

小型核反应堆关键技术研究进展及展望

乔鹏瑞, 郭瑞阳, 杨红义*

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 在全球能源低碳转型的背景下, 小型核反应堆以投资小、建设周期短、多场景应用等优势, 成为突破大型核电应用瓶颈的重要研究对象和发展方向。本文通过调研国内外各类小型核反应堆的研究进展情况, 系统梳理了轻水堆、高温气冷堆、液态金属堆、熔盐堆等小型核反应堆的技术特点与产业应用前景。结合国内外研究及发展现状, 归纳并阐述了新型材料研发及部件加工制造技术、结构材料和燃料的辐照考验、智能精确的仪控系统、高效的动力转换系统以及数字孪生与智能运维技术等5种小型核反应堆的共性关键技术。此外, 结合小型核反应堆的优势与特点, 探讨了其在石化行业、数字化领域、空间和深海领域的应用前景, 并指出具备多场景应用功能的能源结构体系将成为小型核反应堆的未来发展趋势。

关键词: 小型核反应堆; 发展现状; 关键技术; 发展趋势

中图分类号: TL41

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)09-2048-15

doi: 10.7538/yzk.2025.youxian.0453

Research Progress and Prospect of Key Technologies for Small Nuclear Reactor

QIAO Pengrui, GUO Ruiyang, YANG Hongyi*

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Under the global low-carbon energy transition, small nuclear reactors have emerged as a kind of crucial research object and development trend to overcome the limitations of large-scale nuclear power applications, which show the advantages such as lower investment costs, shorter construction cycles, and multi-scenario applicability. The research progress of various reactors worldwide was investigated in this paper, systematically examining the technical characteristics and industrial application prospects of light-water reactors, high-temperature gas-cooled reactors, liquid metal-cooled reactors, and molten salt reactors. Building on current domestic and international research, it summarized and elaborated on five key technologies for small nuclear reactors, i.e. advanced material development and component manufacturing, irradiation testing of structural materials and fuels, intelligent instrumentation and control systems, high-efficiency power conversion systems, and digital twin and intelligent operation-maintenance technologies. Furthermore, the study explores nuclear reactors' application potential in the petrochemical industry, digital field, space exploration and deep-sea power supply fields, proposing that energy systems which integrate multi-scenario adaptability will give insights to the future trajectory of nuclear reactor development.

Key words: small nuclear reactor; development status; key technologies; development trend

当前,全球能源供应模式正在加速变革^[1],能源结构正经历深刻转型,构建清洁、低碳、安全、高效的现代能源体系成为应对气候变化的全球共识。核能凭借安全可靠、高能量密度的特性,被视作构建未来新型低碳能源体系的关键支柱。发展核能对推动我国能源结构转型、保障国家能源安全具有重要战略意义。

然而,传统大型核电站面临高初始投资、长建设周期、严苛选址要求以及公众接受度等挑战,在一定程度上制约了传统大型核电的广泛应用。小型核反应堆具有投资小、建造工期短、占地面积小等天然优势,是适用于多种应用场景的新型核能系统,被视作更为灵活且成本更低的核能应用方式^[2-3],是一种极具潜力的创新核能解决方案。其核心优势在于创新性的设计理念,如紧凑型一体化布置、非能动安全系统应用等,保证良好经济性的同时显著提高了核反应堆的安全性。小型核反应堆与化工、通信、区域供电等脱碳困难的行业相结合,满足分布式发电市场、供热市场和供水市场的需求^[4],进一步推动能源转型,为实现双碳目标开辟多元化、场景化的技术路径。此外,小型核反应堆可应用于海洋、航天航空等领域,为飞行器和舰艇提供动力,为军事基地和特殊武器提供能源供给,符合前沿作战基地和偏远作战基地对于能源电力的需求^[5-6]。对小型核反应堆进行模块化设计及制造、单个或多个模块组合建造,可大幅降低投资成本并缩短制造周期,从而适应不同负荷调度要求^[7]。

近年来,全球小型核反应堆的研发项目与产业化进程发展呈现明显的加速趋势,目前国内外已公布的50余种堆型中,部分已经启动建设并预计在未来几年内投入使用,另有超过20余种方案在未来十年内建设原型堆^[8]。技术路线持续多元化,共性关键技术研究取得系列突破,代表性示范项目加速推进建设,使得小型核反应堆在技术和上下游产业链方面都实现加速发展^[9]。

我国也高度重视小型核反应堆的发展,“十三五”电力发展规划将小型智能反应堆的自主创新列为重点任务,明确开展小型反应堆核电示范工程建设,并发展小型核电站。小型核反应堆的

安全性和多应用性,是核电未来发展的重要方向^[10]。

1 小型核反应堆发展现状

早期核能发展受限于技术成熟度及安全考量,核反应堆普遍采用较小功率设计。随着足够多的工程实践证明以及运行经验的积累,大型商用堆技术日渐成熟并形成了标准化体系,核电规模化应用取得显著进展。然而,大型核反应堆高昂的前期投资、较长的制造周期以及建设周期内区域能源需求的不确定性,导致装机容量适配性风险增加,实际装机规模无法满足能源供给需求,这些因素共同推动小型核反应堆成新一代核能研发热点。

国际原子能机构(IAEA)将小型核反应堆定义为单堆额定输出功率水平在10~300 MWe的核反应堆^[11],其核心价值在于功率配置的灵活适应性、模块化设计的高效性以及多能联供的潜力,具备单堆功率小、一体化设计、紧凑的回路设计、堆芯放射性存量少、防核扩散能力、抵御外部事件能力强等特征,其设计更加重视固有安全性、非能动余热排出能力和更低的堆芯功率密度,通过减少事故源项、降低事故发生的可能性、提升系统的固有安全性、提升系统对事故的抵御能力,从而实现小型核反应堆的高安全特性。

小型核反应堆最显著的特点是模块化设计,该技术可根据用户需求,通过单模块独立运行或多模块协同组合,实现区域能源供应及规模化生产需求,并且能够通过微电网实现资源协调。模块化设计采用功能集成化分区策略,将核反应堆主工艺系统采用模块装配,直接将系统设备按照功能分解为独立的区域模块,对具有共用设备或管道阀门的模块尽量进行最大化集成,形成数量精简、相对独立和功能完整的模块单元。通过针对性模块独立设计和接口最小化处理,显著提升各模块组装和连接的便利性和快捷性^[12]。根据实际功率需求通过优化动力转换系统工艺设计实现电力、工业蒸汽等不同种类的能源供给。

在冷却剂选择方面,小型反应堆与大型商用堆类似,可选用水、气体、液态金属及熔盐等,基于不同冷却剂类型的小型反应堆的特性也不同。

轻水堆采用水作为冷却剂和慢化剂,充分利用现有轻水堆的技术;高温气冷堆采用氦气为冷却剂、石墨作为堆芯材料,可产生很高的热效率;液态金属快堆的冷却剂工作温度高、运行压力低;熔盐堆采用液体熔盐燃料,大幅降低甚至可以完全消除堆芯熔化的风险。表1列出了国际上小型

核反应堆的发展情况,可以看出,美国、俄罗斯、欧盟、中国等国积极参与小型核反应堆的研发和设计,均提出了独立的、不同类型的小型核反应堆设计方案。下文将分别对不同类型小型核反应堆的发展现状(图1)进行详细介绍,主要包括堆型设计和运行概况。

表1 国际小型核反应堆发展情况^[13-15]Table 1 Development status of international small nuclear reactors^[13-15]

堆型	名称	国家-机构	发电功率/MWe	当前进展	
轻水堆	NuScale	美国-NuScale Power	12×45	设计评审中	
	mPower	美国-Babcock & Wilcox	180	详细设计阶段	
	IRIS	国际-Westinghouse 等	335	未公开	
	Westing house SMR	美国-Westinghouse	225	概念设计阶段	
	ACP-100	中国-中国核工业集团有限公司	100	设计评审中	
	KLT-40S	俄罗斯-OKBM	150	2 台机组在建	
	VBER-300	俄罗斯-OKBM	300	详细设计阶段	
	VK-300	俄罗斯-Atomenergoproekt	300	预计 2020 年运行	
	RITM-200	俄罗斯-OKBM	55	概念设计阶段	
	SMART	韩国-韩国原子能研究所	90	设计评审中	
	MAX	日本-日本原子能研究所	30~100	未公开	
	CAREM	阿根廷-阿根廷国家原子能委员会	27	已完成原型堆建设	
	NP-300	法国-Technicatome	100~300	未公开	
	高温气冷堆	HTR-PM	中国-清华大学	2×105	2 台机组在建
		PBMR	南非-Eskom	165	暂停建设
EM ²		美国-General Atomics	240	概念设计	
SC-HTGR		美国-AREVA	272	方案设计	
GT-MHR		俄罗斯-OKBM Afrikanov	285	完成方案设计	
MHR-T		俄罗斯-OKBM Afrikanov	—	方案设计	
MHR-100		俄罗斯-OKBM Afrikanov	25~87	方案设计	
HTTR		日本-日本原子能研究所	10	已运行	
CT-HTR		日本-日本原子能研究所	100~300	基准设计	
液态金属快堆		ENHS	美国-加利福尼亚大学	50	概念设计阶段
	STAR	美国-阿贡国家实验室	20~100	概念设计阶段	
	SVBR-100	俄罗斯-Rosatom	100	原型堆设计阶段	
	BREST-OD-300	俄罗斯-Rosatom	300	建造阶段	
	4S	日本-东芝公司	10	设计评审中	
	PRISM	美国-Ge-Hatachi	311	详细设计阶段	
	NHPM	美国-Hyperion	25	前期申请审评	
	熔盐堆	IMSR400	加拿大-Terrestrial Energy	194	详细设计阶段
MSTW		丹麦-Seaborg Technologies	100	原型堆设计阶段	
ThorCon		美国-Martingale	—	原型堆设计阶段	
MSR-FUJI		日本-International Thorium Molten-Salt Forum	200	详细设计阶段	
LFTR		美国-Filbe Energy	—	原型堆设计阶段	



图1 不同类型小型核反应堆发展现状

Fig. 1 Development status of different types of small nuclear reactors

根据 IAEA 最新预测,至 2050 年核电发电能力将提升至现今水平的 2.5 倍,其中小型模块化反应堆(SMR)占据 25%。在现有的小型核反应堆设计中,小型轻水堆(LWR)具有第三代反应堆特征,凭借丰富的建造和运行经验,成为最常见的堆型,是目前 SMR 快速商业化的首选技术路线。目前,基于 LWR 技术的成熟 SMR 设计已逾 20 种,包含分散布置回路式设计、紧凑布置回路式设计以及一体化布置设计三大类型。单机组功率涵盖 8~300 MWe 区间,包括陆基 LWR、安装在驳船上的海上 LWR 以及深海 LWR。代表性工程进展包括:阿根廷的一体化压水堆 CAREM 完成原型堆建设,计划 2028 年实现并网^[16];俄罗斯紧凑环路压水堆 KLT-40S^[17]、一体化压水堆 RITM-200 已建成并投入运行^[18],一体化压水堆 ABV-6M 原型堆已完成运行^[19];韩国的一体化压水堆 SMART 获得标准设计认证并完成施工设计^[17];中国先后提出了一系列小型轻水堆,如针对寒冷地区供热的 NHR200- I/II 型和“燕龙”池式低温供热堆方案^[16];商用示范的一体化压水堆 ACP-100 已在昌江进入施工建造阶段,预计于 2026 年投入运行^[20]。然而,小型轻水堆存在核燃料利用率低的缺点,考虑到我国铀资源储量有限,应该合理规划 LWR 的建设,优化铀资源利用。

气冷堆由于其固有安全性和运行特性,被视为 SMR 领域中最具潜力和可行性的技术路线,其核心特征在于小型化设计和安全特性。在事故工

况下,得益于惰性单相冷却剂、高热容量的慢化剂及全陶瓷型燃料元件等设计,依靠较大的负温度反应性系数使其能够有效避免堆芯熔化,保证在任何事故工况下使反应堆安全停堆,从设计上确保热点温度不会超过材料安全限值^[21]。此外,气冷堆的运行温度较高,这种高温特性不仅可以高效发电,更能拓展至高温制氢、热电联产等领域,使其在多功能反应堆上展现出更强的竞争力。国际上,多个国家均提出了小型高温气冷堆的设计方案。在我国,高温气冷堆 HTR-10 的设计和研发工作始于 1992 年^[22],在此基础上继续发展商用示范项目 HTR-PM,该项目于 2023 年 12 月在石岛湾商运投产^[23]。其设计采用双反应堆模块驱动 1 套汽轮机组发电系统,满发电功率为 210 MWe。此外,日本的 HTTR 在“3·11”日本地震后 10 年重新恢复运行^[24]。目前,高温气冷堆仍面临着单堆功率较低、堆芯尺寸过大、乏燃料后处理困难等技术难题。此外,由于产业链不够成熟、经济性较低,在市场应用和可持续发展战略方面的竞争力都低于其他堆型。

液态金属冷却快堆作为闭式燃料循环的载体,采用快中子能谱设计可实现燃料增殖及核废料嬗变,是核能“三步走”战略中的重要环节。液态金属作为冷却剂,具有良好的热导率且较高的沸点,允许反应堆在常压条件下运行,为反应堆安全设计提供了显著优势。同时,堆芯出口温度较高,耦合先进动力转换系统为实现小型化、集成化和模块化创造有利条件。此外,快堆还具备多重功能价值,反应堆运行后可作为快中子辐照装置,为后续先进堆型的设计建造提供燃料及结构材料的关键辐照考验数据;也可作为快堆参数试验平台,对系统设备及仪表进行工程考核,从而进一步推动工程型号发展^[25]。

液态金属冷却快堆根据冷却剂类型主要分为钠冷快堆、铅/铅铋快堆,不同冷却剂选择直接决定反应堆的核心特性差异。其中,钠冷快堆具有多重优势:钠的熔点较低,对中子的吸收和慢化作用较小;高热导率有利于堆芯设计成较为紧凑的结构;堆芯通常采用池式布置,主容器内具有较大热容,形成显著的热惯性;钠与其他结构材料相容性较好。然而,钠的化学活性也带来了特殊挑战,钠泄漏可能导致钠火和钠水事故,迫使钠冷快堆

增加以钠为介质的二回路,形成钠-钠-水三回路主热传输系统设计,同时在二、三回路边界处设置了多重安全系统,以实现对事故的预防、监测和缓解后果。相较于钠,液态铅/铅铋合金冷却剂展现出不同的安全特性,其化学惰性显著增强,与水 and 空气无剧烈化学反应,因此不用设置中间回路,这不仅提高热传导效率,也使系统的空间布置更为紧凑。此外,铅基冷却剂具有更高的热膨胀系数,使得铅冷快堆更容易建立自然循环,提升了系统固有安全性;值得注意的是,铅作为原子量最大的非放射性金属,本身是优异的防辐射屏蔽材料,进一步增强了铅/铅铋快堆的固有安全性。但铅基快堆仍然面临两大挑战,一是对结构材料的腐蚀较强,二是中子辐照下会产生高放射性的 ^{210}Po ,这要求研发新型耐腐蚀材料以及增添 ^{210}Po 去除装置。

在工程实践方面,液态金属冷却快堆技术发展至今总共积累了超过350堆·年的运行经验,并且当前发展趋势仍然活跃。俄罗斯在液态金属冷却快堆研发方面处于国际领先地位,其设计的铅冷快堆BREST-OD-300于2021年6月开始建设,主要用于核废料嬗变和闭式燃料循环,并预计2026年投入运行。中国实验快堆于2010年实现并网发电^[26],其示范工程于2024年并网发电。其他正处于详细设计和开发阶段的小型液态金属快堆设计方案包括:日本的钠冷快堆4S、俄罗斯的铅铋快堆SVBR-100、美国的ENHS、STAR铅冷快堆和PRISM、NHPP钠冷快堆^[27-29]。

熔盐堆具有很强的负温度反馈系数和空泡系数,在反应堆实际运行时可允许自动负荷跟踪运行^[30]。具体而言,随着堆芯温度升高,熔盐的热膨胀效应加速其流出堆芯,促使反应性得到有效降低。由于是流体燃料,因此不用担心堆芯熔化问题。当熔盐温度过高,会先将预先设计的冷冻塞熔化,然后将溢出的燃料盐自动排入设计好的储罐内以保证反应堆安全^[31]。在熔盐堆中,还可以调整易裂变材料浓度,以确保过多的剩余反应性得到有效消除。美国对熔盐堆的研究处于领先水平,橡树岭国家实验室首先提出了熔盐堆的概念,而后在1965年建成了以钍-铀燃料循环为研究目的的熔盐实验堆MSRE,随后又提出1000 MWe的熔盐增殖堆MSBR。目前,熔盐堆研发热潮持

续高涨,相较于其他国家,中国研发进程较快,已在甘肃武威建成首台热功率2 MW的液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR),并完成加钍运行^[32]。世界其他国家对小型熔盐堆的研发型号主要包括日本的200 MWe熔盐堆MSR-FUJI、加拿大194 MWe的熔盐堆IMSR400^[33-34],目前尚处于设计阶段。

2 小型核反应堆共性关键技术研究进展

对核反应堆设计而言,良好的经济性、卓越的安全性以及放射性废物的妥善处理是必须满足的3个基本条件。在经济性方面,小型核反应堆无需前期巨大的商业投资^[35],应用场景更加广泛,搭配先进的动力转换系统可以在提高热经济性的同时具备热电联产、海水淡化等多用途能力。在安全性方面,核反应堆安全水平通常通过堆芯损伤概率(CDF)来衡量,早期的核电厂CDF约为 10^{-4} (堆·年) $^{-1}$,而采用新设计或进行升级改造后的反应堆可将CDF降至 10^{-6} (堆·年) $^{-1}$ 。如果要将CDF降至 10^{-8} (堆·年) $^{-1}$,就需要进一步研发固有安全性更高的反应堆技术,例如大幅增加非能动安全系统^[36]。目前新研发的小型核反应堆,无论是基于第三代还是第四代反应堆技术,普遍采用一体化池式布置,将关键设备集成在反应堆压力容器内,有效简化系统布局并提高了结构紧凑性,池式布置又使得主容器内具有较大的热容,显著提高了安全性。在放射性废物的后处理方面,快堆技术能够利用燃料增殖及嬗变处理放射性废物,部分快堆采用高增殖比的金属燃料,配合干法后处理技术能有效提高燃料增殖效率。通过数台机组和后处理厂的合理配置,可有效提高核燃料利用率。此外,铅基堆搭配加速器驱动嬗变系统(ADS)可通过分离和嬗变有效处理超铀元素,实现乏燃料的深度处理^[37]。

然而小型核反应堆的发展仍面临着一些挑战以及亟需解决和发展的关键技术,主要包括:新材料研发及部件加工制造技术、结构材料和燃料的辐照考验、智能精确的仪控系统、高效的动力转换系统以及数字孪生与智能运维技术等。

2.1 新型材料研发及部件加工制造

液态金属冷却快堆技术是小型核反应堆发展的重点方向之一。由于液态金属冷却剂沸点较高,使得液态金属冷却快堆可在高温常压下工作,

降低了耐压设备的加工制造难度,相比于压水堆更具优势。然而,液态金属对结构材料具有较强腐蚀性,特别是需要克服铅基冷却剂对结构材料的腐蚀。同时铅基冷却剂还存在自身氧化问题,因此必须严格控制冷却剂中氧含量以防止难溶性氧化物浮渣导致管道堵塞,并亟需研发具有优异抗腐蚀性能的新型结构材料^[38],确保其使用寿命。目前国内外相关核能研究高校及院所在快堆材料领域开展了大量研究工作,积累了丰富的快堆材料研发和使用经验。中国原子能科学研究院已针对液态金属钠、铅/铅铋合金研发出了具有良好高温力学性能和优异耐腐蚀性能的高温耐热钢系列材料,有效缓解了液态金属对结构材料的腐蚀问题,并且在关键设备部件及元器件的设计制造方面积累了坚实的技术基础。

传统配件制造工艺一般有直接成型(如浇筑或铸造)和后期加工两种方式,直接成型需要先花费大量成本用于制造模具,而后期加工需要先采购锻件后通过铣、车等工艺成型。随着增材制造技术的发展,在一些设备零部件的制造中,3D打印技术在工业内的应用日益广泛。与传统制造方法相比,3D打印技术可以制造加工更为复杂的形状,而且批量生产的速度更快,产生的废物更少,减少了出错的可能性;但缺点是部分能动部件的表面粗糙度较高,导致流体流动的沿程阻力增大。目前,国内外核能行业均对3D打印技术开展了相应的研究与应用。在国外,美国橡树岭国家实验室利用3D打印技术制造了4个燃料组件支架^[39](图2),已成功应用于布朗斯费里核电站2号机组中,预计服役至2027年;法国法马通公司于2022年在瑞典福斯马克核电站安装了首个3D打印的不锈钢燃料部件;俄罗斯最近建造了一台能

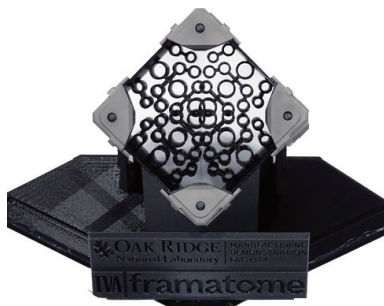


图2 3D打印的核燃料组件支架^[39]

Fig. 2 Nuclear fuel assembly bracket printed by 3D^[39]

够打印直径达2.2 m、高1 m的物体的3D打印机;在韩国,3D打印技术已经被用于制造核级控制阀等关键部件。在国内,中国核动力研究设计院与南方增材科技有限公司合作,通过3D打印技术成功制造出了ACP-100反应堆压力容器并通过技术鉴定;中国广核集团利用3D打印技术成功制造出核电站复杂流道仪表阀阀体^[40](图3);中国科学院合肥物质科学研究院利用3D打印技术对聚变堆第一壁的材料进行制造及测试,明确了此技术在聚变堆等先进系统制造上的可能性^[41]。



图3 3D打印的仪表阀阀体^[40]

Fig. 3 Instrument valve body printed by 3D^[40]

2.2 结构材料和燃料的辐照考验

核反应堆燃料组件在高温、高中子通量辐照场中服役,可能发生开裂并释放裂变气体、包壳发生辐照肿胀和蠕变以及六角形套管发生辐照变形等现象,严重影响燃料元件性能。堆内组件主要面临冷却剂腐蚀和辐照损伤导致材料性能下降问题。此外,包壳管和外套管由于辐照导致的高温力学性能劣化会显著影响其使用寿命。因此需要开展燃料和结构材料在反应堆内的辐照考验,以验证燃料棒和燃料组件的设计参数,获得燃料和结构材料的辐照性能数据,为设计验证与安全评估提供支撑^[42]。

目前,国内缺乏国产燃料和结构材料的辐照性能数据,严重制约了新型核反应堆燃料组件的设计与应用,已成为其发展的关键瓶颈问题。常规的辐照考验验证技术路线包括结构材料辐照考验、燃料辐照考验和先导组件辐照考验。结构材料辐照考验需在设计温度下辐照至组件预期承受的最大辐照损伤剂量,以检验结构材料辐照后性能,为后续设计提供数据支撑。先导组件辐照考验是指燃料组件入堆辐照时,原则上应在具有与

实际堆型运行环境(包括中子能谱、冷却剂种类、温度、压力等)类似的堆内进行辐照考验,并在设计的最大线功率密度下辐照至最大设计燃耗水平。以快堆为例,国内只有中国实验快堆和大功率快堆可以提供快中子能谱环境进行辐照,在众多工程型号并行推进的情况下,辐照资源严重不足。此外,铅基堆的燃料组件设计与钠冷快堆设计存在差异,且冷却剂对材料的腐蚀作用也不相同,导致铅基堆在材料验证及辐照考验方面存在诸多难题。对铅基堆而言,国内尚不存在与其组件尺寸完全一致的辐照条件,因此无法进行先导组件的辐照验证。在辐照资源稀缺且项目工期紧张的情况下,一般采取调整组件部分设计参数、分阶段入堆辐照的策略,以加快辐照考验进度。

目前我国正在研发的小型核反应堆大多是以快堆为主的技术方案,但我国尚无专用的综合性快堆核能研发平台,对于大部分堆型的核燃料及结构材料的辐照考验,只能通过水堆辐照做模拟分析辅助大量计算及冗余设计来保证其使用寿命。因此亟需建设快中子高通量研究堆,满足多种类型先进小型反应堆的研发需求。当前世界各国正在加快部署小型核反应堆的研发,燃料和材料的考验是研发的必要前提。同样的辐照考验,高通量快堆考验周期相比于现有研究堆或压水堆核电站可缩短 20~40 倍。美俄在役的研究堆分别有 50 座和 58 座,其中高通量堆 5 座与 15 座。对比我国在役研究堆仅 16 座,其中仅 5 座可开展辐照考验^[43],因此启动建设一座多功能高通量快中子堆是十分必要的,既能大幅缩短小型核反应堆的研发周期,也是提升我国核科研能力的核心支撑。经过 40 余年的发展,中国原子能科学研究

院在钠冷快堆的设计、建造和运行方面具备扎实基础、积累丰富经验,已经开始提前启动钠冷高通量快堆的设计工作,为后续新型堆型的开发奠定基础。

2.3 智能精确的仪控系统

小型核反应堆的设计目标对仪表和控制系统(I&C)的设计提出了巨大挑战,具体表现为仪控系统需要具备更先进的自动化水平、更高的冗余特性、更完善的故障安全设计及容错能力、更强的预测诊断能力以及多样化的测量方法,以上特征要求小型核反应堆在总体设计阶段就需要重视仪控系统的设计开发,以尽早确定其技术路线和仪控设备研发方案,同时还要考虑设备控制接口及电气系统的兼容性与可靠性^[36]。

传统仪表虽然满足大型商用核电厂的安全认证体系要求,但难以适应小型反应堆特殊的运行环境以及紧凑化、小型化的特性。特别是对于测量堆芯及冷却剂的压力、流量、温度等关键参数的主要仪表需要进行新的技术更迭与研发。

传统压力传感装置利用膜片、活塞、弹簧管和波纹管感知压力变化,并将其转变为电信号,主要类型包括电容式、压阻式、应变式、压电式和电磁式等。但是传统压力传感器在高温环境下存在压阻系数急剧减小、元器件失效、材料蠕变等问题,难以在高温环境下长期使用^[44]。随着技术的发展,出现了以光纤传感器和微机电系统(MEMS)传感器为代表的新型压力传感装置。在光纤传感领域,Luna Innovations 公司已成功在研究堆上测试了光纤压力传感器(图 4),试验证明该传感器可在高剂量辐照环境中正常工作且测量精度高于传统电子压力传感器。此外,光纤传感器可以减

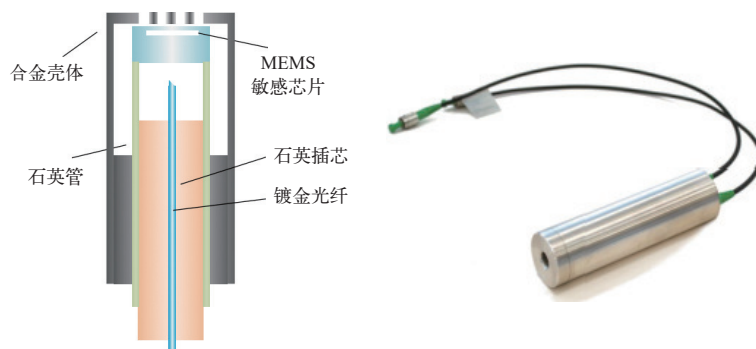


图 4 光纤压力传感器模型^[45]

Fig. 4 Fiber optic pressure sensor model^[45]

小压力边界的穿孔数量以提高系统完整性和包容性。MEMS 传感器基于聚合物衍生陶瓷(PDC)制作,具有恶劣环境适应性强、体积小等优点,适用于小尺寸压力容器内的压力测量,在有限空间内允许安装多个冗余单元和多个测点,从而在尺寸、冗余度、准确性和环境适应性方面更具优势。

堆内温度测量主要采用热电偶或电阻温度探测器(RTD),尽管其测量精度已满足试验与运行要求,但需要重新设计仪表尺寸和安装方式以适应小型反应堆较为紧凑的结构布局。另外也可以考虑采用多样化的温度测量技术,如使用新型分布式光纤传感器技术,利用光纤每相隔 1 cm 处发出的散射信号计算温度,使其能够在几秒内对沿光纤长度的数千个点位进行温度测量^[44];也可以使用 MEMS 温度传感器,由 PDC 材料制成,具有体积小、温度灵敏度高和测量精度高等特点^[46]。这两种传感器技术都已在研究堆中进行了试验验证。

冷却剂流量的精确测量一直较为困难,尤其是在采用池式布置的小型核反应堆中。典型的反应堆流量测量方法为压降法,即通过动量方程与能量方程推导压降与流量的关系,进而通过测量压降来计算特定区域流量。由于压降与流量的平方呈比例,该流量测量方法必须在反应堆满功率运行时进行归一化校准,以确保测量的精度。然而,在采用池式布置或冷却剂流速较低的小型反应堆设计中,传统压降法难以应用。此外,在某些事故工况(如主泵停运)下,堆芯依靠冷却剂自然循环导出热量。由于自然循环下冷却剂流速较低,并且没有安装传统传感器元件的管道,导致流量无法精确测量。针对上述问题,多种新型测量方法正在研发,包括超声波方法、MEMS 方法和光纤方法等。这些方法通常基于与流量呈线性关系的物理量进行测量,其线性响应特性使得仪表可在小流量至全量程范围内保证测量精度。尤其是采用池式布置的小型核反应堆,没有明确的冷却剂管道,无法直接在冷却剂池内部署流量计,流量通常需要通过其他物理量来推算得出,因此直接用于测量流量的技术手段亟需开展研发。

2.4 高效的动力转换系统

小型核反应堆通常采用创新型设计达到更高的安全性、热经济性或多样化用途等特点,相比

于商用压水堆采用的蒸汽朗肯循环,有必要研发更先进的动力循环系统,从而进一步提高小型反应堆的经济性和场景适用性。针对传统朗肯循环,应该优化其工艺流程,使其具备多用途部署功能,如在进入涡轮机械前分流部分蒸汽进行工业供气或在冷凝器环节回收余热,配备供暖或制冷等模块实现热电联产等用途场景,提高反应堆场景适用性。相应地,也可采用更为先进的动力转换系统,以满足布置空间受限、系统集成度高以及良好的热经济性等需求。闭式布雷顿循环在特定应用场景作为一种更具优势的循环方式,可以使用氦气、氦气、二氧化碳及氦氩混合气体作为工质,相较于朗肯循环可以获得更高的功率密度和理论效率。

在各类能源动力转换工质中,氦气具有良好的化学稳定性,其热导率高而密度较低,能有效减少换热器的体积和系统压降,既可作为反应堆冷却剂又可作为布雷顿循环工质。氦氩混合气体其换热性能比氦气更高,通过优化氦-氩原子配比可缩小涡轮机械尺寸、降低转速^[47]并降低轴承和密封设计难度。由于氩的原子质量数较大,较高的密度在提高压缩机功耗的同时降低了气体流动噪声,减少了高速转子振动问题,增强辐射散热能力,更适合空间核反应堆。

二氧化碳具有良好的稳定性和核物理性质,其热力学临界点参数低(7.38 MPa, 31 °C)^[48]。利用超临界二氧化碳(S-CO₂)在拟临界区物性发生突变的特性,将主压缩机入口温度设定在略高于临界温度处,可以利用其密度随温度升高而急剧降低的特性来减少压缩功耗。除了在拟临界区附近表现出显著的密度和比热容变化外,S-CO₂还具有低黏度的特性,这有利于降低系统内的流动阻力,进而减小压缩设备体积。此外,在整个超临界区域,二氧化碳不发生相变,因此不会出现沸腾临界现象,有利于提高系统安全性;在高温区域稳定的物性也确保了 S-CO₂ 可实现高效稳定的能量转换过程。S-CO₂ 布雷顿循环因其热效率高、结构紧凑等优点,与液态金属反应堆耦合后容易实现整体模块化,尤其适用于小功率堆型的研发^[49-50]。随着印刷电路板式换热器(PCHE)技术和 CO₂ 涡轮机技术的进一步发展,S-CO₂ 布雷顿循环再次受到广泛关注与研究。

图5从循环热效率与透平入口温度的关系对比了3种不同循环方式。可以看出在透平入口温度超过500℃时,S-CO₂布雷顿循环热效率已经高于蒸汽朗肯循环和氦气布雷顿循环。S-CO₂布雷顿循环还具有循环布局简单、结构紧凑、占地面积小等优势,更适合于小型反应堆的开发。采用优化工艺布局的方式,在简单回热循环的基础上增加再压缩过程、再热过程以及预冷压缩过程,从而通过有效改善回热器“夹点”问题、提高透平输出功以及减少压缩机耗功的方式获得较高循环效率。此外,由于S-CO₂布雷顿循环布置简单、结构紧凑,使得压缩机和透平的尺寸较小、转速较高,因此通常不采用单独的轴承支承,而是直接布置在高速电机的两侧,形成透平-电机-压缩机一体(T-A-C)结构。如图6所示,当采用分流再压缩循环布置时,可以增加1台透平,工质在进入透平前分流,第1台透平用于驱动主压缩机和电机,另一台透平用于驱动再压缩机和电机。

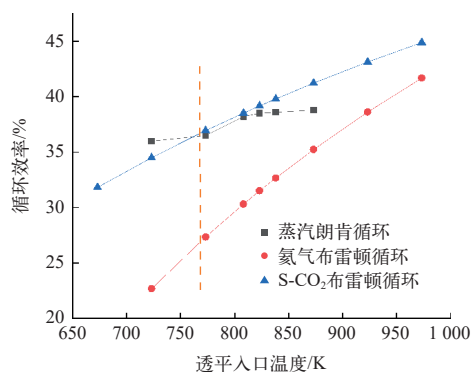


图5 不同循环方式的效率曲线示意图^[49]

Fig. 5 Schematic diagram of efficiency curves for different cycle modes^[49]

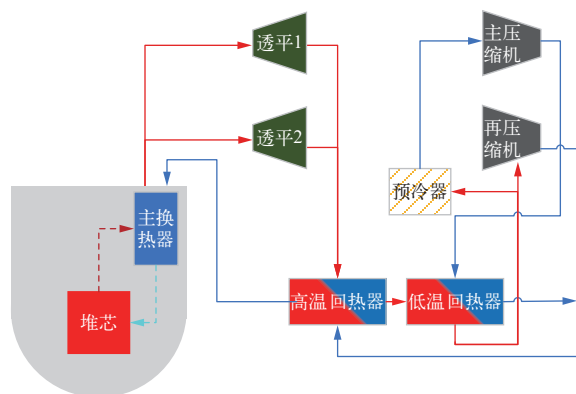


图6 双轴式分流再压缩循环^[49]

Fig. 6 Dual axis-recompression cycle^[49]

自20世纪以来,美、俄等国均开展了布雷顿循环小型核反应堆的研究并建设了一系列实验装置和原型机,如美国的SSTAR计划^[51]、普罗米修斯计划^[52]以及法国的空间核动力电源ERATO^[53]和韩国S-CO₂布雷顿循环耦合钠冷快堆系统KALIMER-600研究计划^[54]。中国一直以来也在布局小型核电源耦合布雷顿循环,中国航天集团上海航天动力机械研究所建设了空间闭式氦氘布雷顿热电转换系统,结合多参数联调完成了系统深度变工况运行,成功实现了百千瓦内多能级电功率输出。中国原子能科学研究院与中国船舶集团洛阳船舶材料研究所研发的适用于钠冷快堆的S-CO₂印刷板式换热器(PCHE)^[55]已完成试验考验。

2.5 数字孪生与智能运维技术

数字孪生(DT)技术是一种实现物理系统向数字化模型映射的关键技术,在核电厂智能控制和小型反应堆等先进核能系统中将发挥重要作用,具体表现为基于大数据的设计方案优化、基于风险指引的设备预测性维修、实时在线故障的诊断及预防、基于数字孪生的运行性能提升。

小型核反应堆的设计研发是一项复杂的系统工程,具有接口庞杂、技术难度大、研发成本高及高风险性等特征。因此对小型核反应堆应采用正向设计方法,即不依赖现有电站设计,而是从用户需求出发,根据顶层设计要求,在小型核反应堆规划论证的3个阶段(概念设计、方案研究、初步设计)内,自上而下完成设计与分解、自下而上完成集成与验证,在有限的周期内确定反应堆的设计参数和系统架构。然而小型核反应堆拥有大量强耦合性的系统过程变量^[56],绝大部分数据样本具有非线性、异构性、规模大及分布不规则等特征,使得难以全面优化出一套可靠的初始关键参数输入。早期为了获取核电站设计方案的优选,最终设计参数的确定往往依靠现有电站参数或专家判断等基于经验的方法,难以得到理论意义上的最优方案^[57]。此外,设计过程中某些参数的变化常引起更多相关参数的更改和重复性设计,其设计周期长且具有较大的不确定性,尤其是小型核反应堆创新性技术应用与多用途使用场景往往需要反复迭代其设计方案。因此利用数字孪生系统辅助小型核反应堆设计,使得流程更加合理化、规范化和信息化,为后续深入设计研究提供重要的

前期支持。

计算机技术的革新和优化理论的发展,推动了多目标优化设计在核反应堆设计中的应用,而且可通过数据模拟和训练得到反应堆的工况参数并进行工况识别,尤其是远程运行状态监控系统在反应堆维护管理中的应用,标志着反应堆管理模式从传统的人工看守式向以计算机技术为基础的智能化、自动化方向转变。这种智能管理模式主要包括对小型核反应堆的核功率、电功率及运行状态变化数据进行可视化展示与统计分析;对实时运行中的异常状态数据进行自动识别与预警;通过远程集中监控,实现对小型反应堆运行状态的全面管理。进一步可采用数据挖掘、人工智能等先进技术,建立小型核反应堆自动化运维决策模型,该模型可识别故障类型及规模,生成规范化的处理建议,辅助管理人员快速制定运维方案。基于故障诊断报警数据,该模型可自动形成涵盖人、物、信息的综合运维指导方案,最终实现自动化运营维护。数字孪生和人工智能技术在小型核反应堆中的深入应用,将显著提高运行安全性,加强关键系统和设备的自动运行监控能力,提高系统、设备的可靠性。同时采用机器人进行巡检和维修,为严重事故处理增加技术储备^[58]。

3 小型核反应堆未来发展趋势

随着我国经济高速发展,能源需求持续增长,发展具备灵活机动、性能先进、功能多样等特性的小型核反应堆对保障国家能源安全具有重要战略意义。通过在偏远地区部署 SMR,可在短周期内形成区域性能源中心,并为当地居民生活及企业生产提供稳定可靠的能量供给,对边疆、海岛等偏远地区的经济发展和能源体系建设具有显著的战略价值。具备偏远山区供电、孤岛供能以及余热回收用于供热网络的热电联产^[59]、海水淡化^[60]等多场景应用功能的能源供给体系,将成为小型核反应堆未来发展的主要方向。

新型小型核反应堆的研发设计必须真正贯彻创新理念,而绝非简单地将核反应堆的功率和物理尺寸缩小,创新性设计才是显著提升小型核反应堆经济竞争力的核心驱动力^[61]。若小型核反应堆能切实做到“即插即用”、具备独立运行和多模块组合运行能力,则可在偏远地区构建区域性

能源自给体系,为我国的能源转型提供重要助力。稳定可靠的能源供给体系不仅能在传统化工行业的生产中发挥关键支撑作用,更能在数字化、智能化产业的创新发展中展现独特优势。目前我国能源需求结构呈现多元化趋势,这一需求特征为小型核反应堆创造了更加广泛的应用场景^[62]。通过对传统热电转换系统进行工艺优化与技术革新,可实现小型核反应堆功能的多元化拓展,进而提高小型核反应堆的经济可行性与市场竞争力。此外,小型核反应堆可应用于空间探测、水上及深海等领域,为飞行器和船艇提供动力。基于此,本节给出了小型反应堆的不同场景下的发展趋势。

在传统石油化工行业领域,通过在油田现场部署模块化小堆,可实现工业供气和发电双模式周期性协同运行,进而在偏远油田打造出区域性能源供给中心。如图 7 所示,在稠油开采注汽阶段,小型核反应堆可为油井持续供应高品质蒸汽;在停止供气周期(焖井阶段),则可利用热电转换系统实现发电储能,有效提升能源的综合利用率。小型核反应堆以其稳定的蒸汽供应能力、无温室气体及硫氮氧化物排放的环保特性,成为清洁、安全、可靠、高效的能源供给方案,可应用于工业供气领域,有助于优化我国能源消费结构,对于推进我国能源结构转型,加速实现“双碳”目标具有重要意义^[63]。

在数字化产业领域,通过在数智中心部署小型核反应堆,利用蒸汽朗肯循环实现发电,同时利用氨水溶液的气化吸收余热以实现制冷。如图 8 所示,其将朗肯循环中产生的余热作为该循环的热源,直接利用热能驱动制冷循环(无压缩机),通过消耗热能的方式实现制冷,可应用于数智中心的机房冷却场景,进而降低数智中心的 PUE 值(数据中心总能耗与 IT 设备能耗的比值)。可根据实际需求部署不同数量的模块,从而为战略高科技产业提供稳定可靠的能源保障。

在空间技术领域,小型核反应堆因其能量密度高、不受环境影响、服役时间长,可以解决航天领域中传统太阳能/化学电池的功率与续航瓶颈。其大功率、长寿命、小质量及高安全的特点可用于轨道核电源、核动力飞船、星表核电源及核热推进等部署。轨道核电源主要用于为深空探测器和地球探测器提供能量,俄罗斯在 2009 年提

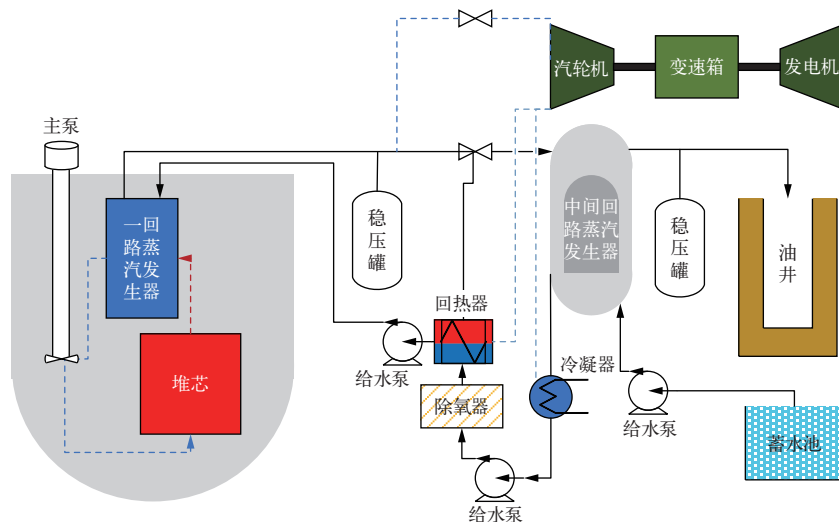


图7 稠油注汽小型核反应堆系统设计方案

Fig. 7 Design scheme of small nuclear reactor for heavy oil steam injection

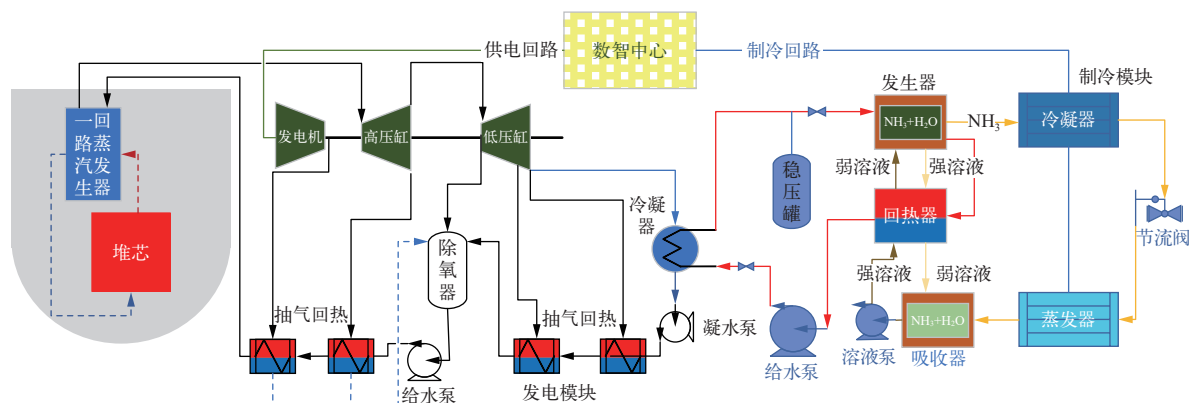


图8 数智中心供电小型核反应堆系统设计方案

Fig. 8 Design scheme for small nuclear reactor powered by digital intelligence center

出了兆瓦级空间核动力飞船技术,采用气冷堆与布雷顿循环的方案,辐射散热器采用了液滴式辐射器的设计方案;另一方面,星表核电源主要定位为月球表面或火星表面的反应堆电源,多采用热管冷却与斯特林相结合的方式;核热推进系统采用反应堆替代液体火箭发动机中的化学燃烧室,利用核能释放的热量直接加热推进工质产生推力,一般采用裂变式核热推进(NFTP)^[64]。

在深海探测及船舶动力领域,小型核反应堆的应用场景更为广泛,包括潜艇核动力、核动力浮动平台以及深海空间站等应用场景。浮动核电站是利用浮动平台建造核动力装置,机动灵活地为海上区域供电。相比于陆地核电站,浮动核电站具有易散热、选址条件较为宽松、经济性好等优势;深海空间站是在载人潜水器基础上发展起

来的新一代居住型深海作业平台,类似太空空间站可实现人员的驻留,其不受海面恶劣环境的影响,可长时间在水下独立工作。目前深海空间系统的动力主要还是依赖电池,而小型核动力深海空间系统已逐渐发展为小型核反应堆的重点应用场景。

4 总结

小型核反应堆具备安全性高、建设周期短、灵活性强、用途广泛等优势,其作为一种可靠且灵活的能源,可为工业和商业的能源消耗提供稳定的能源保障,在全球能源体系低碳转型中具有战略价值。本文首先系统地梳理了小型核反应堆的技术特点和产业应用前景,深入分析了轻水堆、高温气冷堆、液态金属快堆及熔盐堆4种不

同技术类型的小型核反应堆发展现状。然后结合国内外发展现状,归纳并阐述了5种小型核反应堆共性关键技术,包括新型材料研发及部件加工制造技术、结构材料和燃料的辐照考验、智能精确的仪控系统、高效的动力转换系统以及数字孪生与智能运维技术等,并给出了相应的发展建议。最后分析了小型核反应堆未来的应用场景,提出了多用途应用场景的能源供给才是小型核反应堆未来发展的主要趋势。

参考文献:

- [1] 张东辉,王松平,代智文.我国快堆的创新与发展[J].核科学与工程,2024,44(5):980-988.
ZHANG Donghui, WANG Songping, DAI Zhiwen. Innovation and development of fast reactors in China[J]. Nuclear Science and Engineering, 2024, 44(5): 980-988(in Chinese).
- [2] SCHLEGEL J P, BHOWMIK P K. Small modular reactors[M]//Nuclear Power Reactor Designs. Amsterdam: Elsevier, 2024: 283-308.
- [3] 邹树梁,黄斌海.小型反应堆安全特性比较分析[J].南华大学学报(社会科学版),2019,20(3):1-8.
ZOU Shuliang, HUANG Binhai. Comparative analysis of the safety characteristics of small reactors[J]. Journal of University of South China (Social Science Edition), 2019, 20(3): 1-8(in Chinese).
- [4] 曹亚丽,王韶伟,熊文彬,等.小型模块化反应堆特性及应用分析[J].核电子学与探测技术,2014,34(6):801-806.
CAO Yali, WANG Shaowei, XIONG Wenbin, et al. Features and application analysis of the small modular reactors[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(6): 801-806(in Chinese).
- [5] 马云甲.构建中国海洋核动力平台产业基地[J].中国军转民,2015(9):62-64.
MA Yunjia. Constructing China marine nuclear power platform industrial base[J]. Defence Industry Conversion in China, 2015(9): 62-64(in Chinese).
- [6] 廖宏图.空间核动力技术概览与发展脉络初探[J].火箭推进,2016,42(5):58-65,81.
LIAO Hongtu. Survey and venation analysis on space nuclear power[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(5): 58-65, 81(in Chinese).
- [7] CARELLI M D, INGERSOLL D T. Handbook of small modular nuclear reactors[M]. Netherlands: Elsevier, 2014: 3-24.
- [8] MYCLE S. 国际清洁能源发展报告(2015)[C]//国际清洁能源论坛.澳门:[出版者不详],2015.
- [9] 佚名.双碳情报动态[J].高科技与产业化,2021,27(8):32-35.
- [10] 刘志铭,丁亮波.世界小型核电反应堆现状及发展概况[J].国际电力,2005(6):27-31.
LIU Zhiming, DING Liangbo. The current status and future development of small nuclear power reactors[J]. International Electric Power for China, 2005(6): 27-31(in Chinese).
- [11] IAEA. Small modular reactors: Advances in SMR developments 2024[R]. Vienna: IAEA, 2024.
- [12] 周培德,侯斌,陈晓亮,等.小型反应堆技术发展趋势[J].原子能科学技术,2020,54(增刊):218-225.
ZHOU Peide, HOU Bin, CHEN Xiaoliang, et al. Development trend of small reactor technology[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(Suppl.): 218-225(in Chinese).
- [13] IAEA. Advances in small modular reactor technology developments: IAEA advanced reactors information system (ARIS)[R]. Vienna: IAEA, 2020, https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf.
- [14] KHAN N A, JAMIL M, ARA A, et al. Explicit solution for time-fractional batch reactor system[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2011, <https://doi.org/10.2202/1542-6580.2602>.
- [15] GREENSPAN E, HONG S G, LEE K B, et al. Innovations in the ENHS reactor design and fuel cycle[J]. Progress in Nuclear Energy, 2008, 50(2-6): 129-139.
- [16] 张作义,张亚军,贾海军.低温核供热堆关键技术[M].上海:上海交通大学出版社,2023.
- [17] IAEA. Design safety considerations for water cooled small modular reactors incorporating lessons learned from the Fukushima Daiichi accident[R]. Vienna: IAEA, 2013.
- [18] ZVEREV D L, PAKHOMOV A N, POLUNICHEV V I, et al. RITM-200: New-generation reactor for a new nuclear icebreaker[R]. [S. l.]: [s. n.], 2013.
- [19] 刘聚奎,唐传宝.俄罗斯一体化压水堆 ABV-6M 综述[J].核动力工程,1997,18(3):88-92.
LIU Jukui, TANG Chuanbao. Summary of Russian integrated pressurized water reactor ABV-6M[J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 18(3): 88-92(in Chinese).
- [20] 宋丹戎,秦忠.“玲龙一号”技术方案及示范工程进展[J].中国核电,2018,11(1):21-25.
SONG Danrong, QIN Zhong. Progress of LING LONG SMR technology and demonstration project[J]. China Nu-

- clear Power, 2018, 11(1): 21-25(in Chinese).
- [21] IAEA. Coated particle fuels for high temperature gas cooled small modular reactors, IAEA-TECDOC-2090[R]. Vienna: IAEA, 2025.
- [22] WU Z, LIN D, ZHONG D. The design features of the HTR-10[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218(1/2/3): 25-32.
- [23] 上海电气参建全球首座第四代核电站投入商运[J]. 机械制造, 2023, 61(12): 79.
Shanghai Electric participated in the construction of the world's first fourth-generation nuclear power plant and put it into commercial operation[J]. Machinery, 2023, 61(12): 79(in Chinese).
- [24] SAITO S, TANAKA T, SUDO Y. Design of high temperature engineering test reactor (HTTR) and associated research and development[J/OL]. Transactions of the Atomic Energy Society of Japan, 1994, <https://doi.org/10.11484/jaeri-1332>.
- [25] 杨红义. 快堆热工水力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2022.
- [26] 吕兆福, 马勇刚, 乔晋红. 中国实验快堆调试管理[J]. 中国核电, 2014, 7(2): 168-172.
LV Zhaofu, MA Yonggang, QIAO Jinhong. Commissioning management for CEFR[J]. China Nuclear Power, 2014, 7(2): 168-172(in Chinese).
- [27] PETROCHENKO V, TOSHINSKY G, KOMLEV O. SVBR-100 nuclear technology as a possible option for developing countries[J]. World Journal of Nuclear Science & Technology, 2015, 5(3): 221-232.
- [28] SIENICKI J J, MOISSEYTSOV A, YANG W S, et al. Status report on the small secure transportable autonomous reactor (SSTAR)/lead-cooled fast reactor (LFR) and supporting research and development[R]. US: ANL, 2008.
- [29] ALEMBERTI A, CARMELLO M, FRIGNANI M, et al. ALFRED reactor coolant system design[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 370: 110884.
- [30] 秋穗正, 张大林, 苏光辉, 等. 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(增刊): 64-75.
QIU Suizheng, ZHANG Dalin, SU Guanghui, et al. Study on inherent security and related key issues of new concept molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(Suppl.): 64-75(in Chinese).
- [31] 陈仁宗, 王冠. 先进小型反应堆技术现状及未来发展趋势研究[J]. 科技视界, 2018(3): 15-18.
CHEN Renzong, WANG Guan. Current status and development tendency of advanced small reactors[J]. Science & Technology Vision, 2018(3): 15-18(in Chinese).
- [32] 许琦敏. 世界唯一运行的钍基熔盐实验堆在甘肃建成, 上海将成供应链基地[EB/OL]. https://www.cas.cn/cm/202504/t20250411_5062915.shtml.
- [33] MIGNACCA B, LOCATELLI G. Economics and finance of molten salt reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 129: 103503.
- [34] 李晨曦, 伍浩松. 加韩企业合作推进一体化熔盐堆的热电联供应用[J]. 国外核新闻, 2022(8): 14.
LI Chenxi, WU Haosong. Canadian and Korean enterprises cooperate to promote the integration of molten salt reactor's cogeneration supply[J]. Foreign Nuclear News, 2022(8): 14(in Chinese).
- [35] MILIVOJEVIC S, PETROVIC M M, STEVANOVIC V D, et al. Techno-economic comparison of a large-scale nuclear power plant, small modular reactors, and wind and solar power plant deployment[J]. Energies, 2025, 18(9): 2355.
- [36] 刘建阁. 小型模块化反应堆能源科学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2023.
- [37] 于锐, 顾龙, 姚存峰, 等. 加速器驱动次临界系统用嬗变核燃料研究进展分析[J]. 材料导报, 2024, 38(7): 5-15.
YU Rui, GU Long, YAO Cunfeng, et al. Advances in research on transmutation fuel for accelerator driven sub-critical system[J]. Materials Reports, 2024, 38(7): 5-15(in Chinese).
- [38] 梁瑞仙. 液态铅铋合金综合氧控机理及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [39] LUCY A. 拥抱增材制造给先进核反应堆带来的前景[J/OL]. 国际原子能机构通报, 2023, <http://www.iaea.org/bulletin>.
- [40] 伍浩松, 张焰, 戴定. 3D 核电打印现状及前景[J]. 中国核工业, 2017(7): 45-47.
WU Haosong, ZHANG Yan, DAI Ding. Present situation and prospect of 3D nuclear power printing[J]. China Nuclear Industry, 2017(7): 45-47(in Chinese).
- [41] 赵麒麟. 3D 打印技术在核能相关领域的应用调查研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(1): 138-140.
- [42] 茹俊, 庞华, 焦拥军, 等. 压水堆燃料组件辐照考验技术研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(增刊 1): 175-177.
RU Jun, PANG Hua, JIAO Yongjun, et al. Study on irradiation test technology of PWR fuel assembly[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(Suppl.1): 175-177(in Chinese).
- [43] 罗琦, 韩泳江. 关于布局建设快中子高通量研究堆的建议[J]. 中国核工业, 2023(3): 16, 12.

- [44] 向美琼, 刘艳阳, 青先国, 等. 光纤传感技术在核电厂的应用研究[J]. 自动化仪表, 2019, 40(6): 132-136.
XIANG Meiqiong, LIU Yanyang, QING Xianguo, et al. Research on application of optical fiber sensing technology in nuclear power plant[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(6): 132-136(in Chinese).
- [45] 王伟, 李金洋, 毛国培, 等. 温度弱敏感光纤高温压力传感器[J]. 物理学报, 2024, 73(1): 224-232.
WANG Wei, LI Jinyang, MAO Guopei, et al. Optical fiber high-temperature pressure sensor with weak temperature sensitivity[J]. Acta Phys Sin, 2024, 73(1): 224-232(in Chinese).
- [46] 郭政佑, 严强, 李金平, 等. 面向高温应用的聚合物先驱体陶瓷性能调控及其传感器研究进展[J/OL]. 高分子通报, <https://link.cnki.net/urlid/11.2051.06.20250527.1000.001>.
GUO Zhengyou, YAN Qiang, LI Jinping, et al. Research progress on performance regulation and sensor of polymer derived ceramics for high temperature applications [J/OL]. Polymer Bulletin, <https://link.cnki.net/urlid/11.2051.06.20250527.1000.001>(in Chinese).
- [47] 赵正成, 罗皓天, 赵亚楠, 等. 氦氙布雷顿循环系统工质热物性及热力性能研究[J]. 核技术, 2025, 48(4): 161-174.
ZHAO Zhengcheng, LUO Haotian, ZHAO Yanan, et al. Analysis on thermophysical property and thermodynamic performance of He-Xe Brayton cycle system[J]. Nuclear Techniques, 2025, 48(4): 161-174(in Chinese).
- [48] 黄彦平, 王俊峰, 刘光旭, 等. 超临界二氧化碳热质传递与热力循环[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2019.
- [49] 郭瑞阳, 杨红义, 乔鹏瑞, 等. 基于液态金属堆的超临界CO₂ 动力转换系统方案研究[C]//中国核学会核反应堆热工流体力学分会第三届学术年会暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室 2023 年度学术年会. [出版地不详]: [出版者不详], 2023.
- [50] 郭嘉琪, 朱含慧, 李明佳, 等. 铅基堆超临界 CO₂ 复合循环发电系统热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(1): 95-103.
GUO Jiaqi, ZHU Hanhui, LI Mingjia, et al. Thermodynamic analysis of combined supercritical carbon dioxide brayton cycle applied to lead-cooled fast reactor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(1): 95-103(in Chinese).
- [51] SIENICKI J, WADE D. Nonproliferation features of the small secure transportable autonomous reactor (SSTAR) for worldwide sustainable nuclear energy supply[J]. Transactions of the American nuclear society, 2005, 93: 340-341.
- [52] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [53] 胡健, 宿吉强, 李言瑞, 等. 国外空间核动力技术发展现状及对我国的启示[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(6): 33-35.
HU Jian, SU Jiqiang, LI Yanrui, et al. Development status of foreign space nuclear power technology and its enlightenment to China[J]. Industrial & Science Tribune, 2022, 21(6): 33-35(in Chinese).
- [54] HAHN D H, KIM Y I, LEE C B, et al. Conceptual design of the sodium-cooled fast reactor kalimer-600[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2007, 39(3): 193-206.
- [55] 杨红义, 杨晓燕, 张东旭, 等. 基于超临界二氧化碳动力转换系统的革新型钠冷快堆关键技术研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(3): 324-340.
YANG Hongyi, YANG Xiaoyan, ZHANG Dongxu, et al. Key technology research of evolutionary sodium-cooled fast reactor coupled with supercritical CO₂ power conversion system[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2021, 51(3): 324-340(in Chinese).
- [56] 陈玉昇, 杨燕华, 林萌, 等. 基于主元分析法的核反应堆关键参数提取研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(增刊 2): 35-38.
CHEN Yusheng, YANG Yanhua, LIN Meng, et al. Research on key parameters extraction of nuclear reactor based on principal component analysis[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(Suppl. 2): 35-38(in Chinese).
- [57] 贺士晶. 核动力装置参数优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [58] 叶奇蓁. 未来我国核能技术发展的主要方向和重点[J]. 中国核电, 2018, 11(2): 130-133.
YE Qizhen. The main direction and focus of China's nuclear energy technology development in the future[J]. China Nuclear Power, 2018, 11(2): 130-133(in Chinese).
- [59] 孙银锋, 李世昌, 李洋, 等. 考虑小型模块化核反应堆-氢热电联产参与调峰的多类型电源优化调度[J]. 高电压技术, doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250166.
SUN Yinfeng, LI Shichang, LI Yang, et al. Optimized scheduling for multiple type power sources considering the participation of small modular reactor-hydrogen co-generation in peak shaving[J]. High Voltage Engineering, doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250166(in Chinese).
- [60] 郝晓地, 朱开宇, 刘然彬. 小型模块化核反应堆海水淡化技术[J]. 中国给水排水, 2025, 41(4): 1-8.
HAO Xiaodi, ZHU Kaiyu, LIU Ranbin. Seawater desali-

- nation technology using small modular nuclear reactors[J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(4): 1-8(in Chinese).
- [61] 刘玮. 我国核能供热发展及经济性问题的研究[J]. *中国核工业*, 2024(5): 27-30.
LIU Wei. Study on the development and economy of nuclear heating in China[J]. *China Nuclear Industry*, 2024(5): 27-30(in Chinese).
- [62] 孙宝东, 赵树成, 张健. 小型反应堆与煤电机组融合发展面临的问题研究[J]. *中国能源*, 2024, 46(5): 37-45.
SUN Baodong, ZHAO Shucheng, ZHANG Jian. Research and suggestions on the facing problems of integration development of small reactors and coal power units[J]. *Energy of China*, 2024, 46(5): 37-45(in Chinese).
- [63] 熊厚华, 杜继富, 曾正魁, 等. 模块式小型反应堆研发现状及前景分析[J]. *价值工程*, 2015, 34(2): 30-31.
XIONG Houhua, DU Jifu, ZENG Zhengkui, et al. Research and development status and prospect analysis of modular miniature nuclear power reactor[J]. *Value Engineering*, 2015, 34(2): 30-31(in Chinese).
- [64] 苏光辉, 章静, 王成龙. 核能在未来载人航天中的应用[J]. *载人航天*, 2020, 26(1): 1-13.
SU Guanghui, ZHANG Jing, WANG Chenglong. Application of nuclear energy in future manned space flight[J]. *Manned Spaceflight*, 2020, 26(1): 1-13(in Chinese).