

# 丝材定向能量沉积增材制造在线监测与过程控制综述

赵竞杰<sup>1</sup>, 徐婧<sup>1</sup>, 李胜勇<sup>1</sup>, 朱龙生<sup>1</sup>, 戴蓝涛<sup>1</sup>, 苏长赢<sup>1</sup>, 洪宇翔<sup>1, 2</sup>

1. 中国计量大学机电工程学院 浙江杭州 310018

2. 浙江省智能制造质量大数据溯源与应用重点实验室 浙江杭州 310018

**摘要:** 丝材定向能量沉积 (W-DED) 是以丝材为原材料的一种增材制造技术, 具有高效率、高精度、高材料利用率的特点。然而, 在丝材熔化与沉积过程中, 可能因过度热输入而导致沉积缺陷的形成。因此, 需要使用在线监测技术对沉积过程中的熔池和沉积层等对象进行监测, 从而实现对沉积工艺参数的控制优化。多模态信号融合方法能够利用来自不同模态的物理信息来提升监测任务的准确性和稳定性。首先, 总结了丝材定向能量沉积技术在线监测对象与成形质量的关系; 然后, 对现有在线监测技术进行分类, 并对其相关沉积参数的过程控制方法进行整理; 最后, 总结了当前丝材定向能量沉积增材制造在线监测与过程控制方面的研究进展和挑战, 并展望了未来的研究方向。

**关键词:** 增材制造; 丝材定向能量沉积; 在线监测; 过程控制

## A review of online monitoring and process control for wire-based directed energy deposition additive manufacturing

ZHAO Jingjie<sup>1</sup>, XU Jing<sup>1</sup>, LI Shengyong<sup>1</sup>, ZHU Longsheng<sup>1</sup>, DAI Lantao<sup>1</sup>, SU Changying<sup>1</sup>, HONG Yuxiang<sup>1, 2</sup>

1. The School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Quality Big Data Tracing and Analysis of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

**Abstract:** Wire-based Directed Energy Deposition (W-DED) is an additive manufacturing technology that uses wire as the feedstock, characterized by its high efficiency, precision, and utilization rate. However, the process of melting and depositing the wire material may lead to the formation of deposition defects due to excessive heat input. Consequently, it is necessary to employ online monitoring techniques to observe the molten pool and deposited layers during the deposition process, thereby optimizing the control of the deposition process parameters. Multimodal signal fusion methods can enhance the accuracy and stability of monitoring tasks by utilizing physical information from different modalities. This paper first summarizes the relationship between the online monitoring targets of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51605251); 浙江省自然科学基金 (LY22E050009); 浙江省属高校基本科研业务费专项资金资助 (2023YW41)。

第一作者: 赵竞杰, 在读研究生, 研究方向为增材制造检测与控制, E-mail: s24010811041@cjl.u.edu.cn。

通信作者: 洪宇翔, 副教授、硕士生导师, 研究方向为智能化焊接与增材制造, E-mail: hongyuxiang@cjl.u.edu.cn。

W-DED technology and the quality of the formed parts. It then categorizes the existing online monitoring techniques and compiles their related process control methods for deposition parameters. Lastly, the paper reviews the current research progress and challenges in W-DED concerning online monitoring and process control, and proposes future research directions.

**Keywords:** additive manufacturing; wire-based directed energy deposition; online monitoring; process control

## 1 序言

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 是自20世纪80年代末的快速成形技术发展而来的一种集材料、结构、功能于一体的先进数字化制造技术, 也被称为3D打印<sup>[1, 2]</sup>。增材制造和机器人是工业4.0中信息物理系统 (Cyber-Physical Systems, CPS) 的重要组成部分<sup>[3]</sup>, 由于工业4.0背景下对重型工程应用的需求, 故金属增材制造受到了相当大的关注<sup>[4]</sup>。增材制造通过逐层堆叠的方法来连接材料并构建整体结构。区别于减材制造等传统加工技术, 这种方法使得制造出复杂形状结构件变得更加容易, 同时也减少了材料的浪费<sup>[5-7]</sup>。增材制造以三维数字模型为基础, 通过逐层叠加材料的方式来制造实体零件。在金属增材制造中, 粉末床熔融 (PBF) 和定向能量沉积 (DED) 是两种主流方法<sup>[8]</sup>。这两种技术根据采用的原材料与能量源的不同可以细分为激光粉末床熔融 (LPBF)、电子束粉末床熔融 (EB-PBF)、激光粉末沉积 (L-DED Powder)、电弧定向能量沉积 (WAAM)、等离子弧定向能量沉积 (P-DED)、激光熔丝沉积 (L-DED Wire) 与电子束熔丝沉积 (E-DED Wire), 具体分类如图1

所示。

与粉末床熔融相比, 原材料为丝材的定向能量沉积技术不受粉末床尺寸的限制, 可以连续添加材料, 因此适用于更大尺寸部件的制造。尤其是在航空航天等高端装备制造领域中, 定向能量沉积技术应用潜力更大<sup>[9]</sup>。采用粉末作为沉积原材料的优势是能量集中、熔池较小、沉积精度高。通过实时控制进料粉末的组成比, 可以制造出具有复杂梯度结构的异质金属零件。然而, 粉末材料成本昂贵、利用率和沉积效率低等问题也无法忽略<sup>[10]</sup>。采用丝材来代替粉末可以避免粉末污染及其他潜在的安全问题, 而且具有更高的原材料利用率、制造效率, 以及更大的工艺参数窗口, 制造过程更加灵活。定向能量沉积是一个随时间演化的多尺度、多物理场的耦合过程, 相较于粉末床熔融技术, 热输入积累使得定向能量沉积更容易出现熔池坍塌、尺寸精度低、晶粒粗大等缺陷<sup>[11]</sup>。此外, 因为定向能量沉积涉及高温热源与金属材料的相互作用, 这一过程中会产生复杂的热力学和应力演化现象, 进而引发材料变形、残余应力以及潜在的裂纹和断裂。在线监测技术利用传感器捕捉沉积过程中的温度变化、应

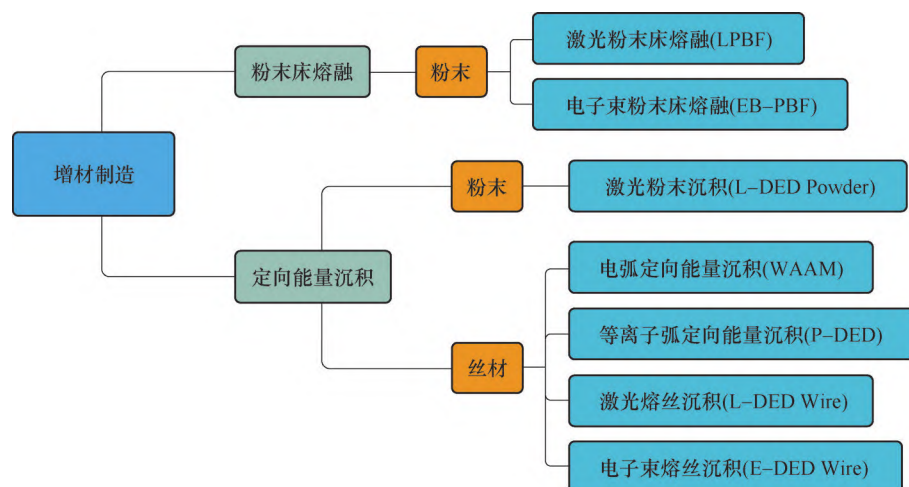


图1 金属增材制造分类

力分布等物理信息，为反馈控制工艺参数提供数据支持，有助于预防制造缺陷的产生；并可以基于监测数据及时调整热源功率、扫描路径和行驶速度等关键参数，从而提高零件的尺寸精度和力学性能。如果在沉积过程中缺乏在线监测，可能导致最终成形工件的缺陷不可控，因此在线监测在定向能量沉积中具有至关重要的地位。

近年来，国内外众多学者在金属增材制造领域展开广泛研究。NABAVI等<sup>[12]</sup>探讨了LPBF在冶金、温度和缺陷方面建模的最新进展，并根据特征和监测方法对各种建模方法进行分类，但却未关注原材料为丝材的定向能量沉积技术。CAI等<sup>[13]</sup>综述了LPBF、L-DED Powder和L-DED Wire三种类型的金属基激光增材制造的缺陷控制方法，但未涉及WAAM与E-DED Wire的在线监测技术。本文旨在对材料类型为丝材的定向能量沉积技术（WAAM、P-DED、L-DED Wire、E-DED Wire）的在线监测与过程控制技术进行梳理，以现有研究的在线监测对象（熔池几何尺寸与温度、熔滴过渡行为、送丝过程与沉积层几何尺寸）为分类标准，并对现有的W-DED在线监测的传感信号进行分类。之后，综述了对在线监测对象进行过程控制的相关研究内容。最后，展望了W-DED在线监测与过程控制的未来发展方向。

## 2 常见监测对象

在W-DED中，常见的监测对象有熔池几何尺寸与温度、熔滴过渡行为、送丝过程，以及沉积层几何尺寸与温度等。通过对这些研究对象进行监测，可以有效评估增材过程中的成形质量，包括成形精度、表面质量、缺陷等。

### 2.1 熔池行为

熔池行为指的是当高能束（如激光、电子束或等离子体、电弧）作用于金属丝材和基板时，材料熔化并形成的一个临时液态金属区域，其稳定性直接影响到沉积层的质量与熔池内部的温度分布。熔池过大或过小都可能导致沉积层厚度不均匀，进而影响外形尺寸的精度；熔池内部温度的分布则会影响到材料的熔化与固化过程，进而影响产品的材料性能（强度、硬度等）。ZALAMEDA等<sup>[14]</sup>采用热成像技术，研究了E-DED Wire中熔池温度与沉积物

表面质量的关系。LIN等<sup>[15]</sup>使用热处理技术研究了E-DED Wire中熔池温度与沉积层微观结构的关系。SHAIKH等<sup>[16]</sup>通过优化激光功率、脉冲宽度和焊枪行进速度等工艺参数，研究了L-DED Wire 中熔池行为与沉积层表面粗糙度的关系。CAI等<sup>[17]</sup>通过改变激光振荡模式、频率和振幅，研究了L-DED Wire 中熔池动态行为与沉积壁表面质量和结构密度的关系，提出熔池轮廓的周期性变化是产生波形外观缺陷的主要原因。不同激光振荡模式下20层薄壁件的成形特性如图2所示。ABE等<sup>[18]</sup>通过对WAAM中电弧放电电流与电压、电弧放电时间等工艺参数进行研究，讨论了其对熔池尺寸与沉积层几何形状的影响。热输入和层几何形状之间的关系如图3所示。

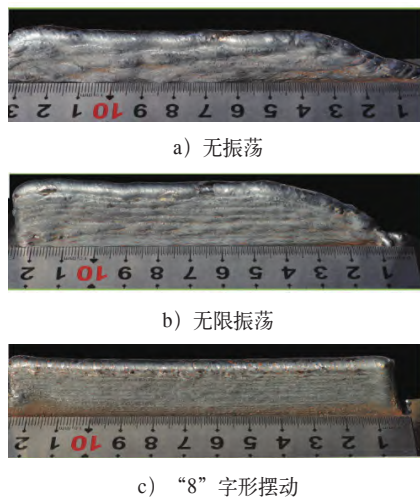


图2 不同激光振荡模式下20层薄壁件的成形特性<sup>[16]</sup>

### 2.2 熔滴过渡

熔滴过渡涉及熔融金属丝与熔池之间的动态交互，其稳定性直接关系到最终沉积层的均匀性和致密性。从宏观上来看，增材过程中的金属过渡模式可以分为球液滴模式，液滴-液桥过渡模式和固液桥传递模式<sup>[19]</sup>。其中，在固液桥传递模式中，会出现未熔化金属丝尖端刺穿，扰动熔池导致成形不稳定；在球液滴模式中，金属液滴由自由空间传递到熔池中，容易产生飞溅；在液滴-液桥过渡模式中，液滴因受表面张力而被拉入熔池中，熔池保持动态稳定，成形质量较好<sup>[20]</sup>。MIAO等<sup>[21]</sup>采用主/旁路电流协调控制方法，研究了P-DED中的熔滴过渡行为与沉积层成形质量和精度的关系，发现在液桥过渡模式下沉积出的金属薄壁结构挺拔，外观良好，沉积过程中熔池稳定可控。ZHU等<sup>[22]</sup>通过对电弧电压

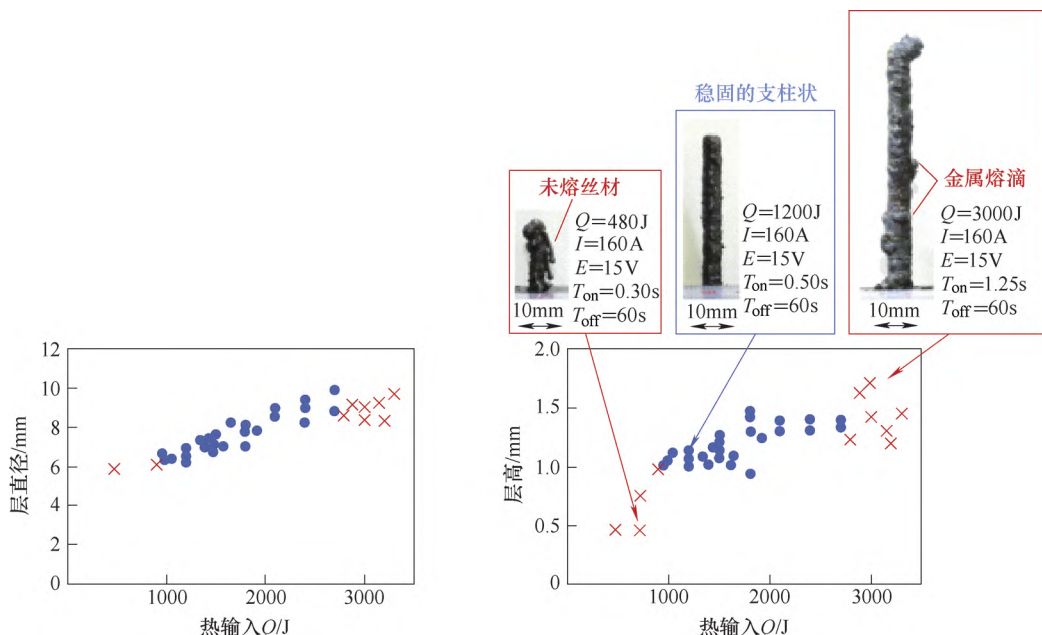


图3 热输入与层几何形状之间的关系<sup>[18]</sup>

与电流信号的采集与计算,研究了WAAM中熔滴过渡与沉积过程中的成形效率和质量的关系。不同传输模式下液滴的温度如图4所示。

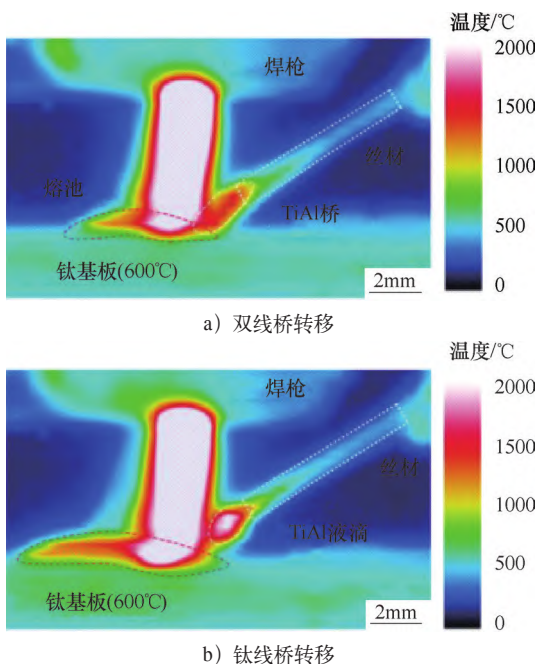


图4 不同传输模式下液滴的温度<sup>[20]</sup> ( $H=3\text{mm}$ )  
注:  $H$ 为焊枪距沉积层表面高度。

### 2.3 送丝过程

送丝是决定沉积成形质量的重要环节。如果送丝过程不稳定,则可能导致丝材在熔池中熔化不充分,造成沉积层内部缺陷,进而影响丝材在熔池中的熔化状态和沉积层的几何尺寸。在送丝过程

中,送丝速度、沉积路径是影响送丝过程稳定性的重要因素。HUANG等<sup>[23]</sup>采用L-DED Wire打印了单轨与多轨沉积层,研究了送丝方向与送丝角度对沉积层表面粗糙度的影响。研究表明,前进料的送丝方式效果最好,具有较高的沉积速率,但还需考虑丝材与熔池的接触位置来对工艺进行综合评价。两种送丝方式如图5所示。ABIOYE等<sup>[24]</sup>利用光学显微镜和扫描电镜对沉积径迹的微观结构进行了分析,研究了L-DED Wire中送丝角度与沉积层宏观硬度的关系,并确定了前送丝的最佳角度为 $42^\circ$ 。TAKUSHIMA等<sup>[25]</sup>采用线截面法测量沉积层高度,研究了L-DED Wire中送丝速度与沉积层高度的关系。

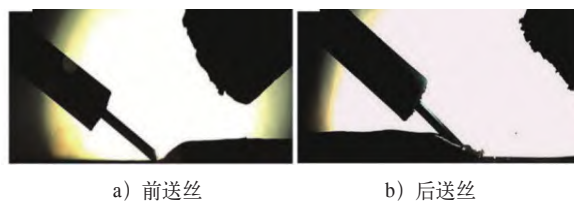


图5 送丝方式<sup>[23]</sup>

### 2.4 沉积层几何参数与温度

沉积层的几何参数,包括层高、层宽、层厚等,决定了最终产品的尺寸精度、表面粗糙度和力学性能。实时监测这些参数,可以确保每一层沉积的均匀性和一致性,及时发现层间间隙、层厚不均、沉积过量或沉积不足等问题<sup>[26]</sup>。MOTTA等<sup>[27]</sup>

采用了高速成像系统研究了L-DED Wire中沉积层几何尺寸与原位缺陷的形成。沉积层温度过高可能导致熔池过大,使成形件的外形尺寸难以控制,表面出现粗糙或过度熔化,甚至产生热裂纹等缺陷;同时,过高的温度还可能造成材料性能下降,如硬度降低、抗拉强度减小等。相反,若沉积层温度过低,则可能导致熔池过小、熔化不充分,影响材料间的结合,造成沉积层内部孔洞、夹渣等缺陷,进而影响成形件的致密性和力学性能。YANG等<sup>[28]</sup>利用红外摄像机采集了沉积层的表面温度,研究了WAAM中沉积层层间冷却温度对成形质量的影响。不同层间冷却时间下的沉积件如图6所示。

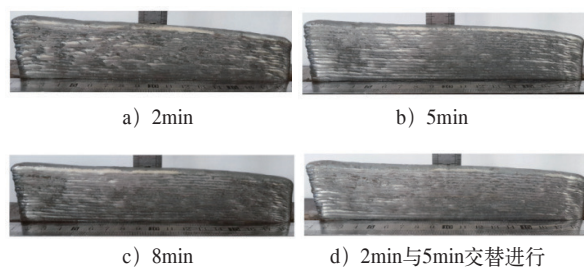


图6 不同层间冷却时间下的沉积件<sup>[28]</sup>

### 3 W-DED过程的信号类型及其监测

在增材制造过程中,工件的制作依赖于精确的计算机辅助设计(CAD)模型,但实际上制作出的成品工件会存在尺寸变化、表面粗糙等模型设计过程中难以预测的缺陷。现有的缺陷检测方法主要依赖于后制造检测,如X射线计算机断层扫描(CT)、超声波检查等。然而,这些检测技术非常昂贵和耗时。因此,针对丝材定向能量沉积过程开发在线检测与缺陷控制方法是非常必要的。常用的监测传感信号可分为视觉信号(熔池与沉积层几何尺寸、熔滴过渡行为、焊枪距离沉积层表面高度等)、电信号(表征液滴的转移行为、电弧长度和接触尖端到工件的距离)和热信号(监测沉积件的温度、表征熔池大小)。各传感信号的特征如图7所示。

#### 3.1 视觉信号

视觉传感器基于光的感知信号,具有非接触、信息丰富、灵敏度高、精度高等优点,并且可以直观地收集熔池图像、沉积层几何尺寸、焊枪距离沉积层表面的距离等信息,因此在丝材定向能量沉积中得到了广泛应用。一些研究人员通过摄像机实时监测沉积过程,通过在沉积头上放置同轴照相机,

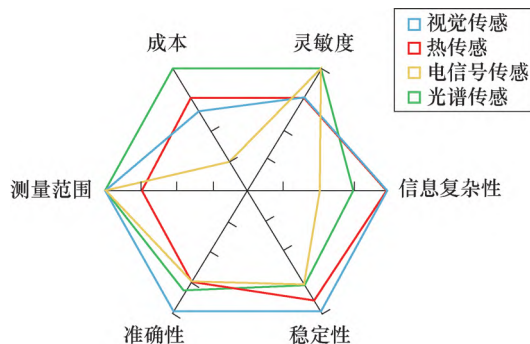


图7 各传感信号的特征

可以通过改变功率或扫描速度等输入参数来监测熔池的尺寸并对其进行控制<sup>[29]</sup>。然而,随着监测精度要求的提升,需要对视觉传感系统进行进一步的改良。常用的改良方法有两种:一是根据不同应用需求开发新的视觉传感设备;二是结合计算机技术、图像处理技术对信号进行处理。

在对熔池行为与熔滴过渡的监测中,CAI等<sup>[30]</sup>通过利用卷积神经网络(CNN)对L-DED Wire中熔池图像进行监测,研究了不同激光束和电弧的距离与沉积层表面外观的关系。LI等<sup>[31]</sup>利用卷积神经网络(CNN)对L-DED Wire中熔池图像进行训练,研究了不同激光功率与沉积层表面平面度的关系。WANG等<sup>[32]</sup>使用高速摄像机来监测P-DED中Fe-30Al合金的双丝传输过程,实现了对熔滴过渡行为的监测,并最终达到控制成形缺陷的目的。TAMINGER等<sup>[33]</sup>通过集成成像系统(CMOS相机、CCD相机)实时监测和评估E-DED Wire过程中的熔池尺寸与熔池温度,研究了过量热输入与沉积产品外部缺陷的关系。在对沉积层几何尺寸的监测中,GARMENDIA等<sup>[34]</sup>使用结构化激光光线的三维扫描来监测L-DED Wire沉积过程的高度偏差,通过调整扫描速度达到控制沉积层缺陷,从而制取全致密零件。

视觉传感器也可以对焊枪喷嘴到沉积层顶层距离(NTLD)进行在线监测,进而确保沉积过程中的热输入和熔池控制,从而优化制造过程并获得所需的沉积层特性和构件质量。如果NTLD过长,会使气体保护效果差,沉积珠产生气孔,从而导致成品件的成形质量变差;如果NTLD过短,焊枪喷嘴可能会触碰顶层表面,导致丝材过早熔化,破坏熔滴转移行为或终止后续沉积过程。TAKUSHIMA等<sup>[35]</sup>对传统光切法进行了改良,从激光加工头的侧面投

射两束交叉的线光束对L-DED Wire中激光加工光斑前的高度位移进行了测量,以达到控制沉积层表面平面度的目的。FRANKE等<sup>[36]</sup>运用图像处理技术克服了在光照条件高度波动的环境中进行距离测量的问题,采用焊接摄像机实现了WAAM中焊枪到工件的距离和丝材水平位置的监测,以达到控制工件几何保真度及力学性能的目的。ZHANG等<sup>[37]</sup>采用视觉传感器与图像处理技术(中值滤波、Sobel算法、Canny算法和Hough变换),实现了WAAM对NTLD的监测,以达到控制沉积层外形尺寸的目的。XIONG等<sup>[38]</sup>采用多通道单目视觉传感器与Marr-Hildreth算法实现了WAAM中当前层到喷嘴的距离(CLND)、前一层到喷嘴的距离(PLND)和沉积层宽度3个对象的监测,并评估了所设计系统的校准能力。实际沉积过程中3项监测值如图8所示。

此外,视觉传感器还可以对E-DED Wire和L-DED Wire中的光斑大小进行测量。激光束强度与焦点光斑大小成反比,为了控制热输入的大小,光斑大小的选择应根据丝材直径进行参考。CHANG等<sup>[39]</sup>通过CMOS传感器对E-DED Wire中电子束散斑进行监测,以达到控制沉积层因过量热输入而导致的缺陷问题。GOFFIN等<sup>[40]</sup>利用光学显微镜对L-DED Wire中的焦点光斑进行监测,从而揭示了焦点光斑大小与沉积层表面张力和黏度的关系。

### 3.2 热信号

热信号的监测主要用于对熔池行为与熔滴过渡行为的监测,热信号能够提供关于熔池温度分布和熔滴过渡行为的直接信息,这对于控制成形质量和工艺稳定性极为关键。

GAO等<sup>[41]</sup>使用红外成像对L-DED Wire中熔池的

熔融流动和温度梯度变化进行了监测,以达到对沉积样品力学性能的控制。BERNAUER等<sup>[42]</sup>利用光电测温仪对L-DED Wire中的熔池温度进行了监测,从而达到对沉积样品微观结构的控制。KHANZADEH等<sup>[43]</sup>利用热监测系统与X射线断层扫描的方法对L-DED Wire中熔池特征进行监测,并使用监督机器学习对孔隙度进行预测,以此研究了熔池特征与增材制造成品零件缺陷(孔隙)产生之间的关系。使用监督机器学习的孔隙度预测程序演示如图9所示。

CHAURASIA等<sup>[44]</sup>利用双色红外热相机来对WAAM中熔池表面和凝固表面的温度场信息进行捕捉,以达到控制沉积层表面平面度的目的。JEGOU等<sup>[45]</sup>使用了包括红外热像仪、多波段热像仪等设备对WAAM中熔池温度和表面温度进行监测,以达到控制成形质量的目的。DELLARRE等<sup>[46]</sup>利用工业近红外摄像机(CMOS或CCD摄像机)作为传感方式,用于监测铝合金WAAM中熔池的热度指标,并讨论了熔池温度与沉积样品缺陷(气孔)的关系。HAUSER等<sup>[47]</sup>研究了WAAM中导丝角度对沉积件几何形状和孔隙度的影响,使用高速摄像系统和热电偶等传感器来监测铝合金材料的熔池行为和几何尺寸。

### 3.3 电信号

对于电信号的监测常用电弧电压传感器、电弧电流传感器来进行。相较于视觉传感,电弧传感检测系统的时间滞后很小,且由于没有固定的传感器,因此焊枪可以保持其原有的自由度。然而,电信号采样的缺点是所采集的电信号会存在噪声干扰,因此必须设计出合理的降噪方法,以提高电信号传感的监测精度。

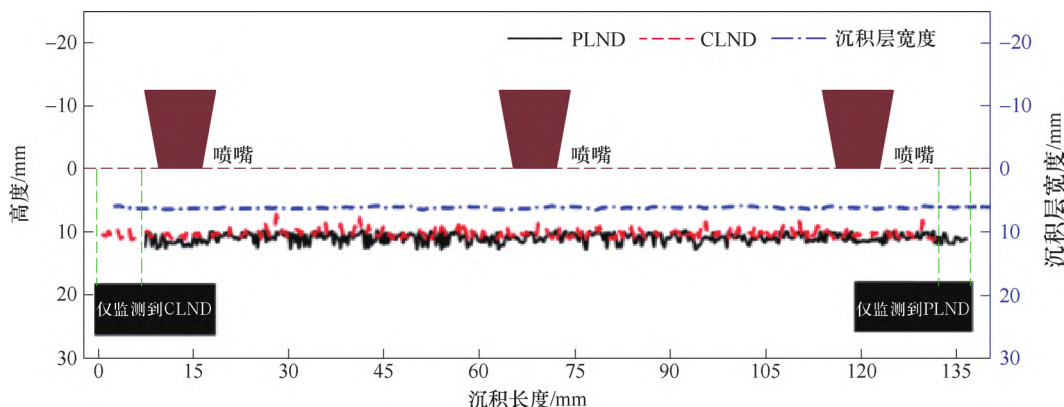


图8 实际沉积过程中3项监测值<sup>[38]</sup>

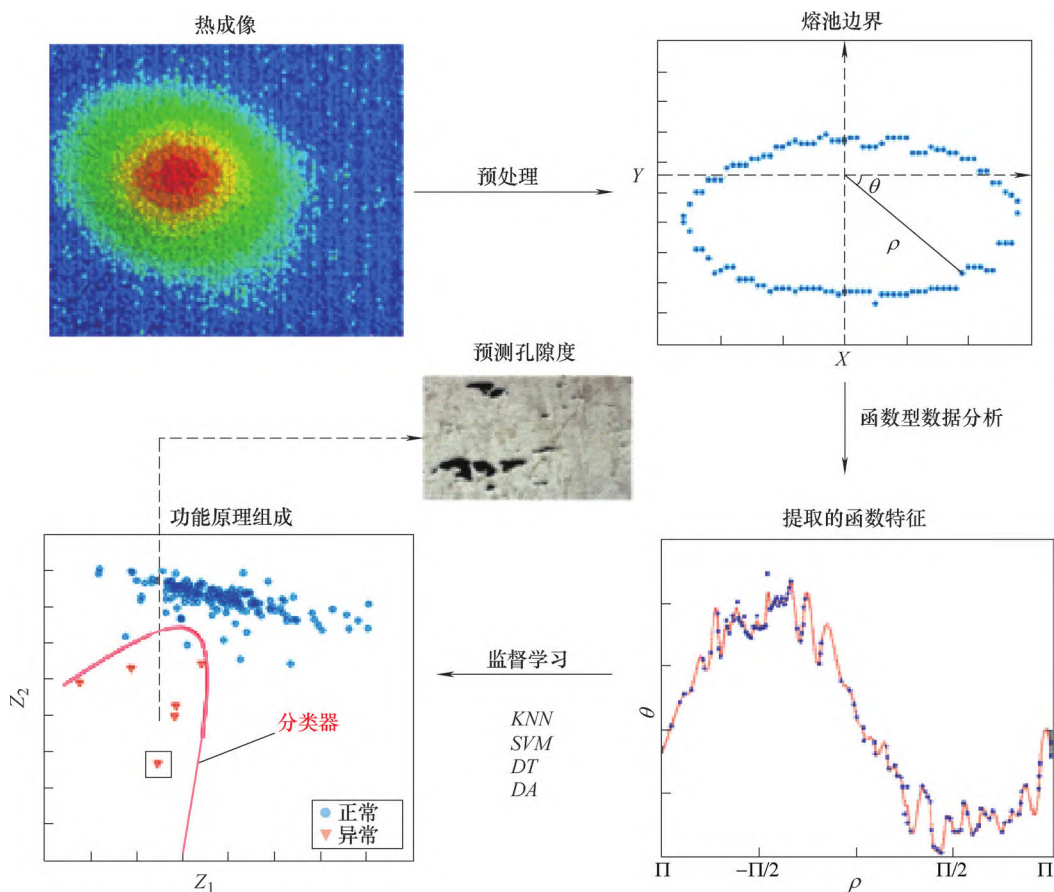


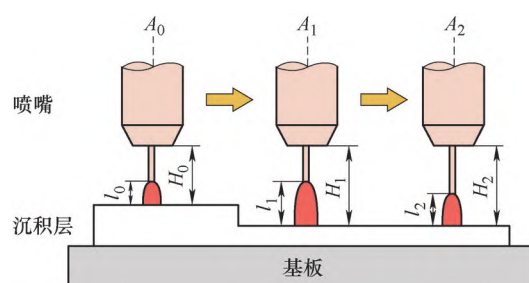
图9 使用监督机器学习的孔隙度预测程序演示<sup>[43]</sup>

XIONG等<sup>[48]</sup>使用电弧电流传感器和电弧电压传感器来采集WAAM中主电弧和旁路电弧的电流和电压，以达到控制成形质量的目的。XIONG等<sup>[49]</sup>提出保持弧长恒定可以间接保证稳定的沉积高度，使用电弧传感系统对脉冲自相关信号进行采样，并利用经验模态分解降噪方法去除脉冲电弧电压中的噪声，从而实现了WAAM中沉积层高度的监测。LI等<sup>[50]</sup>使用电弧电流和电弧电压传感器监测了WAAM中3种液滴传递模式下电弧信号与喷嘴到顶层距离（NTLD）的关系，以达到控制沉积样品表面平整度的目的。不同NTLD下的电弧感应机制如图10所示。

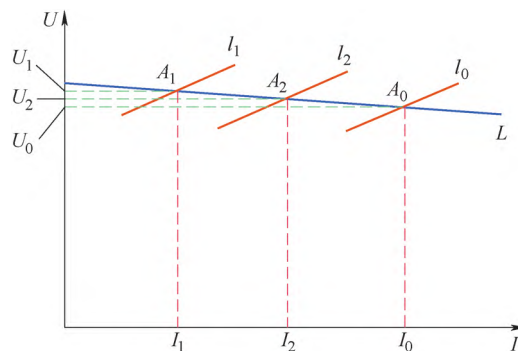
在L-DED Wire中，电信号的监测常用于添加了辅助工艺的L-DED Wire。通过增加电源来预热焊丝，可以保持较低热输入并降低工艺对焊丝相对于激光束位置的敏感性。KISIELEWICZ等<sup>[51]</sup>利用两个PLC模块EL3751和EL3314对电压和电流进行了监测，以达到消除沉积样品熔合缺陷的目的。

### 3.4 光谱信号

对光谱信号的实时监测有助于操作者掌握熔池状况和材料组成，以确保沉积样品的品质和材料性



a) NTLD的变化示意



b) GMA自我调节特性示意

图10 不同NTLD下的电弧感应机制<sup>[50]</sup>

能达到预期标准。

AUCOTT等<sup>[52]</sup>使用X射线成像技术来观察和跟

踪WAAM中金属熔池中的流动行为。然而,由于X射线成像技术的限制,只能观察到熔池流动的二维投影图像,无法提供三维空间信息,因此需要进一步改进成像技术,以获得更全面的熔池流动信息。在线光谱分析装置能够同步对多个通道、多种成分进行检测,ZHAO等<sup>[53]</sup>使用在线光谱分析装置、利用光谱和视觉传感方式对WAAM中的光谱数据和熔池图像进行监测,从而控制了沉积样品的成形质量。在激光熔丝沉积过程中,通过实时监测光谱信号,可以精确地调整沉积参数,确保熔池的形成和材料的熔化过程得到优化,从而获得高质量的沉积层。HU等<sup>[54]</sup>利用微型光谱仪来监测L-DED Wire中的熔池温度、晶粒尺寸和熔池等离子体,以达到控制沉积样品材料性能的目的。在电子束熔丝沉积过程中,光谱信号的监测同样重要。电子束与激光不同,其能量和穿透力更强,因此需要通过监测光谱信号来控制电子束的功率和沉积速度,以保证熔池的稳定性和沉积层的均匀性<sup>[55]</sup>。但是,现阶段在电子束熔丝沉积中,利用光谱信号对熔池进行监测的相关研究较少,已有的研究大多采用能谱分析方法对打印样品的微观结构进行分析。

### 3.5 多模态信号融合

由于W-DED过程涉及复杂的物理化学反应,因此单一传感器往往难以全面捕捉熔池行为和沉积层质量的所有关键信息。多模态信号融合监测结合了不同类型传感器提供的信号,如光学、热学、声学 and 电学信号,它们从不同角度反映了熔池的温度分布、形状变化、熔滴转移行为和材料状态等信息,从而显著提升制造过程的可控性和产品质量。

REISCH等<sup>[56]</sup>使用多种传感方式,包括声学传感器、电流和电压传感器以及激光轮廓仪,对沉积层样品尺寸、形状和温度进行监测,进而对样品的成形缺陷进行控制。然而,研究并未明确提到多模态信号处理的具体方法和算法,因此监测系统的实时性和数据分析的能力还有待提高。JEON等<sup>[57]</sup>采用同轴红外(IR)摄像机、激光扫描仪分别提取熔池与沉积层的几何尺寸,并将提取的信号作为人工神经网络(ANN)模型的输入来测量WAAM过程中的熔池深度,从而控制了沉积层样品的材料性能。YU等<sup>[58]</sup>使用视觉传感和红外传感方式分别收集了WAAM中熔池的视觉图像和工件侧壁的温度信息,

从而建立了一个神经网络模型对机器人的轨迹偏差进行监测。轨迹偏差的整个预测过程如图11所示。

CHAURASIA等<sup>[59]</sup>利用高频数据采集系统和热感摄像机同步监测WAAM中的电弧电流、电压和熔池表面温度,以达到对沉积层样品外形尺寸的控制。SHE等<sup>[60]</sup>利用等离子体光谱与多传感器监测系统,对E-DED Wire中熔池图像和激光诱导等离子体光谱进行了监测,进一步实现了对沉积层样品孔洞缺陷的控制。

## 4 W-DED过程控制技术

在沉积过程中,随着沉积层数的增多,调控沉积层的形态和尺寸变得相当困难,因此会对沉积样品的几何精度造成不良影响。由于蓄热效应,在熔池接触到沉积层边缘的情况下,珠粒的形状难以精确控制。因此,利用先前获得的传感信号对工艺参数进行调整和优化是非常有必要的。目前,主要有两种构件质量的过程控制方法,分别为非闭环控制和闭环控制。

### 4.1 非闭环控制

在设计过程中,非闭环控制依据部件的结构特性和先验知识,设定部件各个部位的加工工艺参数,确保部件性能和品质。CHEN等<sup>[61]</sup>使用试验和数值模拟两种方法对P-DED中填充线的熔化和磁珠形成过程,以及熔池的温度分布和流速进行监测。之后通过动态改变填充线的几何形状和尺寸来调节填充线的熔化和熔滴过渡行为,从而达到控制沉积速率和沉积珠形成的目的。ZHANG等<sup>[62]</sup>利用光学显微镜对WAAM中沉积样品的表面质量进行监测,通过动态调整旁通电流,以达到控制沉积样品孔隙度缺陷的目的。HONG等<sup>[63]</sup>建立了基于微等离子体电弧定向能沉积的线弧稳定沉积模型,利用视觉传感器对沉积层侧面轮廓进行监测,之后通过动态调整线材尺寸、电弧尺寸和线材-电弧位置偏差等参数,实现了对沉积过程稳定性的控制。

### 4.2 闭环控制

尽管非闭环控制具有结构简单、成本低的优点,但其难以满足高精度制造需求,在精密制造领域受限。因此,闭环控制是更为理想的选择。XIONG等<sup>[64]</sup>使用被动视觉传感系统来监测WAAM过程中的沉积层宽度,并设计了一种模糊控制器,

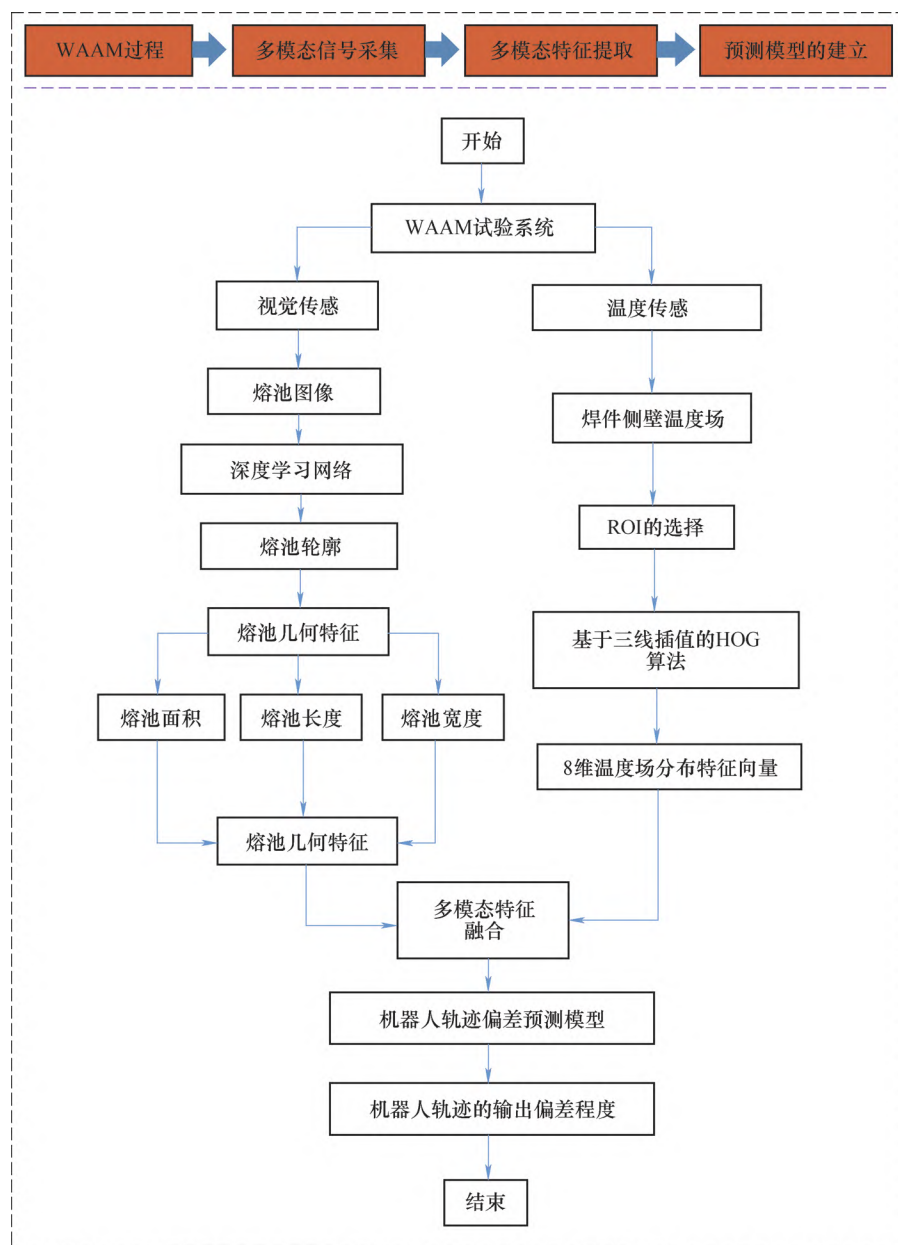


图11 轨迹偏差的预测过程<sup>[58]</sup>

通过调节电弧电流来保持预期的层宽。SHI等<sup>[65]</sup>使用被动视觉传感器来监测WAAM中当前沉积层与上一层的沉积高度，并利用图像处理算法来确定前馈高度和反馈高度，之后采用前馈控制和反馈控制分别对焊枪距沉积层表面的距离与沉积层宽度进行了控制，并分析了不同控制参数与沉积层样品平面度的关系。所设计的前馈与反馈控制器如图12所示。YU等<sup>[66]</sup>采用霍尔电压传感器对WAAM中拐点处反映驼峰高度的电弧电压进行采样，提出了一种消噪算法来去除采样电弧电压中的噪声。之后设计了一个闭环控制器，通过调节送丝速度来控制电弧峰值电压，

以达到控制沉积高度稳定性的目的。XIONG等<sup>[67]</sup>利用被动视觉传感器监测WAAM中熔池宽度，并利用电弧电压传感器进行校准，之后设计了参数自调整模糊控制器（PSA-Fuzzy），通过调节峰值电流来控制沉积层宽度。CHANG等<sup>[68]</sup>利用机器视觉实时监控E-DED Wire过程中的熔滴过渡行为，在此基础上设计了闭环控制器，实现了对沉积层样品缺陷（飞溅）的控制。LIANG等<sup>[69]</sup>设计了一个基于吸收电流的非视觉闭环控制系统，通过分析E-DED Wire中吸收电流信号的变化来识别液滴转移状态与液桥转移现象的偏差，并以液滴传递距离为调节

量，及时有效地调整液滴传递距离，恢复液桥传递状态。对时变熔池进行量化和表征的现有文献一般采用两种方法：利用熔池形态特征和温度特征。大多数关于熔池建模、监测和控制的研究都集中在熔池的形态特征上，而另一种研究是利用监测到的熔池红外（IR）热数据流进行闭环控制。DED通常依赖高能束来熔化沉积材料的颗粒。因此，热成像是过程监控的理想选择。在L-DED Wire中，对熔池的温度特征进行测量，从而控制激光功率是主流的监测与控制方法。GIBSON等<sup>[70, 71]</sup>使用热成像相机对L-DED Wire过程中的熔池温度进行采集，并设计了闭环控制器，通过操纵激光功率以控制熔池尺寸，实现对焊头几何形状的控制，进而减少沉积缺陷。

## 5 总结与展望

丝材定向能量沉积作为一种高效、高精度的增材制造方法，在推动制造业创新发展方面展现出了巨大潜力。本文深入探讨了在线监测与过程控制技术在丝材定向能量沉积过程中的应用现状，分析了监测对象与沉积样品成形质量之间的关系，并讨论了相关沉积参数的在线监测与控制方法。基于对近几年文献的深入分析，本文总结与展望如下。

1) 多传感器集成和数据融合可能是未来增材制造探索的关键技术。目前，单一信号监测已难以满足复杂沉积过程的监控需求，而多模态信号融合技术正逐渐成为在线监测领域的发展主流。现有的多传感器同步传感技术仍存在信号间相互干扰、数据传输不稳定，以及信号处理能力较弱等问题，且

各信号间复杂的耦合机制尚不明晰，未来应深入研究。

2) 现有研究主要从宏观层面通过反馈控制来提高产品几何精度，而在材料性能领域关注度不足。在航空航天这类有着耐高压、耐高温、耐腐蚀或脆化等材料性能需求的特殊场景中，在关注沉积产品几何精度的同时，金属微观结构动态特征同样值得研究，尤其是针对稀释深度、热应力、相变等难以直接监测的特征，有必要进行监测与控制。

3) 目前，国内外学者主要聚焦于熔池与沉积层的几何参数及温度特性的在线监测，通过提取各类传感信号来实时调整沉积过程中的工艺参数，包括激光功率、电弧电流与电压、送丝速度、焊枪行进速度及焊枪至沉积层表面的距离等。未来还应开发研究新的制造模式，实现对多参量数据的高效综合处理，有效地将信息与物理过程联系起来，做到增材制造过程数据溯源，优化生产工艺。

4) 在追求更高沉积精度与速度的增材制造过程中，针对不同材料的特性（如铜对近红外光的高反射性）来优化工艺参数选择显得尤为重要。然而，当前文献中针对特定材料规格选择合适的激光器及其波长的研究仍显不足，这一领域存在显著的研究空白，亟待填补。

综上所述，本文总结了当前丝材定向能量沉积在线监测与过程控制方面的研究进展，指出了该领域面临的挑战。同时，本文也展望了未来的研究方向，以期为实现更高效率、更高精度的丝材定向能量沉积增材制造提供坚实的理论基础和技术支撑。

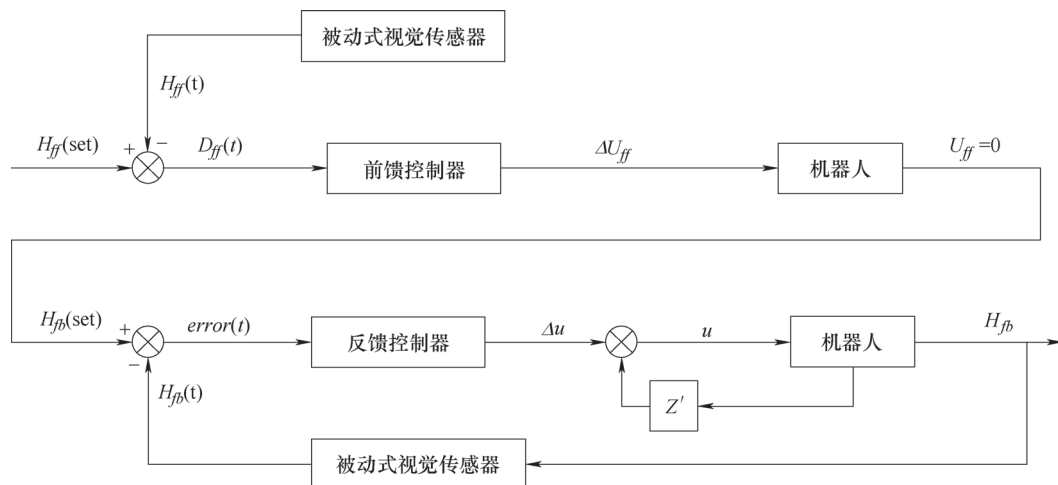


图12 前馈与反馈控制器<sup>[64]</sup>

# 参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZHOU X, HUANG X, ZHANG L, et al. Preparation of high thermal conductivity vat photopolymerization used UV-curable resin synergistically enhanced by silicon nitride and boron nitride[J]. Ceramics International, 2024, 50 (13PA) : 23441-23450.
- [3] HALEEM A, JAVAID M. Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review[J]. Journal of Industrial Integration and Management, 2019, 4 (4) : 1930001.
- [4] DILBEROGLU U M, GHAREHPAPAGH B, YAMAN U, et al. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 545-554.
- [5] SILVA D G E S, SILVA D R N, SANTOS N D V J, et al. Accuracy, adaptation and margin quality of monolithic zirconia crowns fabricated by 3D printing versus subtractive manufacturing technique: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies[J]. Journal of Dentistry, 2024: 105089-105089.
- [6] TIAN Z, LIU J. Current situation and prospect of arc additive manufacturing technology[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science, 2023, 6 (12) : 7-15.
- [7] LIU J N, XU Y L, GE Y, et al. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111 (12) : 1-50.
- [8] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing) : A review of materials, methods, applications and challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172-196.
- [9] PATEL M, KRALETI P K, WAGH R. Gas Turbine Nozzle Repair by Additive Manufacturing: Gas Turbine India Conference[C]. American Society of Mechanical Engineers, 2023, 87721: V001T09A001.
- [10] CHEN X, KONG F, FU Y, et al. A review on wire-arc additive manufacturing: typical defects, detection approaches, and multisensor data fusion-based model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117: 707-727.
- [11] RAMÍREZ I S, MÁRQUEZ F P G, PAPAELIAS M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 66: 260-286.
- [12] NABAVI S F, DALIR H, FARSHIDIANFAR A. A comprehensive review of recent advances in laser powder bed fusion characteristics modeling: metallurgical and defects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132 (5) : 2233-2269.
- [13] CAI Y, XIONG J, CHEN H, et al. A review of in-situ monitoring and process control system in metal-based laser additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 70: 309-326.
- [14] ZALAMEDA J N, BURKE E R, HAFLEY R A, et al. Thermal imaging for assessment of electron-beam freeform fabrication (EBF3) additive manufacturing deposits: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV. [C]. USA: SPIE, 2013, 8705: 174-181.
- [15] LIN S, CHEN K, HE W, et al. Custom-designed heat treatment simultaneously resolves multiple challenges facing 3D-printed single-crystal superalloys[J]. Materials & Design, 2022, 222: 111075.
- [16] SHAIKH M O, CHEN C C, CHIANG H C, et al. Additive manufacturing using fine wire-based laser metal deposition[J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26 (3) : 473-483.
- [17] CAI Y, WANG Y, CHEN H, et al. Molten pool behaviors and forming characteristics in wire-laser directed energy deposition with beam oscillation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 326: 118326.

- [18] ABE T, SASAHARA H. Layer geometry control for the fabrication of lattice structures by wire and arc additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 639-648.
- [19] CHEN X, WANG C, DING J, et al. A three-dimensional wire-feeding model for heat and metal transfer, fluid flow, and bead shape in wire plasma arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 83: 300-312.
- [20] WANG C, SUDER W, DING J, et al. The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116842.
- [21] MIAO Y, YIN C, WEI C, et al. An investigation on droplet transfer for bypass-current wire-heating PAW[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 355-363.
- [22] ZHU L, LUO Y, HAN J, et al. Energy characteristics of droplet transfer in wire-arc additive manufacturing based on the analysis of arc signals[J]. Measurement, 2019, 134: 804-813.
- [23] HUANG W, CHEN S, XIAO J, et al. Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106627.
- [24] ABIOYE T E, MEDRANO-TELLEZ A, FARAYIBI P K, et al. Laser metal deposition of multi-track walls of 308LSi stainless steel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2017, 32 (14) : 1660-1666.
- [25] TAKUSHIMA S, MORITA D, SHINOHARA N, et al. Optical in-process height measurement system for process control of laser metal-wire deposition[J]. Precision Engineering, 2020, 62: 23-29.
- [26] XIA C, PAN Z, POLDEN J, et al. A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system[J]. Journal of manufacturing systems, 2020, 57: 31-45.
- [27] MOTTA M, DEMIR A G, PREVITALI B. High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 497-507.
- [28] YANG D, WANG G, ZHANG G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 215-224.
- [29] TANG Z, WEI Q, GAO Z, et al. 2000W Blue laser directed energy deposition of AlSi7Mg: process parameters, molten pool characteristics, and appearance defects[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2023, 18 (1) : e2120405.
- [30] CAI Y, LI C, CHEN H, et al. Monitoring of distance between laser beam and arc in laser-arc hybrid welding based on deep learning[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 174: 110562.
- [31] LI C, CHEN H, XIONG J. Monitoring weld penetration of laser-arc hybrid welding joints without full-penetration requirement based on deep learning[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 172: 110538.
- [32] WANG L, SHEN C, ZHANG P, et al. Fabrication of Fe-30Al alloy using plasma arc welding powered twin-wire directed energy deposition arc process: Droplet transfer, microstructure, and mechanical property investigation[J]. Intermetallics, 2023, 161: 107961.
- [33] TAMINGER K M, DOMACK C S, ZALAMEDA J N, et al. In-process thermal imaging of the electron beam freeform fabrication process: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII[C]. USA: SPIE, 2016, 9861: 986102.
- [34] GARMENDIA I, PUJANA J, LAMIKIZ A, et al. Development of an intra-layer adaptive toolpath generation control procedure in the laser metal wire deposition process[J]. Materials, 2019, 12 (3) : 352.
- [35] TAKUSHIMA S, SHINOHARA N, MORITA D, et al. In process height displacement measurement using crossed line beams for process control of laser wire deposition[J]. International Journal of Automation Technology, 2021, 15 (5) : 715-727.

- [36] FRANKE J, HEINRICH F, REISCH R T. Vision based process monitoring in wire arc additive manufacturin (WAAM) [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024: 1-11.
- [37] ZHANG Y, XIONG J, LI D, et al. Height control in GMA-AM using external wire as controlling variable[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2023, 38 (8) : 971-979.
- [38] XIONG J, ZHANG K. Monitoring multiple geometrical dimensions in WAAM based on a multi-channel monocular visual sensor[J]. Measurement, 2022, 204: 112097.
- [39] CHANG S, ZHANG H, XU H, et al. Online measurement of deposit surface in electron beam freeform fabrication[J]. Sensors, 2019, 19 (18) : 4001.
- [40] GOFFIN N, TYRER J R, JONES L C R, et al. Simulated and experimental analysis of laser beam energy profiles to improve efficiency in wire-fed laser deposition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114 (9) : 3021-3036.
- [41] GAO L, BHATTACHARYYA J, LIN W, et al. Tailoring material microstructure and property in wire-laser directed energy deposition through a wiggle deposition strategy[J]. Additive Manufacturing, 2023, 77: 103801.
- [42] BERNAUER C, ZAPATA A, ZAEH M F. Toward defect-free components in laser metal deposition with coaxial wire feeding through closed-loop control of the melt pool temperature[J]. Journal of Laser Applications, 2022, 34 (4) : 042044.
- [43] 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.
- [44] CHAURASIA P K, GOECKE S F, DE A. Monitoring melt pool asymmetry in gas metal arc-directed energy deposition[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28 (5) : 424-432.
- [45] JEGOU L, LACHAMBRE J, TARDIF N, et al. Bichromatic melt pool thermal measurement based on a Red, Green, and Blue camera: Application to additive manufacturing processes[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109799.
- [46] DELLARRE A, BÉRAUD N, TARDIF N, et al. Qualify a NIR camera to detect thermal deviation during aluminum WAAM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127 (1) : 625-634.
- [47] HAUSER T, DA SILVA A, REISCH R T, et al. Fluctuation effects in Wire Arc Additive Manufacturing of aluminium analysed by high speed imaging[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1088-1098.
- [48] XIONG J, WEN C. Arc plasma, droplet, and forming behaviors in bypass wire arc-directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2023, 70: 103558.
- [49] XIONG J, YU Y, ZHENG S, et al. Arc voltage measurements for height control in pulsed arc additive manufacturing[J]. Measurement, 2022, 191: 110867.
- [50] LI H, XIONG J. Monitoring process stability in gas metal arc additive manufacturing based on arc sensing[J]. Measurement, 2023, 220: 113377.
- [51] KISIELEWICZ A, THALAVAI PANDIAN K, STHEN D, et al. Hot-wire laser-directed energy deposition: process characteristics and benefits of resistive pre-heating of the feedstock wire[J]. Metals, 2021, 11 (4) : 634.
- [52] AUCOTT L, DONG H, MIRIHANAGE W, et al. Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals[J]. Nature Communications, 2018, 9 (1) : 5414.
- [53] ZHAO Z, GUO Y, BAI L, et al. Quality monitoring in wire-arc additive manufacturing based on cooperative awareness of spectrum and vision[J]. Optik, 2019, 181: 351-360.
- [54] HU Y, CHEN H, LIANG X, et al. Monitoring molten pool temperature, grain size and molten pool plasma with integrated area of the spectrum

- during laser additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 851-860.
- [55] KHOROSHKO E S, FILIPPOV A V, SHAMARIN N N, et al. Anisotropy of the mechanical properties of the aluminum bronze obtained by the electron beam additive manufacturing: AIP Conference Proceedings[C]. Tomsk: AIP Publishing, 2020, 2310 (1) : 020145.
- [56] REISCH R, HAUSER T, KAMPS T, et al. Robot based wire arc additive manufacturing system with context-sensitive multivariate monitoring framework[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 51: 732-739.
- [57] JEON I, YANG L, RYU K, et al. Online melt pool depth estimation during directed energy deposition using coaxial infrared camera, laser line scanner, and artificial neural network[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102295.
- [58] YU R, TAN X, HE S, et al. Monitoring of robot trajectory deviation based on multimodal fusion perception in WAAM process[J]. Measurement, 2024, 224: 113933.
- [59] CHAURASIA P K, GOECKE S F, DE A. Real-time monitoring of temperature field, metal transfer and cooling rate during gas metal arc-directed energy deposition[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2022, 27 (7) : 512-521.
- [60] SHE K, LI D, YANG K, et al. Online Detection of Laser Welding Penetration Depth Based on Multi-Sensor Features[J]. Materials, 2024, 17 (7) : 1580.
- [61] CHEN X, WANG C, DING J, et al. Thermal fluid dynamics of the effect of filler wire on deposition rate and bead formation intending plasma arc-based DED[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 107: 199-209.
- [62] ZHANG K, XIONG J, LIU G, et al. Role of bypass current on pores in double-electrode gas metal arc additive manufactured 2219 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121 (7) : 4503-4516.
- [63] HONG B, QU Y, HONG Y, et al. Modelling and optimising process of micro-plasma arc freeform fabrication[J]. Materials & Design, 2023, 228: 111854.
- [64] XIONG J, CHEN H, ZHENG S, et al. Feedback control of variable width in gas metal arc based additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 76: 11-20.
- [65] SHI M, XIONG J. Controlling torch height and deposition height in robotic wire and arc additive manufacturing on uneven substrate[J]. Welding in the World, 2024, 68 (4) : 765-779.
- [66] YU Y, XIONG J, CHEN Y, et al. Process stability control of corner structures in robotic gas tungsten arc additive manufacturing via arc sensing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101: 156-170.
- [67] XIONG J, YU Y, ZHANG G, et al. Layer width control in robotic pulsed gas tungsten arc additive manufacturing through composite sensing of vision and arc[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2023, 36 (6) : 881-893.
- [68] 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.
- [69] LIANG Z, LIAO Z, ZHANG H, et al. Maintaining a proper droplet transfer state in electron beam directed energy deposition via absorbed current-sensed control[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 109: 407-420.
- [70] GIBSON B T, RICHARDSON B S, SUNDERMANN T W, et al. Beyond the toolpath: Site-specific melt pool size control enables printing of extra-toolpath geometry in Laser Wire-Based directed energy deposition[J]. Applied Sciences, 2019, 9 (20) : 4355.
- [71] GIBSON B T, BANDARI Y K, RICHARDSON B S, et al. Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 100993.