

金属零部件增材制造技术研究进展

叶 峰

齐鲁工业大学 山东济南

【摘要】增材制造技术作为一种颠覆性的先进制造方法，近年来在金属零部件制造领域取得了突破性进展。本文系统综述了 2019—2024 年金属零部件增材制造技术的研究进展。首先，阐述了金属增材制造技术的发展背景与重要意义，分析了该技术在航空航天、医疗器械、汽车制造等高端装备领域的应用需求。其次，详细介绍了选区激光熔化、激光定向能量沉积、电弧增材制造等主要工艺原理与技术特点，对比分析了各工艺在成形精度、效率及适用材料方面的差异。随后，重点综述了钛合金、不锈钢、铝合金及高温合金等典型金属材料在增材制造过程中的组织演变规律与力学性能特征，探讨了工艺参数对材料各向异性及性能的影响机制。进一步，深入分析了增材制造过程中气孔、裂纹、球化等缺陷的形成机理，系统阐述了残余应力的产生原因、表征方法及调控策略。最后，介绍了数值模拟技术在熔池动力学、温度场预测及工艺优化中的应用现状，并展望了金属增材制造技术向智能化、多材料协同及材料-结构-性能一体化方向发展的趋势。本文旨在为金属增材制造技术的深入研究及工程应用提供参考。

【关键词】增材制造；金属零部件；选区激光熔化；微观组织；残余应力；数值模拟

【收稿日期】2026 年 2 月 10 日 **【出刊日期】**2026 年 3 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20260004

Research progress in additive manufacturing technology of metal parts

Feng Ye

Qilu University of Technology, Jinan, Shandong

【Abstract】 As a disruptive advanced manufacturing method, additive manufacturing technology has made breakthrough progress in the field of metal parts manufacturing in recent years. This article systematically reviews the research progress of additive manufacturing technology for metal parts from 2019 to 2024. First, the development background and significance of metal additive manufacturing technology are explained, and the application needs of this technology in high-end equipment fields such as aerospace, medical equipment, and automobile manufacturing are analyzed. Secondly, the main process principles and technical characteristics of selective laser melting, laser directed energy deposition, and arc additive manufacturing are introduced in detail, and the differences between each process in terms of forming accuracy, efficiency, and applicable materials are comparatively analyzed. Subsequently, the article focused on reviewing the microstructure evolution rules and mechanical properties of typical metal materials such as titanium alloys, stainless steel, aluminum alloys and high-temperature alloys during the additive manufacturing process, and discussed the influence mechanism of process parameters on material anisotropy and properties. Furthermore, the formation mechanism of defects such as pores, cracks, and spheroidization during the additive manufacturing process was deeply analyzed, and the causes, characterization methods, and control strategies of residual stress were systematically explained. Finally, the current application status of numerical simulation technology in melt pool dynamics, temperature field prediction and process optimization is introduced, and the development trend of metal additive manufacturing technology towards intelligence, multi-material collaboration and material-structure-performance integration is prospected. This article aims to provide a reference for in-depth research and engineering applications of metal additive manufacturing technology.

【Keywords】 Additive manufacturing; Metal parts; Selective laser melting; Microstructure; Residual stress; Numerical simulation

1 引言

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术, 又称 3D 打印技术, 是一种基于离散-堆积原理, 通过逐层累加材料实现三维实体成形的先进制造方法^[1]。与传统减材制造和等材制造相比, 增材制造具有近净成形、材料利用率高、可制造复杂结构件等显著优势, 被认为是数字化制造的重要支撑技术之一。在金属零部件制造领域, 增材制造技术能够突破传统铸造、锻造工艺对复杂结构件制造的限制, 实现拓扑优化结构、点阵结构及功能梯度结构等复杂几何特征的直接成形, 为高端装备轻量化设计与性能提升提供了全新途径^[2]。

金属增材制造技术的发展可追溯至 20 世纪 90 年代, 经历了从原型制造向直接功能零件制造的转变。进入 21 世纪以来, 随着高功率激光器、电子束设备及精密数控系统的快速发展, 金属增材制造技术在成形精度、表面质量和力学性能方面取得了长足进步。特别是在航空航天领域, 钛合金、镍基高温合金等难加工金属材料的复杂构件制造需求, 极大地推动了激光选区熔化 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF, commonly known as LPBF)、激光定向能量沉积 (Laser Directed Energy Deposition, LDED) 及电子束选区熔化 (Electron Beam Melting, EBM) 等技术的成熟与产业化^[3]。近年来, 金属增材制造技术已从实验室研究阶段逐步迈向工程化应用, 在航空发动机叶片、航天器复杂支架、人工关节及模具镶件等关键零部件制造中展现出巨大的应用潜力^[4]。

然而, 金属增材制造技术在快速发展过程中仍面临诸多挑战。首先, 增材制造过程涉及复杂的物理冶金现象, 包括快速熔化、凝固、固态相变及热循环等, 导致成形件内部易产生气孔、未熔合、裂纹等冶金缺陷, 严重影响构件的力学性能与服役可靠性^[5]。其次, 由于极高的温度梯度和非均匀热输入, 增材制造件内部不可避免地产生残余应力, 引发变形、开裂等问题, 制约了大型复杂构件的制造精度与尺寸稳定性。此外, 现有工艺对材料体系、工艺参数及后处理技术的依赖性较强, 如何实现材料-结构-性能的协同优化, 仍是当前研究的热点和难点。

综上所述, 系统梳理金属零部件增材制造技术的研究进展, 深入分析各工艺技术的特点、材料性能演变规律及质量控制方法, 对于推动该技术的理论发展和工程应用具有重要意义。本文基于近年来国

内外代表性研究成果, 从工艺技术、材料性能、缺陷控制及数值模拟等方面对金属增材制造技术进行系统综述, 以期为相关研究提供参考。

2 金属增材制造主要工艺原理与技术特点

金属增材制造技术按照能量源类型和材料供给方式的不同, 可分为粉末床熔融、定向能量沉积、粘结剂喷射及层压成形等多种工艺类型。其中, 粉末床熔融和定向能量沉积技术因成形精度高、材料适应性广, 已成为金属零部件制造的主流工艺^[6]。

2.1 选区激光熔化技术

选区激光熔化 (LPBF) 是目前金属增材制造领域应用最为广泛的粉末床熔融技术。其基本原理是利用高能量密度激光束按照预定扫描路径逐层熔化金属粉末, 通过快速凝固实现冶金结合, 最终堆积成形三维实体零件^[7]。LPBF 技术的激光功率通常在 200~1000 W 范围内, 光斑直径约为 70~200 μm , 层厚为 20~60 μm , 能够实现复杂精细结构的高精度成形, 尺寸精度可达 $\pm 0.05 - 0.10 \text{ mm}$, 表面粗糙度 R_a 约为 8~20 μm 。

LPBF 技术的核心优势在于能够直接制造全致密、高性能的复杂金属零件, 特别适用于小批量、高附加值的精密零部件制造。然而, 该技术对粉末质量要求极高, 粉末的粒径分布、球形度、流动性及氧含量等参数直接影响铺粉均匀性和成形质量^[8]。此外, LPBF 过程中极高的冷却速率 ($10^3 \sim 10^8 \text{ K/s}$) 和温度梯度导致熔池不稳定, 易产生球化、翘曲及微裂纹等缺陷。为改善成形质量, 研究人员发展了多种扫描策略, 包括层间旋转扫描、分区扫描及岛式扫描等, 通过优化扫描路径降低残余应力和热变形^[9]。

2.2 激光定向能量沉积技术

激光定向能量沉积 (LDED) 技术通过同轴或侧向送粉/送丝方式, 将金属材料输送至激光聚焦区域, 在基体表面形成熔池并逐层堆积成形。与 LPBF 技术相比, LDED 技术的成形效率更高, 可达 1~5 kg/h, 且能够制造大型构件, 成形尺寸可达数米量级^[10]。该技术还可用于零件修复和表面改性, 通过在被磨损或损伤零件表面沉积新材料, 恢复其几何尺寸和力学性能。

LDED 技术的激光功率通常在 2~10 kW 范围内, 光斑直径约为 1~5 mm, 沉积层厚为 0.3~2 mm。由于热输入较大, LDED 成形件表面粗糙度较高 (R_a 约为 10~30 μm), 需要后续机加工处理。此外, LDED

过程中熔池存在时间较长,有利于成分均匀化,但仍可能出现元素偏析及稀释效应。目前,LDED技术已在航空发动机机匣、飞机框梁等大型承力构件的制造与修复中得到应用。

2.3 电弧增材制造技术

电弧增材制造(Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)以电弧为热源,以金属丝材为原材料,通过逐层熔敷堆积实现零件成形。WAAM技术主要包括熔化极气体保护焊(GMAW)、钨极惰性气体保护焊(GTAW)及等离子弧焊(PAW)等工艺类型。该技术具有设备成本低、材料利用率高(可达90%以上)、沉积效率高等优点,被认为是制造大型金属构件最具成本效益的增材制造方法之一。

然而,WAAM技术的热输入量大,热积累效应显著,导致成形件表面质量较差,几何精度较低,且易产生较大的残余应力和变形。因此,WAAM成形件通常需要配合机加工、热处理及表面强化等后处理工艺,以满足最终使用要求。近年来,研究人员通过开发电弧-激光复合增材制造、超声辅助增材制造及在线轧制辅助等技术,有效改善了WAAM成形件的组织和性能。

2.4 电子束选区熔化技术

电子束选区熔化(EBM)技术利用高能电子束在真空环境中逐层熔化金属粉末。与LPBF技术相比,EBM技术的能量转换效率更高,真空环境可有效避免金属氧化,特别适合钛合金、铝锂合金等活性金属材料的成形。此外,电子束扫描速度极快,可实现粉末床预热,降低温度梯度,从而减少残余应力和变形。

EBM技术的局限性在于设备成本高、维护复杂,且真空环境限制了成形件尺寸。目前,EBM技术主要用于航空航天领域钛合金复杂构件的制造,如飞机舱门铰链、发动机支架等。

2.5 各工艺技术对比与适用性分析

上述四种主流金属增材制造工艺在成形精度、效率、材料适应性及成本等方面各具特点。LPBF技术适用于高精度、复杂小型零件的批量制造;LDED技术适用于中大型零件的制造与修复;WAAM技术适用于超大型构件的高效低成本制造;EBM技术则适用于活性金属及高价值零部件的制造。在实际工程应用中,需根据零件的结构特征、性能要求及成本约束,合理选择增材制造工艺类型。

3 典型金属材料增材制造研究进展

金属增材制造技术的材料体系涵盖钛合金、不锈钢、铝合金、镍基高温合金及高熵合金等。不同材料在增材制造过程中的熔化、凝固及固态相变行为存在显著差异,导致其微观组织和力学性能表现出独特的工艺依赖性^[1]。

3.1 钛合金增材制造研究进展

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好及生物相容性优异等特点,是航空航天和生物医学领域的重要结构材料。TC4(Ti-6Al-4V)钛合金是增材制造研究最为广泛的钛合金牌号。研究表明,LPBF成形TC4钛合金的微观组织主要由针状 α' 马氏体组成,这是由于极高的冷却速率抑制了扩散型相变,导致亚稳态马氏体相的形成^[2]。马氏体组织的存在使LPBF-TC4钛合金具有较高的强度和硬度,但塑性和韧性相对较低。

为改善TC4钛合金的塑韧性,研究人员发展了多种后处理技术。退火处理可促进亚稳态马氏体分解为 $\alpha+\beta$ 层片状组织,显著提高材料的塑性和断裂韧性。热等静压(HIP)处理能够有效闭合内部气孔和微裂纹,提高材料的疲劳性能。此外,通过调控激光功率、扫描速度及层厚等工艺参数,可实现对熔池尺寸和冷却速率的控制,进而优化微观组织。例如,适当降低激光功率或提高扫描速度,可细化晶粒尺寸,提高材料的强韧性匹配^[3]。

TiAl合金作为一种轻质高温结构材料,具有高比强度、优异的抗氧化性和蠕变抗力,在航空发动机低压涡轮叶片等领域具有广阔的应用前景。然而,TiAl合金室温塑性差、加工窗口窄,传统铸造和锻造工艺难以制造复杂形状构件。增材制造技术为TiAl合金复杂构件的制造提供了新途径。研究表明,通过优化电子束选区熔化工艺参数,可获得细小的全片层或双态组织,显著改善TiAl合金的室温塑性和高温蠕变性能^[4]。

3.2 不锈钢增材制造研究进展

316L奥氏体不锈钢因其优异的耐腐蚀性、良好的焊接性和较低的成本,成为增材制造领域研究最为深入的不锈钢材料。LPBF成形316L不锈钢的微观组织特征为细小的胞状亚晶结构,胞壁处富集Mo、Cr等合金元素,形成元素偏析带。这种独特的微观组织使LPBF-316L不锈钢表现出较高的屈服强度和拉伸强度,同时保持良好的塑性^[5]。

然而, LPBF 成形 316L 不锈钢存在明显的各向异性。由于熔池边界和扫描方向的定向排列, 水平方向 (XY 平面) 和垂直方向 (Z 方向) 的力学性能存在差异。研究表明, 垂直方向的延伸率通常低于水平方向, 这与柱状晶沿沉积方向的定向生长及层间结合强度有关^[16]。通过优化激光能量密度和扫描策略, 可有效降低各向异性程度。例如, 采用层间旋转 67° 扫描策略, 可打乱柱状晶的定向排列, 形成近等轴晶组织, 提高各向同性。

此外, 微米级选区激光熔化技术 (μ -LPBF) 的发展为微型金属零件的高精度制造提供了可能。 μ -LPBF 采用更小的光斑直径 (约 20~50 μm) 和更薄的铺粉层厚 (约 5~20 μm), 能够制造特征尺寸在 100 μm 以下的微型结构。研究表明, μ -LPBF 成形 316L 不锈钢的晶粒尺寸显著细化, 屈服强度和抗拉强度较常规 LPBF 进一步提高, 但塑性略有下降^[17]。

3.3 铝合金增材制造研究进展

铝合金具有密度低、比强度高、导热导电性好等优点, 在汽车轻量化、航空航天及电子散热等领域应用广泛。然而, 铝合金的激光吸收率低 (对波长为 1064 nm 的 Nd: YAG 激光吸收率约为 5%~10%)、导热率高、易氧化, 导致其增材制造难度较大。

AlSi10Mg 是 LPBF 成形研究最为成熟的铝合金材料。该合金具有良好的焊接性和流动性, LPBF 成形件可获得致密度超过 99.5% 的微观组织。AlSi10Mg 的微观组织特征为细小的 α -Al 基体上分布着共晶 Si 相, 由于快速凝固, Si 相呈细小纤维状或颗粒状, 显著提高了材料的强度和硬度^[18]。热处理后, 共晶 Si 相球化并粗化, 材料的塑性提高, 但强度有所下降。

高强铝合金 (如 2xxx、7xxx 系列) 的 LPBF 成形仍面临严峻挑战。这些合金中的合金元素 (如 Cu、Zn、Mg) 在快速凝固过程中易产生热裂纹, 且对激光反射率高, 能量利用率低。近年来, 研究人员通过合金成分设计、粉末表面改性及基板预热等技术, 改善了高强铝合金的成形性。例如, 在 7075 铝合金中添加 Zr 或 Sc 元素, 可形成 Al₃Zr 或 Al₃Sc 纳米析出相, 细化晶粒, 抑制热裂纹的产生。

3.4 镍基高温合金及高熵合金增材制造

镍基高温合金 (如 Inconel 718、Inconel 625) 具有优异的高温强度、抗氧化性和抗蠕变性能, 是航空发动机涡轮盘、燃烧室等热端部件的关键材料。

LPBF 成形镍基高温合金的主要挑战在于裂纹敏感性高, 特别是凝固裂纹和液化裂纹。裂纹的产生与合金中的 Nb、Mo 等元素偏析及低熔点共晶相的形成密切相关。通过优化激光功率、扫描速度及基板预热温度, 可有效抑制裂纹的产生。此外, 后处理热处理 (如固溶处理+时效处理) 可调控 γ' 、 γ'' 强化相的析出, 提高材料的高温力学性能。

高熵合金 (High-Entropy Alloys, HEAs) 作为一类新型金属材料, 具有优异的力学性能、耐腐蚀性和抗辐照性能。增材制造技术为复杂形状高熵合金构件的制造提供了有效途径。研究表明, CoCrFeMnNi 等面心立方高熵合金在 LPBF 成形过程中可形成细小的等轴晶组织, 表现出优异的综合力学性能。增材制造过程中的快速凝固还可抑制元素偏析, 形成单相固溶体, 发挥高熵效应。

4 增材制造缺陷、残余应力形成机理与质量控制

金属增材制造过程中, 复杂的物理冶金现象和极端的热历史导致成形件内部不可避免地产生各类缺陷和残余应力, 严重影响构件的力学性能和服役可靠性。深入理解缺陷和残余应力的形成机理, 发展有效的质量控制方法, 是实现金属增材制造技术工程化应用的关键^[19]。

4.1 增材制造典型缺陷类型及形成机理

金属增材制造中的典型缺陷主要包括气孔、未熔合、裂纹及球化等^[20]。气孔是增材制造中最常见的缺陷类型, 其形成原因包括粉末颗粒间吸附的气体、保护气氛中的气体卷入以及匙孔效应导致的气体捕获。在 LPBF 过程中, 当激光功率过高或扫描速度过低时, 熔池深度过大, 形成深而窄的匙孔, 匙孔壁面不稳定坍塌后, 气体被封闭在凝固前沿后方, 形成气孔。气孔的存在不仅降低材料的致密度, 还会成为疲劳裂纹的萌生源, 显著降低构件的疲劳寿命。

未熔合缺陷主要发生在激光能量密度不足或铺粉厚度过大的情况下。当激光能量不足以完全熔化粉末层时, 粉末颗粒之间以及层与层之间无法实现充分冶金结合, 形成未熔合区域。未熔合缺陷通常呈不规则形状, 边缘尖锐, 应力集中效应显著, 是构件早期失效的主要诱因之一。

裂纹是增材制造中最危险的缺陷类型, 可分为凝固裂纹、液化裂纹和冷裂纹。凝固裂纹产生于凝固末期, 由于枝晶间液膜在拉应力作用下被撕裂而形

成。液化裂纹则与部分重熔区中低熔点相的液化有关,常见于镍基高温合金和铝合金的增材制造中。冷裂纹是在较低温度下,由于残余应力超过材料的断裂强度而产生的延迟裂纹。裂纹的存在严重损害构件的完整性和可靠性,必须严格控制。

球化现象是由于熔池表面张力过大,熔融金属在凝固前未能充分铺展,形成球形颗粒。球化会导致层间结合不良、表面粗糙度增加,甚至造成成形失败。球化的产生与激光功率、扫描速度、粉末粒径及保护气氛等工艺参数密切相关。

4.2 残余应力的形成机理与表征方法

残余应力是增材制造过程中由于不均匀热输入和约束条件导致的自平衡内应力。在金属增材制造中,激光或电子束等高能热源局部熔化金属材料,形成高温熔池。熔池周围材料处于较低温度,对熔池的膨胀和收缩产生约束,导致热应力的产生。当材料温度超过屈服强度对应的温度时,发生塑性变形;冷却至室温后,塑性变形无法恢复,形成残余应力^[21]。

增材制造残余应力的分布特征与工艺类型、零件几何形状及扫描策略密切相关。一般而言,残余应力在沉积层与基板结合处最大,沿沉积高度方向逐渐减小。在零件边缘区域,由于自由表面的存在,残余应力通常表现为拉应力;而在零件中心区域,残余应力可能表现为压应力。过大的残余应力会导致零件变形、开裂及尺寸精度超差,甚至在后处理加工或服役过程中引发延迟开裂。

残余应力的表征方法主要包括破坏性和非破坏性两类。破坏性方法包括钻孔法、轮廓法和切片法等,通过测量材料去除后的变形来反算残余应力分布。非破坏性方法主要包括 X 射线衍射法、中子衍射法和超声波法等。X 射线衍射法利用布拉格定律测量晶面间距的变化,计算表面残余应力,具有空间分辨率高、无损检测的优点,但穿透深度有限(通常仅为几十微米)。中子衍射法可穿透较厚的金属材料,实现三维残余应力场的测量,但设备昂贵,测试周期长。超声波法利用超声波在应力场中的传播速度变化来评估残余应力,具有便携、成本低的优势,但精度相对较低,适用于现场快速检测。

4.3 残余应力调控策略

针对增材制造残余应力问题,研究人员发展了多种调控策略,包括工艺参数优化、扫描策略设计、基板预热、后处理去应力及在线监测控制等^[22]。

工艺参数优化是降低残余应力的基础手段。降低激光功率、提高扫描速度或减小层厚,可减小热输入和熔池尺寸,降低温度梯度,从而减小热应力。然而,过度降低能量密度可能导致未熔合等缺陷,需要在残余应力和成形质量之间取得平衡。

扫描策略设计对残余应力分布具有显著影响。传统的单向扫描策略易在扫描末端产生应力集中,而层间旋转扫描、岛式扫描及棋盘式扫描等策略可通过改变热输入方向,打乱应力累积路径,降低残余应力的最大值。此外,分区扫描策略将成形区域划分为多个子区域,依次扫描,可有效降低整体热积累和变形。

基板预热是降低温度梯度的有效方法。通过将基板预热至一定温度(如 200~500 °C),可减小熔池与周围材料的温差,降低冷却速率,从而减小热应力。对于大型构件,分区预热和动态温度控制技术可进一步改善温度场均匀性。

后处理去应力主要包括热处理、机械喷丸及超声冲击等方法。去应力退火是最常用的热处理方法,通过将零件加热至再结晶温度以下,使残余应力松弛。机械喷丸和超声冲击通过在零件表面引入压应力层,抵消部分拉应力,提高构件的抗疲劳性能。

在线监测与智能控制是残余应力调控的前沿方向。通过红外热像仪、高温计及应变传感器等实时监测温度场和变形,结合机器学习算法预测残余应力分布,并反馈调节工艺参数,可实现残余应力的主动控制。

4.4 质量控制与无损检测技术

为确保增材制造构件的质量可靠性,发展有效的无损检测技术至关重要。目前,应用于增材制造构件的无损检测技术主要包括 X 射线计算机断层扫描(CT)、超声检测、涡流检测及光学检测等。X 射线 CT 技术可实现内部缺陷的三维可视化,检测精度可达微米级,是评估内部气孔、裂纹及未熔合缺陷的有效手段。超声检测技术包括常规超声、相控阵超声及激光超声等,具有检测速度快、成本低的优势,适用于大型构件的在线检测。近年来,机器学习与深度学习算法被引入缺陷识别和分类中,通过训练大量缺陷图像数据,实现缺陷的自动识别和定量表征,显著提高了检测效率和可靠性。

5 数值模拟与智能化工艺优化

数值模拟技术为深入理解金属增材制造过程中

的物理冶金现象、预测成形质量及优化工艺参数提供了强有力的工具。通过建立多物理场耦合模型,研究人员能够在计算机中再现熔池形成、凝固组织演化及残余应力发展等复杂过程,从而减少试验成本,缩短工艺开发周期^[23]。

5.1 熔池动力学与温度场数值模拟

熔池动力学是金属增材制造过程的核心物理现象,直接影响成形件的表面质量、内部缺陷及微观组织。熔池的形成涉及激光与材料的相互作用、金属熔化、熔池流动及凝固等多个物理过程。研究人员基于流体力学和传热学基本方程,建立了包含质量守恒、动量守恒和能量守恒的熔池动力学模型^[24]。

在 LPBF 单道扫描过程中,激光束作用于粉末层表面,粉末吸收激光能量后迅速熔化,形成熔池。熔池内的流体流动主要由表面张力梯度(Marangoni 对流)和浮力驱动。Marangoni 对流的强度与温度梯度成正比,高温区域表面张力较低,熔融金属从高温区流向低温区,形成强烈的熔池搅拌。这种对流行为促进了熔池内的热量和物质传输,影响凝固组织的形貌和取向。

数值模拟研究表明,激光功率和扫描速度对熔池尺寸和形状具有显著影响。提高激光功率或降低扫描速度,熔池深度和宽度增加,但过大的熔池深度易引发匙孔效应,导致气孔缺陷。此外,扫描间距和层厚的选择直接影响层间搭接率和表面平整度。通过数值模拟优化扫描参数,可获得良好的搭接效果,避免未熔合和球化缺陷。

温度场模拟是预测残余应力和变形的基础。增材制造温度场具有高度瞬态和非均匀特征,涉及多道次、多层级的热循环累积。有限元方法(FEM)是温度场模拟的主要手段,通过将零件离散为有限个单元,求解瞬态热传导方程,获得各时刻的温度分布。为提高计算效率,研究人员发展了单元生死技术、自适应网格划分及并行计算等方法。温度场模拟结果可用于计算热应力场,进而预测残余应力分布和变形趋势。

5.2 微观组织演化模拟

增材制造过程中的快速凝固导致独特的微观组织特征,如细小的胞状晶、柱状晶及亚稳态相。相场法(Phase Field Method)是模拟凝固组织演化的有效方法,通过引入序参量描述固液界面,求解自由能泛函的极值问题,获得枝晶生长形貌和溶质分布。

研究表明,冷却速率和温度梯度是控制凝固组织的关键因素。高冷却速率和高温度梯度有利于形成柱状晶,而低冷却速率和低温度梯度则促进等轴晶的形成。通过调控工艺参数改变熔池尺寸和热历史,可实现对晶粒形貌和尺寸的控制。此外,元胞自动机(Cellular Automaton)和蒙特卡洛(Monte Carlo)方法也被广泛应用于凝固组织模拟中,能够高效地模拟大规模晶粒生长过程。

5.3 多尺度多物理场耦合建模

金属增材制造过程涉及从微观到宏观的多尺度物理现象,包括微米尺度的熔池动力学、毫米尺度的凝固组织演化及厘米至米尺度的温度场和应力场分布。多尺度多物理场耦合建模是实现全过程仿真预测的关键。

在微观尺度,分子动力学(MD)和第一性原理计算可用于研究激光与材料的相互作用机制、熔池内原子扩散及相变动力学。在介观尺度,相场法和元胞自动机方法可模拟枝晶生长和晶粒演化。在宏观尺度,有限元法和有限差分法可求解温度场、应力场及变形场。通过建立跨尺度耦合模型,将不同尺度的模拟结果进行传递和映射,可实现从工艺参数到组织性能的全链条预测。

5.4 机器学习与智能化工艺优化

近年来,机器学习(Machine Learning, ML)和人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术在金属增材制造领域的应用日益广泛。通过收集大量工艺参数-组织-性能数据,训练神经网络、支持向量机及随机森林等机器学习模型,可建立工艺窗口与成形质量之间的映射关系,实现工艺参数的智能优化。

在缺陷预测方面,基于卷积神经网络(CNN)的图像识别技术被用于熔池形貌的实时监测和缺陷预警。通过高速相机采集熔池图像,CNN 模型可自动识别匙孔、球化及飞溅等异常现象,并反馈调节激光功率或扫描速度,实现闭环质量控制。在性能预测方面,结合微观组织图像和力学性能数据,深度学习模型可建立组织-性能关联,指导工艺优化。

此外,数字孪生(Digital Twin)技术为增材制造过程的虚拟映射和实时优化提供了新思路。通过构建与物理制造系统实时同步的数字模型,数字孪生可实现工艺状态的在线监测、故障诊断及自适应调控,推动金属增材制造向智能化方向发展。

6 结论与展望

本文系统综述了金属零部件增材制造技术的研究进展, 主要结论如下:

(1) 金属增材制造技术主要包括选区激光熔化、激光定向能量沉积、电弧增材制造及电子束选区熔化等工艺类型, 各工艺在成形精度、效率、材料适应性及成本方面各具特点, 需根据零件特征合理选择。

(2) 钛合金、不锈钢、铝合金及镍基高温合金等典型金属材料在增材制造过程中表现出独特的组织演变规律和力学性能特征。工艺参数对材料的各向异性、缺陷敏感性、强韧性匹配具有显著影响, 后处理热处理是改善材料性能的重要手段。

(3) 气孔、未熔合、裂纹及球化是金属增材制造中的主要缺陷类型, 其形成机理与能量输入、粉末质量及扫描策略密切相关。残余应力是制约大型复杂构件制造精度的关键因素, 通过工艺优化、扫描策略设计、基板预热及后处理等手段可有效调控残余应力。

(4) 数值模拟技术为理解增材制造物理冶金过程、预测成形质量及优化工艺参数提供了重要工具。机器学习与数字孪生技术的发展, 为增材制造的智能化工艺优化和质量控制开辟了新途径。

展望未来, 金属增材制造技术将朝着以下方向发展: 一是材料-结构-性能一体化设计, 通过拓扑优化、点阵结构及功能梯度设计, 实现构件的轻量化与多功能化; 二是多材料协同增材制造, 实现异种材料的界面冶金结合和性能匹配; 三是智能化与自动化, 融合在线监测、机器学习和数字孪生技术, 构建自适应工艺调控系统; 四是标准体系与认证方法的完善, 建立覆盖材料、工艺、检测及评价的全链条标准体系, 推动增材制造技术的规模化工程应用。随着上述技术的不断突破, 金属增材制造必将在高端装备制造领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
- [2] 李毅, 王振忠, 肖宇航, 等. 金属激光增材+X 复合制造技术综述[J]. 航空学报, 2024, 45(13): 629349.
- [3] 马剑雄, 夏张文, 周伟民. 金属增材制造技术的发展与展望[J]. 金属加工(热加工), 2022(3): 22-27.
- [4] 刘壮壮, 丁明路, 谢建新. 金属 3D 打印数字化制造研究进展[J]. 金属学报, 2024, 60(5): 569-584.
- [5] 李昂, 刘雪峰, 俞波, 等. 金属增材制造技术的关键因素及发展方向[J]. 工程科学学报, 2019, 41(2): 159-173.
- [6] 卢秉恒. 增材制造技术: 现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
- [7] 宗学文, 高倩, 周宏志, 等. 体激光能量密度对选区激光熔化 316L 不锈钢各向异性的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502003.
- [8] 杨晨, 董志宏, 迟长春, 等. 选区激光熔化成形 24CrNiMo 合金钢的组织结构与力学性能[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502008.
- [9] 张仁奇, 樊磊, 周宝刚, 等. 选区激光熔化 316L 不锈钢的各向组织与性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(9): 161-166.
- [10] 程灵钰, 朱小刚, 刘正武, 等. 热处理对激光选区熔化成形 316L 不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(7): 80-86.
- [11] 王俊飞, 袁军堂, 汪振华, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金薄壁件变形与残余应力[J]. 激光技术, 2019, 43(3): 411-416.
- [12] 秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402002.
- [13] 陈玉勇, 时国浩, 杜之明, 等. 增材制造 TiAl 合金的研究进展[J]. 金属学报, 2024, 60(1): 1-15.
- [14] 张楠, 张海武, 王淼辉. 微米级选区激光熔化 316L 不锈钢的拉伸力学性能[J]. 金属学报, 2024, 60(2): 211-219.
- [15] 赵剑峰, 谢德巧, 梁绘昕, 等. 金属增材制造变形与残余应力的研究现状[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(1): 1-6.
- [16] 权国政, 杨焜, 盛雪, 等. 电弧熔丝增材制造残余应力控制方法综述[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(11): 1-10.
- [17] 王瑞鑫, 陈超越, 徐松哲, 等. 激光增材制造中残余应力形成机理、表征及调控方法的研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(7): 1-12.
- [18] 耿汝伟, 杜军, 魏正英, 等. 电弧增材制造成形规律、组织演变及残余应力的研究现状[J]. 机械工程材料, 2020,

- 44(12): 11-17.
- [19] 梁平华, 唐倩, 冯琪翔, 等. 激光选区熔化单道扫描与搭接数值模拟及试验[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 56-67.
- [20] GU D D, SHI X, POPRAWA R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [21] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review[J]. Materials & Design, 2021, 209: 110008.
- [22] VAFADAR A, GUZZOMI F, RASSAU A, et al. Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1213.
- [23] BRENNAN M C, KEIST J S, PALMER T A. Defects in metal additive manufacturing processes[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(9): 6538-6554.
- [24] BANDYOPADHYAY A, ZHANG Y, BOSE S. Recent developments in metal additive manufacturing[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2020, 28: 100-108.
- 版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**OPEN ACCESS**