自由电子激光	赵振堂
13	博士	王闪闪	粒子物理与原子核物理	利用中能重离子核反应产生的光子研究原子核的性质	中能重离子核物理	马余刚
14	博士	刘洋	无机化学	基于 XAFS 的 Co 基催化剂在费托反应合成高阶醇中的构效关系研究	能源与材料	姜政
15	博士	贾国斌	核能科学与工程	基于 DRAGON 与 DONJON 的熔盐堆堆芯燃料管理与优化研究	反应堆物理	蔡翔舟
16	博士	汪洋	核能科学与工程	高潜热 NaF-NaCl-KCl 相变熔盐体系设计、蓄热特性及其与 316 不锈钢的相容性研究	熔盐储能技术与应用	黎忠
17	博士	张岳	粒子物理与原子核物理	激光等离子环境下氘氘聚变反应实验研究	激光核物理	王宏伟
18	博士	赵荣杰	粒子物理与原子核物理	自由电子激光装置中束流分配切割磁铁的研究与研制	加速器物理与自由电子激光	王东
19	博士	王亚迪	无机化学	基于阳离子- $\pi$ 作用的铜复合物的抗菌性能与机理研究	纳米材料与纳米生物学	吕军鸿
20	博士	田纳玺	光学	同步辐射硬 X 射线纳米聚焦自适应位相补偿系统光学特性研究	同步辐射硬 X 射线聚焦	李爱国

21	博士	陈杰	无机化学	自然空气条件下全细胞催化光生物学制氢	纳米材料和纳米生物学	王丽华
22	博士	王永天	无机化学	气相负离子团簇的光电子能谱研究	金属配合物及团簇化学	刘洪涛
23	博士	韩榕城	核技术及应用	质子调强放射治疗不确定性的相关技术研究	质子放疗	蒲越虎
24	博士	刘世昌	核技术及应用	基于二代高温超导带材的波荡器磁体研制及失超研究	超导波荡器	许皆平
25	博士	王小鹤	核能科学与工程	白光中子源上的熔盐硼当量测量	核数据, 中子学积分实验	王纳秀
26	博士	丁小军	核技术及应用	染料辐射稳定性及棉布辐射接枝聚合着色研究	高分子辐射化学	李景烽
27	博士	方舟	核技术及应用	自然现象启发下的纳米气泡制备及其应用	物理生物学	胡钧
28	博士	赵皓贵	无机化学	基于氧化石墨烯薄膜的高放废液分离方法研究	核燃料水法后处理	张岚
29	博士	黄豫	核技术及应用	基于氢同位素研究钚银合金分离熔盐堆中的氚	氚科学与工艺	刘卫
30	博士	兰旭颖	核技术及应用	纳米聚焦系统高空间分辨控制方法研究	同步辐射光学与技术	王劼
31	博士	张文礼	无机化学	聚丙烯腈纤维的高剂量率电子束辐照效应及对预氧化的影响	辐射化学技术	吴国忠
32	博士	郭玲玲	无机化学	铜基催化剂在丙烯选择性氧化制备丙烯醛反应中的“构效关系”研究	纳米催化	司锐
33	博士	杨璞	核能科学与工程	钍基次临界气盐堆概念设计	反应堆物理	余笑寒
34	博士	商海焦	核技术及应用	肺癌治疗中应对质子调强放疗不确定性的临床技术研究	医学物理	蒲越虎
35	博士	王学良	核技术及应用	金属 Ni、Cr 和 Fe 在氯化物氯盐中的腐蚀行为及机理研究	金属在氯化物熔盐中的腐蚀	闫隆
36	博士	刘鹏	粒子物理与原子核物理	超氘核与反超氘核质量和结合能的精确测量	极端条件下的核物理	陈金辉
37	博士	吴超	核技术及应用	质子治疗计划系统核心技术研发	质子治疗	蒲越虎
38	博士	郭雨薇	粒子物理与原子核物理	温度及表面粗糙度影响纳米尺度下水蒸发速率和动力学行为的理论研究	纳米科学和单分子生物物理	方海平
39	博士	刘焕玲	粒子物理与原子核物理	中能重离子碰撞中热核物质的热力学性质以及液气相变探针尺寸效应的研究	中低能重离子碰撞的性质	马余刚
40	博士	金小海	粒子物理与原子核物理	重离子反应中 QCD 物质的涨落研究	高能重离子对撞	陈金辉

41	博士	张正德	粒子物理与原子核物理	铁基合金中裂变产物及合金元素扩散机理的理论研究	材料的理论计算与机器学习	怀平
42	博士	沈志伟	无机化学	多肽自组装超分子的生物功能化材料设计及其应用	多肽自组装	张益
43	博士	张露灏	无机化学	脂质-DNA 复合结构的细胞应用	纳米生物学	王丽华
44	博士	叶翠翠	无机化学	反应性单体接枝聚偏氟乙烯的制备、结构、性能与应用的研究	辐射接枝	李景辉
45	博士	闫庆龙	无机化学	纳米金刚石和响应型纳米材料抗实体瘤效应研究	纳米材料和纳米生物学	王丽华
46	博士	赵婧馨	无机化学	聚乳酸网络结构构筑及其形状记忆性能研究	辐射高分子	李景辉
47	博士	张月月	无机化学	DNA 纳米结构探针在 CNTs 界面的设计及其空间排布	DNA 纳米探针在界面上的设计	王丽华
48	博士	王凯喆	无机化学	肿瘤细胞的细胞外囊泡自噬协同功能及其动态成像研究	细胞外囊泡	李宾
49	博士	夏慧娟	光学	X 射线闪烁体成像探测器光学编码成像研究	同步辐射探测器研究	邵仁忠
50	博士	马立梅	光学	焦点堆栈三维结构成像方法研究及应用	X 射线显微	邵仁忠
51	博士	敖浚轩	无机化学	新型高性能铈酰离子吸附材料制备及应用研究	辐射高分子材料	李晴暖
52	博士	陈晓亮	无机化学	DNA 编程纳米等离子体结构的排布	纳米材料	诸颖
53	博士	王明磊	无机化学	辐射接枝制备功能织物及其催化降解有机污染物的研究	织物辐射改性	吴国忠
54	博士	魏睿	无机化学	金属硫氧配合物的红外光谱和理论计算研究	钢系元素化学	龚昱
55	博士	舒淼	无机化学	负载型贵金属纳米催化材料的合成、催化性能及其“构效关系”研究	纳米催化	司锐
56	博士	谢晓冬	无机化学	基于暗场成像的贵金属纳米颗粒与活细胞相互作用研究	纳米材料生物学效应	胡钧
57	博士	任宁	无机化学	缓释和激活型纳米诊疗探针的制备及应用	纳米材料生物学效应	胡钧
58	博士	李威	无机化学	基于荧光技术的纳米催化研究以及细胞成像	纳米材料生物学效应	诸颖
59	博士	邓孟莹	无机化学	传感界面分子识别优化及应用	生物传感	宋世平
60	博士	耿艺耘	无机化学	三维石墨烯材料在放射性废液蒸发处理中的应用基础研究	乏燃料水法后处理	张岚

61	博士	吴双	无机化学	ZnCl <sub>2</sub> 基多元熔盐体系的设计及传蓄热性能研究	熔盐化学	谢雷东
62	博士	蒋鑫越	核能科学与工程	翅片式氟盐冷冻阀传热及运行特性研究	熔盐回路设备研究	王纳秀
63	博士	杨旭	核能科学与工程	SiC 包覆层的微观结构调控与性能研究	核燃料元件研制	朱智勇
64	博士	何燎原	核能科学与工程	氟盐快堆优化设计及 Th-U 循环性能研究	反应堆优化设计	刘桂民
65	博士	梁育林	核技术及应用	功能化 UHMWPE 纤维对重金属元素的吸附研究	同步辐射技术在环境科学中的应用	李燕
66	博士	岳增慧	核技术及应用	镧铜金属配合物组装机理及其拓展应用的研究	镧铜元素配位化学	黄宇营
67	博士	蒲小云	核技术及应用	上海光源三次谐波超导腔的优化设计及实验研究	超导高频技术	刘建飞
68	博士	胡金棒	光学	在典型半金属及贵金属上的表面在位反应机理研究	表面物理	宋飞
69	博士	周逸媚	核技术及应用	储存环逐束团三维位置测量技术研究	束流测量与控制	冷用斌
70	博士	邹春燕	核能科学与工程	利用超铀元素 (TRU) 启动的熔盐热堆钍铀循环过渡 及嬗变性能研究	反应堆物理	陈金根
71	博士	陈兴伟	核能科学与工程	球床式氟盐冷却高温堆球床堆积规律研究	反应堆物理	蔡翔舟
72	博士	周波	核能科学与工程	液态燃料熔盐堆放射性源项研究	反应堆物理	余笑寒
73	博士	乔舰	核技术及应用	紧凑型质子治疗同步加速器直线注入器 RFQ 和 DTL 的研究	医用质子治疗装置的研发	蒲越虎
74	博士	张茂江	无机化学	柔性织物表面诱导生长 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 纳米线及其传感行为研究	聚合物辐射改性	吴国忠
75	硕士	路宇畅	核能科学与工程	层状金属碳化物材料的力学行为及相变机制的理论研究	核能材料的理论研究	怀平
76	硕士	李武杰	粒子物理与原子核物理	低能核反应 <sup>12</sup> C(d,n) <sup>13</sup> N 和 <sup>12</sup> C(d,p) <sup>13</sup> C 中中子和质子的产额比	极端条件下的核物理	马余刚
77	硕士	周俊	核能科学与工程	<sup>7</sup> Li 富集度对液态熔盐堆钍铀转换性能的影响研究	钍铀燃料循环	陈金根
78	硕士	张守花	生物物理学	前扣带回中促肾上腺皮质激素释放激素能神经元的全脑输入	生物光子学与生物电化学	樊春海
79	硕士	余浩	粒子物理与原子核物理	IQMD 模型对核物质对称能的研究	放射性核束物理	方德清
80	硕士	赵恒	核能科学与工程	熔盐空间堆斯特林换热器的热工水力设计与研究	反应堆热工水力	徐洪杰

81	硕士	张博	核能科学与工程	熔盐流体自然循环特性研究	熔盐堆热工水力	余笑寒
82	硕士	陈鹏	粒子物理与原子核物理	一种钍基熔盐实验堆的钍利用与转换特性研究	中子物理	邹杨
83	硕士	唐彬	核能科学与工程	碳化硅中子探测器的实验研究	辐射探测技术	夏晓彬
84	硕士	黎瑜辉	生物物理学	糖配体修饰的多价 DNA 四面体与流感病毒血凝素亲和性研究	纳米材料与纳米生物学	李江
85	硕士	岑倩莹	核能科学与工程	基于连续损伤模型对熔盐堆堆芯压力容器的蠕变损伤分析与寿命评估	计算固体力学	曾广礼
86	硕士	李成名	粒子物理与原子核物理	基于太赫兹场调制测量超快 X 射线脉冲时间长度	自由电子激光物理	李宾
87	硕士	姚明	光学	基于单模光纤光源大口径细光束自准直测量系统的实验研究	光学仪器	王劼
88	硕士	马坤峰	核能科学与工程	熔盐热堆嬗变长寿命裂变产物的中子学性能分析	钍铀燃料循环物理	陈金根
89	硕士	郁长清	粒子物理与原子核物理	在线加钷模式下钍基熔盐堆燃料自持性能研究	熔盐堆物理设计	余笑寒
90	硕士	李浩	核技术及应用	基于框架核酸平台对 Pt-DNA 和 HMGB1 蛋白相互作用的研究	框架核酸平台用于单分子反应分析	吕敏
91	硕士	王东方	粒子物理与原子核物理	基于多相输运模型对相对论重离子碰撞冻出阶段性质的系统扫描研究	相对论重离子碰撞	马余刚
92	硕士	鲁曼丽	高分子化学与物理	石墨烯/贵金属复合气凝胶材料的伽马射线辐射法制备及其催化性能研究	辐射化学	李景焯
93	硕士	王海	粒子物理与原子核物理	相对论重离子碰撞中重味夸克能损和集体流研究	高温高密核物质性质研究	陈金辉
94	硕士	卢焕婷	信号与信息处理	质子治疗装置的扫描电源研制	电力电子及自动化	李瑞
95	硕士	王凤涛	粒子物理与原子核物理	相对论重离子碰撞输运模拟中强子化算法的改进	相对论重离子碰撞	徐骏
96	硕士	邓彬	核能科学与工程	熔盐快堆稳态核热耦合研究	反应堆物理热工耦合	蔡翔舟
97	硕士	王伟	核能科学与工程	Nb 添加对合金碲腐蚀和碲脆行为的影响	核能金属材料	李志军
98	硕士	周龙	粒子物理与原子核物理	质子-质子关联函数与丰质子核的双质子发射机制研究	放射性核束物理	方德清
99	硕士	冯鑫鑫	高分子化学与物理	辐射改性聚乙烯纤维(无纺布)对铀酰离子和铂离子的吸附研究	高分子辐射改性	吴国忠
100	硕士	侯会良	电子与通信工程	基于载钷闪烁体的中子探测与信号处理技术研究	核电子学与探测技术	戴志敏

101	硕士	林乐诚	光学工程	同步辐射红外 3D 谱学显微及应用	同步辐射红外 3D 谱学显微及应用	陈敏
102	硕士	时英智	电子与通信工程	基于差分进化算法的光束线智能调束系统	光束线智能优化	郑丽芳
103	硕士	李海荣	电子与通信工程	基于开源平台的通用电源控制器研究	电源控制	蒋舸扬
104	硕士	贺国达	核能与核技术工程	FLiBe 熔盐净化体系中结构和扩散的 AIMD 研究	熔盐化工	谢雷东
105	硕士	李国辉	电子与通信工程	基于国产实时操作系统的 EPICS 应用研究	反应堆控制	陈永忠
106	硕士	曹明鹏	核能与核技术工程	二元镍基金属辐照缺陷演化及抗辐照性能的研究	二元镍基金属辐照效应	闫隆

## 附录 2

## 2019-2020 年论文发表一览表

## Papers Published in 2019-2020

2015

No.	论文名称	期刊名称	期	卷	页	作者
1	A study on the validity of the first Born approximation for high-energy electron scattering with nitrogen molecules	JOURNAL OF PHYSICS B-ATOMIC MOLECULAR AND OPTICAL PHYSICS	52	24	245202	Kang, Xu; Xu, Long-Quan; Liu, Ya-Wei
2	Computational- and experimental-based analysis of the load capacity of dowel-brick structure of graphite component in TMSR	NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN	355		UNSP 110346	Fan, Huiqing; Huang, Chaochao; Zhang, Xiaochun
3	Carbon dots decorated ultrathin CdS nanosheets enabling in-situ anchored Pt single atoms: A highly efficient solar-driven photocatalyst for hydrogen evolution	APPLIED CATALYSIS B-ENVIRONMENTAL	259		UNSP 118036	Qiu, Shujun; Shen, Yongli; Wei, Guijuan
4	Synthesis of a dinuclear europium(III) complex through deprotonation and oxygen-atom transfer of trimethylamine N-oxide	DALTON TRANSACTIONS	48	46	17158	Li, Yangjuan; Chen, Xiuting; Gong, Yu
5	Ni, Cr, and Fe surfaces corroded by molten ZnCl <sub>2</sub>	MATERIALS AND CORROSION-WERKSTOFFE UND KORROSION				Wang, Xueliang; Yin, Huiqin; Liu, Wenguan
6	Red-Carbon-Quantum-Dot-Doped SnO <sub>2</sub> Composite with Enhanced Electron Mobility for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells	ADVANCED MATERIALS			1906374	Hui, Wei; Yang, Yingguo; Xu, Quan
7	Bubble formation and evolution behavior from vertical wall orifice	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	12	183	Ma, Zhao-Wei; Wu, Xiao-Ling; Zhang, Qin
8	New status of the infrared beamlines at SSRF	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	12	182	Zhou, Xiao-Jie; Zhu, Hua-Chun; Zhong, Jia-Jia
9	Yield ratio of neutrons to protons in C-12(d,n)N-13 and C-12(d,p)C-13 from 0.6 to 3 MeV	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	12	180	Li, Wu-Jie; Ma, Yu-Gang; Zhang, Guo-Qiang
10	Facile preparation of 3D graphene-based/polyvinylidene fluoride composite for organic solvents capture in spent fuel reprocessing	JOURNAL OF POROUS MATERIALS	26	6	1619	Geng, Yiyun; Li, Jihao; Li, Zheng
11	Growth process and mechanism of SiC	JOURNAL OF THE	39	15	4495	Yang, Xu;

	layer deposited by CVD method at normal atmosphere	EUROPEAN CERAMIC SOCIETY				Zhang, Feng; You, Yan
12	Fabrication of ultralight 3D graphene/Pt aerogel via in situ gamma-ray irradiation and its application for the catalytic degradation of methyl orange	FULLERENES NANOTUBES AND CARBON NANOSTRUCTURES				Lu, Manli; Li, Jihao; Li, Linfan
13	A wavelength-dispersive X-ray spectrometer for in/ex situ resonant inelastic X-ray scattering studies	X-RAY SPECTROMETRY				Mei, Bingbao; Gu, Songqi; Du, Xianlong
14	The Structure of Oxygen Vacancies in the Near-Surface of Reduced CeO <sub>2</sub> (111) Under Strain (vol 7, 436, 2019)	FRONTIERS IN CHEMISTRY	7		795	Han, Zhong-Kang; Zhang, Lei; Liu, Meilin
15	In situ formation of mononuclear complexes by reaction-induced atomic dispersion of supported noble metal nanoparticles	NATURE COMMUNICATIONS		10	5281	Feng, Siqian; Song, Xiangen; Liu, Yang
16	Side-On OMoF <sub>2</sub> (eta(2)-SO) and OWF <sub>2</sub> (eta(2)-SO) Complexes Featuring Peroxo-Like Sulfur Monoxide Ligand	INORGANIC CHEMISTRY	58	22	15652	Wei, Rui; Chen, Xiuting; Gong, Yu
17	Candidate for Laser Cooling of a Negative Ion: High-Resolution Photoelectron Imaging of Th-	PHYSICAL LETTERS	123	20	203002	Tang, Rulin; Si, Ran; Fei, Zejie
18	The fabrication of a Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /graphene oxide (GO)/polyacrylonitrile (PAN) nanofiber membrane for the degradation of Orange II by advanced oxidation technology	RSC ADVANCES	9	63	36517	Zhang, Hao; Liu, Weihua; Tian, Feng
19	Oscillator Strengths for the Lyman and Werner Bands of Molecular Hydrogen Studied by the Dipole (?,?,) Method	ASTROPHYSICAL JOURNAL	885	2	163	Xiong, Tao; Xu, Yuan-chen; Yang, Ke
20	Isospin splitting of pion elliptic flow in relativistic heavy-ion collisions	PHYSICS LETTERS B	798		UNSP 135002	Liu, He; Wang, Feng-Tao; Sun, Kai-Jia
21	Bidentate SO <sub>2</sub> Complexes of Zirconium and Hafnium Difluorides with Highly Activated S-O Bonds	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A	123	44	9567	Wei, Rui; Chen, Xiuting; Gong, Yu
22	Construction of Active Site in a Sintered Copper-Ceria Nanorod Catalyst	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	141	44	17548	Yu, Wen-Zhu; Wang, Wei-Wei; Li, Shan-Qing
23	Climbing the Apex of the ORR Volcano Plot via Binuclear Site Construction: Electronic and Geometric Engineering	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	141	44	17763	Xiao, Meiling; Chen, Yongting; Zhu, Jianbing
24	A guide to sample delivery systems for	FEBS JOURNAL	286	22	4402	Zhao, Feng-Zhu;

	serial crystallography					Zhang, Bin; Yan, Er-Kai
25	Revealing the Adsorption and Decomposition of EP-PTCDI on a Cerium Oxide Surface	ACS OMEGA	4	19	17939	Hu, Jinping; Shen, Kongchao; Liang, Zhaofeng
26	Toward biomass-based single-atom catalysts and plastics: Highly active single-atom Co on N-doped carbon for oxidative esterification of primary alcohols	APPLIED CATALYSIS B-ENVIRONMENTAL	256		UNSP 117767	Zhou, Hua; Hong, Song; Zhang, Hao
27	A highly efficient pathway to recover gold from acid aqueous solution by using an amidoxime-functionalized UHMWPE fiber	RARE METALS	38	11	1105	Liang, Yu-Lin; Jin, Chan; Hu, Jiang-Tao
28	First-principles study on the mechanical properties of M <sub>2</sub> CT <sub>2</sub> (M = Ti, Zr, Hf; T = O, F, OH) MXenes	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	11	172	Lu, Yu-Chang; Ren, Cui-Lan; Wang, Chang-Ying
29	Controlling Dynamic Structural Transformation of Atomically Dispersed CuO <sub>x</sub> Species and Influence on Their Catalytic Performances	ACS CATALYSIS	9	11	9840	Liu, Annai; Liu, Lichen; Cao, Yuan
30	Synthesis and photoluminescence properties of CsPbBr <sub>3</sub> quantum dots by using para-xylene as the anti-solvent	JOURNAL OF LUMINESCENCE	215		116584	Gao, Hui; Liu, Siyuan; Xue, Zhipeng
31	Corrosion behaviour of 316H stainless steel in molten FLiNaK eutectic salt containing graphite particles	CORROSION SCIENCE	160		UNSP 108174	Liu, Qi; Sun, Hua; Yin, Huiqin
32	Influence of U-235 enrichment on the moderator temperature coefficient of reactivity in a graphite-moderated molten salt reactor	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	11	166	Li, Xiao-Xiao; Cui, De-Yang; Ma, Yu-Wen
33	Crystallization and Phase Behavior in Block Copolymer Solution: An in Situ Small Angle X-ray Scattering Study	CHINESE JOURNAL OF POLYMER SCIENCE	37	11	1162	Zhu, Hong-Yan; Tian, Feng; Li, Xiu-Hong
34	Neutron flux distribution and conversion ratio of Critical Experiment Device for molten salt reactor research	ANNALS OF NUCLEAR ENERGY	133		707	Liu, Yafen; Yan, Rui; Zou, Yang
35	A facile approach combining the gel-casting with emulsion method for the preparation of high density erbia microspheres	ANNALS OF NUCLEAR ENERGY	133		718	Gong, Yichao; Yu, Xiaohe; Yang, Mao
36	Xenon ion irradiation induced hardening in inconel 617 containing experiment and	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	525		32	Zhu, Zhenbo; Huang, Hefei;

	numerical calculation						Liu, Jizhao
37	The evaporation behaviour of ThF <sub>4</sub> mixed of FLiNaK melt during low-pressure distillation	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	525	48			Luo, Yan; Geng, Junxia; Li, Wenxin
38	Fast Oxygen Transport in Bottlelike Channels for Y-Doped BaZrO <sub>3</sub> : A Reactive Molecular Dynamics Investigation	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	123	42	25611		Li, Xuejiao; Zhang, Lei; Tang, Zhongfeng
39	Tetrapositive Hafnium-Diamide Complexes in the Gas Phase: Formation, Structure and Reaction	JOURNAL OF THE AMERICAN SOCIETY FOR MASS SPECTROMETRY					Chen, Xiuting; Gong, Yu;
40	Atomic force microscopy-based single-molecule force spectroscopy detects DNA base mismatches	NANOSCALE	11	37	17206		Liu, Wenjing; Guo, Yourong; Wang, Kaizhe
41	Flexible and Highly Sensitive Humidity Sensor Based on Sandwich-Like Ag/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Nanowires Composite for Multiple Dynamic Monitoring	NANOMATERIALS	9	10	1399		Zhang, Maojiang; Wang, Minglei; Zhang, Mingxing
42	Tuning control system of a third harmonic superconducting cavity in the Shanghai Synchrotron Radiation Facility	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	10	157		Gong, Peng-Peng; Zhao, Yu-Bin; Hou, Hong-Tao
43	XAFS and SRGI-XRD studies of the local structure of tellurium corrosion of Ni-18%Cr alloy	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	10	153		Luo, Mi; Deng, Sheng-Jue; Li, Li
44	Evaluation of Dose Derived From HTO for Adults in the Vicinity of Qinshan Nuclear Power Base	HEALTH PHYSICS	117	4	443		Qin, Lailai; Dai, Zhongqin; Xia, Zhenghai
45	A novel concept for a molten salt reactor moderated by heavy water	ANNALS OF NUCLEAR ENERGY	132		391		Wu, Jianhui; Chen, Jingen; Kang, Xuzhong
46	Thermal sizing design and experimental evaluation of molten salt-to-air heat exchanger	ANNALS OF NUCLEAR ENERGY	132		504		Chen, Yu-Shuang; Tian, Jian; Zhu, Hai-Hua
47	Microstructural evolution and load transfer in a nickel-based alloy: An in situ high-energy X-ray diffraction study	MATERIALS LETTERS	252		223		Zhu, Yongqi; Peng, Hao; Li, Cheng
48	Spatial high resolution of actin filament organization by PeakForce atomic force microscopy	CELL PROLIFERATION			e12670		Liu, Lin; Wei, Yuhui; Liu, Jingyuan
49	Anchoring Cu-1 species over nanodiamond-graphene for semi-hydrogenation of acetylene	NATURE COMMUNICATIONS	10		4431		Huang, Fei; Deng, Yuchen; Chen, Yunlei

50	Formation of Cerium and Neodymium Isocyanides in the Reactions of Cyanogen with Ce and Nd Atoms in Argon Matrices	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A	123	38	8208	Fang, Zongtang; Vasiliu, Monica; Chen, Xiuting
51	Synergistic Doping and Intercalation: Realizing Deep Phase Modulation on MoS <sub>2</sub> Arrays for High-Efficiency Hydrogen Evolution Reaction	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION				Deng, Shengjue; Luo, Mi; Ai, Changzhi
52	Experimental and numerical studies on natural circulation behavior of heat exchanger for molten salt loop	JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY				Wu, Yanhua; Cai, Chuangxiong; Wang, Kai
53	Structural Transformation of 2,7-Dibromopyrene on Au(111) Mediated by Halogen-Bonding Motifs	CHEMPHYSICHEM	20	18	2376	Hu, Jinbang; Shen, Kongchao; Hu, Jinping
54	Size-dependent selective crystallization using an inorganic mixed-oxoanion system for lanthanide separation	DALTON TRANSACTIONS	48	34	12808	Lu, Huangjie; Guo, Xiaojing; Wang, Yaxing
55	The structural evolution and tunable photoluminescence of f-element bearing coordination polymers of the 2,4,6-tri- $\alpha$ -pyridyl-1,3,5-triazine ligand	CRYSTENGCOMM	21	34	5059	Yue, Zenghui; Lu, Huangjie; Li, Zijian
56	A novel ion-imprinted amidoxime-functionalized UHMWPE fiber based on radiation-induced crosslinking for selective adsorption of uranium	RSC ADVANCES	9	49	28588	Ao, Junxuan; Zhang, Hongjun; Xu, Xiao
57	Dense carbon film coated 316L via in-situ synthesized CaC <sub>2</sub> in FLiNaK molten salts and its high performance of anti-corrosion property	ELECTROCHIMICA ACTA			23910.1 016/j.electacta.2 019.05.1 00	Liu, Jingchun; Dolan, Kieran P.; Liu, Junxia
58	Efficient conversion of CO <sub>2</sub> to methane using thin-layer SiO <sub>x</sub> matrix anchored nickel catalysts	NEW JOURNAL OF CHEMISTRY	43	33	13217	Huang, Xieyi; Wang, Peng; Zhang, Zhichao
59	End-On Oxygen-Bound Sulfur Monoxide Complex of Titanium Oxyfluoride	INORGANIC CHEMISTRY	58	17	11801	Wei, Rui; Chen, Xiuting; Gong, Yu
60	Higher dose rate effect of 500-keV EB irradiation favoring free radical annealing and pre-oxidation of polyacrylonitrile fibers	POLYMER DEGRADATION AND STABILITY	167		201	Zhang, Wenli; Wang, Mouhua; Liu, Weihua
61	Control and Data Acquisition System for Hard X-Ray Micro-Beam Grazing	SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS	39	9	2794	Lan Xu-ying; He Shang-ming;

	Incident Experiment and Its Application						Zheng Yi
	Overwhelming the Performance of Single						Sun, Minghao;
62	Atoms with Atomic Clusters for Platinum-Catalyzed Hydrogen Evolution	ACS CATALYSIS	9	9	8213		Ji, Jiapeng; Hu, Mingyu
		JOURNAL OF					Xie, Honglan;
63	High-efficiency fast X-ray imaging detector development at SSRF	SYNCHROTRON RADIATION	26		1631		Luo, Hongxin; Du, Guohao
	Investigation of the local structure of molten ThF4-LiF and ThF4-LiF-BeF2	JOURNAL OF					Sun, Jian; Guo,
64	mixtures by high-temperature X-ray absorption spectroscopy and molecular-dynamics simulation	SYNCHROTRON RADIATION	26		1733		Xiaoqing; Zhou, Jing
	Touschek lifetime study based on the precise bunch-by-bunch BCM system at SSRF	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	9	144		Chen, Fang-Zhou; Chen, Zhi-Chu; Zhou, Yi-Mei
66	Electrorefining of nickel from nickel-chromium alloy in molten LiCl-KCl	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	9	136		Zhu, Tie-Jian; Huang, Wei; Li, Qing-Nuan
67	Research on the effect of the heavy nuclei amount on the temperature reactivity coefficient in a small modular molten salt reactor	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	9	140		Tan, Meng-Lu; Zhu, Gui-Feng; Zou, Yang
68	Supervised dictionary learning supported classifier with feature fusion scheme to noninvasively detect TRISO-particle defects	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	523		43		Guo, Man-shan; Yang, Xu; Zhang, Feng
69	Effect of cations on stabilizing graphene oxide membranes in aqueous solutions	APPLIED SURFACE SCIENCE	487		962		Zhao, Haogui; Yang, Jing; Li, Zheng
70	Complex twin interfaces in M6C carbides	MATERIALS LETTERS	250		167		Jiang, Li; Ye, Xiang-Xi; Liu, Ren-Duo
71	Unconventional Atomic Structure of Graphene Sheets on Solid Substrates	SMALL	15	42	1902637		Zhang, Jinjin; Yang, Yizhou; Yang, Shuo
72	Rheology, polymorphic crystal transformation, thermal, and mechanical properties of long-chain branched isotactic poly(1-butene)	JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE	137	9	48411		Maimaitiming, Aizezi; Wu, Guozhong; Tan, Hairong
73	RF design and study of a 325 MHz 7 MeV APF IH-DTL for an injector of a proton medical accelerator	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	9	135		Li, Xuan; Pu, Yue-Hu; Yang, Fan
74	An active, selective, and stable manganese	GREEN CHEMISTRY	21	15	4194		Liao, Xuemei;

	oxide-supported atomic Pd catalyst for aerobic oxidation of 5-hydroxymethylfurfural						Hou, Jindou; Wang, Ya
75	Crystal structures of phage NrS-1 N300-dNTPs-Mg <sup>2+</sup> complex provide molecular mechanisms for substrate specificity	BIOCHEMICAL AND BIOPHYSICAL RESEARCH COMMUNICATIONS	515	4	551		Guo, Haojie; Li, Minjun; Wu, Hai
76	Infrared Spectroscopic and Theoretical Studies of the 3d Transition Metal Oxyfluoride Molecules	INORGANIC CHEMISTRY	58	15	9796		Wei, Rui; Fang, Zongtang; Vasiliu, Monica
77	Parallel direct writing achromatic talbot lithography: a method for large-area arbitrary sub-micron periodic nano-arrays fabrication	NANOTECHNOLOGY	30	31	315301		Yang, Shumin; Xue, Chaofan; Zhao, Jun
78	Unexpected Outstanding Room Temperature Spin Transport Verified in Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Film	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY LETTERS	10	15	4422		Yang, Yingguo; Feng, Shanglei; Li, Zhihao
79	Spontaneous Delithiation under Operando Condition Triggers Formation of an Amorphous Active Layer in Spinel Cobalt Oxides Electrocatalyst toward Oxygen Evolution	ACS CATALYSIS	9	8	7389		Zhang, Shuo; Gu, Songqi; Wang, Yu
80	Single-Atom Cr-N-4 Sites Designed for Durable Oxygen Reduction Catalysis in Acid Media	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION	58	36	12469		Luo, Ergui; Zhang, Hao; Wang, Xian
81	Source apportionment of carbonaceous aerosols during haze days in Shanghai based on dual carbon isotopes	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	321	2	383		Wei, Nannan; Xu, Zhiyou; Wang, Guanghua
82	Research on the comprehensive performance of PrFeB magnets for synchrotron radiation and free electron laser	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	8	118		He, Yong-Zhou; Bao, Xiao-Qing; Zhang, Wei
83	Effect of Na and Cl ions on water evaporation on graphene oxide	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	8	122		Nan, Xi; Guo, Yu-Wei; Wan, Rong-Zheng
84	Application of global variance reduction method to calculate a high-resolution fast neutron flux distribution for TMSR-SF1	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	8	125		Yang, Pu; Dai, Ye; Zou, Yang
85	Efficient all-polymer solar cells based on thiazole-bridged middle band-gap polymer donor: The influence of alkyl side chain on polymer-polymer miscibility and photovoltaic performance	SYNTHETIC METALS	254		49		Du, Zurong; Zhang, Yongchao; Yang, Chunming
86	Microstructure and Its Influence on the	ACTA METALLURGICA	32	8	1032		Chen,

	Mechanical Properties of Ni-28W-6Cr-Based Alloy-Welded Joints by GTAW	SINICA-ENGLISH LETTERS					Shuang-Jian; Ye, Xiang-Xi; Tsang, D. K. L.
87	Understanding the synergetic interaction within alpha-MoC/beta-Mo <sub>2</sub> C heterostructured electrocatalyst	JOURNAL OF ENERGY CHEMISTRY	35	66			Zhang, Hao; Jin, Haiyan; Yang, Yuqi
88	High-Temperature Oxidation Behavior and Oxide Scale Structure of Yttrium-Modified Ni-16Mo-7Cr-4Fe Superalloy at 1273K	OXIDATION OF METALS	92		1 月 2 日	67	Li, Xiaoli; He, Shangming; Liang, Jianping
89	Study on background shielding for a compact photoneutron source	PROGRESS IN NUCLEAR ENERGY	115	74			Wang, X. H.; Liu, L. X.; Hu, J. F.
90	The Laplace transform method for solving the burnup equation with external feed	ANNALS OF NUCLEAR ENERGY	130	47			Xia, Shaopeng; Chen, Jingen; Han, Jianlong
91	Effects of solution treatment on grain coarsening and hardness of laser welds in UNS N10003 alloy contained different carbon content	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY	35	8		1719	Yu, Kun; Shi, Xianwu; Jiang, Zhenguo
92	Preparation of SiC layer with sub-micro grain structure in TRISO particles by spouted bed CVD	JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY	39	9		2839	Yang, Xu; Zhang, Feng; Guo, Manshan
93	Characteristics of size distributions and sources of water-soluble ions in Lhasa during monsoon and non-monsoon seasons	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES-CHINA	82	155			Wei, Nannan; Xu, Zhiyou; Liu, Junwen
94	In-situ mineralized robust polysiloxane-Ag@ZnO on cotton for enhanced photocatalytic and antibacterial activities	CARBOHYDRATE POLYMERS	217	15			Wang, Minglei; Zhang, Maojiang; Zhang, Mingxing
95	Development of a Short REBCO Undulator Magnet With Resistive Joints	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	29	5		4100204	Liu, Shichang; Ding, Yi; Xu, Jieping
96	Regulation of the Crystal Structure Leading to the Bandgap Widening and Phonon Scattering Increasing in Cu <sub>3</sub> SnS <sub>4</sub> -Cu <sub>3</sub> SbSe <sub>3</sub> Chalcogenides	ADVANCED ELECTRONIC MATERIALS	5	10		1900485	Zhao, Lulu; Lin, Naiming; Han, Zhongkang
97	Obliquely incident laser and electron beam interaction in an undulator	PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS	22	7		70701	Wang, Xiaofan; Feng, Chao; Tsai, Cheng-Ying
98	Reversible Switching of Catalytic Activity by Shuttling an Atom into and out of Gold	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL	58	29		9964	Cai, Xiao; Saranya,

	Nanoclusters	EDITION				Govindarajan; Shen, Kangqi
99	Low enriched uranium and thorium fuel utilization under once-through and offline reprocessing scenarios in small modular molten salt reactor	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH	43	11	5775	Zhu, Guifeng; Zou, Yang; Yan, Rui
100	The Evolution in Catalytic Activity Driven by Periodic Transformation in the Inner Sites of Gold Clusters	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	29	38	1904242	Sun, Yongnan; Wang, Endong; Ren, Yujing
101	Carbon vacancy defect-activated Pt cluster for hydrogen generation	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY A	7	25	15364	Bao, Xiaobing; Gong, Yutong; Chen, Yuzhuo
102	Starvation effect on the morphology of microvilli in HeLa cells	BIOCHEMICAL AND BIOPHYSICAL RESEARCH COMMUNICATIONS	514	4	1238	Liu, Lin; Wang, Kaizhe; Liu, Jingyuan
103	Silver nanoparticles exert concentration-dependent influences on biofilm development and architecture	CELL PROLIFERATION	52	4	e12616	Guo, Jingyang; Qin, Simin; Wei, Yan
104	Citrate-assisted efficient local delivery of naked oligonucleotide into live mouse brain cells	CELL PROLIFERATION	52	4	e12622	Zhou, Haibin; Zhang, Shouhua; Lv, Fei
105	Towards an extremely high resolution broad-band flat-field spectrometer in the 'water window'	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26		1058	Li, Zhuo; Li, Bin;
106	A variable fixed-focus constant optimization method for a variable-included-angle varied-line-spacing plane-grating monochromator	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26		1192	Xue, Chaofan; Xue, Lian; Wu, Yanqing
107	In-plane wavevector distribution in partially coherent X-ray propagation	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26		1198	Ren, Junchao; Wang, Yong; Meng, Xiangyu
108	Irradiation-induced mixing of Na and K in graphite in molten salt reactor: An estimation based on ion beam irradiation	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS	450		100	Lei, Qiantao; He, Zhoutong; Qi, Wei
109	Helium release and lattice swelling in nickel foil irradiated by multiply-energy helium ions	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS	450		108	Gao, Jie; Huang, Hefei; Liu, Jizhao

		NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS						
110	Preliminary research on method of tree ring's NE-OBT measurement using AMS	RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS	450		149			Ma, Yuhua; He, Ming; Gao, Jie
111	Broadband terahertz recognizing conformational characteristics of a significant neurotransmitter gamma-aminobutyric acid	RSC ADVANCES	9	35	20240			Cheng, Chao; Zhu, Zhongjie; Li, Shaoping
112	Programming biosensing sensitivity by controlling the dimension of nanostructured electrode	ANALYTICAL AND BIOANALYTICAL CHEMISTRY	411	18	4085			Li, Min; Zhao, Bin; Deng, Mengying
113	Influence of copper element distribution and speciation on the color of Chinese underglaze copper-red porcelain in the Yuan dynasty	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	7	114			Zhang, Mao-Lin; Wang, Li-Hua; Zhang, Li-Li
114	Extraction of medium-spatial-frequency interfacial waviness and inner structure from X-ray multilayers using the speckle scanning technique	OPTICAL MATERIALS EXPRESS	9	7	2878			Jiang, Hui; Ya, Shuai; Tian, Naxi
115	Ionic liquid grafted polyamide 6 as porous membrane materials: Enhanced water flux and heavy metal adsorption	APPLIED SURFACE SCIENCE	481		1435			Zheng, Xin; Chen, Feifei; Zhang, Xiaowei
116	Power losses caused by longitudinal HOMs in 1.3-GHz cryomodule of SHINE	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	7	105			Guo, Jun-Jie; Gu, Qiang; Zhang, Meng
117	High-performance single atom bifunctional oxygen catalysts derived from ZIF-67 superstructures	NANO ENERGY	61		245			Sun, Xueping; Sun, Shixiong; Gu, Songqi
118	Effect of concentration and adsorption time on the formation of a large-scale origami pattern	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	7	111			Liu, Wen-Jing; Zhang, Ping; Sun, Tong
119	One-step ion beam irradiation manufacture of 3D micro/nanopatterned structures in SiC with tunable work functions	CARBON	148		387			Zhou, Yuying; Li, Shimin; Wang, Ying
120	In-situ TEM observation of nanobubbles evolution in helium-irradiated aluminium upon tensile stressing	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	520		178			Chen, Hao; Cheng, Yangming; Lin, Chenghui
121	Thorium utilization with pebble mixing system in fluoride salt-cooled High Temperature Reactor	PROGRESS IN NUCLEAR ENERGY	114		84			Zhu, Guifeng; Liu, Sijia; Zou, Yang
122	Dahlia-liked Carbon Nanohorns Decorated	CHEMISTRYSELECT	4	24	7270			Lu, Qiu-Feng;

	Graphene/Polyaniline Nanocomposite and Its Derived Nitrogen-doped Carbon for High-performance Supercapacitor					Wang, Shuhao; Zhou, Jing
123	Thorium utilization in a small modular molten salt reactor with progressive fuel cycle modes	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH	43	8	3628	Yu, Chenggang; Wu, Jianhui; Zou, Chunyan
124	Temperature regulation of the contact angle of water droplets on the solid surfaces	JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS	150	23	234703	Qi, Chonghai; Lei, Xiaoling; Zhou, Bo
125	Design, RF measurement, tuning, and high-power test of an X-band deflector for Soft X-ray Free Electron Lasers (SXFEL) at SINAP	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT	930		210	Tan, Jianhao; Fang, Wencheng; Tong, Dechun
126	Ternary Solar Cells Employing Thieno[3,4-b]thiophene-Based Copolymer Offer High Performance with Large Current Density and Fine-Tuned Morphology	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	123	24	14976	Huang, Da; Bian, Fenggang; Zhu, Dangqiang
127	Quantitative Measurement of Spatial Effects of DNA Origami on Molecular Binding Reactions Detected using Atomic Force Microscopy	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	11	24	21973	Zhang, Ping; Wang, Fei; Liu, Wenjing
128	Electrochemical and Raman Spectroscopic Investigations on the Speciation and Behavior of Chromium Ions in Fluoride Doped Molten LiCl-KCl	JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY	166	10	H463	Zhu, Tiejian; Wang, Chenyang; Fu, Haiying
129	The Structure of Oxygen Vacancies in the Near-Surface of Reduced CeO <sub>2</sub> (111) Under Strain	FRONTIERS IN CHEMISTRY	7		436	Han, Zhong-Kang; Zhang, Lei; Liu, Meilin
130	Extraction kinetics of uranium(VI) and thorium(IV) with di(1-methyl-heptyl)methyl phosphonate from nitric acid medium using a Lewis cell	SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY	217		258	Song, Lianjun; Liu, Ying; Ding, Songdong
131	Molten salt synthesis of Nb-doped (La, Sr) FeO <sub>3</sub> as the oxygen electrode for reversible solid oxide cells	MATERIALS LETTERS	245		114	Guan, Chengzhi; Wang, Yudong; Chen, Kongfa
132	Single-molecule nanomechanical spectroscopy shows calcium ions contribute to chain association and structural flexibility of blood clotting	BIOCHEMICAL AND BIOPHYSICAL RESEARCH COMMUNICATIONS	513	4	857	Cheng, Jie; Wang, Yadi; Pan, Yatao

factor VIII						
133	Nonuniform self-imaging of achromatic Talbot lithography	CHINESE OPTICS LETTERS	17	6	62201	Xia, Huijuan; Yang, Shumin; Wang, Liansheng
134	Ambient conditions disordered-ordered phase transition of two-dimensional interfacial water molecules dependent on charge dipole moment	PHYSICAL REVIEW MATERIALS	3	6	65602	Wang, Chunlei; Qi, Chonghai; Tu, Yusong
135	Capillary imbibition in pattern charged nanotubes	JOURNAL OF STATISTICAL MECHANICS-THEORY AND EXPERIMENT			63210	Zhang, Renliang; Du, Guojun; Wang, Meifen
136	The role of the Heisenberg principle in constrained molecular dynamics model	INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS E	28	6	1950039	Wang, K.; Bonasera, A.; Zheng, H.
137	Atomic Mechanism in Layer-by-Layer Growth via Surface Reconstruction	NANO LETTERS	19	6	4205	Yu, Jian; Li, Xiao-Yan; Miao, Junjian
138	3D hierarchical porous amidoxime fibers speed up uranium extraction from seawater	ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE	12	6	1979	Xu, Xiao; Zhang, Hongjun; Ao, Junxuan
139	New Astrophysical Reaction Rate for C-12(alpha, gamma)O-16 Reaction (vol 817, L5, 2016)	ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS	877	2	L42	An, Zhen-Dong; Ma, Yu-Gang; Fan, Gong-Tao
140	Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of Hastelloy N superalloy welds	MATERIALS TODAY COMMUNICATIONS	19		230	Wang, Wanxia; Jiang, Li; Li, Chaowen
141	The protective performance of a molten salt frozen wall in the process of fluoride volatility of uranium	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	6	102	Zhou, Jin-Hao; Tan, Ji-Lin; Sun, Bo
142	Radio-frequency design of a new C-band variable power splitter	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	6	100	Li, Zong-Bin; Grudiev, Alexej; Fang, Wen-Cheng
143	Transfer function measurement for the SSRF SRF system	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	6	101	Xia, Yang-Yang; Zhao, Zhen-Tang; Zhao, Yu-Bin
144	Energy calibration of a CR-39 nuclear-track detector irradiated by charged particles	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	6	87	Zhang, Yue; Wang, Hong-Wei; Ma, Yu-Gang
145	Corrosion-driven outward migration and growth of helium bubbles in a nickel-based alloy in high-temperature	CORROSION SCIENCE	153		47	Lei, Guanhong; Yang, Sida; Huang, Hefei

	molten salt environment					
146	Evaluation of Effects of TGF-beta 1 Inhibition on Gastric Cancer in Nude Mice by Diffusion Kurtosis Imaging and In-Line X-ray Phase Contrast Imaging With Sequential Histology	JOURNAL OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING	49	6	1553	Shi, Bowen; Yuan, Fei; Yan, Fuhua
147	Multiscale characterization of three-dimensional pore structures in a shale gas reservoir: A case study of the Longmaxi shale in Sichuan basin, China	JOURNAL OF NATURAL GAS SCIENCE AND ENGINEERING	66		207	Wang, Yu; Wang, Lihua; Wang, Jianqiang
148	In situ XAFS study on the formation process of cobalt carbide by Fischer-Tropsch reaction	PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS	21	20	10791	Liu, Yang; Wu, Dongshuang; Yu, Fei
149	DNA Nanotechnology-Enabled Drug Delivery Systems	CHEMICAL REVIEWS	119	10	6459	Hu, Qinqin; Li, Hua; Wang, Lihua
150	Two-Dimensional Ti3C2TX/Polyaniline Nanocomposite from the Decoration of Small-Sized Graphene Nanosheets: Promoted Pseudocapacitive Electrode Performance for Supercapacitors	CHEMELECTROCHEM	6	10	2748	Wang, Shuhao; Ma, Zhengwei; Lu, Qiu-Feng
151	Trace Zinc-Preload for Enhancement of Uranium Adsorption Performance and Antifouling Property of AO-Functionalized UHMWPE Fiber	INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH	58	19	8026	Ao, Jun-Xuan; Yuan, Yi-Hui; Xu, Xiao
152	Stepping gating of ion channels on nanoelectrode via DNA hybridization for label-free DNA detection	BIOSENSORS & BIOELECTRONICS	133		141	Zhao, Haipei; Ye, Dekai; Mao, Xiuhai
153	Experimental investigation and thermodynamic assessment of the RbCl-CsCl-ZnCl2 system and its subsystems	FLUID PHASE EQUILIBRIA	487		33	Wu, Shuang; Li, Xiang; Zhang, Peng
154	One-step synthesis of centimeter-size alpha-MoO3 with single crystallinity	APPLIED SURFACE SCIENCE	476		789	Sun, Haoliang; Zhang, Huan; Jing, Xinxin
155	Blooming of Block Copolymer Micelles into Complex Nanostructures on a Surface	MACROMOLECULES	52	9	3479	Zhu, Hongyan; Wang, Xinyan; Cui, Yan
156	Assembly of peptides in mica-graphene nanocapillaries controlled by confined water	NANOSCALE	11	17	8210	Zhang, Jinjin; Zhou, Limin; Du, Qiqige
157	Coordination Structures of the Uranyl(VI)-Diamide Complexes: A Combined Mass Spectrometric, EXAFS	INORGANIC CHEMISTRY	58	9	5695	Chen, Xiuting; Li, Qingnuan; Gong, Yu

Spectroscopic, and Theoretical Study						
158	Fabricating Single-Atom Catalysts from Chelating Metal in Open Frameworks	ADVANCED MATERIALS	31	18	1808193	Lin, Yichao; Liu, Pingying; Velasco, Ever
159	Characterization of CoMn catalyst by in situ X-ray absorption spectroscopy and wavelet analysis for Fischer-Tropsch to olefins reaction	JOURNAL OF ENERGY CHEMISTRY	32		118	Yang, Ruouo; Xia, Zhaoming; Zhao, Ziang
160	Promoting nitrogen electroreduction to ammonia with bismuth nanocrystals and potassium cations in water	NATURE CATALYSIS	2	5	448	Hao, Yu-Chen; Guo, Yu; Chen, Li-Wei
161	Probing thermal decomposition mechanism of molten nitrite/nitrates salt by time of flight mass spectrometry	SOLAR ENERGY	183		823	Fei, Zejie; Zhang, Yu; Ge, Min
162	Angular dispersion enhanced prebunch for seeding ultrashort and coherent EUV and soft X-ray free-electron laser in storage rings	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26		677	Wang, Xiaofan; Feng, Chao; Liu, Tao
163	A piezoelectric deformable X-ray mirror for phase compensation based on global optimization	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26		729	Jiang, Hui; Tian, Naxi; Liang, Dongxu
164	A novel method to inspect coating thickness of tristructural isotropic fuel particles	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH	43	6	2391	Guo, Man-shan; Yang, Xu; Zhang, Feng
165	Development of readout electronics for bunch arrival-time monitor system at SXFEL	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	5	82	Wang, Jin-Guo; Liu, Bo;
166	Radiological environmental impact analysis of a 2-MW thorium molten salt reactor during an accident	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	5	78	Chen, Chang-Qi; Xia, Xiao-Bin; Zhang, Zhi-Hong
167	GPU-accelerated scanning path optimization in particle cancer therapy (vol 30, pg 56, 2019)	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	5	85	Wu, Chao; Pu, Yue-Hu; Zhang, Xiao
168	Simulation of migration and coalescence of helium bubbles in nickel	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	518		48	Zhang, Wei; Han, Han; Dai, Jianxing
169	Dual-cavity beam arrival time monitor design for the Shanghai soft X-ray FEL facility	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	5	72	Cao, Shan-Shan; Yuan, Ren-Xian; Chen, Jian
170	Theoretical analyses of chemical bonding in terminal EThF2 (E = O, S, Se, Te)	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	5	70	Li, Yan-Li; Xiong, Xiao-Gen; Liu, Hong-Tao
171	Characterization of molten 2LiF-BeF2 salt	NUCLEAR SCIENCE AND	30	5	74	Xu, Hong-Xia;

	impregnated into graphite matrix of fuel elements for thorium molten salt reactor	TECHNIQUES				Lin, Jun; Zhong, Ya-Juan
172	Single-molecule measurement and bioinformatics analysis suggest a preferred orientation of human coagulation factor VIII on hydrophobic interfaces	BIOPHYSICAL CHEMISTRY	248		9	Cheng, Jie; Geng, Feng; Hu, Jun
173	Transport approaches for the description of intermediate-energy heavy-ion collisions	PROGRESS IN PARTICLE AND NUCLEAR PHYSICS	106		312	Xu, Jun;;
174	The structural relaxation study of Zr-Cu-Ni-Al metallic glass during heating by small-angle X-ray scattering	APPLIED PHYSICS A-MATERIALS SCIENCE & PROCESSING	125	5	297	Liu, Yi; Pan, Jie; Li, Li
175	Numerical and experimental investigation of glow discharge cleaning on SSRF beamline	VACUUM	163		135	Li, Bo; Chen, Ming; Liu, Jia
176	Optimizing reaction paths for methanol synthesis from CO <sub>2</sub> hydrogenation via metal-ligand cooperativity	NATURE COMMUNICATIONS	10		1885	Chen, Yizhen; Li, Hongliang; Zhao, Wanghui
177	Charge asymmetry dependence of the elliptic flow splitting in relativistic heavy-ion collisions	PHYSICAL REVIEW C	99	4	44915	Han, Zhang-Zhu; Xu, Jun;
178	Expansion of the structural diversity of f-element bearing molybdate iodates: synthesis, structures, and optical properties	DALTON TRANSACTIONS	48	15	4823	Lin, Jian; Liu, Qi; Yue, Zenghui
179	Characteristic fingerprint spectrum of neurotransmitter norepinephrine with broadband terahertz time-domain spectroscopy	ANALYST	144	8	2504	Zhu, Zhongjie; Cheng, Chao; Chang, Chao
180	Microstructure Evolution of a Co/MnO Catalyst for Fischer-Tropsch Synthesis Revealed by In Situ XAFS Studies	CHEMCATCHEM	11	8	2187	Sun, Fanfei; Sun, Xueping; Jin, Yixing
181	Redox Engineering of Cytochrome c using DNA Nanostructure-Based Charged Encapsulation and Spatial Control	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	11	15	13874	Ge, Zhilei; Su, Zhaoming; Simmons, Chad R.
182	Formation and Stability of Bulk Nanobubbles in Different Solutions	LANGMUIR	35	15	5250	Ke, Shuo; Xiao, Wei; Quan, Nannan
183	Bidentate Sulfur Dioxide Complexes of Scandium, Yttrium, and Lanthanum Difluorides	INORGANIC CHEMISTRY	58	8	5281	Wei, Rui; Chen, Xiuting; Gong, Yu
184	Effects of O <sub>2</sub> - additive on corrosion behavior of Fe-Cr-Ni alloy in molten fluoride salts	CORROSION SCIENCE	150		175	Ai, Hua; Shen, Miao; Sun, Hua

185	Defects evolution and hardening in the Hastelloy N alloy by subsequent Xe and He ions irradiation	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	517	328		Liu, Jizhao; Huang, Hefei; Gao, Jie
186	Effect of Structural Evolution of Gold Species Supported on Ceria in Catalyzing CO Oxidation	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	123	14	9001	Wang, Xiu-Ling; Fu, Xin-Pu; Wang, Wei-Wei
187	Formation of colloidal alloy semiconductor CdTeSe magic-size clusters at room temperature	NATURE COMMUNICATIONS	10		1674	Gao, Dong; Hao, Xiaoyu; Rowell, Nelson
188	Translocation of tetrahedral DNA nanostructures through a solid-state nanopore	NANOSCALE	11	13	6263	Zhao, Xinjia; Ma, Ruiping; Hu, Ying
189	Porosity analysis of superfine-grain graphite IG-110 and ultrafine-grain graphite T220	MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY	35	8	962	Huang, Qing; Tang, Hui;
190	Virus-Mimicking Cell Capture Using Heterovalency Magnetic DNA Nanoclaws	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	11	13	12244	Wang, Zhiru; Qin, Weiwei; Zhuang, Jialang
191	Geometric Occupancy and Oxidation State Requirements of Cations in Cobalt Oxides for Oxygen Reduction Reaction	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	11	13	12525	Liu, Jing; Bao, Hongliang; Zhang, Bingsen
192	Soft x-ray spectroscopic endstation at beamline 08U1A of Shanghai Synchrotron Radiation Facility	REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS	90	4	43103	Liu, Haigang; Cao, Jiefeng; Wang, Yong
193	Submicrometre Superstructure Co-assembled from Protein and DNA	ACTA POLYMERICA SINICA	50	4	359	Dai, Jiang-bing; Zhang, Li-xia; Mao, Xiu-hai
194	Mechanical Stress-Dependent Autophagy Component Release via Extracellular Nanovesicles in Tumor Cells	ACS NANO	13	4	4589	Wang, Kaizhe; Wei, Yuhui; Liu, Wenjing
195	High-Pressure Phase Transitions of Cubic Y2O3 under High Pressures by In-situ Synchrotron X-Ray Diffraction	CHINESE PHYSICS LETTERS	36	4	46103	Jiang, Sheng; Liu, Jing; Li, Xiao-Dong
196	Aquarium: an automatic data-processing and experiment information management system for biological macromolecular crystallography beamlines	JOURNAL OF APPLIED CRYSTALLOGRAPHY	52		472	Yu, Feng; Wang, Qisheng; Li, Minjun
197	Communication-Electrochemical Behavior of UO22+ and Its Electrodeposition from UO2F2-FLiBe Melt	JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY	166	6	D189	Han, Dong; Li, Yuhe; Liu, Renduo
198	Adsorption and desorption of hydrogen on/from single-vacancy and double-vacancy graphenes	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	4	69	Wu, Xi-Jun; Fei, Ze-Jie; Liu, Wen-Guan
199	Performance of an electron linear	NUCLEAR SCIENCE AND	30	4	53	Li, Xuan; Zhang,

	accelerator for the first photoneutron source in China	TECHNIQUES				Jun-Qiang; Lin, Guo-Qiang
200	Creep damage characterization of UNS N10003 alloy based on a numerical simulation using the Norton creep law and Kachanov-Rabotnov creep damage model	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	4	65	Wang, Xiao-Yan; Wang, Xiao; Zhang, Xiao-Chun
201	GPU-accelerated scanning path optimization in particle cancer therapy	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	4	56	Wu, Chao; Pu, Yue-Hu; Zhang, Xiao
202	Rational synthesis of CaCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub> nanoplate as an earth-abundant electrocatalyst for oxygen evolution reaction	JOURNAL OF ENERGY CHEMISTRY	31		125	Lin, Xiao; Zhou, Jing; Zheng, Dehua
203	Behavior characteristics of hydrogen and its isotope in molten salt of LiF-NaF-KF (FLiNaK)	NUCLEAR ENGINEERING AND TECHNOLOGY	51	2	490	Zeng, Youshi; Liu, Wenguan; Liu, Wei
204	Effects of tungsten content on the high-temperature oxidation behavior of Ni-xW-6Cr alloys	CORROSION SCIENCE	149		87	Gao, Rong; Ye, Xiang-Xi; Yan, Shuai
205	On the possibility of severe corrosion of a Ni-W-Cr alloy in fluoride molten salts at high temperature	CORROSION SCIENCE	149		218	Ai, Hua; Ye, Xiang-Xi; Jiang, Li
206	Pore structure evolution of IG-110 graphite during argon ion irradiation at 600 degrees C	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE	54	8	6098	Huang, Qing; Tang, Hui; Liu, Yong
207	Encapsulation of high-temperature inorganic phase change materials using graphite as heat transfer enhancer	RENEWABLE ENERGY	133		240	Zhong, Yajuan; Zhao, Bingchen; Lin, Jun
208	Infrared spectroscopic and theoretical studies of the metal sulfur oxide complexes	ABSTRACTS OF PAPERS OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	257			Wei, Rui; Gong, Yu;
209	S Size-Segregated Characteristics of Carbonaceous Aerosols during the Monsoon and Non-Monsoon Seasons in Lhasa in the Tibetan Plateau	ATMOSPHERE	10	3	157	Wei, Nannan; Ma, Chulei; Liu, Junwen
210	Direct Identification of Active Surface Species for the Water-Gas Shift Reaction on a Gold-Ceria Catalyst	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	141	11	4613	Fu, Xin-Pu; Gno, Li-Wen; Wang, Wei-Wei
211	Crystal structure and biochemical studies of the bifunctional DNA primase-polymerase from phage NrS-1	BIOCHEMICAL AND BIOPHYSICAL RESEARCH COMMUNICATIONS	510	4	573	Guo, Haojie; Li, Minjun; Wang, Tianle
212	Side-On Sulfur Monoxide Complexes of Tantalum, Niobium, and Vanadium Oxyfluorides	INORGANIC CHEMISTRY	58	6	3807	Wei, Rui; Chen, Xuting; Gong, Yu

213	Predicting surface deformation during mechanical attrition of metallic alloys	NPJ COMPUTATIONAL MATERIALS	5		36	Cao, Shan Cecilia; Zhang, Xiaochun; Lu, Jian Zhang, Dawei; Han,
214	Oxygen-Vacancy Dynamics and Entanglement with Polaron Hopping at the Reduced CeO <sub>2</sub> (111) Surface	PHYSICAL LETTERS	122	9	96101	Zhong-Kang; Murgida, Gustavo E.
215	3-Hydroxy-2-Pyrrolidinone as a Potential Bidentate Ligand for in Vivo Chelation of Uranyl with Low Cytotoxicity and Moderate Decorporation Efficacy: A Solution Thermodynamics, Structural Chemistry, and in Vivo Uranyl Removal Survey	INORGANIC CHEMISTRY	58	5	3349	Wang, Xiaomei; Wu, Suqiang; Guan, Jingwen
216	Three-dimensional focal stack imaging in scanning transmission X-ray microscopy with an improved reconstruction algorithm	OPTICS EXPRESS	27	5	7787	Ma, Limei; Zhang, Xiangzhi; Xu, Zijian
217	Fabrication of Lanthanum Strontium Manganite Ceramics via Agar Gel Casting and Solid State Sintering	MATERIALS	12	6	848	Zhang, Shiyu; Peng, Cheng; Guan, Chengzhi
218	Effects of Silicon on the Oxidation Behavior of Hastelloy N Superalloy at 850 degrees C	RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING	48	3	885	Guo Weijie; Li Jianshu; Lu Yanling
219	Live-cell imaging of octaarginine-modified polymer dots via single particle tracking	CELL PROLIFERATION	52	2	e12556	Luo, Yao; Han, Yuping; Hu, Xingjie
220	An effective method for compensating the field integral errors of hybrid in-vacuum undulators	JOURNAL OF INSTRUMENTATION	14		T03002	Qian, M. F.; Zhou, Q. G.;
221	Effect of Surface Decarburization on Corrosion Behavior of GH3535 Alloy in Molten Fluoride Salts	ACTA METALLURGICA SINICA-ENGLISH LETTERS	32	3	401	Hou, Juan; Han, Fen-Fen; Ye, Xiang-Xi Huang,
222	BRIGHT: the three-dimensional X-ray crystal Bragg diffraction code	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	3	39	Nan-Shun; Li, Kai; Deng, Hai-Xiao
223	Design and flow field analysis for visualization experiment facility of pebble bed based on molten salt reactor	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	3	51	Mei, Mu-Dan; Chen, Xing-Wei; Sun, Sheng-De
224	Theoretical evaluation of microscopic structural and macroscopic thermo-physical properties of molten	JOURNAL OF MOLECULAR LIQUIDS	277		409	Guo, Xiaojing; Qian, Hongliang; Dai, Jianxing

	AF-ThF <sub>4</sub> systems (A = Li <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> and K <sup>+</sup> )							
225	Generation of ultrashort coherent radiation based on a laser plasma accelerator	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26	311				Liu, Tao; Feng, Chao; Xiang, Dao
226	Design and performance of bending-magnet beamline BL02B at the SSRF	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26	543				Meng, Xiangyu; Guo, Zhi; Wang, Yong
227	The oxidation of UF <sub>4</sub> in FLiNaK melt and its electrolysis	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	319	3	899			Han, Dong; She, Changfeng; Niu, Yongsheng
228	Application of computed tomography in the analysis of glass beads unearthed in Shanpula cemetery (Khotan), Xinjiang Uyghur Autonomous Region	ARCHAEOLOGICAL AND ANTHROPOLOGICAL SCIENCES	11	3	937			Cheng, Qian; Zhang, Xueyan; Guo, Jinlong
229	Fluorine-18 click radiosynthesis and microPET/CT evaluation of a small peptide-a potential PET probe for carbonic anhydrase IX	BIOORGANIC & MEDICINAL CHEMISTRY	27	5	785			Jia, Lina; Li, Xiao; Cheng, Dengfeng
230	Influence of grain size on tellurium corrosion behaviors of GH3535 alloy	CORROSION SCIENCE	148		110			Jiang, Li; Fu, Cai-Tao; Leng, Bin
231	Insights into the new 3d-5f heterometallic quaternary fluorides: Synthesis, crystal structures, spectroscopic properties, and thermodynamic stability	INORGANICA CHIMICA ACTA	487		362			Liu, Qi; Yin, Huiqin; Bao, Hongliang
232	Fabrication of highly durable polysiloxane-zinc oxide (ZnO) coated polyethylene terephthalate (PET) fabric with improved ultraviolet resistance, hydrophobicity, and thermal resistance	JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE	537		91			Wang, Minglei; Zhang, Maojiang; Pang, Lijuan
233	Differential interplay between Ce and U on local structures of U <sub>1-x</sub> Ce <sub>x</sub> O <sub>2</sub> solid solutions probed by X-ray absorption spectroscopy	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	515		238			Cao, Hanjie; Bao, Hongliang; Lin, Xiao
234	Effect of exposing duration on the interaction between nickel-based alloy and SiC in molten LiF-NaF-KF salt	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	515		276			Xue, Wandong; Yang, Xinmei; Li, Zhijun
235	A promising new class of irradiation tolerant materials: Ti <sub>2</sub> ZrHfV <sub>0.5</sub> Mo <sub>0.2</sub> high-entropy alloy	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY	35	3	369			Lu, Yiping; Huang, Hefei; Gao, Xuzhou
236	Crystal structure of the Vibrio cholerae VqmA-ligand-DNA complex provides insight into ligand-binding mechanisms relevant for drug design	JOURNAL OF BIOLOGICAL CHEMISTRY	294	8	2580			Wu, Hai; Li, Minjun; Guo, Haojie

237	Generation of large-bandwidth x-ray free electron laser with evolutionary many-objective optimization algorithm	PHYSICAL ACCELERATORS AND BEAMS	REVIEW	22	2	20703	Yan, Jiawei; Deng, Haixiao;
238	Force Spectroscopy Revealed a High-Gas-Density State near the Graphite Substrate inside Surface Nanobubbles	LANGMUIR		35	7	2498	Wang, Shuo; Zhou, Limin; Wang, Xingya
239	Fast and large-area fabrication of plasmonic reflection color filters by achromatic Talbot lithography	OPTICS LETTERS		44	4	1031	Wu, Qingjun; Xia, Huijuan; Jia, Hao
240	Poly-adenine-mediated spherical nucleic acids for strand displacement based DNA/RNA detection	BIOSENSORS & BIOELECTRONICS		127		85	Wang, Lu; Zhang, Huan; Wang, Chenguang
241	Myelin Sheath as a Dielectric Waveguide for Signal Propagation in the Mid-Infrared to Terahertz Spectral Range	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS		29	7	1807862	Liu, Guozhi; Chang, Chao; Qiao, Zhi
242	Surface faceting and compositional evolution of Pd@ Au core-shell nanocrystals during in situ annealing	PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS		21	6	3134	Wu, Zhemin; Tang, Min; Li, Xiaoyan
243	Electrochemical behaviors and electrolytic separation of Th(IV) and Ce(III) in ThF4-CeF3-LiCl-KCl quaternary melt	SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY		210		236	Wang, Xianbin; Zheng, Haiyang; Xu, Qianhui
244	Irradiation-induced hexagonal precipitates and their coupling with the evolution of helium bubbles	JOURNAL OF APPLIED PHYSICS		125	5	55901	Gao, Jie; Huang, Hefei; Liu, Jizhao
245	Study of the relationship between the local geometric structure and the stability of La <sub>0.6</sub> Sr <sub>0.4</sub> MnO <sub>3</sub> -delta and La <sub>0.6</sub> Sr <sub>0.4</sub> FeO <sub>3</sub> -delta electrodes	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES		30	2	21	Guan, Cheng-Zhi; Zhou, Jing; Bao, Hong-Liang
246	Study of heat transfer by using DEM-CFD method in a randomly packed pebble-bed reactor	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES		30	2	28	Niu, Qiang; Wang, Na-Xiu;
247	Synchrotron infrared spectral regions as signatures for foodborne bacterial typing	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES		30	2	25	Wang, Ya-Di; Li, Xue-Ling; Hu, Jun
248	Preparation of amidoxime-based PE/PP fibers for extraction of uranium from aqueous solution	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES		30	2	20	Xu, Xiao; Ding, Xiao-Jun; Ao, Jun-Xuan
249	Separation of hafnium from zirconium in hydrochloric acid solution with di(2-ethylhexyl)phosphoric acid by solvent extraction	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES		30	2	22	Yang, Tao; Sun, Guo-Xin; Qian, Yuan
250	Application of Monte Carlo method to calculate the effective delayed neutron	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES		30	2	34	Zhu, Gui-Feng; Yan, Rui; Peng,

	fraction in molten salt reactor						Hong-Hua
251	Effect of Tensile Strength on the Microstructure of Graphite Impregnated with Salt Revealed by In Situ Synchrotron-Based Two-Dimensional X-ray Diffraction	ACS OMEGA	4	2	4304		Wang, Jiamin; Feng, Shanglei; Yang, Yingguo
252	Electrochemically accessing ultrathin Co (oxy)-hydroxide nanosheets and operando identifying their active phase for the oxygen evolution reaction	ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE	12	2	739		Zhou, Jing; Wang, Yu; Su, Xiaozhi
253	Improving the Supercritical CO <sub>2</sub> Foaming of Polypropylene by the Addition of Fluoroelastomer as a Nucleation Agent	POLYMERS	11	2	226		Yang, Chenguang; Zhao, Quan; Xing, Zhe
254	Crystalline structure in SiC fibers driven by pyrolysis temperature and time	JOURNAL OF THE CERAMIC SOCIETY OF JAPAN	127	2	117		Li, Cheng; Xie, Ruobing; Wang, Mouhua
255	Influence of molten salt composition on the fluorination of UF <sub>4</sub>	JOURNAL OF FLUORINE CHEMISTRY	218		99		Sun, Lixin; Niu, Yongsheng; Hu, Congwei
256	Uranium thermochemical cycle used for hydrogen production	NUCLEAR ENGINEERING AND TECHNOLOGY	51	1	214		Chen, Aimei; Liu, Chunxia; Liu, Yuxia
257	Synthesis and preliminary evaluation of F-18-icotinib for EGFR-targeted PET imaging of lung cancer	BIOORGANIC & MEDICINAL CHEMISTRY	27	3	545		Lu, Xinmiao; Wang, Cheng; Li, Xiao
258	Graphene-based nanomaterials in biosystems	NANO RESEARCH	12	2	247		Lu, Na; Wang, Liqian; Lv, Min
259	CLIC380: RF design and parameters of 2017 re-baselined 380 GeV CLIC linac accelerating structure	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT	916		230		Huang, Xiaoxia; Grudiev, Alexej; Zhao, Zhentang
260	Non-metal boron modified carbon nitride tube with enhanced visible light driven photocatalytic performance	MATERIALS RESEARCH BULLETIN	110		18		Hou, Feng; Li, Yong; Gao, Yanting
261	Development of a Molten Salt Reactor specific depletion code MODEC	ANNALS OF NUCLEAR ENERGY	124		88		Xia, Shaopeng; Chen, Jingen; Guo, Wei
262	A dipole-dipole interaction tuning the photoluminescence of silicon quantum dots in a water vapor environment	NANOSCALE	11	4	1790		Yang, Jinrong; Gao, Yi;

263	Universal description of heating-induced reshaping preference of core-shell bimetallic nanoparticles	NANOSCALE	11	3	1386	Zhao, Zheng; Xu, Haoxiang; Gao, Yi
264	X-ray three-dimensional imaging based on light field imaging technology	ACTA PHYSICA SINICA	68	2	24202	Qi Jun-Cheng; Liu Bin; Chen Rong-Chang
265	One-Pot Synthesis of a Highly Active 3-Dimensional Fe-N-x-CNTs/rGO Composite Catalyst for Oxygen Reduction	CHEMELECTROCHEM	6	2	504	Hu, Ye; Yang, Ruouou; Chen, Hengquan
266	Fabrication of New High-Performance UHMWPE-Based Conductive Fibers in a Universal Process	INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH	58	2	935	Gao, Qianhong; Hu, Jiangtao; Yang, Yi
267	A facile strategy for fabrication of HKUST-1 on a flexible polyethylene nonwoven fabric with a high MOF loading	MICROPOROUS AND MESOPOROUS MATERIALS	292		UNSP 109723	Qiu, Long; Wang, Linlin; Zhang, Mingxing
268	An integrated remote data collection system for macromolecular crystallography beamline at SSRF	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT	914		42	Wang, Qisheng; Sun, Bo; Zhou, Huan
269	Scanning probe microscopy for energy-related materials	BEILSTEIN JOURNAL OF NANOTECHNOLOGY	10		132	Berger, Rudiger; Grevin, Benjamin; Leclere, Philippe
270	Effect of stacking fault energy on microstructural feature and back stress hardening in Cu-Al alloys subjected to surface mechanical attrition treatment	MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING	740		235	Zhang, Yueling; Yang, Chao; Zhou, Dengshan
271	Interfacial water and catalysis	ACTA PHYSICA SINICA	68	1	16803	Hu Jun; Gao Yi; Yang Hai-Jun;
272	Mechanism of soil environmental regulation by aerated drip irrigation	ACTA PHYSICA SINICA	68	1	19201	Wu Feng; Fang Hai-Ping
273	Adsorption and Desorption of Tritium in Nuclear Graphite at 700 degrees C: A Gas Chromatographic Study Using Hydrogen	NUCLEAR TECHNOLOGY	205	9	1143	Deng, Ke; Zhang, Mingjun; Wu, Xijun
274	The Design of The Test Beamline at SSRF	13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYNCHROTRON RADIATION INSTRUMENTATION	2054		60040	Li, Zhongliang; Fan, Yichen; Xue, Lian

		(SRI2018)						
		13TH INTERNATIONAL						
		CONFERENCE ON						
275	A High-performance Bending Magnet Beamline (BL02B) at the SSRF	SYNCHROTRON RADIATION INSTRUMENTATION	2054	30011			Meng, Xiangyu; Guo, Zhi; Wang, Yong	
		(SRI2018)						
		13TH INTERNATIONAL						
		CONFERENCE ON						
276	Design of New Sub-micron Protein Crystallography Beamline at SSRF	SYNCHROTRON RADIATION INSTRUMENTATION	2054	60028			Sun, Bo; Wang, Yuzhu; Liu, Ke	
		(SRI2018)						
		13TH INTERNATIONAL						
		CONFERENCE ON						
277	A Level-2 Biosafety Beamline for Macromolecular Crystallography at SSRF	SYNCHROTRON RADIATION INSTRUMENTATION	2054	60033			Wang Qisheng; Xu Chunyan; Zhang Kunhao	
		(SRI2018)						
		13TH INTERNATIONAL						
		CONFERENCE ON						
278	High-precision Hall Sensor Array Magnetic Field Measurement System	SYNCHROTRON RADIATION INSTRUMENTATION	2054	30020			Zhang, Jidong; Zhu, Ya; Qian, Maofei	
		(SRI2018)						
		13TH INTERNATIONAL						
		CONFERENCE ON						
279	Magnetic Field Optimization of a Novel Hybrid Permanent Undulator	SYNCHROTRON RADIATION INSTRUMENTATION	2054	30029			Zhou, Shudong; He, Yongzhou; Qian, Maofei	
		(SRI2018)						
280	High-temperature ferroelastic phase transition in a perovskite-like complex: [Et4N](2)[PbBr3](2)	RSC ADVANCES	9	18	10364		Huang, Yuan; Yang, Jie; Li, Zi-jian	
281	Formation of disk-like micelles of triblock copolymers in frustrating solvents	RSC ADVANCES	9	17	9443		Zhu, Hongyan; Cui, Yan; Wang, Jie	
282	Tritium Transport Analysis in a 2-MW Liquid-Fueled Molten Salt Experimental Reactor with the Code TMSR-TTAC	NUCLEAR TECHNOLOGY	205	4	582		Zeng, Youshi; Liu, Wenguan; Liu, Wei	
283	NUMERICAL STUDY ON THE CREEP STRAIN CHARACTERISTICS FOR TMSR REACTOR COOLANT PIPING UNDER THERMAL LOADING	PROCEEDINGS OF THE ASME PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE, 2018, VOL 6B			UNSP V06BT0 6A058		Gong, Wei; Zhang, Xiaochun; Xie, Mingqiang	

284	EFFECTS OF THERMAL AGEING ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF NI CLADDING ON AUSTENITIC STAINLESS STEEL BY GTAW	PROCEEDINGS OF THE ASME PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE, 2018, VOL 6B			UNSP V06BT0 6A009	Yu, Kun; Shi, Xianwu; Li, Zhijun
285	Results from the Cuore Experiment	UNIVERSE	5	1	10	Caminata, Alessio; Adams, Douglas; Alduino, Chris
286	In Situ Studies of 30% Li-Doped Bi <sub>25</sub> FeO <sub>40</sub> Conversion Type Lithium Battery Electrodes	ACS OMEGA	4	1	2344	Gao, Mei; Zhu, Daming; Zhang, Xingmin
287	Thermococcus Eurythermalis Endonuclease IV Can Cleave Various Apurinic/Apyrimidinic Site Analogues in ssDNA and dsDNA	INTERNATIONAL JOURNAL OF MOLECULAR SCIENCES	20	1	69	Wang, Wei-Wei; Zhou, Huan; Xie, Juan-Juan
288	A Comprehensive Study of Steel Powders (316L, H13, P20 and 18Ni300) for Their Selective Laser Melting Additive Manufacturing	METALS	9	1	86	Yan, Jujie; Zhou, Yinghao; Gu, Ruinan
289	Distribution of non-exchangeable organically bound tritium activities at the surface soil around Qinshan Nuclear Power Plant	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	319	1	237	Zhang, Qin; Ma, Yu-hua; Deng, Ke
290	Effect of fluorine on stabilization/solidification of radioactive fluoride liquid waste in magnesium potassium phosphate cement	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	319	1	393	Qian, Zheng-hua; Liu, Xue-yang; Qiao, Yan-bo
291	Thermodynamic description for the NaF-KF-RbF-ZnF <sub>2</sub> system	JOURNAL OF FLUORINE CHEMISTRY	217		90	Yin, Huiqin; Wu, Shuang; Wang, Xueliang
292	Proposal of X-ray absorption spectroscopy and magnetic circular dichroism using broadband free-electron lasers	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	26		1	Deng, Bangjie; Yan, Jiawei; Zhang, Qingmin
293	Development of a dynamics model for graphite-moderated channel-type molten salt reactor	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	1	18	He, Long; Yu, Cheng-Gang; Ji, Rui-Min
294	Avoiding sealing failure of flanged connection for tubes made of dissimilar materials subjected to elevated temperature	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	1	1	Li, Qi-Ming; Zhou, Chong; Tian, Jian
295	Analysis of electro-optical intensity modulator for bunch arrival-time monitor at SXFEL	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	30	1	3	Wang, Jin-Guo; Liu, Xiao-Qing; Feng, Lie
296	Effects of He ion irradiation on the	CORROSION SCIENCE	146		172	Liu, Min; Hou,

	corrosion performance of alloy GH3535 welded joint in molten FLiNaK					Juan; Han, Fenfen
297	Monte Carlo burnup code development based on multi-group cross section method	PROGRESS IN NUCLEAR ENERGY	110	24		Zhu, Guifeng; Yan, Rui; Dai, Ming
298	Effect of Oxygen Partial Pressure on Solid Oxide Electrolysis Cells	ACTA PHYSICO-CHIMICA SINICA	35	3	284	Hou Quan; Guan Chengzhi; Xiao Guoping
299	Multi-Mode Full Spectrum Dark Field Microscope for Single Nanoparticle Localized Surface Plasmon Resonance Dynamics Study	ACTA PHYSICO-CHIMICA SINICA	35	4	371	Liu Lei; Hao Yaya; Deng Suhui
300	Chromium carbide coatings produced on ductile cast iron QT600-3 by thermal reactive diffusion in fluoride salt bath: Growth behavior, microstructure evolution and kinetics	CERAMICS INTERNATIONAL	45	1	1196	Su, Xingzhi; Zhao, Sufang; Sun, Hua
301	Welding solidification cracking susceptibility and behavior of a Ni-28W-6Cr alloy	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY	35	1	29	Chen, Shuangjian; Ye, Xiang-Xi; Tsang, D. K. L.
302	Coalescence mechanism of helium bubble during tensile deformation revealed by in situ small-angle X-ray scattering	SCRIPTA MATERIALIA	158		121	Gao, Jie; Huang, Hefei; Liu, Jizhao
303	Explore the QCD phase transition phenomena from a multiphase transport model	SCIENCE CHINA-PHYSICS MECHANICS & ASTRONOMY	62	1	11012	Jin, XiaoHai; Chen, JinHui; Lin, ZiWei
304	The application of beam arrival time measurement at SxFEL	Proceedings of the 7th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2018				Cao, S.S.; Yuan, R.X.; Chen, J.
305	Evidence for resonances in the $7\alpha$ disassembly of $^{28}\text{Si}$	Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement	12	2	307	Cao, X.G.; Kim, E.J.; Schmidt, K.
306	On-line crosstalk measurement and compensation algorithm study of SxFEL digital BPM system	Proceedings of the 7th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2018			150	Chen, F.Z.; Leng, Y.B.; Chen, J.
307	The evaluation of beam inclination angle on the cavity BPM position measurement	Proceedings of the 7th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2018				Chen, J.; Leng, Y.B.; Yu, L.Y.
308	The removal of interference noise of ICT using PCA method	Proceedings of the 7th International Beam Instrumentation Conference,			22	Chen, J.; Leng, Y.B.; Zhang, N.

		IBIC 2018				
309	Irradiation Effects of Fiber and Matrix Induced by He+ Ion for High-Performance C/C Composites	ACS Applied Nano Materials	2	5	2926	Feng, Shanglei; Yang, Yingguo; Xia, Huihao
310	Machine learning applied to predict transverse oscillation at SSRF	Proceedings of the 7th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2018				Gao, B.; Leng, Y.B.; Zhou, Y.M.
311	Silicon nitride as a new support for copper catalyst to produce acrolein via selective oxidation of propene with very low CO2 release	Journal of Catalysis	380		352	Guo, Ling-Ling; Yu, Jing; Shu, Miao
312	Optimization of core loading pattern in AHTR using a novel hybrid adaptive genetic algorithm and tabu search (HAGATS)	International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE		2019-May		He, Liaoyuan; Wu, Jianhui; Li, Guangchao
313	Steady Thermal-hydraulic Analysis Model for Graphite-moderated Channel Type Molten Salt Reactor	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	53	2	319	He, Long; Yu, Chenggang; Guo, Wei
314	Research on LLC Resonant Constant Current Constant Voltage High Voltage Charging Power Supply Technology	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	53	9	1588	Huang, Maomao; Li, Rui; Li, Deming
315	Pore structure evolution of IG-110 graphite during argon ion irradiation at 600 ° C	Journal of Materials Science	54	8	6098	Huang, Qing; Tang, Hui; Liu, Yong
316	Effect of Pebble Bed Structure on PB-FHR Neutron Physics Characteristics	Hedongli Gongcheng/Nuclear Power Engineering	40	2	16	Ji, Ruimin; Yan, Rui; Chen, Xingwei
317	Critical Calculation and Analysis of Liquid Molten Salt Experimental Reactor Based on Dragon and Donjon Codes	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	53	5	853	Jia, Guobin; Wu, Jianhui; Chen, Jingen
318	In situ GISAXS study on the temperature-dependent performance of multilayer monochromators from the liquid nitrogen cooling temperature to 600 ° C	Applied Surface Science				Jiang, Hui; Hua, Wenqiang; Tian, Naxi
319	Identification of faulty beam position monitor based clustering by fast search and find of density peaks	Proceedings of the 7th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2018			114	Jiang, R.T.; Leng, Y.B.; Chen, F.Z.
320	Irradiation effect on alloy GH3535 revealed by X-ray absorption fine structure	Nuclear Engineering and Design	343		38	Li, Cheng; Lei, Guanhong; Xie, Ruobing
321	Corrosion behavior of ion-irradiated SiC	Corrosion Science				Li, Jianjian; Yan,

	in FLiNaK molten salt					Long; Huang, Hefei
322	Soft X-Ray Absorption Spectroscopy of Low Z Element Based on Fluorescence Emission	Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica	39	10		Li, Junqin; Chen, Zhenhua; Zhao, Zilong
323	High-Temperature Oxidation Behavior and Oxide Scale Structure of Yttrium-Modified Ni - 16Mo - 7Cr - 4Fe Superalloy at 1273 K	Oxidation of Metals	92	1-2	67	Li, Xiaoli; He, Shangming; Liang, Jianping
324	Design of Novel KeV-Range Grating Spectrometer with Ultra-High Resolving Power	Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica	39	8		Li, Zhuo; Li, Bin;
325	Electro-optic modulator based beam arrival time monitor for SxFEL	Proceedings of the 7th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2018				Liu, X.Q.; Leng, Y.B.; Yuan, R.X.
326	Breeding properties study on high-power thorium molten salt reactor	Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science	5	1		Liu, Yafen; Guo, Rui; Cai, Xiangzhou
327	Facile and quick formation of cellulose nanopaper with nanoparticles and its characterization	Carbohydrate Polymers	221		195	Ma, Limei; Xu, Zijian; Zhang, Xiangzhi
328	Surface composition evolution of bimetallic alloys under reaction conditions	Journal of Physical Chemistry C				Meng, Jun; Zhu, Beien; Gao, Yi
329	Influence of Admixture on Property of Radioactive Fluoride Liquid Waste Solidified Form by MKPC	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	53	5	805	Qian, Zhenghua; Liu, Xueyang; Qiao, Yanbo
330	Assessment of effects of Mg treatment on corrosivity of molten NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> salt with Raman and Infrared spectra	Corrosion Science				Sun, Hua; Wang, Jian-Qiang; Tang, Zhongfeng
331	Benchmark Test of CENDL-TMSR-V1 Nuclear Data Library for Thorium-uranium Fuel Cycle	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	53	8	1466	Wang, Xiaohe; Hu, Jifeng; Chen, Jingen
332	Crystal structure of the vibrio cholerae VqmA - ligand - DNA complex provides insight into ligand-binding mechanisms relevant for drug design	Journal of Biological Chemistry	294	8	2580	Wu, Hai; Li, Minjun; Guo, Haojie
333	Experimental investigation and thermodynamic assessment of the RbCl - CsCl - ZnCl <sub>2</sub> system and its subsystems	Fluid Phase Equilibria	487		33	Wu, Shuang; Li, Xiang; Zhang, Peng
334	Thermodynamic modeling of the MBr-BaBr <sub>2</sub> (M=Alkali metals) systems	Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry		67		Wu, Shuang; Xie, Leidong;
335	Influence of sampling rate and passband	Proceedings of the 7th				Wu, T.; Leng,

	on the performance of stripline BPM	International Instrumentation Conference, IBIC 2018	Beam				Y.B.; Lai, L.W.
336	Improving Cellular Structure and Property of Supercritical CO <sub>2</sub> Foamed of Polypropylene via the Addition of PTFE Micropowder	Cailiao Reports	Daobao/Materials	33	11	3547	Yang, Chenguang; Zhao, Quan; Zhang, Maojiang
337	Recent progress with in situ characterization of interfacial structures under a solid-gas atmosphere by HP-STM and AP-XPS	Materials		12	22		Zhang, Huan; Sun, Haoliang; Shen, Kongchao
338	Characteristic Analysis of 1 GWt PB-FHR in Load Following Operation	Yuanzineng Jishu/Atomic Energy and Technology	Kexue Science	53	6	1055	Zhang, Jie; Ruan, Jian; He, Long
339	SSRF beam operation stability evaluation using bunch by bunch beam position method	Proceedings of the 7th International Instrumentation Conference, IBIC 2018	Beam			104	Zhang, Ning; Zhou, Yimei; Leng, Yongbin
340	Structural Analysis and Evaluation Method for Nuclear Class 1 Piping Systems at Elevated Temperature	Hedongli Power Engineering	Gongcheng/Nuclear	40	3	198	Zhang, Xiaochun; Gong, Wei;
341	Multiple-step melting/irradiation: A strategy to fabricate thermoplastic polymers with improved mechanical performance	Polymers		11	11		Zhao, Jingxin; Wang, Jiayao; Ding, Xiaojun
342	A new way to improve the main magnetic field uniformity of a Lambertson magnet	Physica Scripta		94	10		Zhao, Rongjie; Gu, Ming; Wang, Dong
343	Shanghai Soft X-Ray Free-Electron Laser Facility	Zhongguo Journal of Lasers	Jiguang/Chinese	46	1		Zhao, Zhentang; Wang, Dong; Yin, Lixin
344	Electrochemically accessing ultrathin Co (oxy)-hydroxide nanosheets and: Operando identifying their active phase for the oxygen evolution reaction	Energy and Environmental Science		12	2	739	Zhou, Jing; Y., Wang; S., Gu
345	Broadband Terahertz Spectroscopy of Levodopa	Zhongguo Journal of Lasers	Jiguang/Chinese	46	6		Zhu, Zhongjie; Ren, Guanhua; Cheng, Chao
346	TMSR-LF1 停堆系统高温螺栓连接结构应力松弛分析与结构安全评定	核技术		42	10		林作康; 王雯; 樊辉青
347	框架核酸在生化检测中的应用	辐射研究与辐射工艺学报		37	5		谢莱; 谷沛霖; 李宇
348	钇掺杂锆酸钡中点/线缺陷结构及氧扩散机理的分子动力学模拟	中国科学. 化学		49	8	1104	李雪娇; 唐忠锋; 张莉

349	DNA 自组装结构在纳米诊疗中的应用	中国科学. 化学	49	9	1137	代江兵; 谷佩霖; 冯灵玉
350	基于 ANSYS 的高温熔盐泵应力分析与结构优化	核技术	42	9		樊辉青; 林良程; 蔡茂源
351	聚四氟乙烯微粉对超临界 CO <sub>2</sub> 发泡聚丙烯泡孔结构及性能的改善	材料导报	33	11 A	3547	杨晨光; 赵全; 张茂江
352	一种新型 keV 波段超高分辨光栅光谱仪设计	光学学报	39	8		李卓; 李宾;
353	硬 X 射线微束掠入射实验的控制和数据采集系统及其应用	光谱学与光谱分析	39	9	2794	兰旭颖; 何上明; 郑怡
354	LLC 谐振恒流恒压高压充电电源技术研究	原子能科学技术	53	9	1588	黄毛毛; 李瑞; 李德明
355	DNA 辅助纳米金三角片的高效纯化与信息编码	高分子学报	50	9	964	鲁爽; 方维娜; 王丽华
356	基于 DNA 的细胞膜功能化	化学进展	31	8	1067	刘江波; 王丽华; 左小磊
357	钍铀燃料循环专用核数据库 CENDL-TMSR-V1 的基准检验	原子能科学技术	53	8	1466	王小鹤; 胡继峰; 陈金根
358	串行晶体学数据筛选算法研究	核技术	42	8		千跃奇; 刘波;
359	拉普拉斯算法在荧光靶光斑位置测量中的应用	核技术	42	8		华永祥; 龚培荣;
360	钍基氟盐冷却高温堆 TRISO 包覆燃料颗粒结构优化分析	核技术	42	8		房勇汉; 蔡翔舟; 陈金根
361	电子束辐照烯烃嵌段共聚物制备二重形状记忆弹性体	辐射研究与辐射工艺学报	37	4		艾则孜·麦麦提 明; 杨俊杰; 黄 承辉
362	左旋多巴宽频太赫兹光谱研究	中国激光	46	6		朱中杰; 任冠华; 成超
363	熔盐实验堆备用停堆方案及其可行性分析	核技术	42	7		于世和; 刘亚芬; 杨璞
364	镍基合金压力容器环形焊缝残余应力数值模拟与失效应力分析	核技术	42	7		吕刘帅; 张小春; 苏博
365	铈掺杂诱导 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 晶型变化	核技术	42	7		曹罕杰; 鲍洪亮; 于海生
366	373MW 液态燃料熔盐堆流量分配设计的优化研究	核技术	42	7		李青远; 徐博; 周翀
367	373 MW 熔盐堆非能动余热排出系统换热元件的优化设计	核技术	42	7		黄婉珏; 徐博; 周翀
368	石墨慢化通道式熔盐堆的稳态热工水力计算模型	原子能科学技术	53	2	319	何龙; 余呈刚; 郭威
369	掺合料对含氟放射性废液 MKPC 凝胶材料固化体性能的影响	原子能科学技术	53	5	805	钱正华; 刘学阳; 乔延波
370	基于 Dragon 与 Donjon 程序的液态熔盐实验堆临界计算与分析	原子能科学技术	53	5	853	贾国斌; 伍建辉; 陈金根

371	1 GWt PB-FHR 负荷跟踪运行特性分析	原子能科学技术	53	6	1055	张洁; 阮见; 何龙
372	基于芯片技术的生物大分子晶体高效数据采集	核技术	42	6		李冰; 汪启胜; 李敏军
373	TMSR-SF 球床随机堆积结构的离散元模拟	核技术	42	6		牛强; 刘峰瑞; 王纳秀
374	一种使用磁场相机的混合波荡器磁化块排序方法	核技术	42	6		钱茂飞; 张继东; 何永周
375	基于离心加速耗散作用的纳米金三角片高效分离方法研究	分析测试学报	38	5	510	鲁爽; 王丽华; 柳华杰
376	针对中枢神经系统的核酸递送策略及其诊疗应用	核技术	42	5		周海斌; 李江; 胡霁
377	X 光发散度对多切片扫描相干衍射成像质量的影响	核技术	42	5		聂巍; 许子健; 陶旭磊
378	熔盐堆高温熔盐泵液下轴承表面织构分析与优化	核技术	42	5		陈俊; 蒋鑫越; 林良程
379	动量加速方法提高层叠衍射成像的质量	核技术	42	5		陶旭磊; 许子健; 王春鹏
380	构建多模式全光谱暗场显微镜用于纳米单颗粒局域表面等离子共振实时动力学研究	物理化学学报	35	4	371	刘磊; 郝亚亚; 邓素辉
381	海水提铀研究进展	辐射研究与辐射工艺学报	37	2		敖浚轩; 徐晓; 李玉娜
382	电子束辐照聚醚醚酮薄膜的氧化效应	辐射研究与辐射工艺学报	37	2		谭海容; 邢哲; 刘伟华
383	核能综合利用研究现状与展望	中国科学院院刊	34	4	460	王建强; 戴志敏; 徐洪杰
384	加速器质谱测量树木年轮中不可交换有机氟的样品制备方法	分析化学	47	4	620	马玉华; 何明; 曾友石
385	球床结构对 PB-FHR 中子物理特性的影响研究	核动力工程	40	2	16	冀锐敏; 严睿; 陈兴伟
386	基于高精度脉冲发生器的定时系统设计	核技术	42	4		于春蕾; 赵欢; 胡守明
387	基于 Bluesky 的荧光面扫描技术	核技术	42	4		兰旭颖; 李爱国; 王劼
388	基于 DNA 折纸的单个链霉亲和素分子的原子力显微术高分辨成像	核技术	42	4		孙彤; 刘文静; 张萍
389	软 X 射线光子关联谱装置设计	核技术	42	4		屈斯诗; 郭智; 邵仁忠
390	基于双腔探头的流强精确测量	核技术	42	4		曹珊珊; 冷用斌; 袁任贤
391	适用于 SSRF 的高性能频率合成源设计与实现	核技术	42	4		袁慧; 赵玉彬; 郑湘
392	熔盐圆管内湍流对流换热实验研究	核技术	42	4		陈玉爽; 田健;

						朱海华
393	He 泡对镍基合金腐蚀性能的影响	核技术	42	4		雷冠虹; 杨斯达; 刘仁多
394	蛋白-DNA 协同组装构建亚微米级复合结构	高分子学报	50	4	359	代江兵; 张丽霞; 毛秀海
395	钎基熔盐堆材料发展战略	中国工程科学	21	1	29	周兴泰; 李志军; 陆燕玲
396	上海软 X 射线自由电子激光装置	中国激光	46	1		赵振堂; 王东; 殷立新
397	软 X 射线荧光吸收谱测试方法的建立与应用	光学学报	39	3		陈振华; 李俊琴; 赵子龙
398	上海光源谐波腔系统的前端变频模块方案设计	核技术	42	1	10101	宫鹏鹏; 赵玉彬; 侯洪涛
399	基于损伤力学的 TMSR-LF1 堆容器接管非弹性蠕变损伤分析	核技术	42	1	10601	王晓艳; 王晓; 张小春
400	氟盐冷却快堆子通道程序开发及初步验证	核技术	42	1	10604	林铭; 程懋松; 戴志敏
401	基于 ASME 规范的核石墨改进概率评价方法研究	核技术	42	1	10605	丁冬; 高彦涛; 杨雄
402	熔盐实验堆堆芯结构变化对反应性的影响分析	核技术	42	2		于世和; 刘亚芬; 杨璞
403	熔盐实验堆堆芯物理参数研究	核技术	42	3		于世和; 李晓晓; 刘亚芬
404	固体氧化物电解池尺寸对其性能的影响	核技术	42	3		侯权; 关成志; 肖国萍
405	宽范围高精度电子枪控制系统的研制	核技术	42	2		廖泳琪; 王胜利; 郭洪雷
406	熔盐实验堆核数据引起反应性参数不确定度分析	核技术	42	3		胡继峰; 王小鹤; 李文江
407	氧分压对固体氧化物电解池性能的影响	物理化学学报	35	3	284	Hou Quan; Guan Chengzhi; Xiao Guoping
408	界面水与催化	物理学报	68	1	16803	胡钧; 高崑;
409	基于加气水滴灌的土壤环境调节机理研究	物理学报	68	1	19201	杨海军; 仵峰; 方海平
410	Si 对 Hastelloy N 合金氧化行为的影响	稀有金属材料与工程	48	3	885	郭伟杰; 李建树; 陆燕玲
411	超临界二氧化碳制备辐射交联微孔聚丙烯材料的研究进展	辐射研究与辐射工艺学报	37	1		杨晨光; 邢哲; 谭海容

2020

No.	论文名称	期刊名称	期	卷	页	作者(前三 etc.)
1	Visualizing H <sub>2</sub> O molecules reacting at TiO <sub>2</sub> active sites with transmission	SCIENCE	367	6	428	Yuan, Wentao; Zhu, Beien; Li,

	electron microscopy					Xiao-Yan
	Reversible loss of core-shell structure for					Zhang, Xiaoben;
2	Ni-Au bimetallic nanoparticles during CO <sub>2</sub> hydrogenation	NATURE CATALYSIS	3	4	411	Han, Shaobo; Zhu, Beien
	Measurement of the mass difference and					Adam, J.;
3	the binding energy of the hypertriton and antihypertriton	NATURE PHYSICS	16	4	409	Adamczyk, L.;
						Adams, J. R.
	Genetically encoded X-ray cellular					Kong, Huating;
4	imaging for nanoscale protein localization	NATIONAL SCIENCE REVIEW	7	7	1218	Zhang, Jichao;
						Li, Jiang
	Ceria-supported ruthenium clusters					Hu, Xiu-Cui; Fu,
5	transforming from isolated single atoms for hydrogen production via decomposition of ammonia	APPLIED CATALYSIS B-ENVIRONMENTAL	268		118424	Xin-Pu; Wang, Wei-Wei
	Interfacial electronic interaction of					Huang, Yiwen;
6	atomically dispersed IrCl <sub>x</sub> on ultrathin Co(OH) <sub>2</sub> /CNTs for efficient electrocatalytic water oxidation	APPLIED CATALYSIS B-ENVIRONMENTAL	279		119398	Wei, Guijuan; He, Jia
	A non-carbon catalyst support upgrades					Zhang, Xing; Sa,
7	the intrinsic activity of ruthenium for hydrogen evolution electrocatalysis via strong interfacial electronic effects	NANO ENERGY	75		104981	Rongjian; Yang, Shuai
	High-Valence Nickel Single-Atom					Li, Yaguang;
8	Catalysts Coordinated to Oxygen Sites for Extraordinarily Activating Oxygen Evolution Reaction	ADVANCED SCIENCE	7	5	190308	Wu, Zhong-Shuai; Lu, Pengfei
	Programming Cell-Cell Communications					Ge, Zhilei; Liu,
9	with Engineered Cell Origami Clusters	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	142	19	8800	Jiangbo; Guo, Linjie
	Programming Switchable Transcription of					Jiao, Kai; Au,
10	Topologically Constrained DNA	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	142	24	10739	Bing; Guo, Linjie
	DNA Origami Radiometers for Measuring					Fang, Weina;
11	Ultraviolet Exposure	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	142	19	8782	Xie, Mo; Hou, Xiaoling
	Intrinsically Active Surface in a					Zhang,
12	Pt/γ-Mo <sub>2</sub> N Catalyst for the Water-Gas Shift Reaction: Molybdenum Nitride or Molybdenum Oxide?	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	142	31	13362	Zhe-Shan; Fu, Qiang; Xu, Kai
	Ultrahigh Density of Gas Molecules					Zhou, Limin;
13	Confined in Surface Nanobubbles in Ambient Water	JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY	142	12	5583	Wang, Xingya; Shin, Hyun-Joon
	Direct DNA Methylation Profiling with an					Ban, Deependra
14	Electric Biosensor	ACS NANO	14	6	6743	Kumar; Liu, Yushuang;

									Wang, Zejun
15	Gamma-Ray Irradiation to Accelerate Crystallization of Mesoporous Zeolites	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION	59	28	11325				Chen, Xinqing; Qiu, Minghuang; Li, Shenggang
16	Highly Thermostable and Efficient Formamidinium-Based Low-Dimensional Perovskite Solar Cells	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION							Cheng, Lei; Liu, Zhou; Li, Shunde
17	DNA Nanoribbon-Templated Self-Assembly of Ultrasmall Fluorescent Copper Nanoclusters with Enhanced Luminescence	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION	59	29	11836				Ouyang Xiangyuan; Wang Meifang; Guo Linjie
18	DNA Framework-Based Topological Cell Sorters	ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION	59	26	10406				Yin, Fangfei; Li, Min; Mao, Xiuhai
19	DNA-Guided Room-Temperature Synthesis of Single-Crystalline Gold Nanostructures on Graphdiyne Substrates	ACS CENTRAL SCIENCE	6	5	779				Chen, Xiaoliang; He, Feng; Fang, Weina
20	Modulating Location of Single Copper Atoms in Polymeric Carbon Nitride for Enhanced Photoredox Catalysis	ACS CATALYSIS	10	10	5715				Wang, Guanchao; Zhang, Ting; Yu, Weiwei
21	Enhancing Bifunctional Electrocatalytic Activities via Metal d-Band Center Lift Induced by Oxygen Vacancy on the Subsurface of Perovskites	ACS CATALYSIS	10	8	4664				Lee, Hansol; Gwon, Ohhun; Choi, Keunsu
22	Selectivity Regulation in Au-Catalyzed Nitroaromatic Hydrogenation by Anchoring Single-Site Metal Oxide Promoters	ACS CATALYSIS	10	4	2837				Zhao, Ji-Xiao; Chen, Chao-Qiu; Xing, Cai-Hong
23	2D-organic framework confined metal single atoms with the loading reaching the theoretical limit	MATERIALS HORIZONS	7	10	2726				Lin, Chao; Zhang, Hao; Song, Xiaokai
24	Implementing digital computing with DNA-based switching circuits	NATURE COMMUNICATIONS	11	1	121				Wang, Fei; Lv, Hui; Li, Qian
25	Capturing transient antibody conformations with DNA origami epitopes	NATURE COMMUNICATIONS	11	1	3114				Zhang, Ping; Liu, Xiaoguo; Liu, Pi
26	Voltage- and time-dependent valence state transition in cobalt oxide catalysts during the oxygen evolution reaction	NATURE COMMUNICATIONS	11	1	1984				Zhou, Jing; Zhang, Linjuan; Huang, Yu-Cheng
27	Encoding quantized fluorescence states with fractal DNA frameworks	NATURE COMMUNICATIONS	11	1	2185				Li, Jiang; Dai, Jiangbing; Jiang, Shuoxing
28	Suppressing ice growth by integrating the	JOURNAL OF MATERIALS	8	44	23555				Liu, Xing; Geng,

	dual characteristics of antifreeze proteins into biomimetic two-dimensional graphene derivatives	CHEMISTRY A							Hongya; Sheng, Nan
29	Core-shell nanoporous AuCu <sub>3</sub> @Au monolithic electrode for efficient electrochemical CO <sub>2</sub> reduction	JOURNAL OF CHEMISTRY A	MATERIALS	8	6	3344			Ma, Xiaoming; Shen, Yongli; Yao, Shuang
30	Ultrahigh and economical uranium extraction from seawater via interconnected open-pore architecture poly(amidoxime) fiber	JOURNAL OF CHEMISTRY A	MATERIALS	8	42	22032			Xu, Xiao; Xu, Lu; Ao, Junxuan
31	Graphdiyne-based Pd single-atom catalyst for semihydrogenation of alkynes to alkenes with high selectivity and conversion under mild conditions	JOURNAL OF CHEMISTRY A	MATERIALS	8	40	20925			Yin, Xue-Peng; Tang, Shang-Feng; Zhang, Chao
32	A novel self-assembly approach for synthesizing nanofiber aerogel supported platinum single atoms	JOURNAL OF CHEMISTRY A	MATERIALS	8	30	15094			Zhang, Haojie; Zhao, Yonghui; Sun, Yu
33	In Situ Observation of Vapor-Assisted 2D-3D Heterostructure Formation for Stable and Efficient Perovskite Solar Cells	NANO LETTERS		20	2	1296			Liu, Zhou; Meng, Ke; Wang, Xiao
34	Treating Acute Kidney Injury with Antioxidative Black Phosphorus Nanosheets	NANO LETTERS		20	2	1447			Hou, Junjun; Wang, Hui; Ge, Zhilei
35	Label-Free and Three-Dimensional Visualization Reveals the Dynamics of Plasma Membrane-Derived Extracellular Vesicles	NANO LETTERS		20	9	6313			Wang, Kaizhe; Zhou, Limin; Li, Jiang
36	Classifying Cell Types with DNA-Encoded Ligand-Receptor Interactions on the Cell Membrane	NANO LETTERS		20	5	3521			Zhang, Luhao; Wang, Fei; Li, Qian
37	Ultrasensitive aptamer-based protein assays based on one-dimensional core-shell nanozymes	BIOSENSORS & BIOELECTRONICS				150		111881	Zhang, Rui; Lu, Na; Zhang, Jiaxing
38	Tuning the coordination number of Fe single atoms for the efficient reduction of CO <sub>2</sub>	GREEN CHEMISTRY		22	21	7529			Chen, Huihuang; Guo, Xu; Kong, Xiangdong
39	In-situ formation of durable akaganeite (beta-FeOOH) nanorods on sulfonate-modified poly(ethylene terephthalate) fabric for dual-functional wastewater treatment	JOURNAL OF MATERIALS	HAZARDOUS			386		121647	Wang, Minglei; Gao, Qianhong; Zhang, Maojiang
40	Facile renewable synthesis of nitrogen/oxygen co-doped graphene-like carbon nanocages as general lithium-ion	CARBON				167		685	Sun, Yuanhe; Zhu, Daming; Liang, Zhaofeng

	and potassium-ion battery anodes							
41	Optimized Molecular Packing and Nonradiative Energy Loss Based on Terpolymer Methodology Combining Two Asymmetric Segments for High-Performance Polymer Solar Cells	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	12	18	20393			Wang, Xunchang; Han, Jianhua; Huang, Da
42	Stable Interface between a NaCl-AlCl <sub>3</sub> Melt and a Liquid Ga Negative Electrode for a Long-Life Stationary Al-Ion Energy Storage Battery	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	12	13	15063			Wang, Junxiang; Jiao, Handong; Song, Wei-Li
43	Radiation-Induced In Situ-Printed Nonconjugated Fluorescent Nonwoven Fabric with Superior Fluorescent Properties	ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES	12	43	49258			Zhang, Mingxing; Chen, Junchang; Zhang, Maojiang
44	Coalescence of Au Nanoparticles without Ligand Detachment	PHYSICAL REVIEW LETTERS	124	6	66101			Guo, Pan; Gao, Yi;
45	PolyA-based DNA bonds with programmable bond length and bond energy	NPG ASIA MATERIALS	12	1	49			Chen, Xiaoliang; Liu, Xiaoguo; Yao, Guangbao
46	Optimizing Electron Densities of Ni-N-C Complexes by Hybrid Coordination for Efficient Electrocatalytic CO <sub>2</sub> Reduction	CHEMSUSCHEM	13	5	929			Wang, Zhong-Li; Choi, Jaecheol; Xu, Mingquan
47	Improved mechanical properties and fracture mechanism of C/C composites with salt treatment monitored by synchrotron-based in-situ tensile XRD	COMPOSITES PART B-ENGINEERING		199				Feng, Shanglei; Yang, Yingguo; Wang, Jiamin
48	Tailoring DNA Self-assembly to Build Hydrogels	TOPICS IN CURRENT CHEMISTRY	378	2	32			Chen, Jie; Zhu, Ying; Liu, Huajie
49	Potential application of graphene oxide membranes in high-level liquid waste treatment	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	266		121884			Zhao, Haogui; Yang, Jing; Li, Zheng
50	Molten salt-assisted synthesis of bulk CoOOH as a water oxidation catalyst	JOURNAL OF ENERGY CHEMISTRY	42		5			Song, Sanzhao; Bao, Hongliang; Lin, Xiao
51	Effects of cobalt carbide on Fischer-Tropsch synthesis with MnO supported Co-based catalysts	JOURNAL OF ENERGY CHEMISTRY	42		227			Sun, Fanfei; Yang, Ruouo; Xia, Zhaoming
52	Role of local coordination in bimetallic sites for oxygen reduction: A theoretical analysis	JOURNAL OF ENERGY CHEMISTRY	44		131			Yang, Yuqi; Zhang, Hao; Liang, Zhaofeng
53	Self-luminescent PVDF membrane hybrid with rare earth nanoparticles for real-time fouling indication	JOURNAL OF MEMBRANE SCIENCE	606		118123			Fan, Kai; Huang, Jianxi; Liu, Enmei
54	A DNA tetrahedral structure-mediated	SENSORS AND ACTUATORS	321		128538			Zhang, Huan;

	ultrasensitive fluorescent microarray platform for nucleic acid test	B-CHEMICAL							Liu, Xinxin; Zhang, Chunxiu
55	Lattice reconstruction of La-incorporated CsPbI2Br with suppressed phase transition for air-processed all-inorganic perovskite solar cells	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY C	8	10	3351				Chen, Shoulong; Zhang, Tianju; Liu, Xiaolin
56	Unrevealing the thermophysical properties and microstructural evolution of MgCl2-NaCl-KCl eutectic: FPMD simulations and experimental measurements	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	210		110504				Li, Xuejiao; Li, Na; Liu, Weihua
57	Thermal transport and storage performances of NaCl-KCl-NaF eutectic salt for high temperatures latent heat	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	218		110756				Wang, Yang; Li, Xiang; Li, Na
58	Atomic structure causing an obvious difference in thermal conductance at the Pd-H2O interface: a molecular dynamics simulation	NANOSCALE	12	34	17870				Li, Shanchen; Chen, Yang; Zhao, Junhua
59	Improving efficiency and stability of colorful perovskite solar cells with two-dimensional photonic crystals	NANOSCALE	12	15	8425				Liu, Zhou; Wu, Longlong; Wang, Xiao
60	Real-time atomistic simulation of the Ostwald ripening of TiO(2)supported Au nanoparticles	NANOSCALE	12	37	19142				Zhu, Beien; Qi, Rui; Yuan, Lina
61	Length feature of ssDNA adsorption onto graphene oxide with both large unoxidized and oxidized regions	NANOSCALE	12	12	6699				Lei, Xiaoling; Ma, Huishu; Fang, Haiping
62	DNA Framework-Mediated Electrochemical Biosensing Platform for Amplification-Free MicroRNA Analysis	ANALYTICAL CHEMISTRY	92	6	4498				Wen, Yanli; Li, Lanying; Li, Jiang
63	A novel sample delivery system based on circular motion for in situ serial synchrotron crystallography	LAB ON A CHIP	20	21	3888				Zhao, Feng-Zhu; Sun, Bo; Yu, Li
64	Phonon-Induced Ratchet Motion of a Water Nanodroplet on a Supported Black Phosphorene	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY LETTERS	11	11	4298				Chen, Jige;;
65	Terahertz Signatures of Hydrate Formation in Alkali Halide Solutions	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY LETTERS	11	17	7146				Chen, Ligang; Ren, Guanhua; Liu, Liyuan
66	Co2+ anchored on surface-functionalized PET non-woven fabric and used as high efficiency monoatom-like catalyst for activating Oxone in water	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	699		134286				Liu, Yinjie; Zhou, Xiying; Wang, Minglei
67	Excellent corrosion resistance of	CORROSION SCIENCE	316		108473				Guo, Lili; Liu,

	stainless steel in purified NaCl-MgCl <sub>2</sub> eutectic salt at high temperature					Qi; Yin, Huiqin
68	Unexpected effect of hydroxyl radical on tellurium corrosion of the Ni-Mo-Cr-Nb based alloy	CORROSION SCIENCE	173	108748		Jiang, Li; Wang, Wei; Ye, Xiang-Xi
69	Irradiation accelerated fluoride molten salt corrosion of nickel-based UNS N10003 alloy revealed by X-ray absorption fine structure	CORROSION SCIENCE	165	108408		Lei, Guanhong; Li, Cheng; Jiang, Zheng
70	Corrosion behavior of ion-irradiated SiC in FLiNaK molten salt	CORROSION SCIENCE	163	108229		Li, Jianjian; Yan, Long; Huang, Hefei
71	Effect of graphite particles in molten LiF-NaF-KF eutectic salt on corrosion behaviour of GH3535 alloy	CORROSION SCIENCE	168	108581		Liu, Qi; Leng, Bin; Qiu, Jie
72	Corrosion of Cr in molten salts with different fluoroacidity in the presence of CrF <sub>3</sub>	CORROSION SCIENCE	169	108636		Liu, Yiyang; Song, Yulong; Ai, Hua
73	Interaction mechanisms of a Hastelloy N-316L stainless steel couple in molten LiF-NaF-KF salt	CORROSION SCIENCE	164	108317		Sun, Hua; Ding, Xiangbin; Ai, Hua
74	Assessment of effects of Mg treatment on corrosivity of molten NaCl-KClMgCl <sub>2</sub> salt with Raman and Infrared spectra	CORROSION SCIENCE	164	108350		Sun, Hua; Wang, Jian-Qiang; Tang, Zhongfeng
75	On the origin of tellurium corrosion resistance of hot-rolled GH3535 alloy	CORROSION SCIENCE	170	108644		Wu, Bo-Heng; Jiang, Li; Ye, Xiang-Xi
76	Biomembrane induced in situ self-assembly of peptide with enhanced antimicrobial activity	BIOMATERIALS SCIENCE	8	7	2031	Shen, Zhiwei; Guo, Zhen; Zhou, Limin
77	Ullmann coupling of 2,7-dibromopyrene on Au(111) assisted by surface adatoms	APPLIED SURFACE SCIENCE	513	145797		Hu, Jinbang; Hu, Jinping; Zhang, Zhengde
78	In situ GISAXS study on the temperature-dependent performance of multilayer monochromators from the liquid nitrogen cooling temperature to 600 degrees C	APPLIED SURFACE SCIENCE	508	144838		Jiang, Hui; Hua, Wenqiang; Tian, Naxi
79	The surface topography and microstructure change of densified nanopore nuclear graphite impregnated with polyimide and irradiated by xenon ions	APPLIED SURFACE SCIENCE	531	147408		Zhang, Heyao; Song, Jinliang; Tang, Zhongfeng
80	The surface topography and	APPLIED SURFACE SCIENCE	515	146022		Zhang, Heyao;

	microstructure of self-sintered nanopore graphite by Xe ions irradiation								Song, Jinliang; Tang, Zhongfeng
81	Understanding the origin of high oxygen evolution reaction activity in the high Sr-doped perovskite	CHINESE JOURNAL OF CATALYSIS	OF	41	4	592PII S1872-2067(19) 63441-8			Song, Sanzhao; Zhou, Jing; Sun, Jian
82	Great enhancement of image details with high fidelity in a scintillator imager using an optical coding method	PHOTONICS RESEARCH		8	7	1079			Xia, Huijuan; Wu, Yanqing; Zhang, Lei
83	In situ SAXS probing the evolution of the precursors and onset of nucleation of ZnSe colloidal semiconductor quantum dots	CHEMICAL COMMUNICATIONS		56	13	2031			Hao, Xiaoyu; Chen, Meng; Wang, LinXi
84	Modulated synthesis and isoreticular expansion of Th-MOFs with record high pore volume and surface area for iodine adsorption	CHEMICAL COMMUNICATIONS		56	49	6715			Li, Zi-Jian; Ju, Yu; Yu, Bowen
85	Effects of cationic concentration on controlling the interlayer spacings for highly effective ion rejection via graphene oxide membranes	CHEMICAL COMMUNICATIONS		56	18	2743			Wang, Shuai; Liang, Shanshan; Chen, Liang
86	How many cells are enough for single-cell infrared spectroscopy?	CHEMICAL COMMUNICATIONS		56	26	3773			Wang, Yadi; Dai, Wentao; Wang, Yue
87	In situ detection of hydroxyl radicals in mitochondrial oxidative stress with a nanopipette electrode	CHEMICAL COMMUNICATIONS		56	86	13237			Wang, Yadi; Wang, Yue; Qian, Jiang
88	Sulfur-substituted uranyl stabilized by fluoride ligands: matrix preparation of U(O)(S)F(2) via oxidation of U(0) by SOF2	CHEMICAL COMMUNICATIONS		56	50	6782			Wei, Rui; Chen, Xiuting; Gong, Yu
89	Unexpected structural complexity of thorium coordination polymers and polyoxo cluster built from simple formate ligands	INORGANIC CHEMISTRY FRONTIERS		7	1	260			Li, Zi-Jian; Guo, Shangyao; Lu, Huangjie
90	Probing the Fast Lithium-Ion Transport in Small-Molecule Solid Polymer Electrolytes by Solid-State NMR	MACROMOLECULES		53	22	10078			Fu, Xiaobin; Liu, Yiyang; Wang, Wei
91	Nondestructive and Quantitative Characterization of Bulk Injection-Molded Polylactide Using SAXS Microtomography	MACROMOLECULES		53	15	6498			Hu, Tao; Hua, Wen-Qiang; Zhong, Gan-Ji
92	Electrochemical separation of uranium from lanthanide (La, Eu, Gd) fluorides in molten LiCl-KCl	SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY		235		116227			Zhu, Tiejian; Huang, Wei; Gong, Yu
93	Controlling interlayer spacings of	SEPARATION AND		241		116738			Liang, Shanshan;

	graphene oxide membranes with cationic for precise sieving of mono-/multi-valent ions	PURIFICATION TECHNOLOGY				Wang, Shuai; Chen, Liang
94	Autophagy changes in lung tissues of mice at 30 days after carbon black-metal ion co-exposure	CELL PROLIFERATION	53	7	e12813	He, Wei; Peng, Hongzhen; Ma, Jifei
95	Efficient selective hydrogenation of 2-butyne-1,4-diol to 2-butene-1,4-diol by silicon carbide supported platinum catalyst	CATALYSIS SCIENCE & TECHNOLOGY	10	2	327	Shu, Miao; Shi, Chuang; Yu, Jing
96	Cytoskeleton induced the changes of microvilli and mechanical properties in living cells by atomic force microscopy	JOURNAL OF CELLULAR PHYSIOLOGY				Liu, Xueyan; Wei, Yuhui; Li, Wei
97	Tuning the surface segregation composition of a PdCo alloy by the atmosphere for increasing electrocatalytic activity	SUSTAINABLE ENERGY & FUELS	4	1	380	Li, Tongtong; Wang, Rong; Yang, Minghe
98	Sensitive imagine of intact microvessels in vivo with synchrotron radiation	IUCRJ	7		793	Wang, Feixiang; Zhou, Panting; Li, Ke
99	A facile PEG/thiol-functionalized nanographene oxide carrier with an appropriate glutathione-responsive switch (vol 11, pg 2194, 2020)	POLYMER CHEMISTRY	11	16	2923	Hao, Bingjie; Li, Wei; Zhang, Sen
100	A facile PEG/thiol-functionalized nanographene oxide carrier with an appropriate glutathione-responsive switch	POLYMER CHEMISTRY	11	12	2194	Hao, Bingjie; Li, Wei; Zhang, Sen
101	Crystal structure of mature myroilysin and implication for its activation mechanism	INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOLOGICAL MACROMOLECULES	156		1556	Ran, Tingting; Li, Weidong; Sun, Bo
102	Insight into dynamic interaction of molten MgCl <sub>2</sub> -NaCl-KCl with impurity water via FPMD simulations	JOURNAL OF MOLECULAR LIQUIDS	314		113596	Li, Xuejiao; Liu, Weihua; Tang, Zhongfeng
103	Insight into effects of molten KNO <sub>3</sub> -NaNO <sub>2</sub> -NaNO <sub>3</sub> volumetric absorption of solar radiation from different factors by absorption spectroscopy	JOURNAL OF MOLECULAR LIQUIDS	301		110604	Liu, Yiyang; Tang, Zhongfeng; Li, Xiang
104	Atomic uranium modified graphdiyne as catalytic material for hydrogen evolution reaction: An interfacial descriptor led mechanistic study	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	45	46	24604	Bacha, Raza ullah shah; Cai, Hong-Xue; Wang, Jian-Qiang
105	Hydrogen absorption behavior of non-stoichiometric Zr <sub>7-x</sub> Ti <sub>x</sub> V <sub>5</sub> Fe (x=0, 0.3, 0.9, 1.5 and 2.1) alloys	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	45	41	21625	Han, Xingbo; Yan, Pan; Zhang, Dongxun

106	Significant hydrogen isotopes permeation resistance via nitride nano-multilayer coating	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	45	38	19583	Hu, Lulu; Wei, Guo; Yin, Ran
107	Reusable fibrous adsorbent prepared via Co-radiation induced graft polymerization for iodine adsorption	ECOTOXICOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY	203		111021	Ye, Feng; Huang, Chen; Jiang, Xiaohui
108	Boosting the Iodine Adsorption and Radioreistance of Th-UiO-66 MOFs via Aromatic Substitution	CHEMISTRY-A EUROPEAN JOURNAL				Li, Zi-Jian; Ju, Yu; Lu, Huangjie
109	Self-Supported Nanoporous Au <sub>3</sub> Cu Electrode with Enriched Gold on Surface for Efficient Electrochemical Reduction of CO <sub>2</sub>	CHEMISTRY-A EUROPEAN JOURNAL				Ma, Xiaoming; Shen, Yongli; Yao, Shuang
110	End-On Cyanogen Complexes of Iridium, Palladium, and Platinum	INORGANIC CHEMISTRY	59	9	6489	Chen, Xiuting; Xiong, Zhixin; Andrews, Lester
111	Complexation of Ln(3+) with Pyridine-2,6-dicarboxamide: Formation of the 1:2 Complexes in Solution and Gas Phase	INORGANIC CHEMISTRY	59	19	14486	Chen, Xiuting; Xiong, Zhixin; Gong, Yu
112	Ultrastable Thorium Metal-Organic Frameworks for Efficient Iodine Adsorption	INORGANIC CHEMISTRY	59	7	4435	Li, Zi-Jian; Yue, Zenghui; Ju, Yu
113	Structural Complexity and Magnetic Orderings in a Large Family of 3d-4f Heterobimetallic Sulfates	INORGANIC CHEMISTRY	59	18	13398	Lu, Huangjie; Diefenbach, Kariem; Li, Zi-Jian
114	Distribution of Spin Density on Phenoxy Radicals Affects the Selectivity of Aerobic Oxygenation of Phenols	INORGANIC CHEMISTRY	59	6	3562	Wang, Yongtao; Guan, Jun; Mei, Bingbao
115	Sulfur Dioxide Complexes of Main-Group Elements: from SO <sub>2</sub> to SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> and SO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> upon Coordination to Aluminum and Silicon Difluorides	INORGANIC CHEMISTRY	59	7	4703	Wei, Rui; Chen, Xiuting; Gong, Yu
116	Unexpected Roles of Alkali-Metal Cations in the Assembly of Low-Valent Uranium Sulfate Molecular Complexes	INORGANIC CHEMISTRY	59	4	2348	Yue, Zenghui; Guo, Xiaofeng; Feng, Mei-Ling
117	High pressure study of nitrogen doped carbon nanotubes using Raman spectroscopy and synchrotron X-ray diffraction	ARABIAN JOURNAL OF CHEMISTRY	13	1	3008	Shi, Weiguang; Liu, Hao; Dong, Zhaohui
118	Design and investigation of the novel ZnCl <sub>2</sub> based ternary chloride salts with low-temperature for sensible energy	APPLIED THERMAL ENGINEERING	171		114917	Wu, Shuang; Peng, Hao; Xie, Leidong

	storage							
119	Effect of Nb addition on the microstructure of Ni-12Mo-7Cr based superalloy	JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	828		154137			Wang, Wei; Jiang, Li; Ye, Xiang-Xi
120	Investigating bulk mechanical properties on a micro-scale: Micro-tensile testing of ultrafine grained Ni-SiC composite to determine its fracture mechanism and strain rate sensitivity	JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	817		152774			Xu, Alan; Yang, Chao; Thorogood, Gordon
121	Temperature-dependent structural changes of [Bmim]FeCl <sub>4</sub> magnetic ionic liquid characterized by an in-situ X-ray absorption fine structure	CHINESE CHEMICAL LETTERS	31	3	801			Jiang, Fangling; Peng, Hao; Li, Cheng
122	Powerful predictability of FPMD simulations for the phase transition behavior of NaCl-MgCl <sub>2</sub> eutectic salt	SOLAR ENERGY	209		568			Xu, Tingrui; Li, Xuejiao; Guo, Lili
123	Thermophysical properties of KCl-NaF reciprocal eutectic by artificial neural network prediction and experimental measurements	SOLAR ENERGY	204		667			Wang, Yang; Ling, Changjian; Yin, Huiqin
124	A facile strategy for fabrication of HKUST-1 on a flexible polyethylene nonwoven fabric with a high MOF loading	MICROPOROUS AND MESOPOROUS MATERIALS	292		109723			Qiu, Long; Wang, Linlin; Zhang, Mingxing
125	Light nuclei production in Au plus Au collisions at root s(NN)=7.7-80 GeV from UrQMD model	PHYSICS LETTERS B	808		135668			Deng, Xian-Gai; Ma, Yu-Gang;
126	Constraining the in-medium nucleon-nucleon cross section from the width of nuclear giant dipole resonance	PHYSICS LETTERS B	807		135532			Wang, Rui; Zhang, Zhen; Chen, Lie-Wen
127	Constraining isovector nuclear interactions with giant resonances within a Bayesian approach	PHYSICS LETTERS B	810		135820			Xu, Jun; Zhou, Jia; Zhang, Zhen
128	Properties of strange quark stars with isovector interactions	PHYSICS LETTERS B	803		135343			Liu, He; Xu, Jun; Ko, Che Ming
129	On the biaxial thermal creep-fatigue behavior of Ni-base Alloy 617 at 950 degrees C	INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE	139		105787			Zhong, Yang; Liu, Xiang; Lan, Kuan-Che
130	Radiation Induced Surface Modification of Nanoparticles and Their Dispersion in the Polymer Matrix	NANOMATERIALS	10	11	2237			Fu, Zhiang; Gu, Xiaoying; Hu, Lingmin
131	Network structure of thermonuclear reactions in nuclear landscape	SCIENCE CHINA-PHYSICS MECHANICS & ASTRONOMY	63	11	112062			Liu HuanLing; Han DingDing; Ma YuGang
132	An improved evaluation of the neutron	SCIENCE CHINA-PHYSICS	63	3	231011			Wang, QiuHong;

	background in the PandaX-II experiment	MECHANICS & ASTRONOMY				Abdukerim, Abdusalam; Chen, Wei
133	Tightly-coated and easily recyclable Ag@AgBr-cotton hybrid photocatalyst for organic dye degradation under visible light	CELLULOSE	27	17	10047	Wang, Minglei; Zhang, Maojiang; Gao, Qianhong Hu, Jinbang;
134	Direct Synthesis of Semimetal Phthalocyanines on a Surface with Insights into Interfacial Properties	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	124	15	8247	Strand, Frode Sneve; Chellappan, Rajesh Kumar
135	Effects of Hydrogen and Hydrothermal Pretreatments on a Silica-Supported Copper Catalyst for CO Oxidation: Copper Hydroxy Active Species	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C	124	46	25270	Wang, Miao-Miao; Yu, Jing; Wang, Wei-Wei
136	Reactive Oxygen Species Scavenging and Biodegradable Peptide Hydrogel as 3D Culture Scaffold for Cardiomyocytes	ACS BIOMATERIALS SCIENCE & ENGINEERING	6	7	3957	Shen, Zhiwei; Guo, Zhen; Tan, Tingyuan
137	Experimental and modelling investigation on the fretting wear of PTFE with and without electron-beam irradiation	WEAR	460		203459	Li, Yuting; Pu, Lei; Xu, Yizhuo
138	Tuning the Interlayer Spacings in Dry Graphene Oxide Membranes via Ions	CHEMISTRY-AN ASIAN JOURNAL	15	15	2346	Liang, Shanshan; Mu, Lihua; Chen, Liang
139	Radiation assisted pre-oxidation of polyacrylonitrile fiber: Graphite formation and lower crystal size revealed by 2D WAXD at a synchrotron facility	POLYMER DEGRADATION AND STABILITY	179		109264	Zhang, Wenli; Wang, Mouhua; Cheng, Li
140	Microstructural characterization and hydrogenation performance of ZrxV5Fe (x=3-9) alloys	PROGRESS IN NATURAL SCIENCE-MATERIALS INTERNATIONAL	30	2	229	Leng, Haiyan; Yan, Pan; Han, Xingbo
141	High-precision speckle-tracking X-ray imaging with adaptive subset size choices	SCIENTIFIC REPORTS	10	1	14238	Tian, Naxi; Jiang, Hui; Li, Aiguo
142	Promoting osteoblasts responses in vitro and improving osteointegration in vivo through bioactive coating of nanosilicon nitride on polyetheretherketone	JOURNAL OF ORTHOPAEDIC TRANSLATION	24		198	Dai, Yong; Guo, Han; Chu, Linyang
143	Broadband terahertz signatures and vibrations of dopamine	ANALYST	145	18	6006	Zhu, Zhongjie; Zhang, Jianbing; Song, Yongshun
144	Fabrication of two-dimensional Ti3C2Tx MXenes by ball milling pretreatment and mild etchant and their microstructure	CERAMICS INTERNATIONAL	46	18	28949	Tian, Shen; Cheng, Guojun; Tang, Zhongfeng
145	Application of multiple linear regression	INTERNATIONAL JOURNAL OF				Jiao, Xiaowei;

	to trip setpoint analysis in a reactivity-initiated accident of a molten salt reactor	ENERGY RESEARCH				Wang, Kai; Wu, Yanhua
146	Transmutation of Cs-135 in a single-fluid double-zone thorium molten salt reactor	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH				Ma, Kunfeng; Yu, Chenggang; Chen, Jingen
147	Nuclear non-proliferation review and improving proliferation resistance assessment in the future	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH				Wu Jianhui; Ma Yuwen; Yu Chenggang
148	Analysis of integrated target in thorium-based molten salt fast energy amplifier	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH				Yang, Pu; Lin, Zuokang; Wan, Weishi
149	The conceptual design of thorium-based molten salt energy amplifier	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH				Yang, Pu; Lin, Zuokang; Wan, Weishi
150	Neutronic effect of graphite dimensional change in a small modular molten salt reactor	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH				Zhu, Guifeng; Guo, Wei; Kang, Xuzhong
151	Solubility of Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> in Molten Fluorides with Different ZrF <sub>4</sub> Contents and Fluoroacidities	JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY	167	2	23501	Song, Yulong; Shen, Miao; Peng, Hao
152	Efficient organic solar cells with the active layer fabricated from glovebox to ambient condition	APPLIED PHYSICS LETTERS	117	13	133301	Li, Hengyue; Huang, Keqing; Dong, Yanan
153	Enhanced Performance in Uranium Extraction by Quaternary Ammonium-Functionalized Amidoxime-Based Fibers	INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH	59	13	5828	Ao, Junxuan; Han, Jiaguang; Xu, Xiao
154	Effect of grain boundary carbides on the diffusion behavior of Te in Ni-16Mo-7Cr base superalloy	MATERIALS CHARACTERIZATION	164		110329	Han, Fenfen; Wang, Xiaodong; Jia, Yanyan
155	Formation and Stability of Bulk Nanobubbles by Vibration	LANGMUIR	36	9	2264	Fang, Zhou; Wang, Xingya; Zhou, Limin
156	Microstructure evolution and mechanical properties of simulated HAZ in a Ni-17Mo-7Cr superalloy: effects of the welding thermal cycles	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE	55	27	13372	Chen, Shuangjian; Zhao, Li Bin; Wang, Jinjun
157	Tuning the interfaces of Co-Co <sub>2</sub> C with sodium and its relation to the higher alcohol production in Fischer-Tropsch synthesis	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE	55	21	9037	Liu, Yang; He, Shun; Yang, Ruouo
158	The effect of thermal oxidation on the coefficient of thermal expansion of nuclear	JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE	55	18	7805	Yang, Xiong; Wang, Xue;

	graphite						Tsang, D. K. L.
159	The synthesis of 3D graphene/Au composites via gamma-ray irradiation and their use for catalytic reduction of 4-nitrophenol	NANOTECHNOLOGY	31	23	235604		Lu, Manli; Li, Jihao; Song, Sanzhao
160	Transverse-to-longitudinal emittance-exchange in optical wavelength	NEW JOURNAL OF PHYSICS	22	6	63034		Wang, Xiaofan; Feng, Chao; Yang, Chuan
161	Probing NaCl hydrate formation from aqueous solutions by terahertz time-domain spectroscopy	PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS	22	32	17791		Chen, Ligang; Ren, Guanhua; Liu, Liyuan
162	Unexpected sequence adsorption features of polynucleotide ssDNA on graphene oxide	PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS	22	20	11740		Ma, Huishu; Xu, Zhen; Fang, Haiping
163	Fabrication and Potential Applications of Highly Durable Superhydrophobic Polyethylene Terephthalate Fabrics Produced by In-Situ Zinc Oxide (ZnO) Nanowires Deposition and Polydimethylsiloxane (PDMS) Packaging	POLYMERS	12	10	2333		Hu, Jiangtao; Zhang, Mingxing; He, Yulong
164	Investigation of Pore Structures in Shallow Longmaxi Shale, South China, via Large-Area Electron Imaging and Neutron Scattering Techniques	ENERGY & FUELS	34	7	7974		Wang, Yu; Jiang, Hanqiu; Ke, Yubin
165	Effect of Heat Treatment Temperature on the Spinning Structure and Properties of a Cu-Sn Alloy	MICROSCOPY AND MICROANALYSIS	26	1	29PII S14319 276190 15101		Liu, Jinli; Zheng, Wenyuan; Yin, Huiqin
166	A Cross-Linked PCBM Interlayer for Efficient and UV-Stable Methylammonium-Free Perovskite Solar Cells	ENERGY TECHNOLOGY	8	7	200022 4		Li, Zhimin; Liu, Ning; Liu, Zhou
167	Stretchable conductive Ni@Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @Polyester fabric strain sensor with negative resistance variation and electromagnetic interference shielding	ORGANIC ELECTRONICS	81		105677		Zhang, Maojiang; Wang, Minglei; Zhang, Mingxing
168	Terahertz spectroscopy of enantiomeric and racemic pyroglutamic acid	SPECTROCHIMICA ACTA PART A-MOLECULAR AND BIOMOLECULAR SPECTROSCOPY	225		117509		Wu, Zhipeng; Zhu, Zhongjie; Cheng, Chao
169	Far-infrared terahertz properties of L-cysteine and its hydrochloride monohydrate	SPECTROCHIMICA ACTA PART A-MOLECULAR AND BIOMOLECULAR SPECTROSCOPY	225		117476		Ren, Guanhua; Zong, Siqi; Zhu, Zhongjie

170	Study on Microstructures of 2D and 3D Chemical Vapor Infiltration SiC/SiC Composites	ADVANCED ENGINEERING MATERIALS	22	5	1900880	Yan, Hao; Li, Ke; Gao, Yantao
171	Directed Self-assembly of Vertical PS-b-PMMA Nanodomains Grown on Multilayered Polyelectrolyte Films	CHINESE JOURNAL OF POLYMER SCIENCE	38	1	92	Liu, Kai; Yang, Chun-Ming; Yang, Bo-Ming
172	Self-assembly of pentapeptides in ethanol to develop organogels	SOFT MATTER	16	46	10567	Tan, Tingyuan; Shen, Zhiwei; Wang, Yujiao
173	Fabrication of new conductive surface-metallized UHMWPE fabric with improved thermal resistance	RSC ADVANCES	10	26	15139	Gao, Qianhong; Wang, Minglei; Chen, Jing
174	Ultra-fine platinum species supported on niobium pentoxide for CO oxidation	RSC ADVANCES	10	21	12326	Wang, Miao-Miao; Yu, Jing; Wang, Dao-Lei
175	Selective Adsorption, Reduction, and Separation of Au(III) from Aqueous Solution with Amine-Type Non-Woven Fabric Adsorbents	MATERIALS	13	13	2958	Huang, Chen; Xu, Xiao; Ao, Junxuan
176	Influence Mechanism of Silicon on Carbide Phase Precipitation of a Corrosion Resistance Nickel Based Superalloy	MATERIALS	13	4	959	Liu, Tao; Yang, Mei; Han, Fenfen
177	Nanoindentation Study on the Creep Characteristics and Hardness of Ion-Irradiated Alloys	MATERIALS	13	14	3132	Zhu, Zhenbo; Huang, Hefei; Liu, Jizhao
178	Molten Salt Synthesis of High-Performance, Nanostructured La <sub>0.6</sub> Sr <sub>0.4</sub> FeO <sub>3-δ</sub> Oxygen Electrode of a Reversible Solid Oxide Cell	MATERIALS	13	10	2267	Zuo, Xiaodong; Chen, Zhiyi; Guan, Chengzhi
179	An investigation of the anomalous asymptotic behavior of elastic electron scattering of helium	JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS	152	3	34304	Liu, Ya-Wei; Xiong, Tao; Huang, Xin-Chao
180	Magnetic field effects in peripheral heavy ion collisions near 1 GeV/nucleon	PHYSICAL REVIEW C	101	5	54610	Deng, X. G.; Ma, Y. G.; Huang, Ling;
181	Sensitivity analysis for observables of the chiral magnetic effect using a multiphase transport model	PHYSICAL REVIEW C	101	2	24916	Nie, Mao-Wu; Ma, Guo-Liang
182	Direct photon emission and influence of dynamical wave packets in an extended quantum molecular dynamics model	PHYSICAL REVIEW C	102	1	14601	Shi, C. Z.; Ma, Y. G.; Cao, X. G.
183	Hard-photon production and its correlation with intermediate-mass fragments in a framework of a quantum molecular	PHYSICAL REVIEW C	102	2	24620	Wang, S. S.; Ma, Y. G.; Cao, X. G.

	dynamics model								
184	Searching for $\langle \text{Li-4} \rangle$ via the momentum-correlation function of $\langle \text{p} \rangle$ - $\langle \text{He-3} \rangle$	PHYSICAL REVIEW C	102	6	64901				Xi, Bao-Shan; Zhang, Zheng-Qiao; Zhang, Song
185	Nucleus giant resonances from an improved isospin-dependent Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck transport approach	PHYSICAL REVIEW C	102	2	24306				Xu, Jun; Qin, Wen-Tao;
186	Bayesian inference of nuclear symmetry energy from measured and imagined neutron skin thickness in Sn-116, Sn-118, Sn-120, Sn-122, Sn-124, Sn-130, Sn-132, Pb-208, and Ca-48	PHYSICAL REVIEW C	102	4	44316				Xu, Jun; Xie, Wen-Jie; Li, Bao-An
187	Two-proton momentum correlation from photodisintegration of alpha-clustering light nuclei in the quasideuteron region	PHYSICAL REVIEW C	101	3	34615				Huang, Bo-Song; Ma, Yu-Gang;
188	Study on the Thermal Stability of the Na <sub>2</sub> UF <sub>8</sub> Complex in the Argon Atmosphere	ACS OMEGA	5	11	5651				Cui, Rongrong; Cheng, Zhiqiang; Dai, Jianxing
189	Antifouling Membranes Prepared from Polyethersulfone Grafted with Poly(ethylene glycol) Methacrylate by Radiation-Induced Copolymerization in Homogeneous Solution	ACS OMEGA	5	42	27094				Lou, Dan; Hou, Zhengchi; Yang, Haijun
190	Migration behavior of tellurium in bcc iron against typical alloying elements: A first-principles study	COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE	181		109571				Zhang, Zheng-De; Ren, Cui-Lan; Tan, Meng-Lu
191	Raman Spectroscopic and Theoretical Study of Scandium Fluoride and Oxyfluoride Anions in Molten FLiNaK	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY B	124	30	6671				Wang, Chenyang; Chen, Xiuting; Wei, Rui
192	SiO <sub>2</sub> -Mediated High-efficiency Enrichment of 5 nm Gold Nanoparticles and Their Catalytic Activity	ACTA CHIMICA SINICA	78	2	170				Li Wei; Ran Tiecheng; Zhang Yu
193	Optimization Design of Rib Width and Performance Analysis of Solid Oxide Electrolysis Cell	ENERGIES	13	20	5468				Guo, Meiting; Ru, Xiao; Lin, Zijing
194	Numerical and experimental comparison of two nano-structuring processing techniques on making stronger stainless steels	MATERIALS TODAY COMMUNICATIONS	24		100419				Cao, Shan Cecilia; Zhang, Xiaochun; Mao, Lawrence David
195	Potential Use of Stable Isotope and	FOOD ANALYTICAL METHODS	13	3	762				Jiang, Di; Du,

	Multi-element Analyses for Regional Geographical Traceability of Bone Raw Materials for Gelatin Production							Lin; Guo, Yanchuan
196	Probing the Hydrogen Bonding in Microsolvated Clusters of Au-1,2(-)(Solv)(n) (Solv = C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH, n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH; n=1-3 for Au-; n=1 for Au-2(-))	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A	124	27	5590			Wang, Yongtian; Han, Changcai; Fei, Zejie
197	High-Resolution Photoelectron Imaging and Photodetachment Spectroscopy of Cryogenically Cooled IO-	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A	124	28	5720			Wang, Yong-Tian; Ning, Chuan-Gang; Liu, Hong-Tao
198	Anion Photoelectron Spectroscopy and Theoretical Study of HAuCN and [HAuCN](-): Spin-Orbit Coupling and Low-Lying Excited States	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A	124	23	4712			Xiong, Xiao-Gen; Liu, Hongtao;
199	The investigation of molten ZnCl <sub>2</sub> natural particle suspensions	ANALYTICAL METHODS	12	9	1229			Wang, Xueliang; Liu, Yiyang; Shen, Miao
200	Unusual Heterometallic Cation-Cation Interactions in Uranyl Zinc Germanates	EUROPEAN JOURNAL OF INORGANIC CHEMISTRY	202	22	2182	0		Lu, Huangjie; Lin, Jian; Wang, Yaxing
201	Local structure of uranium in polycrystalline alpha-U <sub>2</sub> N <sub>3</sub> +delta film probed by X-ray absorption spectroscopy	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	542		152404			Bao, Hongliang; Zhong, Huoping; Hu, Yin
202	Defects evolution and hardening in the Hastelloy N alloy by subsequent Xe and He ions irradiation (vol 517, 328, 2019)	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	538		152270			Liu, Jizhao; Huang, Hefei; Gao, Jie
203	In situ TEM observation of the evolution of helium bubbles in Hastelloy N alloy during annealing	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	537		UNSP 152184			Liu, Jizhao; Huang, Hefei; Liu, Renduo
204	Solubility and precipitation investigations of UO <sub>2</sub> in LiF-BeF <sub>2</sub> molten salt	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	531		152004			Peng, Hao; Huang, Wei; Xie, Leidong
205	Corrosion behavior of a wear resistant Co-Mo-Cr-Si alloy in molten fluoride salts	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	542		152529			Wu, Yanping; Leng, Bin; Li, Xiaoli
206	Helium-induced damage behavior in high temperature nickel-based alloys with different chemical composition	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	541		152419			Zhu, Zhenbo; Huang, Hefei; Liu, Jizhao
207	Emission time sequence of neutrons and protons as probes of alpha-clustering structure	CHINESE PHYSICS C	44	9	94105			Huang, Bo-Song; Ma, Yu-Gang;
208	Yield ratio of hypertriton to light nuclei in	CHINESE PHYSICS C	44	11	114001			Shao, Tian-Hao;

	heavy-ion collisions from root $s(NN)=4.9$ GeV to 2.76 TeV						Chen, Jin-Hui; Ko, Che Ming
209	Transverse momentum spectra of J/psi produced in collisions over an energy range from 17.4 GeV to 13 TeV	JOURNAL OF PHYSICS G-NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS	47	4	45111		Chen, Ya-Hui; Ma, Yu-Gang; Ma, Guo-Liang
210	Microplates for Crystal Growth and in situ Data Collection at a Synchrotron Beamline	CRYSTALS	10	9	798		Liang, Miao; Wang, Zhijun; Wu, Hai
211	Exploring the Adsorption Mechanism of Tetracene on Ag(110) by STM and Dispersion-Corrected DFT	CRYSTALS	10	1	13		Liang, Zhaofeng; Tian, Qiwei; Zhang, Huan
212	Latent Tracks in Ion-Irradiated LiTaO3 Crystals: Damage Morphology Characterization and Thermal Spike Analysis	CRYSTALS	10	10	877		Han, Xinqing; Liu, Yong; Crespillo, Miguel L.
213	Axial resolution and contrast enhancement in digital scanned light-sheet microscopy via stimulated emission depletion	JOURNAL OF OPTICS	22	10	105301		Deng, Suhui; Li, Xianhong; Ding, Zijun
214	Study on the fluorination reaction of uranium tetrafluoride by nitrogen trifluoride	JOURNAL OF FLUORINE CHEMISTRY	230		109436		Niu, Yongsheng; Sun, Lixin; Hu, Congwei
215	Two-state diffusive mobility of slow and fast transport of water in narrow nanochannels	PHYSICAL REVIEW E	101	1	10101		Fan, Wen; Chen, Jige;
216	Suppressed-to-enhanced thermal transport in a Fermi-Pasta-Ulam superlattice: Mediation roles of solitons and phonons	PHYSICAL REVIEW E	101	4	42207		Wang, Jianjin; Chen, Jige;
217	Selectivity mechanism of magnesium and calcium in cation-binding pocket structures of phosphotyrosine	PHYSICAL REVIEW E	101	2	22410		Tu, Yusong; Liu, Huadong; Shi, Guosheng
218	First-principles study of helium behavior in nickel with noble gas incorporation	JOURNAL OF APPLIED PHYSICS	127	17			Liao, Liang-Xiang; Zhang, Xun; Ren, Cui-Lan
219	Comprehensive characterization of TSV etching performance with phase-contrast X-ray microtomography	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	27		1023		Li, Ke; Deng, Biao; Zhang, Haipeng
220	Influence of diffuser grain size on the speckle tracking technique	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	27		146		Tian, Naxi; Jiang, Hui; Li, Aiguo
221	Design of an online spectrometer for the diagnosis of free-electron lasers	JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION	27		870		Zhang, Ximing; Guo, Zhi; Meng, Xiangyu
222	Efficient removal of uranium from diluted aqueous solution with hydroxypyridone	RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY	171		108742		Zhang, Mingxing; Yuan,

	functionalized polyethylene nonwoven fabrics								Mengjia; Zhang, Maojiang
223	Study on dynamic characteristics of activated products source term in secondary loop of integrated molten salt reactor	RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY	171		108700				Zhou, Bo; Yu, Xiao-Han; Liu, Ya-Fen
224	Extracting jet transport parameter q from a multiphase transport model	EUROPEAN JOURNAL A	56	2					Zhou, Feng-Chu; Ma, Guo-Liang; Ma, Yu-Gang
225	Structural evolution of mesoporous graphene/LiNi <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub> composite cathode for Li-ion battery	RARE METALS							Liu, Wen-Jie; Sun, Xian-Zhong; Zhang, Xiong
226	Broadband terahertz spectroscopy of paper and banknotes	OPTICS COMMUNICATIONS	475		126267				Ren, Guanhua; Zhu, Zhongjie; Zhang, Jianbing
227	Robust Optimization of SBRT Planning for Patients With Early Stage Non-Small Cell Lung Cancer	TECHNOLOGY IN CANCER RESEARCH & TREATMENT	19		1.53303 E+15				Shang, Haijiao; Pu, Yuehu; Wang, Yucan
228	Plasmonic Luneburg lens and plasmonic nano-coupler	CHINESE OPTICS LETTERS	18	9	92401				Zhang, Lei; Wang, Lin; Wu, Yanqing
229	The preparation of graphene foam by one-step reduction and air-drying for oil-water separation	JOURNAL OF SOL-GEL SCIENCE AND TECHNOLOGY	94	2	375				Geng, Yiyun; Li, Zheng; Chen, Mumei
230	Nanostructures and nanomechanical properties of ion-irradiated HOPG	CARBON LETTERS							Zhou, Yuying; Wang, Ying; Lei, Qiantao
231	A new design of Lambertson magnet with true zero field region	PHYSICA SCRIPTA	95	6	65216				Zhao, Rongjie; Gu, Ming; Wang, Dong
232	Pore Structure of Nuclear Graphite Obtained via Synchrotron Computed Tomography	JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION	39	1	17				Zhu, Yongqi; Huang, Qing; Li, Cheng
233	Thermodynamic description of the constitutive binaries of the NaCl-KCl-UCI <sub>3</sub> -PuCl <sub>3</sub> system	CALPHAD-COMPUTER COUPLING OF PHASE DIAGRAMS AND THERMOCHEMISTRY	70		101783				Yin, Huiqin; Lin, Jian; Hu, Biao
234	Investigation on failure assessment method for nuclear graphite components	NUCLEAR ENGINEERING AND TECHNOLOGY	52	1	206				Gao, Yantao; Tsang, Derek K. L.;
235	Defects evolution and element segregation of Ni-Mo-Cr alloy irradiated by 30 keV Ar ions	NUCLEAR ENGINEERING AND TECHNOLOGY	52	8	1749				Liu, Min; Liu, Wenguan; He, Xiujie

236	Investigating creep behavior of Ni-Cr-W alloy pressurized tube at 950 degrees C by using in-situ creep testing system	NUCLEAR ENGINEERING AND TECHNOLOGY	52	7	1481	Zhong, Yang; Lan, Kuan-Che; Lee, Hoon
237	Molten Salt Treated Cu Foam Catalyst for Selective Electrochemical CO(2)Reduction Reaction	CHEMISTRYSELECT	5	38	11927	Song, Sanzhao; Meng, Jun; Wang, Yu
238	Characterization of a 3D Auxetic Warp-knitted Spacer Fabric by Synchrotron Radiation X-ray Computed Tomography	FIBERS AND POLYMERS	21	4	930	Gao, Yantao; Ma, Pibo; Li, Ke
239	Effects of irradiation temperature on Ne ion irradiated binary nickel-based alloys	PHILOSOPHICAL MAGAZINE	100	24	3061	Cao, Mingpeng; Chen, Huaican; Zhang, Wei
240	General method for highly controlled preparation of ceramic hollow spheres from core-shell structures	INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED CERAMIC TECHNOLOGY	17	5	2220	Zhang, Feng; Yang, Xu; Wang, Peng
241	Microstructure characterization of IG110 and reactor pebble graphite using synchrotron micro X-ray diffraction 2D maps	SURFACE AND INTERFACE ANALYSIS	53	1	90	He, Zhoutong; Zhang, Can; Tang, Hui
242	Determination of Mechanical Properties and Fracture Behavior of Hot-Rolled Inconel 617/Ni Bimetal Composite Plate	JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE	29	6	3974	Lei, Qi; Huang, Hefei; Han, Fenfen
243	Independent Control of the Chirality and Polarity for the Magnetic Vortex in Symmetric Nanodot Pairs	IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	56	9	430030 6	Li, Junqin; Wang, Yong; Zhao, Zilong
244	Thermal loading on crystals in an x-ray free-electron laser oscillator	PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS	23	9	90704	Huang, Nanshun; Deng, Haixiao;
245	Polarization control of an x-ray free electron laser oscillator	PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS	23	3	30702	Huang, Nanshun; Li, Kai; Deng, Haixiao
246	Extremely bright coherent synchrotron radiation production in a diffraction-limited storage ring using an angular dispersion-induced microbunching scheme	PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS	23	11	110701	Li, Changliang; Feng, Chao; Jiang, Bocheng
247	Machine learning based image processing technology application in bunch longitudinal phase information extraction	PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS	23	3	32805	Xu, Xingyi; Zhou, Yimei; Leng, Yongbin
248	Transient analysis of TMSR-SF0 simulator	JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY				Wang, Jiajun; Dai, Ye; Zou, Yang
249	Theoretical prediction of radiation-enhanced diffusion behavior in	NUCLEAR SCIENCE AND TECHNIQUES	31	9	95	Chen, Xiao-Ya; Wen, A-Li; Ren,

	nickel under self-ion irradiation (vol 31, 79, 2020)								Cui-Lan
250	Theoretical prediction of radiation-enhanced diffusion behavior in nickel under self-ion irradiation	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	8	79			Chen, Xiao-Ya; Wen, A-Li; Ren, Cui-Lan
251	Core and blanket thermal-hydraulic analysis of a molten salt fast reactor based on coupling of OpenMC and OpenFOAM	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	9	85			Deng, Bin; Cui, Yong; Chen, Jin-Gen
252	Stability study of Disperse Blue 79 under ionizing radiation	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	2	21			Ding, Xiao-Jun; Yu, Ming; Zheng, Xin Fan, Hui-Qing;
253	Numerical simulation of stress behavior of dowel-brick structures in TMSR	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	5	51			Huang, Chao-Chao; Wang, Xiao
254	Effect of Cl-37 enrichment on neutrons in a molten chloride salt fast reactor	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	3	27			He, Liao-Yuan; Li, Guang-Chao; Xia, Shao-Peng
255	Th-U cycle performance analysis based on molten chloride salt and molten fluoride salt fast reactors	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	8	83			He, Liao-Yuan; Xia, Shao-Peng; Zhou, Xue-Mei
256	Ion-beam-assisted characterization of quinoline-insoluble particles in nuclear graphite	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	10	98			Huang, Qing; Han, Xin-Qing; Liu, Peng
257	Numerical and experimental investigation of a new conceptual fluoride salt freeze valve for thorium-based molten salt reactor	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	2	16			Jiang, Xin-Yue; Lu, Hui-Ju; Chen, Yu-Shuang
258	Feasibility of an innovative long-life molten chloride-cooled reactor	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	4	33			Lin, Ming; Cheng, Mao-Song; Dai, Zhi-Min
259	Electroplating titanium film on 316L stainless steel in LiCl-KCl-Tix+ (2 < x < 3) molten salts	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	5			10.1007 /s41365 -020-00 754-1		Liu, Jun-Xia; Liu, Jing-Chun; Long, De-Wu
260	Multi-port cavity model and low-level RF systems design for VHF gun	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	1	8			Liu, Kui; Li, Lin; Wang, Cheng
261	Transmutation of I-129 in a single-fluid double-zone thorium molten salt reactor	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	1	10			Ma, Kun-Feng; Yu, Cheng-Gang; Cai, Xiang-Zhou
262	Frequency sensitivity of the passive third harmonic superconducting cavity for SSRF	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE AND	31	3	31			Pu, Xiao-Yun; Hou, Hong-Tao; Wang, Yan

263	Physical design and multi-particle simulations of a compact IH-DTL with KONUS beam dynamics for proton therapy	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	7	64	Qiao, Jian; Xie, Xiu-Cui; Li, De-Ming
264	Methodology development and application of X-ray imaging beamline at SSRF	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	10	102	Xie, Hong-Lan; Deng, Biao; Du, Guo-Hao
265	Preliminary neutron study of a thorium-based molten salt energy amplifier	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	4	41	Yang, Pu; Lin, Zuo-Kang; Wan, Wei-shi
266	Investigation of the symmetry energy of nuclear matter using isospin-dependent quantum molecular dynamics	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	6	61	Yu, Hao; Fang, De-Qing; Ma, Yu-Gang
267	Preliminary analysis of fuel cycle performance for a small modular heavy water-moderated thorium molten salt reactor	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	11	108	Zhang, Ya-Peng; Ma, Yu-Wen; Wu, Jian-Hui
268	Primary yields of protons measured using CR-39 in laser-induced deuteron-deuteron fusion reactions	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	6	62	Zhang, Yue; Liu, Long-Xiang; Wang, Hong-Wei
269	RF design optimization for the SHINE 3.9 GHz cavity	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	7	73	Zhang, Yu-Xin; Chen, Jin-Fang; Wang, Dong
270	Effects of N-1 substituent on the phototoxicity of fluoroquinolone antibiotics: comparison of pefloxacin and difloxacin	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	7	66	Zhao, Jian-Feng; Liu, Yan-Cheng; Xu, Yu-Lie
271	Study on dynamic characteristics of fission products in 2 MW molten salt reactor	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	2	17	Zhou, Bo; Yu, Xiao-Han; Zou, Yang
272	Effect of source size and emission time on the p-p momentum correlation function in the two-proton emission process	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	5	52	Zhou, Long; Fang, De-Qing;
273	Molecular rotation-caused autocorrelation behaviors of thermal noise in water	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	6	53	Guo, Yu-Wei; Qin, Jing-Yu; Hu, Jian-Hua
274	Collection efficiency of a monitor parallel plate ionization chamber for pencil beam scanning proton therapy	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	2	13	Han, Rong-Cheng; Li, Yong-Jiang; Pu, Yue-Hu
275	Design of a 162.5 MHz continuous-wave normal-conducting radiofrequency electron gun	NUCLEAR TECHNIQUES	SCIENCE	AND	31	11	110	Wang, Cheng; Zhu, Zi-Han; Jiang, Zeng-Gong

276	Corrosion behaviors of the UNS N10003 alloy in Fenton's reagent	MATERIALS CORROSION-WERKSTOFFE UND KORROSION	AND	71	7	1113	Zhou, Yuying; Yin, Huiqin; Wang, Xueliang
277	Dynamic analysis for a 2 MW liquid-fueled molten salt reactor	PROGRESS IN ENERGY	NUCLEAR	126		103381	Cui, Y.; Cui, L.; Xia, S. P.
278	Evaluation of Mo-99 production in a small modular thorium based molten salt reactor	PROGRESS IN ENERGY	NUCLEAR	124		103337	Kang, Xuzhong; Zhu, Guifeng; Yan, Rui
279	Sensitivity/uncertainty comparison and similarity analysis between TMSR-LF1 and MSR models	PROGRESS IN ENERGY	NUCLEAR	122		103289	Liu, Yafen; Yan, Rui; Zou, Yang
280	Influence of Li-7 enrichment on Th-U fuel breeding performance for molten salt reactors under different neutron spectra	PROGRESS IN ENERGY	NUCLEAR	120		103213	Zhou, Jun; Chen, Jingen; Wu, Jianhui
281	The magnet sorting of APTRON	REVIEW OF INSTRUMENTS	SCIENTIFIC	91	1	14711	Xie, Xiucui; Zhang, Manzhou; Qiao, Jian
282	Experimental study on the vibration behavior of the pebble bed in PB-FHR	ANNALS OF ENERGY	NUCLEAR	139		107193	Chen, Xingwei; Dai, Ye; Yan, Rui
283	Radiotoxicity of minor actinides in thermal, epithermal and fast TMSRs with very high burnup	ANNALS OF ENERGY	NUCLEAR	137		107162	Zhang, Ao; Zou, Chunyan; Wu, Jianhui
284	Transition to thorium fuel cycle in a small modular molten salt reactor based on a batch reprocessing mode	ANNALS OF ENERGY	NUCLEAR	138		107163	Zou, Chunyan; Yu, Chenggang; Wu, Jianhui
285	Fracture resistance of imperfect filler particles within nuclear graphite during irradiation	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM INTERACTIONS WITH MATERIALS AND ATOMS		464		123	Huang, Qing; Lei, Qiantao; Tang, Hui
286	Supply of I-131 in a 2 MW molten salt reactor with different production methods	APPLIED RADIATION AND ISOTOPE		166		109350	Yu, Chenggang; Wang, Xiaohu; Wu, Chen
287	Sustainable supply of Mo-99 source in a 2 MW molten salt reactor using low-enriched uranium	APPLIED RADIATION AND ISOTOPE		160		109134	Yu, Chenggang; Zou, Chunyan; Wu, Chen
288	Angular stability measurement of a cryocooled double-crystal monochromator at SSRF	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT		983		164636	Fan, Yichen; Qin, Hongliang; Zhu, Wanqian
289	Bunch-by-bunch phase study of the	NUCLEAR INSTRUMENTS &		955		163273	Zhou, Yimei;

	transient state during injection	METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT				Chen, Zhichu; Gao, Bo
290	Discontinuous transition between Zundel and Eigen for H5O2+*	CHINESE PHYSICS B	29	8	83101	Wang, Endong; Zhu, Beien; Gao, Yi
291	Th-U Breeding Performances in an Optimized Molten Chloride Salt Fast Reactor	NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING				He Liaoyuan; Xia Shaopeng; Chen Jingen
292	Solving Burnup Equations by Numerical Inversion of the Laplace Transform Using Pade Rational Approximation	NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING	194	12	1143	Xia, Shaopeng; Cheng, Maosong; Dai, Zhimin
293	Study on the adsorption behavior of UF(6)and MoF(6)on the NaF adsorbents	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	326	1	603	Cui, Rongrong; Cheng, Zhiqiang; Dou, Qiang
294	Removal of entrained organic phase from raffinate in spent fuel reprocessing with graphene-based composites	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	323	3	1157	Geng, Yiyun; Li, Zheng; Zhao, Haogui
295	Radiolabeling and biological evaluation of I-125-Necitumumab for EGFR-targeted SPECT imaging	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	323	1	83	Lu, Xinmiao; Li, Xiao; Peng, Ye
296	The distillation behavior of fluorides in LiCl-KCl molten salt	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	324	3	1365	Luo, Yan; Yang, Tianhong; Geng, Junxia
297	Influence of silica fume on radioactive fluoride concentrate liquid waste solidified by magnesium potassium phosphate cement	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	324	3	1013	Qian Zheng-hua; Yu Bo-wen; Zhou Shun
298	Distribution of Cs-137 in different soil particle sizes in the vicinity of the Qianshan nuclear power plant	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY	326	3	1663	Wang, Wei; Liu, Wei; Zhang, Qin
299	Peptides Co-Assembling into Hydrangea-Like Microstructures	JOURNAL OF NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY	20	5	3239	Guo, Zhen; Shen, Zhiwei; Wang, Yujiao
300	A New Approach for Residual Stress Analysis of GH3535 Alloy by Using Two-Dimensional Synchrotron X-Ray Diffraction	CHINESE PHYSICS LETTERS	37	7	70701	Jiang, Sheng; Zhang, Ji-Chao; Yan, Shuai
301	Controlling the Coffee Ring Effect on Graphene and Polymer by Cations	CHINESE PHYSICS LETTERS	37	2	28103	Yang, Haijun; Yang, Yizhou; Sheng, Shiqi
302	Unexpectedly Strong Diamagnetism of	CHINESE PHYSICS LETTERS	37	8	87504	Yang, Haijun;

	Self-Assembled Aromatic Peptides						Wang, Zixin; Mu, Liuhua
303	Determination of Tensile Strength by Modified Brazilian Disc Method for Nuclear Graphite	EXPERIMENTAL TECHNIQUES	44	4	475		Zhang, Can; Yuan, Yuan; He, Zhoutong
304	Diffusion Characterization of Hydrogen Isotopes in Hastelloy N Alloy for the Application of Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactors (FHRs)	FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY	76	4	543		Zhang, Dongxun; Liu, Wei; Liu, Wenguan
305	A lysosome specific ratiometric fluorescent probe for detection of bisulfite ion based on hybrid coumarin-benzimidazolium compounds	PHOSPHORUS SULFUR AND SILICON AND THE RELATED ELEMENTS					Zhao, Jiangdong; Huang, Liliang; Yan, Meiling
306	MICROSTRUCTURAL DAMAGE CHARACTERISTIC OF A LAYER-TO-LAYER THREE-DIMENSIONAL ANGLE-INTERLOCK WOVEN COMPOSITE UNDER QUASI-STATIC TENSILE LOADING	AUTEX RESEARCH JOURNAL	20	2	121		Ma, Qian; Wang, Ke; Wang, Shu-Dong
307	Experimental and Simulation Analysis of Hydrogen Permeation Performance of Pd/Ag Permeator Used for Tritium Processing	NUCLEAR TECHNOLOGY	206	3	458		Huang, Yu; Lu, Gaofeng; Zeng, Youshi
308	Preparation of Filtration Membrane by Grafting of Poly(N-vinylpyrrolidone) onto Polyethersulfone and Its Influence on Pollution Resistance of Membrane	POLYMER SCIENCE SERIES B	62	5	550		Fan, Kai; Liu, Enmei; Zhou, Guoqing
309	Numerical Simulation of Nanohardness in Hastelloy N Alloy After Xenon Ion Irradiation	ACTA METALLURGICA SINICA	56	5	753		Liu Jizhao; Huang Hefei; Zhu Zhenbo
310	Broadband Terahertz Spectroscopy of Glutathione	CHINESE JOURNAL OF ANALYTICAL CHEMISTRY	48	10	1367		Guo Gong; Zhu Zhong-Jie; Shen Jian-Xiong Wang
311	Theoretical Studies on the Modulation of the Electronic Property of Ti <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> by Electric Field, Strain and Charge States	JOURNAL OF INORGANIC MATERIALS	35	1	73		Chang-Ying; Lu Yu-Chang; Ren Cui-Lan
312	Construction of Controllable Lipid-DNA Complex for Study in Membrane Biology	CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES-CHINESE	41	6	1151		Zhang Luhao; Cao Shuting; Liu Jiangbo
313	Study of the Properties of ZrCo <sub>0.8</sub> M <sub>0.2</sub> (M=Co, Cu, Cr, Mn, Al) Alloys for Tritium Storage	RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING	49	8	2658		Lv Lijun; Cheng Honghui; Qian Yuan

314	Effect of Shot Peening on Isothermal Oxidation Behavior of GH3535 Alloy at 900 degrees C	RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING	49	10	3519	Wang Songlin; Zhang Jixiang; Lu Yanling
315	Micro X-Ray Fluorescence Imaging Based on Ellipsoidal Single-Bounce Mono-Capillary	SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS	40	7	2011	Tao Fen; Feng Bing-gang; Deng Biao
316	Cooling Design for the Magnetic Structure of SHINE Superconducting Undulator	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	30	4		Tang, Qisheng; Zhou, Qiaogen; Zhang, Jingmin
317	Interfacial engineering and film-forming mechanism of perovskite films revealed by synchrotron-based GIXRD at SSRF for high-performance solar cells	MATERIALS TODAY ADVANCES	6		100068	Yang, Y.; Yang, L.; Feng, S.
318	Decay behavior and stability of free radicals of silk fibroin with alkali/urea pretreatment induced by electron beam irradiation	Polymer Degradation and Stability	181			Zhang, Hao; Tian, Feng; Lin, Haitao
319	Comparison between SCALE 6.1 Built-in Library and CENDL-TMSR-V1 Library with Sensitivity Analysis	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	54	8	1453	Hu, Jifeng; Wang, Xiaohe; Zou, Chunyan
320	Unexpected effect of hydroxyl radical on tellurium corrosion of the Ni - Mo - Cr - Nb based alloy	Corrosion Science	173			Jiang, Li; Wang, Wei; Ye, Xiang-Xi
321	Tuning the interfaces of Co - Co <sub>2</sub> C with sodium and its relation to the higher alcohol production in Fischer - Tropsch synthesis	Journal of Materials Science	55	21	9037	Liu, Yang; He, Shun; Yang, Ruouo
322	Influence of <sup>7</sup> Li enrichment on Th-U fuel breeding performance for molten salt reactors under different neutron spectra	Progress in Nuclear Energy	120			Zhou, Jun; Chen, Jingen; Wu, Jianhui
323	Sustainable supply of <sup>99</sup> Mo source in a 2 MW molten salt reactor using low-enriched uranium	Applied Radiation and Isotopes	160			Yu, Chenggang; Zou, Chunyan; Wu, Chen
324	Effects of cobalt carbide on Fischer - Tropsch synthesis with MnO supported Co-based catalysts	Journal of Energy Chemistry	42		227	Sun, Fanfei; Yang, R.; Xia, Zhaoming
325	Synthesis of hierarchical interconnected graphene oxide for enhanced oxygen reduction	Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects				Liu, Ze; Liu, Hongdong; Du, Hongfang
326	Algorithm to Reconstruct Ultra-Fast X-Ray Pulse Based on Terahertz Modulation	Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica	40	6		Li, Chengming; Li, Bin;
327	Polarization Control of Shanghai Soft X-Ray Free-Electron Laser Facility	Zhongguo Jiguang/Chinese Journal of Lasers	47	5		Gao, Zhangfeng; Deng, Haixiao;

						Liu, Bo
328	The synthesis of 3D graphene/Au composites via $\gamma$ -ray irradiation and their use for catalytic reduction of 4-nitrophenol	Nanotechnology	31	23		Lu, Manli; Li, Jihao; Song, Sanzhao
329	Influence of diffuser grain size on the speckle tracking technique Tian Naxi	Journal of Synchrotron Radiation	27		146	Tian, Naxi; Jiang, Hui; Li, Aiguo
330	In situ GISAXS study on the temperature-dependent performance of multilayer monochromators from the liquid nitrogen cooling temperature to 600 ° C	Applied Surface Science		508		Jiang, Hui; Hua, Wenqiang; Tian, Naxi
331	Corrigendum to "Defects evolution and hardening in the Hastelloy N alloy by subsequent Xe and He ions irradiation" [J. Nucl. Mater. 517 (2019) 328 - 336] (Journal of Nuclear Materials (2019) 517 (328 - 336), (S0022311519300340), (10.1016/j.jnucmat.2019.02.022))	Journal of Nuclear Materials		538		Liu, Jizhao; Huang, Hefei; Gao, Jie
332	Integrating terahertz metamaterial and water nanodroplets for ultrasensitive detection of amyloid $\beta$ aggregates in liquids	Sensors and Actuators, B: Chemical				Tang, Chao; Yang, Jing; Wang, Yadi
333	Cavity design of a 7MeV 325MHz proton APF IH-DTL for a compact injector	Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, LINAC 2018			163	Li, X.; Pu, Y.H.; Xie, X.C.
334	Neutronics Performance of Molten Salt Spallation Target in ADS	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	54	5	796	Yang, Pu; Lin, Zuokang; Wan, Weishi
335	Solubility and precipitation investigations of UO <sub>2</sub> in LiF - BeF <sub>2</sub> molten salt	Journal of Nuclear Materials		531		Peng, Hao; Huang, Wei; Xie, Leidong
336	In Situ Formation of Hierarchical Bismuth Nanodots/Graphene Nanoarchitectures for Ultrahigh-Rate and Durable Potassium-Ion Storage	Small	16	2		Zhao, Yuanxin; Ren, Xiaochuan; Xing, Zhenjiang
337	Fabrication of ultralight 3D graphene/Pt aerogel via in situ gamma-ray irradiation and its application for the catalytic degradation of methyl orange	Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures	28	5	425	Lu, Manli; Li, Jihao; Li, Linfan
338	Facile renewable synthesis of nitrogen/oxygen co-doped graphene-like carbon nanocages as general lithium-ion and potassium-ion batteries anode	Carbon		167	685	Sun, Yuanhe; Zhu, Daming; Liang, Zhaofeng

339	Design and Test Study on a High Temperature Molten Salt Loop	Hedongli Gongcheng/Nuclear Power Engineering	41	5	127	Kong, Xiangbo; Wang, Naxiu; Lin, Liangcheng
340	LaOx(OH)y supported platinum catalysts for CO oxidation: Deactivation by formation of lanthanum carbonate	Journal of Rare Earths				Jiang, Luozhen; Chen, Junxiang; Si, Rui
341	Rheology, polymorphic crystal transformation, thermal, and mechanical properties of long-chain branched isotactic poly(1-butene)	Journal of Applied Polymer Science	137	9		Maimaitiming, Aizezi; Wu, Guozhong; Tan, Hairong
342	Evaluation of 99Mo production in a small modular thorium based molten salt reactor	Progress in Nuclear Energy			124	Kang, Xuzhong; Zhu, Guifeng; Yan, Rui
343	Phase analysis for partially coherent light propagating through an optimized aperture in a synchrotron beamline	Journal of Synchrotron Radiation	27		1485	Ren, Junchao; Meng, Xiangyu; Wang, Yong
344	Analysis of Physical Design for AB-BNCT Neutron Target	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	54	5	804	Lin, Zuokang; Yang, Pu; Zhao, Qiankun
345	Evolutionary many-objective optimization algorithm for large-bandwidth free-electron-laser generation	Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, LINAC 2018			121	Yan, J.W.; Deng, H.X.;
346	Calculation and Analysis of Heat Source in Pebble Bed Fluoride Salt Cooled Test Reactor	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	54	3	450	Yang, Pu; Yan, Rui; Zou, Yang
347	High-accuracy in-situ detection method of monochromator angular vibration	Chinese Optics	13	1	156	Fan, Yi-Chen; Li, Zhong-Liang; Xu, Zhong-Min
348	Assessment of effects of Mg treatment on corrosivity of molten NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> salt with Raman and Infrared spectra	Corrosion Science			164	Sun, Hua; Wang, Jian-Qiang; Tang, Zhongfeng
349	Ni, Cr, and Fe surfaces corroded by molten ZnCl <sub>2</sub>	Materials and Corrosion	71	6	931	Wang, Xueliang; Yin, Huiqin; Liu, Wenguan
350	Thermal transport and storage performances of NaCl - KCl - NaF eutectic salt for high temperatures latent heat	Solar Energy Materials and Solar Cells			218	Wang, Yang; Li, Xiang; Li, Na
351	Irradiation accelerated fluoride molten salt corrosion of nickel-based UNS N10003 alloy revealed by X-ray absorption ne structure	Corrosion Science			165	Lei, Guanhong; Li, Cheng; Jiang, Zheng
352	Unrevealing the thermophysical properties and microstructural evolution of MgCl <sub>2</sub> -	Solar Energy Materials and Solar Cells			210	Li, Xuejiao; Li, Na; Liu, Weihua

	NaCl - KCl eutectic: FPMD simulations and experimental measurements						
353	The Development of TMSR-SF0 Simulation Protection System	Lecture Notes in Electrical Engineering	595				Huang, Guo-Qing; Hou, Jie; Liu, Ye
354	The 7 MeV APF DTL for proton therapy	Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, LINAC 2018			112		Xie, Xiucui; Pu, Yuehu; Qiao, Jian
355	Synchrotron Radiation Infrared Three-Dimensional Microspectroscopy Based on Point Scanning Method	Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica	40	3			Lin, Yuecheng; Tong, Yajun; Ji, Te
356	Experimental research on photon-stimulated desorption from CuCrZr	Vacuum			171		Chen, Ming; Xue, Song; Li, Zhongliang
357	Hydrogen absorption behavior of non-stoichiometric Zr <sub>7-x</sub> Ti <sub>x</sub> V <sub>5</sub> Fe (x = 0, 0.3, 0.9, 1.5 and 2.1) alloys	International Journal of Hydrogen Energy	45	41	21625		Han, Xingbo; Yan, Pan; Zhang, Dongxun
358	Upgrade of Machine Protection System in Shanghai Synchrotron Radiation Facility Storage Ring	Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology	54	3	571		Yu, Chunlei; Chen, Jianfeng; Zhang, Ying
359	Impact of Multiple Beams on Plan Quality, Linear Energy Transfer Distribution, and Plan Robustness of Intensity Modulated Proton Therapy for Lung Cancer	ACS Sensors					Shang, Haijiao; Pu, Yuehu; Chen, Zhiling
360	等离子体纳米探针在细胞成像中的应用	核技术	43	9			刘文晗; 谢晓冬; 殷敏
361	快扫描磁铁电源的输出电流平滑过零研究	核技术	43	9			卢焕婷; 李瑞; 王川云
362	硝酸盐自然循环试验回路实验研究	核技术	43	9			张博; 徐博; 周翀
363	紧急停堆棒落棒时间对熔盐堆反应性引入瞬态的影响	核技术	43	9			王凯; 焦小伟; 杨群
364	小型模块化增殖焚烧快堆 MA 嬗变性能分析	核技术	43	9			马玉雯; 陈金根; 余呈刚
365	储氚合金 ZrCo <sub>0.8</sub> M <sub>0.2</sub> (M=Co, Cu, Cr, Mn, Al)的性能研究	稀有金属材料与工程	49	8	2658		吕丽君; 程宏辉; 钱渊
366	等能量层重扫描技术在肺癌质子调强治疗中对相互影响效应的改善	中华放射肿瘤学杂志	29	9	772		商海焦; 蒲越虎; 刘晨彬
367	基于单毛细管椭球镜的微束 X 射线荧光成像	光谱学与光谱分析	40	7	2011		陶芬; 丰丙刚; 邓彪
368	电感耦合等离子体发射光谱法测定铍盐中痕量硼	分析实验室	39	8	910		唐晓星; 马继飞; 刘忠英
369	基于灵敏度对比分析 SCALE 6.1 自带库	原子能科学技术	54	8	1453		胡继峰; 王小鹤;

	与 CENDL-TMSR-V1 数据库					邹春燕
370	基于点扫描的同步辐射红外三维谱学显微研究	光学学报	40	3		林乐诚; 佟亚军; 吉特
371	熔盐快堆 U-Pu 燃料循环增殖性能分析	核技术	43	8		李冬国; 周雪梅; 刘桂民
372	脉冲高度权重技术测量 <sup>197</sup> Au 中子俘获截面	核技术	43	8		李鑫祥; 刘龙祥; 蒋伟
373	交联固化对碳化硅纤维耐热性能的影响	辐射研究与辐射工艺学报	38	4		张文礼; 李诚; 刘伟华
374	LiF-BeF <sub>2</sub> 熔盐微观结构及扩散特性的分子动力学研究	化工学报	71	8	3565	贺国达; 汤睿; 段学志
375	负离子光电子能谱技术发展及应用	化学通报	83	1	3	王永天; 韩昌财; 刘洪涛
376	激光康普顿散射产生带轨道角动量的 X 射线方案研究	核技术	43	7		耿和平; 武海龙; 陈建辉
377	Physical design and multi-particle simulations of a compact IHDTL with KONUS beam dynamics for proton therapy	核技术	31	7		Qiao Jian; Xie Xiucui; Li Deming
378	Effects of N-1 substituent on the phototoxicity of fluoroquinolone antibiotics: comparison of pefloxacin and difloxacin	核技术	31	7		Zhao Jianfeng; Liu Yancheng; Xu Yulie
379	基于 DNA 纳米结构的分子间相互作用研究	高分子学报	51	7	728	李浩; 郝亚亚; 王飞
380	储存环逐束团相位测量系统信号处理算法优化	强激光与粒子束	32	7		周逸媚; 冷用斌; 许兴懿
381	计划靶体积概念是否适合肺癌质子调强治疗计划	中华放射肿瘤学杂志	29	7	540	商海焦; 蒲越虎; 陈志凌
382	Technical commissioning of the spot scanning system in Shanghai Proton Therapy Facility	辐射探测技术与方法	4	1	46	Liu Ming; Zhang Haiyang; Shu Hang
383	脂质修饰 DNA 复合结构的可控制备及膜生物学研究	高等学校化学学报	41	6	1151	张露灏; 曹书婷; 刘江波
384	上海软 X 射线自由电子激光装置的偏振控制	中国激光	47	5		高张峰; 邓海啸; 刘波
385	熔盐冷却球床实验堆堆内热源分布计算与分析	原子能科学技术	54	3	450	杨璞; 严睿; 邹 杨
386	上海光源储存环机器保护系统升级	原子能科学技术	54	3	571	于春蕾; 陈建锋; 张莹
387	ADS 熔盐散裂靶中子学性能研究	原子能科学技术	54	5	796	杨璞; 林作康; 万唯实
388	AB-BNCT 中子靶物理设计分析	原子能科学技术	54	5	804	林作康; 杨璞; 赵乾坤

389	APTR 质子同步加速器 RFQ 直线注入器的优化设计	强激光与粒子束	32	6		乔舰; 谢修瑾; 李德明
390	小型智能程控 SiPM 电源设计与验证	核技术	43	6		侯会良; 黄跃峰; 程懋松
391	面形误差对自由电子激光聚焦光斑影响的研究	核技术	43	6		张熙明; 郭智; 孟祥雨
392	同步辐射荧光分区域面扫描的控制和图像拼接方法	电子显微学报	39	1	40	兰旭颖; 张继超; 张丽丽
393	氙离子辐照后 Hastelloy N 合金的纳米硬度及其数值模拟	金属学报	56	5	753	刘继召; 黄鹤飞; 朱振博
394	火星熔盐堆堆芯概念设计	核技术	43	5		于世和; 孙强; 赵恒
395	小型模块化氟盐冷却高温堆可燃毒物布置方案	核技术	43	5		刘思佳; 朱贵凤; 严睿
396	基于 EPICS 和差分进化算法的同步辐射光束线智能调束系统	核技术	43	5		时英智; 高梅; 贾文红
397	固溶元素对二元镍基合金的微结构及其抗辐照性能的影响	核技术	43	5		曹明鹏; 付崇龙; 曹建清
398	熔盐快堆 Th-U 燃料循环增殖性能分析	核技术	43	5		李冬国; 刘桂民;
399	基于太赫兹调制的超快 X 射线脉冲长度复原方法	光学学报	40	6		李成名; 李宾;
400	熔盐体系中 UF <sub>4</sub> 的氟化挥发工艺技术	核化学与放射化学	42	2	78	孙理鑫; 程治强; 胡聪伟
401	FLiNaK-CrF <sub>3</sub> /CrF <sub>2</sub> 氧化还原缓冲熔盐体系对 316L 不锈钢耐蚀性能的影响	中国腐蚀与防护学报	40	2	182	秦越强; 左勇; 申淼
402	gamma 射线辐照合成石墨烯/银复合多孔气凝胶及其对硝基苯酚的催化性能	辐射研究与辐射工艺学报	38	2		鲁曼丽; 李吉豪; 李林繁
403	氟盐和氟盐快堆增殖特性研究	核技术	43	4		周雪梅; 李冬国; 何燎原
404	工作点反馈系统对同步辐射光源运行稳定性的提升	强激光与粒子束	32	4		Wu Xu; Tian Shunqiang; Zhang Qinglei
405	质子治疗装置动态电源控制系统研发	强激光与粒子束	32	4		李海荣; 蒋舸扬; 金林
406	Sr 掺杂钙钛矿体系中高活性氧析出反应机制	催化学报	41	4	592	Song Sanzhao; Zhou Jing; Sun Jian
407	SiO <sub>2</sub> 介导的 5 nm 金颗粒的高效富集及其催化活性研究	化学学报	78	2	170	李威; 冉铁成; 张瑜
408	细胞外囊泡成像方法最新研究进展	南方医科大学学报	40	2	279	王凯喆; 魏余辉; 张萍
409	VaspCZ: 一个提高效率的 VASP 计算辅助程序	核技术	43	3		张正德; 谈蒙露; 任翠兰
410	在线加钷模式下的熔盐堆钍铀燃料可持	核技术	43	3		郁长清; 朱贵凤;

	续性研究					夏少鹏
411	基于 PepS 的高温核一级管道蠕变疲劳分析方法研究	核技术	43	3		龚玮; 张小春; 王晓艳
412	单色器晶体角度微振动的高精度原位检测技术	中国光学	13	1	156	樊奕辰; 李中亮; 徐中民
413	Effect of $\sim(37)\text{Cl}$ enrichment on neutrons in a molten chloride salt fast reactor	核技术	31	3		He Liaoyuan; Li Guangchao; Xia Shaopeng
414	棉纤维辐射接枝纳米粒子的绿色印染新思路	辐射研究与辐射工艺学报	38	1		丁小军; 虞鸣; 王自强
415	马来酸酐接枝改性低密度聚乙烯的制备及其性能研究	辐射研究与辐射工艺学报	38	1		叶翠琴; 丁小军; 李林繁
416	4-氨基-1, 2, 4-三氮唑改性超高分子量聚乙烯纤维对 Au(III)的吸附机理	辐射研究与辐射工艺学报	38	1		梁育林; 魏向军; 庞利娟
417	LEU 启堆模式下的氯盐快堆 Th-U 与 U-Pu 循环特性研究	核技术	43	1		何燎原; 夏少鹏; 严睿
418	偕胺肟基超高分子量聚乙烯纤维对含氟含铀溶液中铀的吸附性能研究	核技术	43	2		冯鑫鑫; 邱龙; 张明星
419	非相干光点扩散函数的重建及其在同步辐射成像系统中的应用	核技术	43	1		夏慧娟; 吴衍青; 张磊
420	Synchrotron radiation-based materials characterization techniques shed light on molten salt reactor alloys	核技术	31	1		Jiang Li; Ye Xiangxi; Wang Dejun
421	Transmutation of $\sim(129)\text{I}$ in a single-fluid double-zone thorium molten salt reactor	核技术	31	1		Ma Kunfeng; Yu Chenggang; Cai Xiangzhou

## 2019-2020 年专利授权一览表

## Patents in 2019-2020

2019

No.	专利名称	申请号	申请日	授权日	类型	发明人
1	一种胺基增强石墨烯膜、氮掺杂石墨烯膜及其制备方法	201510111456.X	2015/3/13	2019/8/13	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 张阔 贾娜
2	一种胺基增强石墨烯膜、氮掺杂石墨烯膜及其制备方法	201510109892.3	2015/3/13	2019/5/24	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 张阔 贾娜
3	一种胺基增强石墨烯纤维及其制备方法	201510111458.9	2015/3/13	2019/8/13	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 张阔 贾娜
4	一种石墨烯水凝胶、石墨烯气凝胶及其制备方法和应用	201510121541.4	2015/3/19	2019/10/1	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 张阔 贾娜
5	石墨烯-无机纳米颗粒复合水凝胶、气凝胶及其制备方法、应用	201510122453.6	2015/3/19	2019/11/22	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 张阔 贾娜
6	一种防水膜材料的制备方法、其产品及应用	201510170300.9	2015/4/10	2019/11/22	发明	李景焯 吴景霞 张伯武 岳兵 虞鸣 王自强
7	一种自清洁膜材料的制备方法、其产品及应用	201510170955.6	2015/4/10	2019/11/22	发明	李景焯 吴景霞 张伯武 岳兵 虞鸣 王自强
8	一种石墨烯-无机纳米颗粒复合膜及其制备方法	201510198730.1	2015/4/21	2019/6/14	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 张阔 贾娜
9	一种燃料元件、其制备方法及其用途	201510848589.5	2015/11/27	2019/10/18	发明	仲亚娟 林俊 姜海涛 朱智勇
10	一种用于同步辐射 X 射线衍射测试的联动系统	201610118890.5	2016/3/2	2019/5/21	发明	柳义 周平
11	一种闪烁体探测系统	201610118507.6	2016/3/2	2019/4/16	发明	吴衍青 于怀娜 陈媚 邵仁忠 赵俊 荣丽媛
12	一种单个抗体分子原子力显微镜成像的样品制备方法	201610213078.0	2016/4/7	2019/3/19	发明	周星飞 赵志杰 张萍 李宾 虞国凯 胡钧 郝长春 杨家香
13	一种防堵塞的超临界水氧化反应器	201610248208.4	2016/4/20	2019/4/16	发明	秦强 王帅 王红玉 马洪军 乔延波 何柳斌 刘学阳 钱正华
14	一种组件型熔盐堆	201610301006.1	2016/5/9	2019/5/7	发明	薛春 朱智勇 张海青 林俊
15	一种核设施周围大气中多形态氙的取样装置及测量方法	201610343045.8	2016/5/20	2019/3/29	发明	刘卫 秦来来 刘佳煜 邓珂 张钦 马兆伟 杨果 马玉华 杜林 包广粮 王广华 王玲 吕丽君
16	一种高吸热效率的硝酸熔盐及其制备方法与应用	201610361572.1	2016/5/26	2019/3/15	发明	刘舒婷 苏涛 刘洪涛 张鹏 安学会 唐晓星 王建强 谢雷

						东
17	一种玻璃炭制品的制备方法 及玻璃炭制品	201610561829.8	2016/7/18	2019/1/29	发明	张东生 夏汇浩 周兴泰 杨新梅 叶林凤 冯尚蕾
18	能灵活配置时钟频率的数字 低电平控制处理器	201610594207.5	2016/7/26	2019/4/2	发明	赵玉彬 郑湘 张志刚 徐凯 赵申杰 刘建飞 赵振堂
19	石墨烯-贵金属纳米颗粒复合 水、气凝胶及其制备方法、应 用	201510305992.3	2015/6/4	2019/11/12	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 张阔 贾娜
20	一种单气室固体氧化物燃料 电池组及应用	201510351357.9	2015/6/23	2019/1/1	发明	关成志 侯权 王建强 肖 国萍
21	一种 N-甲基胺类化合物的制 备方法	201510371772.0	2015/6/29	2019/2/26	发明	杜贤龙 关成志 王建强
22	密闭式蒸馏熔盐的方法及蒸 馏装置	201510427482.3	2015/7/20	2019/4/19	发明	杨洋 窦强 付海英 王子 豪 耿俊霞 李晴暖
23	一种四氟化铀的溶解方法	201510486616.9	2015/8/10	2019/5/7	发明	郑小北 刘玉峡 张岚  张岚 李铮 李瑞芬 刘春 霞 何淑华 赵皓贵 李晴 暖 于婷
24	一种钽和铀的分离回收方法	201510631309.5	2015/9/29	2019/8/13	发明	仲亚娟 林俊 姜海涛 朱 智勇
25	一种石墨材料、其原料组合 物、其制备方法及其用途	201510848610.1	2015/11/27	2019/2/26	发明	孙理鑫 牛永生 胡聪伟 窦强 李晴暖
26	一种氟化石墨的制备方法及 制备装置	201510947321.7	2015/12/16	2019/11/22	发明	方海平 吴明红 石国升 徐刚 陈亮
27	层间距可控的氧化石墨烯膜 及其制备方法、应用	201610575159.5	2016/7/20	2019/5/21	发明	朱燕燕 卢宋林 李瑞 王 东兴 胡志敏
28	电流传感器的线性度测试方 法	201610828246.7	2016/9/18	2019/1/25	发明	贺周同 曾建荣 田丰 唐 辉 戚威 汪雪 张灿 夏 汇浩
29	用于小角 X 射线散射实验的 原位装置	201610955590.2	2016/10/27	2019/1/18	发明	张岚 陈爱梅 刘玉侠 郑 小北
30	高温回转炉及含其的高温制 氢系统	201610848944.3	2016/9/23	2019/6/21	发明	何上明 李爱国 闫帅 高 兴宇
31	一种射线微探针的热台、热台 装置及其实验方法	201610888987.4	2016/10/11	2019/5/21	发明	左勇 汪洋 汤睿 赵素芳 苏兴治 侯娟 谢雷东
32	一种 FLiNaK 熔盐及其制备方 法、反应器和制备装置	201610892250.X	2016/10/12	2019/12/10	发明	陈兴伟 邹杨 曹云 余笑 寒 孙雪静
33	流体介质中球形元件的卸料 方法及其装置	201610966541.9	2016/10/28	2019/7/9	发明	张灿 贺周同 张东生 高 彦涛 唐辉 戚威 夏汇浩
34	熔盐环境理学性能测试装置、 系统及方法	201611071977.8	2016/11/29	2019/5/3	发明	

35	一种测量粒子加速器束团纵向相位方法	201610926066.2	2016/10/24	2019/3/19	发明	冷用斌 赖龙伟 张宁 阎映炳 陈之初
36	一种在谈及材料表面制备抗高温氧化符合涂层的方法	201611214490.0	2016/12/26	2019/5/17	发明	邱杰 刘华剑 俞国军 刘崎 夏汇浩 谢雷东 侯惠奇
37	一种在碳基材料表面制备 MoSi <sub>2</sub> 涂层的方法	201611214194.0	2016/12/26	2019/5/17	发明	邱杰 刘华剑 俞国军 刘崎 夏汇浩 谢雷东 侯惠奇
38	一种包覆燃料颗粒的压碎强度的测试方法	201611245256.4	2016/12/29	2019/6/14	发明	张峰 林俊 杨旭 李子威 朱智勇
39	一种空心陶瓷微球的制备方法	201611245248.X	2016/12/29	2019/7/30	发明	张峰 林俊 杨旭 王鹏 李子威 朱智勇
40	一种自动控制喷动床内颗粒喷动状态的装置和方法	201611246507.0	2016/12/29	2019/9/10	发明	张峰 林俊 杨旭 王鹏 李子威 朱智勇
41	一种用于肌氨酸的电化学检测方法	201611080806.1	2016/11/30	2019/3/29	发明	樊春海 左小磊 宋萍
42	一种用于同步辐射 X 光衍射面探测器的样品切光装置	201611192255.8	2016/12/21	2019/7/30	发明	柳义 文闻 阴广志 高兴宇
43	一种同步辐射 X 射线对面探测器的快速准直方法及系统	201611085622.4	2016/11/30	2019/11/26	发明	柳义 顾月良 高梅 阴广志 文闻 高兴宇
44	一种耐辐射和高热负载的 X 射线成像探测器	201710039152.6	2017/1/19	2019/1/1	发明	佟亚军 谢红兰 陈敏 杜国浩 邓彪 朱化春 肖体乔
45	一种二维长程面形检测装置及检测方法	201710198456.7	2017/3/29	2019/4/19	发明	罗红心 张翼飞 樊奕辰 金利民 李中亮 王劫
46	一种同步 X 射线可见的成像标签及其制备方法	201710228701.4	2017/4/10	2019/8/6	发明	樊春海 诸颖 孔华庭 张继超 夏凯 闫庆龙 王丽华 胡钧
47	含铬铁基高温合金的表面处理方法及含铬铁基高温合金件	201710355223.3	2017/5/19	2019/3/26	发明	刘崎 俞国军 韩晗 孙华 冷滨
48	一种电子束预辐射接枝改性芳纶纤维的方法	201710348605.3	2017/5/17	2019/11/22	发明	许璐 吴国忠 李晴暖
49	一种钽基碳化物和/或钽基碳氧化物的陶瓷微球的制备方法	201710316214.3	2017/5/8	2019/3/1	发明	严超 黄鹤 曹长青 林俊 朱智勇
50	一种氧化钽的陶瓷微球制备方法	201710316195.4	2017/5/8	2019/8/6	发明	严超 黄鹤 曹长青 林俊 朱智勇
51	一种非能动风门系统	201710586918.2	2017/7/18	2019/3/19	发明	蔡创雄 何兆忠 陈莹
52	一种四氟化钽中稀土元素含量的分析方法	201710607855.4	2017/7/24	2019/8/27	发明	李晓云 韩玲 曹长青 林俊
53	一种去除熔盐中气态氙及其同位素的装置及方法	201710859393.5	2017/9/21	2019/10/1	发明	刘卫 黄豫 王广华 杨果 马兆伟 张宁 韩兴博 钱楠 曾友石

54	一种高分辨率自动束流探测装置及方法	201710860663.4	2017/9/21	2019/10/15	发明	舒航 张娟 殷重先 谷鸣 沈立人 刘鸣 苗春晖 赵斌请
55	一种高温氟盐蒸汽抑制模拟试验装置	201710947290.4	2017/10/12	2019/4/16	发明	林良程 李玉兰 马继飞 侯惠奇 傅远 姜鑫越 米丽娟
56	一种 SCARA 结构的放射治疗用机器人治疗床	201721574716.8	2017/11/22	2019/2/26	实用新型	唐琳 周伟民 惠志梅 蒋志强
57	一种一体化小型熔盐堆	201711137574.3	2017/11/16	2019/10/1	发明	于世和 孙强 邹杨 严瑞 周翀 赵恒
58	热泵式储能供电供热方法及装置	201711402735.7	2017/12/22	2019/1/1	发明	沈佳杰 邹杨 戴叶 阮见
59	一种新型水溶液电镀镍合金的方法	201711404956.8	2017/12/22	2019/11/12	发明	宋昱龙 刘玉侠 张岚
60	一种制备熔盐反应堆燃料盐的装置和方法	201711276155.8	2017/12/6	2019/10/1	发明	曹长青 孙理鑫 窦强 胡聪伟 黄卫 牛永生 王鹏 周金豪 林俊 李晴暖
61	一种三氟化铀的电沉积方法	201711445518.6	2017/12/27	2019/9/3	发明	王鹏 郑海洋 余长峰 黄卫 曹长青 林俊
62	一种用于质子治疗仪旋转机架的旋转地板	201820066360.5	2018/1/16	2019/2/15	实用新型	吴军 杜涵文 李德明 张昕 潘家珍 董鹏程
63	一种熔盐堆中的核材料的模拟方法	201810046002.2	2018/1/17	2019/12/17	发明	刘卫 潘太军 朱海云 吴胜伟 王广华 韩兴博 曾友石
64	一种用于质子治疗的紧凑型旋转机架	201820123753.5	2018/1/25	2019/2/15	实用新型	张满洲 陈沅 方守贤 李德明 赵振堂 杜涵文 吴军 殷重先
65	非能动单罐储热供暖系统	201810128446.0	2018/2/8	2019/12/20	发明	李启明 邹杨 袁晓凤 李明海 周翀 王建强 曹云
66	热泵式交替储能供电方法及装置	201810180017.8	2018/3/5	2019/6/28	发明	沈佳杰 邹杨 戴叶 阮见
67	一种高温热电偶套管结构	201810220781.3	2018/3/16	2019/12/13	发明	蔡创雄 黄岳峰 张亚朋 吴燕华 杨群 何兆忠 陈莹
68	固体串联型热泵式循环储能方法及装置	201810258652.3	2018/3/27	2019/10/15	发明	沈佳杰 邹杨 戴叶 袁晓凤
69	一种钽基熔盐增值堆堆芯	201810146204.4	2018/2/12	2019/7/30	发明	刘亚芬 伍建辉 严睿 邹杨 陈金根
70	一种熔盐堆上腔室	201810147093.9	2018/2/12	2019/9/20	发明	朱贵凤 邹杨 康旭忠 邹春燕 严睿 张金红 周波
71	熔盐堆装卸料系统	201810246586.8	2018/3/23	2019/12/3	发明	冀锐敏 严睿 邹杨 于世和 李明海 周波
72	一种熔盐堆堆芯	201810146205.9	2018/2/12	2019/10/15	发明	朱贵凤 邹杨 康旭忠 戴叶 周波 严睿 邹春燕
73	一种换热-储热装置	201820609541.8	2018/4/26	2019/1/29	实用新型	殷子彦 邹杨 戴叶 沈佳杰 袁晓凤 陈兴伟 谢雷东

74	重水慢化熔盐堆堆芯及重水慢化熔盐堆系统	201820911239.8	2018/6/13	2019/1/25	实用新型	伍建辉 陈金根 马玉雯 邹春燕 余呈刚
75	用于熔盐堆的非能动余热排出系统	201820945792.3	2018/6/19	2019/1/1	实用新型	傅瑶 袁晓凤 周翀 邹杨
76	一种熔盐堆液态燃料的制备装置及其制备方法	201810842253.1	2018/7/27	2019/12/20	发明	宋昱龙 孙斌 左勇 汪洋 王建强 谢雷东
77	一种光子光闸装置	201821448608.0	2018/9/5	2019/4/16	实用新型	贾丹丹 祝万钱 李勇军 张敏 薛松 吴帅
78	带原位蒸釜功能的软 X 射线光束线通量检测装置	201821648610.2	2018/10/11	2019/6/11	实用新型	邹鹰 王勇 郇仁忠
79	一种材料吸附性能综合测试装置	201821782200.7	2018/10/31	2019/5/21	实用新型	颜攀 刘卫 韩兴博 冷海燕 吴胜伟 钱渊 王广华
80	堆芯结构及熔盐球床堆	201822053577.5	2018/12/7	2019/10/15	实用新型	严睿 邹杨 于世和 杨璞 周波 冀锐敏 刘亚芬
81	一种光闸装置	201920063280.9	2019/1/15	2019/8/20	实用新型	贾丹丹 李勇军 陈家华 吴帅 祝万钱 张敏 薛松
82	太赫兹光谱测量样品架	201920112767.1	2019/1/23	2019/10/18	实用新型	朱中杰 赵红卫 张建兵
83	一种在线观测和调节 X 射线光束和样品的光学系统	201920324063.0	2019/3/14	2019/11/12	实用新型	滑文强 胡哲 王玉柱 谢红兰 李秀宏 边风刚 王劼
84	Ni-Nb 二元合金在抗碲腐蚀中的应用	201811071936.8	2018/9/14	2019/9/20	发明	蒋力 李志军
85	一种改善 UNS N10003 合金抗碲腐蚀性能的方法	201811071923.0	2018/9/14	2019/11/22	发明	蒋力 李志军
86	耐熔盐腐蚀镍基高温合金短环链热处理方法	201811373134.2	2018/11/19	2019/10/11	发明	玉昆 李志军 黎超文 梁建平 蒋力 王晚霞 李肖科 陈双建 叶祥熙
87	一种复合涂层结构的制备方法以及由此得到的复合涂层结构	201910250464.0	2019/3/29	2019/12/10	发明	薛万东 杨新梅 陆燕玲 周兴泰
88	一种脉冲调制器	201920641363.1	2019/5/7	2019/12/20	实用新型	刘永芳 谷鸣 吴勇华 袁启兵
89	一种能高精度地测量蛋白晶体数据的衍射仪	201611249140.8	2016/12/29	2019/2/12	发明	杨利峰 汪启胜 崔莹

2020

No.	专利名称	申请号	申请日	授权日	类型	发明人
1	基于参数筛选和定时查询的报警系统及方法	201310705582.9	2013/12/19	2020/3/27	发明	郭冰 陈永忠 张宁 孙雪静
2	一种 <sup>18</sup> F标记的多肽化合物及其制备方法和应用	201510053912.X	2015/2/2	2020/10/23	发明	张岚 贾丽娜
3	石墨烯-无机纳米颗粒复合纤维及其制备方法	201510109893.8	2015/3/13	2020/3/27	发明	李吉豪 李景烨 李林繁 张阔 贾娜
4	聚砷酸/聚丙烯腈复合离子交换剂及其制备方法和应用	201510142148.3	2015/3/27	2020/10/23	发明	张岚 马付银 李峥 史万龙
5	一种碳化硅陶瓷材料及其制备方法	201510486617.3	2015/8/10	2020/7/31	发明	王谋华 程勇 刘伟华 张文礼 张文发 李诚 吴国忠
6	一种铀的回收方法	201510631393.0	2015/9/29	2020/7/31	发明	张岚 李铮 李瑞芬 刘春霞 何淑华 赵皓贵 李晴暖 于婷
7	含钍氟化物熔盐和/或含铀氟化物熔盐及制备方法	201510740787.X	2015/11/4	2020/7/31	发明	王建东 张国欣 耿俊霞
8	电子束与辐射接枝改性 PET 薄膜的方法	201510929143.5	2015/12/14	2020/3/13	发明	许璐 吴国忠 胡江涛 王洪龙 李荣 邢哲
9	一种镍基合金的表面钝化处理方法	201510947322.1	2015/12/16	2020/7/23	发明	牛永生 孙理鑫 胡聪伟 窦强 李晴暖
10	包覆无机钛层的 UHMWPE 复合材料及其制备方法	201511028885.7	2015/12/31	2020/6/19	发明	胡江涛 吴国忠 王谋华 高乾宏 邢哲 许璐 李荣

11	一种超疏水/超亲油有机-无机杂化材料及其制备方法和应用	201511028979.4	2015/12/31	2020/10/30	发明	胡江涛 吴国忠 王谋华 高乾宏 邢哲 许璐 李荣
12	熔盐基碳纳米流体及其制备方法	201610018248.X	2016/1/12	2020/10/23	发明	汪洋 赵素芳 程进辉 谢雷东 李明广 张鹏 唐忠锋 左勇 王坤 费泽杰
13	一种润滑膜材料、原料组合、制备方法和应用	201610074712.7	2016/2/2	2020/3/27	发明	李景焯 吴景霞 张伯武 岳兵兵 虞鸣 王自强
14	一种熔盐热扩散处理设备及其应用	201610074177.5	2016/2/2	2020/3/27	发明	苏兴治 侯娟 俞国军 陈燕军 谢雷东 侯惠奇 王建强
15	超疏水/超亲油有机-无机杂化材料及其制备方法、应用	201610072367.3	2016/2/1	2020/12/8	发明	胡江涛 吴国忠 王谋华 高乾宏 许璐 邢哲 李荣
16	自动获取数据的系统	201610089234.7	2016/2/17	2020/3/20	发明	刘龙祥 王宏伟 韩建龙 张国强 蔡翔舟 陈金根
17	一种抗菌纤维及其制备方法	201611206940.1	2016/12/23	2020/7/31	发明	胡江涛 张明星   吴国忠 高乾宏 许璐邢哲李荣
18	一种并行 CT 采集系统	201710038819.0	2017/1/19	2020/2/7	发明	佟亚军 杜国浩 邓彪 王玉丹 陈敏 肖体乔
19	一种基于同步光源的 X-射线遗传标记及其制备方法以及应用	201710228597.9	2017/4/10	2020/1/3	发明	樊春海 诸颖 孔华庭 张继超 夏凯王丽华 胡钧
20	一种基于碳基材料的离子收集方法	201710365330.4	2017/5/22	2020/10/20	发明	方海平 闫隆 石国升 梁珊珊 王学良 方钢

---

21	一种惰性环境熔盐制备、转运的装置与方法	201710427682.8	2017/6/8	2020/12/11	发明	杨洋 付海英 耿俊霞 王子豪 窦强 李晴暖
22	导热油工质强迫循环综合实验回路系统	201710399622.X	2017/5/31	2020/3/27	发明	曲世祥 何兆忠 陈堃 吴燕华
23	一种快速测试 $\alpha$ 圆片上轴同位素组成的方法	201710607835.7	2017/7/24	2020/2/7	发明	崔荣荣 刘艳成 周伟 张岚 胡伟青 丛海霞 罗艳
24	一种磁性纳米材料介导的CRISPR/Cas9 T细胞内递送系统及其制备方法和应用	201710728571.0	2017/8/23	2020/5/8	发明	樊春海 诸颖 王丽华 夏凯 任宁 孔华庭
25	一种三维微纳米加工方法	201710725202.6	2017/8/22	2020/2/21	发明	汪颖 周玉莹 闫隆 胡钧
26	一种钽基混合氧化物陶瓷微球的制备方法	201711021039.1	2017/10/26	2020/2/7	发明	黄鹤 严超 曹长青 王鹏 林俊
27	一种超高温熔盐轴封泵	201711445520.3	2017/12/27	2020/7/31	发明	林良程 曹云 傅远 姜凯华 孔祥波 陈俊
28	用于质子治疗装置电源层扫描数据的快速容错传输系统	201810035945.5	2018/1/15	2020/2/21	发明	蒋舸扬 谭松清 陈建锋 李瑞
29	多孔石墨烯材料及其制备方法和应用	201810041218.X	2018/1/16	2020/3/27	发明	李吉豪 李景焯 李林繁 贾娜
30	蓄热储能发电系统	201810091475.4	2018/1/30	2020/3/27	发明	戴叶 邹杨 沈佳杰 袁晓凤 陈兴伟 贾国斌 李明海

---

31	一种片状表面结构的球状二 氧化钪纳米材料的制备方法 以及由此得到的球状二氧化 钪颗粒	201810130042.5	2018/2/8	2020/5/8	发明	崔荣荣 窦强 刘艳成 王晨 阳 程治强 李晴暖
32	一种小型模块化流动球床氟 盐冷却高温反应堆	201810089818.3	2018/1/30	2020/5/8	发明	戴叶 邹杨 徐博 朱贵凤 周 波 贾国斌 李文江
33	X 射线相干测量装置及测量 方法	201810172034.7	2018/3/1	2020/7/10	发明	黎斌 兰太和 张文艳 李卓 王月 冯冽 王兴涛 刘波 蒋 志强 陈家华 王东 李钦明 张未卿
34	一种原位光通量监测及曝光 剂量补偿方法	201810214561.X	2018/3/15	2020/4/17	发明	薛超凡 胡纯 刘平 吴衍青 王连升 杨淑敏 赵俊 郑丽 芳 邵仁忠
35	一种含氟放射性废液的固化 方法	201810294474.X	2018/3/30	2020/12/18	发明	钱正华 刘学阳 乔延波 夏晓彬 马洪军 王帅 秦强 施柳青 彭红花
36	一种熔盐堆生产 U-233 的方 法	201810146223.7	2018/2/12	2020/2/7	发明	邹春燕 邹杨 朱贵凤 康旭 忠 陈金根 严睿 谈蒙露
37	矩阵管理式固体温度分区储 能方法及装置	201810503712.3	2018/5/23	2020/5/15	发明	沈佳杰 邹杨 戴叶 袁晓凤
38	一种吸附铀酰离子的方法	201810409276.3	2018/5/2	2020/12/11	发明	马红娟 徐晓 李荣 澳浚轩 张岚 李晴暖 吴国忠
39	蓄热锅炉恒温恒量出风装置 及其出风方法	201810367059.2	2018/4/23	2020/3/27	发明	陈兴伟 邹杨 贾国斌 李明 海 戴叶 袁晓凤
40	LSM 块体材料的制备方法	201810368341.2	2018/4/23	2020/10/23	发明	张诗雨 彭程 关成志 肖国 萍 王建强
41	一种回收并电解 CO <sub>2</sub> 制备 CO 的方法及装置	201810368395.9	2018/4/23	2020/3/27	发明	关成志 肖国萍 王建强
42	一种固态盐加热熔融装置及 方法	201810390755.5	2018/4/27	2020/3/27	发明	周金豪 陈梓 孙波 窦强 黄 卫 龚昱 李晴暖

43	一种氧化还原缓冲熔盐体系的腐蚀测试方法	201810552303.2	2018/5/31	2020/7/31	发明	秦越强 左勇 申淼 王建强
44	一种固体氧化物电池用复合氧电极及其制备方法	201810646028.0	2018/6/21	2020/10/23	发明	关成志 彭程 肖国萍 王建强
45	一种池式熔盐堆及其运行方法	201810573062.X	2018/6/6	2020/3/27	发明	于世和 严睿 邹杨 冀锐敏 刘亚芬
46	一种同步加速器高频系统及其频率及腔压调控方法	201810653779.5	2018/6/22	2020/7/17	发明	张文志 赵玉彬 赵申杰 郑湘 徐凯 张志刚 常强 赵振堂
47	一种基于超连续激光器构建的多模式全光谱暗场显微镜及其应用	201810661599.1	2018/6/25	2020/7/17	发明	樊春海 王丽华 李嘉隽 刘磊
48	一种低频动态磁铁电源的输入功率控制系统及控制方法	201810843939.2	2018/7/27	2020/5/1	发明	谭松清 李瑞 郭春龙 李德明 石涛 赵永群 李晓鹏
49	一种用于熔盐堆尾气中多形态氟的去除装置和去除方法	201810870126.2	2018/8/2	2020/3/13	发明	刘卫 韩兴博 吴胜伟 钱渊 吴小玲 王广华 程宏辉 杨果 颜攀
50	带电粒子加速装置	201810988935.3	2018/8/28	2020/7/10	发明	何子锋 欧阳联华 杨永金 吴新时 张金玲 黄建鸣 郭洪雷 刘永好 王胜利 苏海军
51	一种高温熔盐电池	201811130177.8	2018/9/27	2020/11/13	发明	彭程 张诗雨 关成志 肖国萍 王建强
52	一种熔盐仿真堆堆舱负压排风装置	201811130398.5	2018/9/27	2020/10/27	发明	钱正华 乔延波 彭红花 蔡军 何柳斌
53	一种基于框架核酸编码的有机矿化结构的合成方法及应用	201811278726.6	2018/10/30	2020/9/25	发明	樊春海 颜灏 刘小果 靖薪 薪 张菲 王丽华
54	一种包覆燃料颗粒破损率的测试方法	201811223099.6	2018/10/19	2020/5/22	发明	张锋 林俊 杨旭 李子威 王鹏 朱智勇
55	一种燃料元件的制备方法	201811243467.3	2018/10/24	2020/5/8	发明	仲亚娟 林俊 王浩然 朱智勇
56	一种高带宽射频信号到达时间测量方法	201810941865.6	2018/8/7	2020/11/6	发明	汪金国 刘波
57	一种熔盐堆燃料重构的方法	201811307960.7	2018/11/5	2020/9/4	发明	王鹏 孙理鑫 曹长青 牛永生 胡聪伟 林俊 窦强 李晴

						暖
58	一种燃料颗粒的制备方法以及由此得到的核壳型燃料颗粒	201811487028.7	2018/12/6	2020/6/5	发明	王鹏 张锋 林俊 张海青 曹长青 严超 黄鹤 李子威 于小何
59	唑啉化合物、其制备方法和应用	201811445304.3	2018/11/29	2020/7/10	发明	贾丽娜 芦鑫淼 张岚
60	一种熔盐燃料多堆系统	201811494801.2	2018/12/7	2020/11/27	发明	于世和 邹杨 严睿 刘艳芬 杨璞
61	一种用于反应堆的燃料元件及其制备方法	201910092415.9	2019/1/30	2020/10/23	发明	仲亚娟 林俊 王浩然 朱智勇
62	用于高温反应堆的样品输送装置及输送方法	201910127804.0	2019/2/19	2020/11/27	发明	胡瑞荣 曹云 朱世峰 张丽娜
63	一种固体蓄热体	201910258579.4	2019/4/1	2020/10/20	发明	贾国斌、邹杨、戴叶、袁晓凤、陈兴伟、陈金根
64	一种熔盐堆停堆系统	201920473424.8	2019/4/9	2020/2/7	实用新型	于世和、邹杨、严睿、李明海
65	一种高温梯级相变蓄热装置	201920804500.9	2019/5/30	2020/7/7	实用新型	陈兴伟 邹杨 戴叶
66	高压真空馈入连接装置	201920804586.5	2019/5/30	2020/6/19	实用新型	何子锋 欧阳联华 李德明 李瑞 杨永金 黄建鸣 吴新时 张金玲
67	一种静电切割器	201920907653.6	2019/6/17	2020/4/17	实用新型	欧阳联华 李德明 何子锋 杜涵文 李瑞 张娟 陈楚
68	一种位置和角度可调的静电切割器总成	201920907659.3	2019/6/17	2020/3/13	实用新型	欧阳联华 李德明 何子锋 杜涵文 李瑞 张娟 陈楚
69	一种以三氟化氮为氟化剂的熔盐脱氧方法	201910535623.1	2019/6/20	2020/10/23	发明	牛永生、胡聪伟、孙理鑫、窦强、李晴暖
70	一种自动上下样系统	201921112163.3	2019/7/16	2020/5/8	实用新型	洪春霞 边风刚 周平 缪夏然
71	一种软 X 射线吸收谱的测量系统	201921384998.4	2019/8/23	2020/11/27	实用新型	孙天啸 张祥志 曹杰锋 李小艳 郇仁忠 王勇 郭智 邢振江 何健 孟祥雨
72	一种 X 射线小角散射与 X 射线成像联用的光学系统	201921460117.2	2019/9/2	2020/6/5	实用新型	边风刚 洪春霞 周平 王玉柱
73	一种高温流体定量出料系统及出料方法	201910942164.9	2019/9/30	2020/10/27	发明	汤睿、谢雷东、赵素芳、王建强、赵乾坤、傅杰、申淼

74	一种用于散射实验站的真空腔体组件	201921694098.X	2019/10/11	2020/7/17	实用新型	洪春霞 王玉柱 滑文强 周平 李秀宏 边风刚
75	一种耐腐蚀原位高温微型衍射仪	201921787603.5	2019/10/23	2020/8/14	实用新型	高梅 文闻 张兴民 雷琦 周兴泰 高兴宇 黄宇营
76	一种真空热重装置	201921846080.7	2019/10/30	2020/7/10	实用新型	许璐 窦强 付海英
77	温差发电单元及熔盐堆	201921871737.5	2019/11/1	2020/10/23	实用新型	陈兴伟、戴叶、崔德阳、于世和、邹杨
78	用于熔盐电化学测试的电极集成系统	201921814332.8	2019/10/25	2020/6/19	实用新型	蒋锋、黄卫、龚昱
79	一种组合式真空差分结构	201922001536.6	2019/11/19	2020/7/17	实用新型	刘俊男 王楠 陈明 祝万钱 薛松
80	软 X 射线磁学实验站的原位观察装置	201922217000.8	2019/12/11	2020/9/18	实用新型	曹杰峰 王勇 朱方园 邵仁忠
81	一种自由电子激光的紫外飞秒种子激光脉冲宽度测量装置	202020121020.5	2020/1/19	2020/8/28	实用新型	李春雷 王兴涛 刘波 张文艳 冯冽 兰泰和 孙昊
82	一种气溶胶的发生与干燥系统	202020096471.8	2020/1/16	2020/10/23	实用新型	马继飞、姜迪、姚剑、唐晓星、刘忠英、吕丽君、杜林、钱渊
83	镍基高温合金抗碲腐蚀性能提升方法及镍基高温合金	201911086203.6	2019/11/8	2020/10/30	发明	蒋力 李志军 吴博恒 王伟
84	一种高温绝缘焊接管组件	202020362271.2	2020/3/20	2020/10/27	实用新型	王建强 杜贤龙 肖国萍 洪春峰 关城志 高娜

## 2019-2020 年国际学术会议报告表

## Presentations by SINAP Scientists at International Scientific Meetings in 2019-2020

2019

No.	会议全称	报告名称	报告人	报告类别	所属学科	离境日期	会议地点
1	第 27 届四代堆 国际论坛熔盐 堆系统执委会	Design of Th-U Cycle	蔡翔舟	大会报 告	反应堆物理与技 术	2019.03.10-201 9.03.17 (8 天)	澳大利亚
2	第 27 届四代堆 国际论坛熔盐 堆系统执委会	Recent progress on the chemistry of thorium-uranium fuel cycle	龚昱	分会报 告	反应堆物理与技 术	2019.03.10-201 9.03.17 (8 天)	澳大利亚
3	第 27 届四代堆 国际论坛熔盐 堆系统执委会	Irradiation study progress of metallic structural materials used for TMSR	黄鹤飞	墙报	反应堆物理与技 术	2019.03.10-201 9.03.17 (8 天)	澳大利亚
4	第 27 届四代堆 国际论坛熔盐 堆系统执委会	Progress of TMSR Engineer	刘桂民	分会报 告	反应堆物理与技 术	2019.03.10-201 9.03.17 (8 天)	澳大利亚
5	第 27 届四代堆 国际论坛熔盐 堆系统执委会	Progress of TMSR project in China	徐洪杰	大会报 告	反应堆物理与技 术	2019.03.10-201 9.03.17 (8 天)	澳大利亚
6	第 27 届四代堆 国际论坛熔盐 堆系统执委会	Interaction between molten salt and graphite  Influence of Acidity, Temperature, and Counteraction	周兴泰	分会报 告	反应堆物理与技 术	2019.03.10-201 9.03.17 (8 天)	澳大利亚
7	2019 年锕系物 理化学国际会 议	Hydration Enthalpies on Hydrolysis, Nucleation, and Condensation of Tetravalent Actinide Ions	林健	分会报 告	核放射化学	2019.04.13-201 9.04.20 (8 天)	意大利
8	Tritium 2019 国际会议	The study of tritium removal from irradiated nuclear graphite base on	刘卫	墙报	核技术及其应用	2019.04.21-201 9.04.27 (7 天)	韩国



		self-cleaning						
		Radiation functionalized polymer material for flexible sensing and environmental preservation						
14	2019 年纤维协会春季会议	polymer material for flexible sensing and environmental preservation	吴国忠	分会报告	核技术在工、农业和医学中的应用	2019.05.20-2019.05.23 (4 天)		香港
		Microstructure and mechanical properties of GTAW and fiber LBW GH3535 superalloy						
15	2019 年国际焊接会议	Microstructure and mechanical properties of GTAW and fiber LBW GH3535 superalloy	黎超文	分会报告	焊接结构、工艺与装备	2019.07.06-2019.07.13 (8 天)		斯洛伐克共和国
		Electrochemical studies on uranium precipitate formation and its dissolution in molten fluorides						
16	第 11 届国际熔盐化学与技术研讨会	Electrochemical studies on uranium precipitate formation and its dissolution in molten fluorides	申淼	墙报	电化学	2019.05.18-2019.05.25 (8 天)		法国
		Research and application progress on heat transfer and storage characteristics of high temperature molten salt						
17	第 11 届国际熔盐化学与技术研讨会	Research and application progress on heat transfer and storage characteristics of high temperature molten salt	唐忠锋	墙报	电化学	2019.05.18-2019.05.25 (8 天)		法国
		The progress of beam commissioning for the synchrotron of Shanghai Advanced Proton Therapy Facility						
18	2019 年度国际粒子加速器会议	The progress of beam commissioning for the synchrotron of Shanghai Advanced Proton Therapy Facility	李德明	墙报	束流物理与加速器技术	2019.05.18-2019.05.26 (9 天)		澳大利亚
		Overview of TMSR Progress						
19	第六届生态繁荣会议	Overview of TMSR Progress	徐洪杰	大会报告	能源利用系统与评价	2019.06.05-2019.06.09 (5 天)		新加坡
		Molten Salt Synthesis of Porous La <sub>0.6</sub> Sr <sub>0.4</sub> Co <sub>0.2</sub> Fe <sub>0.8</sub> O <sub>3-δ</sub> as Efficient Anode Material toward Solid Oxide Electrolysis Cells						
20	第 22 届固态离子国际会议	Molten Salt Synthesis of Porous La <sub>0.6</sub> Sr <sub>0.4</sub> Co <sub>0.2</sub> Fe <sub>0.8</sub> O <sub>3-δ</sub> as Efficient Anode Material toward Solid Oxide Electrolysis Cells	刘泽	墙报	电化学	2019.06.15-2019.06.22 (8 天)		韩国
		中国核物理发展情况						
21	第十四届亚洲核物理学会会议	中国核物理发展情况	马余刚	大会报告	核物理	2019.06.27-2019.06.30 (4 天)		韩国

22	ASTM 人造碳和石墨生产的DO2.F 小组委员会会议 熔盐堆技术状况的原子能机构技术文件编写工作顾问会议	The effect of molten salt on graphite stress analysis	曾广礼	大会报告	高性能碳素材料	2019.06.23-2019.06.28 (6 天)	美国
23	2019 熔盐与离子液体研究夏季论坛 亚洲核合作论坛-辐射技术在高分子改性及农业, 环境和医学上的应用论坛	Review of TMSR project in China	戴志敏	大会报告	反应堆物理与技术	2019.07.28-2019.08.03 (7 天)	奥地利
24	第16届国际固体氧化物燃料电池会议	molten salts assisted Coating of Carbide Film on 316L Stainless Steel	龙德武	分会报告	无机合成和制备化学	2019.08.11-2019.08.16 (6 天)	英国
25	第16届国际固体氧化物燃料电池会议	Radiation Processing and Polymer Modification for Agricultural, Environmental Application in China	马红娟	大会报告	核技术在工、农业和医学中的应用	2019.09.02-2019.09.08 (7 天)	印度尼西亚
26	第16届国际固体氧化物燃料电池会议	Nuclear Hydrogen Production Research in TMSR	王建强	墙报	材料化学其他学科	2019.09.08-2019.09.14 (7 天)	日本
27	第16届国际会议暨星体粒子与深地物理国际会议	Recent research progress about porous perovskite by molten salt synthesis and advanced X-ray technique.	张林娟	墙报	无机化学	2019.09.08-2019.09.14 (7 天)	日本
28	第28届四代堆国际论坛熔盐堆系统执委会和超高温熔盐堆材料论坛技术研讨会	核物质的粘滞性	马余刚	大会报告	核物理	2019.09.08-2019.09.14 (7 天)	日本
29	第28届四代堆国际论坛熔盐堆系统执委会和超高温熔盐堆材料论坛技术研讨会	The design of TMSR material	黄鹤飞	分会报告	裂变堆物理	2019.09.14-2019.09.20 (7 天)	法国
30	第28届四代堆国际论坛熔盐堆系统执委会和超高温熔盐堆材料论坛技术研讨会	The Design of TMSR reactor	邹杨	大会报告	裂变堆物理	2019.09.14-2019.09.20 (7 天)	法国

31	第20届国际核石墨专家会议	Irradiation Effects of Fiber, Matrix and Their Interfaces Induced by He+ Ion for C/C Composites in TMSR	冯尚蕾	大会报告	高性能碳素材料	2019.09.15-2019.09.21 (7天)	比利时
32	第20届国际核石墨专家会议	Irradiation lifetime estimation of nuclear graphite based on ion beam irradiation	贺周同	大会报告	高性能碳素材料	2019.09.15-2019.09.21 (7天)	比利时
33	第20届国际核石墨专家会议	Characterization of microcrack in nuclear graphites and its relationship with the coefficient of thermal expansion	汪雪	大会报告	高性能碳素材料	2019.09.15-2019.09.21 (7天)	比利时
34	第20届国际核石墨专家会议	1) An empirical relationship for manufactured nuclear graphite; 2) New ASTM standards for molten salt reactors.	曾广礼	大会报告	材料的组织、结构、缺陷与性能	2019.09.15-2019.09.21 (7天)	比利时
35	第20届国际核石墨专家会议	Fracture behavior of nuclear graphite	高彦涛	分会报告	材料科学基础学科	2019.09.15-2019.09.21 (7天)	比利时
36	第18届亚太化工联盟大会	Ab initio molecular dynamics simulation of H <sub>2</sub> and HF in FLiBe molten salts	傅杰	墙报	化学反应工程	2019.09.22-2019.09.28 (7天)	日本
37	第19届国际新兴核能系统会议	Analysis of integrated target in the thorium-based molten salt energy amplifier	林作康	分会报告	核能	2019.10.05-2019.10.10 (6天)	印度尼西亚
38	第19届国际新兴核能系统会议	The conceptual design of thorium-based molten salt energy amplifier	杨璞	分会报告	核能	2019.10.05-2019.10.10 (6天)	印度尼西亚
39	2019 法兰克福书(刊)展及科技期刊影响力提升国际学术研讨会	Proposal of Journal Data Resources Sharing between NST and EPJ N	李勇平	大会报告	图书馆、情报与文献学其他学科	2019.10.17-2019.10.24 (8天)	法国,德国

		Nucleon-nucleon						
40	第九届核对称能国际研讨会	correlation from photonuclear reactions.	马余刚	大会报告	中高能核物理学	2019.09.30-2019.10.05 (6 天)		越南
41	极端核物质中心和 RAON 用户联络中心联合研讨会	Recent development on nuclear facility in China	马余刚	大会报告	重离子核物理学	2019.10.30-2019.11.03 (5 天)		韩国
42	核石墨知识库现状技术会议	Graphite oxidation effect on CTE.	曾广礼	大会报告	核材料与工艺技术	2019.11.05-2019.11.09 (5 天)		奥地利
43	第五届国际辐射防护体系研讨会	Current Status and Problems for Citizen Science and Engagement in Radiation Protection.	夏晓彬	大会报告	辐射防护技术	2019.11.16-2019.11.23 (8 天)		澳大利亚
44	X 射线发射谱研讨会	Uranium-Induced Changes in Crystal-Field and Covalency Effects of Th <sup>4+</sup> in Th <sup>1-x</sup> U <sup>x</sup> O <sub>2</sub> Mixed Oxides Probed by High Energy Resolution Fluorescence Detected X-ray absorption spectroscopy	于海生	墙报	物理光学	2019.12.02-2019.12.07 (6 天)		法国
45	2019 年美国化学会学术年会	金属硫氧配合物的红外光谱和计算化学研究	魏睿	墙报	核物理	2019.3.29-2019.4.6 (9 天)		美国
46	IPAC19 会议	R&D of a Bimodal RF Electron Photocathode Gun	王琳	墙报	加速器物理	2019.5.17-2019.5.26 (10 天)		澳大利亚
47	IPAC19 会议	Bunch Length Measurement Using Multi-Channel Harmonic Analyze Method at SSRF	周逸梅	墙报	加速器物理	2019.5.17-2019.5.25 (9 天)		澳大利亚
48	Transport 2019	Nuclear collective dynamics in lattice Hamiltonian method"	王睿	分会报告	核物理	2019.5.18-2019.5.26 (9 天)		意大利
49	2019 国际核工程大会	Optimization of core loading pattern in	何燎原	墙报	加速器物理	2019.5.18-2019.5.25 (8 天)		日本

		AHTR using a novel HYBRID adaptive genetic algorithm and tabu search(HAGATS)							
50	IPAC19 会议	Beam Dynamics Design of Proton Synchrotron Linear Injector for Proton Therapy	乔舰	墙报	加速器物理	2019.5.18-2019.5.24 (7 天)		澳大利亚	
51	58th Particle Therapy Co-Operative Group Conference 国际会议	The synchrotron-based eye treatment therapy system in Shanghai advanced proton therapy project and safety goals	孔海云	墙报	加速器物理	2019.6.9-2019.6.17 (9 天)		英国	
52	58th Particle Therapy Co-Operative Group Conference 国际会议	Study of parameters and errors affecting performance of Synchrotron-based Proton Beam Scanning System	魏梦雅	墙报	加速器物理	2019.6.9-2019.6.17 (9 天)		英国	
53	58th Particle Therapy Co-Operative Group Conference 国际会议	1) Evaluation of the interplay effects in IMPT of patients with early stage NSCLC、2) Evaluation of fully automated robust IMPT planning of cervical cancer in Raystation treatment planning system	商海焦	墙报	加速器物理	2019.6.9-2019.6.14 (6 天)		英国	
54	第39届国际自由电子激光会议	The pulse energy measurement at the SXFEL	刘子朋	墙报	加速器物理	2019.8.24-2019.9.1 (9 天)		德国	
55	第39届国际自由电子激光会议	The Physic Design for FEL3 Line of SHINE	黄楠顺	墙报	加速器物理	2019.8.24-2019.9.8 (16 天)		德国	
56	第39届国际自由电子激光会议	Generation of large-bandwidth free electron laser pulses in SXFEL	颜佳伟	墙报	加速器物理	2019.8.24-2019.9.8 (16 天)		德国	

57	暑期学校及国际会议	A method for isocentric beam alignment used for proton beam commissioning	刘琪	墙报	核技术及其应用	2019.7.26-2019.8.3 (9天)	越南
58	2019年加速器束流装置会议	Machine Learning Image Processing Technology Application in Bunch Longitudinal Phase Data Information Extraction	许兴懿	墙报	核技术及其应用	2019.9.7-2019.9.14 (8天)	瑞典
59	18届亚太化工联盟大会 (APCCHE)	Ab initio molecular dynamics simulation of H2 and HF in FLiBe molten salts	贺国达		熔盐化学	2019.9.22-2019.9.28 (7天)	日本
60	FUSEE (Future of Seeded Free-electron Lasers) International Workshop.	FALCON: A Super-fast Threedimensional Time-dependent Free-electron Laser Simulation Code	曾理	墙报	加速器物理	2019.12.9-2019.12.15 (7天)	意大利
61	第十六届亚洲晶体学协会会议	Crystal structures of Vibrio cholerae VqmA complexes provide insight into ligand-binding and DNA-binding mechanisms of LuxR-type receptors	吴海	墙报	核技术及其应用	2019.12.16-2019.12.21 (6天)	新加坡

2020 无