DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.03

增材制造技术在小型模块化反应堆领域的应用现状与发展趋势

郭子豪[1,2]，邹尧磊[1,2]，吴　君[1]

1. 中广核研究院有限公司，广东 深圳 518031
2. 哈尔滨工程大学，黑龙江 哈尔滨 150001

摘　要：小型模块化反应堆作为一种在三代堆与四代堆技术基础上实现小型化与模块化的新兴核能技术，已成为全球核能科技创新热点。增材制造技术可以赋能小型模块化反应堆领域，支撑先进核材料的性能提升，助力复杂部件的设计制造，以及推动关键设备的批量化生产。首先，基于国际原子能机构的《小型模块化反应堆：2024年进展报告》所收录的反应堆名录，全面调研了增材制造技术在小型模块化反应堆技术开发中的应用现状，在小型模块化反应堆的六条技术路线下，横向对比各堆型方案应用了金属增材制造技术的材料、部件与设备，分析相较于传统制造技术实现的性能或经济效益提升。其次，围绕美国、俄罗斯、法国、英国、加拿大等传统核能强国的核能增材制造项目布局以及相关科研院所、高校的研究方向开展纵向研究，分析国际上金属增材制造技术在小型模块化反应堆领域的发展趋势。最终，结合横向对比与纵向研究，研判得出金属增材制造技术已在小型模块化反应堆领域积累良好的应用实践，包括氮化铀TRISO燃料、U3Si2燃料、全陶瓷微胶囊燃料等先进燃料以及镍基超合金、难熔金属基合金、碳化硼复合丝等先进核材料的生产，几何形状复杂的燃料组件底座与支架、控制阀等反应堆部件的制造，压力容器试件、印刷电路板式换热器等关键设备的制造。增材制造技术在小型模块化反应堆领域的发展将呈现从非核心部分到核心部分、从样件到部件再到模块的趋势。随着增材制造技术成熟度的提升和标准的建立，将形成从原料、打印设备、工艺到检测认证的完整产业链，推动具有广大市场前景的小型模块化反应堆领域的成本下降和规模化应用。

关键词：小型模块化反应堆；增材制造；核燃料；反应堆部件；先进核材料

中图分类号：TL4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303(2026)04-0020-11

Status of Design and Technology Development of Additive Manufacturing in Small Modular Reactors

GUO Zihao[1,2], ZOU Yaolei[1,2], WU Jun[1]

1. China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518031, China
2. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: Small modular reactors (SMRs), as an emerging nuclear technology with miniaturization and modularization based on Generation III and IV reactor technologies, have become a global hotspot for nuclear technology innovation. Additive manufacturing technology can empower SMRs by supporting the performance enhancement of advanced nuclear materials, facilitating the design and manufacture of complex components and promoting the mass production of key equipment. Initially, based on the directory included in the International Atomic Energy Agency's "Small Modular Reactors: Progress Report 2024", a comprehensive survey was conducted on the current application status of additive manufacturing technology in SMRs development. Across the six technical routes of SMRs, a horizontal comparison was conducted among materials, components, and equipment which utilized metal additive manufacturing technology in various reactor designs. Compared with traditional manufacturing technology, the performance or economic enhancement of additive manufacturing was well

收稿日期：2025-12-26　　**修回日期：**2026-02-06

作者简介：郭子豪(1994—)，博士研究生，主要从事先进核能研发。E-mail：cyrusgzh@163.com。

studied. Moreover, a vertical study was carried out focusing on the layout of nuclear additive manufacturing projects and the research directions of relevant institutes and universities in traditional nuclear advanced countries such as the United States, Russia, France, the United Kingdom, Canada and so on. The international development trends of additive manufacturing technology in SMRs was revealed. Finally, by synthesizing the horizontal comparison and vertical analysis, it was concluded that metal additive manufacturing technology has already accumulated substantial practical application experience in SMRs. This includes the production of advanced fuels such as TRISO fuel with uranium nitride, U3Si2 fuel and FCM fuel, as well as advanced nuclear materials like nickel-based superalloys, refractory metal-based alloys and boron carbide composite wires. It also encompasses the manufacturing of geometrically complex reactor components such as fuel assembly base and support pieces, control valves, as well as the manufacturing of key equipment like pressure vessel test pieces and printed circuit heat exchangers. The development of additive manufacturing technology in SMRs will show a trend progressing from irrelevant to essential parts, and from prototypes to components and then to modules. As the maturity of additive manufacturing technology increases and the standards of which are established, a complete industrial chain from raw materials, printing equipment, relevant processes and inspection certification was funded, promoting cost reduction and large-scale application in SMRs, which holds a vast market prospect.

Keywords: small modular reactors (SMRs); additive manufacturing; nuclear fuel; reactor components; advanced nuclear materials

引用格式：郭子豪，邹尧磊，吴君. 增材制造技术在小型模块化反应堆领域的应用现状与发展趋势[J]. 电焊机，2026，56(4)：20−30.

Citation: GUO Zihao, ZOU Yaolei, WU Jun. Status of Design and Technology Development of Additive Manufacturing in Small Modular Reactors [J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 20−30.

0　引言

小型模块化反应堆（Small Modular Reactors，SMRs）作为基于第三代与第四代反应堆技术发展而来的新兴核能系统，以其小型化、模块化、高安全性和多场景适应性等特点，已成为全球核能科技创新的重要方向。随着全球能源结构向清洁、低碳转型加速，SMRs在实现碳中和目标、保障能源安全、推动核能多元化应用等方面展现出巨大潜力。然而，SMRs的发展仍面临制造成本高、供应链复杂、部件几何结构日趋复杂等挑战，亟需制造技术的革新以支撑其规模化、经济化发展。

增材制造（Additive Manufacturing，AM）技术，又称3D打印，作为一种逐层堆积成型的数字化制造工艺，具有设计自由度高、材料利用率高、可快速制造复杂结构件等突出优势，正逐步成为高端装备制造领域的关键技术。在核能领域，增材制造技术已展现出在先进核材料制备、复杂部件一体化成型、关键设备快速原型制造等方面的应用潜力，有望为SMRs的设计优化、性能提升、成本降低和建造周期缩短提供关键技术支撑。

目前，国内外已在SMRs与增材制造技术的交叉领域开展了一系列探索性研究与应用实践，但尚未形成系统性的综述与分析。已有研究多聚焦于特定工艺或部件的个案分析，缺乏对全球范围内不同技术路线下增材制造应用全景的横向比较，以及对主要国家技术发展路径与战略布局的纵向梳理。本文旨在系统梳理增材制造技术在小型模块化反应堆领域的应用现状，通过横向对比不同SMR堆型中增材制造技术的应用场景与效能，并纵向分析美国、俄罗斯、欧洲及中国等主要国家的发展战略与技术趋势，以揭示该领域的技术发展脉络与未来方向。本研究不仅有助于全面认识增材制造赋能SMR发展的现状与挑战，也为我国相关技术研发、产业布局与标准体系建设提供参考。

1　小型模块化反应堆发展现状

根据国际原子能机构（IAEA）2024年发布的小型堆技术目录，当前全球小型堆（SMR）已进入从概念设计向工程示范和早期商业化加速过渡的阶段，呈现出技术路线多元、应用场景拓展和安全理念深化的鲜明特征[1]。

本研究梳理了2012年至2024年（Advanced Re-

actors Information System，ARIS）收录的SMR项目情况，详细发展趋势见图1。2022年为全球SMR项目研发的高峰期。水冷小型堆一直为主要的研发对象，但其总研发项目占比在逐年下降。从2016年起，全球开始关注基于第四代反应堆技术的SMR研发工作，其研发项目占比逐年上升，直至2024年的约70%。从2018年起，微堆因其模块化程度高、部署灵活和初始投资低等优势，成为偏远地区能源供应和特定工业场景的理想选择。近年来，多个国家加快推进微堆设计认证与示范项目建设，推动其向标准化、系列化发展，同时在安全设计上普遍采用固有安全特性和被动冷却系统，进一步提升了公众接受度与商业可行性。其研发项目占比有大幅度上升趋势。

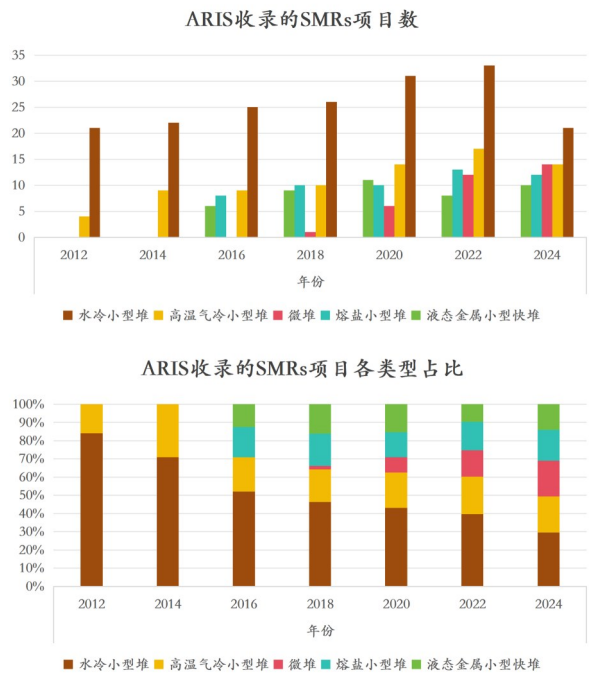

图1 IAEA收录的SMR项目发展情况

Fig. 1 Development status of SMR projects documented by the IAEA

发展现状方面，全球已有超过80种SMR设计处于不同开发阶段。轻水堆技术因其成熟度最高而进展最快，如中国的ACP100已开工建设示范项目，美国的NuScale首个电站计划于2030年投运，俄罗斯的KLT-40S浮动电站已并网运行。同时，高温气冷堆、液态金属快堆和熔盐堆等四代堆型技术也进入工程验证阶段。从空间布局看，陆基固定式电站仍是主流，但浮动式核电站、可移动式模块等创新部署模式不断涌现，显著提升了核能应用的灵活性和场景适应性。

发展趋势呈现四个明确方向：一是安全理念系统升级，普遍采用“无源安全+纵深防御”组合，通过一体化设计消除大破口失水事故，利用自然循环实现长期衰变热导出，部分设计已实现72小时无需干预的自主安全状态；二是多功能应用成为标配，新一代SMR在设计之初就集成发电、供热、制氢、海水淡化等多重功能，推动核能从单一电力供应商向综合能源系统转变；三是建造模式深刻变革，工厂预制模块化率达到70%以上，现场施工周期可缩短至36个月，显著改善经济性；四是全球协作网络初步形成，跨国技术合作（如SMART项目）、多国联合审评（如NUWARD的三国联合预审）等新机制正在重塑核能产业生态。在SMR研发过程中，全球开始关注新一代反应堆技术与先进制造技术的融合设计。尽管面临供应链整合、首堆造价高昂、监管标准适应等挑战，但SMR凭借其适配新型电力系统、支撑深度脱碳的独特优势，正成为全球核能复兴和能源转型的关键载体。预计到2035年，将有20–30座SMR投入商业运行，开启核能发展的“小型化、分布式”新时代。

2 增材制造技术在小型模块化反应堆技术开发中的应用现状

2.1 先进制造技术在SMR领域的重要性

国际能源署（International Energy Agency，IEA）2025年的工作[2]开展了SMR的相关部署与建设成本研究。SMR在各国已宣布承诺情景（APS）中的2040年平准化度电成本（LCOE）预计较高，这主要源于其更高的单位建设成本。在假设与大型反应堆相同容量因子的情况下，许多地区SMR的成本比大型反应堆高出约20%。详细结果见图2。其中中国成本预计达85美元/兆瓦时，美国为110美元/兆瓦时，欧盟地区则高达130美元/兆瓦时。在最理想的核能政策影响下，大规模建设SMR才使得SMR建设成本与大型核电站相当。

实现SMR规模化推进与建设是降低SMR建设

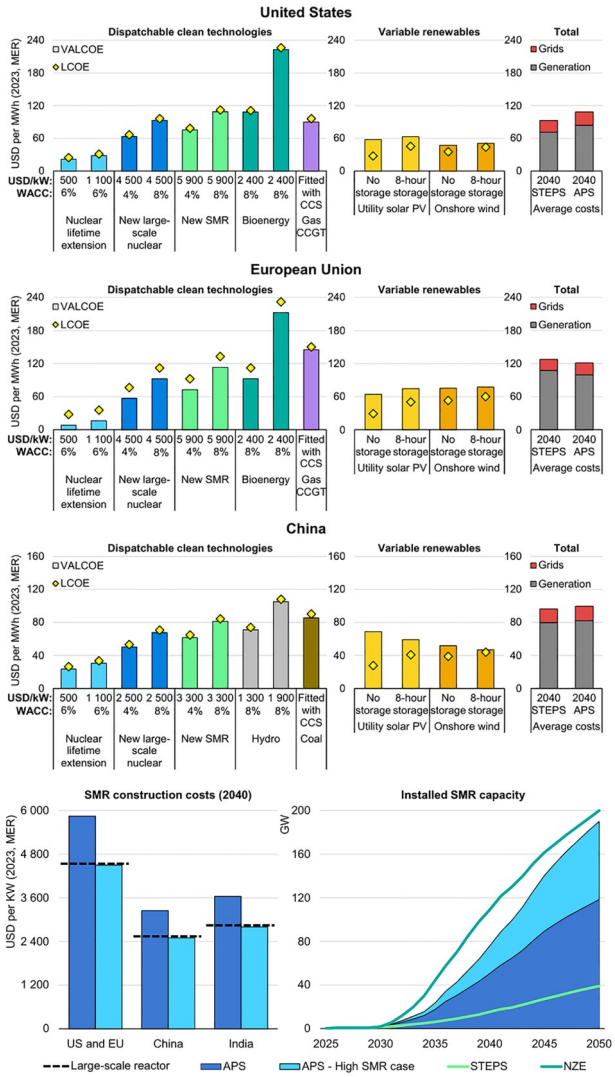

图 2　IEA 各国能源建设成本分析[2]

Fig. 2　Analysis of energy construction costs across countries by the IEA[2]

成本的主要途径。SMR 所具备的模块化建设技术特征，使其可以在模块化生产、制备流程上引入先进的制造技术从而降低制造与建设成本，增强各国核能政策对 SMR 项目的倾向性。增材制造技术可以为 SMR 带来更低的建设成本、更快的部署速度、更优的迭代流程以及更好的材料性能，这些优势将影响各国对 SMR 的部署政策，有利于进一步批量化建设，摊平研发成本，降低最终的 SMR 建设成本。

2.2　应用增材制造技术的项目介绍

针对 IAEA 收录的 72 个 SMR 项目进行梳理分析，有 8 个项目明确应用了增材制造技术，其中除俄罗斯的 RITM-200N 为陆基水冷小型堆，即三代反应堆技术，其余 7 个 SMR 项目均部分采用四代反应堆技术的新概念方案，包括美国的 MMR（高温气冷堆）、美国的 BANR（高温气冷堆）、美国的 eVinci（热管堆）、美国的 KP-FHR（氟盐冷却高温堆）以及法国牵头研制的 LFR-AS 系列（铅冷快堆）。同时，增材制造在各 SMR 项目上均体现了不亚于传统制造工艺的材料性能，且在复杂几何制造、制造时间、制备材料损耗以及工程供应链优化等方面有独特的优势。表 1 为各 SMR 项目的增材制造技术应用情况。其中，美国由能源部牵引，橡树岭国家实验室主导的制造示范设施（Manufacturing Demonstration Facility，MDF）是当前全球唯一采用增材制造技术进行燃料芯块制备的项目，将在相关制备工艺标准、材料性能鉴定标准等标准制定方面有先发优势。

2.2.1　变革挑战堆项目

美国橡树岭国家实验室主导的变革挑战堆项目（Transformational Challenge Reactor，TCR），旨在设计、建造与运行一座由增材制造与 AI 共同赋能的微型反应堆。该项目同时进入了美国的先进制备方法项目（AMM）和核材料研发验证计划（NMDQI），以全面覆盖 TCR 核材料与相关制造技术的全周期研发工作。项目利用先进制造、数据分析和材料科学的最新进展，显著降低新一代核能系统的部署成本和时间，通过整合数字技术、增材制造和人工智能等方法，探索核能系统设计、制造、鉴定和部署的全新范式[3]。

TCR 项目主要采用粘结剂打印工艺（Binder Jet Printing）结合化学气相渗透（Chemical Vapor Infiltration），进行 SiC 燃料组件的封装与制备（见图 3）。利用增材制造可快速制备样品的特性，TCR 项目利用数据挖掘与 AI 赋能大幅度缩短异型 TRISO-SiC 燃料组件的研发路径[4]，实现传统方法无法加工的几何形状（如自由曲面、内部流道、晶格结构），优化传热和材料分布，并支持快速原型迭代，为后续 BANR 项目与超安全核能公司（USNC）的 MMR 项目提供高性能燃料。通过定向能量沉积技术制造堆芯主结构、反射层、混凝土生物屏蔽层等大型部件，验证“基体高精度成形+表面功能层熔覆”的一体化制造路径，为核部件多功能化（如防腐涂层、耐磨层）提供了新思路，同时推动了核设施建造模式

表1　增材制造技术在SMR领域的应用情况

Table 1　The application status of additive manufacturing technology among SMRs

型号	电功率/MW	类型	国家	状态	研发内容	效能
RITM-200N	55	PWR	俄罗斯	详细设计	俄罗斯RITM-200小堆已获准采用增材制造生产首批核电部件。俄罗斯国家原子能公司Rosatom旗下Afrikantov设计局已完成首个部件(接线盒)制造与全流程测试,通过俄罗斯海事船级社认证[13]。	Rosatom依托该项目制定了核能增材制造领域的监管技术文件,进一步发展利用增材制造制备RITM-200反应堆更复杂、关键部件的能力,从而提高设备效率与可靠性,并降低其重量与成本。
LFR-AS-30/ LFR-AS-200	30/200	LFR	意大利、法国	概念设计	Newcleo公司计划将3D打印技术作为一项关键的工艺开发工具,重点用于未来燃料组件制造方法的测试、优化和资格认证[14]。	为其后续的燃料试点生产线及小型模块化铅冷快堆的燃料供应奠定技术基础。
MMR	15	HTGR	美国	初步设计	超安全核能公司(USNC)获授权采用一种新型3D打印技术制造核反应堆部件。该技术由橡树岭国家实验室开发,结合粘结剂喷射打印与化学气相渗透工艺,可实现耐高温、耐辐照的碳化硅材料成形[15]。	USNC在核反应堆堆芯部件制造中首选碳化硅材料,但传统机械加工方法制造复杂形状部件时存在耗时久、成本高的瓶颈,新引进的增材制造技术将显著提升该类部件的生产效率。
BANR/Pele	BANR 50MWtPele 1.5MWe	HTGR	美国	正在建设	BWX Technologies(BWXT)旗下子公司近日完成化学气相渗透熔炉的安装测试,用于固化含TRISO颗粒的预制坯体。该设备形成一条全新生产线,可通过增材制造技术生产第四代反应堆所需先进TRISO燃料。BWXT现已具备将氮化铀TRISO颗粒填充至增材制造燃料基体的完整能力[7]。	BWXT公司采用增材制造技术生产的燃料制品,其单位体积所含铀质量高于传统TRISO燃料。该新型燃料设计更具成本效益,可延长反应堆寿命,并有望降低整体反应堆系统成本。
eVinci	5	Heat Pipe	美国	关键技术研发	西屋公司针对eVinci微型反应堆主热交换器提出了基于增材制造的设计方案,其核心是开发了采用格栅支撑结构的新型集管板[12]。	通过增材制造为eVinci微堆制造传统工艺难以实现的复杂功能部件,在提升热工性能与结构效率的同时,有效解决了高价值长周期稀缺件的供应链制约问题。
KP-FHR	140	FHR	美国	在建	Kairos Power联合Barnard Construction公司及橡树岭国家实验室的制造示范设施(MDF),成功开发并验证了用于浇筑高精度复杂混凝土结构的大型3D打印聚合物复合材料模具。在后续18个月内,SM2ART登月计划项目将继续支持Kairos Power的建造计划,将扩展至包括用于辐射屏蔽和反应堆建筑围护结构的全尺寸模具生产[11]。	Kairos Power采用可打印生物复合材料模具,将复杂核部件浇筑周期从数周缩短至数天,实现原位快速成形。该技术以木材残余物为原料,在提升精度的同时降低模具成本约75%,标志着核设施建造方法的重大进步。
XAMR	40	MSR	法国	概念设计	NAAREA与Phoenix Manufacture合作推动XAMR微堆的工程化与规模化生产,覆盖设计、样机研制、首台套制造直至批量生产全过程。引入增材制造技术用于生产反应堆部件,并规划建设联合制造工厂及配套再处理设施,确立3D打印在该项目中的核心工艺地位。[16]	这种涵盖设计、原型制造、首台套制造直至批量生产的结构化路径,将确保XAMR反应堆以最高效的方式实现全面部署。

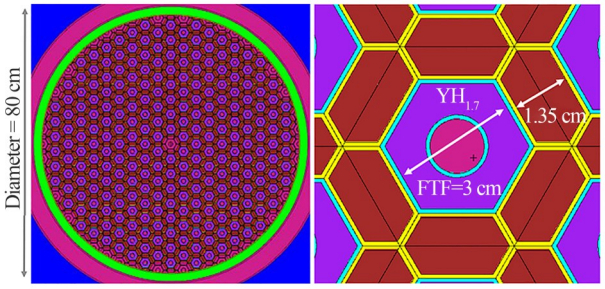

图3　TCR项目中TRISO-SiC燃料组件与堆芯概念方案[4]

Fig. 3　TRISO-SiC fuel assembly and core conceptual design in the TCR project[4]

的革新。

总的来说，TCR项目在增材制造领域取得了系统性成果，其成功验证了多工艺协同的核部件制造范式：通过激光粉末床熔融实现高精度燃料组件与复杂流道结构；利用定向能量沉积完成大尺寸堆芯结构件与反射层的一体化成形；创新性融合粘结剂喷射技术制造陶瓷基复合燃料。这些技术突破了传统核设备制造的几何约束与周期瓶颈，实现了从燃料、慢化剂到主结构的全链条增材制造能力。其核心意义在于构建了“设计–材料–工艺–认证”的快速迭代闭环，不仅将部件制造时间缩短数倍，更通过材料与结构的协同优化显著提升了系统性能与安全性，为先进核能系统的快速定制化部署奠定了工业化基础。

2.2.2　BWXT先进核反应堆

美国BWX Technologies公司（简称BWXT），面向小型模块化领域提出BWXT先进核反应堆（BWXT Advanced Nuclear Reactor，BANR）概念，当前处于概念设计阶段。BANR定位为一座热功率为50 MW的原型气冷小堆，采用富集度为19.75%的TRISO颗粒燃料、氦气冷却剂、具有非能动余热排出能力与固有安全特征。整体系统见图4，由5个独立模块组成，每个模块均满足公路与铁路运输要求，可进行快速部署与换料。BANR可以为采矿与油气公司提供高品质工艺热，为地区城市、算力中心与校园提供稳定电能供应。其燃料组件主要采用TCR项目的研发成果，通过增材制造制备包容UN–TRISO颗粒燃料的异型柱状燃料组件[5]。

BANR项目在燃料制造中创新性融合了增材制造技术，形成了"增材预制+CVI致密化"的先进燃料

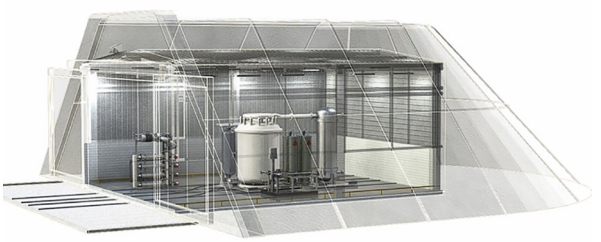

图4　BANR整体概念图[6]

Fig. 4　BANR general conceptual scheme[6]

工艺路线，具体见图5。具体而言，利用粘结剂喷射增材制造技术生产燃料元件的复杂几何结构预制件，随后填充UN TRISO燃料颗粒，再通过化学气相渗透炉（chemical vapor infiltration furnace）进行致密化处理，最终形成一体化、高铀装量的先进燃料形式[7]。这一工艺突破了传统TRISO压块的几何限制，提升了燃料性能与设计自由度，并通过计算机断层扫描（CT）与数字孪生技术实现制造全过程的无损检测与质量监控。

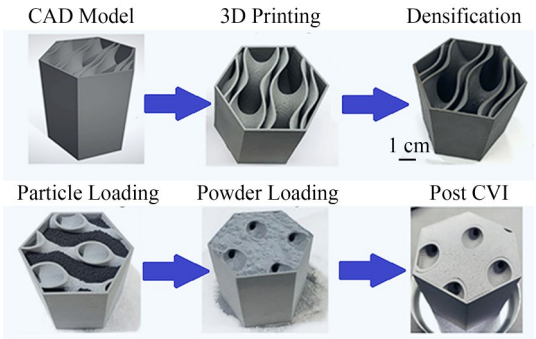

图5　BANR燃料工艺流程[6]

Fig. 5　BANR fuel process scheme[6]

通过一体化成型与材料的高效利用，该工艺实现了更高的铀装填密度与更长的燃料寿命，直接降低了燃料循环成本。增材制造支持的复杂流道与结构优化进一步提升了堆芯的热工水力性能与功率密度，有助于缩小系统体积、简化辅助设施。此外，数字化制造与快速原型迭代能力缩短了燃料研发与认证周期，为微堆的快速部署与商业化推广奠定了成本与时间优势，增强了在分布式能源市场中的竞争力。

2.2.3　氟盐冷却高温堆（KP-FHR）

Kairos Power公司（以下简称KP公司）于2016年在加州成立，致力于实现氟盐冷却高温堆（KP–FHR）的商业化应用。KP公司采用快速迭代开发模

式(rapid iterative development approach)推动先进反应堆技术落地。2023年获批的Hermes示范堆是美国五十余年来首个获准建造的非水冷堆。KP公司的氟盐冷却高温反应堆是一种创新的先进堆技术,采用TRISO球形燃料以及低运行压力的氟盐冷却剂,利用蒸汽循环将裂变产生的热量转化为电能。KP-FHR设计功率为150 MWe(2×75,双机组配置),堆芯入口温度为550 ℃,出口温度为650 ℃,KP-FHR的堆芯及整体系统概念如图6所示。Hermes是KP-FHR的低功率示范堆,不具备发电能力,由KP公司主导设计、建造和运行,热功率为35 MWt,使用TRISO燃料和低压氟化物盐FLiBe冷却剂。KP公司计划于2027年投运Hermes,完成完整核系统验证、关键部件制造能力提升、供应链体系测试以及KP-FHR技术许可认证完善,推动KP公司的迭代开发进程从原型阶段迈向商业规模[8-9]。

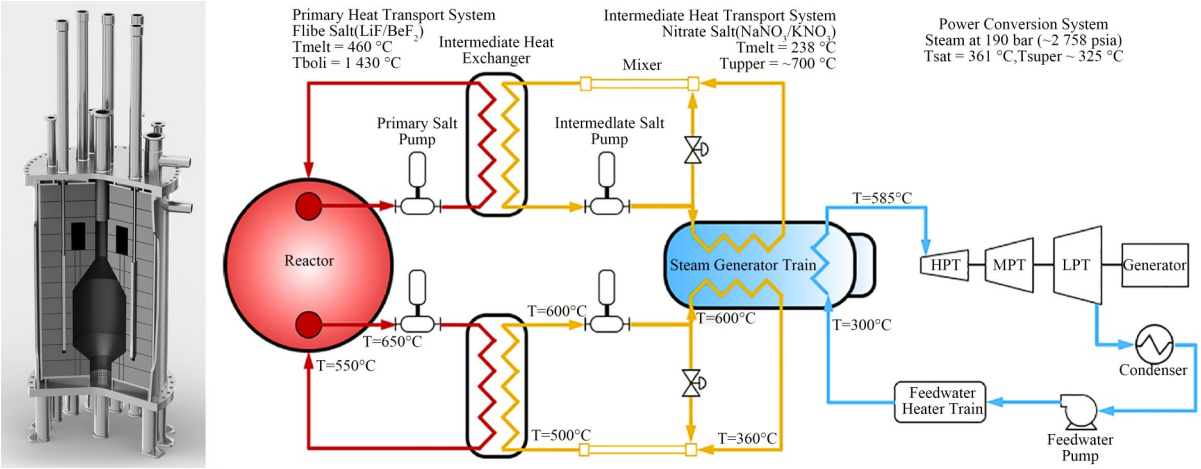

图6 KP-FHR堆芯概念方案与整体系统概念方案[9-10]

Fig. 6 KP-FHR core conceptual design and overall system conceptual design[9-10]

Kairos Power公司于2025年12月为Hermes反应堆的生物屏蔽结构,成功开发并验证了基于增材制造(3D打印)的大型混凝土模板技术[11]。该项目名为“Janus屏蔽演示”,由Kairos Power公司与美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)的制造示范设施(MDF)以及巴纳德建筑公司合作完成。项目团队使用大型3D打印机制造了尺寸约10英尺×10英尺、采用碳纤维增强ABS材料的可堆叠复合模板。这些模板用于在现场直接浇筑(“现浇”)具有复杂几何形状的混凝土生物屏蔽柱,取代了传统的钢制或木制模具。Hermes反应堆基于增材制造的水泥浇筑案例如图7所示。

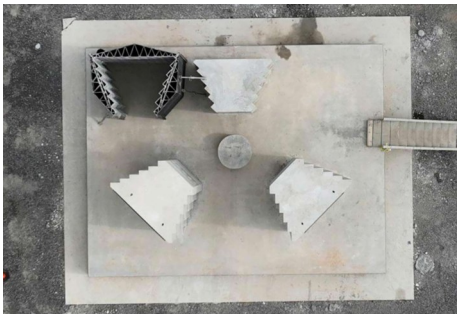

图7 Hermes基于增材制造的水泥浇筑案例[11]

Fig. 7 Additive manufacturing-based cement pouring case for hermes[11]

Kairos Power公司的Janus生物屏蔽结构项目通过采用大型3D打印复合模板技术,将复杂混凝土结构的现场浇筑工期从数周压缩至数天,实现了施工效率的突破性提升。该技术不仅支持传统工艺难以实现的复杂几何设计,更通过实时设计调整与快速迭代显著增强了工程灵活性与可靠性。在成本控制方面,项目通过早期验证与监管协同有效降低了技术风险,并计划采用基于木材残余物的生物复合材料进一步将模板成本削减75%。这项技术将增材制造的模块化与快速迭代优势系统性地引入核能基础设施建设,为Hermes反应堆及未来商业化电站的加速部署奠定了创新性工程基础。

2.2.4 热管微堆(eVinci)

eVinci™微反应堆是西屋公司正在开发的下一代微型模块化反应堆,旨在为偏远、离网及边缘电网地区提供可靠、可运输的分布式能源解决方案。

其核心创新是热管技术，它作为完全非能动的传热元件，直接取消了传统反应堆所需的反应堆冷却剂系统、泵、阀门以及外部冷却水，从根本上杜绝了冷却剂丧失事故和流致腐蚀/振动风险，极大简化了系统并提升了固有安全性，配合耐事故的TRISO燃料，可实现高达5 MW的电功率输出和超过8年的免换料运行。该反应堆在工厂完成组装，通过标准集装箱运输，现场安装占地小于2英亩，能适应多种严苛环境，并能与可再生能源无缝结合，为采矿、工业供热、关键基础设施等广泛领域提供零碳排放的基荷电力和热能。

西屋公司针对eVinci微堆的主换热器，运用了拓扑优化（Topology Optimization）与增材制造技术，具体开发了一种独特的晶格支撑结构，用于支撑换热器的集管板[12]。这种结构设计旨在实现柔性支撑，允许换热管在热循环过程中自由移动，从而有效管理热应力，提高部件的可靠性和寿命。项目首先利用拓扑优化、有限元分析（FEA）与面向增材制造的设计（DfAM）完成了创新性轻量化设计；随后同时制造了具有晶格支撑结构的增材制造部件和传统设计部件；最终，严格的疲劳测试对比表明，所有增材制造部件均成功满足性能要求，验证了该技术路径在制造满足核级性能与耐久性标准的高性能部件上的可行性。eVinci主换热器的增材制造探索方案如图8所示。

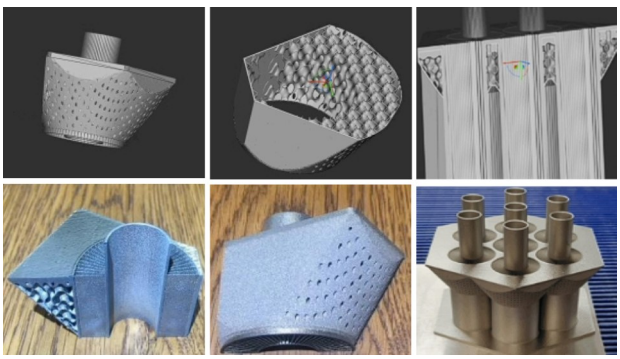

图8　eVinCi项目主换热器的增材制造探索方案[12]

Fig. 8　Additive manufacturing exploration program for the primary heat exchanger in the eVinCi project[12]

该技术是性能驱动型创新设计的关键赋能技术。通过拓扑优化，增材制造帮助解决了微堆紧凑空间内热管理的关键挑战，为eVinci微堆的商业化部署提供了重要的技术支撑。增材制造支持“快速制造”的能力，极大地加速了设计验证周期，加快了性能优化进程。

3　全球增材制造技术在小型模块化反应堆领域的发展趋势

3.1　欧洲增材制造发展趋势

欧洲的增材制造技术发展以“体系先行、标准驱动”为核心理念，其最具代表性的实践是欧盟层面资助的NUCOBAM等大型协作项目。这类项目汇集了来自法国、比利时、西班牙等多国的顶尖研究机构、核能企业和安全监管部门，其核心目标并非追求单项技术的突破，而是致力于构建一套从材料、工艺到部件性能的完整资格鉴定方法论与标准化流程，旨在为增材制造技术在高安全要求的核工业中的规模化、规范化应用扫清根本性障碍[17]。

在技术路径上，欧洲采取了“验证–固化–推广”的严谨路线。以NUCOBAM项目为例，其工作系统地涵盖了工艺稳定性验证、材料在辐照等核环境下长期行为的评估，以及具体部件（如阀门）的堆外性能测试。该项目最重要的成果是直接输出了面向全球两大主流核设计规范（ASME规范与法国AFCEN的RCC–M系列）的资格鉴定方法论草案，并明确设定了将其纳入RCC–MRx 2025版和RCC–M 2028版标准的具体路线图，这标志着欧洲正努力将研究成果转化为具有强制力的行业规则。

欧洲模式的优势与挑战均十分突出。其核心优势在于通过跨国、跨机构的协作，能够整合研发、应用、安全监管的全链条视角，形成权威且共识度高的技术基准，这极大地降低了未来产业化的制度性风险。然而，其挑战也在于此：一套由多国协商产生的、极其严谨但可能较为复杂的标准体系，如何能在全球范围内被快速采纳，并适应不同国家监管体系和工业生态的差异，同时确保其在执行过程中的一致性与高效性，是欧洲模式能否成功引领全球的关键考验。

3.2　俄罗斯增材制造发展趋势

俄罗斯的增材制造技术，由国家原子能集团公司（Rosatom）强力主导和驱动，呈现出一种高度集中、全产业链垂直整合的发展模式。其核心战略非

常明确：通过一个具备强大工程能力和资源调配权的国家工业主体，系统性构建从核心装备、专用材料到实际应用乃至人才培养的完整技术主权，旨在彻底摆脱对外部技术和供应链的依赖。这不仅是一项产业计划，更是其实现整体“技术主权”国家战略的关键组成部分。

在具体进展上，俄罗斯已取得了从研发到批量生产、再到实际工程应用的实质性突破。在装备层面，实现了中型金属3D打印机“RusMelt 300M”的系列化量产，并同步研发大型和小型设备以覆盖不同需求。在核心材料这一“卡脖子”环节，通过在旗下切佩茨克机械厂建立全周期生产线，成功实现了钛合金粉末的国产化，并规划向更尖端的镍基、钴基耐热粉末进军。尤为重要的是，其技术验证紧密围绕自身最强的核工业需求展开，已将3D打印的泵叶轮等部件应用于真实的核燃料生产设施中，标志着该技术已跨越原型展示，进入了为关键工业流程提供可靠部件的工程化阶段。

展望未来，俄罗斯的发展趋势表现出对内深化与对外扩张并举的特点。对内，通过在全国高校建立“公共访问增材技术中心”网络，系统性解决人才短缺问题，并向区域产业辐射技术。对外，则制定了明确的出口目标（设备销售收入30%以上），并已在印度、白俄罗斯等国布局。然而，其面临的挑战也根植于其模式之中：如何确保自主产业链的各个环节（设备、材料、工艺）在大规模生产中保持协同、稳定与成本竞争力；如何在核能等安全至上的领域，建立起一套获得国内国际广泛认可的、高效可靠的部件资格认证体系，将是其技术能否真正实现全球化商业成功的关键考验。

2025年，俄罗斯核监管机构批准了RITM-200小型模块化反应堆的第一台增材制造部件（接线盒）[13]。俄罗斯国家原子能公司（Rosatom）依托该项目编制了核能领域增材制造的相关监管文件，进一步发展利用增材制造RITM-200反应堆复杂、关键部件的能力。

3.3 美国增材制造发展趋势

美国的增材制造技术呈现出产学研用高度协同、市场与前沿并重的开放式创新生态。其发展由国家实验室（如橡树岭国家实验室的制造示范设施MDF）与国防部、能源部等强力牵引，核心目标是通过共享基础设施、工具和专业知识，降低先进制造技术的应用门槛，加速技术从实验室向产业界（特别是中小型企业）的转化。这一模式旨在构建一个覆盖材料、工艺、装备到认证的完整创新网络，确保美国在高端制造领域的全球技术领导力。

在技术路径上，美国的发展重点明确指向高性能、智能化与产业化。一方面，在航空航天、能源和国防领域，致力于攻克极端环境下的材料与构件制造难题，并高度重视通过实时过程监控、机器视觉与人工智能算法（如用于质量监控的卷积神经网络）来实现制造的数字化与智能化。另一方面，其技术焦点始终围绕“实现主流制造应用”展开，系统性地研究如何优化整个增材制造系统，以解决成本、效率、可重复性和规模化生产等产业化核心问题。

美国的战略优势和面临的挑战均与其生态模式紧密相关。其最大优势在于强大的前沿探索能力、数据驱动文化以及成熟的产业协作体系，这使其在智能监测、新材料开发和新型设计（如嵌入式传感器构件）方面持续领先。然而，其核心挑战也在于此：如何为这些创新性强但变数较多的新技术（特别是基于海量过程数据和人工智能的工艺）建立一套高效、经济且能被严格监管领域（如核电、航空）普遍接受的认证与标准化框架，是决定其技术能否最终安全、可靠地实现大规模商业化应用的关键瓶颈。

3.4 我国增材制造发展趋势

我国的增材制造技术呈现“以国家战略为牵引，以重大工程需求为导向”的快速发展态势，已从早期的跟踪研究，进入到了在关键材料和核心部件上实现自主突破、并积极构建完整技术体系的新阶段。在国家《中国制造2025》等顶层规划的持续支持下，技术发展紧密围绕航空航天、核能等高端装备的迫切需求展开，形成了产学研用协同攻关的鲜明特色。例如在核能领域，已成功实现了CAP1400核燃料组件下管座等复杂结构的一体化原型制造，并系统开展了国产核级不锈钢粉末的研发与制备工艺研究[18-19]。

从发展现状来看，我国已在装备、材料和典型

应用“点”上取得了显著突破。国内已成功研发大尺寸、高精度的金属增材制造装备，并在钛合金、高温合金以及核用不锈钢等关键材料的制备与打印工艺方面积累了深厚经验。多个国家级研发平台和创新中心相继成立，致力于攻克从设计软件、专用粉末到在线监测的全链条技术。然而，整体上仍面临从“点状突破”向“体系化、工程化”应用的转型挑战，特别是在满足核级严苛要求的长期性能数据积累、全流程质量一致性控制以及标准与鉴定体系的完善方面，仍需持续投入。

展望未来，我国增材制造技术的核心趋势与挑战在于如何构建自主可控、稳定可靠的完整工业体系。发展趋势明确指向高性能复杂构件制造、新材料研发与标准体系建设三者的深度融合。未来的关键任务，一方面是加快补齐高端专用粉末等基础材料短板，并深化材料在辐照、高温等极端环境下的行为研究；另一方面则是亟需建立一套与国际接轨、又符合我国工业实际且获得监管机构认可的资格鉴定与标准规范体系，从而将技术突破转化为可批量、安全应用的工业能力，最终实现从“跟跑”“并跑”到在部分领域“领跑”的战略目标。

3.5　小结

全球增材制造在SMR领域呈现多元化发展路径：欧洲重标准、俄罗斯强整合、美国推智能、中国抓自主。尽管发展模式不同，但共同趋势是逐步从研发示范走向工程化、规模化应用，并面临材料性能验证、工艺稳定性、标准体系建立等共性挑战。未来随着技术成熟与标准完善，增材制造有望进一步推动SMR成本下降与商业化进程。

4　结论与展望

本文系统梳理了增材制造技术在小型模块化反应堆领域的全球应用实践与发展脉络，通过横向对比与纵向分析，揭示了该技术为SMR带来的设计革新、性能提升与成本优化潜力。在增材制造技术在SMR领域的深度融合与规模化应用领域，总结了以下主要结论与主要挑战。

4.1　主要结论

（1）技术应用已进入工程验证阶段：增材制造技术已超越概念验证，在多个SMR项目中实现工程化应用，涵盖先进燃料（如氮化铀TRISO）、高性能结构材料（如镍基超合金、碳化硼复合材料）、复杂部件（如燃料组件底座、主换热器）及关键设备（如压力容器试件）的制造，展现出在降低成本、提升性能、缩短周期、优化供应链方面的明确价值。

（2）全球发展呈现差异化战略路径：美国以开放式创新生态为引领，聚焦智能制造与新材料研发，依托国家实验室加速技术转化；欧洲强调整合与标准先行，通过跨国协作构建认证体系，为产业化扫清制度障碍；俄罗斯采用国家主导的全产业链整合模式，推进技术主权与工程化应用；中国在国家战略牵引下，已在关键部件与材料上实现自主突破，正致力于构建自主技术体系。

（3）技术演进遵循“由外至内、由简至繁”的渐进逻辑：当前应用仍以非核心部件、样件与原型为主，但已呈现向堆芯关键部件、集成化模块发展的清晰趋势。随着工艺成熟度与可靠性提升，增材制造有望逐步承担更高安全等级部件的制造任务。

4.2　主要挑战

（1）核级材料在极端环境下的长期可靠性验证不足：当前缺乏在强辐照、高温高压、腐蚀介质等多场耦合环境下，增材制造材料（尤其是各向异性明显的沉积态组织）的长期性能数据积累。其辐照肿胀、蠕变、疲劳裂纹扩展等行为与传统锻造/铸造材料存在差异，亟需建立全寿命周期的材料退化数据库与预测模型，以支撑安全评审与设计寿期认证。

（2）工艺一致性与质量稳定性控制难度高：增材制造过程涉及多参数耦合，粉末特性、能量输入、扫描策略等微小波动均可能导致部件内部缺陷（如气孔、未熔合、微裂纹）及性能离散。在核安全“零容忍”的要求下，实现批量化生产中的微观组织均匀性、力学性能一致性及尺寸精度稳定性，仍是工艺走向成熟的根本瓶颈。

（3）全流程无损检测与质量认证体系尚未健全：增材制造部件的内部缺陷特征与传统工艺不同，现有无损检测技术（如超声、射线）对其典型缺陷的检出率、定量化评估能力尚存局限。同时，从“过程监控—成形检测—在役监测”的全链条质量追踪方法与验收标准仍不完善，难以满足核级部件

“可知、可控、可追溯”的监管要求。

4.3 展望

增材制造技术正逐步成为SMR技术创新与产业升级的关键使能技术。随着材料体系完善、工艺稳定性提升、标准体系建立以及成本持续优化，该技术有望在未来十年内推动SMR实现更高效的设计迭代、更低的建造与运维成本、更短的部署周期，从而影响各国核能部署政策，加速其商业化进程，为全球能源转型与碳中和目标实现提供坚实支撑。

参考文献：

[1] IAEA. Small modular reactors catalogue 2024[R]. Vienna：IAEA，2025.

[2] IEA. The path to a new era for nuclear energy[R]. Paris：IEA，2025.

[3] ORNL. The transformational challenge reactor[EB/OL].（2025）[2026–04–15]. https://www. ornl. gov/tcr#lsfanchor1.

[4] BETZLER B R，ADE B J，WYSOCKI A J，et al. Transformational challenge reactor preconceptual core design studies[J]. Nuclear Engineering and Design，2020，367：110781. DOI：10.1016/j. nucengdes.2020.110781.

[5] BWXT. BWXT advanced nuclear reactor（BANR）[EB/OL]. [2026–04–15]. https://www. bwxt. com/sectors/nuclear–energy/smrs–microreactors/bwxt–advanced–nuclear–reactor–banr/.

[6] HAGGERTY M，POWERS J，SHRIER A，et al. BWXT advanced nuclear reactor（BANR）regulatory update[R]. 2023.

[7] DOBKEN J. BWXT fires up furnace for advanced nuclear fuel[EB/OL].（2025）[2026–04–15]. https://www.bwxt.com/

[8] CARLOTTA G G，NICHOLAS R B. TRISO burnup–dependent failure analysis in FHRs using BISON[J]. Journal of Nuclear Materials，2023，586：154651.

[9] KAIROS POWER LLC. Technology sheet[EB/OL]. [2026–04–15]. https://www.kairospower.com/technology.

[10] EDWARD B，KYLE B，LAMBERT F，et al. Kairos power thermal hydraulics research and development[J]. Nuclear Engineering and Design，2020，364：110636.

[11] ORNL. 3D printing reshapes construction for nuclear energy[EB/OL].（2025）[2026–04–15]. https://www.ornl.gov/

[12] ARMSTRONG C，HUEGEL D. Westinghouse design for additive manufacturing（AM）and development needs[R]. 2021.

[13] WORLD NUCLEAR NEWS. Rosatom to 3D–print equipment elements for SMR[EB/OL].（2025）[2026–04–15]. https://www.world–nuclear–news.org/

[14] WORLD NUCLEAR NEWS. Newcleo plans fuel development centre[EB/OL].（2025）[2026–04–15]. https://www.world–nuclear–news.org/

[15] WORLD NUCLEAR NEWS. USNC licenses 3D printing for reactor component manufacture[EB/OL].（2022）[2026–04–15]. https://www. world–nuclear–news.org/

[16] LISTEK V. 3D printing meets nuclear：NAAREA’s bold bet on microreactors[EB/OL].（2025）[2026–04–15]. https://3dprint.com/

[17] Garcia J E M，Bourgeois M. NUCOBAM European project：NUclear COmponents based on additive manufacturing[J]. EPJ Nuclear Sciences & Technologies，2025，11：38.

[18] 何勇，陈雨航，何雪溢，等.核领域增材制造技术的研究进展[J].科技视界，2024，14(2)：41–46.
HE Y，CHEN Y H，HE X Y，et al. Research progress in additive manufacturing technology in the nuclear field[J]. Science & Technology Vision，2024，14(2)：41–46.

[19] 马青原，杜沛南，彭英博，等.金属增材制造技术在核工业领域的应用与发展[J].粉末冶金技术，2022，40(1)：86–94.
MA Q Y，DU P N，PENG Y B，et al. Application and development of metal additive manufacturing technology in the field of nuclear industry[J]. Powder Metallurgy Technology，2022，40(1)：86–94.