

引用格式: 张凡, 郭波龙. 熔盐反应堆技术: 进展、挑战与展望 [J]. 南方能源建设, xxxx, x(x): 1-7. ZHANG Fan, GUO Bolong. Molten salt reactor technology: progress, challenges, and prospects [J]. Southern energy construction, xxxx, x(x): 1-7. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-180.

熔盐反应堆技术: 进展、挑战与展望

张凡^{1,2,✉}, 郭波龙^{1,2}

(1. 中核北方核燃料元件有限公司, 内蒙古 包头 014035;

2. 内蒙古自治区核燃料元件企业重点实验室, 内蒙古 包头 014035)

摘要: [目的] 文章旨在全面系统地探讨熔盐反应堆 (Molten Salt Reactor, MSR) 技术的发展现状, 明确 MSR 作为第四代核电技术的优势, 并分析其商业化应用面临的主要挑战。通过分析 MSR 技术的发展历程、技术分类及各国研发进展, 为 MSR 技术的未来发展提供有价值的参考。[方法] 采用文献综述和比较分析的研究方法, 梳理了 MSR 技术的发展历程, 详细分类了 MSR 技术的不同类型, 并深入分析了美国、中国、俄罗斯、法国、加拿大等国在 MSR 技术研发方面的最新进展; 同时, 结合 MSRE 实验堆和 TMSR 项目等实际案例, 探讨了 MSR 技术的关键技术进展及面临的主要挑战; 此外, 还分析了国际合作和技术创新对 MSR 技术发展的影响。[结果] 研究发现, MSR 技术因其安全性高、燃料利用率高的优势, 受到了全球广泛关注。美国通过熔盐堆实验 (Molten-Salt Reactor Experiment, MSRE) 验证了 MSR 的工程可行性, 中国在钍基熔盐堆核能系统 (Thorium Molten Salt Reactor Nuclear Energy System, TMSR) 研究项目中取得了熔盐制备和纯化方面的重要进展。俄罗斯、法国、加拿大等国也在 MSR 技术领域取得了显著成就。然而, MSR 技术的商业化应用仍面临诸多挑战, 包括供应链建设、燃料供应、监管框架适应、废料处理、安全保障措施以及复杂的维护和运营等。[结论] 尽管 MSR 技术面临诸多挑战, 但其在安全性、燃料利用率和设计灵活性等方面的优势, 使其拥有广阔的发展前景。国际合作和技术创新是推动 MSR 技术进步的关键因素。随着相关技术的不断进步, 这些挑战正在逐步得到解决。未来, MSR 技术有望成为全球能源结构转型的重要支撑, 在提高燃料利用率、降低核废料产生和提升反应堆安全性等方面发挥重要作用。随着研究的深入和技术的成熟, MSR 技术有望实现商业化应用, 为全球清洁能源转型贡献力量。

关键词: 熔盐反应堆; 技术分类; 研发现状; 商业化挑战; 国际合作; 技术创新

中图分类号: F414; TL45

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-180

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Molten Salt Reactor Technology: Progress, Challenges, and Prospects

ZHANG Fan^{1,2,✉}, GUO Bolong^{1,2}

(1. China North Nuclear Fuel Co., Ltd., Baotou 014035, Inner Mongolia, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Nuclear Fuel Element, Baotou 014035, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Introduction] The study aims to comprehensively and systematically explore the current development status of molten salt reactor (MSR) technology, clarify the advantages of MSR as the fourth-generation nuclear power technology, and analyze the major challenges facing its commercialization. By analyzing the development history, technical classification, and research and development progress in various countries, the study provides valuable references for the future development of MSR technology. [Method] Using the research methods of literature review and comparative analysis, the development history of MSR technology was reviewed, the different types of MSR technology were classified in detail, and the latest progress in MSR technology research and development in countries such as the United States, China, Russia, France, and Canada was deeply analyzed. Meanwhile, based on actual cases such as the MSRE experimental reactor and the TMSR project, the key technical progress and major challenges of MSR technology were discussed. In addition, the impact of international cooperation and technological innovation on the development of MSR technology was also analyzed.

收稿日期: 2024-05-30 修回日期: 2024-06-21

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目“以 UCO 为核心的高铀密度 TRISO 燃料制备技术研究”

[Result] It is found that MSR technology has been widely concerned globally due to its advantages of high safety and high fuel utilization rate. The United States has verified the engineering feasibility of MSR through the MSRE experimental reactor, and China has made important progress in molten salt preparation and purification in the TMSR project. Russia, France, Canada, and other countries have also made significant achievements in the field of MSR technology. However, the commercialization of MSR technology still faces many challenges, including supply chain construction, fuel supply, regulatory framework adaptation, waste treatment, safety assurance measures, and complex maintenance and operation. [Conclusion] Although MSR technology faces many challenges, its advantages in safety, fuel utilization rate, and design flexibility give it broad development prospects. International cooperation and technological innovation are key factors in promoting the progress of MSR technology. With the continuous advancement of related technologies, these challenges are gradually being resolved. In the future, MSR technology is expected to become an important support for the global energy structure transformation, playing a crucial role in improving fuel utilization, reducing nuclear waste generation, and enhancing reactor safety. As research deepens and technology matures, MSR technology is expected to achieve commercialization and contribute to the global clean energy transition.

Key words: molten salt reactor (MSR); technical classification; research and development status; commercialization challenges; international cooperation; technological innovation

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的提高,核能作为一种清洁、高效的能源选择,再次受到世界各国的关注。在众多核反应堆技术中,熔盐反应堆(Molten Salt Reactor, MSR)因其独特的设计理念和潜在的安全优势而脱颖而出。MSR技术的核心在于使用高温熔盐作为冷却剂,具有高温、低压、高化学稳定性、高热容等热物特性,无需使用沉重而昂贵的压力容器,适合建成紧凑、轻量化和低成本的小型模块化反应堆;熔盐堆采用无水冷却技术,只需少量的水即可运行,可在干旱地区实现高效发电。熔盐堆输出的700℃以上高温核热可用于发电,也可用于工业热应用、高温制氢以及氢吸收二氧化碳制甲醇等,可以有力缓解碳排放和环境污染问题^[1]。这一特性赋予了MSR在安全性、燃料利用率和设计灵活性方面显著的优势。

20世纪40年代美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)开展了熔盐堆实验(Molten-Salt Reactor Experiment, MSRE)项目^[2],自此MSR技术经历了一段漫长的研发历程。尽管在70年代多种原因导致研究力度减弱,但进入21世纪后,核安全和能源效率的双重需求促使MSR技术的研究重新得到重视。目前,包括中国、美国、俄罗斯、法国和加拿大在内的多个国家都在积极开展MSR

相关的研发工作,旨在通过技术创新解决现有的技术难题,推动MSR技术的商业化进程。

MSR技术的发展不仅需要科学上的突破,还需要工程上的创新和国际合作的支持。各国的研究团队正在针对MSR的不同技术类别进行深入研究,包括石墨基MSR、均质MSR和非均质MSR,以期找到最佳的技术方案。这些研究不仅涉及反应堆物理、热工水力、材料兼容性等技术领域,还包括燃料循环、安全监管和经济性分析等多个方面。

尽管MSR技术展现出广阔的发展前景,但其商业化进程仍面临诸多挑战。这些挑战包括建立稳定的供应链、确保燃料供应的稳定性、适应监管框架的要求、处理燃料盐废物、制定保障和安全措施、维护和运营的复杂性以及完善项目文档等。此外,公众对核能的接受度和国际合作的深度也是影响MSR技术推广的重要因素。

文章将综述MSR技术的历史发展、技术分类、各国的研发现状以及面临的挑战,并对未来的发展方向进行展望。通过这一全面的分析,文章旨在为MSR技术的未来发展提供参考,并探讨其在全球能源结构中潜在的角色。

1 熔盐堆技术发展情况

熔盐反应堆(MSR)技术的发展历史可追溯至20世纪40年代,美国曼哈顿计划期间,为了寻找一

种适合生产钚的核反应堆, 开始了对 MSR 的早期探索。20 世纪 50 年代, 随着“飞机核动力计划”(Aircraft Nuclear Propulsion, ANP) 的启动, MSR 技术因其在高温下运行的潜力而受到重视。ORNL 在 1965—1969 年间成功运行了熔盐反应堆实验, 这一实验验证了 MSR 在工程和物理上的可行性, 是 MSR 技术的一个重要里程碑。MSR 技术的发展经历了多个阶段, 包括对燃料盐的选择、热交换器的设计、结构材料的耐蚀性研究以及燃料循环和再处理技术的研究。MSRE 实验堆的成功运行为后续的 MSR 设计提供了宝贵的数据和经验。然而, 70 年代随着世界技术的进步以及其他政治、经济等客观因素发生了变化。由于“冷战”的考虑, 侧重民用的熔盐堆计划下马, 美国熔盐堆研发中止。20 世纪 70 年代初, 我国也曾选择钍基熔盐堆作为发展民用核能的起步点。上海“728 工程”于 1971 年建成了零功率冷态熔盐堆并达到临界。但限于当时的科技、工业和经济水平, “728 工程”转为建设轻水反应堆。自此, 世界范围内熔盐堆研发的国家行为几乎停止。进入 21 世纪, 随着能源需求的增长和对清洁能源的追求, MSR 技术因其在安全性、效率 and 环境影响方面的优势而重新受到关注。MSR 的设计理念得到了进一步的发展, 包括小型模块化反应堆 (Small Modular Reactor, SMR) 的概念, 以及能够利用钍基燃料循环的系统。这些新的设计概念旨在提高燃料的利用率, 降低核废料的产生, 并提高反应堆的安全性。目前, 全球多个国家都在积极开展 MSR 技术的研究和开发。例如, 加拿大核实验室 (Canadian Nuclear Laboratories, CNL) 正在进行 MSR 相关的研究项目, 以支持不同 SMR 技术的部署。中国在 2011 年重启了钍基熔盐堆核能系统 (Thorium Molten Salt Reactor Nuclear Energy System, TMSR) 研究计划^[3], 致力于开发第四代 MSR 技术, 并在熔盐生产和纯化等方面取得了关键进展。捷克共和国、丹麦、欧洲委员会、法国等也都在进行 MSR 相关的研发活动, 涉及物理、化学、材料性能和组件开发等多个领域^[4]。MSR 技术的发展还得到了国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 的支持, 该机构通过组织会议和提供信息交流平台, 促进了 MSR 技术的国际合作和知识共享。此外, 第四代国际论坛 (Generation IV International Forum) 也将 MSR 作为

其 6 个重点研究方向之一, 以推动其未来的商业化和部署。总体而言, MSR 技术的发展经历了从早期探索到实验验证, 再到现代概念设计的转变。随着全球对清洁能源的需求日益增长, MSR 技术因其潜在的优势而展现出巨大的发展前景。未来的研究将集中在解决技术挑战、优化设计、确保安全和提高经济性上, 以实现 MSR 技术的商业化和大规模部署。

2 熔盐堆技术类别及其优缺点

2.1 熔盐堆技术类别

MSR 技术可根据其核心材料和运行特性分为不同的类别, 根据瑞士保罗谢尔研究所 (Paul Scherrer Institute, PSI) 的分类 (见图 1^[5]), 从技术上可分为三大类, 每种类别都有其独特的优点和挑战^[6-8]。

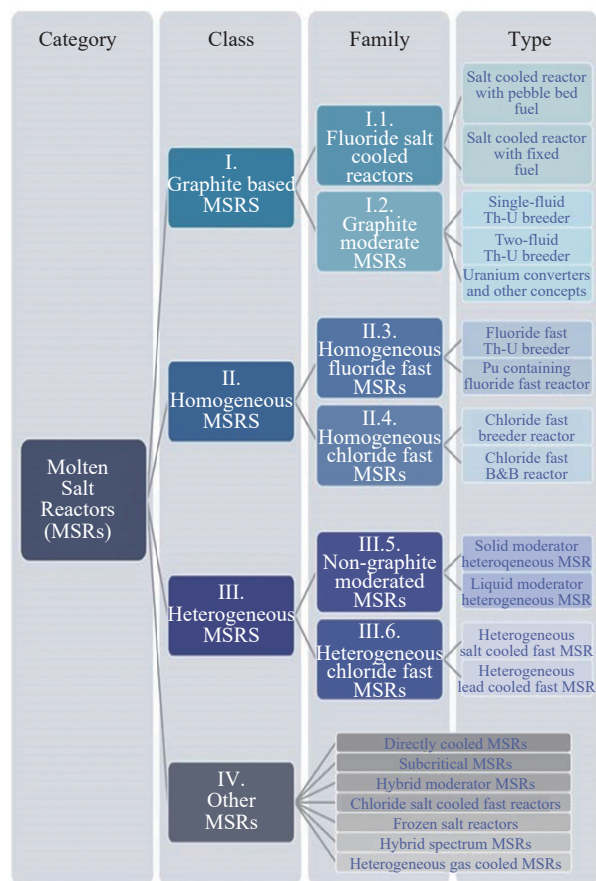


图 1 熔盐反应堆分类图^[5]

Fig. 1 Classification of molten salt reactor^[5]

1) 石墨基 MSR: 这类 MSR 使用石墨作为中子慢化剂, 根据燃料位置不同而有所区别, 可分为两类, 一类是氟化盐冷却的反应堆, 氟化盐冷却的反应堆

使用 TRISO 颗粒燃料,分布在石墨慢化剂中,核心由 $7\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 共晶氟化盐进行冷却。这类反应堆与高温反应堆有许多相似之处。另一类是石墨慢化的熔盐反应堆,石墨慢化的熔盐反应堆是技术发展最为成熟的 MSR 类型。它们利用氟化载体盐作为锕系元素的稀释剂,能实现比氟化盐冷却反应堆更高的燃料密度。

石墨基 MSR 虽然技术成熟度较高,但石墨在高温辐照环境下的辐照损伤和有限的使用寿命是其主要挑战。

2) 均质 MSR: 均质 MSR 的特点是具有快中子能谱,反应堆芯仅由燃料盐填充。它们主要根据 MSR 使用的盐的种类(氟盐或氯盐)分为两大类。一类是均质氟化物快中子熔盐反应堆,另一类是均质氯化物快中子熔盐反应堆。

这类反应堆的核心完全由燃料盐组成,没有结构材料分隔。能够实现高效的铀-钚或钍-铀燃料循环。均质 MSR 的优点在于其简单的燃料循环和良好的安全性,但燃料盐的化学稳定性和腐蚀性是需要克服的技术难题。

3) 非均质 MSR: 非均质 MSR 的特点是堆芯中存在结构材料,将燃料盐与专用冷却剂或与燃料盐不直接相容的慢化剂隔开。根据分隔材料不同可分为两类。一类是堆内结构分隔慢化剂的,例如:非石墨慢化熔盐反应堆。另一类的是分隔冷却剂的,例如:非均质氯化物快中子熔盐反应堆。

非均质 MSR 在设计上比较灵活,但结构的兼容性和对熔盐的耐腐蚀性是关键技术挑战。

2.2 熔盐堆技术的优缺点

3 种熔盐堆技术的优缺点主要有:(1)石墨基 MSR 的优点在于其相对简单的设计和较高的技术成熟度。石墨作为一种中子慢化剂,已经过广泛研究,且在高温气冷堆中有着成功的应用经验。然而,石墨的辐照损伤和有限的使用寿命限制了这类反应堆的长期运行。此外,石墨基 MSR 可能需要频繁的石墨更换,增加了运行和维护的复杂性;(2)均质 MSR 的优点在于其能够提供连续的燃料循环和在线再处理能力,这有助于提高燃料的利用率和减少长寿命放射性废物的产生。这类反应堆的快速中子谱有助于实现高效的铀-钚或钍-铀燃料循环。然而,均质 MSR 需要解决燃料盐的化学稳定性问题,以及

在高温和强辐射环境下材料的耐腐蚀性问题;(3)非均质 MSR 的设计灵活性较高,可以根据特定的运行要求和安全考虑进行定制。这类反应堆可以使用不同的中子慢化剂和冷却剂,提供了更广泛的设计选择。然而,非石墨基 MSR 需要开发与熔盐兼容的结构材料,并且必须确保这些材料在长期运行中的可靠性和耐久性。此外,非石墨基 MSR 的设计与建造可能需要新的技术和工艺,这可能会增加研发和部署的成本^[4]。

3 国内外研究现状

MSR 技术当前的研发活动是全球性的,涉及多个国家和地区。这些活动不仅包括基础科学研究,还涵盖了工程开发、系统集成和政策制定等多个层面。下面介绍美、中、俄等几个主要国家的研究进展。

3.1 美国研究进展

美国在 MSR 技术的发展上具有悠久的历史,特别是 ORNL 在 1960 年代成功运行了熔盐反应堆实验。美国的研究重点在于提高 MSR 的安全性和经济性,同时探索在线燃料处理和钍基燃料循环的可能性。技术参数包括对燃料盐的选择、热交换器设计、结构材料的耐蚀性研究以及燃料循环和再处理技术^[4]。美国能源部积极推动 MSR 技术的发展,为此资助了国家实验室、先进反应堆开发商以及大学的研究活动。2022 年,泰拉能源公司与南方公司合作,计划在爱达荷国家实验室建造世界上首个临界快中子熔盐实验堆(Molten Salt Fast Reactor, MSFR),其结构示意图如图 2^[9]所示。2023 年 11 月,该项目成功启动了综合效应试验(Integrated Effects Test, IET)的盐泵操作,为 2030 年代初计划的 180 MW 氯化物熔盐快堆(Molten Chloride Salt Fast Reactor, MCFR)示范项目提供关键信息。美国核学会(American Nuclear Society, ANS)发布了液态燃料 MSR 核电站的核安全设计准则和功能性能要求标准。能源部对 MCFR 的最终环境影响评价报告确认了其环境友好性。泰拉能源公司自 2008 年成立以来,致力于商业化包括 Natrium 反应堆-储能系统、MCFR 和医用放射性同位素锕-225 生产技术在内的多项技术,均获能源部资助^[10]。

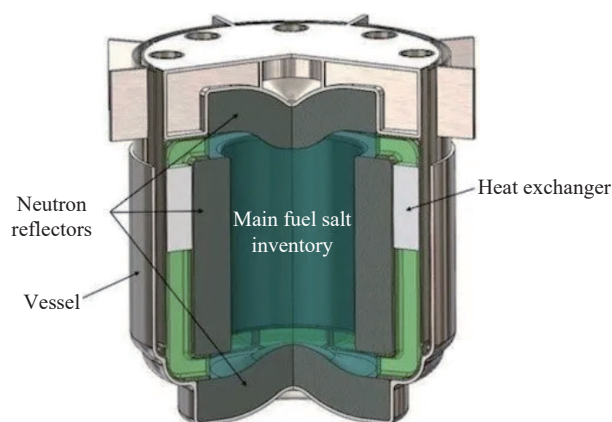


图 2 美国南方公司与泰拉能源公司合作开发的熔盐快堆示意图^[9]

Fig. 2 Molten Salt Fast Reactor (MSFR) developed by Southern Company in partnership with TerraPower^[9]

3.2 中国研究进展

中国在 2011 年重启了 TMSR 研究计划, 旨在实现第四代 MSR 的安全和经济使用, 以及钍资源的高效利用。TMSR 项目在钍基核燃料的制备方面取得了一系列技术进展。面对 ThO_2 高熔点导致的制备难题, 研究人员开发了能在超过 $2000\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下烧结的技术, 成功制备固态钍基燃料元件。针对燃料循环后处理的挑战, 项目改进了化学分离技术, 有效处理了化学性质稳定的 ThO_2 和 ThO_2 基混合氧化物燃料。在材料科学方面, 研究团队探索了与熔盐相容的慢化剂材料, 并成功应用耐腐蚀的 Hastelloy N 合金于反应堆容器、回路管道等关键部位。此外, TMSR 项目还可能在开发干法在线分离技术方面取得进展, 以提高燃料循环的利用率。新型燃料元件的设计考虑了钍基燃料的特性, 确保了反应堆内的高效和安全运行。通过模拟和计算, 优化了燃料制备工艺, 加快了开发进程。同时, 项目还进行了钍基燃料辐照稳定性的研究, 确保了长期稳定运行。在安全规范和许可方面, TMSR 项目制定了相关标准并获取了必要的许可证, 为钍基燃料的制备和使用提供了支持。这些技术突破为实现钍资源的有效利用和核能的综合利用奠定了基础。图 3 为钍基熔盐堆应用前景设想图^[1, 11]。

3.3 俄罗斯研究进展

俄罗斯的研究集中在快谱 MSR 概念上, 这些概念被第四代国际论坛认为是固体燃料快中子反应堆的替代品。俄罗斯在 MSR 技术上的研究包括容器

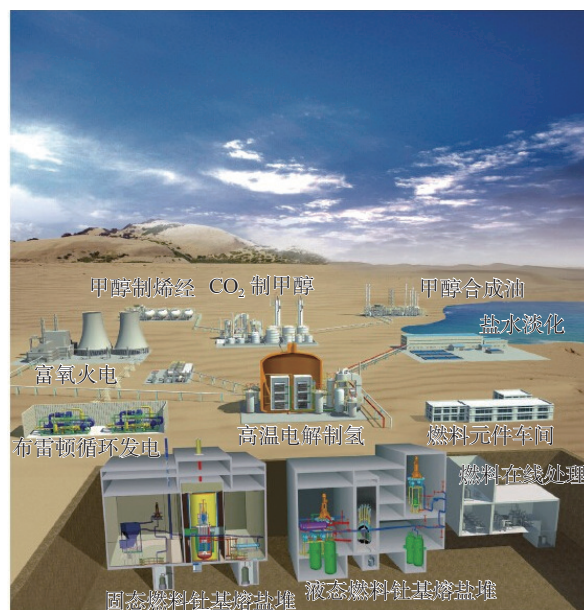


图 3 基于 TMSR 的核能综合利用前景^[1]

Fig. 3 The prospect of comprehensive utilization of nuclear energy based on TMSR^[1]

材料、熔盐的热和质量传输特性以及燃料盐的辐照。技术参数包括对高镍合金容器材料的使用、不同燃料加载和由铜系元素组成的特殊铜系元素嬗变器的操作^[12-13]。

3.4 法国研究进展

法国的 MSFR 项目在 2000 年初开始, 重点在于设计和安全分析。法国在 MSFR 概念上进行了广泛的参数研究, 包括反应堆核心配置、再处理性能和盐组成。技术参数包括对熔盐堆的安全特性、操作程序和燃料循环的优化^[14]。

3.5 加拿大研究进展

加拿大核安全委员会采用基于风险的监管框架来许可先进的反应堆设计, 包括两种小型模块化 MSR 设计: Terrestrial Energy 的 IMSR 和 Moltex Energy 的 SSR-W300。加拿大在 MSR 技术的研发活动包括在加拿大核实验室的 Chalk River 实验室进行的实验协议开发、熔盐合成、熔盐燃料行为研究等^[15]。

3.6 欧洲委员会

欧洲委员会的联合研究中心 (Joint Research Centre, JRC) 在熔盐燃料的合成、纯化技术、熔盐的密度测量、核燃料的辐照后检查以及结构部件的辐照用途开发方面具有广泛能力。JRC 还确定了 MSR 燃料和冷却盐的熔点、惰性气体在熔盐燃料中

的溶解度极限以及多组分卤化物系统的混合熔^[16]。

各国在 MSR 技术上的研究和开发活动涵盖了从基础研究到系统集成的广泛领域,目标是解决技术难题,推动 MSR 技术的商业化和部署。关键技术的突破包括燃料盐的稳定性、结构材料的耐蚀性、高温热工水力实验回路的建立以及先进的模拟和计算工具的开发。这些进展为 MSR 技术的未来应用奠定了坚实的基础。

4 熔盐堆发展面临的挑战与展望

MSR 技术的发展虽然前景广阔,但也面临着一系列挑战和需要克服的技术难题。首先,供应链的建立是关键,因为 MSR 所需的许多特殊材料和组件缺乏现有的供应商基础。其次,燃料供应问题,包括高浓度低浓缩铀(High-Assay Low-Enriched Uranium, HALEU)的生产、运输和使用,以及铀和钍基燃料的供应,都需要稳定的来源和相应的监管批准。此外,监管框架的适应性和完善是 MSR 商业化的关键,需要制定和接受新的安全评估工具和监管许可流程。MSR 的燃料盐废物处理和处置也是一项挑战,尽管液态燃料盐不像固态燃料那样累积物理损伤,但其废物处理和处置路径仍需明确^[17-19]。保障和安全措施的制定同样重要,MSR 的独特设计要求对现有的核安全保障措施进行适应和更新。维护和运营方面,MSR 的高温和放射性环境要求使用远程维护技术,这增加了操作的复杂性和成本。此外,MSR 技术的发展还受限于公众接受度和政策支持,公众对核能的接受度以及政府的政策方向对 MSR 的未来发展具有决定性影响。尽管存在这些挑战,MSR 技术的研究和开发仍在积极进行中。国际合作和知识共享是推动 MSR 技术发展的关键因素,通过 IAEA 和 Generation IV International Forum 等平台,各国可以共享研究成果和经验。此外,随着技术的进步和创新,一些挑战正在逐步被解决,如材料科学的进步有助于提高 MSR 组件的耐蚀性和寿命,先进的模拟和计算工具的开发有助于更好地理解 and 预测 MSR 的行为。展望未来,MSR 技术有潜力成为全球能源结构转型的关键技术之一,特别是在提高燃料利用率、降低核废料产生和提高反应堆安全性方面。随着研究的深入和技术的成熟,MSR 技术有望实现商业化,

并在全球清洁能源领域发挥重要作用^[20]。

5 结论

熔盐反应堆技术作为一种安全、高效的核能利用方式,在全球范围内得到了广泛的研究和关注。各国在 MSR 技术上的研发进展表明,通过国际合作和技术创新,MSR 技术有望在未来能源领域扮演重要角色。然而,要实现 MSR 技术的商业化,还需克服包括技术、经济、监管和公众接受度等多方面的挑战。未来,随着研究的深入和技术的成熟,MSR 有潜力成为全球能源结构转型的关键技术之一。

参考文献:

- [1] 中科院上海应用物理所. 未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统(TMSR) [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(增刊 2): 27-31
Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(Suppl. 2): 27-31.
- [2] Oak Ridge National Laboratory. Time Warp: Molten Salt Reactor Experiment-Alvin Weinberg's magnum opus [EB/OL]. (2023-11-17) [2024-05-30]. <https://www.ornl.gov/molten-salt-reactor/history>.
- [3] 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR 钍基熔盐堆核能系统 [J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366-374
DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
JIANG M H, XU H J, DAI Z M. Advanced fission energy program - TMSR nuclear energy system [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366-374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- [4] 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 1): 64-75. DOI: 10.7538/yzk.2009.43.suppl.0064.
QIU S Z, ZHANG D L, SU G H, et al. Research on inherent safety and relative key issues of a molten salt reactor [J]. Atomic energy science and technology, 2009, 43(Suppl. 1): 64-75. DOI: 10.7538/yzk.2009.43.suppl.0064.
- [5] KREPEL J. Molten Salt Reactor: sustainable and safe reactor for the future? [R/OL]. (2016-09-14) [2024-05-30]. <https://www.psi.ch/en/media/47135/download?attachment>.
- [6] ZANDER MAUSOLFF Z, MARK DEHART M, SEDAT GOLUOGLU S. Design and assessment of a molten chloride fast reactor [J]. Nuclear engineering and design, 2021, 379: 111181. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2021.111181.
- [7] ANDREADES C, CISNEROS A T, CHOI J K, et al. Design summary of the Mark-I pebble-bed, fluoride salt-cooled, high-temperature reactor commercial power plant [J]. Nuclear

- technology, 2016, 195(3): 223-238. DOI: 10.13182/NT16-2.
- [8] GUO Y W, YUAN X F, ZHAO HENG, et al. Coupling a small modular molten salt reactor with desalination [J]. *Nuclear engineering and design*, 2023, 431: 112513. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2023.112513.
- [9] Office of Nuclear Energy. Southern Company and TerraPower prep for testing on molten salt reactor [EB/OL]. (2021-11-9) [2024-05-30]. <https://www.energy.gov/ne/articles/southern-company-and-terrapower-prep-testing-molten-salt-reactor>.
- [10] ZOHURI B. Nuclear energy research and development roadmap [R/OL]. (2009-12-18) [2024-05-30]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/Presentation%20-%20Nuclear%20Energy%20Research%20and%20Development%20Roadmap.pdf>.
- [11] SERP J, ALLIBERT M, BENEŠ O, et al. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives [J]. *Progress in nuclear energy*, 2014, 77: 308-319. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.02.014.
- [12] IGNATIEV V V, KORMILITSYN M V, LIZIN A A, et al. Key experimental results of the PYROSMANI project [J]. *Procedia chemistry*, 2016, 21: 417-4242. DOI: 10.1016/j.proche.2016.10.058.
- [13] IGNATIEV V V, KORMILITSYN M V, KORMILITSYNA L A, et al. Molten- salt reactor for nuclear fuel cycle closure on all actinides [J]. *Atomic energy*, 2019, 125(5): 279-283. DOI: 10.1007/s10512-019-00481-w.
- [14] D HEUER D, E MERLE-LUCOTTE E, M ALLIBERT M, et al. Towards the thorium fuel cycle with molten salt fast reactors [J]. *Annals of nuclear energy*, 2014, 64: 421-429. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.08.002.
- [15] ZHABIN, PECHERYTSA O, TARAKANOV S, et al. Approach to regulatory pre-licensing SMR vendor design review [J]. *Nuclear and radiation safety*, 2020, 114(88): 4-13. DOI: 10.32918/nrs.2020.4(88).01.
- [16] AUFIERO M, CAMMI A, GEOFFROY O, et al. Development of an OpenFOAM model for the molten salt fast reactor transient analysis [J]. *Chemical engineering science*, 2014, 111: 390-401. DOI: 10.1016/j.ces.2014.03.003.
- [17] RILEY B J, MCFARLANE J, DELCUL G, et al. Identification of potential waste processing and waste form options for molten salt reactors [R/OL]. (2018-08-15) [2024-05-30]. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub114284.pdf>.
- [18] ARM S T, HOLCOMB D E, HOWARD R, et al. Status of fast spectrum molten salt reactor waste management practice [R/OL]. (2020-12) [2024-05-30]. https://www.pnnl.gov/main/publication/external/technical_reports/PNNL-30739.pdf.
- [19] SIEMER D. D. Molten salt breeder reactor waste management [J]. *Nuclear technology*, 2014, 185(1): 100-108. DOI: 10.13182/NT12-16410.1016/j.nucengdes.2019.02.00.
- [20] FORSBERG C W, MOSES D L. Safeguards challenges for Pebble-Bed reactors (PBRs): People's Republic of China (PRC) [R/OL]. (2009-11) [2024-05-30]. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc935246/>.

作者简介:



张凡

张凡(通信作者)

1979-, 男, 正高级工程师, 工学学士, 主要研究方向为核燃料循环(e-mail)419275704@qq.com。

(编辑 叶筠英)