

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.03.002

金属增材制造监测与控制技术研究进展

郭立杰^{1,2}, 许伟春³, 齐超琪^{1,2}, 任斐¹, 封小松¹, 赵凯^{1,2}, 郝云波^{1,2}

(1. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245; 2. 上海复杂金属构件增材制造工程技术研究中心, 上海 200245; 3. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘要: 金属增材制造技术凭借其柔性化定制能力和复杂构件成形优势, 有望成为提升航天领域设计与制造能力的一项关键核心技术, 但现阶段该方法仍然存在制造过程稳定性不足、制造质量实时检测困难、工艺参数实时调节技术成熟度有待提升等问题。本文从增材过程信息感知、增材工艺优化决策、质量优化控制发展趋势三方面详细阐述了金属增材制造监测技术的研究进展, 论证了高性能结构件增材成形过程中工艺变量-过程参量-成形质量调控的发展必要性, 并就增材过程监测技术的发展趋势做出了思考与展望。

关键词: 金属增材制造; 过程监测; 工艺优化; 闭环控制

中图分类号: TG146.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2022)03-0365-13

Research Progress of Monitoring and Control Technology for Metal Additive Manufacturing

GUO Lijie^{1,2}, XU Weichun³, QI Chaoqi^{1,2}, REN Fei¹, FENG Xiaosong¹, ZHAO Kai^{1,2},
HAO Yunbo^{1,2}

(1. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China; 2. Shanghai Complex Metal Components Additive Manufacturing Engineering Technology Research Center, Shanghai 200245, China; 3. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Metal additive manufacturing technology is growing rapidly and expected to play a key role in design and manufacture of aerospace component, which is attributed to its ability of personalized customization and advantages of forming complex components. However, there is insufficient technical maturity in additive manufacturing stability, real-time quality monitoring, real-time process adjusting in the recent process of additive manufacturing. To solve these problems, the research of metal additive manufacturing monitoring and control technology is summarized from three aspects: Process monitoring, parameter optimizing and closed-loop control. Meanwhile, the necessity of intelligent control of process parameters/sensor data/forming quality in additive manufacturing of high-performance metallic components is demonstrated and future research of process monitoring technology in metal additive manufacturing is suggested.

Key words: metal additive manufacturing; process monitoring; parameter optimizing; closed-loop control

增材制造作为先进制造技术的代表, 与传统制造工艺相比, 一方面可以实现三维复杂结构零件的

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(52075341); 装备预研领域基金(80904010502); 上海市科技计划项目(21510731500); 上海市青年科技启明星计划(20QB1402800)。

收稿日期: 2022-03-15; **修订日期:** 2022-05-13

作者简介: 郭立杰, 男, 研究员, 上海航天设备制造总厂有限公司科技委主任, 中国航天科技集团公司首席工艺专家。主要研究方向为航天器制造, 材料加工。

通信作者: 任斐, 研究员, E-mail: renfei_149@163.com。

引用格式: 郭立杰, 许伟春, 齐超琪, 等. 金属增材制造监测与控制技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 365-377. GUO Lijie, XU Weichun, QI Chaoqi, et al. Research progress of monitoring and control technology for metal additive manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 365-377.

快速制造,另一方面凭借其快速非平衡凝固行为^[1-2],有望实现材料的高性能化,具有快频响、低成本、数字化、自动化、个性化等优势,已成为全球先进制造业重点关注的一个学科方向^[3]。2021年1月,美国以国防需求为牵引,发布了首个综合性《增材制造战略》报告,将增材制造视为实现国防战略保障的强有力科创技术。西安交通大学卢秉恒院士在《增材制造技术——现状与未来》一文中也指出^[3]发展自主创新的增材制造技术是我国由“制造大国”向“制造强国”跨越的必由之路。

目前关于增材制造技术的研究十分广泛而深入,已有多位知名学者对已有研究作了文献综述。现有关于增材制造的综述主要侧重于不同原材料可适性分析^[4-6]、不同增材制造工艺技术特点^[7-8]、增材制造构件性能分析与控制^[9-10]、结构与优化^[11-12]、产品服役场景介绍^[13-15],进而总结现有增材制造技术的发展概况并提出挑战^[16-17]。而在其发展趋势与挑战中常提到的就是对于基础科学问题的研究、材料-工艺-设备等配套步骤的跟进、与减材-智能化-数字化等多元技术的融合、增材产品形性质量的把控。

鉴于现有增材过程中普遍存在质量稳定性与工艺匹配度不高的问题,同工况-装备-工艺-材料下制备的结构件良莠不齐^[18-19]。原因在于金属增材制造是涉及材料、结构、多重物理化学场的多因素-多层次-跨尺度耦合的极端复杂系统,因此,增材制造过程的材料-工艺-组织-性能关系难以精准把控。针对以上问题,亟待引入过程监测与闭环控制技术的概念,开发具有自感知-自诊断-自决策-自控制的形性调控技术,从而实现增材制造材料、工艺、结构设计、产品质量和服役效能的跨越式提升,

进一步构建完善的工艺质量管控体系是未来增材制造的优先发展方向。

随着声-光-电信息监测技术的发展,在线监测技术逐步应用于增材制造的过程监测数据收集与处理^[20-21]。以EOS公司为例,开发了一套基于实时热成像与AI预测的图像处理软件,根据虚实对比结果判断正常/异常情况,据此判别是否停止打印,达到节省材料与时间成本的目的。GE航空公司的Spears等^[22]聚焦于选区激光熔化技术,从粉末性能监测、声信息检测、粉床检测、机器视觉监测等方面对增材制造过程中的在线监测技术进行了详细阐述,并在展望中指出基于在线监测技术延伸的闭环控制技术也至关重要。在此之后,诸多学者也对增材制造熔池监测^[23]、缺陷表征^[24]、尺寸监测^[25]等方面进行了详细综述。然而,前述要实现以形性为靶向的增材过程参数自主修正,不仅需要在线监测,还涉及增材制造全流程的闭环控制。发展面向产品全生命周期的具有信息感知、优化决策、执行控制功能的制造系统具有重要意义^[26]。

鉴于增材制造技术在先进制造业中的巨大优势和形性难以调控的痛点,促进金属增材制造技术的发展,本文从增材过程信息感知(如温度信息、变形信息、缺陷信息)、增材工艺优化决策(如激光功率、沉积层高度、扫描速度)、多目标同步优化控制三方面,详细阐述金属增材制造过程在线监测技术研究现状与技术进展,具体框架如图1所示。结合航空航天增材制造重大实际需求,提出了高性能结构件增材成形过程中工艺变量-过程参量-成形质量调控方法,并就未来增材制造技术监测与控制的研究方向作出思考与展望,以期为本领域相关研究提供一些参考。

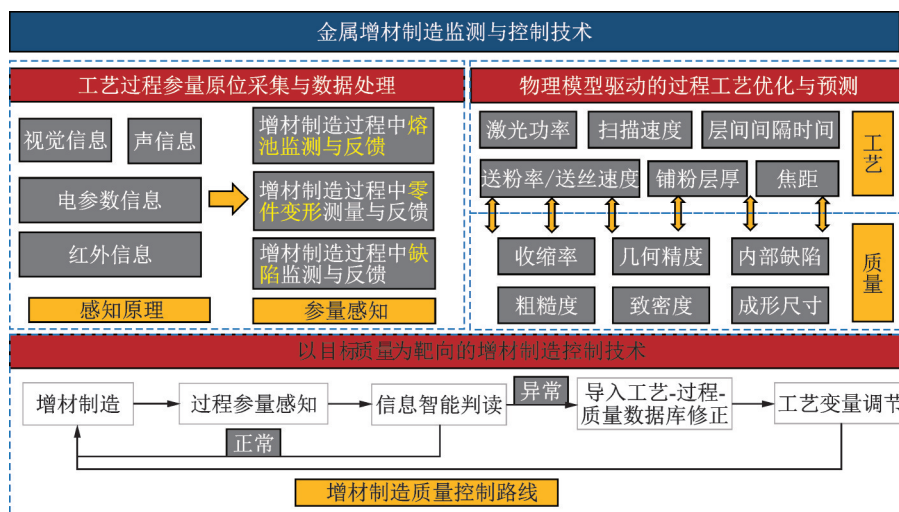


图1 框架图

Fig.1 Framed illustration

1 金属增材过程信息感知技术

传感技术的迅速发展快速升级为增材质量可靠性和制造可重复性提供关键保障,该技术具有如下典型特征:通过视觉信息、声信息、电参信息过程监测信息,能获取成形过程温度、形状尺寸、缺陷等关键参量,有别于现有增材手段采用模拟的方法对过程关键参量进行预测,直观数据获取更为精准且便于调控。

1.1 金属增材熔池温度监测技术

熔池温度作为增材制造成型件质量的重要影

响因素之一,反映了增材过程的热累积,温度过高则会造成驼峰、流淌等问题,温度过低则会导致气孔、未熔合等缺陷产生,为了通过过程参量控制实现增材质量的精确调控,有必要对熔池温度施加过程监测。获取熔池温度信息的方法可以分为接触式测量和非接触式测量。现阶段,用于熔池温度监测的接触式温度传感器主要有热电偶等。非接触式温度传感器主要有高温计^[26-27]、高速相机^[28-29]、红外热像^[30-31]等,各类温度监测工具对比如表 1 所示。

表 1 不同熔池温度监测工具对比^[23]

Table 1 Comparison of different molten pool temperature monitoring tools^[23]

监测设备	测量范围	优点	缺点
高温计	900~1 700 nm	准确率高、相应快	高成本
CCD/CMOS 相机	300~1 000 nm	低成本、高分辨高帧率	搭配光学滤镜、对温度不敏感
热电偶	-200~2 800 °C	对温度敏感、成本低	接触式测量不利于动态监测,响应慢

在上述 3 种监测工具中,虽然热电偶的温度检测精度最高,但是 Segerstark 等^[32]发现热电偶受到激光熔化沉积(LMD)制造过程中高强度热辐射作用会出现明显过热并失效,虽然提出了一种保护片测量温度的方法,但是峰值温度依然存在 10% 左右的误差。鉴于其误差较大且不利于动态监测的特点,显然不适用于以激光、电弧、电子束为热源的金属增材制造过程热监测以及后续的实时温度把控。相较而言,用于增材制造过程测温的单点高温计产业已经相对成熟,采集频率和测量精度能满足在线测温需求,但是该方法无法获取熔池温度分布且温度区域小。针对高温计的区域局限性问题,西北工业大学黄卫东教授课题组^[33]通过建立比色红外测温系统,对 LMD 增材制造过程熔池温度进行实时跟踪与定点测量,建立了工艺参数与增材熔池温度之间的理论模型,并用于指导成形精度和凝固

组织控制。重庆绿色智能技术研究院^[34]也有相关报道:通过如图 2 所示的红外热成像仪测量激光送丝增材过程冷却速度,最终指导成形尺寸控制和缺陷把控。但是温度精度低始终是其不可避免的弊端。美国南卫理公会大学 Kovacevic 教授团队^[35]采用高温计传感器和红外相机温度检测系统,测量 LMD 成形过程传热传质行为,最终建立了工艺参数与增材过程熔池温度的关联。该方法融合了高温计单点测温精度高和红外热像仪测温点域宽的优点,是目前精度要求高、测温区域宽的增材制造过程的理想测温手段,可广泛应用于各类增材制造,但是该方法难以保障实时测温需求,有一定的延后性。除此之外,天津工业大学杨洗陈教授团队^[36]以 LMD 技术为例,从普朗克辐射定律出发,研制了一套基于 CCD 比色测温的熔池温度在线监测系统,由 CCD 采集双波长图像信息,然后计

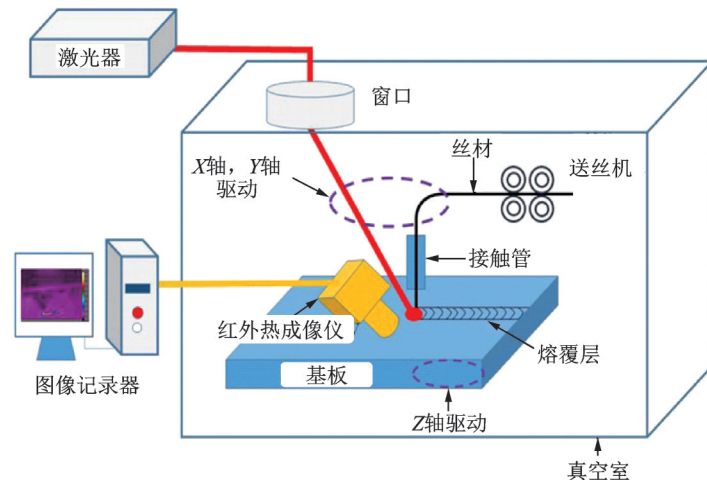


图 2 激光送丝增材过程测温系统^[34]

Fig.2 Temperature measurement system during laser wire feeding process^[34]

计算机对图像进行滤波、提取灰度图像,通过该灰度图再经过标定得到激光熔池的温度场分布。北京理工大学刘战伟教授团队则已经在LMD增材制造现场利用自主研发的单机温度场在线测量光路系统与长焦显微镜镜头结合,在线测量了两种打印过程的熔池温度分布,包括单点和单道打印过程。总结了熔池温度场的温度分布规律,分析了熔池的形成、发展及冷却过程的温度变化规律,如图3所示。但由于制造环境的高复杂性、发射率变化等测量难题,对质量反馈的准确度造成影响,且该方法

后处理过程复杂,亟待后续软件开发解决时效性的问题。为此,实时-高精度-大区域的温度信息获取成为接下来研究发展的主要方向。

鉴于激光/电弧/电子束熔池温度特征的相似性,上述温度监测装备同样可应用于电弧/电子束增材制造。哈尔滨工业大学增材制造团队采用红外测温的方法捕获了电弧增材过程温度场^[37],采用高速热电偶测温设备对电子束增材过程进行实时监测^[38],测量结果对其后续工艺参数(层间等待时间)的优化提供依据。

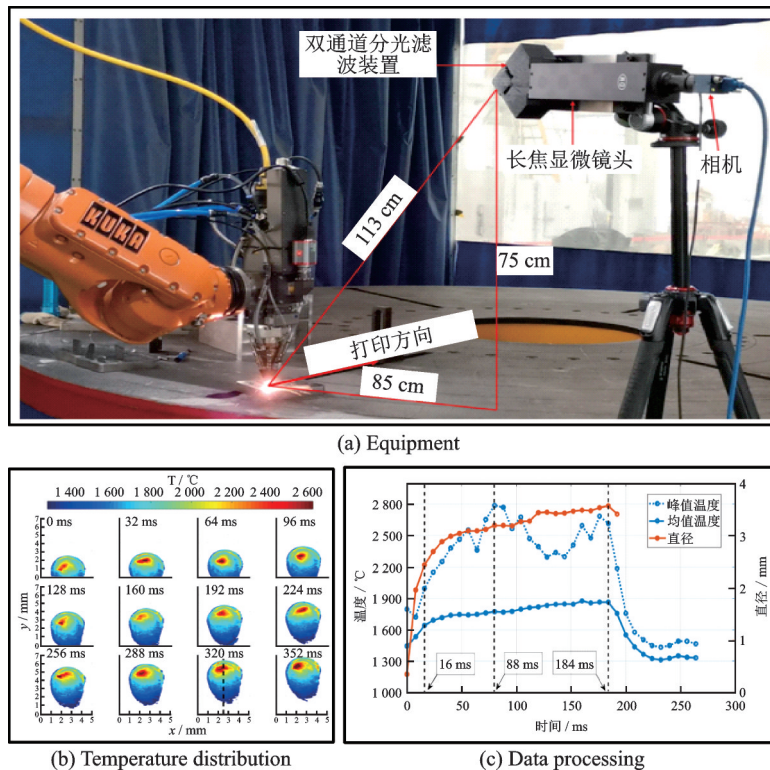


图3 增材过程中熔池温度场在线检测设备与检测数据

Fig.3 On-line testing equipment and testing data of molten pool temperature field during additive manufacturing process

1.2 金属增材成形尺寸特性监测技术

控形控性问题是现阶段增材制造领域的攻坚方向,而通过优化工艺参数同时实现宏观尺度的“控形”和微观尺度的“控性”是增材制造零部件质量精准把控的关键所在。目前,常通过建立热-力耦合小尺度模型,对增材制造零部件的尺寸进行预测,再通过变形补偿来控制成形件的变形。但是增材制造过程中的尺寸变更规律十分复杂,并不断累积,很难进行预测和调控。因此,发展原位检测技术,实现对成形过程中零部件尺寸的实时调控是目前对控形控性的主要研究方向^[39]。

意大利卡塔尼亚德格利大学 Bonaccorso 等^[40]针对电弧增材制造搭建了一套基于电弧电压传感器的堆积高度检测与控制系统,通过电弧电压与堆积高度的线性映射关系,测量出了堆积层的实时高

度。但是该方法得到的高度信息误差较大,且不同沉积材料的线性映射关系不一致,受限于电弧增材制造形式,极大地限制该技术的推广。西南交通大学李沿江^[41]以 CCD 摄像机为核心设计了双摄像机视觉传感系统,通过熔池图像处理方法开发实现了薄壁件堆积尺寸的实时检测。该方法虽然可适性较强,不拘束于激光/电弧/电子束增材,但是得到的只是定性的图片信息,缺乏定量精确的尺寸数据,不利于实时检测和后续数据判读与参数修正。Garmendia 等^[42-43]提出了一套基于结构光扫描仪的测量系统,该结构光扫描仪可在短时间内获取最新沉积层的高度轮廓,并根据点云处理,计算出后续层所遵循的沉积路径。如图4所示,该扫描仪可以调节投影仪和照相机之间的距离以及它们之间的角度,从而可以测量不同尺寸的物体。相较于前两

种方法,该方法通过现有软件就可以得到定量的尺寸信息且耗时较短(0.5 s),虽然精度不能达到视觉传感的水平,但误差在 ± 0.05 mm范围内,该设备

的准确性及其可重复性通过物理标准的测量得到验证,适用于电弧增材、激光熔化沉积、电子束送丝增材这类对高度敏感的增材制造类型。

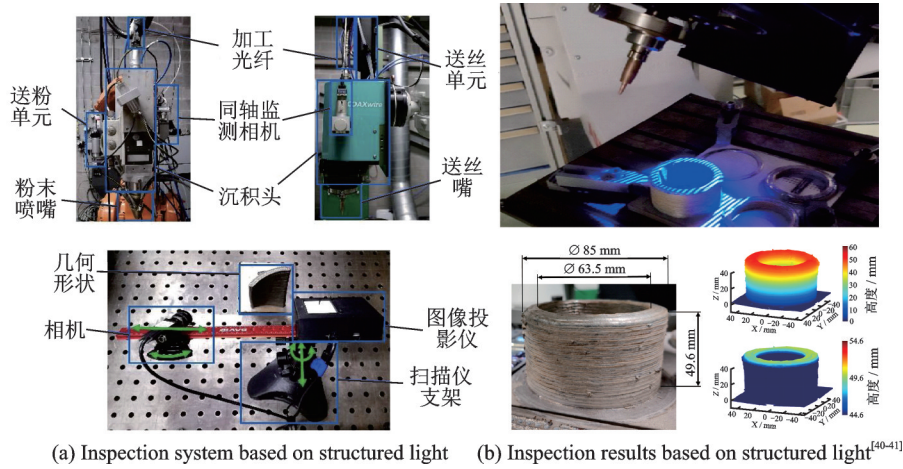


图4 成形尺寸测量系统与测量结果

Fig.4 Forming dimension measurement system and measurement results

1.3 金属增材过程缺陷检测技术

增材制造是一个快速熔化与快速凝固的过程,过程中所产生的残余应力以及基体与熔覆层材料性能差异,导致制造区域极易产生裂纹、气孔、夹渣及未熔合等不良缺陷,严重影响增材质量,国内外学者广泛开展熔覆过程缺陷在线检测技术研究。现有在线检测技术主要分为两种类型:一种是以视觉、可见光、红外等手段为主的表面缺陷检测方法。美国橡树岭国家实验室提出一种在线监测-图像处理方法,采用计算机视觉技术与无监督机器学习技术实现增材异常状态检测与分类,从而实现对激光粉末层熔化区质量优劣的判定^[44]。次年,该团队在此基础上融合了多尺度神经网络和迁移学习方法实现了多类缺陷(铺粉不足、铺粉沟纹、小碎块缺陷)的在线实时监测与分类^[45]。该方法太过于依赖庞大的试验数据来提高检测精度,现阶段而言,检测精度不够。且该方法目前用于检测增材前的铺粉缺陷,仅适用于预铺粉型增材制造(激光选区熔化、电子束选区熔化),对于增材过程中的缺陷监测还有待研发。另一种缺陷检测方法是超声、射线为主的内部缺陷检测方法^[46]。其中,射线由于辐射原因,不适用于增材过程在线监测。在激光超声检测领域,Lévesque等^[47]已经成功将激光超声技术应用于离线增材制造产品内部缺陷检测,且通过X-射线扫描结果证实其检测结果准确率和实时检测可行性。原材料送给形式以及热源模型对激光超声检测可行性和准确性无明显影响,因为该技术可广泛用于各类增材制造。武汉理工大学华林教授团队^[48]鉴于电弧增材过程中气孔、未熔合、

微裂纹等内部缺陷和传统超声检测的局限性,研发了一套由脉冲激光器和激光干涉仪组成的非接触内部缺陷检测装置,通过2D轮廓重建、有限元分析、检测试验等流程最终实现了人工定制缺陷的定量检测。在此基础上,上海航天设备制造总厂有限公司增材制造团队已经自主研发了一套激光选区熔化在线缺陷监测一体化装置,具体装备如图5(a)所示,相应原理见图5(b),其中振镜1用于增材制造,振镜2用于缺陷监测。从可行性而言,激光超声技术是目前较为合理的缺陷检测技术,但该技术尚且存在检测盲区,有待突破。

2 金属增材过程工艺优化技术

鉴于工艺参数是增材制造过程的核心可控输入变量,建立工艺参数-成形件质量的预测与反求模型是实现成形件形性调控的关键,而基于该模型目前已经形成两类驱动方式:一类是物理驱动,它通过性能强化机制、物理冶金机理、组织演化机制等基础科学研究揭示工艺参数与成型质量的关联,从基础原理层面诠释了增材质量的影响机制,是理想状态下的工艺-质量模型构建方法。但增材制造存在多材料、多变量、多目标的特点,该方法难以快速实现庞大的工艺参数因子-多质量目标模型的迭代。另一类是数据驱动,它通过机器学习算法优化工艺参数与成形质量的定量关系,通过少批次变量试验实现多维度工艺参数下成形质量的预测与多目标质量的参数精准寻优。

目前最常用于工艺/质量优化的机器学习技术是神经网络,国内外学者已经就此开展了大量研

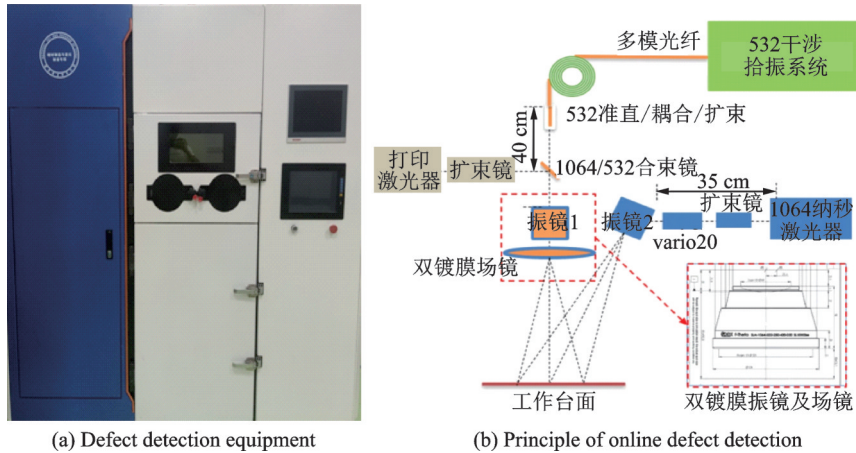


图5 缺陷检测装备和原理

Fig.5 Defect detection equipment and principle

究^[49],涉及目标质量包括成形尺寸、耐磨性能、表面质量、力学性能、疲劳性能,涉及的优化参数包括激光功率/电弧参数、扫描速度、层厚、间隔时间等^[50-52],具体案例汇总如表2所示。值得注意的是,武汉光电国家实验室^[53]针对激光增材过程,进行了反向传播(BP)神经网络质量预测,将平均相对误差控制在5.97%以内;在此基础上,上海航天

设备制造总厂有限公司增材制造团队^[54]采用回归分析-BP神经网络构建了工艺参数-加工性能耦合模型,将性能预测误差控制在4%以内,并基于NSGA-II算法对参数进行优选设计,得到硬度性能优良的增材构件。由此可知,采用多元智能算法对增材质量模型进行耦合能大幅度减小预测误差,实现以质量为靶向的工艺参数优化设计。

表2 基于神经网络的金属增材制造工艺/质量优化

Table 2 Neural network-based metal additive manufacturing process/quality optimization

增材工艺	目标质量	优化参数	预测误差/%
SLS ^[55]	收缩率	激光功率、扫描速度、层厚、间隔时间、温度	12.7
EBM ^[56]	粗糙度	旋转速度、沉积速度	2.5
WAAM ^[57]	成形宽度、高度	送丝速度、扫描速度	98
LMD ^[58]	几何精度	激光功率、扫描速度、送粉率	2~5.8
LMD ^[59]	熔池宽度	激光功率、送粉率、激光速度、焦距	
LMD ^[54]	硬度、沉积层形貌	激光功率、送粉速度、扫描速度	4
SLM ^[53]	成形件致密度	激光功率、扫描速度、铺粉层厚	5.97

除神经网络以外,遗传算法、随机森林、支持向量回归、K-均值、集成算法等机器学习算法也受到广泛关注^[49]。华南理工大学杨永强教授团队^[60]为解决现阶段DED成型精度低的问题,以常规沉积工艺参数为输入,熔道宽度和高度为输出,建立了融合高斯径向(RBF)核函数与支持向量回归(SVR)的预测模型。不仅实现了误差控制在4.58%的多参数下熔道尺寸预测,同时采用改进的粒子群优化算法对工艺参数进行自动全局寻优。美国西北大学Liu教授团队^[61]开发了一种基于多物理场建模-实验测量-数据挖掘的新型数据驱动方法,建立了工艺(激光功率、能量密度、冷却速度、送粉速率)-质量(稀释率、微观组织、显微硬度)的耦合模型(图6),并实现了基于多目标质量的增材工艺寻优。该方法充分发挥了物理模型与数学模型的优势,通过工艺试验与数值模拟结合的方法得

到用于数据挖掘的7维输入参数,采用自组织映射算法建立了工艺-质量的关联模型并实现了可视化,有助于实现增材过程的在线调控。

虽然通过建立输入参数-输出质量耦合模型能一定程度上实现工艺参数的自动寻优与成型件形性调控,但是增材制造过程中材料往往存在强烈的物理化学变化、复杂的物理冶金过程和形变过程,导致现阶段增材成形过程的质量稳定性和工艺一致性不足,制约基于智能制造技术的工艺参数-成形质量模型的预测精度与形性调控效果。

3 金属增材过程质量控制技术

鉴于工艺参数-成型质量预测模型的不稳定性,在该模型中引入过程参量感知因子,得到工艺参数-过程参量-成形质量三者耦合模型,通过增材过程参量的感知实时保障过程稳定性,通过工艺参

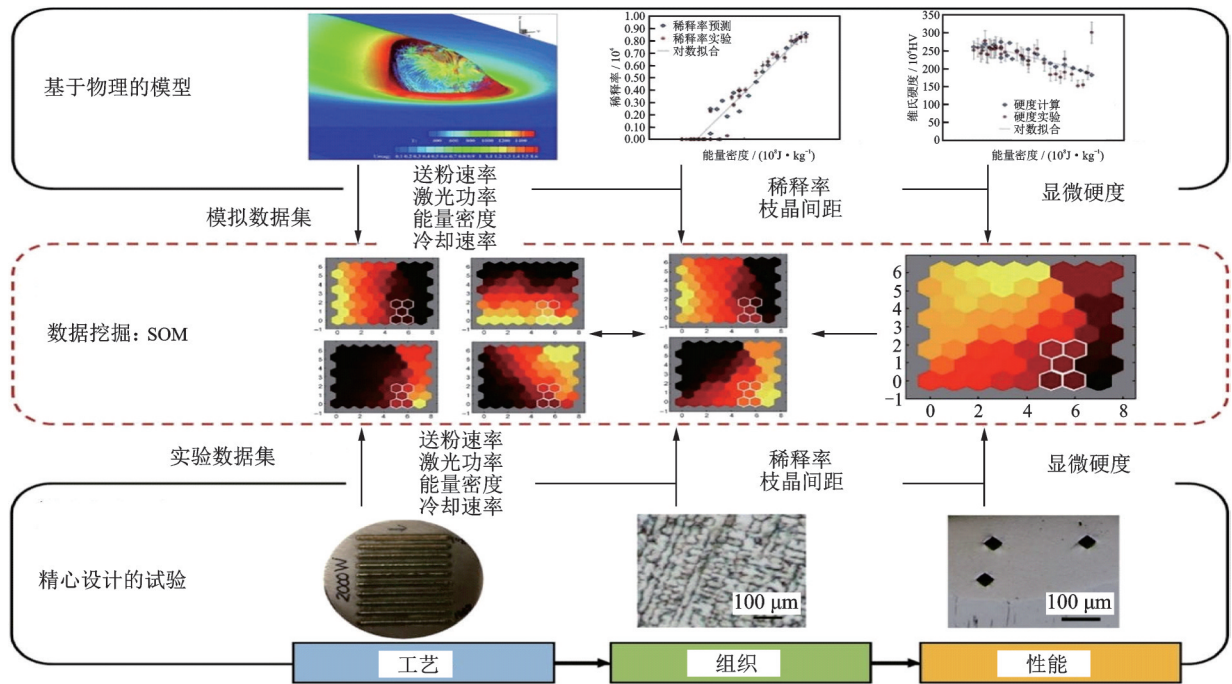


图 6 基于多物理场建模-实验测量-数据挖掘的新型数据驱动模型^[61]

Fig.6 Novel data-driven model based on multiphysics modeling-experimental measurement-data mining^[61]

数优化实时调控增材过程,实现增材工艺一致性把控是目前增材制造的有效保障手段^[62-63]。国内外学者基于红外监测^[37]、视觉监测^[64]、电参数监

测^[65-66]等技术围绕熔池温度、尺寸、过程缺陷 3 个领域开展了大量增材质量控制技术研究,具体内容如表 3 所示。

表 3 基于智能感知的增材质量控制技术

Table 3 Quality control technology of additive manufacturing based on intellisense

序号	增材工艺	过程参量	调控质量	智能算法	传感器
1 ^[67]	LMD	声波信息	孔隙率	卷积神经网络	声发射传感器
2 ^[68]	LMD	熔池状态	缺陷	卷积神经网络	图像采集系统
3 ^[69]	LMD	温度	气孔、裂纹	霍特林统计量、Q charts	同轴高温计相机
4 ^[70]	SLM	匙孔、气孔、未熔合	缺陷	K-均值、聚类算法	高速相机
5 ^[71]	SLM	过程飞溅	形貌	深度置信网络	旁轴高速相机
6 ^[72]	SLM	熔池尺寸	成形精度	卷积神经网络	高速相机

在成形尺寸控制方面。西南交通大学熊俊教授课题组^[73]为解决电弧增材制造过程中交叉结构引起的重叠峰值现象,开发了一套集弧压监测和填充焊丝外控系统于一体的功能性 PID 闭环控制系统。以弧压为输入量,送丝速度为输出量,通过 PID 系统的自主偏差调节有效消除了交叉峰值并确保了成形高度的稳定性,具体增材设备如图 7 所示。该方法原理简单、适应性强,但极大依赖数据的实时性。除此之外,该课题组还开发了一套用于电弧增材制造过程中层宽调控的智能自调节控制器:以扫描速度为输入变量,层宽作为因变量。当层宽过大时,提高扫描速度,当层宽过小时,降低扫描速度,凭此实现层宽的实时调控^[74]。鉴于扫描速度和层宽的线性关系,该方法可行性高且效果显著,但是与层宽相比,沉积层高度对于制造可行性与性

能稳定性的影响更加显著。针对沉积层高度,Herali 等^[75]将自主开发的成型尺寸扫描系统与机器人控制系统耦合集成,通过机器学习算法控制激光熔化沉积层送丝速度从而补偿层高的偏差,具体过程如图 8 所示,控制方案为:激光增材得到沉积层→3D 扫描仪得到高度信息→送丝速度参数调控沉积层高度,具体为:高度过高则提高送丝速度,高度过低则降低送丝速度。该方法有效实现了增材过程的闭环控制,虽然调节目标只有沉积层高度,但是依然是智能增材制造向前的一大步,有待实现多目标质量的调节。

在熔池温度调控方面。Giri 等^[76]研究发现影响激光增材制造几何精度、材料特性和参与应力的关键因素之一就是熔池的热行为,因此该实验室通过增材过程温度分布的动态捕获特征,凭此调控激

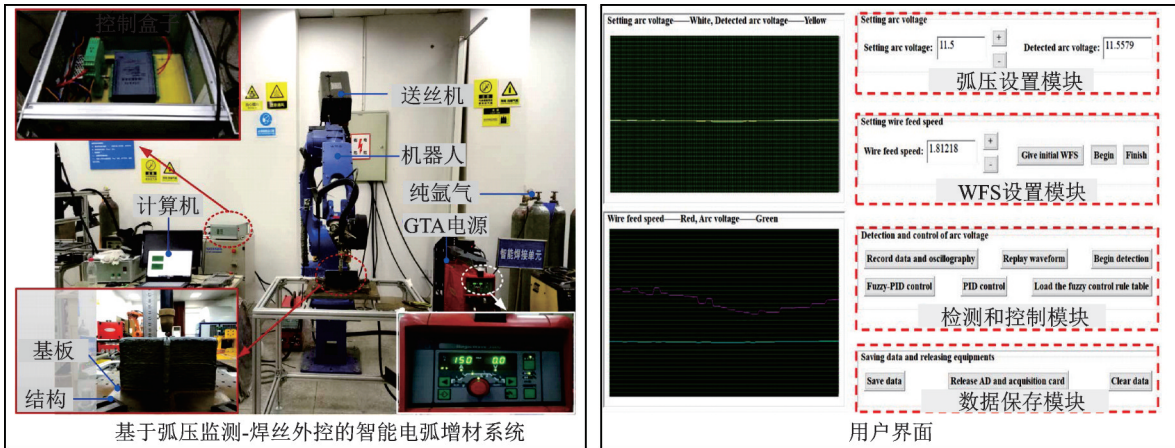


图7 基于弧压监测-焊丝外控的智能电弧增材系统与用户界面^[73]

Fig.7 Intelligent arc additive system and user interface based on arc voltage monitoring and welding wire external control^[73]

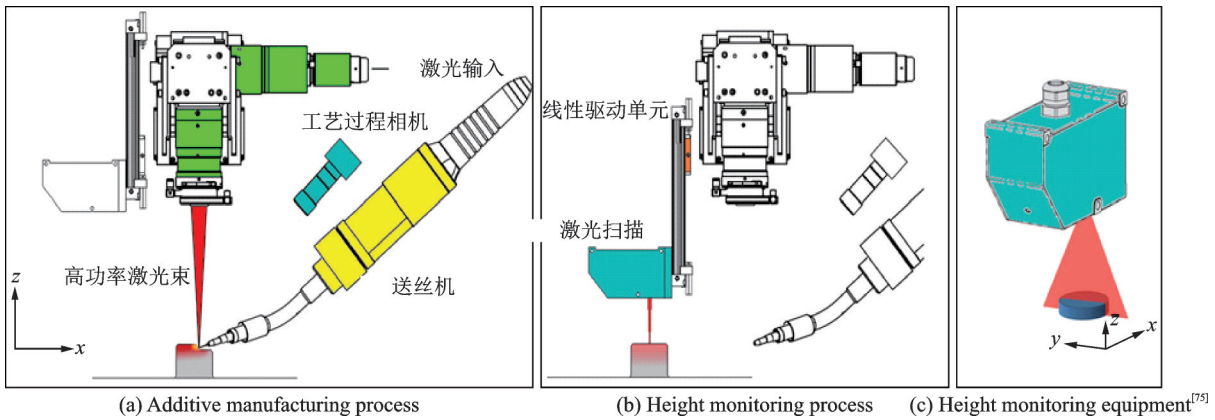


图8 沉积层高度控制过程图

Fig.8 Height control of deposited layer during additive manufacturing

光功率实现熔池稳定,具体方法为:捕获温度过高,则降低激光功率,反之,亦然。Nassar等^[77]通过对温度实施阈值温度闭环控制,发现通过控制成形温度,能得到更规则的晶粒排列、更均匀的柱状晶尺寸和显微硬度,结果如图9所示。为后续把控增材制造宏观结构、残余应力应变等物理特性提供了新思路。

除温度和尺寸之外,增材过程中液滴过渡方式、铺粉缺陷等因子也对增材质量造成重要影响。大连理工大学姚山教授团队^[78]鉴于目前铺粉缺陷对成形质量的决定性影响作用,针对典型的四类铺粉缺陷(小碎块、铺粉沟纹、铺粉不足、铺粉过量),利用自研机器视觉系统和深度学习算法建立了基于图像处理的铺粉缺陷在线检测与控制流程。清华大学都东教授团队^[79]发现由于增材过程不稳定性导致沉积层表面状态极易发生变化,进而造成液滴过渡不稳定,形成大液滴,或导致丝材与基板粘接。为解决现有电子束增材开环控制造成的沉积质量差甚至沉积中断现象,该团队提出一种基于机器视觉的液桥过渡监测方法,将液滴距离实时反馈并控制在阈值范围内,有效解决了增材过程沉积不

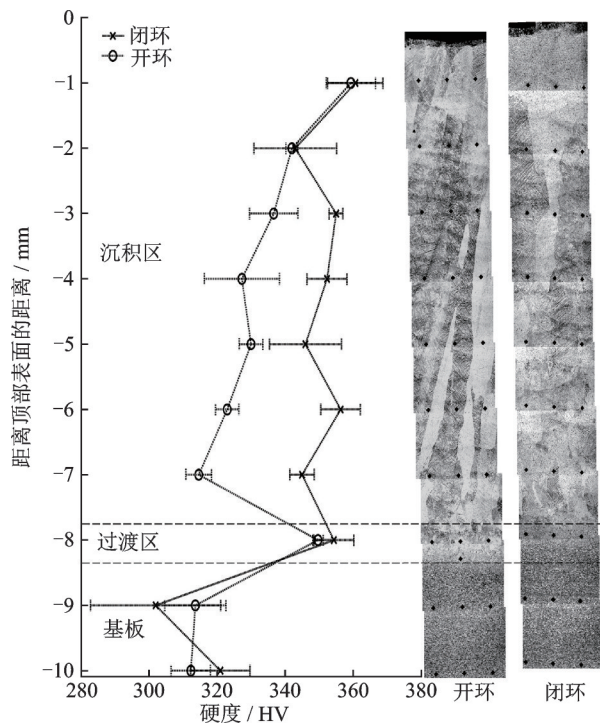


图9 开环控制和闭环控制结果对比^[77]

Fig.9 Comparison of open-loop control and closed-loop control results^[77]

稳定的问题。

前述变形、温度、缺陷等过程参数的调控方法都有效可行,但是若要实现增材过程的形性调控,不能是单一过程参量调控能实现的,还涉及基于多源信息融合的智能决策,涵盖多目标(温度、变形、缺陷)等过程信息的处理和多自变量(功率、扫描速度、送丝/粉速度)的调节。如何解决过程监测信息

求解得到的工艺参数冲突问题,成为增材制造过程形性综合调控的重要难题。上海航天设备制造总厂有限公司目前已经搭建了一套基于激光-电弧复合增材的在线监测与控制系统,具体模型如图 10 所示。通过温度-激光功率的循环实现增材构件组织尺寸的把控,通过沉积层高度-提升量的循环实现增材构件成形尺寸的把控。

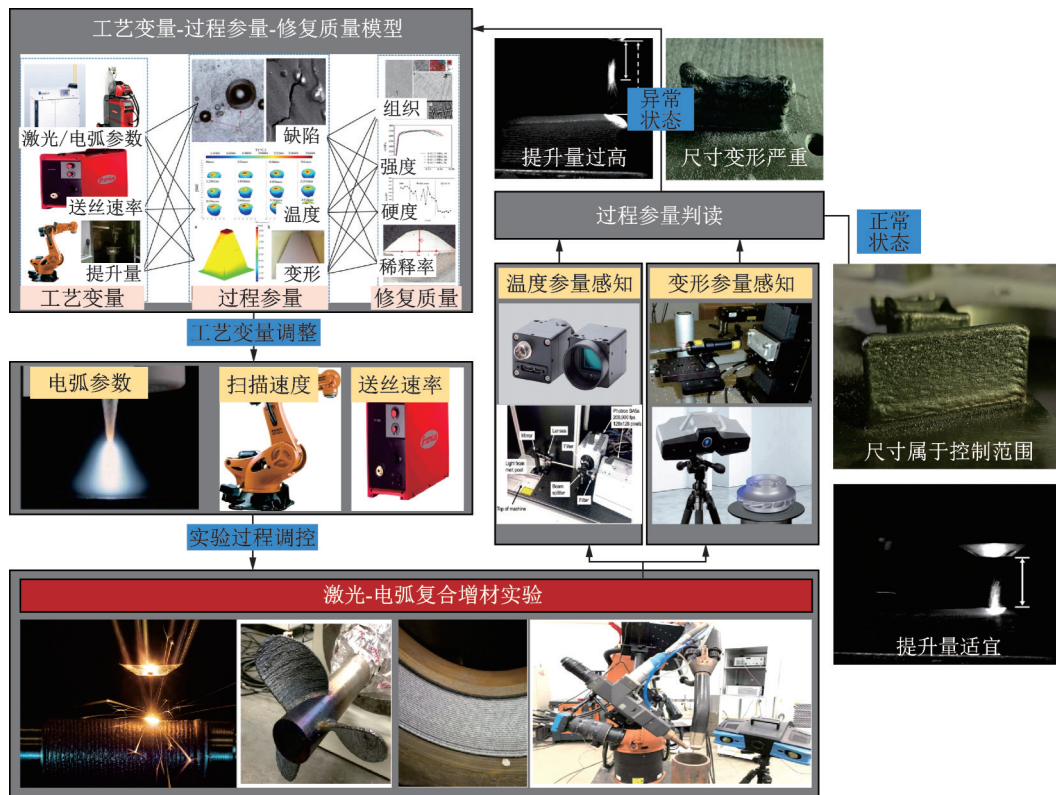


图 10 激光-电弧复合增材的在线监测与控制系统

Fig.10 On-line monitoring and control system of laser-arc composite additive manufacturing

4 展 望

受限于增材制造技术存在的工艺过程影响因素多、缺陷及变形产生机理尚不清晰、工艺状态随时空域变化等因素,现有增材成形过程中质量稳定性和工艺一致性不足,严重制约了其工程应用。结合在线监测和闭环控制技术来研究这一极端复杂系统是实现增材制造形性可控的有效途径。结合前述研究现状,思考增材制造质量在线监测与控制技术未来的研究和发展趋势,下列方向值得进一步关注:

(1) 增材过程参量时效性和精准度把控

过程感知是最终实现形性调控的第一步也是最重要的环节,数据的准确与否直接影响工艺参数调节的正确性,关系到最终成形质量。而只有实时反馈才能保障实时调控,滞后时间较长将导致时间成本增大甚至是无效调节。

由于增材过程存在复杂物理化学变化,对温度、变形等过程参量的感知造成干扰,亟待有效解

决手段。此外,现有感知设备存在海量数据处理与实时反馈不能兼顾的问题,亟待后续算法优化。以高温计为例,虽然时效性符合要求,但是测温区域窄,单点测温误差大,而比色测温技术虽然测温精度高,但后续数据处理耗时长,严重影响增材进度。因此,开发兼具时效性和精准度的增材过程监测设备是智能增材制造技术的重要方向。

(2) 以目标质量为靶向的增材过程工艺变量-过程参量-成形质量耦合求解/调控功能的主动实现

现有的增材质量控制手段局限于工艺变量-成形质量的耦合优化,但增材制造普遍存在工艺稳定性与质量一致性不足的问题,因此优化后的工艺也难以保障质量的稳定性,亟待引入过程参量的概念。

通过增材制造过程参量数据掘取与分析,精准构建/求解增材质量-过程参量-决策变量耦合映射模型,并在关联模型基础上进行多目标同步优化,最终实现多载能束增材流程的智能化控制。采用大数据分析方法求解出瞬/暂/稳三态过程参量(瞬

态温度/变形数据、暂态缺陷信息、稳态变形结果)的决策性工艺变量,并通过决策变量权重因子求解,得到多目标过程参量-工艺变量的耦合模型;基于海量成形质量评价与过程参量掘取结果,得到多目标质量(稀释率、硬度、屈服强度、拉伸强度、延伸率、成形尺寸)分别对应的过程参量影响因子和权重比;最终建立工艺变量-过程参量-增材质量耦合映射模型。在此基础上,针对增材构件目标质量的个性化需求,依次反向求解瞬/暂/稳三态过程参量数据和决策变量修正值,并依据增材制造一体化感知系统和增材成形质量评价体系对修正值下的过程参量和成形质量进行校验,形成以目标质量为靶向的具有大数据传输、数据库查询、数据快速处理、工艺参数调控的工艺-参量-质量数据库。

(3)基于多源传感信息融合与多优化目标智能同步决策的增材全过程质量管控

现有增材制造过程调控存在优化目标单一和决策参数单一的问题,如局限于温度、变形、缺陷等单一对象的调节,尚未实现多源信息的融合优化。

基于人工智能技术识别多源传感信息中的有效信息,排除无效信息,并综合考虑传感器的专属特征,对过程参量信息进行智能融合(温度、变形、缺陷);在此基础上,对多源融合过程参量的正常状态和异常状态进行判读,并将异常过程参量反馈至工艺-参量-质量数据库,求解出预期质量、目标质量对应的过程参量、目标参量对应的工艺变量;在此过程中,开发智能决策算法,解决现阶段以目标质量为靶向的过程参量调节和以目标参量为靶向的决策变量调节存在多目标之间的冲突干扰问题;最终将求解得到的修正工艺变量信息传输至操作端,基于不断迭代的过程把控,达到增材制造过程中全生命周期的质量调控目的。

参考文献:

- [1] 刘伟,李能,周标,等.复杂结构与高性能材料增材制造技术进展[J].机械工程学报,2019,55(20):128-151,159.
LIU Wei, LI Neng, ZHOU Biao, et al. Progress in additive manufacturing on complex structures and high-performance materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 128-151, 159.
- [2] 黄卫东,林鑫.激光立体成形高性能金属零件研究进展[J].中国材料进展,2010,29(6):12-27.
HUANG Weidong, LIN Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
- [3] 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.
LU Bingheng. Additive manufacturing——Current situation and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.
- [4] LAI C, LIU Y, LI S, et al. Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A review [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(5): 1700842.
- [5] EMIRALIOLU A, NAL R. Additive manufacturing of gamma titanium aluminide alloys: A review[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(4): 1-26.
- [6] HARUN W, KAMARIAH M, MUHAMAD N, et al. A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials [J]. Powder Technology, 2017(327): 128-151.
- [7] WONG K, HERNANDEZ A. A review of additive manufacturing[J]. Isrn Mechanical Engineering, 2012, 2012: 30-38.
- [8] 杨强,鲁中良,黄福享,等.激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J].航空制造技术,2016(12):26-31.
YANG Qiang, LU Zhongliang, HUANG Fuxiang, et al. Research on status and development trend of laser additivemanufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(12): 26-31.
- [9] TURNER BN, GOLD S A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness[J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(3): 250-261.
- [10] LEWANDOWSKI J, SEIFI M. Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties[J]. Annual Review of Materials Research, 2016, 46: 151-186.
- [11] JING S, SONG G, LIU J, et al. A review of product design for additive manufacturing[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 635: 97-100.
- [12] ZHAN T. Progress on different topology optimization approaches and optimization for additive manufacturing: A review[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1939(1): 012101.
- [13] 任慧娇,周冠男,从保强,等.增材制造技术在航空航天金属构件领域的发展及应用[J].航空制造技术,2020,63(10):72-77.
REN Huijiao, ZHOU Guannan, CONG Baoqiang, et al. Development and application of metal additive manufacturing in aerospace field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10): 72-77.
- [14] 田宗军,顾冬冬,沈理达,等.激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J].航空制造技术,2015,480(11):38-42.
TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 480(11): 38-42.
- [15] 林鑫,黄卫东.高性能金属构件的激光增材制造[J].中国科学:信息科学,2015,45(9):1111-1126.

- LIN Xin, HUANG Weidong. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. China Science: Information Science, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [16] 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.
LU Bingheng, LI Dichen. Development of additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2013, 42(4): 1-4.
- [17] 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.
WANG Huaming. Materials fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic component[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [18] GENG H, XIONG J, HUANG D, et al. A prediction model of layer geometrical size in wire and arc additive manufacture using response surface methodology[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(93): 175-186.
- [19] 产玉飞, 陈长军, 张敏. 金属增材制造过程的在线监测研究综述[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 2839-2867.
CHAN Yufei, CHEN Changjun, ZHANG Min. Review of on-line monitoring research on metal additive manufacturing process[J]. Materials Reports, 2019, 33(9): 2839-2867.
- [20] LEI J, WANG Z, LIU L. Design of forming shape measurement system for laser molten pool in laser fabricating[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 37: 327-330.
- [21] 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.
- [22] SPEARS T, GOLD S. In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing[J]. Integrating Materials & Manufacturing Innovation, 2016, 5(1): 16-40.
- [23] 王奉涛, 杨守华, 吕秉华. 金属增材制造过程熔池动态监测研究综述[J]. 计算机集成制造系统, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211102.1345.004.html>.
WANG Fengtao, YANG Shouhua, LYU Binghua. Review of research on dynamic monitoring of metal additive manufacturing process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211102.1345.004.html>.
- [24] 吴圣川, 胡雅楠, 杨冰. 增材制造材料缺陷表征及结构完整性评定方法研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 4-34.
WU Shengchuan, HU Yanan, YANG Bing. Review on defect characterization and structural integrity assessment method of additively manufactured materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 4-34.
- [25] 刘强. 智能制造理论体系架构研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 24-36.
LIU Qiang. Study on architecture of intelligent manufacturing theory[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 24-36.
- [26] FURUMOTO T, UEDA T, ALKAHARI M R, et al. Investigation of laser consolidation process for metal powder by two-color pyrometer and high-speed video camera[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 223-226.
- [27] CHIVEL Y, SMUROV I. On-line temperature monitoring in selective laser sintering/melting[J]. Physics Procedia, 2010, 5(8): 515-521.
- [28] LOTT P, SCHLEIFENBAUM H, MEINERS W, et al. Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM)[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 683-690.
- [29] ZHANG Y, FUH J, YE D, et al. In-situ monitoring of laser-based PBF via off-axis vision and image processing approaches[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 263-274.
- [30] BOONE N, ZHU C, SMITH C, et al. Thermal near infrared monitoring system for electron beam melting with emissivity tracking[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 601-605.
- [31] 朱进前, 凌泽民, 杜发瑞, 等. 激光熔丝增材制造温度场的红外热像监测[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 145-149.
ZHU Jinqian, LING Zemin, DU Farui, et al. Monitoring of laser metal-wire additive manufacturing temperature field using infrared thermography[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(6): 145-149.
- [32] SEGERSTARK A, ANDERSSON J, SVENSSON L. Evaluation of a temperature measurement method developed for laser metal deposition[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 22(1): 1-6.
- [33] 谭华. 激光快速成形过程温度测量及组织控制研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
TAN Hua. Research on temperature measurement and tissue control in laser rapid prototyping process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [34] DING X P, LI H M, ZHU J Q, et al. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 81: 166-169.
- [35] LIU S, FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Optical monitoring of high power direct diode laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 363-376.
- [36] 雷剑波. 激光再制造熔池温度场数值分析及检测研

- 究[D].天津:天津工业大学,2005.
- LEI Jianbo. Numerical analysis and detection of molten pool temperature field in laser remanufacturing [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2005.
- [37] YANG D Q, WANG G, ZHANG G J. Thermal analysis for singlepass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017(244): 215-224.
- [38] 树西. 304不锈钢电子束熔丝沉积工艺及稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- SHU Xi. Research on technology and stability of 304 stainless steel electron beam freeform fabrication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [39] 陈樱莹. 面向金属增材制造过程的零件三维形貌测量技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- CHEN Yingying. Research on three-dimensional topography measurement technology of parts for metal additive manufacturing process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [40] BONACCORSO F, CANTELLI L, MUSCATO G. An arc welding robot control for a shaped metal deposition plant: Modular software interface and sensors [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 58(8): 3126-3132.
- [41] 李沿江. GMA增材制造堆积尺寸视觉传感与解耦控制[D].成都:西南交通大学,2020.
- LI Yanjiang. GMA additive manufacturing stack size visual sensing and decoupling control[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [42] GARMENDIA I, PUJANA J, LAMIKIZ A, et al. Structured light-based height control for laser metal deposition [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42(6): 20-27.
- [43] GARMENDIA I, FLORES J, MADARIETA M, et al. Geometrical control of DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts [J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 425-429.
- [44] SCIME L, BEUTH J. Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm [J]. Additive Manufacturing, 2018, 19: 114-126.
- [45] SCIME L, BEUTH J. A multi-scale convolutional neural network for autonomous anomaly detection and classification in a laser powder bed fusion additive manufacturing process[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 273-286.
- [46] 胡婷婷, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 70-75.
- HU Tingting, GAO Limin, YANG Hainan. Application of nondestructive testing techniques on additive manufacturing in aerospace fields[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 70-75.
- [47] LÈVESQUE D, BESCOND C, LORD M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics[C]//Proceedings of AIP Conference. [S.l.]:AIP Publishing LLC, 2016, 1706(1): 130003.
- [48] ZENG Y, WANG X, QIN X, et al. Laser ultrasonic inspection of a wire+arc additive manufactured (WAAM) sample with artificial defects[J]. Ultrasonics, 2021, 110(8): 106273.
- [49] GOH G D, SING S L, YEONG W Y. A review on machine learning in 3D printing: Applications, potential, and challenges[J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(1): 63-94.
- [50] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 32-42.
- [51] GAO J, WANG C, HAO Y, et al. Prediction of TC11 single-track geometry in laser metal deposition based on back propagation neural network and random forest[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(3): 1417-1425.
- [52] WAN H Y, CHEN G F, LI C P, et al. Data-driven evaluation of fatigue performance of additive manufactured parts using miniature specimens[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 183-192.
- [53] 邵建军. 基于神经网络和遗传算法的激光选区熔化成形工艺优化研究[D].武汉:华中科技大学,2018.
- SHAO Jianjun. Research on optimization of selective laser melting processing based on neural network and genetic algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.
- [54] 赵凯, 梁旭东, 王炜, 等. 基于NSGA-II算法的同轴送粉激光熔覆工艺多目标优化[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 96-105.
- ZHAO Kai, LIANG Xudong, WANG Wei, et al. Multi-objective optimization of coaxial powder feeding laser cladding based on NSGA-II [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 96-105.
- [55] RONG J W, XIN H L, QING D W. Optimizing process parameters for selective laser sintering based on neural network and genetic algorithm[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2009, 2009, 42(11/12): 1035-1042.
- [56] ZHANG W, MEHTA A, DESAI P S, et al. Machine learning enabled powder spreading process map for metal additive manufacturing (AM)[C]//Proceedings of 2017 International Solid Freeform Fabrication Symposium. [S.l.]:[s.n.], 2017.
- [57] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 32-42.
- [58] CAIAZZO F, CAGGIANO A. Laser direct metal deposition of 2024 Al alloy: Trace geometry prediction

- via machine learning[J]. *Materials*, 2018, 11(3): 444.
- [59] SAQIB S, URBANIC R J, AGGARWAL K. Analysis of laser cladding bead morphology for developing additive manufacturing travel paths[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 17(1): 824-829.
- [60] 姚望,黄延禄,杨永强. 基于支持向量回归的定向能量沉积熔道尺寸预测[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 99-105.
YAO Wang, HUANG Yanlu, YANG Yongqiang. Size prediction of directed energy deposited cladding tracks based on support vector regression[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 99-105.
- [61] GAN Z, LI H, WOLFF S J, et al. Data-driven microstructure and microhardness design in additive manufacturing using a self-organizing map[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 595-812.
- [62] MAJEED A, LV J, PENG T. A framework for big data driven process analysis and optimization for additive manufacturing[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 25(2): 308-321.
- [63] RIVERA F J, ARCINIEGAS A J. Additive manufacturing methods: Techniques, materials, and closed-loop control applications[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(1): 17-31.
- [64] COMAS T F, DIAO C L, DING J L, et al. A passive imaging system for geometry measurement for the plasma arc welding process[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017(64): 7201-7209.
- [65] BONACCORSO F, CANTELLI L, MUSCATO G. An arc welding robot control for a shaped metal deposition plant: Modular software interface and sensors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011(58): 3126-3132.
- [66] ZHU B B, XIONG J. Increasing deposition height stability in robotic GTA additive manufacturing based on arc voltage sensing and control[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020(65): 101977.
- [67] SHEVCHIK S A, KENEL C, LEINENBACH C, et al. Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 598-604.
- [68] 马琳杰. 基于深度学习的金属激光熔化沉积熔池状态识别方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
MA Linjie. The research of identifying molten pool state of laser-based direct energy deposition based on deep learning[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [69] KHANZADEH M, CHOWDHURY S, MARUFUZZAMAN M, et al. Porosity prediction: Supervised-learning of thermal history for direct laser deposition[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 47: 69-82.
- [70] SCIME L, BEUTH J. Using machine learning to identify in-situ melt pool signatures indicative of flaw formation in a laser powder bed fusion additive manufacturing process[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 25: 151-165.
- [71] YEA D, FUHB J, ZHANG B Y, et al. In situ monitoring of selective laser melting using plume and spatter signatures by deep belief networks[J]. *ISA Trans* 2018, 81: 96-104.
- [72] BODI Y, GABRIEL M, AARON C, et al. Machine-learning-based monitoring of laser powder bed fusion [J]. *Advanced materials technologies*, 2018, 3(12): 1800136.
- [73] XIONG J, ZHU B, CHEN H, et al. Peak elimination of cross structures in wire and arc additive manufacturing using closed-loop control[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 58(5619): 368-376.
- [74] XIONG J, YIN Z, ZHANG W. Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 233: 100-106.
- [75] HERALI A, CHRISTIANSSON A K, LENNARTSON B. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1230-1241.
- [76] GIRI S, PAUL C P, KUMAR A, et al. Studies on closed loop laser power control in a dynamic fashion through temperature distribution measurement in LAM system[J]. *International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering*, 2016, 8(5): 6900-6909.
- [77] NASSAR A R, KEIST J S, REUTZEL E W, et al. Intra-layer closed-loop control of build plan during directed energy additive manufacturing of Ti-6Al-4V [J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 6: 39-52.
- [78] 黄阿童. 基于机器视觉的增材制造铺粉缺陷在线检测方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
HUANG Atong. Research on the online detection method of powder coating defects in additive manufacturing based on machine vision[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [79] CHANG S, ZHANG H, XU H, et al. Closed-loop control of droplet transfer in electron-beam freeform fabrication[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 923.