

引用格式: 游尔胜, 幸冀川, 李依依, 等. 微型核反应堆电源研发进展及关键技术分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 51-59. YOU Ersheng, XING Dianchuan, LI Yiyi, et al. Research progress and technical analysis of microreactor nuclear power systems [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 51-59. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-111.

微型核反应堆电源研发进展及关键技术分析

游尔胜^{1,2,✉}, 幸冀川^{1,2}, 李依依^{1,2}, 于启帆^{1,2}, 闫晓^{1,2}

(1. 核反应堆技术全国重点实验室, 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213;
2. 中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213)

摘要: [目的]为加快实现“双碳”战略目标, 推动微型核反应堆(简称“微堆”)技术研发, 需要综合分析微堆概念方案和现有能力基础, 更好地服务于微堆系统总体设计论证。[方法]通过全面调研美国及其他主要国家在微堆方面的研发概况, 重点介绍了Holos-Quad、Xe-Mobile、Pele、Aalo-1等微堆项目进展。按照气冷微堆、液态金属微堆、热管微堆的分类方式, 各自选择一种代表性的微堆设计方案, 总结了Holos-Quad、MARVEL、eVinci这3种微堆的主要设计特点和技术参数。[结果]其中, Holos-Quad微堆采用“TRISO燃料、氦气冷却剂、氦气布雷顿循环”的技术路线, 典型发电功率为10 MW; MARVEL微堆采用“铀氢锆燃料、钠钾合金冷却剂、斯特林循环”的技术路线, 典型发电功率为20 kW; eVinci微堆采用“TRISO燃料、钠热管冷却、空气布雷顿循环”的技术路线, 典型发电功率为5 MW。目前, 微堆技术成熟度并未达到商业应用条件, 在核燃料、堆芯冷却、反应性控制等方面存在着明显的关键技术挑战, 因此需要进一步开展科研攻关和技术验证, 为示范工程建设奠定技术基础。[结论]作为先进核能技术的重要发展方向, 微堆系统简单小巧、部署灵活、安全性高, 在偏远地区、高原极地、海上岛屿等孤网条件下具有很好的应用前景, 要重点开展关键技术攻关, 提高技术成熟度, 尽早实现演示验证和工程应用。

关键词: 微堆项目; 设计方案; 研究进展; 技术挑战; 核反应堆电源

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-111

文章编号: 2095-8676(2025)04-0051-09

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-111

中图分类号: TL413; TM91



论文二维码

Research Progress and Technical Analysis of Microreactor Nuclear Power Systems

YOU Ersheng^{1,2,✉}, XING Dianchuan^{1,2}, LI Yiyi^{1,2}, YU Qifan^{1,2}, YAN Xiao^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, Sichuan, China;
2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] In order to achieve the strategic goal of "carbon peaking and carbon neutrality" and accelerate the development of microreactor nuclear systems (referred to as microreactors), it is necessary to comprehensively analyze various conceptual designs and technology basis up to date. [Method] The progress of micro reactor projects such as Holos Quad, Xe Mobile, Pele, and Aalo-1 was highlighted by comprehensively investigating the R&D of microreactors in the United States and other major countries. According to the classification of gas-cooled microreactors, liquid metal cooled microreactors and heatpipe microreactors, one representative conceptual design was selected, and the main design characteristics and technical parameters of Holos-Quad, MARVEL and eVinci microreactors were summarized. [Result] Among them, the Holos-Quad microreactor adopts the technical route of "TRISO fuel, helium coolant, and helium Brayton cycle", with a typical power generation of 10 MW. The MARVEL microreactor adopts the technical route of "uranium-hydrozirconium fuel, sodium-potassium alloy coolant, and Stirling cycle", with a typical power generation of 20 kW. The eVinci microreactor adopts a technical route of "TRISO fuel, sodium heat pip, and air Brayton cycle", with a typical power generation of

收稿日期: 2025-04-14 修回日期: 2025-06-06

基金项目: 中国核动力研究设计院领军人才基金项目“满足极端差异化需求的局部中子能量调控方法和关键技术研究”(YCLJ-1-001)

5 MW. At present, the maturity of microreactor technology has not reached the conditions for commercial application, and there are obvious technical challenges in nuclear fuel, core cooling and reactivity control. [Conclusion] As an important direction of advanced nuclear technologies, the microreactor with the characteristics of simple and compact, flexible and diverse, as well as high inherent safety, has good application prospects in remote areas, polar regions, off-grid islands and other isolated grid occasions.

Key words: microreactor program; conceptual design; research progress; technical challenges; nuclear power systems

2095-8676 © 2025 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

日益严重的气候变化和环境污染问题,使得世界各国及国际组织正努力研究采用核能作为清洁低碳能源的技术方案。为实现 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的“双碳”目标,我国制定了一系列能源发展政策,大力发展风电、光伏、水电、核能等非化石能源,推动能源结构绿色低碳转型,以微堆为代表的先进核能技术将迎来重要的发展机遇^[1-2]。与目前大量建造运行的商用压水堆相比,微堆发电功率一般在 20 MW 以下,固有安全性更高、建造周期更短、场址选择更加灵活,被誉为是核能领域的新兴颠覆性技术,受到美国、英国、法国等核能公司和研发机构的广泛关注^[3-5]。

微堆电源的主要优势包括总体尺寸小、系统设备简化、便于快速部署等,可适应固定式、运输式等不同应用需求^[6-10]。对于固定式应用场景,微堆电源可将二回路发电模块产生的电功率连接到电网,以独立模式运行或作为微电网的一部分,提供 1~20 MW 的电力。微堆电源可用于为工业园区提供高温工艺热,为没有电网的偏远村庄供电,为需要可靠热源和电力的国防设施供电。作为运输式应用场景,微堆电源可在受到海啸、飓风、地震等自然灾害破坏的地区快速恢复供电,或者用于人道主义救援。由于尺寸小、重量轻,微堆电源系统的大多数设备可在工厂进行组装,提高系统设备的研制效率,缩短现场安装时间。微堆电源的模块化设计和组装技术,能进一步促进工厂制造和现场建造的工作协同。同时,微堆电源的上述优势,还有助于减小放射性控制区和应急计划区,提高了部署使用上的灵活性和多样性。

本文通过调研美国等微堆项目研发概况,重点介绍了 Holos-Quad、MARVEL、eVinci 等典型微堆设计方案,分析了微堆电源研发面临的核燃料、堆芯

冷却、反应性控制等关键技术挑战,为我国微堆技术研发和商业应用提供一定的参考依据。

1 微堆项目研发动态

1.1 美国微堆研发项目

近年来,美国开展的微堆研发项目^[11-18]主要以非水冷反应堆技术为主,包括采用气体冷却反应堆技术(简称“气冷微堆”)的 HOLOS、MMR、Xe-Mobile、Pele 等,采用液态金属冷却反应堆技术(简称“液态金属微堆”)的 MARVEL、Aalo-1、Aurora 等,采用热管冷却反应堆技术(简称“热管微堆”)的 eVinci、ZEUS 等,以及采用熔盐冷却反应堆技术(简称“熔盐微堆”)的 ARC 等,如表 1 所示。

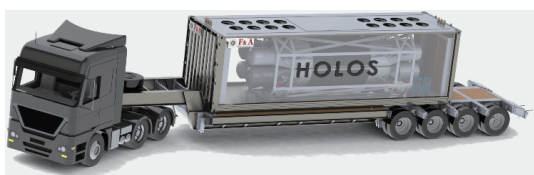
美国 HolosGen 公司采用模块化思路设计了不同配置的 Holos 系列微堆方案,可提供额定功率 3~81 MW 的可扩展式微堆电源^[11-12]。Holos-Quad 微堆的单个集装箱内装有完整的发电系统,可以单独运输以便进行部署、维护或更换,最大能满足 13 MW 的电力需求,如图 1 所示。Holos-Quad 微堆的主要技术特征包括:(1) 燃料寿期长,能在额定功率下工作 12 年以上;(2) 燃料富集度不超过 15%,满足防止核扩散的监管要求;(3) 可以对整个燃料组件进行拆换,在换料期间也能维修设备;(4) 次临界核热功率模块与有机朗肯循环系统进行耦合;(5) 匹配单个标准集装箱尺寸。将 4 个装有 Holos-Quad 微堆的标准集装箱组合,可进一步拓展得额定功率 81 MW 的 Holos-Titan 发电系统,其中布雷顿循环的输出功率为 61 MW,有机朗肯循环的输出功率为 20 MW。

Xe-Mobile 微堆^[15]是美国 X-Energy 公司针对偏远地区和微电网研发的一种可换料移动微堆,能根据用户需要运输至指定位置并快速部署发电,如图 2 所示。Xe-Mobile 微堆的主要技术特征包括:

表 1 美国微堆研发项目

Tab. 1 American nuclear microreactor projects

技术路线	名称	研发机构	功率等级/ MW	能量 转化方式
气冷 微堆	Holos-MONO	HolosGen 公司	10	布雷顿
	Holos-QUAD		3~13	布雷顿+ 有机朗肯
	MMR	USNC 公司	3.5~15	布雷顿
	Pylon		1.5~5或 0.01~3	布雷顿
	Xe-Mobile		X-Energy 公司	2~7
	XENITH	公司	~5	布雷顿
	Pele	BWXT 公司	1~5	布雷顿
	BANR	公司	17	布雷顿
	SOLO-X1	TerraPower公司	1	—
	GA Micro	通用原子能	4~10	布雷顿
	NuGen	NuGen公司	1~3	布雷顿
	Kaleidos	Radiant核能公司	1.2	布雷顿
	MN-1	Mobile核能公司	0.35	布雷顿
	MARVEL	INL	~0.02	斯特林
液态金 属微堆	Aalo-1	Aalo原子能公司	10	蒸汽朗肯
	ODIN	NANO核能公司	—	—
	Aurora	Oklo公司	15	热电联供
热管 微堆	eVinci	西屋公司	5	布雷顿
	AstroVinci™		0.01~0.1	斯特林
	ZEUS	NANO核能公司	1~2	布雷顿
	Antares R1	Antares核能公司	0.2~0.3	布雷顿
熔盐 微堆	ARC	Alpha Tech公司	12	—

图 1 Holos-QUAD 微堆概念示意图^[11]Fig. 1 Conceptual diagram of Holos-QUAD microreactor^[11]

(1)可以通过铁路、公路和海上航道运输;(2)系统设备能装进货物集装箱;(3)能在满功率条件下运行3年以上;(4)使用 TRISO 燃料,具有很好的安全性和成熟性;(5)根据具体应用场景,提供 2~7 MW 电源功率;(6)最大输出电压约 4.16 kV,可适配不同电压等级的用电设备。2022年,X-Energy公司通过市场需求调研,提出了 5 MW 功率等级的 XENITH 微堆,

图 2 Xe-Mobile 微堆模块化运输示意图^[15]Fig. 2 Schematic diagram of modular transportation for Xe-Mobile microreactor^[15]

以便在短期时间内最大限度地提高制造可行性和经济竞争力。

2019年1月,美国国防部战略能力研究室(SCO)发布 Pele 研究计划^[16],旨在开发一种安全、先进、可移动的微堆电源,发电功率 1~5 MW、满功率运行3年以上,以取代每年 30 GWh 电力和近 40 000 m³ 燃料的能源保障,支撑军事基地、远程作战等任务场景下的用电需求。2020年3月,美国国防部与 BWXT 公司、X-Energy 公司和西屋公司分别签订了竞争性研发合同,支持开展初步方案设计,要求2年后进行方案比较。2021年3月,BWXT 公司和 X-Energy 公司从初步方案设计竞优中脱颖而出,继续开展最终方案设计。2022年,SCO 选择 BWXT 公司进行原型微堆建设,启动了长周期设备制造,同时在 2023年9月与 X-Energy 公司签订了备份性研发合同,支持2种不同技术方案的 Pele 微堆设计工作。2024年9月,由 BWXT 公司研制的 Pele 微堆在爱达荷实验室(INL)破土动工,计划2025年2月开始核反应堆系统组装、完成现场混凝土屏蔽结构建造,2026年初将整个微堆装置运抵 INL 园区并在微电网上实现发电演示,成为美国第一个运行发电的原型微堆,如图3所示。美国国防部公开信息表示,Pele 微堆原型装置可装入 20 ft 集装箱中,通过货船和卡车运输至 INL 园区。

Aalo 原子能公司成立于 2022 年底,是美国商用微堆研发的后起之秀,在 MARVEL 项目研究成果的基础上,提出了发电功率 10 MW 的 Aalo-1 微堆设计方案。2023年4月和2024年8月,Aalo 原子能公司



图 3 Pele 微堆原型装置建造场景示意图^[16]

Fig. 3 Schematic diagram of the construction scene for Pele microreactor prototype facility^[16]

分别获得了 626 万美元的种子轮投资和 2700 万美元的 A 轮投资,为微堆产品研发提供了充足的经费支持,使其核心研发人员从 2 人大幅增加至 15 人。如图 4 所示, Aalo 原子能公司在奥斯汀市建成了 3700 m² 以上的新总部大楼,可同时作为反应堆制造工厂,用于研制全尺寸非核装置 Aalo-0、原型实验堆 Aalo-X 和第一个微堆产品 Aalo-1。目前, Aalo-1 微堆已完成概念设计,计划 2025 年完成 Aalo-0 建造测试、开始燃料组件加工和 Aalo-X 研制,2026 年完成 90% Aalo-1 最终设计、Aalo-X 实验堆建造并实现临界。2024 年 9 月, Aalo 原子能公司与爱达荷市政电力公司签订谅解备忘录,为其提供 7 个工厂预制的 Aalo-1 微堆,总发电量约 75 MW。2025 年 2 月, Aalo 原子能公司被选为德州农工大学 RELLIS 校区 1 GW 核能发电项目的 4 个合作伙伴之一,预计部署多个 Aalo 发电模块,为数据中心等关键基础设施提供清洁、可靠的电力保障,支撑高性能计算、人工智能等科研任务。每个发电模块包括 5 个 Aalo-1 微堆和 1 个共用的蒸汽朗肯发电机组,额定发电功率 50 MW。



图 4 Aalo 原子能公司反应堆制造工厂^[17]

Fig. 4 Aalo atomic Inc. microreactor manufacturing factory^[17]

1.2 其他微堆研发项目

俄罗斯、英国、法国等也各自开展了微堆研发项目^[19-22],其中俄罗斯主要以水冷反应堆技术为主,如 SHELF-M、ELENA、UNITHERM 等,其他国家主

要以非水冷反应堆技术为主,包括英国 U-battery 气冷微堆、瑞典 SEALER 液态金属微堆、日本 MovelluX 热管微堆、捷克 Energy Well 熔盐微堆等,如表 2 所示(不含水冷微堆)。

表 2 其他国家微堆研发项目

Tab. 2 Nuclear microreactor projects in other countries

技术路线	名称	国家	功率等级/ MW	能量 转换方式
气冷微堆	U-Battery	英国	4	布雷顿
	Rolls-Royce	英国	1-10	布雷顿
	Jimmy	法国	5~7	布雷顿
	StarCore	加拿大	20	布雷顿
	AMR	南非	3	布雷顿
	PeLUIt-40	印度尼西亚	10	布雷顿
液态金属 微堆	SEALER	瑞典	3	朗肯
	MicroURANUS	韩国	20	—
热管微堆	MovelluX	日本	3~4	布雷顿
熔盐微堆	Energy Well	捷克	8	朗肯

2017 年 12 月,英国重新评估了小型模块化反应堆的发展方向,提出了先进核反应堆(AMR)研发计划,最高投资约 4400 万英镑用于关键技术研究,以提高 AMR 设计方案的商业化水平。AMR 项目分为两个阶段,第一阶段使用 400 万英镑进行设计方案的初步可行性研究,第二阶段对选定的设计方案进行工程研发,经费高达 4000 万英镑。2018 年末,Urenco 公司^[20]提出的 U-Battery 微堆方案成为第一阶段竞争的八家研发单位之一,2020 年 7 月成功入围第二阶段,获得近 1000 万英镑的研发经费,用于后续方案设计和技术开发工作。U-Battery 微堆由英国曼彻斯特大学和荷兰代尔夫特大学合作完成概念设计,已于 2019 年 7 月在加拿大开展了第一阶段技术评估,初步选址在安大略省 Chalk River 部署第一个 U-Battery 工程示范堆。

同样为解决加拿大北极地区的柴油运输困难、发电成本高等问题,瑞典皇家理工大学(KTH)提出了铅冷反应堆 SEALER 微堆方案^[22],以满足偏远地区的孤网用电需求。而且,考虑到电力消耗在加拿大北极地区采矿业成本中占 30%~50%,可在每个采矿点部署一个 SEALER 微堆装置,以提供电力和供热条件。LeadCold 公司在 Nunavut 和 North-West

地区分别选择了9个和1个孤网社区,用于推广发电功率3 MW的SEALER微堆产品。考虑到该地区无法通过公路运输方式进行微堆装置建造,因此一方面可在7月和8月短暂时间内将重型设备通过海面运输,另一方面可将重量小于25 t的设备通过货运飞机运输。因此,SEALER微堆的反应堆容器直径为2.7 m,以适应Hercules C-130货船的内部空间;高度设计为6 m,以提高容器外表面散热能力,通过自然对流的方式带走堆芯余热。

2 典型微堆设计方案

不同技术路线的微堆设计方案有很大差异,特别是在堆芯冷却技术上区别明显。气冷微堆大多通过气体冷却剂和闭式布雷顿循环直接耦合的方式,在高温条件下集成发电,实现系统小型紧凑和高效运行,可适应大功率、高效率、轻量化等任务要求下的长时敏捷供能需求。液态金属微堆需要借助碱金属、铅铋合金等冷却剂的流动传热过程实现堆芯热量导出,通过中间换热器与朗肯循环、布雷顿循环等能量转换技术进行耦合发电,更适用于中高温下的大功率发电需求。热管微堆一般采用热管与斯特林发电机的组合方式实现热量传递与转换,具有良好的非能动技术特征和固有安全优势,在中小功率发电、无人自主运行等方面应用前景广阔。

2.1 气冷微堆

2018年,HolosGen公司提出了Holos-Quad微堆概念设计方案,采用先进的氦冷反应堆技术,搭配轴流式涡轮机、压气机和高速直连发电机,可实现高度集成的微堆电源系统,装入40 ft标准集装箱中。Holos-Quad微堆使用4个总热功率22 MW的次临界功率模块,可通过布雷顿直接循环能量转换系统产生10 MW左右的电功率。如图5所示,堆芯设计为六棱柱石墨结构^[23],TRISO燃料颗粒均匀地分布在石墨结构中,主要设计参数如表3所示。TRISO燃料颗粒采用²³⁵U富集度19.95%的UCO核燃料(碳铀比0.4、氧铀比1.5),总铀装量约1.044 t,平均燃耗深度约61 MW·d/kg。堆芯内氦气工质的运行压力约7 MPa,以一定速度流经石墨结构上的冷却剂通道,吸收堆芯热量后达到850 °C的堆芯出口温度。Holos-Quad微堆通过旋转控制鼓进行反应性控制,同时设置了应急堆芯控制棒组,共同构成了独立、

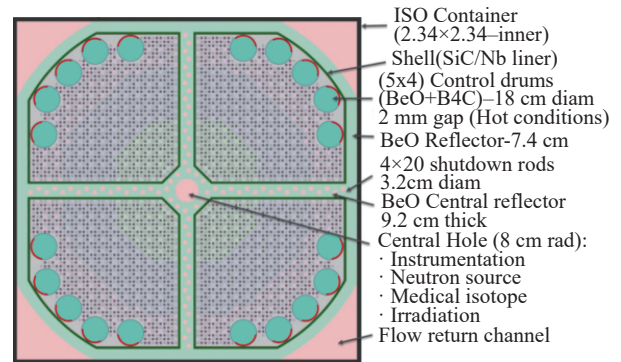


图5 Holos-Quad微堆堆芯设计方案^[23]

Fig. 5 The conceptual design of Holos-Quad microreactor core^[23]

表3 Holos-Quad微堆主要设计参数

Tab. 3 Main design parameters of Holos-Quad microreactor

物理量	设计值
堆芯功率/MW	22
燃料组件高度/m	3.8
上下反射层高度/m	0.1
燃料元件数量	2300
燃料孔道直径/mm	18
燃料孔道中心距/mm	26.5
冷却剂通道数量	1528
冷却剂通道直径/mm	6.4
冷却剂进出口温度/°C	590/850
冷却剂运行压力/MPa	7
燃料最高运行温度/°C	<1250
堆芯寿期/EFPD	>8
堆芯重量/t	44

多样化和冗余的反应性控制系统。

美国阿贡实验室(ANL)开发了一种基于多目标优化方法的随机、高保真仿真计算工具,可以实现Holos-Quad微堆在不同设计阶段的方案迭代优化。系统运行仿真结果表明,各种运行控制手段都能以10%FP/min的升降功率速率,为Holos-Quad设计方案提供负载跟踪能力。但当系统运行在较低功率,如20%FP甚至更低时,有可能出现压气机失速等问题。对比分析表明,容积控制是Holos-Quad微堆负载跟踪的技术首选,可提供较高的转换效率和较小的温度变化;其次是压气机转速控制、节流控制和旁路控制,可能导致循环最高温度进一步升高或者能量转换效率下降。通过对不同控制方案的研究,ANL开发形成了Holos-Quad微堆的运行控制策略。

对于主动容积控制系统,可在 20%FP ~ 100%FP 的功率范围内,使用主动容积控制方案;在 20%FP 以下的功率范围内,使用压气机节流控制方案。对于被动容积控制系统,可在 70%FP ~ 100%FP 的功率范围内,使用被动容积控制方案;在 30%FP ~ 70%FP 的功率范围内,使用压气机转速控制方案;在 30%FP 以下的功率范围内,使用压气机节流控制方案。

2.2 液态金属微堆

MARVEL 微堆是在美国能源部支持下,INL 设计建造的液态金属实验微堆,主要用于技术验证、科研探索和人员培训,如图 6 所示。

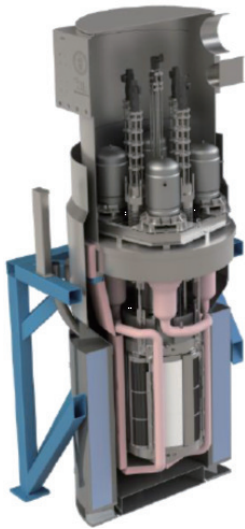


图 6 MARVEL 微堆总体结构示意图^[24]

Fig. 6 The structure diagram of MARVEL microreactor^[24]

堆芯装有 36 个 TRIGA 国际公司生产的铀氢锆燃料元件,采用高密度、低浓铀方案,²³⁵U 富集度为 19.75%,金属铀质量分数为 30%。堆芯中心是一根中子吸收棒,周围按三角形排列方式布置燃料元件,外围设计有一定厚度的氧化铍反射层。燃料元件主要包括 UZrH_{1.6} 环形芯块、中心金属锆棒、上下端石墨反射层、位于环形芯块与石墨反射层之间的金属钨盘,以及 304 不锈钢包壳。能量转换系统采用 Qnergy 公司生产的斯特林发动机,每台斯特林发动机可产生 5 ~ 6 kW 电功率,并配有用于排放循环废热的辅助设备。MARVEL 微堆^[24]的主要设计参数如表 4 所示。

一回路冷却剂系统是一个 4 环路的液态金属回路,装有 150 kg 左右的钠钾合金冷却剂。正常运行

表 4 MARVEL 微堆主要设计参数

Tab. 4 Main design parameters of MARVEL microreactor

物理量	设计值
堆芯功率/kW	75 ~ 100
发电功率/kW	15 ~ 27
核燃料	质量百分比30%的UZrH _{1.6}
²³⁵ U富集度	19.75%
换料周期/月	>60
平均卸料燃耗/(MW·d·kg ⁻¹)	1.5
反应性控制方式	4个堆外控制鼓+1个堆内安全棒
冷却剂工质	钠钾合金
冷却剂进出口温度/°C	450/520
冷却剂运行压力/MPa	0.39
冷却剂循环方式	自然循环
压力容器尺寸/m	直径1.22、高度2.55
压力容器重量/t	5.94
中间回路工质	镓钢锡合金
中间回路运行压力/MPa	0.22
能量转换方式	4台斯特林发电机
装置占地面积/m ²	8.9

时,通过钠钾合金的自然循环流量,可将堆芯核裂变产生的热量传递到中间热交换器。正常或紧急停堆后,一回路冷却剂系统还能将堆芯衰变热量传递到最终散热器。斯特林发电机的加热器安装在反应堆压力容器内,通过镓钢锡合金或其他低熔点液态金属材料作为中间换热器的传热工质。钠钾合金冷却剂在氧化铍反射层外围的环形通道中,从上往下通过管道流动到堆芯底部区域,通过堆芯加热后向上流动至中间换热器,将热量传递至中间回路工质。2023 年 9 月, MARVEL 微堆已完成 90% 最终方案设计,开始了长周期系统设备和核燃料制造,计划 2025 年开始现场建造组装,2027 年开始堆芯装料并完成首次临界。

2.3 热管微堆

eVinci 微堆是西屋公司开发的一个热功率 15 MW、电功率 5 MW 的热管微堆,能连续运行 8 年甚至更长时间,按标准集装箱尺寸设计以实现可运输性,主要用于偏远或孤网地区的电力供应和能源保障^[25]。eVinci 微堆采用热管传热技术,具有非能动堆芯冷却特点。如图 7 所示,堆芯是一个整体结构的六棱柱石墨材料,设置有燃料芯块、热管 2 种类型的圆柱形孔道,采用高浓度、低富集度的 TRISO

燃料方案, ^{235}U 富集度为 19.75%。能量转换系统选用开式空气布雷顿循环, 将热管传递的堆芯热量转换为电能, 对环境条件的依赖性小, 适合部署在各种应用场景。eVince 微堆具有简单紧凑的技术特点, 整体布置在 2 个标准集装箱中, 其中一个用于安装核反应堆和能量转换系统, 另一个用于安装电力电子设备和仪表控制系统。因此, 可通过工厂预制的方式, 在制造工厂完成核燃料和其他主要设备的加工制造后, 再运输至用户现场进行组装。

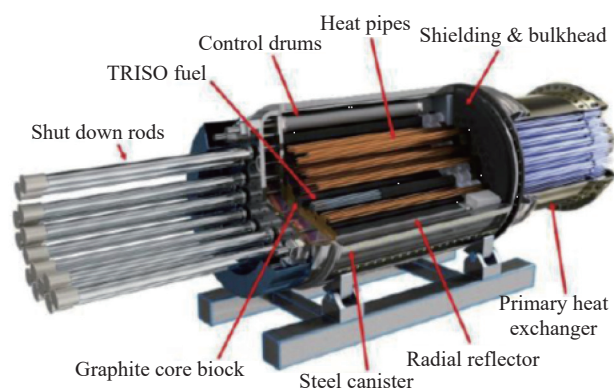


图 7 eVinci 微堆总体结构示意图^[25]

Fig. 7 The structure diagram of eVinci microreactor^[25]

eVinci 微堆的主要设计参数如表 5 所示。堆芯通过钠热管的非能动传热过程将热量传递至换热器, 不需要使用冷却剂泵及传统的一回路系统, 可大幅简化系统设备, 实现小型化、轻量化。反应性控制通过设置在径向反射层中的旋转控制鼓实现, 控制鼓驱动机构是反应堆系统中的唯一运动部件。2022 年西屋公司完成 eVinci 微堆概念设计, 开始与美国和

表 5 eVinci 微堆主要设计参数

Tab. 5 Main design parameters of eVinci microreactor

物理量	设计值
堆芯功率/MW	15
发电功率/MW	5
核燃料	TRISO燃料
^{235}U 富集度	19.75%
换料周期/年	8
慢化剂	石墨
反应性控制方式	控制鼓+安全棒
堆芯冷却方式	钠热管
热管运行压力/MPa	0.12
能量转换方式	开式空气布雷顿
装置占地面积/m ²	<2000

加拿大的核设施监管机构进行许可审批沟通。目前, eVince 微堆已完成带核试验装置设计, 正按计划进行系统设备制造测试, 以及中子临界、瞬态和辐照试验, 并进一步考虑在 INL DOME 设施中完成带核试验研究, 从而为监管许可批准和商业化做好技术准备。

3 关键技术挑战

技术成熟度评价 (Technology Readiness Level, TRL) 是对一项新技术从基本原理到工程应用全周期研发过程的综合性评价, 一般从 TRL 1 到 TRL 9 分为 9 个等级。技术成熟度对研发资源投入和商业部署时间有很大影响。2011 年, 美国能源部对微堆电源的技术成熟度进行了不同等级划分^[26], 认为 Xe-Mobile、MMR、eVinci 等微堆电源已达到 TRL 4 水平。具体分级依据如下:

- 1) TRL 1: 基本原理研究。
- 2) TRL 2: 概念方案设计。
- 3) TRL 3: 概念方案原理性验证。
- 4) TRL 4: 实验室级单项技术验证。
- 5) TRL 5: 实验室级系统集成验证。
- 6) TRL 6: 工程级原型相似系统验证。
- 7) TRL 7: 全尺寸、工程级原型相似系统演示。
- 8) TRL 8: 原型系统演示和性能鉴定。
- 9) TRL 9: 原型系统在真实条件下运行。

然而, 考虑到一种新的核能系统从关键技术到商业应用需要经历的各个研发阶段, 即使微堆电源系统少、规模小, 也将面临核燃料、堆芯冷却、反应性控制、系统安全防护等诸多技术挑战。

3.1 核燃料技术

目前, 商用压水堆一般使用富集度低于 5% 的二氧化铀燃料, 制造技术和工艺条件更加成熟, 已积累了丰富的试验数据和使用经验。但微堆为了提高中子经济性, 需要使用富集度更高的核燃料, 通常接近 20%, 对铀浓缩技术和后处理能力提出了更高要求。另一方面, 微堆电源大多采用气冷堆、铅铋堆、热管堆等先进核反应堆技术, 运行温度显著高于商用压水堆, 需要燃料元件和包壳材料具有更好的耐高温、抗辐照和耐腐蚀性能。

TRISO 燃料是许多微堆概念方案中使用的一种先进核燃料技术, 具有多层包覆结构和良好的耐高温

温、抗辐照性能。TRISO 燃料通过优异的物理隔离能力和化学稳定性,能将绝大多数的裂变产物限制在燃料颗粒内部,即使当燃料温度达到 1600 °C 时,也能保持结构完整性。TRISO 燃料中的碳化硅层,具有很低的辐照肿胀率,在高中子通量水平下仍能保持较好的力学性能,很大程度上降低了放射性大规模释放的可能性。但是,TRISO 燃料制造工艺更复杂,辐照试验数据还不充分,需要进一步在工程示范过程中验证其长时间服役性能。

3.2 堆芯冷却技术

微堆功率密度远大于商用压水堆,需要选用高效的冷却介质和紧凑的传热结构,从而在有限的尺寸空间内实现堆芯热量的安全导出。不同微堆方案选用的堆芯冷却技术差异很大,如气冷微堆可以选用氦气、氦氘混合气体、超临界二氧化碳等气体冷却剂,液态金属微堆可以选用钠、钠钾合金、铅、铅铋合金等液态金属冷却剂,热管微堆可以选用钠热管、钾热管等新型冷却方式。堆芯冷却技术直接影响着系统热效率、经济性和安全性,是微堆电源实现小型化、轻量化的关键影响因素,需要在高性能传热、固有安全性、场景适配性等方面不断进行优化,以提高系统总体性能。

微堆堆芯冷却技术首先面临着材料相容性、杂质控制、腐蚀抑制等难题。液态金属钠、铅铋合金等在高温下对结构材料的腐蚀速率较高,一方面要严格控制在回路系统中的氧浓度以抑制腐蚀过程,另一方面要优化材料合金成分、开发新型耐腐蚀涂层,以减缓冷却剂对堆内材料的腐蚀。同时,冷却剂的物理性质也会对系统运行提出新的要求。气体冷却剂需要将反应堆运行压力显著提高以强化换热能力,但这将增加压力容器和动密封结构的设计和制造难度。铅、铅铋合金等冷却剂在常温下是固态,需要专门配置辅助加热系统,通过电加热方式将冷却剂融化并维持液态。微堆小型化设计要求可能导致堆芯冷却剂流道变小,引起流致振荡或出现局部过热,影响系统运行安全。

3.3 反应性控制技术

在反应性控制方面,微堆需要在更小尺寸内实现堆芯剩余反应性的精细化控制,满足高安全性、长期稳定性、极端环境适应性等要求,对材料性能、控制技术、结构设计、系统集成等提出了新的挑战。

传统控制棒需要缩小尺寸并提高中子吸收效率,通过可燃毒物、旋转控制鼓等方式也可以减少控制棒数量。但是,控制棒直径变小后,中子吸收截面将明显降低,而且碳化硼中子吸收材料在高中子辐照条件下,会产生氦气泡导致材料肿胀和脆化。可燃毒物的使用上也需要进行空间分布的不断优化,精确匹配堆芯燃耗过程,以避免对初始剩余反应性的过度抑制,而后期提供的反应性补偿不足。

微堆可能用于负载频繁波动的场景,需要具有快速响应能力和动态稳定性,因此反应性控制系统也要能及时响应,通过堆芯负温度反馈特性、数字化控制算法等方面抑制功率振荡。微堆快速升降功率时,堆芯氦振荡等时滞效应可能引起周期性功率波动。堆芯冷却剂的流量突变、压力突变等瞬态工况,可能导致局部温度变化,要进一步耦合堆芯热工水力和中子动力学模型,根据计算分析结果来优化反应性控制策略。

4 结论

本文在调研美国、英国、法国等微堆技术研发概况的基础上,重点介绍了 Holos-Quad、Xe-Mobile、Pele、Aalo-1、U-Battery、SEALER 等微堆项目最新进展,选取 Holos-Quad 气冷微堆、MARVEL 液态金属微堆、eVinci 热管微堆 3 种具有代表性的微堆方案,详细介绍了堆芯方案、反应堆系统配置和主要设计参数,总结了微堆电源研发过程中在核燃料、堆芯冷却、反应性控制等方面面临的关键技术挑战,可为我国微堆设计研发提供高价值的技术参考。

本文得到的主要结论如下:

1)微堆具有体积小功率低、固有安全性高、应用部署灵活等优势,是先进核能技术发展的重要方向,美国能源部、国防部等高度关注并在积极支持开展相关研究工作。

2)微堆技术创新性强,堆型主要以非水冷反应堆为主,包括气冷堆、液态金属堆、热管堆等多种技术路线,需要根据用户需求、应用场景、技术成熟度等进行合理匹配。

3)微堆尚未实现商业应用,面临着核燃料、堆芯冷却、反应性控制等诸多技术挑战,需要进一步加大投入、持续攻关,以提高总体技术成熟度,完成各项技术攻关和系统集成演示。

参考文献:

- [1] International Atomic Energy Agency. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050 [R]. Vienna: IAEA-RDS-1/44, 2024. DOI: [10.61092/iaea.e3qb-hsrr](https://doi.org/10.61092/iaea.e3qb-hsrr).
- [2] 王丛林, 柴晓明, 杨博, 等. 先进核能技术发展及展望 [J]. *核动力工程*, 2023, 44(5): 1-5. DOI: [10.13832/j.jnpe.2023.05.0001](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.05.0001).
WANG C L CHAI X M, YANG B, et al. Development and prospect of advanced nuclear energy technology [J]. *Nuclear power engineering*, 2023, 44(5): 1-5. DOI: [10.13832/j.jnpe.2023.05.0001](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.05.0001).
- [3] LANE T G, REVANKAR S T. Advances in technology, design and deployment of microreactors- a review [J]. *Progress in nuclear energy*, 2025, 178: 105520. DOI: [10.1016/j.pnucene.2024.105520](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105520).
- [4] CHAUBE A, AHMED Z, SIEH B, et al. Nuclear microreactors and thermal integration with hydrogen generation processes [J]. *Nuclear engineering and design*, 2024, 419: 112968. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2024.112968](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112968).
- [5] TESTONI R, BERSANO A, SEGANTIN S. Review of nuclear microreactors: status, potentialities and challenges [J]. *Progress in nuclear energy*, 2021, 138: 103822. DOI: [10.1016/j.pnucene.2021.103822](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103822).
- [6] WILLIAMS L, MIKKELSON D, RIGBY A, et al. Capacity optimization of nuclear power integration to meet dynamic industrial demand [J]. *Energy conversion and management: X*, 2025, 26: 100991. DOI: [10.1016/j.ecmx.2025.100991](https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100991).
- [7] HANNA B N, DE OLIVEIRA R, DAWOOD K A, et al. Technoeconomic evaluation of microreactor using detailed bottom-up estimate [R]. Idaho: Idaho National Laboratory, 2024. DOI: [10.2172/2447366](https://doi.org/10.2172/2447366).
- [8] BLACK G, SHROPSHIRE D, ARAÚJO K, et al. Prospects for nuclear microreactors: a review of the technology, economics, and regulatory considerations [J]. *Nuclear technology*, 2023, 209(Supp.1): S1-S20. DOI: [10.1080/00295450.2022.2118626](https://doi.org/10.1080/00295450.2022.2118626).
- [9] LOVERING J R. A techno-economic evaluation of microreactors for off-grid and microgrid applications [J]. *Sustainable cities and society*, 2023, 95: 104620. DOI: [10.2139/ssrn.4293007](https://doi.org/10.2139/ssrn.4293007).
- [10] SHROPSHIRE D, BLACK G, ARAÚJO K. Global market analysis of microreactors [R]. Idaho: Idaho National Laboratory, 2021. DOI: [10.2172/1806274](https://doi.org/10.2172/1806274).
- [11] AUMEIER S, SHROPSHIRE D, ARAÚJO K, et al. Microreactor applications in U. S. [R]. Idaho: Idaho National Laboratory, 2024. DOI: [10.2172/1964093](https://doi.org/10.2172/1964093).
- [12] ALLEN K S, HARTFORD S K, MERKEL G J. Feasibility study of a micro modular reactor for military ground applications [J]. *Journal of defense management*, 2018, 8(1): 1-7. DOI: [10.4172/2167-0374.1000172](https://doi.org/10.4172/2167-0374.1000172).
- [13] MIAO Y B, BHATTACHARYA S, STAUFF N, et al. Advanced coolant enclosure solutions for micro gas cooled reactors with enhanced efficiency and safety [R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 2022. DOI: [10.2172/1906365](https://doi.org/10.2172/1906365).
- [14] Global First Power. Project description for the micro modular reactor™ project at Chalk river [R]. Ottawa: Global First Power, 2019. DOI: [10.4095/299156](https://doi.org/10.4095/299156).
- [15] GOUGAR H, REARDEN B, RHODES D. Market-driven optimization of the XENITH microreactor [R]. Washington, DC: Office of Nuclear Energy, 2024.
- [16] CONNER A M, GRIFFITH G W, LEE R D. Pre-conceptual evaluation of department of defense Pele microreactor sites at Idaho national laboratory [R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2021. DOI: [10.2172/1834745](https://doi.org/10.2172/1834745).
- [17] Idaho National Laboratory. An integrated, strategic program plan for research and development supporting demonstration and deployment of nuclear microreactors [R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2022. DOI: [10.2172/1821961](https://doi.org/10.2172/1821961).
- [18] MAIOLI A, DETAR H L, HAESSLER R L, et al. Westinghouse eVinci micro-reactor licensing modernization project demonstration [R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2019. DOI: [10.1115/icon28-67519](https://doi.org/10.1115/icon28-67519).
- [19] International Atomic Energy Agency. Small modular reactors: advances in SMR developments 2024 [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2024. DOI: [10.61092/iaea.304h-svum](https://doi.org/10.61092/iaea.304h-svum).
- [20] THRELFALL S, DONNELLY S, WHITE A, et al. A future energy solution [R]. Chester: U-battery, 2019. DOI: [10.1002/bte2.20240016](https://doi.org/10.1002/bte2.20240016).
- [21] ZOHURI B. Nuclear micro reactors [M]. Cham: Springer, 2020. DOI: [10.1007/978-3-030-47225-2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47225-2).
- [22] 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. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2018.07.031](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.07.031).
- [23] Argonne National Laboratory. Core design of the Holos-Quad microreactor [R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 2022. DOI: [10.2172/1863405](https://doi.org/10.2172/1863405).
- [24] JACKSON J H, PATTERSON M, JAOUDE A A. Microreactor applications, research, validation, and evaluation (MARVEL) reactor? status, construction, and testing [R]. Idaho: Idaho National Laboratory, 2024. DOI: [10.2172/2386934](https://doi.org/10.2172/2386934).
- [25] RORY A B, GREGORY E K, CHRISTOPHER N. Demonstration of eVinci microreactor: electrical demonstration unit (EDU) heat pipe performance [C]//American Nuclear Society. Nuclear and Emerging Technologies for Space. Santa Fe: American Nuclear Society, 2024: 168-172. DOI: [10.13182/nets24-43977](https://doi.org/10.13182/nets24-43977).
- [26] U. S. Department of Energy. Technology readiness assessment guide [R]. Washington, DC: U. S. Department of Energy, 2011. DOI: [10.46220/2022tr001](https://doi.org/10.46220/2022tr001).

作者简介:



游尔胜

游尔胜 (通信作者)

1992-, 男, 副研究员, 核能科学与工程专业博士, 主要从事新型核反应堆技术研究 (e-mail) youersheng@126.com。

(编辑 叶筠英)