

高性能大尺寸金属构件增材制造研究进展*

方学伟, 杨健楠, 周 健, 张 珪, 乔润基, 冯佳劲, 刘 畅, 黄 科, 卢秉恒
(西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对大尺寸金属构件增材制造(additive manufacturing, AM) 技术的研究现状与发展趋势, 综述了该技术在航空航天、能源等领域的应用及其面临的挑战。首先, 阐述了增材制造的基本原理及其在大尺寸金属构件中的优势与局限。其次, 分析了增材制造过程中工艺参数优化与智能控制技术的研究进展, 特别是通过外场辅助调控、实时监测与自适应控制技术的应用, 提高了制造过程的精度与稳定性。此外, 重点讨论了针对大尺寸金属构件的在线与后处理形性同步调控技术, 结合热处理与机械加工方法, 有效改善了成形质量与力学性能。最后, 展望了未来增材制造技术在大尺寸金属构件中的应用前景, 提出了在工艺优化、材料特性、生产效率以及可持续发展等方面亟待解决的问题。研究表明, 随着技术的不断进步, 增材制造将在多个领域实现更广泛的应用, 并推动传统制造模式的变革。

关键词: 大尺寸; 金属增材; 多场耦合; 组织性能; 过程控制; 后处理

中图分类号: TH164 **文献标识码:** A

DOI: [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.10.001](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.10.001)



全文在线

Advances in additive manufacturing of large-size high-performance metal components

FANG Xuewei, YANG Jiannan, ZHOU Jian, ZHANG Yao, QIAO Runji, FENG Jiajin,
LIU Chang, HUANG Ke, LU Bingheng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, CHN)

Abstract: The current status and development trends of additive manufacturing (AM) technology for large-size metal components are reviewed with applications in aerospace, energy, and other fields. Firstly, the basic principles of AM and its advantages and limitations for large-size metal components are discussed. Secondly, research progress in process parameter optimization and intelligent control technologies during AM is analyzed. Particular focus is placed on the application of external field-assisted control, real-time monitoring, and adaptive control technologies to enhance the precision and stability of the manufacturing process. Additionally, online and post-processing shape synchronization control technologies for large-size metal components are emphasized. Combined with heat treatment and machining methods, these technologies are shown to effectively improve forming quality and mechanical properties. Finally, future prospects of AM technology for large-size metal components are outlined, and key issues related to process optimization, material properties, production efficiency, and sustainable development are identified. The review demonstrates that with continuous technological advancements, AM is expected to find broader applications in various fields and contribute to the transformation of traditional manufacturing models.

Keywords: large-size component; metal additive manufacturing; multi-field coupling; microstructure and property; in-situ control; post-processing

* 国家自然科学基金项目“高强铝合金原位低频锤击-动态冷约束复合电弧熔丝增材强韧化机理研究”(52205414)

随着航空航天、核电能源等高端装备向大型化、轻量化方向快速发展，大尺寸金属构件（特征尺寸大于等于1 m）的制造需求日益迫切。传统铸造、锻造工艺因受限于模具尺寸与材料利用率低^[1]，难以满足新一代运载火箭燃料贮箱、核反应堆压力容器等关键构件的整体成形要求。金属增材制造（AM）通过逐层堆积成形，可实现复杂结构一体化制造，显著缩短生产周期并降低材料损耗（材料利用率大于85%）^[2]，为大尺寸构件制造提供了革新途径^[3-4]。然而，随着构件尺寸从实验室级（小于0.5 m）向工程级（大于2 m）跨越，工艺过程中的非线性累积效应导致成形质量与效率难以协同提升，成为制约技术工程化应用的核心瓶颈^[5]。

当前研究聚焦于大尺寸AM的三大关键科学问题，如图1所示，包括热应力与变形控制^[6]、高沉积速率下缺陷抑制^[7]、跨尺度组织与性能均匀性调控^[8]。本文系统梳理了大尺寸金属构件增材制造在应对上述三大挑战方面的解决方案与技术瓶颈，以为该领域的学术研究与工程实践提供参考框架。

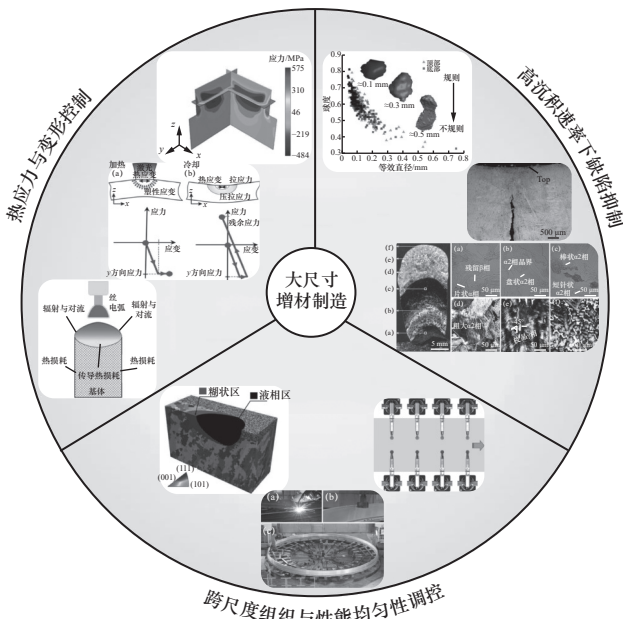


图1 大尺寸金属构件增材制造面临的挑战

Fig. 1 The challenges faced by additive manufacturing of large-size metal components

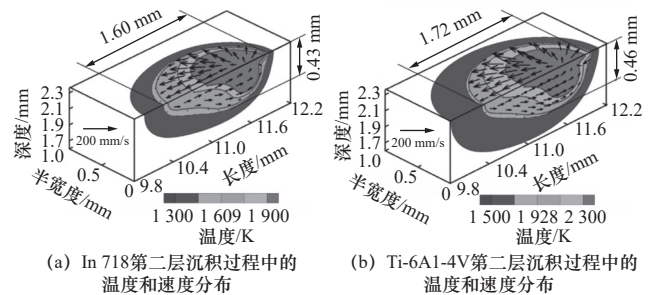
1 大尺寸金属构件增材制造的关键挑战

1.1 热累积与应力变形控制

增材制造技术凭借其设计自由度高、材料利用率高等优势，在航空航天、核电装备等领域的大尺

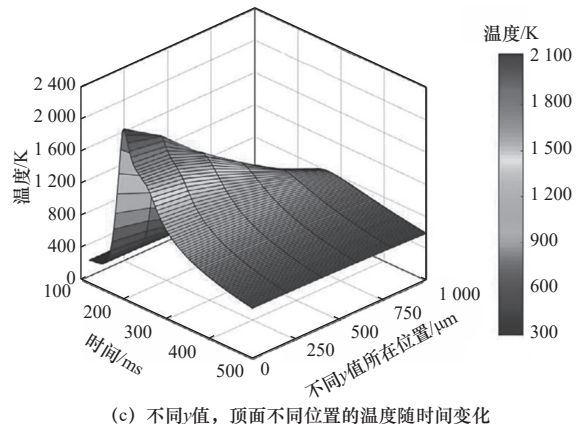
寸高性能金属构件制造中展现出显著潜力。然而，随着构件尺寸从实验室级向工程级跨越，逐层沉积过程中反复的热循环与快速非平衡冷却引发的热累积效应与非均匀残余应力问题日益突出，成为制约成形精度、几何稳定性与服役可靠性的核心挑战^[9]。研究表明，大尺寸构件由于沉积时间长、热梯度累积显著，其残余应力分布复杂程度远超常规尺度零件，极易导致层间开裂、整体翘曲甚至基板失效^[10]。如何有效抑制热力耦合引发的变形失稳，已成为推动大尺寸金属增材制造技术工业化落地的关键课题。

近年研究聚焦于热力学机制解析、工艺优化与智能调控的多维度探索。以激光粉末床熔融（laser powder bed fusion, LPBF）为例，MUKHERJEE T等^[11]通过多尺度建模揭示了激光粉末床熔融中热输入与温度梯度的非线性关系（图2）。PARRY L等^[12]则基于红外热成像技术开发了定向能量沉积（directed energy deposition, DED）的实时热管理策略，显著降低了大尺寸构件的变形率。随着机器学习^[13]、数字孪生^[14]等技术的引入，热应力控制正从传统“试错法”转向数据驱动的智能范式，例如通过神经网络预测热累积趋势并实时调整沉积路径。然而，大尺寸增材制造中热累积的动态平衡仍是亟待突破的瓶颈，尤其在超高沉积速率下，温度梯度与应力演化的耦合作用机制尚未完全明晰。



(a) In 718第二层沉积过程中的温度和速度分布

(b) Ti-6Al-4V第二层沉积过程中的温度和速度分布



(c) 不同y值，顶面不同位置的温度随时间变化

图2 不同参数下的温度梯度图

Fig. 2 Temperature gradient maps under different parameters

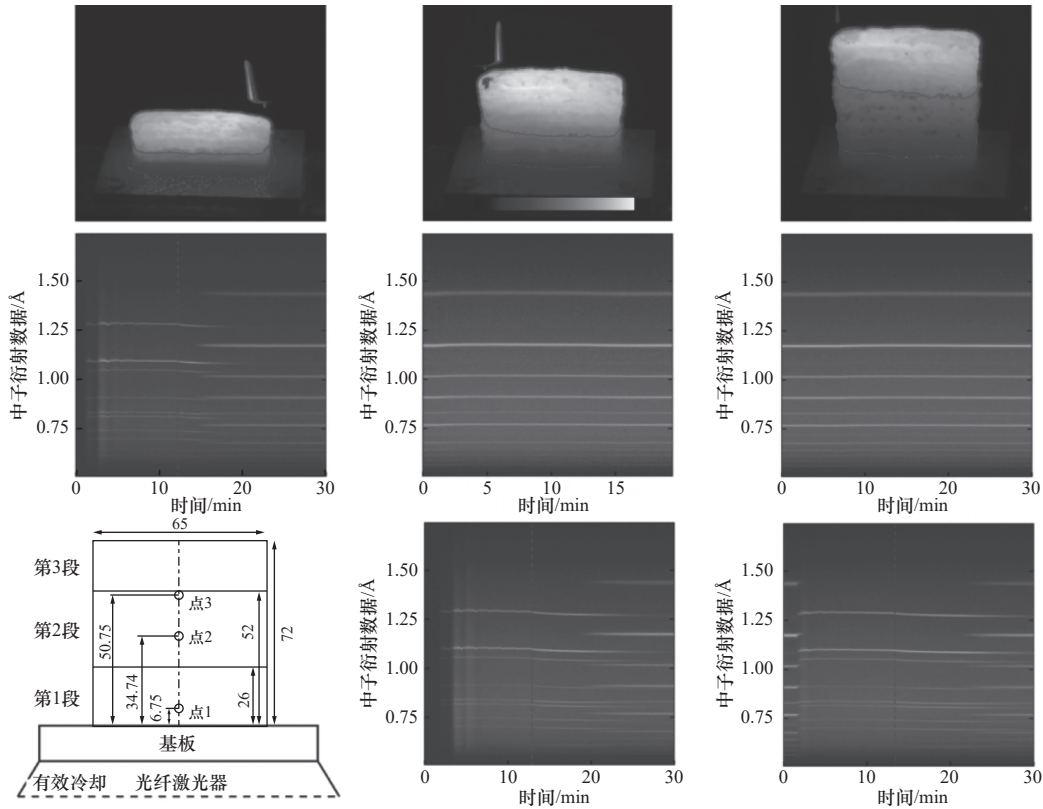


图3 激光增材制造过程中熔池温度变化

Fig. 3 The temperature variation of the molten pool during the laser additive manufacturing process

1.1.1 热-力耦合机制

增材制造过程中，高能束（如激光、电子束）的局部加热导致材料经历高温-冷却循环，引发热膨胀与收缩的周期性应变。PLOTKOWSKI A 等^[15]通过原位中子衍射技术揭示了熔池区域的弹塑性应变演化规律（图3），发现随着成形高度增加，层间未完全冷却区域持续吸收后续沉积热量，形成热累积效应。这种效应导致温度梯度与残余应力非线性叠加，例如LPBF中顶层温度可升至材料熔点的80%以上^[16]，显著加剧变形失稳风险。

残余应力的形成机制主要包含两方面：一是熔池快速冷却引起的非均匀收缩，温度梯度引起的弹性应变在冷却后被材料约束形成热应力，是增材制造残余应力的主要来源^[17]，其分布可通过热弹塑性有限元数值仿真技术量化（图4）；二是奥氏体→马氏体相变伴随的体积变化（相变应力）。热-力耦合与结构变形的交互作用进一步放大了应力分布的复杂性，使得大尺寸构件的残余应力预测难度显著增加。

1.1.2 热应力控制技术

热应力控制技术通过工艺优化、原位调控与结构设计的协同创新，显著提升了大尺寸金属构件的

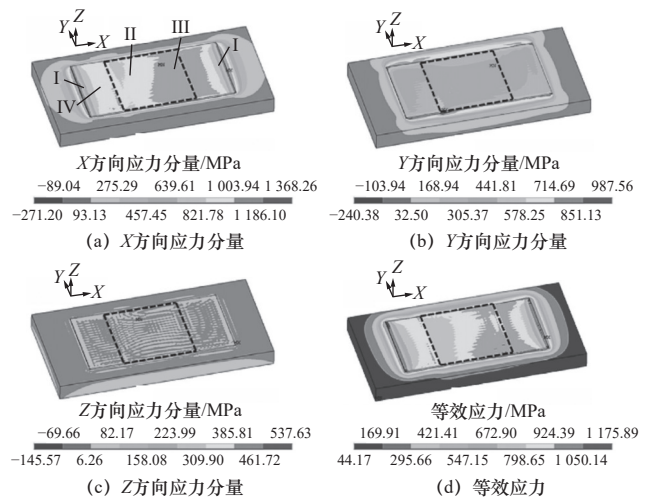


图4 增材零件在室温下的残余应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution of additive manufactured part at room temperature

成形精度与服役可靠性。工艺参数优化是基础性控制手段，通过调整激光功率、扫描速度及层间停留时间降低单层能量密度，从而减少热输入与温度梯度。例如，ZHANG X 等^[18]引入液态金属（如锡层）作为辅助冷却介质，利用其高导热性加速热量传递，残余拉伸应力降幅达30%（图5）。然而，单纯降低热输入可能牺牲成形质量，需结合路径规划创新

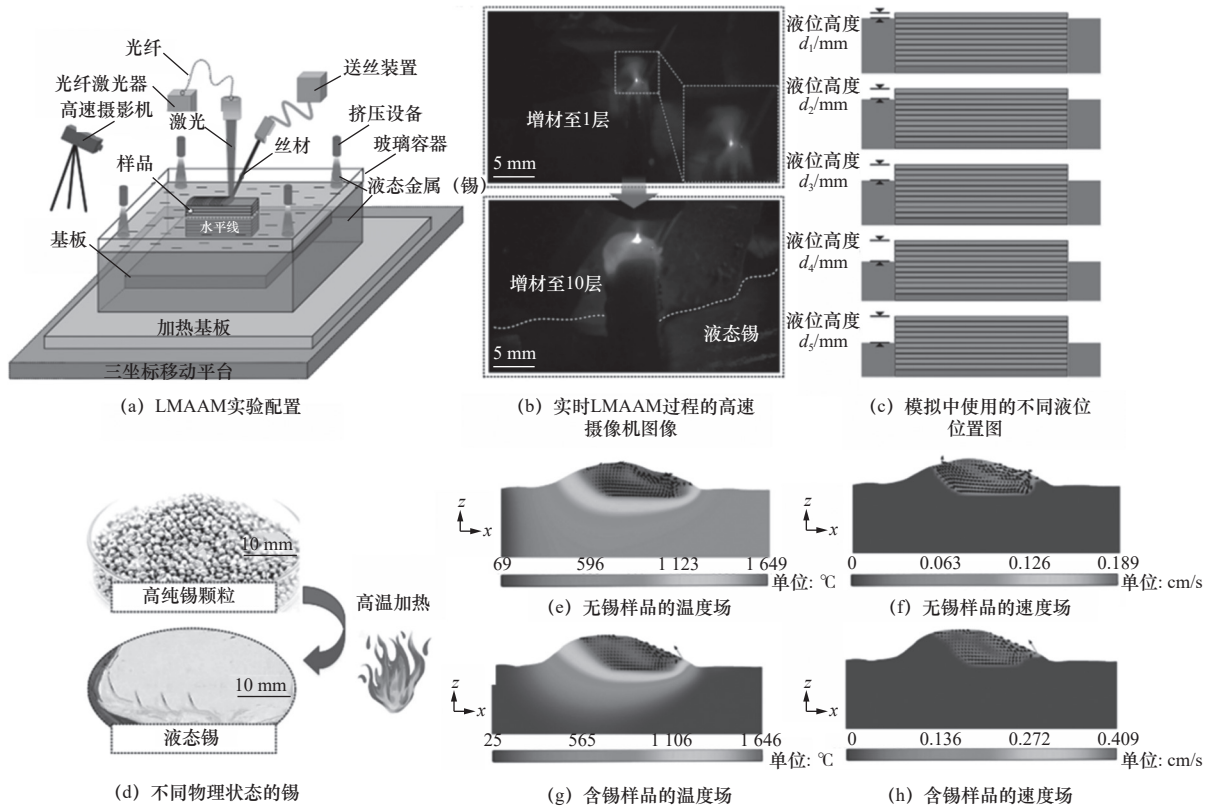


图5 增材制造过程中引入液态金属基础流程图

Fig. 5 Flowchart of the introduction of liquid metal base in the additive manufacturing process

以平衡效率与精度。罗军等^[19]通过高能 X 射线分析发现，岛状扫描策略可分散热输入区域，避免局部过热，使钛合金残余应力降低（图 6），为混合路径优化提供了理论依据。图 6a 所示为当束流能量为 20 keV 时采用激光波长为 532 nm 和 1 064 nm 的无保护层激光喷丸技术对 Ti-6Al-4V 合金进行 1、3、5 次冲击（分别为样品 1、2、3），得出残余应力的分布曲线；图 6b 所示为在相同的喷丸条件下，当束流能量为 30 keV 时，得出残余应力的分布曲线。

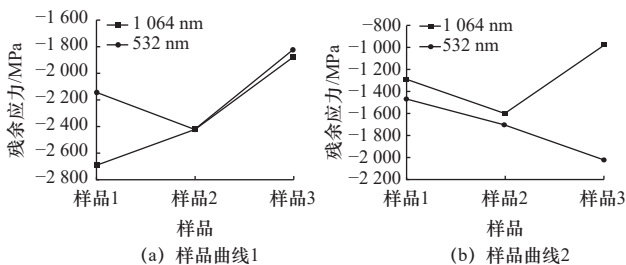


图 6 不同扫描策略对钛合金残余应力的影响

Fig. 6 The influence of scanning strategies on the residual stress of titanium alloys

原位调控技术通过实时监测与动态干预实现主动热管理。基于红外热成像或热电偶的闭环控温系

统可动态调节激光功率或沉积速率，将熔池温度波动范围控制在制定范围以内^[20]，从而降低残余应力累积。杨益等^[21]通过将基板进行预热，以减小温度梯度使得材料热胀冷缩减弱，将试样内部的残余应力由 267.2 ± 13.4 MPa 降低到 172.6 ± 8.6 MPa， β 相稳定性提高， α_2 脆性相的含量减少，如图 7 所示。

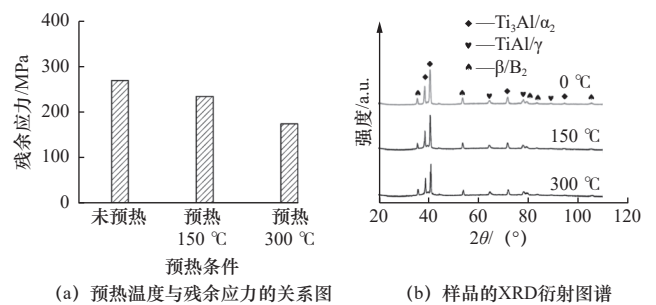


图 7 基板预热前后样品的残余应力及 XRD 衍射图谱

Fig. 7 The residual stress and XRD diffraction patterns of the samples before and after substrate preheating

机械辅助调控手段如层间轧制（interpass rolling）通过塑性变形释放应力，MARTINA F 等^[22]在电弧增材制造（wire arc directed energy deposition, WA-DED）中应用该技术后，残余应力降幅达 40%。ZHOU S 等^[23]使用层间锤击+WA-DED 混合工艺，得出经过

层间锤击3次相较于1次和沉积态具有更高的加工硬化和残余应力水平。FANG X等^[24]通过在增材过程中加入层间锤击处理,显著改变了残余应力状态,使表面附近的残余应力从拉伸应力(+80 MPa)转变为压应力(-22 MPa),如图8所示。

多物理场仿真技术的进步进一步提升了预测能力, QIU Y等^[25]开发的基于有限元法(finite element method, FEM)的多物理场模型,使应力分布

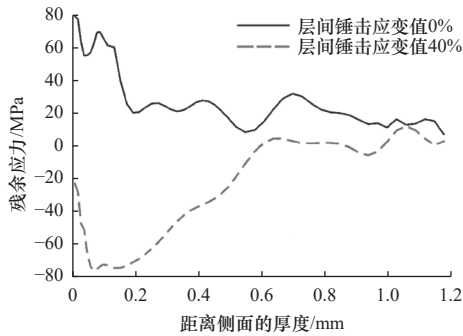


图8 层间锤击应变值0%和40%样品沿厚度方向的残余应力分布
Fig. 8 Residual stress distribution along thickness direction for samples with interlayer hammering strain values of 0% and 40%

预测精度提升10%(图9)。此外,中子衍射技术(图10)实现了增材过程中晶格应变的实时追踪,为弹塑性应变演化机制解析提供了实验支撑^[15]。

结构设计与后处理优化是热应力控制的最终保障。TAKEZAWA A等^[26]提出基于递推公式的固有应变法,结合激光扫描策略优化与晶格密度梯度设计(图11),实现层间应力的动态调控,使变形量

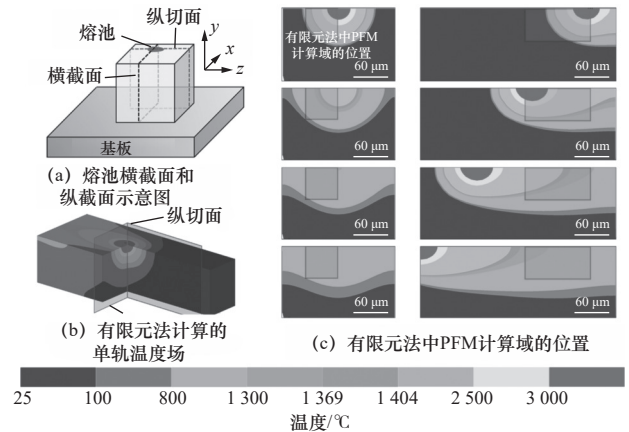


图9 基于有限元法(FEM)的多尺度模型
Fig. 9 Multi-scale model based on the FEM

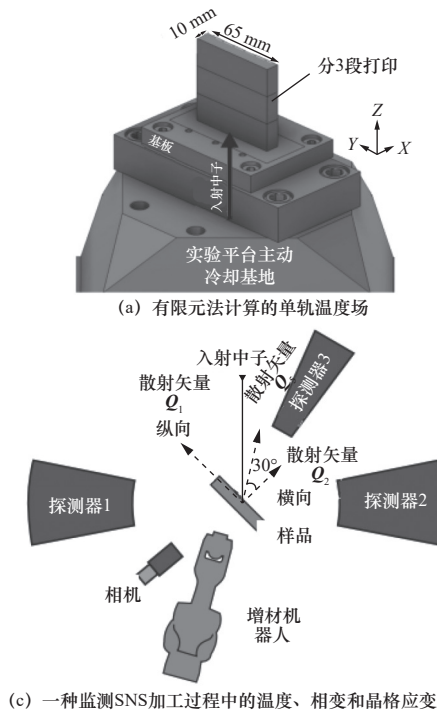


图10 增材过程中的晶格应变

Fig. 10 Lattice strain during the additive manufacturing process

减少 35%。后处理工艺如热等静压 (hot isostatic pressing, HIP) 可消除残余应力, 但可能导致晶粒粗化; 激光冲击强化 (laser shock peening, LSP) 虽保留细晶组织, 却需规避表面脆性相形成。因此, 需根据构件服役条件权衡应力缓解与组织性能的关系, 例如航空航天承力件优先选择 LSP 以保持疲劳性能, 而核电容器则倾向 HIP 以确保尺寸稳定性。

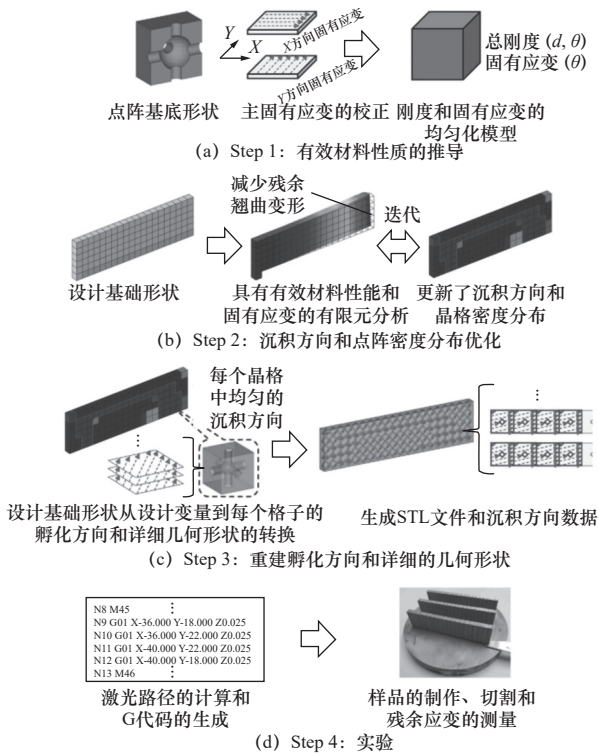


图 11 优化设计后的流程图

Fig. 11 Flowchart after the optimized design

LI X 等^[27]引入了一种 LSP 后处理技术, 将表面残余应力从未加工样品的拉应力 (+187 MPa) 转变为压应力 (-164~-59 MPa), 如图 12 所示, 其中零刻度线处为 LSP 处理表面。通过有效引入深层压应力, 改善材料的力学性能, 但需对组件两侧进行处理以减少变形。CHANG T 等^[28]采用层间 LSP 工艺增强电弧熔丝制备的 2319/5B06 异种铝合金部件, 使得样品中受 LSP 影响区域的晶粒尺寸大幅减小。

1.2 效率-质量-性能的协同调控

大尺寸金属构件增材制造的核心矛盾在于“效率-质量-性能”三元悖论, 即三者相互制约的动态平衡问题。在工程化应用中, 实现高效率成形、高质量组织控制与优异综合性能的协同优化是核心难点。效率提升策略 (如增大激光功率、加快扫描速度) 虽能缩短制造周期, 却可能引发熔池冷却速率过快导致的未熔合缺陷或热累积加剧引发的翘曲变

形。例如, 高扫描速度虽可缩短单层沉积时间, 但会导致柱状晶占比上升与各向异性加剧, 同时层厚增加可能降低材料致密度。过度追求低缺陷则可能限制性能优化, 如热等静压) 处理虽可消除气孔, 却伴随晶粒粗化风险。因此, 需通过多维度工艺设计与过程控制实现三者的动态平衡。

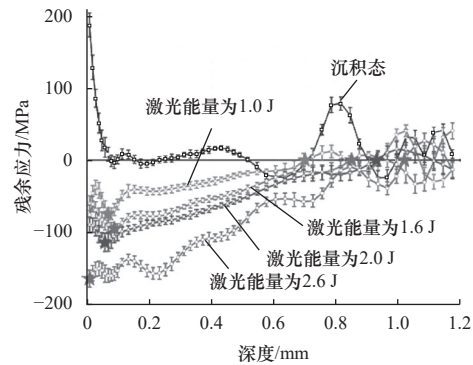


图 12 不同激光能量下 LSP 处理样品沿深度方向的残余应力分布
Fig. 12 Residual stress distribution along the depth direction for the LSP-treated samples with varying laser energies

1.2.1 效率与质量的冲突

大尺寸构件的增材制造周期通常持续数十至数百小时, 在航空航天与能源装备领域, 效率提升直接影响制造成本与交付可行性^[29]。当前主流策略包括提高送粉/送丝速率以增加沉积量; 增强能量密度 (如激光功率提升) 以扩大熔池尺寸; 采用多喷嘴或多能束协同技术实现并行加工^[30] (图 13)。

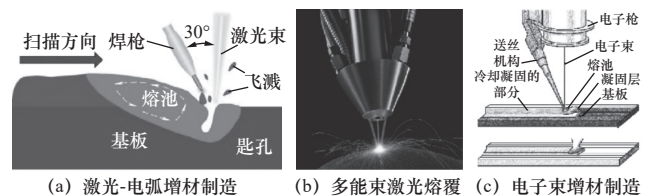


图 13 多种增材制造示意图

Fig. 13 Schematics of multiple additive manufacturing

然而, 效率提升往往伴随质量风险。在高沉积速率条件下, 熔池稳定性降低, 热输入剧烈波动, 易产生如下问题: (1) 气孔与飞溅增加, 高速熔化导致熔池扰动增强, 金属蒸气扰动或保护气体卷入熔池, 易形成孔洞、夹杂^[31]; (2) 层间融合不良, 扫描速度过快或能量分布不均导致层间连接不足, 结构完整性受损; (3) 组织粗化与异质性增强, 熔池冷却速率下降, 促使晶粒长大、柱状晶显著发展, 导致组织不均、各向异性加剧; (4) 变形与残余应力增大, 快速沉积带来的热梯度扩大, 使热应力集中与变形难以控制, 甚至引发裂纹;

(5) 表面质量下降, 沉积边界波动性强, 堆叠精度下降, 导致表面粗糙度增加, 需后期大量精加工。

因此, 在增材制造过程中, 仅单方面追求效率往往会牺牲构件的几何精度、内部致密性与服役性能。这对实际应用构成挑战, 特别是在服役环境复杂、负载要求严格的场合, 如航空发动机部件、航天结构构件、海洋平台连接件等。

1.2.2 质量与性能的耦合机制

增材制造过程中, 材料的微观组织结构在很大程度上决定了构件的宏观性能表现与服役可靠性。传统制造中, 热处理与变形加工可在一定程度上控制组织与性能, 而在增材制造中, 组织的形成是与构件成形过程同步进行的, 因此材料的组织演化过程更加复杂且高度依赖成形路径与热/力历史的耦合作用。此时, “高质量”不仅意味着几何形貌精确、表面光洁、宏观缺陷少, 更关键的是材料内部的组织均匀性、致密性与可控性。

例如, 若在成形过程中热输入波动、冷却速率不均, 极易造成如下问题: 组织不均导致不同区域力学性能差异显著, 易引发局部应力集中、开裂或断裂; 未熔合缺陷、气孔等内部缺陷可能作为裂纹萌生源, 显著降低疲劳性能和循环寿命^[32]; 强织构特征导致构件产生明显的各向异性, 在多向载荷作用下的稳定性与安全性降低; 粗晶组织在某些材料体系中会削弱强度与韧性的综合协调性; 某些材料如高温合金在不适宜的热输入条件下还可能形成有害相沉淀或元素偏析, 进一步削弱性能。

因此, 单纯依靠传统意义上的几何精度和致密度评估构件质量, 已无法满足高端装备对于关键结构件的服役安全要求。在追求构件高质量成形的同时, 必须深入理解和控制增材过程中材料的组织演化机制, 尤其是热循环历史对晶粒生长、相变、织构形成的影响机制。

具体而言, 增材制造正在从多个角度进行优化:

(1) 调控熔池尺寸与冷却速率, 通过精准控制激光功率、扫描速度、成形路径等工艺参数, 实现熔池热输入均匀、快速凝固, 促进晶粒细化; (2) 设计组织细化策略, 如层间扰动(熔池搅拌)、超声/电磁场辅助^[33]等方式, 破坏柱状晶生长, 促进等轴晶形成; (3) 采用梯度能量输入或多级热循环策略, 控制组织由底部至顶部逐层演化, 构建梯度组织或功能梯度性能^[34]; (4) 在某些合金体系中, 配合后处理热处理工艺, 进一步优化组织, 如时效强化、相稳定化、消除织构与应力集中等^[35]。

未来, 高质量构件的形成不仅依赖于材料本身的合金设计和工艺参数控制, 还需要构建“组织-性能-工艺”之间的多尺度关联模型, 借助多物理场模拟、数据驱动优化与智能控制系统, 实现微观组织的“可预期、可控制、可设计”, 推动高性能增材制造构件的大规模工程化应用。

1.2.3 协同调控策略

为实现效率、质量与性能的协同优化, 大尺寸金属构件增材制造研究正向多维度、智能化的系统调控方向发展。核心挑战在于平衡效率提升与组织性能的矛盾, 例如高沉积速率可能引发组织粗化与性能波动, 而过度追求组织均匀性则导致制造周期延长。当前研究聚焦以下方向:

(1) 多目标工艺参数优化

传统工艺开发依赖经验试错法, 效率低且成本高昂。基于设计实验法 (design of experiment, DoE)、响应面模型 (response surface method, RSM) 及机器学习 (machine learning, ML) 算法^[36], 可构建工艺参数与多目标 (如变形量、成形精度) 的映射关系。赵欣等^[37]通过响应面法优化数值分析流程, 减少实验次数。郭志永等^[38]采用中心复合响应面法对镍基高温合金 GH4169 电弧增材工艺进行参数优化 (图 14), 显著提升参数选择的科学性与工艺稳健性。

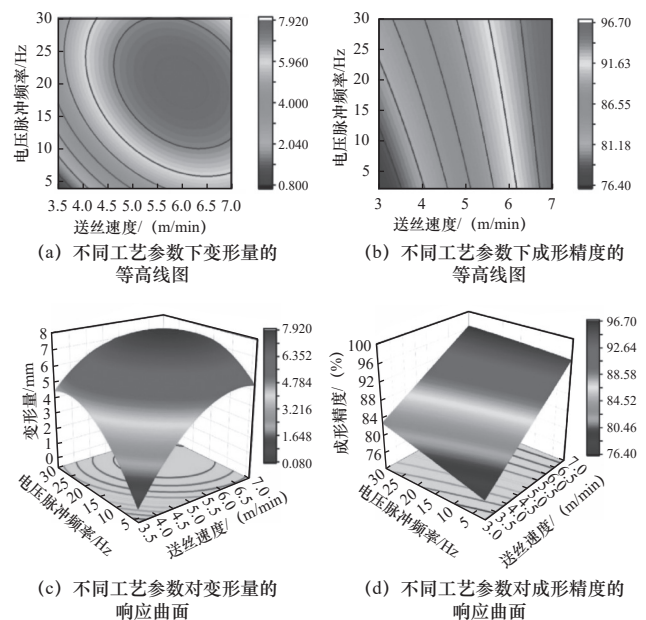


图 14 多种响应曲面模型

Fig. 14 Multiple response surface modeling

(2) 过程多物理场建模与仿真

增材制造涉及热传导、熔池流动、凝固及应力演化的多物理场耦合。通过构建多场耦合模型, 可

预测温度场分布、熔池行为及应力演化路径，从而提前识别缺陷与高应力区域。杜军等^[39]基于计算流体力学建立了熔滴复合电弧增材制造的三维瞬态熔池模型，对比分析了熔滴过渡模式对熔池冲击、铺展及凝固行为的影响（图15）。此类模型为工艺优化与缺陷抑制提供了理论支撑。

(3) 自适应智能控制系统

集成实时监测与反馈调控的智能系统正成为研究热点。红外热成像、熔池形貌监测等传感技术可实时捕捉温度分布、能量输入波动等关键参数^[40]。结合闭环控制算法，动态调整激光功率、送粉速率及扫描路径，维持熔池稳定性与成形质量一致性（图16）。

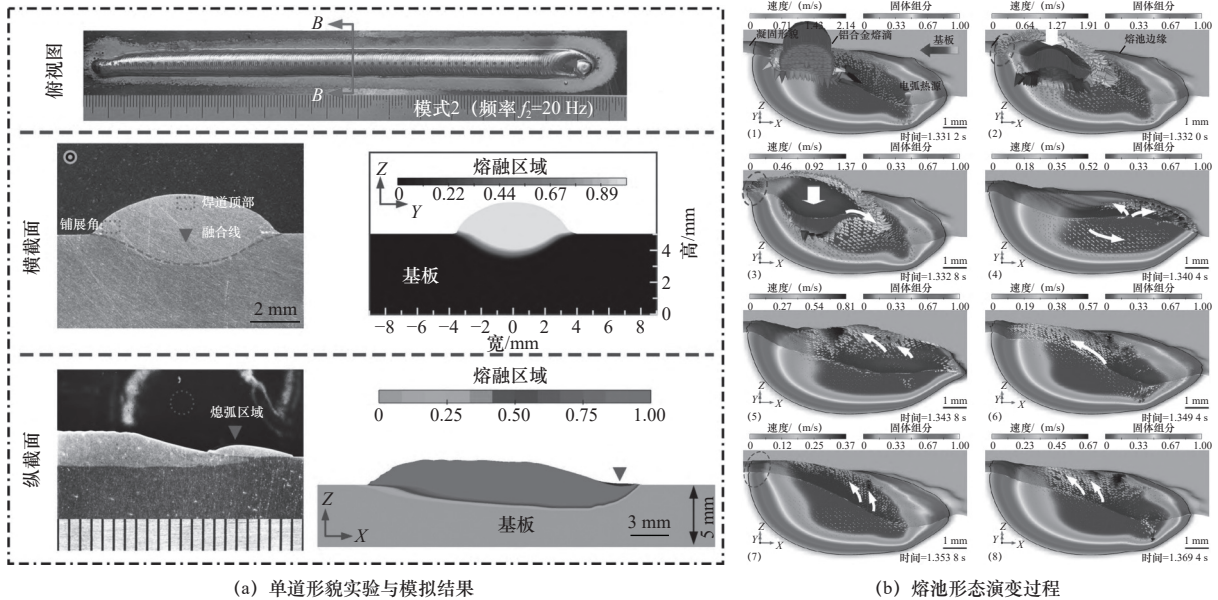


图 15 多种模拟仿真结果

Fig. 15 Multiple simulation results

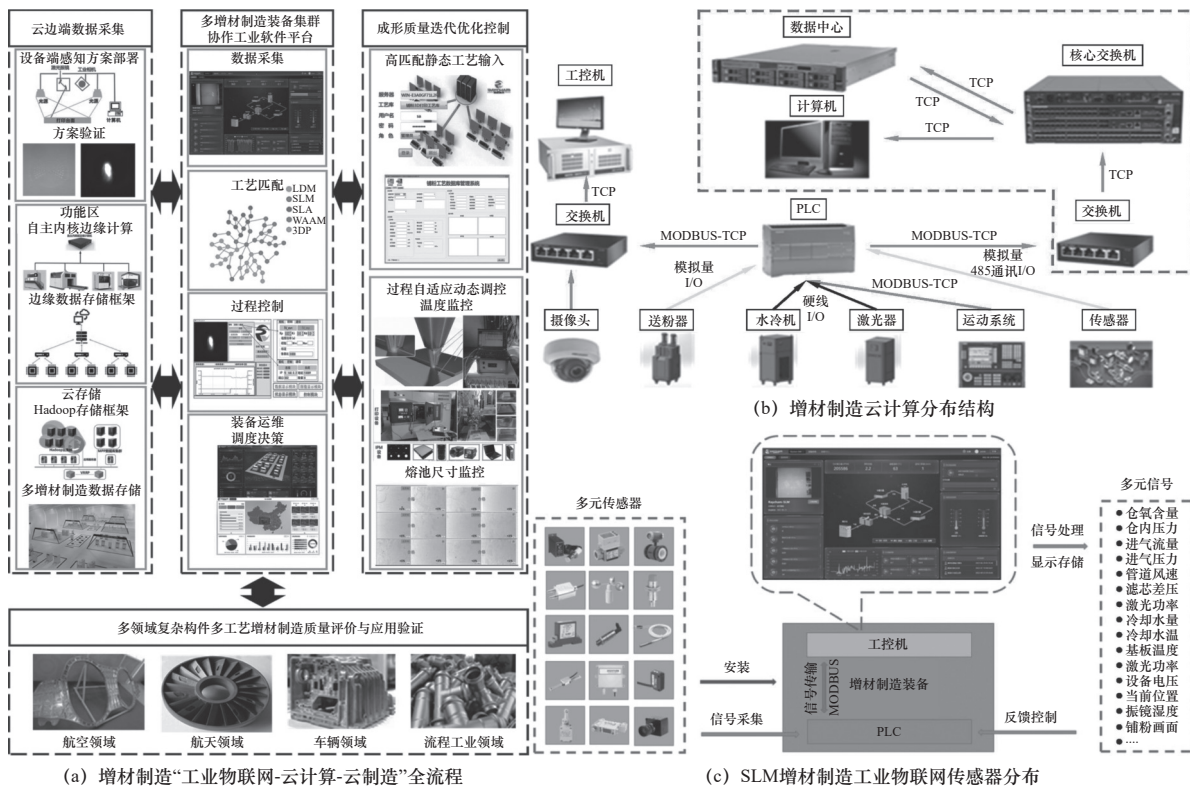


图 16 3种计算机系统控制增材制造工作流程

Fig. 16 Three computer systems control additive manufacturing workflow

此类系统为数字孪生驱动的全流程优化奠定了基础^[41]。

(4) 增材-减材-热处理一体化制造路径

为兼顾精度与性能，研究趋向于构建“增材成形-后处理-精密加工”协同的制造链。在成形阶段预留加工余量，通过热等静压（HIP）^[42]消除缺陷与残余应力，再结合数控加工或激光整形提升尺寸精度与表面质量^[43]。晶粒结构优化需要通过细化晶粒尺寸来控制晶粒形态，而选择合理的热处理手段可以有效改变晶粒结构，这可以改善增材制造部件的机械性能^[44]。这一“增材+减材+热处理”的融合模式，已成为大型复杂构件制造的主流路径之一。

2 大尺寸金属构件增材制造的关键技术

2.1 工艺优化与过程智能控制

2.1.1 工艺优化

(1) 工艺参数优化

工艺参数是影响增材制造质量的核心变量，涉及热源输入（激光功率、扫描速度、电弧电压）与材料输送（送粉率、送丝速度）等多因素耦合。研究表明，参数波动会显著改变熔池形态与稳定性，进而影响构件微观组织与力学性能。为优化工艺窗口，崔宝磊等^[45]采用响应面法建立激光增材 TiAl 合金裂纹预测模型，结合遗传算法确定最优参数范围，显著降低裂纹密度。在大尺寸构件制造中，因子实验与数值模拟被广泛用于建立“工艺-组织-性能”映射关系，例如通过机器学习预测高强钢沉积层的气孔率与残余应力分布，指导参数动态调整。CHANG T 等^[46]基于异种合金的 WA-DED 制造问题，对不同工艺参数下的样品沉积质量以及性能展开研究，对在不同热输入和基材条件下沉积所得组件的过渡区域以及上下部分形貌进行观察总结，并对区域内的沉淀物以及晶粒尺寸变化进行表征，并基于熔池中对流和快速冷却等行为的研究对结果进行分析，建立起工艺-组织-性能相关关系。

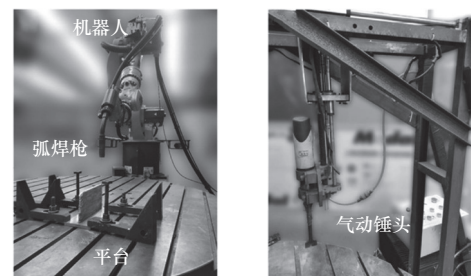
(2) 外场辅助优化

外场辅助技术通过引入磁场、声场或热场调控熔池行为，为大尺寸构件组织性能优化提供新路径。王轲^[47]设计的随动冷却装置可约束熔池热扩散，使铝合金直壁构件硬度提升 15%。ZHAO W 等^[48]研究表明，纵向交变磁场能细化电弧增材铝合金的晶粒尺寸，熔深增加 20%。热场辅助（如基板预热、层间冷却）通过温度场均匀化降低残余应力，但需解

决外场稳定性问题，例如基板预热不均可能引发局部变形。数值模拟与实验结合表明，合理的热场分布可使钛合金构件的残余应力降低 30% 以上。

外场辅助技术是一种结合不同能量场的固有优势来克服增材制造局限性的新手段，是近些年来增材制造中的研究重点，较为典型的辅助场包括磁场、声学、机械和热场，近年来也有耦合多场相关的研究。大尺寸构件制造中由于制造时间长、热输入大，有效的热管理对于控制变形和组织均匀性至关重要，引入外场辅助对于调整大尺寸构件沉积材料的微观结构和机械性能提供了更多的可能性。但是在沉积大型构件时，外场的稳定性与均匀性至关重要，在成形区域内如何保持均匀稳定的场分布是一大关键问题。

JIAO G 等^[49]基于 WA-DED 工艺通过超声波振动辅助探索了超声能量场在沉积过程中的整合，以系统地研究其对 Invar 合金的微观结构演变、机械性能和等轴晶转变的影响，通过超声波振动辅助 WA-DED 制造的部件表现出优异的性能并且晶粒结构得以显著细化。ZHANG M 等^[50]通过超声辅助线弧定向能量沉积制备了具有精细微观结构的 NiTi 合金，并通过在沉积过程中引入超声辅助场观察到超弹性可恢复性的提高。利用超声辅助过程中的超声空化和声流现象促进了凝固过程中的柱状到等轴过渡。从根本上说，超声辅助后增强可恢复应变的关键是等轴晶粒的形成并为晶界提供了更多的应变兼容性，从而减少了变形过程中位错的形成。FANG X 等^[24,51]对铝、镁合金的成形问题，采用层间锤击处理技术（图 17）结合 WA-DED 制备出了高性能 AZ31 镁合金。在增材制造的层间引入了气动锤击处理，并设置不同变形水平，通过调整电弧模式、送丝速度和锤击参数（如气体流量、锤击次数），控制沉积层厚度和塑性变形程度，以此来调



(a) 电弧定向能量沉积设备图

(b) 锤击强化设备图

图 17 电弧增材制造设备外加锤击强化模块

Fig. 17 WA-DED equipment with external hammering strengthening module

整所获得构件的性能；并且系统地分析了不同变形水平的增材制造和层间锤打样品的缺陷特征、晶粒结构、位错、晶体织构和电化学腐蚀性能。层间锤击技术本质上是通过外加能场引入塑性变形来诱导晶粒细化、位错增殖和孔隙闭合，以此来实现缺陷缓解、微观结构改进和性能提升，这为增材制造外场辅助提供了新的见解。

王轲^[47]基于热场辅助手段，设计了一种随动冷却装置，设备可以在增材制造过程中随行跟随，实现对熔池两侧进行冷却约束。运用该冷却技术设备，成形出了良好的铝合金直壁增材件，并且使得构件硬度显著提高。但采用该设备对于工装夹具精度需求较高，因此更加合理适配的冷却材料以及与成形构件的表面接触状态有待于进一步研究。ZHAO W等^[48]系统研究了外加纵向交变磁场对铝合金的电弧增材制造过程电弧行为、材料沉积、沉积形态以及组织性能的影响，研究表明外加磁场可有效增加熔深，磁场搅拌作用还细化微观组织。CHANG T等^[28]通过层间激光冲击（图 18）来增强通过线弧定向能量沉积制备的 2319/5B06 异种铝合金部件的界面性能，有效降低了粗沉淀物的聚集和孔隙率，显著提高了构件的力学性能，为通过直接能量沉积制备的不同合金部件的界面微观结构优化和性能增强提供了工艺参考。FANG X 等^[52]也基于激光冲击技术（LSP）对 WA-DED 薄壁零件制造成形进行了研究，对成形的 Al-6Mg-0.3Sc 组件进行了 LSP 处理。通过对处理前后组件内部缺陷数目的量化表征，发现 LSP 处理后组件内部孔隙度减少了 68% 以上，缺陷尺寸也有所减小，组件性能有一定提高，并通过更深入的表征研究对 LSP 的影响机理进行总结，为制造高性能的免热处理大型薄壁部件提供了一种新方法。

目前热场辅助是在大型构件成形领域内较为成熟的场辅助手段，主要包括基板预热、层间冷却、外加辅助热源等手段。为保证大型构件在成形过程中外场的稳定性、均匀性以及外场施加的合理性，部分研究人员还对增材制造过程中的温度场分布与热应力演化进行了模拟分析，并结合实际实验对模拟结果加以验证，从而为外场辅助技术的应用以及相关工艺参数的优化提供了理论依据。

（3）复合工艺优化

目前增材制造大都采用单一热源来实现零件的成形制造。成形构件受单一热源形式重复扫描加热，成形区域有限并且热历史较为复杂。同时由于基板或者已成形部分的约束，成形构件内部的应力作用较为复杂，在构件内部形成较高的残余应力水平，构件发生不同程度的变形，最终使得构件表面或者内部出现宏观、微观裂纹等缺陷，导致构件失效。

为突破单一热源的成形缺陷与限制，改善增材制造构件的残余应力及组织性能，多机协同式增材制造、多热源协同增材制造等复合工艺制造^[53]逐渐成为研究热点。复合工艺的本质在于将多个增材制造工艺进行复合协同，采用多个独立运动机构携带相同或不同种类的能量源，在特定的工艺参数和时空配合条件下同步沉积材料，最终实现构件的成形，基于多能场耦合条件下的传质、传热机制，通过预设增材过程中的热质输运和应力应变行为，使得构件能够较好地成形并且性能满足要求，突破成形区域的限制，改良工艺中存在的问题，极大程度地避免内部缺陷的形成。

石俊彪等^[54]根据复合工艺理论，针对成形效率问题，研究了基于熔化极气体保护焊的双电弧增材制造装备，该装备将福尼斯双丝弧焊电源与机器人集成，通过 6 轴机器人搭载双丝协同增材装置，实现两根金属丝材的同步熔化，双丝协同制备出不锈钢复合材料构件，一方面通过增加同步熔化的丝材提高成形效率，另一方面通过多台机器人分区域成形来提高构件成形效率，突破成形区域限制，整体成形效率有一定提高。何天英等^[55]为了进一步提高成形尺寸与沉积效率，研制了 3 台机器人协同工作，共同完成金属构件形性一体化制造的五电弧增材制造装备，如图 19 所示。设备整体是由增材制造单元、测量单元和减材加工单元等组成，设备内部 3 台机器人可以分别进行路径规划，相互协同进行工作，最终成形出优于同材料铸造件力学性能的艏轴架构件，整体尺寸偏差在±0.65 mm 范围内。

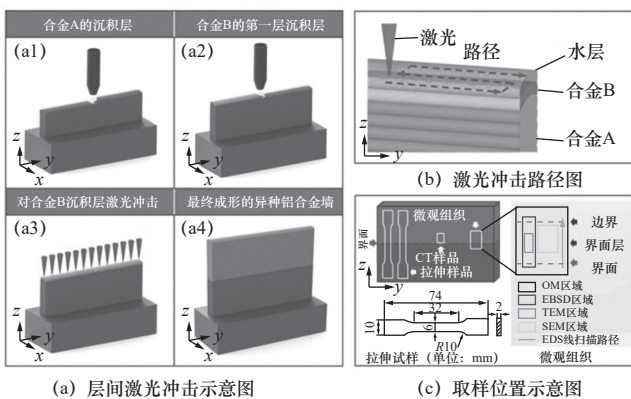


图 18 层间激光冲击示意图

Fig. 18 Schematic diagrams of interlayer laser shock peening



图 19 五电弧增材制造装备
Fig. 19 Five-additive manufacturing equipment

除此之外，GU J等^[56]也深入研究 Tandem 双丝增材制造方法（图 20），与单丝工艺相比，Tandem 双丝工艺具有更大的热输入，成形中熔池尺寸也更大，这不仅有利于改善堆积层道间熔合度，还可以减小内部缺陷率，提高材料沉积效率。研究人员通过对双丝电弧的工艺参数的分别控制，以此来改变材料沉积过程中的热流场，进而控制构件内部微观组织的转变，成形出有理想微观组织的样品，最终获出力学性能较高的铝合金构件。克兰菲尔德大学（Cranfield University）的研究团队^[57]则研究开发了一套双机器人协同增材制造装备，通过在变位机两侧分布的两台机器人来完成不同区域的构件成形，分区域成形，相互协同，提高了金属构件的成形效率。

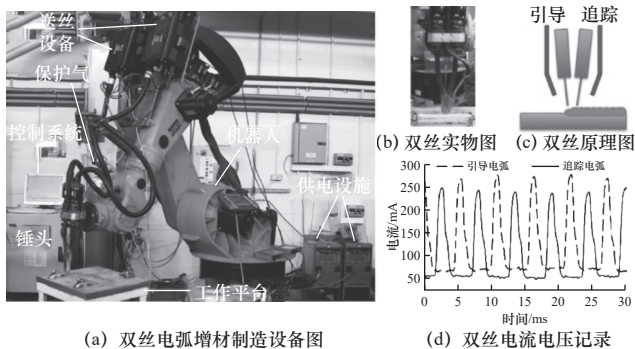


图 20 Tandem 双丝增材制造设备
Fig. 20 Tandem twin-wire additive manufacturing equipment

CHEN J等^[58]也提出了一种多能量场耦合的增材方法，将电弧、激光、磁场 3 种能量场同时引入，并通过调控电弧、激光、磁场输入能量的比例系数，来满足不同制造条件下不同材料的大型金属构件的制造需求。

2.1.2 过程智能控制技术

(1) 在线监测

与传统小尺寸零件相比，大尺寸构件的制造过程更容易因热积累、层间冷却不均等因素导致缺陷

累积，而成形后的检测与表征手段成本较高，且无法实现对增材制造过程实时干预与智能控制。因此，研究人员开始向增材制造的在线监测技术开始探索研究，使其逐步成为保障增材制造过程稳定以及成形质量优良的重要手段^[59]。

在线监测技术的核心是通过多传感器的相互协同来实现对于增材制造过程状态的动态感知与反馈控制，包括有熔池检测，缺陷检测，实时反馈控制等。目前的在线监测系统通常集成有多种传感器，包括红外热像仪、高速摄像机和光谱仪等，可以实现对熔池形态、温度场和等离子体发射等多物理量的实时监测，并通过信号处理算法，从监测数据中提取特征参数，如熔池尺寸、冷却速率等，作为过程控制的反馈信号。能够有效识别工艺中出现的如未熔合、孔洞等缺陷异常^[60]。

YANG J等^[61]基于 WA-DED 领域，通过对制造过程中的电信号统计分析并清洗消噪，建立起钨极尖端到工件距离（contact tip to work distance, CTWD）和电弧电压信号之间的定量关联，并结合理论分析与计算流体力学模型计算，建立起了一种通过在线监测弧电压信号来调整切片厚度的数据驱动自适应控制策略，以此来实现对于制造过程的在线监测以及实时调整，如图 21 所示。

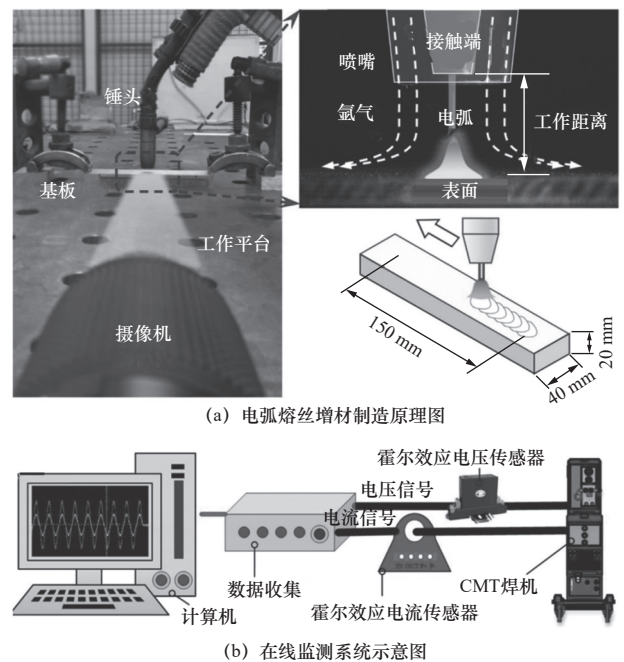


图 21 基于钨极尖端到工件距离（CTWD）和电弧电压信号关联的在线监测方法

Fig. 21 An online monitoring method based on the correlation between the CTWD and the arc voltage signal

上海交通大学的钟继勇^[62]基于氩弧焊接 (gas tungsten arc welding, GTAW) 工艺领域, 开发提出了一种基于图像退化处理、滤波去噪、Canny 算子的熔池检测、焊缝检测的图像处理算法, 有效提取了熔池的宽度, 并开发了基于遗传算法的模糊控制系统对熔池宽度进行控制, 在熔池宽度设定值 7 mm 时, 误差小于 0.4 mm, 满足成形质量的要求。李志勇等^[63]对 TIG、MIG 焊接过程中光谱辐射信息进行了研究, 通过试验证明了可根据焊接方式的光谱分布及变化特点, 选择特征谱段, 从而准确地对干扰因素和焊接质量进行判识, 并总结为“焊接质量检测辐射基础理论”。

(2) 机器学习

在近近年来, 机器学习技术被越来越多地运用在增材制造中。由于增材制造过程具有很强的随机性, 是一种具有非线性和时变性的过程, 因此传统的 PID 控制难以应对, 而模糊控制、神经网络控制和自适应控制等智能算法表现出更好的适应性。特别是将深度学习算法应用于过程控制, 能够从海量制造数据中学习复杂的工艺规律, 实现更高精度的控制。通过机器学习算法, 不仅可以对增材制造工艺参数进行优化, 减少试错成本, 还可以实现对过程中的缺陷检测以及质量控制, 构建起可以动态调整打印参数以及反馈传感器检测数据的机器学习模型, 完成对增材制造的过程智能控制^[64]。

FENG S 等^[65]创新性地将多层光学监测图像与机器学习技术结合, 通过机器学习模型与光学层层监测图像的协同, 如图 22 所示, 实现对 LPBF 过程中缺陷 (特别是孔隙) 的精准预测, 并且结合对于激光选区熔化过程中缺陷的形成与愈合机制的深入分析, 总结提出了一种新颖的缺陷预测方法, 为未来实现实时质量控制与在线闭环反馈系统打下了坚实基础。

2.2 在线/后处理形性同步调控技术

控形与控性是金属增材制造 (metal AM, MAM) 工艺的两个重要考察指标。但是, MAM 过程是涉及材料、结构、多种物理场、多层次和跨尺度耦合的极端复杂系统, 这也使得 MAM 过程的材料-工艺-组织-性能关系往往难以准确把握^[4, 66]。同时 MAM 构件的快速加热、冷却和凝固过程会产生复杂的微观结构和特征, 成形制件内易形成气孔、裂纹、分层等缺陷, 这些缺陷会降低部件的机械性能^[67-69]。与传统制造方法相比, MAM 构件的表面成形精度较差, 主要原因是逐层沉积引起的阶梯效应、部分熔融原料的团聚物、飞溅物、蒸发和成球效应引起的飞溅颗粒, 以及润湿引起的熔池运动和不稳定性^[70]。所以如何改善增材制造金属构件组织和性能、提高成形精度有重要的研究价值。目前改善 MAM 构件组织性能、提高表面成形精度的方法众多。主要分为在线调控和后处理调控。

2.2.1 在线调控

MAM 最终目的是实现完全按照设计要求实现

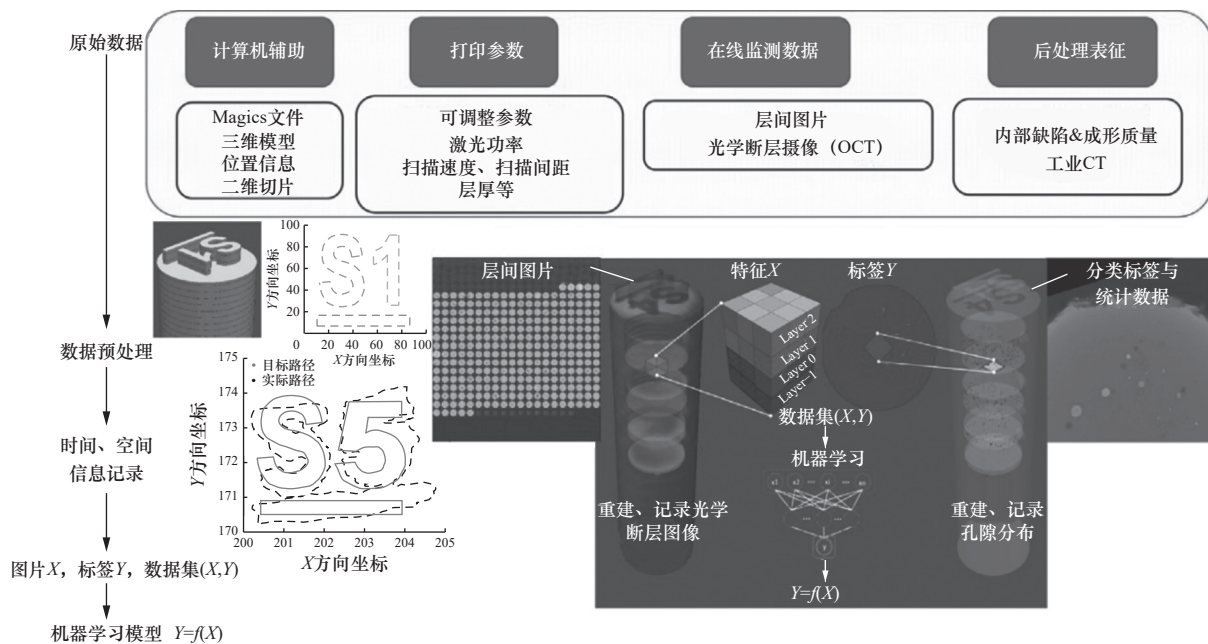


图 22 机器学习框架

Fig. 22 Machine learning framework

一致的、可重复的产品精度和性能。但是 MAM 制造构件的性能、形貌很容易受到不适当的过程因素的影响。因此，很有必要监测和建立过程特征与构建质量之间的相关性以优化和控制构建过程以确保构件质量。MAM 制造焊接监测系统可分为离线和在线监测系统^[71]。离线监测一般应用于研究初期阶段，在线监测是实时监测焊接过程的状态，并根据在线测量结果制定相应的调控策略。相较于离线监测，在线监测是一种反馈控制，使用原位传感设备和算法来更新过程参数，直到达到所需的质量^[72]。因此在线监测通常被认为更有效的策略来提升 MAM 构件的质量。MAM 制造过程会产生多种信号，目前，常见的信号主要有 5 种类型，即红外辐射 IR、可见光和紫外线 UV、超声波和电信号。

光信号中包括红外辐射、可见光和紫外线，其中最重要的是红外辐射。在 MAM 过程中，熔池的形成有助于决定凝固微观结构中晶粒的生长，是决定构件表面质量的主要因素之一，因此对熔池状态的监控至关重要^[73]。而红外光是由熔池中局部积累的辐射热产生的，所以对红外光信号的采集可以有效监测熔池的温度分布和几何形状。LI X 等^[74-75]提出了一种使用光场相机进行原位熔池温度场监测的多眼监测方法。建立了 LF 子孔径拜耳模型来提取红、绿和蓝（R、G 和 B）波长的熔池图像。通过使用黑体炉校准 LF 相机的相对光谱响应比，根据双波长理论从 R、G 和 B 通道的两个图像中得出熔池的温度场。与传统红外相机和新型双波长方法相比，所提方法具有温度范围宽、复杂度低的优越性。WANG R 等^[72]设计并实施定制的激光粉末床熔融（laser powder bed fusion, LPBF）测试台，根据熔池热发射来调节激光功率，以避免过度熔融、起球和高表面粗糙度。将尺寸精度与打印温度相关联，以确定控制设定点。提出了高速和实时的热传感器和控制系统。该系统通过将激光功率调节在 2 kHz 成功稳定了熔池尺寸，打印质量得到了显著提高。HERZOG T 等^[76]提出了一种基于多轴红外视觉的系统，使用 3 个红外摄像头对激光定向能量沉积进行原位监测。用于跟踪整个沉积过程中熔池的演变以提取位移和几何信息，结果表明，垂直位移监测的波动可以检测到包含各种角度相交壁的薄壁结构中结构特征的形成。

在一些早期研究中，脉冲回波法被描述为一种适合监测粉末冶金过程和确保零件质量的技术。在

近些年的研究发现超声监测也可用于 MAM，通过对回波信号的分析，可以对残余应力进行定性评价，也可以通过估计超声速度来预测孔隙率。RAFFESTIN M 等^[77]设计了一个原位超声监测系统，该技术用于测量零件的高度，并在 LPBF 过程中进行缺陷跟踪，证实了 LPBF 样品的各向同性。CHAKROBARTY A 等^[78]利用机器学习（machine learning, ML）驱动超声波监测使用 2D 声子试样在 AM 中实现质量保证，开发并使用了一种深度神经网络（deep neural network, DNN）模型，该模型通过分析打印过程中获得的实验性超声波弹性波来实时检测和定位缺陷。结果表明，从超声波波形预测的准确率超过 86%。

在 MAM 过程中，有电子信号和其他信号可用于监测，例如涡流、磁场和振动。已经发现，电子的变化可以用来判断穿透力的变化，并且利用这一优势可以识别和定位空腔的形成。

2.2.2 后处理调控

后处理作为 MAM 生产链的核心环节，对零件的表面质量、机械性能和功能实现至关重要。MAM 采用逐层堆积的成形机制，常导致部件表面呈现明显的阶梯效应和较高的粗糙度，从而需要额外的表面精加工处理。与此同时，因内部存在孔隙、残余应力及组织不均等微观结构缺陷，MAM 部件的力学性能需通过热处理、机械加工等手段加以提升。现有研究主要集中在以下几个方面：

热处理是 MAM 后处理技术中常用的方法。由于 MAM 经历了多次热循环，不仅金属的晶粒会有所长大，还有可能造成析出强化相重新溶解等问题，因此热处理对 MAM 过程中的缺陷消除和组织性能改善发挥着重要作用。同时热处理方法种类繁多，不同的方法在金属材料中会产生不同的结果。对于 Al-Cu 合金，ZHOU Y 等^[79]评价了不同热处理方案对 MA2219 铝合金晶粒结构、孔隙缺陷、析出物、力学性能和耐热性的影响，结果表明 T6 和 HT6 热处理后，合金中的主要析出物是 θ'' 和 θ' ，这种细小的等轴晶粒具有各向同性强度，除 T6-V 样品因为严重的局部孔聚集外，所有样品均表现出优异的延展性。GUO X 等^[80]系统地研究了 T6、T73 和 RRA 等不同热处理制度对电弧增材制造 Al-Zn-Mg 合金微观组织、力学性能的影响。沉积态试样晶粒边界 η 相呈连续粗大的分布，热处理后晶界粗大的 η 相变小，沿晶界稀疏分布，如图 23 所示，T73 热

处理样品存在更宽的无沉淀区 (precipitate-free zone, PFZ)。不同热处理制度下晶界和晶粒内部 η 相尺寸具有较大差异。T6 热处理试样的力学性能最好。对于钢, CHEN W 等^[81] 研究了电弧增材制造的还原活化铁素体/马氏体 RAFM 钢在铸态、正火和回火以及部分回火处理条件下的微观结构和机械性能。正火和回火处理可以改变铸态的非均质微观结构, 形成铁素体/马氏体微观结构。经过正火和回火后, 抗拉强度降低, 而伸长率显著提高。分区热处理产生了较高强度和中等延展性的混合物。对于 NiTi 合金, CHEN L 等^[82] 采用了热处理来解决 NiTi 基合金的不良性能问题, 在 450 °C 时效下, 合金表现出最窄的相变滞后 (11.7 °C) 和最佳的机械性能 (拉伸强度为 539 MPa, 断裂应变为 6.9%)。ZHOU Y 等^[83] 研究优化了一种新颖的定制热处理 (tailored heat treatment, THT) 方案, 包括短期低温均匀化和随后的双重时效处理, 来对于增材制造修复 Inconel 718 合金进行性能提升。并对经过直接双重时效 DA 和 THT 处理的修复合金的微结构演变和力学性能进行了比较研究。研究发现 THT 有效地溶解了沉积区的大部分硬脆的 Laves 析出物, 而基体中的晶粒仅略有粗化, 样品的延伸率显著提高了 88%, 屈服应力略有降低此外, 样品整体的应变分布也更加均匀。

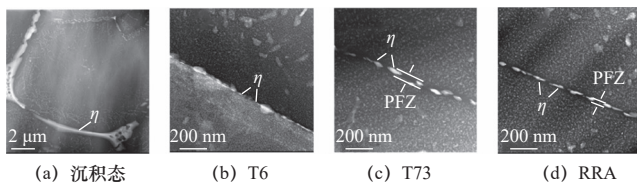


图 23 沉积态和不同热处理制度下 Al-Zn-Mg 合金晶界 η 相形貌

Fig. 23 Grain boundary η -phase morphology of Al-Zn-Mg alloys in the as-deposited state and different heat treatment regimes

切削、抛光等后处理通过去除一层薄薄的材料来消除具有几何缺陷特征的表面层^[84]。随着 AM 技术在金属材料领域的快速发展, 它被广泛应用于生产大型的、结构复杂的零件。然而, 现在 MAM 技术难以满足高精度零件的精度要求和表面质量。机械切削是工业生产中降低增材制造零件表面粗糙度的重要表面后处理方法。TAN R 等^[85] 对选择性激光熔化增材制造的 AISi10Mg 合金进行超声振动辅助切削, 得到的加工表面几乎完美无瑕, 表面粗糙度值小于 10 nm。机械抛光是一种将磨料、抛光剂和其他液体相结合以去除材料的表面处理技术。机

械抛光的主要优点是能够去除划痕等表面缺陷^[84]。ZHANG J 等^[86] 使用磁场驱动抛光加工激光粉末床熔化制造的 AISI316L 不锈钢管, 实验设施如图 24 所示。在抛光的几十分钟内, 抛光部件的表面粗糙度从 Ra11.599 μm 变为 Ra0.385 μm 。

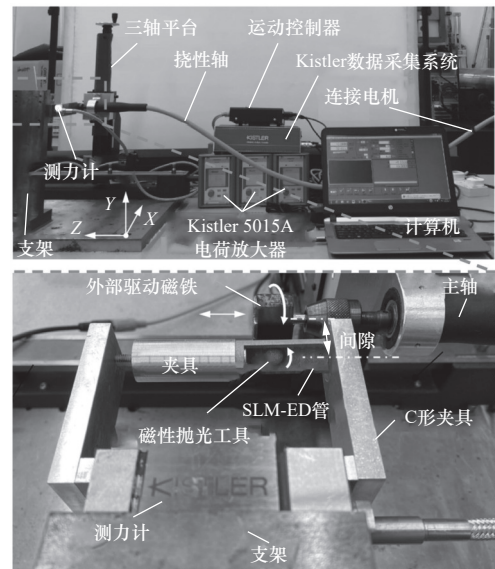


图 24 在 LPBF 管上进行磁驱动内部精加工的实验设置

Fig. 24 Experimental setup of magnetically driven internal finishing on the LPBF-ED tubes

激光冲击强化 (LSP) 与喷丸强化 (shot peening, SP) 是通过塑性变形改变零件表面特性的过程, 而无需去除或添加材料。载荷或冲击会导致塑性变形以及动能或热能在表面上的传递。喷丸在许多行业中已被用作一种重要的后处理方法, 用于处理风扇叶片、涡轮叶片、齿轮和其他金属部件。在喷丸强化中, 会与材料产生多次冲击。这些冲击会在材料表面产生压应力, 使材料产生塑性压缩, 进而防止裂纹扩展并提高材料的强度。同时不同的抛丸处理介质可能会产生不同的效果。CALIGNANO F 等^[87] 采用两种磨料及其组合对 LPBF 和电子束粉末床熔融 (electron beam powder bed fusion, EBPBF) 制备的构件进行喷丸处理, 结果显示氧化铝可显著降低 LPBF 和 EBPBF 构件的表面粗糙度。MALEKI E 等^[88] 研究了梯度强化喷丸强化作为 AISi10Mg 的新型表面处理, 发现与热处理相结合时, 表面层纳米结晶化、硬度增加以及压缩残余应力提高, 使疲劳性能显著改善。

LSP 是一种先进的表面处理技术, 被广泛用于在金属表面施加有益的压缩残余应力, 以提高其疲劳性能。这是 MAM 形成的大型部件使用寿命的关

键特性。其作用原理是利用高功率激光在金属表面产生压缩应力，在 LSP 产生的压应力作用下金属表面会发生塑性变形，从而提高试样的抗疲劳性、强度和耐腐蚀性。因此 LSP 很有希望应用于 MAM 大型构件的后处理。JING Y 等^[89]对典型的 WA-DED 制备的 2319 铝合金进行了 LSP 表面处理。在材料表面生成了厚度为 1.3 mm 的影响层，峰值硬度和屈服强度分别提高了 30.2% 和 151.2%。在孔隙缺陷周围集中残余压应力的作用下，孔隙的数量密度降低了 65.3%，如图 25 所示。残余压应力、表面硬化层和减少缺陷的综合作用使疲劳寿命延长了一倍。与传统的喷丸强化技术相比，激光冲击强化技术具有更高的精度和可控性，可以精确控制动作区域和深度。另外 LSP 的压缩残余应力深度（约 1 mm）大于 SP 的压缩残余应力深度（0.1~0.2 mm）。这使得 LSP 成为比 SP 更理想的 MAM 后处理工艺。ZHANG H 等^[90]通过实验分析和多尺度模拟相结合的方式，研究了 Al-Mn 合金在循环冲击载荷作用下的应变梯度特性和相应的微观组织演变，研究发现与单个 LSP 相比，重复的 LSP 处理产生了更明显的塑性波横向作用，多个 LSP 循环积累的高位错密度局部触发子结构向新晶粒的转变。YONG C K 等^[91]研究了 PBF 制备的 In 718 的残余应力，观察到残余应变延伸到 1.0 mm 深度。FANG X 等^[52]对电弧 DED Al-6Mg-0.3Sc 组件进行了 LSP 处理，LSP 在表面附近产生具有亚微晶粒的梯度微观结构，显著降低孔隙率的同时有效提高了拉升强度，为制造高性能、无需热处理的大型薄壁部件提供了一种新颖的解决方案。

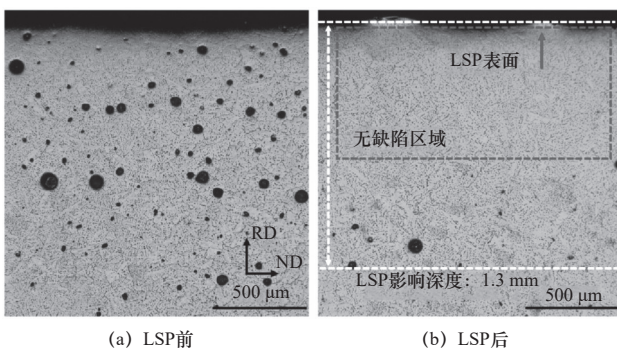


图 25 LSP 前后 2319 的孔隙分布

Fig. 25 Pore distribution of LSP 2319 before and after

3 大尺寸金属构件增材制造典型应用案例

近年来，金属增材制造技术在大尺寸金属构件

制造领域取得了显著进展，其设计自由度高、材料利用率高、可快速成形复杂结构的优势，使其在航空航天、建筑等工业领域展现出广阔的应用前景。

3.1 大尺寸金属构件增材制造在航空航天中的应用

随着金属增材制造技术的持续发展，其成形构件的性能和尺寸精度已逐渐达到航空航天领域的应用要求。近年来，采用金属增材制造技术制备的大尺寸航空航天关键部件不断涌现，标志着该技术在高端装备制造领域已进入工程化应用阶段^[92]。在粉末床融化（powder bed fusion, PBF）技术，定向能量沉积（direct energy deposition, DED）两大增材制造工艺方法中，已经出现了应用于航空航天大型构件的典型应用案例。

3.1.1 PBF 典型应用案例

图 26 所示为由 SLM Solutions 公司和 Cellcore 公司联合开发的大尺寸增材制造推力室典型样件^[93]。该关键航天部件使用 LPBF 技术，采用 In 718 高温镍基合金作为原材料，这种材料具有优异的高温强度和抗氧化性能，特别适用于极端工作环境下的推进系统^[94]。制造过程采用了激光选区熔化技术，该技术通过 200~400 W 的高功率激光束在保护气氛（通常为高纯氩气）中逐层熔化金属粉末（层厚通常为 20~50 μm），实现了高达 99.9% 的致密度^[95]。该推力室设计体现了大尺寸增材制造在复杂结构一体化成形方面的独特优势。传统火箭发动机通常由数百个零件组装而成，而该推力室通过 LPBF 技术实现了燃料通道、冷却结构和燃烧室的一体化成形，显著减少了连接件数量，提高了密封性与可靠性。燃烧室壁集成了仿生点阵结构，这种设计通过增材制造特有的几何自由度实现，既能降低重量，又可通过内部流道增强冷却效率。该案例充分证明了大尺寸金属增材制造在航天推进领域的重要应用价值。相比传统制造方式，采用大尺寸增材制造技术可实现大尺寸、复杂内腔结构的整体制造，在提高结构

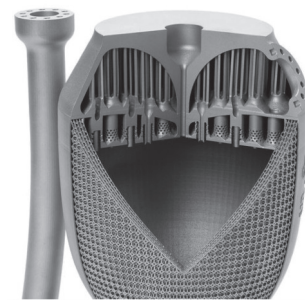


图 26 3D 打印的火箭推进发动机

Fig. 26 A 3D printed rocket propulsion engine

效能、保障产品质量和降低制造成本方面有着巨大技术优势^[96]。

尽管 PBF 技术发展已经相对成熟，具有非常好的成形能力，但在大尺寸金属构件领域受制于其较慢的制造速度和增材设备尺寸限制，因此在航空航天应用当中以中小尺寸复杂构件为主。如图 27 所示，使用 PBF 技术制造的航空航天业中复杂形状的金属零件^[97-99]。当前 PBF 技术在航空航天领域的典型应用主要如下。



图 27 增材制造在航空航天中的应用

Fig. 27 Additive manufacturing in aerospace

(1) 发动机核心部件。如图 27b 所示，通用公司制造的燃油喷嘴、涡轮叶片等具有复杂内流道结构的零件，通过 PBF 技术实现一体化成形，显著减少零件数量和装配接口。

(2) 轻量化结构件。包括卫星支架、航天器连接件等拓扑优化设计的中小型构件，在保证力学性能的同时实现 30%~50% 的减重效果。

(3) 功能集成部件。如内置传感器的航空电子设备外壳，利用 PBF 工艺直接成形异型冷却流道和多孔结构。

3.1.2 DED 典型应用案例

相比于 PBF 技术的制造技术和空间局限性，定向能量沉积 (DED) 技术在制造大型复杂构件方面展现出显著优势：其不受粉床尺寸限制，可直接在基材上逐层堆积金属材料（丝材或粉末），成形尺寸理论上仅受机械运动范围约束，目前已可实现米级甚至十米级构件的整体制造（如火箭贮箱环件）；同时，DED 的高沉积速率（可达 1~3 kg/h）大幅提升制造效率，特别适合航空航天领域大型承力结构件的快速成形。此外，DED 支持多材料梯度制造和原位修复功能，为复杂工况下的构件性能定制

提供了新途径（如发动机叶片耐磨涂层的梯度修复）。这些特性使 DED 成为大尺寸金属构件增材制造的首选技术之一。

2023 年 3 月 22 日，美国航天初创公司 Relativity Space 成功发射了世界上第一枚主要采用 3D 打印技术制造的火箭 Terran 1（代号“GLHF”）。尽管火箭最终因第二级点火异常未能进入预定轨道，但此次任务仍标志着 3D 打印火箭技术的重大突破，验证了增材制造在航天领域的可行性。Terran 1 成功飞越卡门线（100 km），成为全球首枚进入太空的 3D 打印火箭，火箭 85% 的质量由 3D 打印制造，如图 28 所示，整个机身和发动机的几乎所有部件都是通过自研的 DED 金属 3D 打印机（部分零件由金属 PBF 3D 打印机制造）制造完成，包括 9 台 Aeon 1 一级发动机和 1 台 Aeon Vac 二级发动机。Relativity Space 的 Stargate 3D 打印系统可在 60 天内完成火箭制造，大幅缩短传统航天制造周期，与传统火箭的数十万个零件相比，Terran 1 仅由 730 个部件组成，减少了潜在故障点。



图 28 Terran 1 机身增材制造过程

Fig. 28 Terran 1 airframe additive manufacturing process

大型金属构件电子束自由成形 (electron beam freeform fabrication, EBFF) 技术是 DED 技术的一种，该技术以电子束为热源，能够制造高精度的大型复杂构件。在该研究领域，美国航空航天局兰利研究中心 (NASA Langley Research Center) 是重要的先驱机构之一。该中心开发的六自由度 EBFF 系统配置了长×宽×高为 2.7 m×2.5 m×2.0 m 的大型真空工作舱，为航空级大型结构件的增材制造与修复提供了关键技术支撑^[100]。工业界方面，Sciaky 公司开发的商业化 EBFF 系统展现出更突出的成形能力，其最大加工尺寸可达 5.79 m×1.22 m×1.22 m，针对回转类零件的最大成形直径达 2.44 m。该系统表现出优异的材料适应性，可稳定加工包括钛合金、钽及镍基高温合金在内的多种航空级金属材料^[101]。图 29 所示为该公司打印的航空推进剂钛合金存储罐。如

图 30 所示, NASA 报道的激光粉末定向能量沉积制造了高为 1.78 m、直径为 1.52 m 的大型喷嘴。



图 29 存储罐
Fig. 29 Storage tank

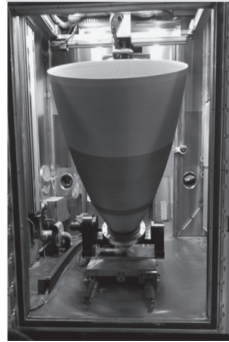


图 30 大型喷嘴
Fig. 30 Large nozzle pipe

进入 21 世纪以来, 我国科研机构在大型构件激光增材制造技术领域取得了显著研究进展。西北工业大学凝固技术国家重点实验室在该领域开展了开创性工作, 黄卫东和林鑫团队^[102]创新性地采用激光熔覆沉积技术成功制备了 C919 大型客机钛合金中央翼缘条结构件, 该构件长度达到 5 m 量级, 其综合力学性能指标甚至超越传统锻造工艺制备的同类产品。同期, 北京航空航天大学王华明院士课题组在装备研发方面取得突破^[103], 如图 31 所示, 自主设计并建造了具有多路协同沉积功能的“桥式”结构大型激光增材制造系统, 为航空航天领域大尺寸复杂金属构件的直接制造提供了创新解决方案。

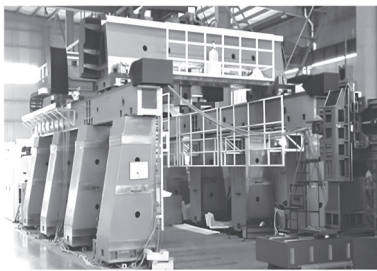


图 31 多路沉积“桥式”增材制造装备
Fig. 31 “Bridge type” additive manufacturing equipment with multi-deposition paths

图 32 中是西安交通大学与国家增材制造创新中心卢秉恒院士团队采用电弧熔丝增材减材制造一体化技术成功制造并报道了一个直径近 10 m 的重型火箭连接环^[104]。超大型火箭连接环是连接贮箱筒段、前后底与箱间段的关键承力部件, 传统制造工艺依赖多段锻造与焊接, 存在工序复杂、周期长、成本高等问题, 卢秉恒院士团队通过多丝协同工艺装备与在线监测技术, 解决了超大型构件成形过程中的稳定性与精度控制难题, 制造周期缩短至一个

月, 较传统工艺显著提高效率。该样件是目前国际上采用增减材一体化技术成形的最大尺寸铝合金环件, 为重型运载火箭超大型结构件的整体制造提供了新的技术路线, 具有重要的工程应用前景。

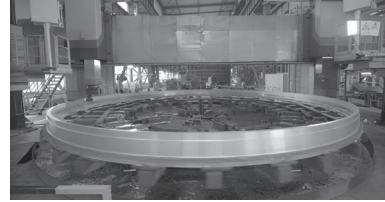


图 32 重型火箭连接环
Fig. 32 Heavy-duty rocket connection ring

3.2 大尺寸金属构件增材制造在航海中的应用

大尺寸增材制造技术在船舶领域中的应用场景同样呈现多样化特点, 且已在实船工程中展现出良好的适应性。目前该技术在船舶制造中的应用以 DED 技术, 尤其是电弧熔丝增材制造 (wire arc directed energy deposition, WA-DED) 技术为主导, 根据具体应用需求可分为以下类别: 独立船体构件制造、船体结构加固与损伤修复、大型部件连接^[105]。相较于航空航天领域对材料性能、结构精度和可靠性的严苛要求, 船舶领域更注重制造效率、成本控制及复杂曲面成形能力, 这使得大尺寸增材制造技术在该领域具有独特优势。近年来, 增材制造技术在船舶工业中的应用潜力正受到国内外学者的广泛关注与积极探索。

中国船舶重工集团公司第七二五研究所张帅锋等^[106]采用冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 技术的电弧增材制造过程, 通过实时监测电弧形态、电信号变化及熔池动态行为, 深入分析了熔滴过渡模式和熔池受力特性, 针对悬垂结构成形问题, 揭示了熔池金属的力学平衡机制。通过对 CMT 工艺的热输入与电弧力精确调控, 实现了钛合金螺旋桨叶片的无支撑高效成形 (图 33)。中国船舶重工集团公司第七二五研究所在金属材料组织性能方面也进行了相关研究, 郭纯等^[107]利用电弧增材工艺成功制备了舰船专用 10CrNi3MoV 高强钢构件 (图 34), 重点探究了该材料的物相特征、微观组织演变、晶体学特性及综合力学性能表现。实验结果表明, 增材成形的 10CrNi3MoV 钢样件具有优良的组织均匀性和力学性能指标。

江苏科技大学陈超研究团队创新性地采用选区激光熔化 (LPBF) 金属增材制造技术, 成功制备了具有复杂内部流道结构的印刷版式液化天然气

(liquefied natural gas, LNG) 汽化器^[108]。该汽化器作为 LNG 存储的关键部件，其内部包含精密设计的流体换热通道网络，能够满足近海浮动平台在超高压和超低温（最低工作温度达-196℃）极端工况下的稳定运行要求（图 35）。这一成果为海洋工程装备中复杂换热器件的设计与制造提供了新的技术路径，对推动我国 LNG 产业链关键设备的国产化进程具有重要意义。

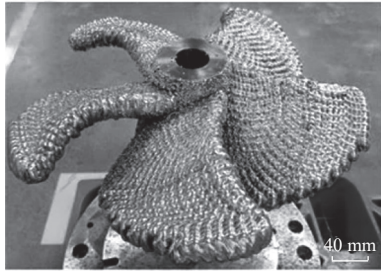


图 33 CMT 增材制造钛合金螺旋桨

Fig. 33 CMT additively manufactured titanium alloy propeller



图 34 电弧增材制造 10CrNi3MoV 钢成形试样

Fig. 34 Arc additive fabrication 10CrNi3MoV steel forming specimen

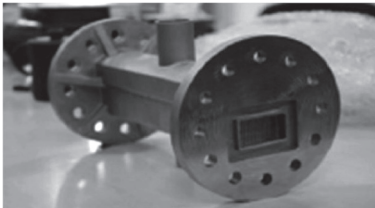


图 35 3D 打印的印刷版式 LNG 汽化器

Fig. 35 3D printed LNG vaporizer

国外目前已经有了将大尺寸增材应用到造船业中的先例^[109]，图 36a 所示为荷兰达门造船厂完全由电弧熔丝增材制造（WA-DED）技术打印的船用螺旋桨，使用的材料是铝、镍和青铜合金。整个制造过程由必维国际检验集团监督，并为螺旋桨颁发了认证。荷兰豪氏威马设备制造公司 3D 打印的起重机吊钩，制造的钩子有 4 个臂，跨度为 1 m，质量为 1 t。与传统制造的钩子相比，这种设计的改进在于对其内部空白空间进行了优化建模，而这是传统技术难以实现的（图 36b）。美国卡德洛克海军水面作战中心（Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, NSWCCD）通过增材制造技术，按比例

3D 打印出结构复杂的 T-AH20 医院船大型模型（图 36c），用于模拟气流环境以提高直升机作业安全^[105]。

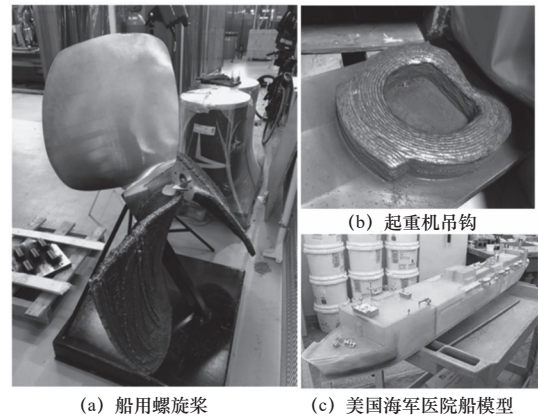


图 36 船舶领域 WA-DED 制造的典型件

Fig. 36 Typical components manufactured by WA-DED in the shipbuilding field

在学术研究方面，克兰菲尔德大学（Cranfield University）的研究团队在 WA-DED 的大型结构件应用方面取得了重要突破。如图 37 所示，该团队成功采用 WA-DED 工艺制备了重达 300 kg 的双面铝合金翼梁结构^[110]，这一成果充分展示了 WA-DED 技术在船舶大型构件制造中的应用潜力。研究数据显示，该翼梁结构的平均沉积速率达到 0.75 kg/h，在保证结构完整性和力学性能的前提下，相较于传统机械加工与焊接组合工艺，总制造成本降低约 29%。这一案例不仅验证了 WA-DED 技术在大尺寸金属构件制造中的可行性，更重要的是，其展现的成本优势为造船业领域轻量化大型结构件的经济化生产提供了新的技术路径。该研究成果对推动增材制造技术在船舶结构件批量化生产中的应用具有重要的示范意义。CUNNINGHAM C R 等^[111]对整个工艺链进行建模，并采用基于工具路径的沉积策略，使用 WA-DED 技术制造了船舶螺旋桨和 X 型结构（图 38）。

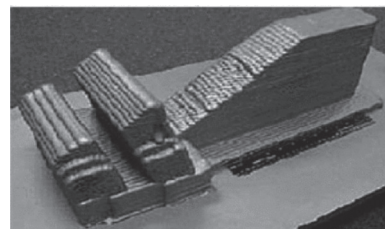
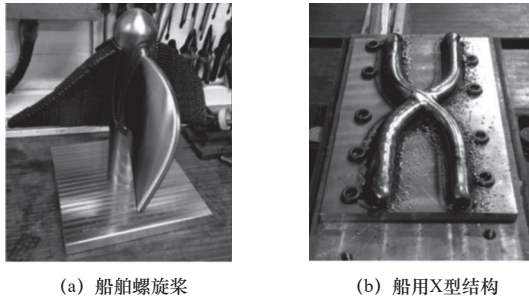


图 37 电弧增材制造双面铝合金翼梁结构

Fig. 37 WAAM manufactures double-sided aluminium spar structures



(a) 船舶螺旋桨

(b) 船用X型结构

图 38 电弧增材制造的船舶螺旋桨和 X 型结构

Fig. 38 Ship propellers and X-shaped structures manufactured by WAAM technology

4 结语

本研究综述了大尺寸金属构件增材制造技术的现状与发展。通过对增材制造工艺的分析与优化,结合智能控制技术与后处理技术,本文总结了目前技术应用中的优势与不足。研究表明,增材制造技术在提高大尺寸金属构件生产效率、降低材料浪费及缩短制造周期方面具有显著优势。然而,现有技术仍面临着精度控制、力学性能与表面质量提升等方面的挑战。

在未来的研究中,增材制造技术有望在大尺寸金属构件生产中得到更广泛的应用。随着工艺优化与智能化控制技术的不断发展,增材制造的稳定性与精度将进一步提升。尤其是在多材料增材制造、实时监控与自适应调节技术的应用方面,将推动技术的进一步成熟。此外,后处理技术与可持续发展理念的融合也将是未来研究的重点,尤其是在提高金属构件的力学性能与降低环境影响方面,将发挥重要作用。

总体来看,随着相关技术的不断突破,增材制造将在高端装备制造、航空航天、能源等领域的应用潜力巨大,将成为未来制造业变革的重要推动力。

参 考 文 献

- [1] THOMAS D. Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2016, 85(5): 1857-1876.
- [2] 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.
- [3] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 1-4.
- [4] 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.
- [5] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [6] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2014, 70(1): 227-236.
- [7] WEN W, QI H, LIAO Z, et al. In-situ study of crack propagation mechanisms in wire arc additive manufactured Al-Mg alloys: multiple strategies involving microdefects and microstructures[J]. *Materials science and engineering: A*, 2025, 924: 147802.
- [8] BRACKETT J, YAN Y, CAUTHEN D, et al. Characterizing material transitions in large-scale additive manufacturing[J]. *Additive manufacturing*, 2021, 38: 101750.
- [9] 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.
- [10] ABATTOUY M, OUARDOUZ M, AZZOUZI H. Smart manufacturing modeling: Thermal and residual stress in metal additive manufacturing [C]// *Advanced intelligent systems for sustainable development*, 2020: 607-617.
- [11] MUKHERJEE T, ZHANG W, DEBROY T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing[J]. *Computational materials science*, 2017, 126: 360-372.
- [12] PARRY L, ASHCROFT I A, WILDMAN R D. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation[J]. *Additive manufacturing*, 2016, 12: 1-15.
- [13] FREEMAN F S H B, CHECHIK L, TODD I. Beat the machine (learning): metal additive manufacturing and closed loop control[J]. *Physics education*, 2020, 55(5): 055012.
- [14] HAW J, SING S L, LIU Z H. Digital twins in design for additive manufacturing[J]. *Materials today: proceedings*, 2022, 70: 352-357.
- [15] PLOTKOWSKI A, SALEEBY K, FANCHER C M, et al. Operando neutron diffraction reveals mechanisms for controlled strain evolution in 3D printing[J]. *Nature communications*, 2023, 14(1): 4950.
- [16] 牛玉玲, 李晓峰, 赵宇霞, 等. 激光粉末床熔融 WC-12Co 硬质合金温度场模拟[J]. *材料工程*, 2024, 52(2): 50-59.
- [17] XIE D, LV F, YANG Y, et al. A review on distortion and residual stress in additive manufacturing[J]. *Chinese journal of mechanical engineering: additive manufacturing frontiers*, 2022, 1(3): 100039.
- [18] ZHANG X, HE Y, ZHAO S, et al. Innovative liquid metal strategy for real-time thermal control in additive manufacturing[J]. *Journal of materials processing technology*, 2023, 322: 118166.
- [19] 罗军, 李楠, 王曦, 等. 同步辐射 X 射线衍射技术在残余应力分析中的应用[J]. *材料工程*, 2024, 52(7): 120-129.
- [20] BIN X I E, JUNHONG Z, JIAXIANG X U E. Research on additive manufacturing technology of MIG welding arc controlled by PID optimization of ant colony algorithm [C]//2020 12th international conference on intelligent human-machine systems and cybernetics (IHMSC), 2020: 146-149.
- [21] 杨益, 党明珠, 李伟, 等. 激光选区熔化钛铝合金裂纹形成机理及抑制研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3): 181-188.
- [22] MARTINA F, MEHNEN J, WILLIAMS S W, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V[J]. *Journal of materials processing technology*, 2012, 212(6): 1377-1386.
- [23] ZHOU S, WANG J, YANG G, et al. Periodic microstructure of Al-Mg

- alloy fabricated by inter-layer hammering hybrid wire arc additive manufacturing: formation mechanism, microstructural and mechanical characterization[J]. *Materials science and engineering: A*, 2022, 860: 144314.
- [24] FANG X, YANG J, JIANG X, et al. Wire-arc directed energy deposited high-performance AZ31 magnesium alloy via a novel interlayer hammering treatment[J]. *Materials science and engineering: A*, 2024, 889: 145864.
- [25] QIU Y, LI Y J, FENG X H, et al. Numerical simulation of microstructure evolution in molten pool of nickel-based superalloy during selective laser melting[J]. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2024, 34(2): 560-575.
- [26] TAKEZAWA A, GUO H, KOBAYASHI R, et al. Simultaneous optimization of hatching orientations and lattice density distribution for residual warpage reduction in laser powder bed fusion considering layerwise residual stress stacking [J]. *Additive manufacturing*, 2022, 60: 10319418.
- [27] LI X, FANG X, ZHANG M, et al. Gradient microstructure and prominent performance of wire-arc directed energy deposited magnesium alloy via laser shock peening[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2023, 188: 104029.
- [28] CHANG T, ZHANG H, FANG X, et al. Tailoring interface properties in wire-arc directed energy deposited dissimilar aluminum alloys through interlayer laser shock peening[J]. *Virtual and physical prototyping*, 2025, 20(1): 2469155.
- [29] 朱胜, 杜文博. 电弧增材再制造技术研究进展 [J]. *电焊机*, 2022, 50(9): 251-255.
- [30] DILBEROGLU U M, GHAREHPAPAGH B, YAMAN U, et al. Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing[J]. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2021, 113(3/4): 623-648.
- [31] JIA Y Z, SUN S Q, LI B K, et al. Current research status and prospect of laser wire additive manufacturing technology[J]. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2025, 137(7/8): 3229-3255.
- [32] RADHIKA C, SHANMUGAM R, RAMONI M, et al. A review on additive manufacturing for aerospace application[J]. *Materials research express*, 2024, 11(2): 022011.
- [33] 赵旭山, 王元勋, 李润声, 等. 磁场辅助电弧增材制造边缘焊道流淌抑制研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(12): 27-36.
- [34] 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.
- [35] 陈勇, 陈辉, 姜亦帅, 等. 高性能金属材料激光增材制造应力变形调控研究现状 [J]. *材料工程*, 2019, 47(11): 1-10.
- [36] SHEN Z, DONG X Y, FANG Q H, et al. Parallel additive manufacturing systems[J]. *IEEE Journal of radio frequency identification*, 2022, 6: 758-763.
- [37] 赵欣, 黄金杰. 基于RSM-RVEA的FDM增材制造工艺参数优化方法 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(19): 277-297.
- [38] 郭志永, 李猛, 张志强, 等. 基于响应面法的镍基高温合金GH4169电弧增材工艺优化 [J]. *材料导报*, 2024, 38(19): 209-215.
- [39] 杜军, 张洁, 崔骛, 等. 熔滴复合电弧增材制造中熔滴过渡模式对堆积层形貌的影响 [J/OL]. *航空学报*, 1-13[2025-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250410.1457.010.html>.
- [40] 蔡玉华, 熊俊, 陈辉. 激光增材制造过程监测与控制研究进展及展望 [J]. *电焊机*, 2023, 53(9): 1-13.
- [41] 邢飞, 刘琦. 数字化增材制造的研究进展与发展趋势 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2024, 46(5): 654-664.
- [42] 朱瑞园, 程焜, 田春茂, 等. 热等静压增材制造Ti-6Al-4V/316L叠层双金属 [J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35(2): 515-528.
- [43] YUE W W, ZHANG Y C, ZHENG Z X, et al. Hybrid laser additive manufacturing of metals: a review[J]. *Coatings*, 2024, 14(3): 315.
- [44] YAN F Y, XIONG W, FAIERSON E J. Grain structure control of additively manufactured metallic materials[J]. *Materials*, 2017, 10(11): 1260.
- [45] 崔宝磊, 刘伟军, 卞宏友. 基于响应面法的TiAl合金激光增材制造工艺参数优化 [J]. *应用激光*, 2024, 44(3): 13-21.
- [46] CHANG T, FANG X, ZHOU Y, et al. Heterogeneous interfaces of aluminum bronze/Inconel 718 dissimilar alloys under different wire arc directed energy deposition sequences [J]. *International journal of extreme manufacturing*, 2024, 7(1): 367-381.
- [47] 王轲. 冷却约束条件下铝合金电弧增材制造工艺研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [48] ZHAO W, WEI Y, ZHANG X, et al. Comparative investigation of wire arc additive manufacturing of Al-5%Mg alloy with and without external alternating magnetic field[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2022, 119(3/4): 2571-2587.
- [49] JIAO G, FANG X, LI X, et al. High performance ultrasonic vibration assisted wire-arc directed energy deposition of invar alloy[J]. *Journal of materials processing technology*, 2024, 332: 118534.
- [50] ZHANG M, WANG B, LI X, et al. Grain refinement of NiTi alloys during ultrasound-assisted wire-arc directed energy deposition[J]. *Virtual and physical prototyping*, 2023, 19(1): 2289465.
- [51] FANG X, ZHANG L, CHEN G, et al. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering[J]. *Materials science and engineering: A*, 2021, 800: 140168.
- [52] FANG X, LI K, MA M, et al. Improved properties of wire arc directed energy deposited thin-walled Al-6Mg-0.3Sc component via laser shock peening[J]. *Virtual and physical prototyping*, 2024, 19(1): 2370956.
- [53] 李永哲, 李晨鹏, 周怡君, 等. 大型金属构件多机协同增材制造前沿进展 [J]. *稀有金属*, 2023, 47(5): 664-678.
- [54] 石俊彪, 赵昶, 陈树君, 等. Tandem-GMAW电弧增材制造基层成型宽度研究及热过程分析 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(9): 910-916.
- [55] 何天英, 余圣甫, 雷毅, 等. 多机器人协同的五电弧增材制造装备及其应用 [J]. *现代制造工程*, 2022(1): 26-35.
- [56] GU J, BAI J, DING J, et al. Design and cracking susceptibility of additively manufactured Al-Cu-Mg alloys with tandem wires and pulsed arc[J]. *Journal of materials processing technology*, 2018, 262: 210-220.
- [57] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON A C, et al. Wire + arc additive manufacturing[J]. *Materials science and technology*, 2016, 32(7): 641-647.
- [58] CHEN J, WEI Y, ZHAN X, et al. Influence of magnetic field orientation on molten pool dynamics during magnet-assisted laser butt welding of thick aluminum alloy plates[J]. *Optics & laser technology*, 2018, 104: 148-158.

- [59] 余其芳, 成雨萱, 韦有翔, 等. 电弧增材制造过程形性调控方法及在线质量监测技术研究进展 [J]. 焊接技术, 2023, 52(3): 1-13, 113.
- [60] 朱腾飞. 面向电弧增材制造的熔池视觉检测及控制方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [61] YANG J, FANG X, CHEN R, et al. Data-driven control of slicing thickness in wire directed energy deposition via on-line monitoring the shifting behavior of arc voltage drop[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2025, 137(11/12): 5821-5835.
- [62] 钟继勇. 机器人铝合金脉冲GTAW焊缝跟踪和成形质量控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [63] 李志勇, 顾小燕, 李桓, 等. 电弧光谱信息在焊接质量检测上的应用研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 711-715.
- [64] NG W L, GOH G L, GOH G D, et al. Progress and opportunities for machine learning in materials and processes of additive manufacturing[J]. *Advanced materials*, 2024, 36(34): e2310006.
- [65] FENG S, CHEN Z, BIRCHER B, et al. Predicting laser powder bed fusion defects through in-process monitoring data and machine learning[J]. *Materials & design*, 2022, 222: 111115.
- [66] 熊晓晨, 秦训鹏, 华林, 等. 复合式增材制造技术研究现状及发展 [J]. *中国机械工程*, 2022, 33(17): 2087-2097.
- [67] ZAHIDIN M R, YUSOF F, RASHID S H A, et al. Research challenges, quality control and monitoring strategy for wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of materials research and technology*, 2023, 24: 2769-2794.
- [68] ZHANG Y, WU L M, GUO X Y, et al. Additive manufacturing of metallic materials: a review[J]. *Journal of materials engineering and performance*, 2018, 27(1): 1-13.
- [69] BRENNAN M C, KEIST J S, PALMER T A. Defects in metal additive manufacturing processes[J]. *Journal of materials engineering and performance*, 2021, 30(7): 4808-4818.
- [70] MALEKI E, BAGHERIFARD S, BANDINI M, et al. Surface post-treatments for metal additive manufacturing: progress, challenges, and opportunities[J]. *Additive manufacturing*, 2021, 37: 101619.
- [71] LIN X, ZHU K, FUH J Y H, et al. Metal-based additive manufacturing condition monitoring methods: from measurement to control[J]. *ISA transactions*, 2022, 120: 147-166.
- [72] WANG R, STANDFIELD B, DOU C, et al. Real-time process monitoring and closed-loop control on laser power via a customized laser powder bed fusion platform[J]. *Additive manufacturing*, 2023, 66: 103449.
- [73] SU Y, WANG Z, XU X, et al. Effect of closed-loop controlled melt pool width on microstructure and tensile property for Fe-Ni-Cr alloy in directed energy deposition[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2022, 82: 708-721.
- [74] LI X, LI H, CHEN X, et al. In-situ multi-eye monitoring of melt pool temperature field in laser additive manufacturing by light field camera[J]. *Additive manufacturing*, 2025, 102: 104747.
- [75] LI X, LI H, SHEN S. In situ three-dimensional reconstruction of laser powder bed fusion parts by light field camera[J]. *Measurement*, 2024, 226: 114179.
- [76] HERZOG T, BRANDT M, TRINCHI A, et al. Defect detection by multi-axis infrared process monitoring of laser beam directed energy deposition[J]. *Scientific reports*, 2024, 14: 3861.
- [77] RAFFESTIN M, DOMASHENKOV A, BERTRAND P, et al. Ultrasonic diagnostic for in situ control in metal additive manufacturing[J]. *Measurement*, 2023, 206: 112244.
- [78] CHAKROBARTY A, SULTAN T, CETINKAYA C. Machine learning-driven ultrasonic monitoring for quality assurance in additive manufacturing employing 2D phononic coupons[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2025, 141: 416-430.
- [79] ZHOU Y, CHANG T, FANG X, et al. Tailoring the mechanical properties and thermal stability of additive manufactured micro-alloyed Al-Cu alloy via multi-stage heat treatment[J]. *Materials & design*, 2023, 233: 112287.
- [80] GUO X, XUE P, LI H, et al. Microstructures and properties of wire-arc additively manufactured ultra-high strength aluminum alloy under different heat treatments[J]. *Journal of materials research and technology*, 2023, 24: 1663-1678.
- [81] CHEN W, LI D, CAO H, et al. Microstructure refinement and enhanced mechanical properties of wire arc additively manufactured RAFM steel via post heat treatments[J]. *Journal of materials research and technology*, 2024, 29: 4269-4285.
- [82] CHEN L, ZHAO M, WU J, et al. Mechanical property strengthening by post-heat treatments in NiTiCu shape memory alloys fabricated by twin-wire arc additive manufacturing[J]. *Virtual and physical prototyping*, 2025, 20(1): 2457579.
- [83] ZHOU Y, FANG X, XI N, et al. Enhanced strength and ductility of laser-directed energy deposition repaired IN718 superalloy via a novel tailored heat treatment[J]. *Journal of materials science & technology*, 2024, 199: 86-101.
- [84] LIU Y, LIU X, LU J, et al. Post-treatment technologies for high-speed additive manufacturing: status, challenge and tendency[J]. *Journal of materials research and technology*, 2024, 30: 1057-1082.
- [85] TAN R, ZHAO X, LIU Q, et al. Investigation of surface integrity of selective laser melting additively manufactured AlSi10Mg alloy under ultrasonic elliptical vibration-assisted ultra-precision cutting[J]. *Materials*, 2022, 15(24): 8910.
- [86] ZHANG J, WANG H. Magnetically driven internal finishing of AISI 316L stainless steel tubes generated by laser powder bed fusion[J]. *Journal of manufacturing processes*, 2022, 76: 155-166.
- [87] CALIGNANO F, MERCURIO V, RIZZA G, et al. Investigation of surface shot blasting of AlSi10Mg and Ti6Al4V components produced by powder bed fusion technologies[J]. *Precision engineering*, 2022, 78: 79-89.
- [88] MALEKI E, BAGHERIFARD S, HEYDARI ASTARAEI A, et al. Application of gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment on fatigue behavior of additively manufactured AlSi10Mg[J]. *Materials science and engineering: A*, 2023, 881: 145397.
- [89] JING Y, FANG X, XI N, et al. Improved tensile strength and fatigue properties of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy by surface laser shock peening [J]. *Materials science and engineering: A*, 2023, 864: 144599.
- [90] ZHANG H, SHANG J, MA H, et al. The evolution of strain gradient and surface microstructure of aluminum alloy during multiple laser shock peening cycles[J]. *Applied surface science*, 2025, 698: 163067.
- [91] YONG C K, KEATING E M, HUGHES D J, et al. Assessment of

- residual strain in laser shock peened additive manufactured Inconel 718 using synchrotron X-ray diffraction[J]. *Materialia*, 2023, 30: 101843.
- [92] WU D, QU W, WEN Y, et al. The application, challenge, and developing trends of non-destructive testing technique for large-scale and complex engineering components fabricated by metal additive manufacturing technology in aerospace [J]. *Journal of nondestructive evaluation*, 2024, 43(3): 1-16.
- [93] ETMM. 3D printing a rocket engine [EB/OL]. (2019-11-27) [2024-05-01]. <https://www.etmm-online.com/3d-printing-a-rocket-engine-a-886960>.
- [94] GALLMEYER T G, MOORTHY S, KAPPES B B, et al. Knowledge of process-structure-property relationships to engineer better heat treatments for laser powder bed fusion additive manufactured Inconel 718[J]. *Additive manufacturing*, 2020, 31: 100977.
- [95] 王楠, 李金国, 刘纪德, 等. 增材制造高温合金组织及缺陷研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(1): 257-269.
- [96] 董鹏, 王铁岩, 周庆军, 等. 金属增材制造技术在液体火箭发动机推力室制造中的应用与展望 [J]. *航空制造技术*, 2024, 67(23): 88-104.
- [97] CHILDERHOUSE T, JACKSON M. Near net shape manufacture of titanium alloy components from powder and wire: a review of state-of-the-art process routes [J]. *Metals*, 2019, 9(6): 1079276.
- [98] KURZYNOWSKI T, PAWLAK A, SMOLINA I. The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry [J]. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2020, 20(1): 22-35.
- [99] SRIVASTAVA M, JAYAKUMAR V, UDAYAN Y, et al. Additive manufacturing of Titanium alloy for aerospace applications: insights into the process, microstructure, and mechanical properties [J]. *Applied materials today*, 2024, 41: 102481.
- [100] GOCKEL J, BEUTH J, TAMINGER K. Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V [J]. *Additive manufacturing*, 2014, 1-4: 119-126.
- [101] URHAL P, WEIGHTMAN A, DIVER C, et al. Robot assisted additive manufacturing: a review [J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2019, 59: 335-345.
- [102] HUANG W, LIN X. Research progress in laser solid forming of high-performance metallic components at the State Key Laboratory of Solidification Processing of China [J]. *3D Printing and additive manufacturing*, 2014, 1(3): 156-165.
- [103] 汤海波, 吴宇, 张述泉, 等. 高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状与发展趋势 [J]. *精密成形工程*, 2019, 11(4): 58-63.
- [104] 方学伟, 杨健楠, 陈瑞凯, 等. 铝合金电弧增材制造技术研究进展 [J]. *电焊机*, 2023, 53(2): 52-67.
- [105] 周长平, 林枫, 杨浩, 等. 增材制造技术在船舶制造领域的应用进展 [J]. *船舶工程*, 2017, 39(2): 80-87.
- [106] 张帅锋, 吕逸帆, 魏正英, 等. 基于 CMT 的电弧熔丝增材 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金的组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(2): 56-62.
- [107] 郭纯, 马明亮, 胡瑞章, 等. 电弧增材制造舰船用高强度钢 10CrNi3MoV 的组织及性能 [J]. *材料导报*, 2019, 33(增刊 2): 455-459.
- [108] 肖志文, 杨建明, 石国杰, 等. 船舶与海洋工程领域的 3D 打印技术现状 [J]. *现代制造技术与装备*, 2021, 57(1): 130-133.
- [109] ZIÓLKOWSKI M, DYL T. Possible applications of additive manufacturing technologies in shipbuilding: a review [J]. *Machines*, 2020, 8(4): 1-34.
- [110] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. Process planning for robotic wire and arc additive manufacturing [C]//2015 IEEE 10th conference on industrial electronics and applications (ICIEA), 2015.
- [111] CUNNINGHAM C R, WIKSHÅLAND S, XU F, et al. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing [J]. *Procedia manufacturing*, 2017, 11: 650-657.
- 第一作者/通信作者: 方学伟, 男, 1990 年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 长期从事大型金属构件增材制造工艺与装备研究, 发表 SCI 期刊论文 40 余篇 (入选 Elsevier 全球前 2% 顶尖科学家榜单), 中国科协青年人才托举工程获得者。E-mail: xuweifang@xjtu.edu.cn
- (编辑 李静)
(收修改稿日期: 2025-06-08)