

铅基反应堆海洋核动力发展研究

吴宜灿^{1, 2, 3, 4*}, 柏云清^{1, 2, 3}, 李春京^{3, 5}, 李阳^{3, 5}, 刘少军^{1, 2, 3}, 王芳^{1, 2, 3},
蒋洁琼^{1, 2, 3}, 吴庆生¹, 刘超^{1, 4}, 周丹娜^{3, 5}, 凤麟核团队

(1. 中子科学国际研究院, 山东青岛 266199; 2. 山东大学核科学技术研究院, 济南 250061; 3. 山东省中子科学技术重点实验室, 山东青岛 266199; 4. 中子科学(重庆)研究院有限公司, 重庆 401331;
5. 国科中子能(青岛)研究院有限公司, 山东青岛 266041)

摘要: 铅基反应堆(铅基堆)核动力具有固有安全、小型轻量、长寿高效等突出优点, 在先进海洋装备、无人潜航器、深海空间站的能源动力上应用前景广阔; 在加快建设海洋强国的背景下, 保障海洋能源供给成为重要的基础条件, 开展铅基堆海洋核动力发展研究是推动我国海洋装备能源动力技术革新的重要内容。本文总结了海洋核动力的应用场景与发展需求, 从技术特征、代表性应用、研制现状等方面系统梳理了铅基堆核动力的发展概况, 凝练和剖析了包括核燃料与包壳材料、一回路关键设备、冷却剂工艺与氧测控、先进发电技术在内的铅基堆海洋核动力关键技术。立足国情研判了铅基堆海洋核动力面临的发展挑战, 提出了低温铅基堆海洋核动力、高温高效铅基堆海洋核动力、一体化全自然循环铅基堆海洋核动力等可行技术路线。研究建议, 强化前瞻性配套专项技术研发、加快部署装备示范工程, 将铅基堆纳入重大能源战略、加快建设标准体系, 设置国家级联合研发机构、构建科技创新和产业发展新模式, 更好服务国家海洋战略并推动海洋核动力跨越式发展。

关键词: 铅基反应堆; 海洋核动力; 海洋装备; 深海核电源; 无人潜航器

中图分类号: TL413 文献标识码: J

Development of Lead-Based Reactor Marine Nuclear Power

Wu Yican^{1, 2, 3, 4*}, Bai Yunqing^{1, 2, 3}, Li Chunjing^{3, 5}, Li Yang^{3, 5}, Liu Shaojun^{1, 2, 3}, Wang Fang^{1, 2, 3},
Jiang Jieqiong^{1, 2, 3}, Wu Qingsheng¹, Liu Chao^{1, 4}, Zhou Danna^{3, 5}, FDS Consortium

(1. International Academy of Neutron Science, Qingdao 266199, Shandong, China; 2. Institute of Nuclear Science and Technology, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Shandong Key Laboratory of Neutron Science and Technology, Qingdao 266199, Shandong, China; 4. International Academy of Neutron Science (Chongqing), Chongqing 401331, China; 5. Institute of Neutronic Energy Co. Ltd., Qingdao 266041, Shandong, China)

Abstract: Lead-based reactor nuclear power has the advantages of inherent safety, compact size, light weight, long service life, and high efficiency, and it is widely applied to advanced marine equipment, unmanned underwater vehicles, and deep-sea space stations for energy and power purposes. Conducting research on lead-based reactor marine nuclear power is key to the technological innovation of energy and power for marine equipment in China. This study clarifies the application scenarios and development demands of marine nuclear power, summarizes the development status of lead-based reactor nuclear power from the aspects of

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-04-17

通讯作者: *吴宜灿, 中子科学国际研究院研究员, 中国科学院院士, 研究方向为核科学技术及其交叉领域; E-mail: yican.wu@fds.org.cn

资助项目: 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202205200); 山东省泰山学者工程项目(TSTP20231246)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

technical characteristics, representative applications, and research status, and analyzes corresponding key technologies including nuclear fuel and cladding materials, key components in the primary loop, coolant processes and oxygen control, and advanced power generation technologies. Moreover, the study explores the development challenges for lead-based reactor marine nuclear power and proposes there feasible technical routes: low-temperature lead-based reactor marine nuclear power, high-temperature and high-efficiency lead-based reactor marine nuclear power, and integrated natural-circulation lead-based reactor marine nuclear power. Furthermore, we propose the following suggestions to promote the leapfrog development of marine nuclear power in China: (1) strengthening research and development (R&D) of specialized technologies for the lead-based reactor marine nuclear power and accelerating the deployment of demonstrative projects; (2) incorporating lead-based reactors into the country's major energy strategies and creating a standards system; (3) establishing national joint R&D centers and creating new models for technological innovation and industrial development.

Keywords: lead-based reactor; marine nuclear power; marine equipment; deep-sea nuclear power station; unmanned underwater vehicle

一、前言

发展海洋经济、保护海洋生态环境、加快建设海洋强国上升为国家战略,海洋能源绿色低碳转变、海洋各领域关键技术突破都需要能源技术革新。一方面,实现能源在海洋装备中的持续稳定供给,是发展海洋经济、建设海洋强国的必由之路;我国面临海上战略威慑,发展先进海洋国防装备是突破“岛链”封锁的重要途径之一。另一方面,海洋观测能力建设、海洋经济开发等需求愈加紧迫,深海观测网、海底采矿车、深海空间站等装备加快应用,为海洋核动力系统发展提供了重大牵引:功率密度高、体积紧凑,满足海洋装备舱内空间布设要求;安全可靠、使用周期长,满足海洋装备长期安全运行需求;运行灵活、智能控制,满足无人条件下系统自主运行需求。当然,这时海洋核动力系统的运行效率、经济性、运行维护等提出了更高要求。

核动力具有功率密度高、续航能力强、不依赖氧气、不排放废气、清洁低碳等优点,尤其适用于海洋装备的能源动力供应^[1-4]。目前,世界上成功用于海洋核动力的核反应堆类型有压水堆和液态金属堆。美国^[5]、苏联^[6]的第一艘核潜艇均采用压水反应堆作为动力系统,而美国建造的第二艘核潜艇则换用钠冷反应堆^[7],水下航速达到30节(1节=1.852 km/h),体现了液态金属反应堆的功率密度优势;为进一步提高航速,苏联开发了铅基反应堆(铅基堆)核动力潜艇,创造了核潜艇水下航速世界纪录^[8]。与传统压水堆相比,铅基堆具有小型轻量、固有安全、长寿高效、运行灵活等优点,逐渐成为海洋核动力的重要发展方向,契合先进海洋装备对核动力的需求^[9,10]。

本文在调研海洋核动力应用场景及发展需求的基础上,分析铅基堆海洋核动力发展现状,探讨研发过程中需解决的材料、工艺、关键设备等方面的科学技术问题;剖析铅基堆海洋核动力发展面临的挑战,形成未来技术路线、实施要点、发展建议,为先进海洋核动力装备发展研究提供参考和依托。

二、海洋核动力应用场景与发展需求

(一) 海洋核动力的原理与应用场景

海洋核动力作为一种具有极高能量密度的能源,可为海洋装备提供持续稳定的能源动力(见图1),在民用和国防领域均有突出优势。海洋核动力主要由一回路反应堆系统、二回路热力循环系统构成:前者包括反应堆容器、堆芯、堆内构件、控制棒驱动系统、驱动泵、换热器等主设备,冷却剂通过驱动与流动传热,将堆芯产生的热量传递至后者;后者包括给水泵、汽轮机、发电机、冷凝器、最终热阱等设备,工质吸收堆芯热量后,通过汽轮机和发电机将热能转换成海洋装备的电能或动力。海洋核动力应用场景大致分为3类。

1. 大型海洋装备和海上浮动平台

航母、巡洋舰、核潜艇^[11,12]、破冰船、商船、浮动核电站^[13]等大型海洋装备和海上浮动平台,所需功率水平为数十兆瓦级到数百兆瓦级,对核动力系统的体积质量限制较小,而对安全性、经济性、续航能力要求很高。以美国核动力航母为代表的应用实践表明,海洋军事强国对海洋核动力高度重视。国际水上海洋核动力装备也由军用向民用拓展,如俄罗斯核动力破冰船在北极航道开辟和维护方面起到重要作用,海上浮动核电站建设实现商

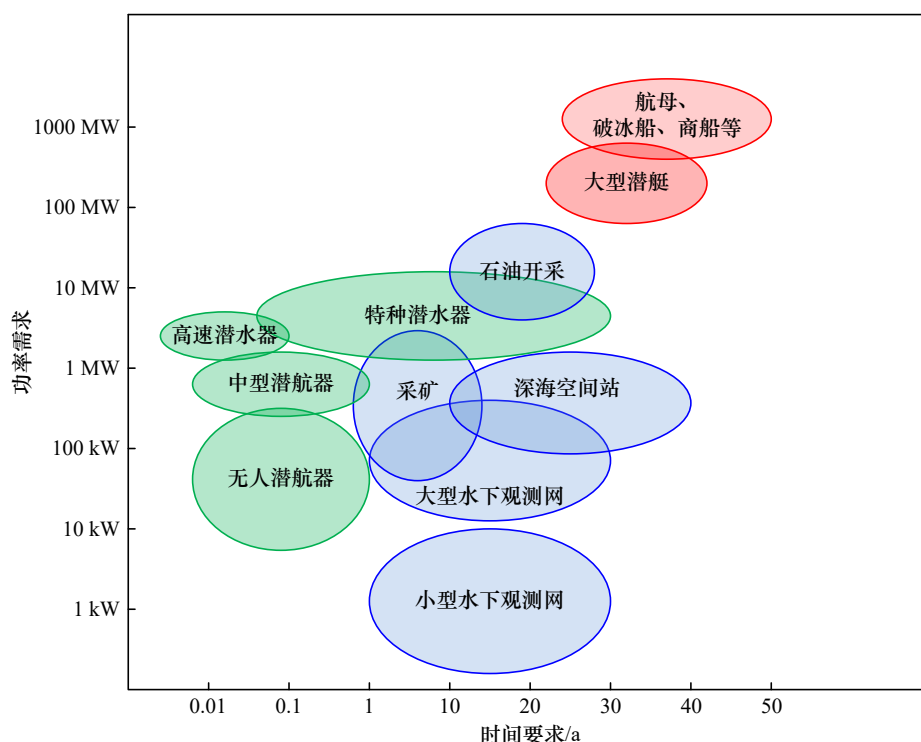


图1 海洋装备的功率和运行时间需求

业运行。我国在20世纪70年代实现了核潜艇应用，但目前尚未实现水面核动力舰船的突破。

2. 小型水下移动装备

特种水下装备、无人潜航器、海底采矿设备、深海空间站等^[14,15]小型水下移动装备，对核动力系统小型轻量化提出严苛要求，也对机动性、低噪声、运行寿命等提出较高要求，所需功率水平为数十千瓦级到数兆瓦级。① 特种水下装备执行特种攻击、水下布雷及排雷、水下武器试验等任务，具有大潜深、高航速、长寿命特点，能够显著提升军事装备体系能力。② 在陆地资源趋于乏困、海洋资源开发成为探索重点的背景下，先进核动力无人潜航器因其小型化、安全长效、隐身性好、大潜深的独特优势，能够高效执行水下人员及装备运输、水下情报收集、水下测绘、水下侦察、深海打捞、地球物理观测、海底地形详细勘测、海底信息通道控制等任务。③ 海底“区域”内蕴藏着丰富的金属、能源和生物资源，深海海底资源开采成为大国能源资源竞争的新形式，海底采矿设备将发挥关键作用。

3. 水下固定的监测装置

深海观测网^[16]、深海预警系统、水下预置系统

等水下固定的监测装置，对小体积、强耐压、长寿命、高可靠性、长期免维护有着特殊的要求，所需功率水平为千瓦级到兆瓦级。① 海洋资源尤其是深海资源丰富，观测海洋的温度、盐度、流速、海底地形、矿产资源、海洋生物等是保护和开发海洋资源的必要条件，发展海洋科学需要以长期的海洋观测为基础，深海观测网成为发展海洋经济的亟需。② 深海预警系统为水下作战力量提供侦察和探测能力，在深海海域布置监听网，有助于维护军事力量安全、实时掌握对方动态。③ 水下预置系统作为一种新型的水下攻防装备，预先放置于大陆架、岛链等特定海域并进行长时间潜伏，通过远程方式激活后执行侦察、打击、封锁等任务。

(二) 海洋核动力发展需求

1. 小型轻量

不同于陆上核电站，海洋核动力受空间尺寸、排水量等因素的限制，核心要求表现为小型化和紧凑化。在相同的空间内提供更大的推进功率，使海洋核动力装置具有更高的航速、更强的机动能力。核动力系统小型化节省的空间，用于改善人员居住和工作条件、装载更多生活或后勤物资。特别是对

于水下装置，核动力系统小型化可使装置直径进一步缩小、总体性能显著增强。面对深海环境的巨大压力，在耐压外壳厚度相同或耐压外壳质量在排水量中占比相同的条件下，小直径的水下核动力装置具有更大的工作潜深和航速。

2. 长寿高效

海洋核动力的长寿命主要指堆芯寿命长，即反应堆一次装料后满功率运行使用的时间足够长。提高堆芯寿命，将减少海洋核动力装置在运行使用期间的换料次数，增加海洋核动力装置的使用率与服役时间，也可减少放射性废物量。特殊类型的水下装备在换料时一般需要切割和重新焊接耐压外壳，这对深海装备的结构安全构成潜在风险，而长寿命的海洋核动力装置有利于提高深海装备的使用效能。

3. 安全可靠

在远洋、深海、无人的复杂环境条件下，不具备进行核动力系统大修所需的专业人员与专业工具条件，事故后人员不易疏散，因而海洋核动力的安全可靠事关海洋核动力装置既定任务的完成以及整个装置和人员的安全。在大型水面/水下核动力装置中，通常采用双堆布置、提高一回路系统自然循环能力、减少运动部件等措施，提高核动力系统的固有安全性和可靠性，降低事故条件下的人员干预要求。

4. 灵活机动

海洋装备在海洋洋流及海域态势多变的复杂条件下航行，需要具有快速调节动力系统输出功率的能力，这对反应堆提出了快速启停和升降功率的要求。随着无人潜航器技术的发展，智能化成为研究热点，加之应用环境复杂多变，对核动力系统自动控制和智能化技术提出了更高的要求。核动力系统的自主探测、自主调控、自主运行等运行灵活性已成为共性要求。

5. 低噪声

低噪声是水下核动力系统的重要性能指标。反应堆一回路统主泵、推进系统主机减速齿轮箱、螺旋桨是水下核动力装置的主要噪音来源。新一代水下核动力装置较多采用新型电力驱动推进器代替传统螺旋桨及减速齿轮箱，提高反应堆一回路系统的自然循环能力，在低速航行阶段不需要运行主泵，从而降低甚至消除水下核动力系统的噪音源。

三、铅基堆海洋核动力的技术特征与发展态势

（一）铅基堆海洋核动力的技术特征

铅基堆海洋核动力采用液态铅或铅合金等铅基材料作为一回路系统的主冷却剂（见图2），是第四代核能系统的6种参考堆型之一^[17]。铅基冷却剂具有优良的中子物理、热工水力和化学特性，因而铅基堆系统表现出固有安全、小型轻量、高效长寿的技术特征。

在固有安全方面，铅基堆系统从技术层面消除场外应急需求，防止核泄漏事件发生。随着温度的升高，铅合金的中子慢化能力减弱，堆芯的反应性自动下降，具有反应性负反馈特性^[18]。铅合金沸点高，一回路系统为常压运行，不会发生冷却剂丧失事故，避免堆芯裸露和熔化的风险。铅基合金可与裂变产生的气态放射性核素（碘、铯）形成化合物，将绝大部分放射性物质滞留在铅基冷却剂内，显著降低放射性物质向环境释放的风险^[19]。

在小型轻量方面，铅基堆系统布置灵活，利于在体积质量要求严格的海洋装备上应用。铅合金的载热和传热性能优异（热导率约是水的30倍），支持反应堆高功率密度运行，降低堆芯体积。铅合金的 γ 屏蔽性能良好，可显著减小辐射屏蔽系统体积。铅基堆主系统在常压状态下运行，无需高压安注系统等专设安全设施，使反应堆系统布局更为简化紧凑^[20,21]。

在长寿高效方面，铅基堆系统的能量利用率高、经济性好，支持海洋装备的长寿命应用。铅合金具有低的中子慢化能力、低的中子俘获截面等特点，中子能谱硬，燃料增殖能力强，利于提高核燃料的利用效率。铅基堆中子能谱易调整，反应性可

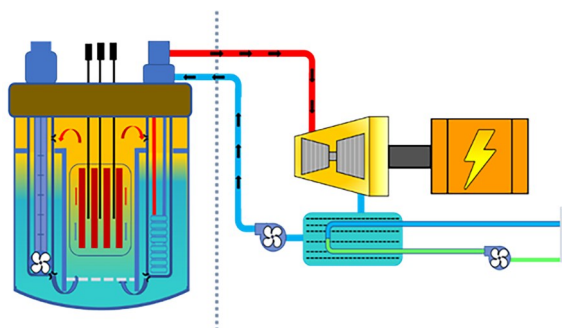


图2 铅基堆系统原理图

取得长周期平衡，一次装料可稳定运行 10~30 a，续航能力强。

（二）铅基堆海洋核动力的早期应用

20 世纪 60 年代，苏联为了应对美国战略核潜艇的威慑，启动了高航速、大潜深的小型攻击型核潜艇研制工作。考虑到传统压水堆核动力不能满足潜艇的体积、质量、水下速度的设计要求，技术人员提出了铅铋合金冷却反应堆技术方案，研制了 BT-1 型、OK-550 型、BM-40/A 型铅铋反应堆（见表 1）。1969 年，世界第一艘铅基堆核潜艇开始下水测试，后续建造了 7 艘以铅铋反应堆为动力源的“阿尔法”级核潜艇，创造了水下巡航速度（42 节）的世界纪录^[22]。

第一艘铅基堆核潜艇（645 型）曾发生堆芯熔化事故。事故分析发现，对冷却剂氧浓度控制、杂质纯净化等认识不足，在部分设备选型以及系统操作规范方面缺乏针对性解决方案，一系列误操作最终导致堆芯熔化^[23]。经过针对性研究，技术人员攻克了铅铋冷却剂氧测控和纯化技术，解决了反应堆冷却剂管道堵塞问题，为铅基堆海洋核动力发展扫除了技术障碍^[24]。2006 年，最后一艘“阿尔法”级核潜艇退役拆解，反应堆系统及设备仍处于良好状态^[25]。

（三）铅基堆海洋核动力的研制进展

铅基堆系统因其突出的安全性，在 2002 年入选第四代堆的代表堆型^[26]。目前，铅基堆技术得到广泛关注，发展迅速。俄罗斯积极推进铅基堆的商业核电站应用，BREST-OD-300 示范项目已开工并计划 2026 年完成建设^[27,28]。欧盟在多期科技框架计划的连续支持下，形成了较为完整的铅基堆发展路线和规划，如意大利于 2013 年开始实施欧洲先进铅基堆示范装置的设计建造工作^[29,30]，比利时投资

5.58 亿欧元支持高科技应用多用途混合研究堆（MYRRHA）项目（2038 年建成铅基堆）^[31,32]。瑞典皇家理工学院成立了铅基堆开发公司，计划建造小型模块化铅冷堆（3~10 MWe）^[33]。美国能源部支持多个国家实验室联合开展铅基堆的设计工作。

近年来，随着先进海洋装备对核动力的需求更为迫切，小型铅基堆核动力技术受到更多关注^[34]。2018 年，俄罗斯发布了“波塞冬”巨型核动力鱼雷计划，该鱼雷具有“无限”航程、潜深 1000 m、航速 100 节等优越性能^[35]。2019 年，俄罗斯发布了第五代“莱卡”级核潜艇设计方案^[36]，其功率质量比较压水堆核动力提高 1.5~2.5 倍^[37]。依据官方公开的性能数据、俄罗斯在铅基堆方面的技术积累推测，“波塞冬”“莱卡”采用铅铋冷却反应堆作为动力^[38]。日本东京工业大学研究团队设计了基于铅基堆的水下核电源方案，可用于深海观测网、深海机器人供电，电功率分别为 40 kWe、200 kWe^[39]。韩国企业研制了基于铅基堆的超长寿命动力电源，可以部署到浮动电站、商船、破冰船^[40]。

我国铅基堆研究始于 20 世纪 80 年代中后期。在中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能—ADS 嬗变系统”等项目的支持下，凤麟核团队牵头完成了铅基堆基础研究和关键技术攻关^[41~43]。近年来，我国在小型铅基堆技术方向取得了显著进展，形成了多种海洋核动力方案。凤麟核团队基于“从源头确保核安全”的理念，率先提出了第五代核能系统的发展设想^[44]；该核能系统突出亲近性、灵活性、智能性特征，契合先进海洋装备对于核动力技术的应用需求。凤麟核团队研发了适配海洋核动力的超小型铅基堆“核电宝”技术，建造了系列实验回路装置群、十兆瓦级“核电宝”工程集成模拟实验样机，推动了铅基堆技术从单项技术验证到工程集成验证（见图 3、图 4）。此外，我国主要核

表 1 铅铋反应堆在潜艇的应用情况			
反应堆类型	反应堆结构	热功率/MWt	潜艇应用情况
BT-1 型	回路式结构	73	645 型（1 艘）
OK-550 型	组件式	150	705 型（1 艘）
	半一体化堆		
BM-40/A 型	组件式	150	705K 型（3 艘）
	半一体化堆		705M 型（3 艘）



图 3 液态铅基合金实验回路装置群



图4 十兆瓦级“核电宝”工程集成模拟实验样机

电集团均将铅基堆列入发展规划，西安交通大学、兰州大学、清华大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、华北电力大学、中山大学等开展了铅基堆系统的概念设计和技术研发^[45-47]。

四、铅基堆海洋核动力关键技术

（一）核燃料与包壳材料

由核燃料和包壳组成的堆芯是铅基堆核动力系统的核心构件，直接决定续航能力和能量传输效率。二氧化铀是应用广泛的核燃料，技术成熟，在压水堆核电站、海上浮动电站、破冰船上获得了充分验证。然而，二氧化铀热导率低、铀密度低，针对未来铅基堆海洋核动力进一步小型紧凑化、高效率的应用目标，需要开发热导率和铀密度更高的新型燃料（如氮化铀、碳化铀）^[48]。其中，氮化铀中的铀密度高于二氧化铀约40%，可显著减小堆芯尺寸^[49,50]，是未来核燃料的重要发展方向之一。

燃料包壳是核燃料放射性包容的第一道屏障。铅基堆燃料包壳管长期工作在核燃料与液态铅合金产生的高温、高能中子辐照、强腐蚀环境下，这对材料的高温强度、抗辐照、耐蚀性能提出了极高要求。研制新一代铅基堆包壳材料、评估包壳材料的长期服役性能，成为铅基堆发展的关键课题。鉴于包壳的重要性，包壳材料的实际堆内应用需要经过完备的性能考验，尤其需要积累长周期系列的腐蚀和辐照数据。铁素体钢/奥氏体钢具有良好的高温力学性能、辐照稳定性、可加工性（其中的富Cr氧化膜在450℃以下条件下具有良好的稳定性），加之铅铋腐蚀及堆内辐照数据积累情况良好，可以满足第一代铅基堆的运行要求。在450~550℃条件下，需要对铁素体钢/奥氏体钢进行改性或者增加

涂层保护，以使材料表面在液态铅基合金中自发形成致密的富Al/Si氧化膜，进一步提高材料抗腐蚀性能^[51]。在600℃以上条件下，通常需要采用氧化物弥散强化铁素体/马氏体钢或者奥氏体钢^[52]，甚至采用难熔金属及其合金、SiC_f/SiC陶瓷复合材料，才能进一步提升包壳材料的高温力学性能。

（二）一回路关键设备

铅基堆一回路系统的关键设备主要有反应性控制机构、冷却剂驱动泵、主换热装置^[53]。受特殊的运行环境和空间限制，海洋核动力的小型高效、安全可靠、环境适应性、全系统耦合集成能力等面临着较高的要求。

高功率铅基堆较多采用机械驱动屏蔽泵，以应对海洋特殊的摇摆晃动等应用环境，防止一回路放射性物质经由机械泵密封处泄漏。机械泵叶轮长期高速运行在液态铅基合金环境下，需要重点研发耐高温、防冲刷的腐蚀材料及涂层技术。

面向特种水下装备的低噪音、长寿命应用需求，电磁驱动泵具有更好的适用性，但也存在运行效率低、系统自耗电比例高、净电输出比例低的缺点。可采取优化电磁泵内部铁芯和线圈结构等技术手段，解决电磁驱动泵存在的效率低、高温冷却问题。

主换热装置是铅基堆一回路系统与二回路冷却系统之间热量传递的枢纽，传统水介质蒸汽发生器可以设计为直流式，以获得更高的蒸汽品质、提高热电转化效率、简化系统并精简设备。采用超临界二氧化碳（S-CO₂）布雷顿循环方式可以进一步提高换热性能，需要设计液态金属耦合S-CO₂工质的换热器方案；一次侧液态金属选型需要考虑低流阻、冷却剂堵塞等要求，二次侧S-CO₂工质选型需要考虑提高工质换热系数、减少设备体积。

（三）冷却剂工艺与氧测控

冷却剂工艺系统用于控制液态铅合金冷却剂中的氧浓度和杂质含量，缓解关键设备结构材料腐蚀，保证铅基堆长期安全运行。向液态铅铋合金中补充氧，可使结构材料表面生成保护性氧化膜，从而减缓铅铋合金对材料基体的腐蚀。然而，如果铅铋合金中氧含量过高，铅铋合金过度氧化将形成大量浮渣，也会加重结构材料氧化腐蚀而损坏材料力学性能。因此，合理调控铅铋合金中的氧浓度对冷却剂系统

安全运行具有重要意义。鉴于铅基堆海洋核动力系统长期运行的特殊要求以及水下补给难度,不宜采用系统复杂且存在一定放射性废物问题的气相氧测控方法,可以采用基于新型氧泵的氧测控方法^[54]。

^{210}Po 防护是液态铅铋合金冷却反应堆的核心安全课题。 ^{210}Po 主要由冷却剂中 ^{209}Bi 受中子辐照活化产生,具有极强毒性和强挥发性,因而研究 ^{210}Po 在海洋装备密闭环境中的扩散行为和处理方法尤为重要。铅铋合金具有包容安全特性,可将绝大部分 ^{210}Po 以 99.8% PbPo 、0.2% 单质 Po 形式存在于铋合金中,只有极微量的 Po 挥发到覆盖气体中。为此,需要研发 Po 在线高精度监测设备、放射性 Po 气溶胶吸附及处理装置,建立实时监控和处理能力^[55]。

(四) 先进发电技术

发电系统是铅基堆核动力热电转换的核心设备。持续提高核动力系统热电转化效率、降低系统的体积与质量是技术发展方向。铅基堆主冷却剂的堆芯出口温度高 ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$),可适配多种热电转换技术。

蒸汽朗肯发电技术非常成熟,发电效率为 10%~30%,功率不低于 10 MWe。但配套系统比较复杂,需要配套抽真空、除盐水、水化学系统等设备,适用于空间、质量要求相对较低的大中型海洋核动力平台。

S-CO_2 布雷顿循环发电技术在高温 ($>450\text{ }^{\circ}\text{C}$) 工况下的热电转化效率超过传统蒸汽朗肯循环,设备体积小、系统简化,显著降低全系统体积,适用于特种水下装备^[56]。 S-CO_2 动力循环和相关部件技术进展较快,国际上完成实验室技术验证,国内完成 5 MWe 设备示范;船舶应用方案中的运行温度为 $500\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$,输出功率为 7.5 MWe^[57]。针对水下装备应用,还需解决长期运行条件下的高温高压密封、工质补给等问题。

自由活塞斯特林发电技术以外部加热使活塞往复运动的外燃机为基础,具有高效率、高可靠性、低噪声的热电转换能力^[58],功率一般不高于 1000 kWe。自由活塞斯特林取消了传统曲轴连杆结构,系统简单、技术较成熟,最高热电效率为 33.3%。国外有空间堆采用自由活塞斯特林发电技术,完成地面样机的带核试验^[59],显示了相关技术在空间、质量、可靠性上的优势。自由活塞斯特林发电技术未来应

用到海洋核电源,需要发展高精度部件加工与制备工艺,提高单机功率。

温差发电技术基于塞贝克效应原理,在从室温到 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内均可工作,发电效率为 4%~6.8%,功率不高于 100 kWe。全系统无动部件,技术成熟、可靠性高、无噪声,可长期稳定运行。针对水下装备应用,还需发展高效率、低衰减率器件,解决大规模应用面临的集成工艺问题。

五、铅基堆海洋核动力面临的发展挑战与可行技术路线

(一) 铅基堆海洋核动力发展挑战

一是铅基堆与海洋装备平台耦合关键技术研发力度不足,陆上模式堆亟待立项建设。铅基堆应用于海洋核动力装备,面临不同的海洋环境(如晃动、盐雾、深海低温等)要求,而铅基堆与海洋装备平台耦合技术、海洋环境铅基堆安全性、无人自主智能控制技术等研究未能深入开展,需要针对性部署铅基堆海洋环境适应性研究项目。国外在海洋核动力平台的发展过程中,建立了多座铅基堆核动力陆上模式堆,以充分验证反应堆安全性、积累建造运行经验。我国没有建设针对铅基堆海洋核动力应用的陆上模式堆,导致建造和运行经验欠缺。

二是铅基堆海洋核动力装备标准化技术规范、配套安全法规等尚未形成。我国现行的核工业标准与规范主要采用美国 ASME 系列规范、法国 RCC 系列规范,适用对象为陆上大型压水堆核电厂,没有涉及海洋条件的内容。铅基堆海洋核动力系统的工作原理、安全特性、设备部件工作环境等,均区别于传统陆上压水堆,导致现行的法规、规范、标准不完全适用,加大了铅基堆海洋核动力系统设计、建造、运行、维护、退役等阶段的安全监管评审难度,也使验证示范与工程应用推广进度缓慢。根据现行的配套法规和技术规范,总结形成适用于铅基堆海洋核动力装备发展的制度体系是相关装备发展亟需。

三是铅基堆海洋核动力装备发展资源相对分散,基础理论与应用技术研究脱节,在市场准入壁垒高的背景下难以形成发展合力。近年来,国家在铅基堆方面的投入稳步增长,相关核电集团、高校、科研院所积极参与铅基堆技术研发,而科研经

费有限、信息资源共享不充分、竞争环境封闭等原因，导致谱系化的铅基堆研究体系未能形成。同时，海洋核动力装备发展主要由涉核、涉海等机构负责，而从事基础和应用基础研究的科研院所、高新技术企业难以进入装备发展的“主链条”，导致装备部门的技术需求与科研机构的研究成果契合度不紧。此外，社会资本实力雄厚，投资核能技术创新以及新型海洋装备意愿明确，但受限于核能行业准入机制而使参与程度有限、合力难以形成。

（二）铅基堆海洋核动力技术路线

1. 低温铅基堆海洋核动力技术路线

根据海洋装备能源供给、核动力技术发展的迫切需求，宜优先选择技术成熟、可快速开展示范应用的低温铅基堆海洋核动力技术路线，即采用低温铅基堆技术，耦合蒸汽朗肯循环发电系统。发挥铅基堆小型化、系统简单的优势，追求实现少人化控制与操作。基于最高的技术成熟度，在大型海洋装备、海上浮动平台上快速开展应用示范。

低温铅基堆对结构材料和设备的要求低，现有反应堆技术完全满足。铅基堆包壳热点温度控制在 450°C 以下，反应堆结构材料选取成熟的奥氏体不锈钢（如316L、15-15Ti，已有较完备的材料腐蚀和辐照数据）。

铅基堆一回路系统为常压运行，辅助系统少，以减小体积并提升功率体积比，降低控制难度。参照现有压水堆技术，二回路温度可达 350°C ，以获得更高的过热度；与蒸汽朗肯循环耦合，显著提高发电效率，同步发挥技术成熟度高的优势。

2. 高温高效铅基堆海洋核动力技术路线

考虑小型水下移动装备（如无人潜航器、海底采矿设备、深海空间站）对百千瓦级到兆瓦级核动力系统进一步小型轻量化的特殊需求，采用高温铅基堆耦合S-CO₂发电技术，进一步降低系统体积和质量。

铅基堆出口温度控制在 550°C 以上，包壳热点温度超过 600°C ；采用涂层技术或材料添加Al/Si改性，提升包壳材料的抗腐蚀性能。近期发展反应堆高温耐腐蚀材料技术，开展高温铅基堆耦合S-CO₂发电系统集成技术研究，为远期推动示范应用筑牢基础。

相比蒸汽朗肯热电转换系统，S-CO₂布雷顿循环系统在体积、效率、噪声控制方面均具有优势；

尤其是运行温度超过 450°C 时，效率优势更加突出。S-CO₂发电系统采用压缩机、透平机、发电机一体化布置，兼顾节省空间和提升发电效率。

3. 一体化全自然循环铅基堆海洋核动力技术路线

考虑水下固定的监测装置（如深海观测网、深海预警系统、水下预制装备）对百千瓦级能源动力的需求，采用一体化全自然循环铅基堆并耦合斯特林发电或静态温差发电技术，以发挥体积小、耐高压、高可靠性的特点。反应堆采用全自然循环池式堆技术路线，消除运动部件，固有安全性好，长期免维护。

反应堆与发电系统一体化布置，耦合自由活塞斯特林发电或静态温差发电技术，根据外部用电需求实现智能自主控制与调节，满足水下固定装置的长期布置需求。近期开展反应堆与发电系统耦合技术研究，推动技术成熟度提升；后续结合各类应用场景的工程需求，开展系统设计与集成验证工作。

六、铅基堆海洋核动力发展建议

（一）强化前瞻性配套专项技术研发，加快部署铅基堆海洋核动力装备示范工程

建议国家层面设立支持铅基堆研发的重点科技项目，系统支持高效先进发电、核能微电网或分布式组网、核动力载具、海洋环境适应性、乏燃料后处理等铅基堆海洋核动力应用关键技术研发，提升我国在铅基堆技术领域的核心竞争力。充分利用现有的科研和产业资源，加强“产学研”协同，保障科研成果的高效顺畅转化，推动铅基堆海洋核动力技术示范应用进程。及时部署铅基堆陆上模式堆示范工程，采用成熟技术路线，加快实现铅基堆技术工程应用。通过陆上模式堆积累建造与运行经验，发展反应堆安全性验证、反应堆测试相关的总体技术和专项技术；高水平开展铅基堆及其系统、设备、部件的试验验证、操作人员培训，为铅基堆的海洋装备工程应用筑牢基础。

（二）将铅基堆纳入国家和海洋装备能源战略，加快建设铅基堆标准体系

面向海洋强国建设需求，把握海洋装备体系发展格局，深化论证铅基堆核动力装备中长期发展规

划, 将铅基堆核动力纳入国家能源战略、海洋装备能源战略的主导方向。将“坚持自主”作为铅基堆核动力技术的发展主旨, 依靠自主创新与原始创新, 建立完整的技术体系和知识产权, 确保我国在铅基堆技术领域的长期发展和竞争力, 加速赶超海洋装备核动力方面的国际先进水平。此外, 建议设立铅基堆标准体系研究专题, 由国家核安全主管部门牵头, 组织国内涉核、涉海装备部门, 铅基堆技术基础与应用技术研究单位等, 联合开展铅基堆标准化建设。高水平制定铅基堆海洋核动力设计、建造、运行、维护方面的标准, 支持提升铅基堆技术应用的安全性、可靠性和规范性, 加速铅基堆技术的产业化和市场化。

(三) 设置国家级铅基堆联合研发机构, 构建开放融合的科技创新和产业发展新模式

建议管理部门提供政策保障, 以企业为创新管理主体、科研院所为技术后援, 统筹国内铅基堆研究与应用资源, 最大程度发挥协同优势, 促进核工业创新发展。可打破行业边界、机构边界, 联合多途径、跨行业的资本和力量, 成立国家级铅基堆联合研发机构, 主导总体方案设计与关键技术攻关, 形成核心技术创新高地和新兴产业孵化基地。与优势高校联合, 开展铅基堆共性基础技术研究。培育高新技术企业, 作为铅基堆产业化实施主体, 吸引多元化社会资本投入, 加快关键技术产业应用转化。多方共建铅基堆产业园, 协同推动工程应用转化, 牵引产业链发展, 形成产业集群。稳健壮大铅基堆海洋核动力装备的研发队伍, 服务国家海洋战略、海洋核动力跨越式发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 31, 2024; **Revised date:** April 17, 2024

Corresponding author: Wu Yican is a research fellow of International Academy of Neutron Science, and a member of Chinese Academy of Sciences. His major research fields include nuclear science and technology and interdisciplinary. E-mail: yican.wu@fds.org.cn

Funding project: Laoshan Laboratory Science and Technology Innovation Project (LSKJ202205200); Shandong Province Taishan Scholars Project (TSTP20231246)

参考文献

[1] 卢川, 王仲辉, 于俊崇. 船用核动力的发展特点与启示 [J]. 核动

力工程, 2022, 43(1): 1–6.

Lu C, Wang Z H, Yu J C. Development characteristics and inspiration of marine nuclear power [J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(1): 1–6.

[2] Lee K H, Kim M G, Lee J, et al. Recent advances in ocean nuclear power plants [J]. Energies, 2015, 8(10): 11470–11492.

[3] 董海防. 海洋核动力平台发展研究综述 [J]. 船舶工程, 2019, 41(11): 5–10.

Dong H F. Review on the marine nuclear power platform development [J]. Ship Engineering, 2019, 41(11): 5–10.

[4] 郑洁, 余凡, 朱军民, 等. 海洋核动力装备国内外发展现状与前景展望 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 62–73.

Zheng J, Yu F, Zhu J M, et al. Development status and prospect of marine nuclear power equipment in China and abroad [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 62–73.

[5] Ward S A. Forged in war: The naval-industrial complex and American submarine construction [J]. Defense AR Journal, 2015, 22: 35–42.

[6] Tsylin S G, Zhimov, A D. Stages of physical investigations of the radiation shielding in the first nuclear submarine ‘Leninskii Kom-somol’ [J]. Atomic Energy, 1996, 80(2): 111–118.

[7] Levy S. Sodium fast reactors (SFRs) and recyclers [C]. Anaheim: Advances in nuclear power plants, ICAPP 2008, 2008.

[8] Gromov B F, Subbotin V I, Toshinsky G I. Application of lead-bismuth eutectic and lead melts as nuclear power plant coolant [J]. Atomic Energy, 1992, 73: 1–19.

[9] 李宗洋, 郭慧芳, 赵畅, 等. 国外铅铋堆发展及军事应用 [J]. 国外核新闻, 2020 (7): 29–31.

Li Z Y, Guo H F, Zhao C, et al. Development and military application of lead-bismuth reactors abroad [J]. Foreign Nuclear News, 2020 (7): 29–31.

[10] 伍赛特. 核动力装置应用于舰船推进领域的技术可行性分析及前景展望 [J]. 传动技术, 2023, 37(3): 45–52.

Wu S T. Technical feasibility analysis and prospect of nuclear power plant used in the field of ship propulsion [J]. Drive System Technique, 2023, 37(3): 45–52.

[11] Jones G M. The development of nuclear propulsion in the royal navy, 1946–1975 [D]. Plymouth: University of Plymouth (Doctoral dissertation), 2019.

[12] Chen X Z. A comparative analysis of Chinese and French nuclear motivations [J]. History of European Ideas, 1995, 20 (1/2/3): 261–269.

[13] 王琮, 于雷, 叶水生. 我国海上浮动核电站的核安全问题及建议 [J]. 科技导报, 2022, 40(4): 16–22.

Wang C, Yu L, Ye S S. Nuclear safety issues and development proposals of floating nuclear power plant in China [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(4): 16–22.

[14] 吴秀霞. 加快推进深海装备技术体系化发展 [N]. 中国船舶报, 2023-03-10(02).

Wu X X. Accelerating the systematic development of deep-sea equipment technology [N]. China Ship News, 2023-03-10(02).

[15] 钟宏伟, 李国良, 宋林桦, 等. 国外大型无人水下航行器发展综述 [J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(4): 273–282.

Zhong H W, Li G L, Song L H, et al. Development of large displacement unmanned undersea vehicle in foreign countries: A re-

- view [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2018, 26(4): 273–282.
- [16] 吴天元, 江丽霞, 崔光磊. 水下观测和探测装备能源供给技术现状与发展趋势 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 898–909.
Wu T Y, Jiang L X, Cui G L. Status and trends of energy power supply technologies for underwater equipment [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(7): 898–909.
- [17] 苏更林. 第四代核能系统的六大候选堆型 [J]. *百科知识*, 2022 (19): 24–27.
Su G L. Six candidate reactor types for the fourth-generation nuclear energy system [J]. *Encyclopedic Knowledge*, 2022 (19): 24–27.
- [18] 吴宜灿, 王明煌, 黄群英, 等. 铅基反应堆研究现状与发展前景 [J]. *核科学与工程*, 2015, 35(2): 213–221.
Wu Y C, Wang M H, Huang Q Y, et al. Development status and prospects of lead-based reactors [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2015, 35(2): 213–221.
- [19] Bandini G, Meloni P, Polidori M. Thermal-hydraulics analyses of ELSY lead fast reactor with open square core option [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(4): 1165–1171.
- [20] Nuclear Energy Agency. Accelerator-driven systems (ADS) and fast reactors (FR) in advanced nuclear fuel cycles: A comparative study [R]. Paris: Nuclear Energy Agency, 2002.
- [21] 吴宜灿, 柏云清, 宋勇, 等. 中国铅基研究反应堆概念设计研究 [J]. *核科学与工程*, 2014, 34(2): 201–208.
Wu Y C, Bai Y Q, Song Y, et al. Conceptual design of China lead-based research reactor CLEAR-I [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2014, 34(2): 201–208.
- [22] 施征. 依然神秘的“阿尔法” [J]. *舰载武器*, 2006 (9): 51–54.
Shi Z. Mysterious Alfa class nuclear-powered attack submarine [J]. *Shipborne Weapons*, 2006 (9): 51–54.
- [23] 刘相春. 国外陆上模式堆建设情况及其对舰艇核动力装备发展的贡献分析 [J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(3): 84–91.
Liu X C. Analysis of the construction instances of foreign land-based naval nuclear plant prototypes and the contribution to naval nuclear power equipment's development [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(3): 84–91.
- [24] Zrodnikov A, Chitaykin V, Gromov B, et al. Use of Russian technology of ship reactors with lead-bismuth coolant in nuclear power [C]. Obninsk: Advisory Group Meeting on Small Power and Heat Generation Systems on the Basis of Propulsion and Innovative Reactor Technologies, 2000.
- [25] Kurata Y, Futakawa M, Saito S. Corrosion behavior of steels in liquid lead-bismuth with low oxygen concentrations [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, 373(1/2/3): 164–178.
- [26] Stanculescu A. Worldwide status of advanced reactors (GEN IV) research and technology development [J]. *Encyclopedia of Nuclear Energy*, 2021: 478–489.
- [27] Moiseev A V. Pilot demonstration reactor BREST-OD-300: Conceptual approaches and their implementation [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021.
- [28] Adamov E O, Kaplienkov A V, Orlor V V, et al. Brest lead-cooled fast reactor: From concept to technological implementation [J]. *Atomic Energy*, 2021, 129(4): 179–187.
- [29] Castelluccio D M, Grasso G, Lodi F, et al. Nuclear data target accuracy requirements for advanced reactors: The ALFRED case [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 162: 108533.
- [30] Chebac R, Cammi A, Ricotti M E, et al. ALFRED reactor and hybrid systems: A test case [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 191: 109934.
- [31] Magni A, Bertolus M, Lainet M, et al. Fuel performance simulations of ESNII prototypes: Results on the MYRRHA case study [EB/OL]. (2022-01-01)[2024-04-10]. <https://re.public.polimi.it/handle/11311/1227825>.
- [32] Van Oost G, Terentyev D, Abderrahim H A. Contributions of MYRRHA to the European fusion energy roadmap [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2024, 198: 114098.
- [33] Wallenius J, Qvist S, Mickus I, et al. Design of SEALER, a very small lead-cooled reactor for commercial power production in off-grid applications [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 338: 23–33.
- [34] Ghimire L, Waller E. Small modular reactors: Opportunities and challenges as emerging nuclear technologies for power production [J]. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2023, 9(4): 044501.
- [35] Choi H, Bolin J, Gutierrez O, et al. Progress in fast modular reactor conceptual design [J/OL]. *Nuclear Technology*, [2024-04-10]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00295450.2024.2319925>.
- [36] Wang J Y, Ke W. Development plan of unmanned system and development status of UUV technology in foreign countries [J]. *Journal of Robotics and Control*, 2022, 3(2): 187–195.
- [37] Compton N A. The role of Russian submarines in Russian maritime strategy [D]. Monterey: Naval Postgraduate School (Master's thesis), 2021.
- [38] Warren A, Baxter P M. Nuclear modernization in the 21st Century [M]. London: Routledge, 2020.
- [39] Otsubo A, Takahashi M. Design study of PbBi- and NaK-cooled small deep sea fast reactors [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2005, 47: 202–211.
- [40] Mun J, Kim H J, Ryu H J. Analysis of fuel performance under normal operation conditions of MicroURANUS: Micro long-life lead-bismuth-cooled fast reactor [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 965319.
- [41] Wu Y C. Design and R & D progress of China lead-based reactor for ADS research facility [J]. *Engineering*, 2016, 2(1): 124–131.
- [42] Wu Y C, Bai Y Q, Song Y, et al. Development strategy and conceptual design of China Lead-based Research Reactor [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 87: 511–516.
- [43] Jin M, Yang Q, Sa R Y, et al. Conceptual design of China lead-based mini-reactor CLEAR-M [C]. Obninsk: Fifth Conference on Heavy Liquid-Metal Coolants in Nuclear Technologies, 2018.
- [44] 吴宜灿, 李亚洲, 金鸣, 等. 第五代核能系统概念及其特征 [J]. *核科学与工程*, 2021, 41(2): 201–210.
Wu Y C, Li Y Z, Jin M, et al. The concept and characteristics of the fifth generation nuclear energy system [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2021, 41(2): 201–210.
- [45] Wang M J, Ju H R, Wu J, et al. A review of CFD studies on thermal hydraulic analysis of coolant flow through fuel rod bundles in nuclear reactor [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2024, 171: 105175.

- [46] Luo X, Teng Y F, Lu D G, et al. Comparative analysis on high-efficiency energy conversion system with different working mediums matched with small lead-cooled fast reactor [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2023, 164: 104844.
- [47] Zeng Y, Ming P J, Li F C, et al. Thermal hydraulic characteristics of spiral cross rod bundles in a lead-bismuth-cooled fast reactor [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 167: 108850.
- [48] Heller J, Hatala B. D4.1 GFR refractory fuel qualification options [R]. Czechoslovakia: SafeG, 2022.
- [49] 钱跃庆, 孙晓博, 刘文涛. 空间核反应堆电源用核燃料研制进展 [J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(1): 45–49.
Qian Y Q, Sun X B, Liu W T. Development of nuclear fuel for space power reactor [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(1): 45–49.
- [50] El-Alem M, Abdel-Latif A. The MOX fuel performance analysis of ALFRED core using MCNPX transport code [J]. *Fayoum University Journal of Engineering*, 2024, 7(2): 272–277.
- [51] Feng K L, Li M F, Chen M Y, et al. Cyclic oxidation behavior of Al-Si coating on new γ' -strengthened cobalt-based superalloy: Experimental study and first-principles calculation [J]. *Corrosion Science*, 2021, 185: 109422.
- [52] Wang H, Xiao J, Wang H, et al. Corrosion behavior and surface treatment of cladding materials used in high-temperature lead-bismuth eutectic alloy: A review [J]. *Coatings*, 2021, 11(3): 364.
- [53] Agbevanu K T, Debrah S K, Arthur E M, et al. Liquid metal cooled fast reactor thermal hydraulic research development: A review [J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16580.
- [54] Lim J, Manfredi G, Rosseel K, et al. Performance of electrochemical oxygen pump in a liquid lead-bismuth eutectic loop [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(6): 153–158.
- [55] Toshinsky G I, Dedul A V, Komlev O G, et al. Lead-bismuth and lead as coolants for fast reactors [J]. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 2020, 10(2): 65–75.
- [56] Liu Y P, Wang Y, Huang D G. Supercritical CO₂ Brayton cycle: A state-of-the-art review [J]. *Energy*, 2019, 189: 115900.
- [57] 邓清华, 胡乐豪, 李军, 等. 超临界二氧化碳发电技术现状及挑战 [J]. *热力透平*, 2019, 48(3): 159–165.
Deng Q H, Hu L H, Li J, et al. State-of-art and challenge on technologies of supercritical carbon dioxide electric power generation [J]. *Thermal Turbine*, 2019, 48(3): 159–165.
- [58] Zare S, Tavakolpour-Saleh A R, Aghahosseini A, et al. Thermoacoustic stirling engines: A review [J]. *International Journal of Green Energy*, 2023, 20(1): 89–111.
- [59] Gibson M A, Poston D I, McClure P R, et al. Heat transport and power conversion of the kilowatt reactor test [J]. *Nuclear Technology*, 2020, 206: 31–42.