DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.02

核能领域增材制造技术的应用与发展

罗　英[1,2,3]，李青宇[1,2]，熊瑞坤[1]，陈　平[1,2]，何戈宁[1,2]，朱发文[1,2]，徐瑞璠[1,2]

1. 中国核动力研究设计院，四川 成都 610213
2. 核能增材制造四川省重点实验室，四川 成都 610213
3. 核反应堆技术全国重点实验室，四川 成都 610213

摘　要：核能领域对设备与零部件的精度、性能和可靠性要求极高，传统制造技术难以满足其发展需求。增材制造技术则为设备的定制化、模块化和快速制造提供了全新途径。本文系统分析了增材制造技术在核能领域的应用与工程价值，并调研了全球主要核能国家在增材制造技术研究和应用方面的最新进展，重点介绍了中国核动力研究设计院等机构在核能领域增材制造方面的具体实践和取得的成果。针对增材制造技术在核能领域规模化应用方面存在的关键挑战与困难，提出了未来核能领域增材制造技术的主要建设与发展方向，包括先进反应堆设备研制、先进燃料及材料研发、系统及鉴定技术研究验证、质量过程监督体系建立、核行业增材制造标准体系研究、增材制造数字化技术研究以及高水平人才与资源保障等。对推动增材制造技术在核能领域的发展与成熟应用具有指导意义。

关键词：增材制造；核能领域；研究现状

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303(2026)04-0012-08

Application and Development of Additive Manufacturing Technology in the Nuclear Energy Sector

LUO Ying [1,2,3], LI Qingyu [1,2], XIONG Ruikun[1], CHEN Ping[1,2], HE Gening[1,2], ZHU Fawen[1,2], XU Ruifan[1,2]

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China
2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 6102131, China
3. National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Chengdu 610213, China

Abstract: Additive manufacturing (AM) is an advanced intelligent manufacturing technology that utilizes digital techniques to fabricate products through layer-by-layer material deposition. This innovative approach offers significant advantages, including process simplification and rapid prototyping of complex structures, thereby enabling new possibilities for equipment customization, modularization, and accelerated production. This paper systematically examines the applications and engineering value of AM technology in the nuclear energy sector. Through a comprehensive review of current research, implementation status, and developmental trends of AM in nuclear applications, we identify and analyze the key challenges and obstacles hindering large-scale AM adoption in this field. Furthermore, based on emerging trends in nuclear AM technology, we propose several strategic development directions for future advancement. These findings provide valuable insights and guidance for promoting the maturation and widespread implementation of AM technology within the nuclear energy industry.

Keywords: additive manufacturing; nuclear energy; research status

引用格式：罗英，李青宇，熊瑞坤，等. 核能领域增材制造技术的应用与发展[J]. 电焊机，2026，56(4)：12-19.

Citation: LUO Ying , LI Qingyu , XIONG Ruikun, et al. Application and Development of Additive Manufacturing Technology in the Nuclear Energy Sector[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 12-19.

收稿日期：2026-01-27　　**修回日期：**2026-02-05

基金项目：稳定支持科研计划资助项目(WDZC-2023-05-03-02)

作者简介：罗　英(1971—)，教授级高工，博导，主要从事反应堆科研和工程设计。E-mail：luoying@npic.ac.cn。

0　引言

增材制造（Additive Manufacturing，AM）又称为3D打印，是一种基于分层制造原理，通过材料逐层累加方式，将数字化模型直接转化为实体零件的先进智能制造技术[1-2]。作为先进制造领域的标志性技术，增材制造已被提升至国家战略高度。2012年，美国将其列为国家先进制造技术发展战略中11项优先发展的跨科学技术之一[3]；我国亦高度重视其战略地位，2021年发布的《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》明确提出“加快推进增材制造技术研发和应用，推动与传统制造业深度融合”的战略部署，2022年党的二十大报告中指出“推动制造业高端化、智能化、绿色化发展”更是作为增材制造的顶层发展指引，明确了传统制造业的发展方向。

传统制造技术（即减材制造）通过去除材料来实现零部件的加工制造，但其难以加工复杂结构件，且无法避免材料利用率低、加工周期较长的问题。与减材制造相比，增材制造具有柔性高、无模具、周期短、不受零件结构和材料限制等一系列优点，能够制造复杂几何形状的部件、减少材料浪费、缩短生产周期并降低成本，近年来已在核能、航空航天、汽车、电子、医疗、军工等领域均得到了广泛应用[4-7]。而就核能领域应用而言，核工业对反应堆设备与零部件精度、性能和可靠性均有着极高的要求，因此增材制造为核能领域关键设备与零部件的制造加工提供了一种全新的解决方案，已逐步成为全球核工业极具变革潜力的先进制造技术之一，但同时也面临着诸多挑战。本文通过综合分析增材制造在核能领域的应用现状与研究进展，包括反应堆设备与零部件制造、反应堆运行与维护等方面的应用现状，以及目前所面临的挑战与困难，以期对其在核能领域的发展现状进行综述，指导增材制造在核能领域的进一步发展。

1　增材制造在核能领域的价值发掘

增材制造技术作为引领现代工业变革的核心技术之一，为核能设备的创新研发与制造提供了全新的技术范式，在核能领域展现了多维创新优势。

（1）设计革新。增材制造从根本上改变了传统产品的设计理念，展现出其独特的设计优势，可为核能领域设备设计带来颠覆性革新。增材制造通过拓扑优化设计可实现设备与零部件结构的轻量化，实现其重量与结构优化；通过创成式设计生成多种结构方案，打破传统直觉实现设计创新；以晶格点阵技术、功能梯度材料等实现产品的综合性能优化。在以上设计技术的协同作用下，实现核能领域设备传统“制造约束设计”模式向“功能引领设计”模式的转变，最大化设备与产品的设计自由度，通过多部件集成与功构一体化部件的设计制造，实现产品综合性能的显著提升。

（2）材料优势。增材制造因其独特的制造工艺，可实现对材料性能的精准调控。增材制造基于核能领域设备对材料的特殊要求与应用场景需求，通过构建“增材制造基因组”，结合材料工程计算（ICME），可实现对材料性能的精准调控。基于以上方案所建立的材料基因库可实现对材料性能的参数化表达，极大缩短使用同类材料的不同产品开发周期，为核能领域设备研制提供更先进、更高效的材料定制化方案。

（3）效率提升。通过增材制造工程技术中心可实现对原材料、设计、制造、鉴定的集中布局，显著提升产品的研发效率与高效应用。针对核能领域关键产品，可通过与国内3D打印设备厂家及相关科研院所、高校建立长期战略合作关系，构建“产、学、研、用”的协同平台，确保新一代增材制造技术的及时引进和应用，支撑核能领域增材制造产品的快速研发与迭代。

（4）数字化优势。增材制造基于其全数字化特点，在实现产品设计与工艺数字化交付的基础上，可结合大数据、数字孪生、区块链等新技术，打造增材制造数字化平台，实现产品从设计、仿真、工艺分析、打印制造、过程智能检测与控制、优化反馈、产品检验到使用维护的全生命周期数字化管理和闭环反馈，加速产品的迭代优化。

（5）产业链条重塑。增材制造技术可显著提升产品从设计、研发、制造到运维等方面的核心竞争力，需以产业化发展为目标，实现传统产品制造产业链条的颠覆与重塑。设计端可掌握技术核心，形

成以设计端为主，广泛合作的产业链发展生态，并与增材制造优势企业联合，迅速形成产业规模，推进增材制造在核能领域的建设与发展。

2 核能增材制造技术发展及应用现状

2.1 全球增材制造技术在核能领域的发展态势

增材制造技术凭借其高度的设计自由度、高材料利用率和短生产周期等优势，正在深刻影响核能领域的设计、制造和运维模式。全球主要核工业机构与核能企业纷纷布局，在核级部件研发与工程应用方面积极开展了增材制造技术研发工作，美、法、中等国家均取得了不同程度的突破，并在工程项目中实现了初步应用。

美国能源部橡树岭国家实验室（ORNL）早在2017年便开展了核级材料相关的增材制造工作，利用超声波增材制造的薄材堆叠技术，实现了高通量同位素反应堆中子吸收材料铝控制部件的制造。2019年ORNL正式启动了“转型挑战反应堆计划项目”（The Transformational Challenge Reactor Demonstration Program，TCR），旨在于2023年前利用增材制造技术建成一座微型反应堆，以验证增材制造、计算机科学以及数字化等先进智能技术在反应堆设计研发方面的可行性[8-9]。该实验室研究人员长期致力于优化增材制造堆芯设计，以期实现大规模的增材制造工艺以实现对反应堆堆芯的打印制造。TCR是一种先进的气冷反应堆，反应堆组件为六边形，堆芯结构使用3D打印技术制造，从而实现反应堆结构快速、安全生产，该项目预期可实现整个堆芯在几周内完成打印制造的目标。2020年ORNL宣布堆芯3D打印取得了阶段性突破，后续将进一步优化设计与制造工艺，并验证堆芯打印件材料的一致性与关键性能。同时ORNL表示除在核能领域部署增材制造技术外，还计划将增材制造技术移交给其他工业，用于快速制造产品零部件[10-11]。

西屋电气公司（Westinghouse Electric Company）基于增材制造技术开展了材料研发、关键结构件制造等工作，并在商用机组中进行了应用。材料研发方面，西屋开展了核级镍基合金和不锈钢的增材制造工艺优化工作，成功解决了设备传统机加制造过程中复杂结构成形的难题；通过激光粉末床熔融技术（LPBF）实现了燃料组件定位格架的快速成形制造，提升了部件精度和性能，并已成功应用于商用核电机组如AP1000机组中。在机组延寿应用方面，利用增材制造快速成形的特点，缩短机组可更换部件的制造周期，极大降低了制造与时间成本。

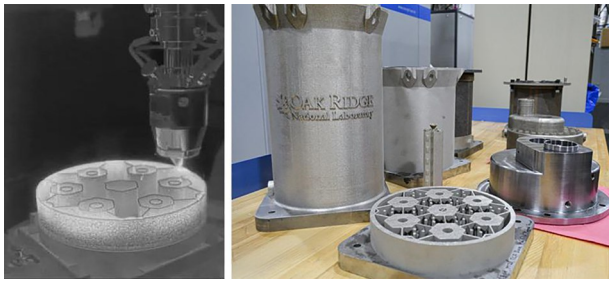

图1 橡树岭国家实验室TCR项目

Fig. 1 TCR project at Oak Ridge National Laboratory

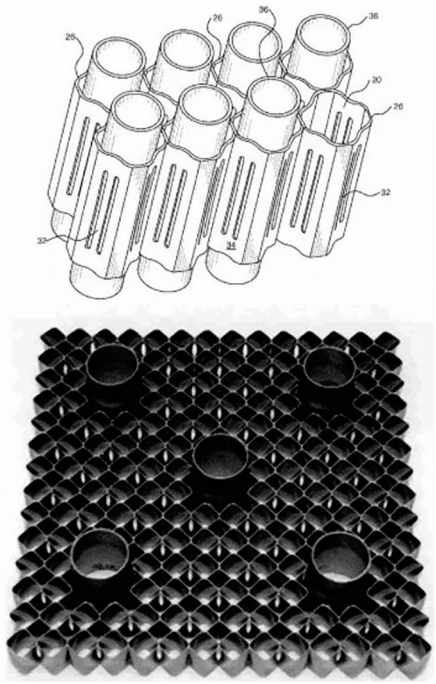

图2 西屋公司基于激光粉末床熔融技术制造的燃料组件定位格架

Fig. 2 Fuel assembly spacer grid manufactured by Westinghouse using laser powder bed fusion technology

法国法马通公司（Framatome）自2015年正式启动增材制造技术研究以来，重点研究了使用增材制造技术制造不锈钢和镍基合金燃料部件并推动增材制造技术在核燃料部件制造中的设计优化，成功应用至多个在役核电机组中，逐步实现增材制造从实验室到工程应用的验证与部署。2019年法马通

将首个3D打印燃料部件装入瑞士戈斯根核电机组堆芯；2020年宣布成功利用3D打印技术制造了铀钼合金和铀硅合金物体；2021年与美国橡树岭国家实验室合作研发并制造了4个增材制造的不锈钢燃料组件通道紧固件，安装在美国布朗斯弗里2号机组中；2022年将首个增材制造不锈钢燃料部件装入了瑞典福什马克核电厂3号机组堆芯；2024年通过增材制造制备防碎屑过滤器，安装于瑞典灵哈尔斯核电厂4号机组中，简化了其生产过程并提高了设备性能和安全性[12]。

俄罗斯国家原子能集团公司集中开展了核能领域的增材制造研究与应用工作，于2018年2月成立俄原增材制造技术公司，专门负责核领域3D技术研发。2020年12月，启动了俄罗斯首个使用国产设备建设的3D打印技术中心；2023年成功研制可用于制造核反应堆大型部件的3D打印机，使用直接金属沉积（DMD）技术，承载能力达8吨，能够打印直径2.2 m、高1 m的产品，在增材制造打印机发展方面取得了显著进展。

德国西门子公司2017年1月在斯洛文尼亚克尔什科核电厂成功安装首个直径为108 mm的增材制造消防泵金属叶轮，实现了增材制造设备在核电厂的首次应用。该核电站自1981年运行以来使用的老旧叶轮原制造商已停业，传统制造方式难以实现制造，通过增材制造技术成功实现了老旧零部件的替换，且性能优于原部件，完全能够满足核工业设备严苛的安全性和可靠性要求[13]。

英国核先进制造研究中心于2017年联合法马通公司、法国电力公司、法国原子能与替代能源委员会和瑞典材料研究组等共同实施参与核领域增材制造“PowderWay”项目，确定了一系列可使用增材制造的核级零部件并制定了相应的发展规划。芬兰工业动力公司与富腾公司合作利用增材制造技术研制核级不锈钢球阀，以应对核电设备供应商数量减少、设备更换成本上升的问题。加拿大核工业组织联合相关供应商于2022年1月联合发布《加拿大核工业先进制造发展路线图》，强调了以增材制造为代表的先进制造技术对于核工业发展的重要性，旨在利用增材制造技术积极推动包括核电厂老旧零部件替换、小堆部件生产与零部件按需制造的长期发展[14]。

在核燃料与组件生产方面，增材制造为复杂几何结构、功能梯度结构与新型复合材料燃料提供了传统工艺难以实现的制备路径[15]。Yang[16]探索了使用替代材料进行氧化物核燃料芯块的增材制造的可行性，并讨论了陶瓷核燃料生产中面临的技术挑战。采用激光粉末床熔融技术制备的Inconel 718合金核燃料组件原型，已通过了严格的机械测试（包括室温和高温拉伸及疲劳测试），验证了其性能足以替代商用部件[17]，这表明增材制造在提升核燃料组件的经济效益和性能方面具有巨大潜力。

在核反应堆的结构材料和零部件方面，面对高温、高压、腐蚀和辐照等极端服役环境，增材制造可生产具有复杂内部冷却通道的结构部件，从而提高冷却效率和热管理能力。Ulmer[18]等人选取高镍奥氏体不锈钢合金800H作为潜在应用材料，系统开展增材制造专用核级材料的辐照性能研究；Kang[19]等人采用激光定向能量沉积（L-DED）技术实现了核安全1级阀门等典型安全级部件的增材制造，为在运核电厂设备的有效快速维护提供了可能性，尤其是在需要定制化、小批量生产替换部件的场景下。此外，功能梯度材料（Functionally Graded Materials，FGMs）的增材制造在核应用中也展现出巨大潜力。Sasi、Alkunte[20-21]等人通过精确控制功能梯度材料的微观结构，成功在增材制造的零部件内部实现了材料性能的渐变，以优化其在复杂环境下的整体性能。

在核电厂设备的运行维护效率和备件保障方面，增材制造可快速、经济地实现定制化替换件的按需制造[22]。同时，其设计自由度使得核反应堆和燃料组件的创新设计成为可能，极大地提高了设计效率，降低设计与制造成本。Gladden[23]等人设计并增材制造了具有复杂内部流道的热交换器结构，实现了冷却效率和经济性的同步提升。Mondal[24]等人结合数字孪生与增材制造技术，构建复杂核系统虚拟模型和全流程优化体系，从而提高了产品运行效率，实现了系统行为的预测与维护优化。

2.2　我国核能领域增材制造技术实践与成果

我国高度重视增材制造产业发展，已将其列为国家战略性新兴产业和制造业转型升级的关键技

术。《中国制造2025》中明确指出将增材制造列为高端设备创新工程的重点方向，强调其在复杂精密部件制造中的突破作用；“十四五”规划明确提出发展增材制造产业，推动其在航空航天、能源设备（含核电）、医疗等领域的应用。在国家战略引领下，我国核能领域增材制造研究快速推进，已形成以科研院所为主导、核电集团与装备企业协同攻关的发展格局，并取得一系列标志性成果[25]。

中国核动力研究设计院（Nuclear Power Institute of China，NPIC）是国内核能领域最早开始并系统性持续开展增材制造研究的单位，利用增材技术实现核能领域设备的快速、高效设计与制造。2015年NPIC首次在反应堆主设备反应堆压力容器的制造加工中采用增材制造技术，并于2016年11月成功打印出我国首个小堆（ACP100）压力容器试件，是我国重大型设备制造技术的一次突破[26]。在近十年来，NPIC相继在多个核电项目中开展了基于增材制造的零部件与设备研制，实现了传热部件、燃料格架、换热器等设备的快速、高效设计，大幅缩短了产品研发与制造周期。

图3　通过电熔增材技术制造的反应堆压力容器

Fig. 3　Reactor pressure vessel manufactured using electrofusion additive manufacturing technology

在设计方面，NPIC通过增材制造技术大幅减少零部件数量，实现多件合一，解决了多个核能领域复杂结构设计难题。NPIC相继开展了反应堆堆内构件与一体化接管等复杂堆内结构设备的增材制造研究。对于堆内构件整体式堆芯围筒结构，分别选用Z2CN19-10（控氮）奥氏体不锈钢与ER308L焊丝，采用激光近净成形工艺与电弧增材制造工艺，成功制备出结构外径达到3 630 mm的整体式堆芯围筒构件，该构件为目前国内外最大尺寸的核领域

图4　核领域增材制造换热器研制

Fig. 4　Development of additively manufactured heat exchanger for nuclear applications

不锈钢激光增材制造结构件，并成功开发了适于堆内构件电弧增材制造的成形工艺、变形控制技术及无损检测方法。在复杂结构设计方面，突破传统制造约束下的设计局限，采用参数化有限元仿真和拓扑优化相结合的方法，实现了多因素约束条件下的反应堆接管结构的轻量化和高性能设计，与传统制造结构相比，构件在实现轻量化、小型化的同时，流阻降低90%，为增材制造技术在核能领域复杂异形结构件的工程化应用提供了典型示范。

材料研究方面，增材制造全新的材料成形方式，为传统材料的迭代与新材料研发带来了全新的思路。NPIC围绕高熵合金、含硼不锈钢与高温合金等体系开展系统研究，实现材料性能预测模型的快速迭代与性能优化。

除NPIC外，国内其他核工业集团也积极开展了相关研究与实践工作。中国广核集团采用选区激光熔化（SLM）技术成功制造出核电站复杂流道仪表阀阀体，并经过基础性能测试，阀体的材料化学成分和基础力学性能满足国际核电标准RCC-M的要求；中核北方核燃料元件有限公司采用3D打印技术完成CAP1400自主化燃料原型组件下管座研制，从而在国内首次实现了3D打印技术在核燃料元件制造领域的应用。

3　关键挑战

尽管目前增材制造技术在核能领域已实现了诸多应用与成果，具备广阔的发展潜力，但在其广泛应用之前仍面临诸多挑战与困难，尤其是在工艺及质量控制、材料性能评估、标准化与可靠性保障等方面[27]。由于核能领域对设备及零部件的质量控制和可靠性要求极高，使得增材制造工艺的优化和质量控制成为目前其在核能行业推广发展的首要关键难题之一[28]。增材制造在设备与零部件加工成形过程中涉及到大量工艺参数，如激光功率、扫描速度、层厚等，这些参数对最终部件的微观结构和宏观性能有着复杂影响。不同于传统制造加工可仅对加工部位进行无损检测，增材制造得到的零部件其内部可能存在细微缺陷，如孔隙、夹杂等。受限于零部件结构，传统的无损检测技术可能难以发现这些缺陷，因此也对先进的无损检测技术研发与发展提出了更高要求[29]。此外，增材制造初期设备投资较大、材料成本较高也极易导致时间与经济成本损失，确保增材制造过程的可重复性和部件性能的一致性也是其在核能领域应用需论证的关键。

其次是核能领域严苛工况下的材料性能与结构完整性论证问题。核反应堆部件长期服役于高温（通常超过 200 ℃）、高压（可达 15~20 MPa）以及强中子辐照（寿期内累计辐照剂量可达 10~100 dpa）的极端环境，对材料的性能提出了极高要求。增材制造技术虽然为核部件制造提供了新的可能性，但其特有的工艺特性也为材料性能和结构完整性带来了新的挑战。增材制造过程可能导致材料内部出现各向异性、残余应力、孔隙、未熔合区域以及独特的晶粒结构等缺陷，特别是其快速熔凝合金粉末的特点会导致材料内部产生明显的各向异性，材料在构建方向和平面方向的晶粒生长和微观组织存在显著差异，这种各向异性会直接影响材料的拉伸强度、疲劳寿命、蠕变行为和断裂韧性等关键力学性能。

目前，针对增材制造核材料的辐照响应特性研究仍较为匮乏，亟需大量实验数据来评估其在核环境下的长期稳定性。此外，增材制造材料的辐照损伤与老化等基础研究尚处于起步阶段，而核反应堆设备与零部件的服役周期通常要求达到 30~60 年。传统锻件材料在辐照下的行为已有大量数据积累，但增材制造材料独特的微观结构可能使其辐照损伤机制与传统研究结论间存在显著差异。上述性能退化机制与增材制造特有的微观结构如何相互作用，将直接影响部件的使用寿命和安全性，因此仍需要更全面、深入地研究来阐明机理[30]。

此外，核能领域增材制造发展还面临着标准化体系构建、行业监管以及人才培养等难题。核工业作为高度受监管的行业，对材料和部件的认证和标准化有着严格要求。但截至 2025 年全球范围内尚未建立针对增材制造核级设备及零部件的统一设计、制造、检测和认证标准，难以直接适用现有核安全法规。亟需实现标准体系框架与认证监督流程建立，使其与现有核法规相衔接，建立针对增材制造核部件的统一标准体系。行业方面，核工业对专业人才的需求日益增长，而兼具增材制造工艺、核材料科学、无损检测和核法规知识的复合型专业人才严重短缺，短期内无法匹配行业发展的需要。长期来看，仍需建立系统性的核能增材制造教育培训体系和产、学、研协同创新机制。

4　增材制造在核能领域的发展建议

增材制造在核能领域具备广阔的发展空间与重大应用前景。结合当前核能领域的增材制造研究及应用现状，分析整理其在核能领域潜在的应用与发展价值，梳理并得到以下建设意见：

（1）先进反应堆设备研制。全面梳理可利用增材制造技术实现价值的反应堆设备，开展先进产品研制，推进相关产品与设备的替换应用；基于增材制造技术“拓扑设计”与“协同设计”的思想，针对核能领域设备应用场景与特殊需求，瞄准零部件高度集成、小型化设计与材料性能统一等设计特点，开展核能领域设备的优化设计；开展各项技术攻关与系统集成演示验证。包括建立正向设计体系与多学科协同设计分析技术，实现典型样机的设计研发与增材制造应用验证；在此基础上，逐步完成核能领域增材制造关键技术节点的填充，系统实现核能领域增材制造技术全面自主掌握。

(2)先进燃料及材料研发。以压水堆燃料组件零部件(如燃料格架、阻流塞)及燃料元件为技术攻关重点,同步探索新型燃料及结构材料的增材制造技术,掌握增材制造创新设计技术、增材制造工艺以及材料性能,实现增材制造燃料材料的辐照和应用研究,加快推动增材制造在核燃料领域的应用进程。

(3)系统及鉴定技术研究验证。开展核能领域常用材料的系统性研究验证,获得满足核级设备要求的材料及工艺;梳理核能领域设备增材制造全流程性能形成的关键因素,研究确定增材制造过程中产品性能影响的关键参数,完善增材制造鉴定技术框架及工作流程,建立核能领域增材制造性能表征及鉴定评价体系。

(4)质量过程监督体系建立。构建增材成形—热处理—后处理的全链条质量过程监督体系,针对全过程的质量管控,对制造过程中的关键工艺参数进行监测与闭环调控,结合过程数据的可追溯化管理,实现增材制造件的质量精准把控。

(5)核行业增材制造标准体系研究。在参考借鉴国外增材制造标准体系框架和构成要素的基础上,结合我国核安全监管的相关要求以及核工业的特殊要求与工程实践,构建核工业增材制造标准体系,完成标准需求分析,建立标准化路线图。

(6)增材制造数字化技术研究。牵引并整合国内外增材制造数字化研发资源,攻克统一平台、统一数据接口等技术难点,建立基于统一大数据链路与智能反馈数据流程的增材制造全周期软件平台、核能领域设备增材制造智能系统以及核能领域设备装置增材制造产品数字仓库关键技术。

(7)高水平人才与资源保障。引入业内增材制造领域的高端复合型人才,兼具反应堆设计专业素养与增材制造技术专长,并在国家与行业层面设立核能领域增材制造技术研发中心,人才与平台相辅,加强技术与设备研制的深度融合,争取国家与业内相关部门政策上的支持,保障核能领域增材制造的落实。

随着材料学、工艺技术和质量控制方法的不断进步,同时针对核能领域设备结构设计的复杂化、多样化以及性能需求的不断提升,增材制造技术的推广与应用将是发展的必然趋势。作为一种颠覆性的制造技术,增材制造也将成为我国在核能建设与发展的关键突破与创新,未来的发展应注重推动产、学、研、用的深度融合,以核能领域关键产品与设备需求为牵引,建立健全的增材制造鉴定评价与标准体系,以支撑其在核能领域的应用,推进增材制造技术成为核能领域制造创新与性能突破的关键核心技术。

参考文献:

[1] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程,2016,44(02):122-128.
ZHANG X J, TANG S Y, ZHAO H Y, et al. Research Status and Key Technologies of 3D Printing[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(02):122-128.

[2] 杨强,鲁中良,黄福享,等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术,2016,507(12):26-31.
YANG Q, LU Z L, HUANG F X, et al. Research on Status and Development Trend of Laser Additive Manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 507(12):26-31.

[3] 祁萌,李晓红,胡晓睿,等. 增材制造技术在国外国防领域的发展现状与趋势[J]. 国防制造技术,2013,29(05):12-16.
QI M, LI X H, HU X R, et al. Development Status and Trend of Additive Manufacturing Technology in Foreign National Defense Fields[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013, 29(05):12-16.

[4] MELCHELS F P W, DOMINGOS MA N, KLEIN T J, et al. Additive manufacturingof tissues and organs[J]. Progress in PolymerScience, 2012, 37(8):1079-1104.

[5] BUCHBINDER D, SCHLEIFENBAUMH, HEIDRICH S, et al. High power selective lasermelting (HP SLM) of aluminum parts[J]. PhysicsProcedia, 2011, 12:271-278.

[6] BAUFELD B, VAN DER BIEST O, GAULT R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties[J].Materials & Design, 2010, 31:106-111.

[7] MURR L E, MARTINEZ E, AMATOK N, et al. Fabrication of metal and alloycomponents by additive manufacturing: examplesof 3D materials science[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 1(1):42-54.

[8] Adam Hehr, Justin Wenning, Kurt Terrani, et al. Five-

Axis Ultrasonic Additive Manufacturing for Nuclear Component Manufacture[J]. Jom，2016，69：485–490.

[9] World Nuclear News. ORNL developing 3D–printed nuclear microreactor[EB/OL].（2020–05–12）[2022–03–14]. https://www.world–nuclear–news.org/Articles/ORNL–developing–3D–printed–nuclear–microreactor.

[10] DOE.The Transformational Challenge Reactor（TCR），https://www.energy.gov/ne/transformational–challenge–reactor–tcr

[11] 美国橡树岭国家实验室（ORNL）核电反应堆核心3D打印技术取得阶段性突破[J].辐射防护，2020，40（3）：203.

[12] 正式安装3D打印不锈钢核燃料组件，瑞典核电站已工业化应用[EB/OL].（2022–09–27）[2024–01–15]. https：//t.cj.sina.com.cn/articles/view/5782647650/158ac3362001012os2.

[13] 陈兴江，刘彦章，张峰. 基于3D打印技术的主泵试验用叶轮研制[J]. 机械设计与制造，2017（S1）：67–69.
CHEN X J，LIU Y Z，ZHANG F. Development of Impeller for Main Pump Test Based on 3D Printing Technology[J]. Machinery Design & Manufacture，2017（S1）：67–69.

[14] 伍浩松，张焰，戴定. 3D核电打印现状及前景[J]. 中国核工业，2017，No.203（07）：45–47.
WU H S，ZHANG Y，DAI D. Current Status and Prospects of 3D Printing in Nuclear Power[J]. China Nuclear Industry，2017，203（07）：45–47.

[15] Nelson A T. Prospects for additive manufacturing of nuclear fuel Forms[J]. Progress in Nuclear Energy，2023，155：104493.

[16] Yang J. A Feasibility Study on the Application of Additive Manufacturing Method to Fabricate Nuclear Fuel using Surrogate[Z]（2022–12–10）.

[17] Jeong S G，Kim E S，Ahn S Y，et al. Prototyping of nuclear fuel assembly parts by laser powder bed fusion of Inconel 718 [J]. Progress in Nuclear Energy，2025，184：105694.

[18] Ulmer C J，Motta A T. Characterization of faulted dislocation loops and cavities in ion irradiated alloy 800H [J]. Journal of Nuclear Materials，2018，498：458–467.

[19] Kang S H，Suh J，Lim S Y，et al. Additive manufacture of 3 inch nuclear safety class 1 valve by laser directed energy Deposition[J]. Journal of Nuclear Materials，2021，547：152812.

[20] Sasi A，Srivastava M，Dash K. Role of additive manufacturing in developing functionally graded materials for nuclear applications[J]. Frontiers in Nuclear Engineering，2025，4：1603437.

[21] Alkunte S，Fidan I，Naikwadi V，et al. Advancements and Challenges in Additively Manufactured Functionally Graded Materials：A Comprehensive Review[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing，2024，8（1）：23.

[22] Nakajima M，Kojima T，Abe T，et al. Challenges in Standardizing Additive Manufacturing for Nuclear Components and Associated Material Testing I：Overview of the Project and its Future Outlook[C]//Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers，2025，89091：V05BT06A023.

[23] Gladden B J，Snarr S E，Haas D A. Survey of Additive Manufacturing Signatures for the Prevention of Nuclear Proliferation[J].Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry，2022，331（12）：4953–4961.

[24] Mondal K，Martinez O，Jain P. Advanced manufacturing and digital twin technology for nuclear energy[J]. Frontiers in Energy Research，2024，12：1339836..

[25] 国家原子能机构. 3D打印技术在国内商运核电站首次实现工程应用[EB/OL].（2018–02–11）[2022–03–14]. http://www. caea. gov. cn/n6758881/n6758890/c6799840/content.html.

[26] 国家原子能机构. 中核集团成功3D打印我国首个小堆压力容器[EB/OL].（2016–12–07）[2022–03–14]. http://www.caea.gov.cn/n6758881/n6758890/c6786765/content.html

[27] Li H，Fu X，Zhang L，et al. A Review of the Latest Developments in the Field of Additive Manufacturing Techniques for Nuclear Reactors[J]. Crystals，2022，12（7）：918.

[28] Bourgeois M，Petesch C，Verlet R，et al. Some Challenges Regarding Qualification of Additive Manufacturing Components for a Nuclear Use – NUCOBAM Project[C]//Pressure Vessels and Piping Conference.American Society of Mechanical Engineers，2024.

[29] Wylie B，Moore C Jr. Optical Methods of Error Detection in Additive Manufacturing：A Literature Review [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing，2023，7（3）：80.

[30] Zhou D，Yan K，Du Q，et al. Review of mechanical performance and structural integrity challenges of AM materials and components in nuclear Reactors[J]. Additive Manufacturing Frontiers，2025，4（4）：200271.