智能新核·增材未来
INTELLIGENT NUCLEAR, ADDITIVE FUTURE

DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.01

增材制造技术在核能材料领域的挑战与前景

王唯一[1,2]，樊恩想[1]

1. 上海电气中央研究院，上海 200070
2. 核能增材制造四川省重点实验室，四川 成都 610213

摘　要：随着核能系统向更高安全性、经济性与性能指标发展，增材制造技术因其在复杂构件一体化成形、材料利用率提升及快速迭代设计方面的独特优势，被视为推动核能装备革新的一项关键使能技术。目前，国内外研究已围绕核级材料的增材制造适应性、成形件组织性能调控及在反应堆关键部件（如燃料包壳、换热器、屏蔽结构）的潜在应用展开积极探索，初步验证了其技术可行性，尤其是在以TPMS结构换热器等为代表的具有复杂结构构件的生产制造方面，增材制造技术相比传统锻造铸造方式具有显著的优势。然而，将增材制造技术真正应用于核能这一极端服役环境，仍面临一系列从材料、工艺到质量控制的系统性挑战，主要瓶颈体现在两方面。首先，部分核用金属材料（如钨及钨合金、镍基高温合金等）在增材过程中由于快速熔凝的非平衡工艺特性而极易产生热裂纹、气孔等冶金缺陷，难以满足核级部件严格的力学与抗辐照性能要求；其次，对于目前常用的核能材料，现有增材制造工艺窗口狭窄，难以同时保障几何精度、内部质量与稳定的理想微观组织，使得样件性能批次稳定性差，制约其工程化认证与应用。本文将探讨增材制造技术在核能领域的发展现状及应用前景，着重分析增材制造在气氛控制、解决开裂难题以及过程监测等方面的发展方向，并强调了建立“AI+高通量”智能研发体系的重要性，旨在通过结合人工智能、机器学习等前沿信息技术，加速新材料新工艺的设计与制造进程，系统性突破核能部件增材制造应用的核心技术瓶颈。

关键词：核能；增材制造；人工智能；材料

中图分类号：TM623；TG14　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303（2026）04-0001-11

Challenges and Prospects of Additive Manufacturing Technology in the Field of Nuclear Materials

WANG Weiyi[1,2], FAN Enxiang[1]

1. Shanghai Electric Group Central Academe, Shanghai 200070, China
2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

Abstract: As nuclear energy systems advance toward higher safety, economic efficiency, and performance metrics, additive manufacturing technology is recognized as a key enabling technology for driving innovation in nuclear equipment. This is due to its unique advantages in integrated forming of complex components, enhanced material utilization, and rapid iterative design. Current domestic and international research has actively explored the potential applications of additive manufacturing in nuclear-grade materials, focusing on adaptability, microstructural and property control of formed components, and their

收稿日期：2025-12-19　　**修回日期：**2026-01-19
作者简介：王唯一（1996—），博士，工程师，主要从事金属增材制造研究。E-mail：wangwy8@shanghai-electric.com。
通讯作者：樊恩想，高级工程师，E-mail：fanenx@shanghai-electric.com。

use in critical reactor components such as fuel cladding, heat exchangers, and shielding structures. These studies have preliminarily validated its technical feasibility, particularly in the production of complex structural components like TPMS structural heat exchangers, where AM demonstrates significant advantages over traditional forging and casting methods. However, the practical application of AM in the extreme service environment of nuclear energy still faces a series of systemic challenges spanning materials, processes, and quality control. The primary bottlenecks manifest in two aspects. First, certain nuclear-grade metallic materials (such as tungsten and tungsten alloys, nickel-based high-temperature alloys, etc.) are highly susceptible to metallurgical defects like hot cracks and porosity during the additive process due to the non-equilibrium characteristics of rapid solidification. This makes it difficult to meet the stringent mechanical and radiation resistance requirements for nuclear components. Second, for commonly used nuclear materials, existing additive manufacturing processes have a narrow operational window, making it difficult to simultaneously ensure geometric accuracy, internal quality, and stable ideal microstructures. This results in poor batch-to-batch consistency in specimen performance, hindering their engineering certification and application. This paper explores the current development status and application prospects of additive manufacturing technology in the nuclear energy sector. It focuses on analyzing development directions in atmosphere control, crack mitigation, and process monitoring, while emphasizing the importance of establishing an "AI+high-throughput" intelligent R&D system. The aim is to accelerate the design and manufacturing of new materials and processes by integrating cutting-edge information technologies such as artificial intelligence and machine learning, thereby systematically overcoming core technological bottlenecks that constrain the application of additive manufacturing in nuclear components.

Keywords: nuclear energy; additive manufacturing; artificial intelligence; materials

引用格式:王唯一,樊恩想. 增材制造技术在核能材料领域的挑战与前景[J]. 电焊机,2026,56(4):1-11.

Citation:WANG Weiyi, FAN Enxiang. Challenges and Prospects of Additive Manufacturing Technology in the Field of Nuclear Materials[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 1-11.

0 引言

在"双碳"目标驱动与全球能源结构深度调整的背景下,核能发电的战略地位愈发凸显[1-2],相应地,第三代、第四代核电技术对核心装备的安全性、可靠性、服役寿命提出了严苛要求[3],这对未来先进核能系统的设计以及核能部件的研发和制造提出了更多挑战。一方面,核能部件本身具有的结构复杂性和高精密度,使部件生产加工一直是核工业界中的关键环节。核能领域部件生产一般采用冶炼、铸造、锻造等传统制造工艺,其中还可能存在众多的焊接件等结构。这些传统工艺流程繁琐、生产周期长,同时复杂构件的制作、焊接等过程往往依靠于技术员的经验,且一次合格率较低[4],在复杂结构部件成形、稀有贵重材料高效利用、个性化定制化生产等方面的局限性逐渐显现。另一方面,未来核能系统的服役环境将更为严苛,核电材料在极端环境下服役,必须满足多重严格的性能要求。首先是耐高温性能,不同反应堆类型对材料的耐温要求差异很大,第三代反应堆要求材料能够在350 ℃以上稳定工作,第四代反应堆则要求材料能够在750 ℃以上长期服役[5-6];其次是抗辐照性能,材料在长期中子辐照下会发生晶格畸变、产生空位和间隙原子、形成气泡等微观结构变化,即辐照损伤,导致材料性能退化,需要从合金成分设计的角度,基于材料服役的实际环境开展研究以提高材料的抗辐照性能[7-8];耐腐蚀性是核电材料的另一项关键性能要求,核电站的冷却剂通常含有硼酸、氢氧化锂等化学物质,对材料具有强烈的腐蚀性[9];最后,在力学性能方面,核电材料需要具备优异的强度、韧性、抗蠕变和抗疲劳性能,特别是反应堆压力容器材料,在服役期间要长时间遭受高温、高压、快中子的高强度辐照,其失效模式主要为脆性断裂、蠕变、腐蚀、疲劳与强度过大破坏[10]。这对材料的综合性能提出了更高的要求[11]。

在核能领域对先进材料及制造工艺的探索过程中,增材制造(Additive Manufacturing,AM)这门制造技术以其独特的优势引起了广泛关注[12-13]。增材制造是一种以数字模型文件为基础,采用不同形式原材料,以挤压、喷射、熔融等方式进行逐层打印

的快速成形制造技术。有别于传统的减材制造，增材制造技术不仅在原材料利用率方面具有很大提升，还具有高精度一体成形、生产周期短、对复杂结构直接近净成形等优点，经过工艺调整后生产的材料具有非常优异的力学性能，这些特点突破了传统制造技术的结构约束与工艺瓶颈，可实现核电部件的近净成形与高性能调控，成为推动核电装备制造向“高效、精准、绿色”转型的关键技术[14]。

增材制造技术为解决复杂结构核电装备的制造提供了新的思路，随着增材制造技术逐步完善，其在核能领域广阔的应用潜力更能够得以施展。但是由于核能领域对部件安全性能的极高要求，以及增材制造技术自由及多样化的工艺，使得该技术的应用推广目前面临着许多问题，其中最关键的便是增材制造金属材料能否达到核电部件服役要求所规定的性能及质量，有必要针对增材制造技术在核能领域的发展方向和应用前景展开探讨。

1　增材制造技术简介

金属增材制造具体工艺包括激光粉末床熔化（Laser Powder Bed Fusion，LPBF）、电子束熔化（Electron Beam Melting，EBM）、定向能量沉积（Directed Energy Deposition，DED）等丰富多样的技术类型。这些不同的工艺原理相通，都是通过高能热源将金属粉末、金属丝等原材料定点快速熔凝后逐层叠加，实现金属部件设计形状的直接成形[15-16]。相比于传统的减材制造成形工艺，金属增材制造技术可以实现原料的高效率可回收利用，成形步骤也节省了大量的后续加工及其他处理，在工业生产中具有巨大的优势，目前在核能领域也得到了一定的应用[17]。

激光粉末床熔化（LPBF）技术以高能量密度激光束为热源，通过振镜系统控制激光束在粉末床表面的扫描轨迹，实现粉末材料的选择性熔化与逐层凝固。该技术的热源光斑直径可达50~100 μm，成形精度高（尺寸误差可控制在±0.1 mm以内），能够制备具有复杂内腔、薄壁结构的精细部件[18]，其工艺如图1所示[19]。LPBF能够实现部件的高精度成形，表面粗糙度更低，对于在核能领域具有重要意义的换热器而言，LPBF使得可大幅提高换热效率的三周期最小表面（TPMS）结构的设计和制备成为了可能[20-21]；此外LPBF还可以实现异种材料的梯度成形，例如在不锈钢基体表面制备镍基高温合金耐磨涂层，满足部件的复合服役需求[22]。但其局限性同样显著：激光热源的高能量密度易导致熔池温度梯度大，冷却速度快（可达10^6 K/s），从而引发部件内部产生残余应力，甚至出现微裂纹、气孔等冶金缺陷[23]；同时，为了保证成形精度，目前LPBF使用的粉层厚度一般约为50 μm，导致成形效率相对较低，难以满足大型核电部件的快速成形需求，有必要发展大层厚LPBF制备技术[24]。

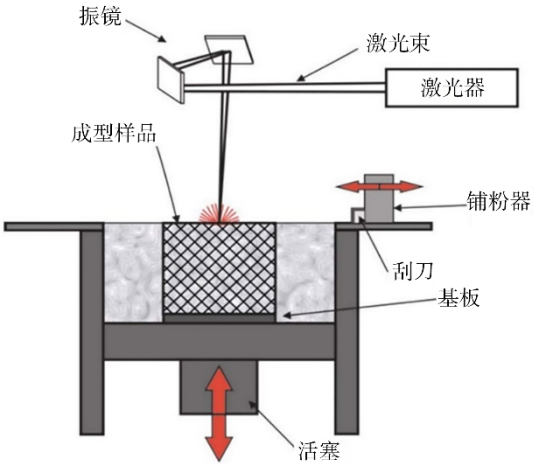

图1　LPBF成形工艺流程示意[19]

Fig. 1　Schematic diagram of the LPBF forming process[19]

电子束熔化（EBM）技术以高能电子束为热源，利用电子束的高能轰击效应实现粉末材料的熔化。与LPBF技术相比，EBM技术具有三大核心优势：一是电子束的能量利用率更高，可达90%以上，远高于激光的10%~20%，成形效率更高；二是电子束在成形过程中可对粉末床进行预热处理，预热温度可达1 000 ℃以上，有效降低熔池与基体的温度梯度，减少残余应力与裂纹缺陷的产生；三是电子束的真空成形环境可避免材料的氧化与污染，尤其适用于钛合金、镍基合金等活性金属的成形[13]。EBM技术在核电大型承力部件的制造中具有显著优势，例如核电主泵叶轮、压力容器法兰等[25-26]。但该技术的成形精度略低于LPBF技术，且设备成本较高，对成形环境的真空度要求严苛，限制了其在部分精密部件制造中的应用。

定向能量沉积(DED)技术通过同轴喷嘴、多喷嘴和载流气体进料,激光束能量输入产生熔池,随着喷嘴的移动,不断形成新的涂覆层,重复叠加来构建零件。该技术在核电部件的修复与再制造领域具有独特的优势,可以通过热源熔化粉末/丝材与基体表面,实现受损部件的尺寸修复与性能强化[27-28]。相比于其他增材制造技术,DED在部件修复领域具有加工工艺简单,效率高的优点,目前在航空发动机、汽轮机涡轮叶片的再制造修复方面已经有了较为成熟的应用[29-30]。

金属增材制造技术在工艺原理上与传统金属成形技术存在着根本性的差异。相比于传统工艺中金属会较长时间地处于液态且凝固速度较慢的凝固过程,增材制造成形过程中金属处于液态的时间极短,使得凝固过程具有远高于传统过程的凝固速度和冷却速度[31];且由于增材制造还具有逐层叠加的工艺特点,已凝固成形的部分还有可能经历多次重熔和热机械冲击的影响[32]。以上特点都导致增材制造成形制备的金属材料会具有独特的非平衡凝固组织,从而使成形材料的力学、热学及其他功能性指标都会有别于传统工艺制备得到的同类型材料[33]。以选区激光熔化制备得到的316L不锈钢为例,在成形样品中通常能够观察到外延生长的粗大柱状晶[34-35]、合金元素偏析网[12,36]、高密度位错[37-38]等铸造态316L不锈钢不具备的微观结构,如图2所示,其中合金元素偏析网和高密度位错通常被认为是增材制造316L不锈钢具有更优异力学性能的重要原因[39-40]、热稳定性[41-42]、抗腐蚀性[43-44]和抗辐照性[45-46],如Shang等人[47]开展的LPBF(SLM)316L不锈钢在400 ℃ Kr离子辐照下的原位观察中发现,伴随着纠缠位错的胞壁结构在辐照条件下具有不稳定性,在位错胞壁附近观察到四种位错环缺陷、位错线以及胞壁结构之间相互作用的形式,证实了相较于传统316L不锈钢,SLM 316L不锈钢中特殊的位错胞结构能作为辐照缺陷的有效陷阱,显著降低位错环的密度,并推测位错胞结构是具有高阱强和高稳定性的中性缺陷阱。这些结果表明增材制造技术在核能领域的应用有着独特的优势。

但同时也要注意到,增材制造技术在面向核能行业的特殊服役需求并大规模应用于实际制造生产之前仍面临诸多应用瓶颈。目前在核电领域应用较为成熟的材料,除了316L不锈钢也是增材制造

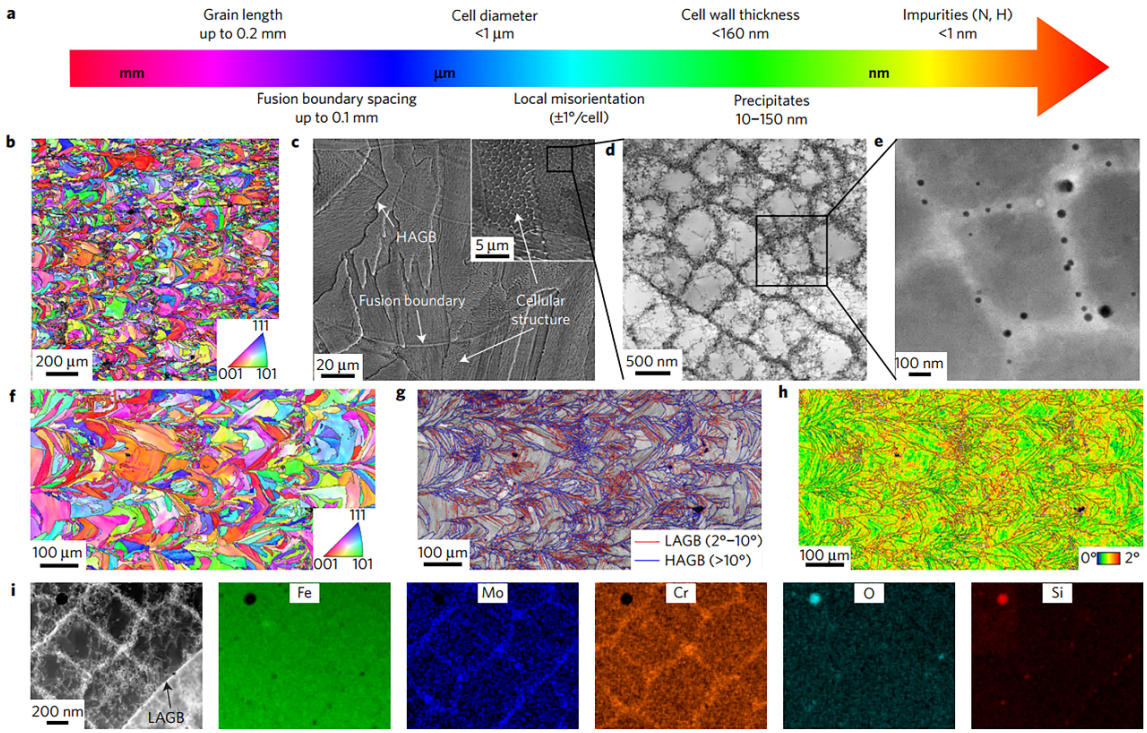

图2 LPBF 316L不锈钢内部跨尺度微观组织[12]

Fig. 2 Cross-scale microstructure inside LPBF 316L stainless steel [12]

研究较为成熟的材料以外，其他的包括ODS钢[48]，钨及钨合金[49]、镍基高温合金[50]等，都存在着包括微观组织调控机理不明晰、增材过程材料易开裂、成形部件存在大量缺陷等问题，如何快速筛选出适用于增材制造的新型高性能合金体系，并优化其工艺参数以使得成形部件达到核能服役要求的性能，是最为关键的问题；而即使对于316L不锈钢这类增材制造技术成熟的材料，在实际生产成形阶段，由于增材制造技术本征的高凝固速率、高温度梯度等物理性质导致的工艺窗口狭窄、成形缺陷难以控制、性能一致性差等突出问题也是制约其成品质量的重要原因[51]。上述瓶颈问题都亟待有效的解决方案，开展相应的研发工作迫在眉睫。

2　增材制造在核电领域的发展方向

2.1　气氛控制

氧化物弥散强化（Oxide Dispersion Strengthened，ODS）钢通过机械合金化工艺将纳米级氧化物颗粒（主要是Y_2O_3、Y–Ti–O等）均匀分散在铁素体或马氏体基体中实现强化，使材料具有优异的高温强度、抗辐照性能和耐腐蚀性，是第四代核反应堆和聚变堆的理想结构材料[52]。ODS钢的氧化物颗粒尺寸通常为3~10 nm，数量密度达10^{23}~10^{24} m^{-3}[53]。为获得这样的微观组织，常规的制备工艺主要包括机械合金化、热成形和热处理三个关键步骤。机械合金化是将合金粉末与氧化物粉末在高能球磨机中进行长时间研磨，使氧化物颗粒均匀分布并与基体形成固溶体。热成形工艺包括热挤压、热等静压和放电等离子烧结等，用于将机械合金化粉末致密化并形成所需形状。这样的制备方法存在效率低、周期长、成本高且控制变量多等突出问题，尤其是对氧化物颗粒的形貌及尺寸控制存在较大的难度，由于氧化物粒子热稳定性高、密度低，而且与钢液之间的润湿性较差，特别是添加纳米级的氧化物粒子容易粗化和团聚，削弱样品的性能[54]。

近年来，增材制造技术的发展为ODS钢的制备方式提供了全新的途径。增材制造过程中作为热源的激光通常会将金属材料加热到熔化温度，为材料与活性气氛发生化学反应创造了有利的条件；而快速凝固快速冷却的工艺特点则可以确保颗粒不会发生粗化和团聚，均匀弥散分布在基体中，实现良好的ODS效果[55]。增材制造ODS钢样品中的氧化物主要来源可分为两类，如图3所示[56]：原料粉末中颗粒携带的氧，以及舱室保护气氛中混杂的氧[57]。原料粉末颗粒携带的氧包括粉末表面的氧化物层以及粉末颗粒内的球形氧化物夹杂[58]，也可以和常规方法一样在原料粉末中混合氧化物颗粒[59]。而对于保护气氛改性，则是利用增材制造快速凝固的特点，通过使用改性的保护气体（如Ar–O_2、N_2等）控制舱室内的氧含量或氮含量，也可以促使材料内部形成纳米级氧化物或氮化物[60]。目前，已有研究表明这类ODS钢的力学性能、高温蠕变性能及抗辐照性能都优于常规方法制备得到的ODS钢[61]。而更为重要的是这类方法相对简单，可以推广应用到更多材料体系，如镍基高温合金、钛合金[62–63]等，这无疑为核能领域ODS金属材料的应用提供了大量简便的可行思路。

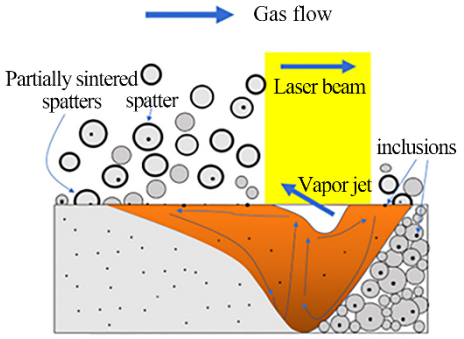

图3　氧进入熔池的可能途径示意[56]

Fig. 3　Schematic diagram of possible pathways for oxygen entering the melt pool[56]

2.2　解决开裂难题

对于应用于核能领域的金属材料而言，在转向增材制造技术制备时会面临复杂多样的问题。以钨及钨合金为例，其具有耐离子轰击特性和低氚滞留特性，因此在核电领域具有重要的应用，被选为国际热核聚变实验堆（ITER）的第一壁主要材料[64]。但由于其熔点极高，在增材制造过程中会遇到严重的开裂问题[65]；而不锈钢、ODS钢等材料在增材制造过程中也需要面对控制晶粒尺寸、调控氧化物颗粒形貌等微观组织的重要问题[13]。这些科学问题需要开展大量的研究并对其背后的物理机理建立

深入的理解后才能得到完善的解决。但增材制造技术涉及大量的工艺参数及加工环境条件，材料也会经历熔化、凝固、反复加热等复杂的过程，这些因素之间互相耦合影响，存在复杂的物理机制，包括熔池动力学、热应力演化、相变行为等物理行为均受到材料成分、工艺参数和环境条件的多重影响，导致最终成形部件的微观组织及服役性能等都会产生巨大的差异。这对于增材制造相关科学问题的研发提出了很大的挑战。

传统的研发方式通常为试错法，通过大量实验得出科学规律和物理机理，但这样的传统增材制造研发流程通常遵循“单变量–单样品–单测试”的模式，即每次仅改变一个变量（如激光功率、扫描速度、层厚等），制造一个样品并进行性能测试。这种低效的方式不仅耗时耗力，而且几乎无法实现系统性优化。因此，有必要发展材料高通量智能研发体系，将高通量技术引入金属增材制造领域，同时还需要引入物理机理的约束，构建“高通量制备–高通量表征–高通量数据分析”的全链条研发体系，成为破解上述难题的必然选择。高通量技术能够在同一基板上并行制造数百甚至上千个具有梯度成分、梯度结构或梯度工艺参数的小尺寸样品，结合先进的原位/非原位表征手段与大数据分析方法，实现对材料性能的快速筛选与机理揭示，从而大幅缩短研发周期，降低研发成本，并为新材料的设计与制造提供科学依据。此外，高通量技术的引入也契合了智能制造与数字化转型的战略需求。通过将高通量实验数据与人工智能、机器学习、数字孪生等前沿信息技术深度融合，可建立材料成分–工艺–组织–性能之间的定量映射关系，推动增材制造从“经验驱动”向“模型驱动”转变，最终实现“按需设计、一次成功”的理想制造目标。

近年来，人工智能和机器学习的发展极大地推动了“AI+高通量”研究范式的升级，涌现出许多成功案例。Turnali 等人[66]发展了计算辅助合金设计策略，如图 4 所示，通过 CALPHAD 与多相场（MPF）耦合模拟精确控制了凝固过程中的溶质偏析行为，设计出了一种新型的增材制造沉淀强化合金，获得了强度和塑性的优异匹配；而在高通量平台建设方面，Huang 等人[67]在同一基板上打印制备批量并排分布的拉伸试样，并通过自编程序+设备改装实现拉伸头的稳定步进移动，避免了人工装卸拉伸样消耗的人力和时间，可在两周内完成近 100 个增材制造样品的拉伸性能检测，完成 356 条数据的整理归档，极大提升了实验效率。未来，增材制造技术应面向核能领域的实际需求更为精准地开展“AI+高通量”的研发工作，以更加高效地开展科研及生产制造任务，这将是该领域非常重要的课题方向。

2.3 AI 融合及过程监测

近年来，人工智能（AI）与数字孪生技术被广泛引入，推动增材制造进入“数据驱动”的新时代。相应地，增材制造过程产生的数据量呈指数级增长，传统的数据分析方法已难以应对。如何从海量、多维、异构的数据中提取有价值的信息，成为当前研

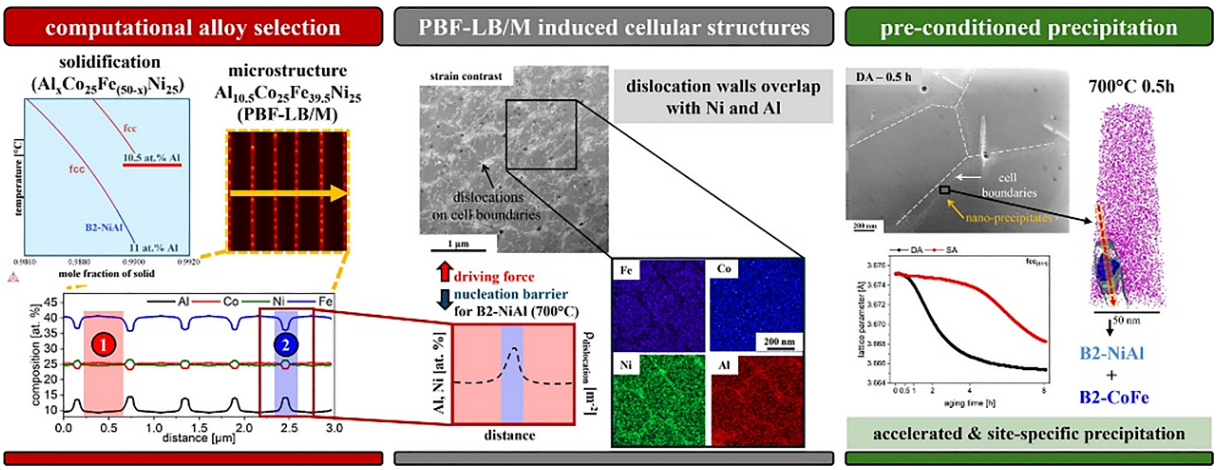

图 4　通过计算辅助合金设计获得新型增材制造沉淀强化合金[66]

Fig. 4　A novel additive manufactured precipitation-strengthened alloy obtained via computational-assisted alloy design[66]

究的重点。

机器学习模型被用于构建材料“成分–工艺–性能”之间的非线性映射关系。例如，研究者利用支持向量机（SVM）、随机森林（Random Forest）、深度神经网络（DNN）等算法，基于高通量实验数据库训练预测模型，可快速预测某一新成分合金在特定工艺下的致密度、硬度、抗拉强度等性能指标，显著减少了实验次数。更有前沿研究尝试将强化学习应用于工艺参数优化，使系统能够自主探索最优打印策略，实现“自适应控制”。华东理工大学李博课题组开发了一种结合激光粉床熔融（LPBF）增材制造熔池温度场数值计算边界条件的高保真元胞自动机算法，如图 5 所示，用于精确模拟 Al–Mg–Sc–Zr 铝合金在 LPBF 过程中晶粒双峰结构的形成和演化，进而通过晶体塑性有限元（CPFEM）方法揭示了材料在拉伸变形过程中强度与塑性的协同效应；试验研究表明，该双峰结构具有良好的抗疲劳性能，在低应力循环载荷下表现出各向异性[68]。

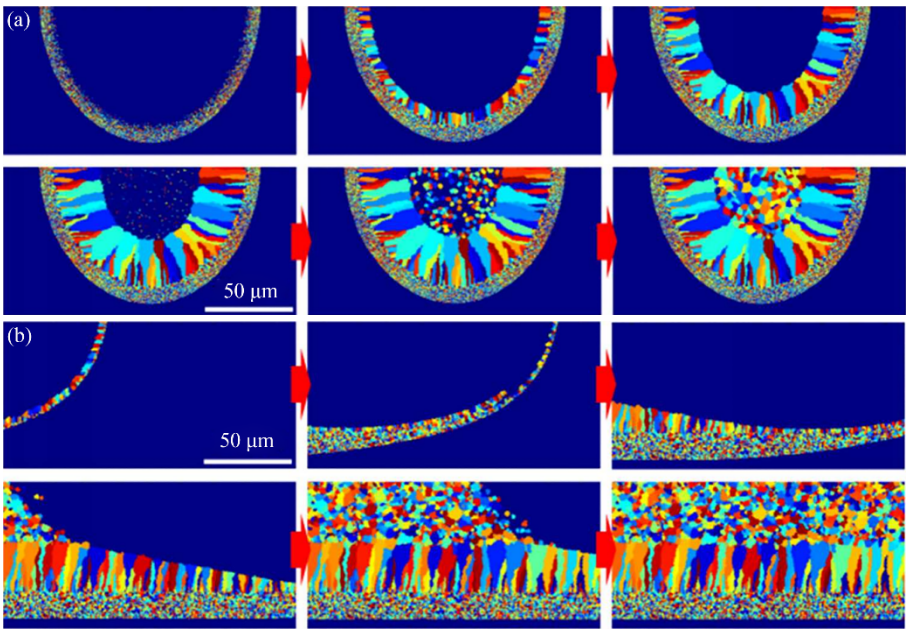

图 5　通过晶体塑性有限元方法预测的晶粒生长模型[68]

Fig. 5　Grain growth model predicted by crystal plasticity finite element method[68]

数字孪生技术则进一步将虚拟与现实深度融合。通过构建增材制造全过程的数字化模型，包括热场、流场、应力场、微观组织演化等物理场模拟，结合实时传感器数据（如熔池监测、红外热成像），可实现对打印过程的动态仿真与偏差预警。其中，全流程在线监测是保障核电增材制造部件质量的核心手段，需构建“多传感器融合+数据驱动”的监测体系。具体而言，需集成多种监测技术：一是熔池监测技术，采用高速摄像机、红外热像仪、光谱仪等设备，实时采集熔池的形态、温度、成分信息；二是粉末床监测技术，利用激光扫描共聚焦显微镜，监测粉末床的平整度与粉末分布状态；三是成形件监测技术，采用超声、X 射线等无损检测技术，对成形过程中的部件进行实时扫描，识别内部缺陷[69]。

通过多传感器数据的融合分析，可构建增材制造过程的数字孪生模型，实现物理成形过程与虚拟仿真过程的实时映射[70]。基于数字孪生模型，可对成形过程中的缺陷进行溯源分析，并实时调整工艺参数，形成“监测–分析–调控”的质量闭环，确保增材制造核电部件的质量稳定性。

对于缺陷的识别与预测这一领域，目前最值得关注的研究方向是原位实时监测技术的开发与应用，通过红外检测、热层析成像等技术对打印过程中的熔池实时信息进行记录，并和成形样品中对应位置的微观组织和缺陷结果进行匹配即有望实现组织和缺陷的实时调控或抑制[71–72]，这将极大地有助于部件的高效率制备，同时也有助于科学问题的研究。

3 结论

增材制造技术将给核级设备提供新的实现途径，研究者可以围绕新型核级材料体系的开发、核级设备增材制造的设计创新来提高材料适用性，大力构建增材制造系统的规范平台，提升增材制造核产品的设计、开发和制造能力。随着增材制造各方面技术的不断进步，材料学科的不断发展，行业标准的不断完善，增材制造技术的引入将会为核能领域带来全新的发展思路，从而解决核反应堆技术的“卡脖子”难题，促进核工业的持续发展。

参考文献：

[1] 张坤民. 低碳世界中的中国：地位、挑战与战略[J]. 中国人口·资源与环境，2008(03)：1–7.
ZHANG K M. China's Role, Challenges and Strategy for the Low Carbon World[J]. China Population, Resources and Environment, 2008(03)：1–7.

[2] 欧阳予，汪大升. 国际核能应用及其前景展望与我国核电的发展[J]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2007(05)：1–10.
OUYANG Y, WANG D S. International nuclear power application and its prospect forecast and our country nuclear electricity development[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition)，2007(05)：1–10.

[3] Aguiar J A, Jokisaari A M, Kerr M, et al. Bringing nuclear materials discovery and qualification into the 21st century[J]. Nature Communications, 2020, 11：2556.

[4] 乔鹏瑞，郭瑞阳，杨红义，等. 小型核反应堆关键技术研究进展及展望[J]. 原子能科学技术，2025，59(9)：2048–2062.
QIAO P R, GUO R Y, YANG H Y, et al. Research Progress and Pr.ospect of Key Technologies for Small Nuclear Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology，2025，59(9)：2048–2062.

[5] Murty K L, Charit I. Structural materials for Gen–IV nuclear reactors：Challenges and opportunities[J]. Journal of Nuclear Materials，2008，383(1)：189–195.

[6] 史力，赵加清，刘兵，等. 高温气冷堆关键材料技术发展战略[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2021，61(04)：270–278.
SHI L, ZHAO J Q, LIU B, et al. Development strategy of key materials technology for the high temperature gas–cooled reactor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2021，61(04)：270–278.

[7] 田震，李聪聪，吴渊，等. 核结构材料用多主元合金辐照损伤的研究进展[J]. 材料工程，2023，52(01)：1–15.
TIAN Z, LI C C, WU Y, et al. Research progress in multiprincipal element alloys for nuclear structure materials on irradiation damage[J]. Journal of Materials Engineering，2023，52(01)：1–15.

[8] 夏礼栋，霍晓杰，张弛，等. 低活化钢的氦离子辐照损伤行为[J]. 金属热处理，2022，47(07)：211–216.
XIA LD, HUO X J, ZHANG C, et al. Helium ion irradiation damage behavior in a reduced activation steel [J]. Heat Treatment of Metals，2022，47(07)：211–216.

[9] 张玥，兰洋，王成宇，等. 核领域增材制造制品腐蚀性能研究概述[J]. 核动力工程，2024，45(S1)：208–214.
ZHANG Y, LAN Y, WANG C Y, et al. Overview of Research on Corrosion Properties of Additively Manufactured Products in the Nuclear Field[J]. Nuclear Power Engineering，2024，45(S1)：208–214.

[10] Jokisaari A M, Chen Y, Copeland–Johnson T, et al. Corrosion testing needs and considerations for additively manufactured materials in nuclear reactors[J]. Progress in Nuclear Energy，2024，174：105296.

[11] 高智颖，肖昊，王宇钢，等. 先进核能材料的辐照损伤效应[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2023，53(10)：117–131.
GAO Z Y, XIAO H, WANG Y G, et al. Radiation effects in novel nuclear materials[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2023, 53(10)：117–131.

[12] Morris Wang Y, Voisin T, McKeown J, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility[J]. Nature Materials, 2018, 17：63–71.

[13] Debroy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science，2018，92：112–224.

[14] 袁宏，何戈宁，李磊，等. 3D打印技术在核电领域的发展应用情况综述[J]. 科技视界，2020，17：118–122.
YUAN H, HE G N, LI L, et al. Overview of the Development and Application of 3D Printing Technology in the Nuclear Power Sector[J]. Science & Technology Vision，2020，17：118–122.

[15] Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, et al. Laser addi-

tive manufacturing of metallic components：materials，processes and mechanisms[J]. Int. Mater. Rev.，2013，57(3)：133–164.

[16] Gorsse S，Hutchinson C，Goune M，et al. Additive manufacturing of metals：a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels，Ti–6Al–4V and high–entropy alloys[J]. Science and Technology of Advanced Materials，2017，18(1)：584–610.

[17] De Sano G，Palumbo M F，De Luca R，et al. Investigation of laser powder bed fusion for the application of additive manufacturing in the First Wall of the DTT facility[J]. Fusion Engineering and Design，2025，220：115334.

[18] Herzog D，Seyda V，Wycisk E，et al. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia，2016，117：371–392.

[19] Tsopanos S，Mines R，McKeown S，et al. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering，2010，132(4)：041011.

[20] Wang J，Qian C，Qiu X，et al. Numerical and experimental investigation of additive manufactured heat exchanger using triply periodic minimal surfaces（TPMS）[J]. Thermal Science and Engineering Progress，2024，55：103007.

[21] 苏烯元，张月亮，饶宇，等. 增材制造三周期极小曲面换热器流动传热特性实验[J]. 推进技术，2025，46(9)：192–200.
SU X Y，ZHANG Y L，RAO Y，et al. Experimental study on flow and heat transfer characteristics of additively manufactured triply periodic minimal surface heat exchanger[J]. Journal of Propulsion Technology，2025，46(9)：192–200.

[22] Chen W Y，Zhang X，Li M，et al. Laser powder bed fusion of Inconel 718 on 316 stainless steel[J]. Additive Manufacturing，2020，36：101500.

[23] Fathi–Hafshejani P，Soltani–Tehrani A，Shamsaei N，et al. Laser incidence angle influence on energy density variations，surface roughness，and porosity of additively manufactured parts[J]. Additive Manufacturing，2022，50：102572.

[24] Ramesh Sagar V，Lorin S，Warmefjord K，et al. A Simulation Study on the Effect of Layer Thickness Variation in Selective Laser Melting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering，2023，145(2)：021011.

[25] 孙广，李学军. 核级马氏体不锈钢叶轮激光增材再制造工艺优化[J]. 焊接技术，2025(7)：10–14.
SUN G，LI X J. Optimization of laser additive remanufacture process of nuclear grade martensite stainless steel impeller[J]. Welding Technology，2025(7)：10–14.

[26] Zhong Y，Rannar L E，Liu L，et al. Additive manufacturing of 316L stainless steel by electron beam melting for nuclear fusion applications[J]. Journal of Nuclear Materials，2017，486：234–245.

[27] 孙晓峰，李占明，王梦露，等. 用于装备零件损伤规模化修复的激光定向能量沉积技术[C]//中国稀土学会2021学术年会会议论文集，2021.

[28] Kenevisi M S，Gobber F S，Fino P，et al. Tool steels and their additive manufacturing for fabrication and repair via PBF and DED processes：techniques，challenges，and applications[J]. Materials & Design，2025，258：114639.

[29] 张佩宇，周鑫. 单晶涡轮叶片高能束修复研究进展[J]. 航空学报，2021，43(4)：525610–525610.
ZHANG P Y，ZHOU X. Progress on high energy beam repair of single crystal turbine blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2021，43(4)：525610–525610.

[30] 邢浩鹏. 基于激光定向能量沉积技术的三维损伤构件再制造[D]. 辽宁：大连理工大学，2023.
XING H P. Remanufacturing of 3D–Damaged Components based on Laser Directed Energy Deposition Technology[D].Liaoning：Dalian University of Technology，2023.

[31] Scipioni Bertoli U，Guss G，Wu S，et al. In–situ characterization of laser–powder interaction and cooling rates through high–speed imaging of powder bed fusion additive manufacturing[J]. Materials & Design，2017，135：385–396.

[32] Chen H，Zhang Y，Giam A，et al. Experimental and computational study on thermal and fluid behaviours of powder layer during selective laser melting additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing，2022，52：102645.

[33] Qiu C，Kindi M A，Aladawi A S，et al. A comprehensive study on microstructure and tensile behaviour of a selectively laser melted stainless steel[J]. Scientific Reports，2018，8(1)：7785.

[34] Yang D，Yin Y，Kan X，et al. The mechanism of substructure formation and grain growth 316L stainless steel by selective laser melting[J]. Materials Research

Express,2021,8(9):096510.

[35] Kok Y,Tan X P,Wang P,et al. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing:A critical review[J]. Materials & Design,2018,139:565-586.

[36] Haghdadi N,Laleh M,Moyle M,et al. Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges[J]. Journal of Materials Science,2021,56(1):64-107.

[37] Bertsch K M,Meric de Bellefon G,et al. Origin of dislocation structures in an additively manufactured austenitic stainless steel 316L[J]. Acta Materialia,2020,199:19-33.

[38] Liu L,Ding Q,Zhong Y,et al. Dislocation network in additive manufactured steel breaks strength - ductility trade-off[J]. Materials Today,2018,21(4):354-361.

[39] Shamsujjoha Md,Agnew S R,Fitzgerald J M,et al. High Strength and Ductility of Additively Manufactured 316L Stainless Steel Explained[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2018,49(7):3011-3027.

[40] Wanni J,Achuthan A. Hetero-deformation induced (HDI) strengthening in directed energy deposited SS316L:A nanoindentation-based investigation[J]. Materials Science and Engineering:A,2022,860:144280.

[41] Roirand H,Pugliara A,Malard B,et al.Multiscale study of additively manufactured 316 L microstructure sensitivity to heat treatment over a wide temperature range [J]. Materials Characterization,2024,208:113603.

[42] Laleh M,Sadeghi E,Revilla R I,et al. Heat treatment for metal additive manufacturing[J]. Progress in Materials Science,2023,133:101051.

[43] Man C,Duan Z,Cui Z,et al. The effect of sub-grain structure on intergranular corrosion of 316L stainless steel fabricated via selective laser melting[J]. Materials Letters,2019,243:157-160.

[44] Kong D,Dong C,Wei S,et al. About metastable cellular structure in additively manufactured austenitic stainless steels[J].Additive Manufacturing,2021,38:101804.

[45] Snitzer J,Chen W Y,Lou X. Creep-induced microstructural evolution of additively manufactured 316H stainless steels and its effects on radiation resistance [J]. Scripta Materialia,2026,274:117134.

[46] Jenkins B M,Rouland S,Etienne A,et al. Heat-treated additively manufactured and wrought 316L steels display a comparable response to ion irradiation[J]. Journal of Nuclear Materials,2025,614:155913.

[47] Shang Z,Fan C,Xue S,et al. Response of solidification cellular structures in additively manufactured 316 stainless steel to heavy ion irradiation:an in situ study[J]. Materials Research Letters,2019,7(7):290-297.

[48] Zhang S,Li K,Zhang W,et al. A novel additive manufactured reduced activation ferritic/martensitic steel enhanced by in-situ nanoparticles benefiting from oxygen addition[J]. Scripta Materialia,2023,235:115627.

[49] Xie J,Lu H,Lu J,et al. Additive manufacturing of tungsten using directed energy deposition for potential nuclear fusion application [J]. Surface and Coatings Technology,2021,409:126884.

[50] Hu H,Zhao T,Du D,et al. New insights into radiation damage in additively manufactured alloy 718[J]. Additive Manufacturing,2025,108:104827.

[51] 施建辉,蒙新明,刘政平,等. 增材制造316L不锈钢组织、性能和辐照损伤效应研究进展[J]. 粉末冶金工业,2025,35(02):146-153.
SHI J H,MENG X M,LIU Z P,et al. Research progress on microstructure,properties,and radiation damage effects of additive manufacturing 316L stainless steel[J]. Powder Metallurgy Industry,2025,35(02):146-153.

[52] 周晓胜,孙汝昊,李国栋,等. 核电用氧化物弥散强化铁素体/马氏体钢制备技术研究进展[J]. 精密成形过程,2024,16(10):73-83.
ZHOU X S,SUN R H,LI G D,et al. Advancements in the Development of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic/Martensitic Steel for Nuclear Power Generation [J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2024,16(10):73-83.

[53] 翟亚中,车洪艳,何西扣,等. 先进核能系统用氧化物弥散强化钢成分设计及制备工艺研究进展[J]. 粉末冶金技术,2025,43(04):484-496.
ZHAI Y Z,CHE H Y,HE X K,et al. Research progress on composition design and preparation technology of oxide dispersion strengthened steels for advanced nuclear energy systems[J]. Powder Metallurgy Technology,2025,43(04):484-496.

[54] 赵定国,李月,刘岩,等. 先进氧化物弥散强化钢制备技术研究进展[J]. 中国冶金,2023,33(03):1-16.
ZHAO D G,LI Y,LIU Y,et al. Research progress for manufacturing technology of advanced oxide dispersion strengthened steel[J]. China Metallurgy,2023,33(03):1-16.

[55] 李依阳,张瑞杰,张聪,等. 增材制造钢中氧化物形成

及其控制的研究进展[J]. 粉末冶金技术，2024，42(3)：264–274+296.
LI Y Y，ZHANG R J，ZHANG C，et al. Research progress on oxide formation and control of high performance steels by additive manufacturing [J]. Powder Metallurgy Technology，2024，42(3)：264–274+296.

[56] Deng P，Karadge M，Rebak R B，et al. The origin and formation of oxygen inclusions in austenitic stainless steels manufactured by laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing，2020，35：101334.

[57] 王大为，董阳平，田艳红，等. 活性气氛对金属材料激光增材制造的作用机制[J]. 中国激光，2022，49(14)：79–99.
WANG D W，DONG Y P，TIAN Y H，et al. Influencing Mechanisms of Reactive Atmospheres in Laser Additive Manufacturing of Metallic Materials [J]. Chinese Journal of Lasers，2022，49(14)：79–99.

[58] Eo D R，Chung S G，Yang J，et al. Numerical modeling of oxide particle evolution during additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing，2022，51：102631.

[59] Zhong Y，Liu L，Zou J，et al. Oxide dispersion strengthened stainless steel 316L with superior strength and ductility by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology，2020，42：97–105.

[60] 杨鑫悦，杨玉滢，赵定国，等. 选区激光熔化制备316LN[J]. 粉末冶金工业，2025，35(03)：77–86.
YANG X Y，YANG Y Y，ZHAO D G，et al. Selective laser melting of 316LN stainless steel[J]. Powder Metallurgy Industry，2025，35(03)：77–86.

[61] Wilms M B，Rittinghaus S K，Gossling M，et al. Additive manufacturing of oxide–dispersion strengthened alloys：Materials，synthesis and manufacturing[J]. Progress in Materials Science，2023，133：101049.

[62] Song T，Chen Z，Cui X，et al. Strong and ductile titanium – oxygen – iron alloys by additive manufacturing [J]. Nature，2023，618(7963)：63–68.

[63] Zhang S，Li F，Wang Y，et al. Study on forming process and microstructure of FeCrAl–ODS alloy by selective laser melting [J]. Journal of Materials Research and Technology，2025，35：1369–1376.

[64] 赵乙椤，雷鸣，张旭，等. 聚变反应堆钨基等离子体材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程，2021，50(9)：3399–3407.
ZHAO Y L，LEI M，ZHANG X，et al. Research Progress of Tungsten–Based Plasma Materials in Fusion Reactors[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2021，50(9)：3399–3407.

[65] Ma M，Zhang S，Li K，et al. Crack suppression in LPBF–processed W–ta–C alloys：Synergistic roles of alloying and HIP–induced self–healing [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials，2026，134：107444.

[66] Turnali A，Hariharan A，Polatidis E，et al. Harnessing additive manufacturing–induced microstructure and solute heterogeneities for the design of precipitation–strengthened alloys [J]. Acta Materialia，2025，298：121423.

[67] Huang K，Kain C，Diaz–Vallejo N，et al. High throughput mechanical testing platform and application in metal additive manufacturing and process optimization [J]. Journal of Manufacturing Processes，2021，66：494–505.

[68] Huang G，Shen T，Li B，et al. Microstructural evolution modelling and low–stress fatigue performance of bimodal–structured Al–Mg–Sc–Zr alloy produced by laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. Virtual and Physical Prototyping，2024，19 (1)：e2346287.

[69] Wang H，Li B，Zhang S，et al. Traditional machine learning and deep learning for predicting melt–pool cross–sectional morphology of laser powder bed fusion additive manufacturing with thermographic monitoring [J]. Journal of Intelligent Manufacturing，2025，36(3)：2079–2104.

[70] Zhang Y，Wu S，Guo Z，et al. Defects caused by powder spattering and entrainment in laser powder bed fusion process：High–fidelity modeling of gas，melt pool and powder dynamics[J]. Acta Materialia，2025，288：120816.

[71] Fu J，Li H，Song X，et al. Multi–scale defects in powder–based additively manufactured metals and alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology，2022，122：165–199.

[72] Fu Y，Downey A R J，Yuan L，et al. Machine learning algorithms for defect detection in metal laser–based additive manufacturing：A review[J]. Journal of Manufacturing Processes，2022，75：693–710.