

基于熔池光信号的激光粉末床熔融沉积缺陷 在线监测与诊断

陈香媛, 韦辉亮*, 刘婷婷**, 张凯, 李建森, 邹志永, 廖文和

南京理工大学机械工程学院, 南京 210094

摘要 在激光粉末床熔融(LPBF)成形过程中,铺粉异常导致的沉积缺陷会严重影响成形零件的表面及内部质量,但目前缺乏针对性的在线监测与诊断方案。采用光电探测器和高速相机在线监测成形过程中的光强和熔池面积信号,探究不同粉末厚度条件下熔池尺度光信号的变化规律,实现对零件质量的初步诊断。研究表明,粉末厚度的异常增加会导致零件熔化状态出现波动,并最终导致严重的球化。表面粗糙度从正常打印状态的 $5\ \mu\text{m}$ 显著增加至 $100\ \mu\text{m}$ 以上,同时在零件内部形成了未熔合孔隙缺陷。阐述了粉末厚度对沉积缺陷的影响机制,深入分析了光强与熔池面积的特征及其相互关系,提出了一种基于阈值百分比诊断沉积缺陷的信号监测方法。

关键词 增材制造; 激光粉末床熔融; 在线监测; 熔池光信号; 沉积缺陷

中图分类号 TH16; TP277 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL240472

1 引言

激光粉末床熔融(LPBF)技术是一种极具前景的金属增材制造(AM)技术^[1-2]。该技术通过逐层铺粉,利用高能激光束熔化粉体材料,选区凝固堆积出实体零件,突破了航空航天领域精密复杂结构件制造成本高、周期长的瓶颈^[3]。同时,在实现功能-结构-材料一体化方面具有很大优势^[4]。

然而,LPBF过程中熔池复杂的热/动力学行为容易造成球化、未熔合等沉积缺陷,会严重影响零件的力学性能^[5-7]。这些缺陷的产生与激光功率、扫描速度、粉末厚度等关键参数密切相关^[8-9]。近年来,许多研究通过工艺试验针对不同的材料开发了合适的工艺窗口,以减少孔隙等缺陷^[10-12]。Yang等^[13]研究了AlSi10Mg合金孔隙分布规律和输入能量密度之间的关系,优化后致密度在99.5%以上,且90%的孔隙尺寸被控制在 $25\ \mu\text{m}$ 以下。然而,在零件打印过程中会出现激光能量波动^[14]、气流不稳定^[15]、刮刀损坏^[16]等不可控问题。即使采用了优化的工艺参数,仍有产生缺陷的风险^[16]。上述问题会造成铺粉厚度不稳定,最终形成孔隙缺陷留在零件内。Liu等^[17]研究了LPBF制造过程中的粉末层厚参数对零件缺陷、微观组织及力学性能的影响,而Jansen等^[18]的研究表明,打印中的实际粉末厚度与设置参数存在明显差距,且会随着激光

参数的变化而变化。因此,研究和监测LPBF制造过程中由异常铺粉厚度造成的沉积缺陷对于提高成形质量具有重要意义。

为了实现零件的无缺陷成形目标,包括声、光、热信号在内的过程在线监测技术不断发展^[19]。LPBF过程中金属粉末熔化和凝固的速度极快,大大增加了沉积缺陷监测和诊断的难度^[20]。此外,目前的监测信号数据量庞大、关系复杂,与零件实际缺陷的映射关系尚不明晰^[21]。最初铺粉问题的监测依赖操作人员的经验,他们通过视觉观察铺粉情况以调整铺粉量的决策,如图1所示。随后,Kleszczynski等^[22]利用工业相机在成形过程中对粉层表面进行拍摄,通过分析灰度图像,实现了对凸起部分位置和面积的有效提取和判断。然而,工业相机通常是在整层打印后对整个成形幅面进行拍摄,时间、空间分辨率都较低,无法提供粉末熔化状态及缺陷形成过程方面的监测数据。目前,光电探测器和高速相机已成为监测熔池状态的常用手段,可用于捕获熔池的温度与形态特征,具有效率高、成本低的优势^[23]。Taherkhani等^[24]通过收集光电探测器信号,采用绝对极限算法成功监测到尺寸大于 $120\ \mu\text{m}$ 的孔隙。Booth等^[25]基于机器学习算法分析了高速相机拍摄的熔池图像,预测的零件整体致密度与实际致密度的相关性改善了42%。然而,目前依赖于机器学习算法的监测信号分析主要集中于试

收稿日期: 2024-01-08; 修回日期: 2024-02-22; 录用日期: 2024-03-05; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4600800)、国家自然科学基金(52322509, 52175330)、江苏省自然科学基金(BK20230034)

通信作者: *hlwei@njust.edu.cn; **liutingting@mail.njust.edu.cn

件整体致密度的分析,缺乏对缺陷来源及其形成机制的理解。鉴于上述铺粉异常问题,迫切需要建立不同铺粉厚度条件下沉积缺陷与在线监测信号之间的关联模型,并研究快速有效的诊断技术,以便为在线修复缺陷的反馈控制系统提供科学依据。

本文采用 LPBF 成形设备开展打印试验,通过自主研发的光电探测器与高速相机结合的在线监测系

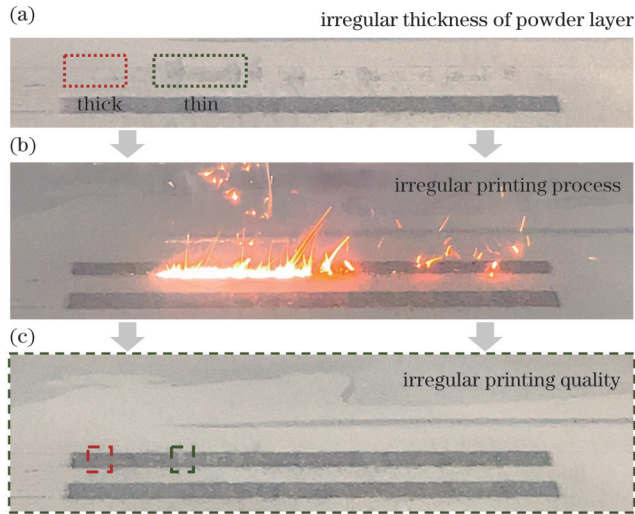


图 1 打印过程中的铺粉沉积缺陷。(a)打印前;(b)打印过程;(c)打印完成

Fig. 1 Deposition defects caused by powder spreading during printing. (a) Before printing; (b) during printing; (c) after printing

统,对不同铺粉厚度下的在线监测数据进行采集与分析,探究零件表面质量及内部缺陷的演变规律。根据粉末的熔化特性,可以将熔池状态分为稳定状态和球化状态。通过分析不同熔化状态下熔池光强和熔池面积信号的特征,揭示了铺粉异常时沉积缺陷的形成机制。基于质量表征与熔池尺度光信号在线监测数据的内在关联,提出了一种诊断沉积缺陷的信号分析方法。

2 试验方法

2.1 试验设备

本次试验采用本研发团队自主研发的 LPBF 设备,配备连续型红外光纤激光器,额定功率为 500 W,激光波长为 1060 nm,光斑尺寸为 100 μm 。试验中成形腔被通入氩气以实现保护,氧含量(体积分数)不超过 10^{-4} 。

图 2 展示了本试验使用的打印过程的在线监测系统,集成了三个离轴光电二极管和一个同轴高速相机,用于监测熔池光强度和熔池图像。试验中金属熔池产生的辐射光首先通过 830~960 nm 的滤光片进行去噪处理,然后进入光电二极管。这些光信号以 10 kHz 的频率与光斑坐标被同步采集记录。对称布置的三个离轴二极管采集的数据在经过降噪处理后,辐射角度对光强信号的影响减小^[26]。此外,设备集成的同轴高速相机也以 10 kHz 的频率在 160 pixel \times 160 pixel 的区域内实时捕捉熔池图像,其中像素尺寸为 9.85 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ (监测系统更多细节请查阅文献^[26])。

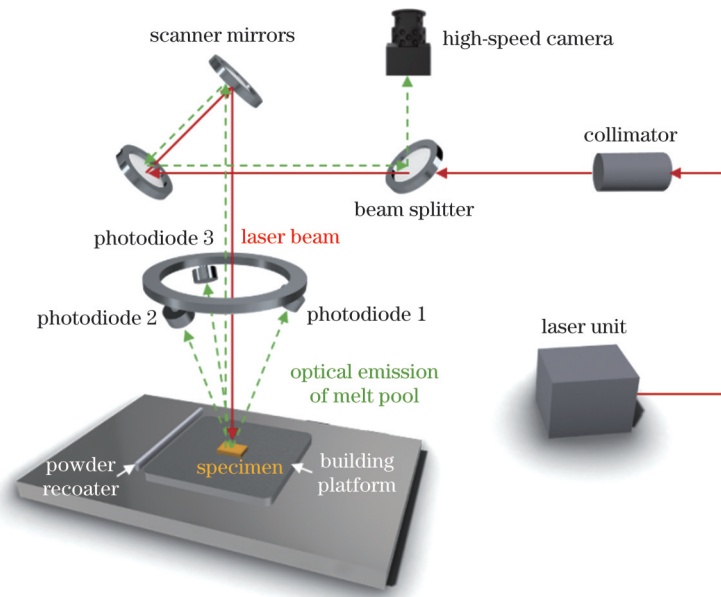


图 2 基于熔池光信号的在线监测系统

Fig. 2 *In-situ* monitoring system based on optical signals of melt pool

2.2 试验材料

试验选用的雾化 AlSi10Mg 粉末的元素组成如下: Si(质量分数为 10.08%)、Mg(质量分数为 0.53%)、Cu(质量分数为 0.01%)、Fe(质量分数为

0.13%)、Zn(质量分数为 0.02%)、Mn(质量分数为 0.06%)、Ti(质量分数为 0.02%)、Al(Bal.)。粉末扫描电镜(SEM)形貌如图 3(a)所示。大多数粉末呈球形,表面粘附少量小尺寸粉末。使用激光衍射粒

度分析仪对粉末的粒度分布进行表征,如图 3(b)所示。其中,累计粒度分布数达到 10%、50% 和 90% 时

对应粒径(D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90})的测量值分别为 11.5、30.4、56.2 μm 。

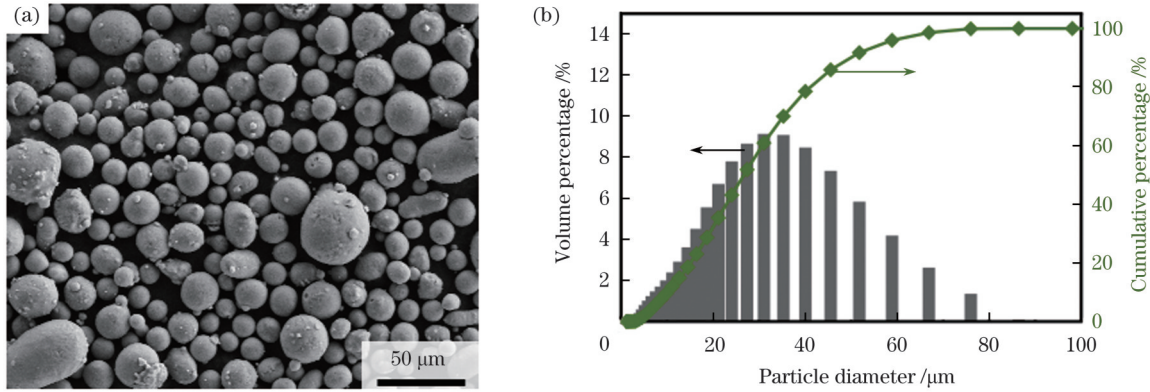


图 3 AlSi10Mg 合金粉末的形貌和粒径。(a)粉末的 SEM 形貌图;(b)粒径分布

Fig. 3 Morphology and particle size of AlSi10Mg alloy powder. (a) SEM morphology of powder; (b) particle size distribution

2.3 试验模型及参数设计

为了定量研究不同粉末厚度下的熔化差异,本试验定制了铣削预处理的基板,如图 4(a)所示。在尺寸为 148 mm×148 mm 的基板上均匀分布了深度为 30~300 μm 的铣槽,每个铣槽尺寸为 8 mm×8 mm。考虑到粉末粒径以及通常采用的层厚,以 30 μm 为梯度设

计了 10 个不同深度的槽。试验中首先进行铺粉,调整基板 Z 轴位置,使刮刀与基板上表面齐平,每个槽内的粉末厚度达到设计厚度。接着分区域进行激光单层曝光,扫描路径如图 4(b)所示。同时,基于优化的工艺参数(激光功率为 200 W,扫描速度为 1000 mm/s),设计了 5 组工艺参数进行打印,如表 1 所示。

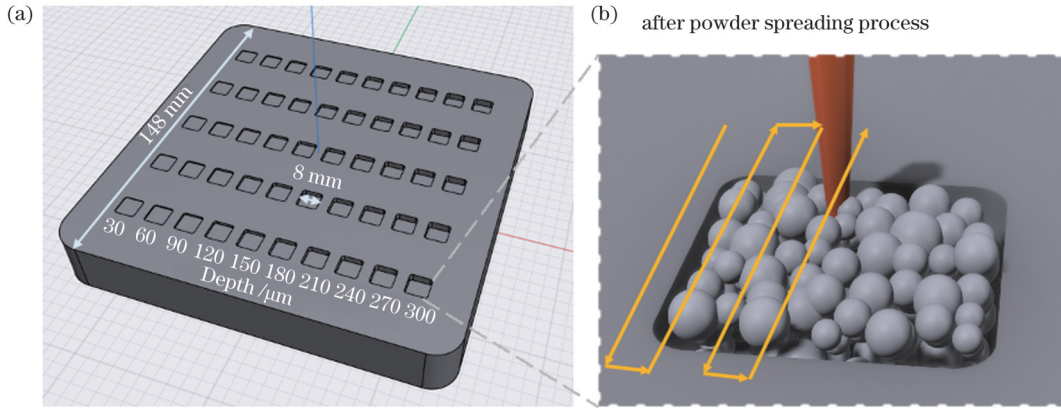


图 4 试验模型示意图。(a)铣削预处理的基板;(b)铺粉后单层打印

Fig. 4 Schematics of experimental model. (a) Pre-processed substrate by milling; (b) single-layer printing after powder spreading process

表 1 试验工艺参数

Table 1 Experimental process parameters

Data set	Laser power P/W	Scanning speed $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Hatch space $h / \mu\text{m}$
A	240	1000	90
B	200	1000	90
C	160	1000	90
D	200	800	90
E	200	1200	90

2.4 监测数据采集及材料表征

对于三个离轴光电探测器采集的熔池光强数据,首先进行均值处理,再将其与对应的 X/Y 坐标进行

匹配,得到信号空间分布的映射图像。同时,使用中值过滤法处理高速相机采集的熔池图像,在阈值分割后提取熔池面积,并用与光强相同的匹配方式得到熔池面积空间分布的映射图像。具体原始监测数据的处理方法详见文献[26]。

对于试验得到的 50 个样品,使用线切割技术从基板处开始切割。为了避免试样在切割过程中因内部应力而变形,切割深度为 5 mm。切割后的样品使用乙醇进行超声清洗。随后,使用三维共聚焦扫描激光显微镜获取样品的 3D 表面形貌,并使用配套的图像分析软件测量每个样品的表面粗糙度(S_a),每个测量区域的尺寸为 1.35 mm×1.00 mm。使用场发射扫描电子显微镜在 15 kV 加速电压下观察和分析样品表面形貌

的微观特征。样品的纵向截面(XZ平面)用不同SiC砂纸进行打磨处理。随后,用二氧化硅悬浮液对其进行抛光,达到无划痕的镜面效果。抛光后,用凯勒试剂(1 mL HF、1.5 mL HCl、2.5 mL HNO₃和95 mL蒸馏水H₂O)刻蚀抛光表面约20 s。对样品纵向截面的光学显微镜(OM)图像进行孔隙和熔池的观察和分析。

3 试验结果

3.1 熔池光信号与粉末厚度、激光参数的关系

根据时序将光电探测器测得的熔池光强及高速相机测得的熔池面积与对应时刻激光扫描的X/Y位置进行匹配后,可以得到信号空间分布的映射图像,如图5所示。结果表明:激光打印时基板及粉末区域的信号差异较大;同时,金属材料熔化过程中产生的熔池光信号特征与粉末厚度密切相关。在相同工艺参数条件下,随着粉末厚度的增加,光强值逐渐减小,熔池面积逐渐增大。

提取不同粉末厚度区域的信号进行统计分析,进一步观察工艺参数与熔池光信号之间的关系。图6(a)、(b)为不同工艺参数下计算得到的光强信号均值,其反

映了熔池光信号的平均强度随粉末厚度的变化趋势。结果表明,在不同激光功率和扫描速度组合情况下,熔池光强的均值都呈现出随粉末厚度的增加而逐渐降低的变化规律。以激光功率为240 W、扫描速度为1000 mm/s的工艺条件为例,当粉末厚度从30 μm 增加至300 μm 时,熔池光强均值从0.50 V下降至0.25 V。同时,在相同粉末层厚条件下,熔池光强均值会随着能量密度的降低(激光功率降低或扫描速度增加)而降低,且光强信号对激光功率的降低更加敏感。此外,在粉末厚度大于240 μm 后,光强趋于稳定,激光功率及扫描速度的影响显著下降。通常,在数据统计中会选择标准差作为特征指标显示实际信号围绕均值的波动状况。然而,根据已有的文献[21]及本文使用的数据集特征可知,光强信号标准差受到均值显著的影响。为了更准确地分析熔池光强的稳定程度,通过计算变异系数分析信号的离散程度,结果如图6(c)、(d)所示。变异系数为标准偏差与平均值的比值,与标准差相比,变异系数的值可以在均值不同的情况下更好地反映数据集的离散程度。总体上,熔池光强的变异系数在20%~60%之间,且随着粉末厚度的增加离散程度有先增加后降低的变化趋势。

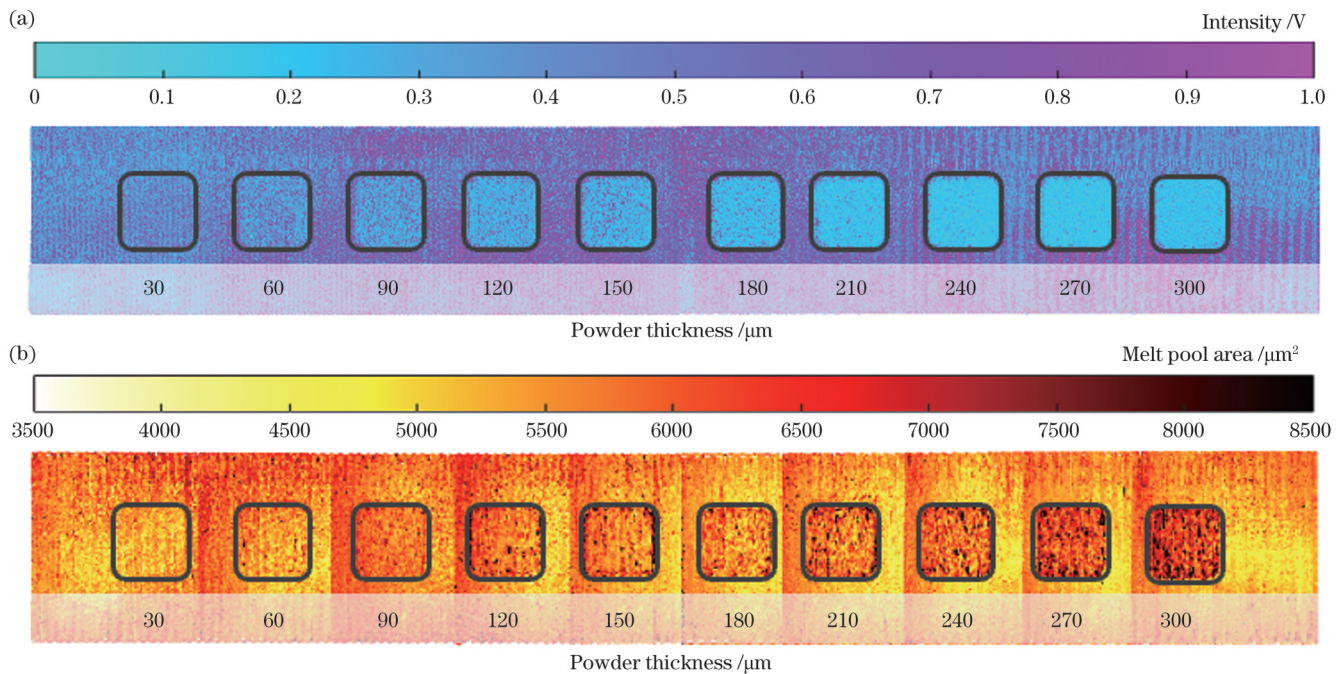


图5 B组样品熔池光信号的空间分布。(a)熔池光强;(b)熔池面积

Fig. 5 Spatial distributions of optical signals for melt pool of Group B samples. (a) Melt pool light intensity; (b) melt pool area

图7为不同工艺参数下高速相机测得的熔池面积均值与变异系数。图7(a)、(b)结果显示,当激光功率与扫描速度相同时,熔池面积的均值随粉末厚度的增加而增加。这与图6(a)、(b)中相同激光参数条件下熔池光强均值随粉末厚度的增加而减小的趋势相反。此外,当扫描速度相同时,激光功率对熔池面

积的影响较小。在160 W的低激光功率条件下,熔池面积均值随粉末厚度的变化最显著。如图7(c)、(d)所示,不同工艺条件下熔池面积的离散程度小于熔池光强,总体在20%以下。同时,变异系数随粉末厚度的增加轻微上升,其受激光功率、扫描速度的影响较小。

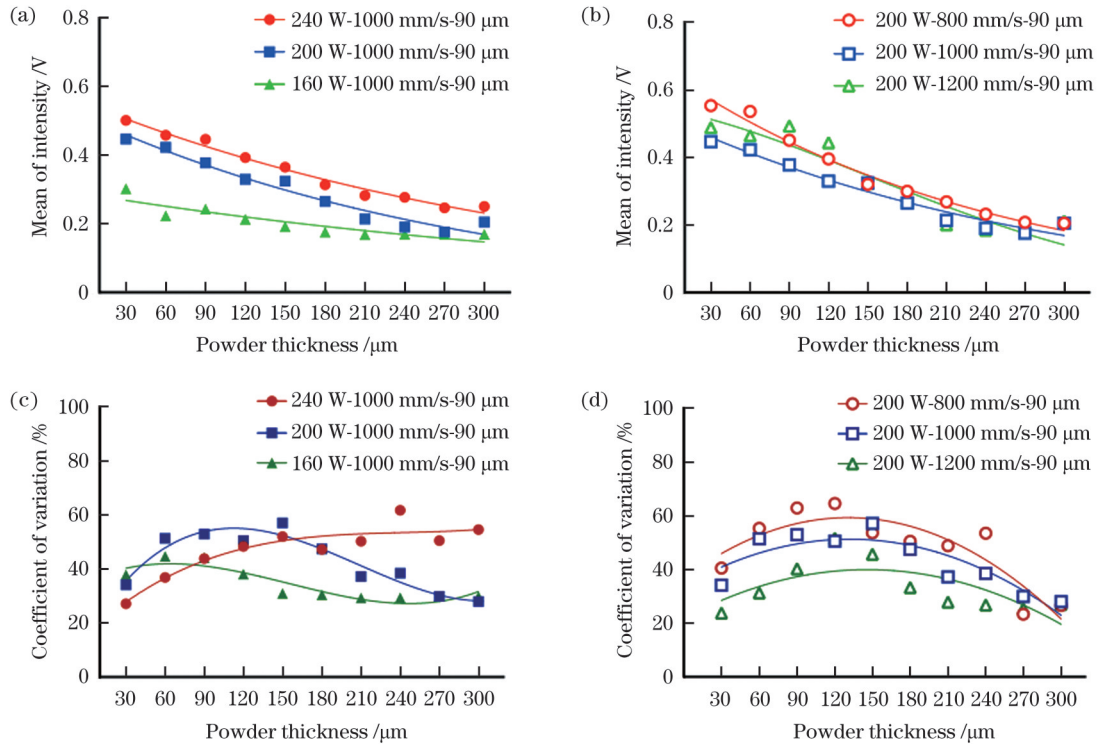


图 6 不同工艺参数下熔池光强的统计结果。(a)不同激光功率下的均值;(b)不同扫描速度下的均值;(c)不同激光功率下的变异系数;(d)不同扫描速度下的变异系数

Fig. 6 Statistical results of melt pool light intensity under different process parameters. (a) Mean values under different laser powers; (b) mean values under different scanning speeds; (c) coefficients of variation under different laser powers; (d) coefficients of variation under different scanning speeds

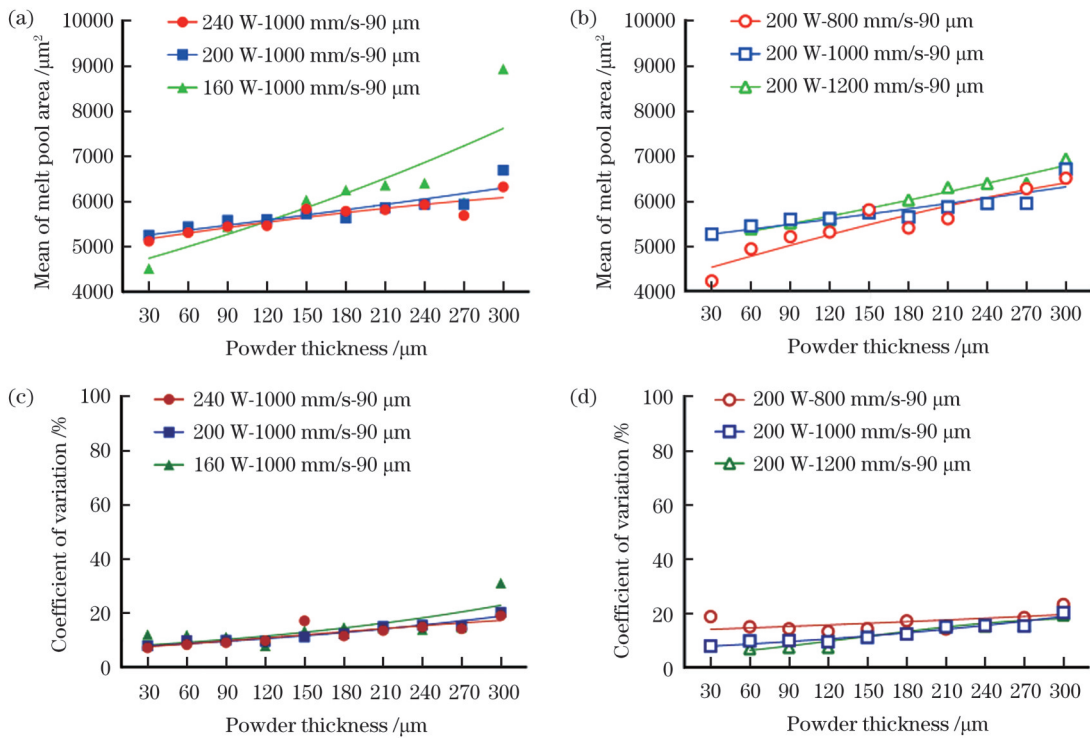


图 7 不同工艺参数下熔池面积的统计结果。(a)不同激光功率下的均值;(b)不同扫描速度下的均值;(c)不同激光功率下的变异系数;(d)不同扫描速度下的变异系数

Fig. 7 Statistical results of melt pool area under different process parameters. (a) Mean values under different laser powers; (b) mean values under different scanning speeds; (c) coefficients of variation under different laser powers; (d) coefficients of variation under different scanning speeds

3.2 表面质量与粉末厚度、激光参数的关系

图 8 显示了不同粉末厚度条件下表面粗糙度的测量结果以及三维形貌特征。可以观察到样品表面粗糙度随着粉末厚度的增加而增加。以激光功率为 200 W、扫描速度为 1000 mm/s 的工艺参数为例,当粉末厚度从 30 μm 增加至 300 μm 时,表面粗糙度从 4.16 μm 增加至 117.86 μm 。当正常打印(粉末厚度为 30 μm)时,不同激光工艺参数下的样品表面粗糙度均低至 5 μm 左右,表面较为光滑,仅粘附有少量

小尺寸的粉末颗粒。当粉末厚度达到 90 μm 以上时,样品表面出现了不同程度的球化,表面粗糙度显著增加。此外,在相同粉末厚度条件下,随着激光功率的降低或扫描速度的增加,表面粗糙度呈现出逐渐增加的趋势。值得注意的是,当粉末厚度达到 90 μm 时,在激光功率为 160 W、扫描速度为 1000 mm/s 的工艺参数条件下成形样品的表面粗糙度超过 20 μm ,远高于其他参数条件下成形试样的表面粗糙度。

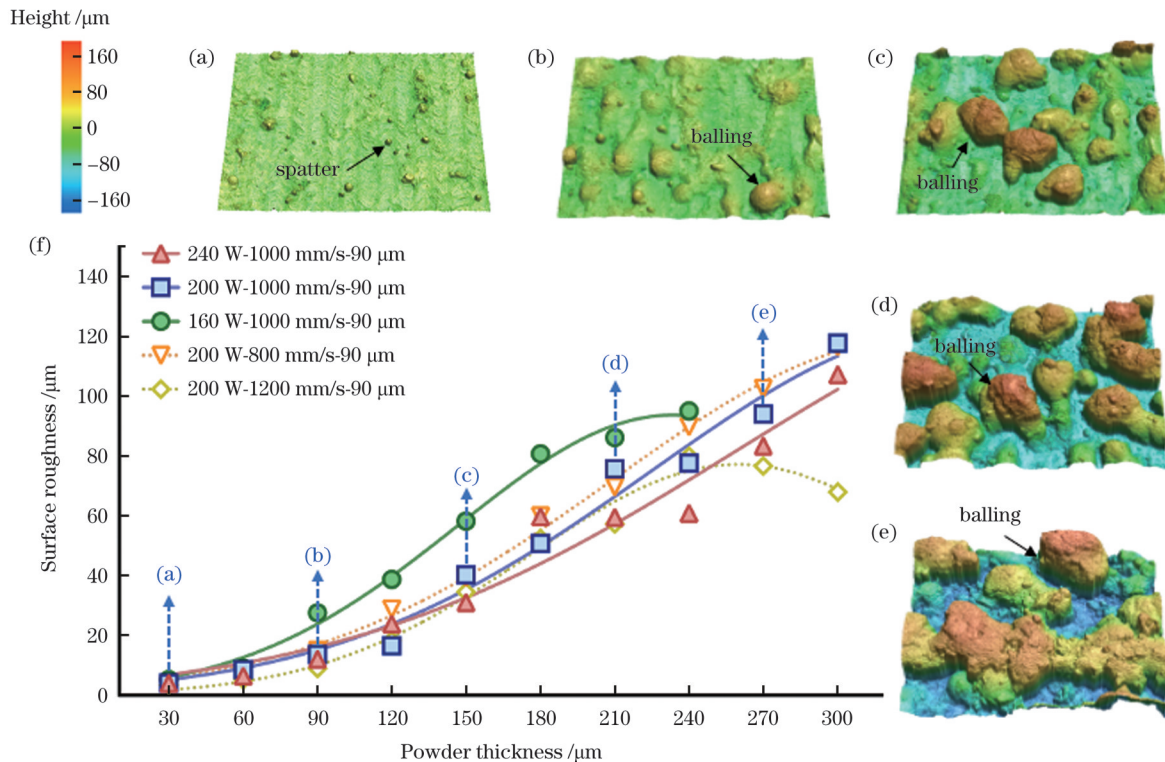


图 8 不同粉末厚度条件下表面粗糙度的测量结果以及三维形貌特征。粉末厚度为(a) 30、(b) 90、(c) 150、(d) 210、(e) 270 μm 时 B 组样品的三维形貌;(f) 不同激光工艺参数下表面粗糙度与粉末厚度的关系

Fig. 8 Surface roughness measurement results and three-dimensional morphologies under different powder thickness conditions. Three-dimensional morphologies of Group B samples when powder thickness is (a) 30, (b) 90, (c) 150, (d) 210, and (e) 270 μm ; (f) relationship between surface roughness and powder thickness under different laser process parameters

不同参数下样品的 SEM 图如图 9 所示。随着粉末厚度从 30 μm 增加至 300 μm ,可以观察到样品表面从平整逐渐演变到严重球化。当使用激光功率 240 W、扫描速度 1000 mm/s 的工艺参数时,在粉末厚度为 30 μm 的条件下,表面熔道清晰可见,宽度稳定,凝固波纹均匀分布,打印状态良好,仅粘附有少量尺寸为 30 μm 左右的飞溅粉末,如图 9(b) 所示。当粉末厚度增加至 120 μm 时,凝固波纹逐渐消失,熔道宽度的波动明显增加,如图 9(c) 所示。当粉末厚度增加至 150 μm 时,表面开始形成明显的球化缺陷,尺寸达到 150 μm 以上,如图 9(d) 所示。当粉末厚度继续增加至 270 μm 时,可以观察到粉槽底部已经无法被激光完全熔化,聚集了大量的未熔粉末颗粒,如图 9(e) 所

示。此外,较低的激光功率对球化起到加速的作用,而扫描速度对沉积缺陷的影响作用较小。对于激光功率为 200 W、扫描速度为 1000 mm/s 的工艺参数,在 120 μm 的粉末厚度下就形成了较为明显的球化缺陷。然而,当激光功率为 160 W 时,在粉末厚度达到 60 μm 后就可以观察到明显的球化缺陷。当粉末厚度达到 240 μm 以上时,熔融材料大部分已无法与基板粘结,在超声清洗后脱离,样品表面形貌无法通过 SEM 进行表征。

3.3 内部缺陷与粉末厚度的关系

在分析表面质量的基础上,进一步对内部缺陷进行表征。图 9 结果显示沉积缺陷主要受到粉末厚度的影响。因此,选取 B 组激光参数(200 W, 1000 mm/s)

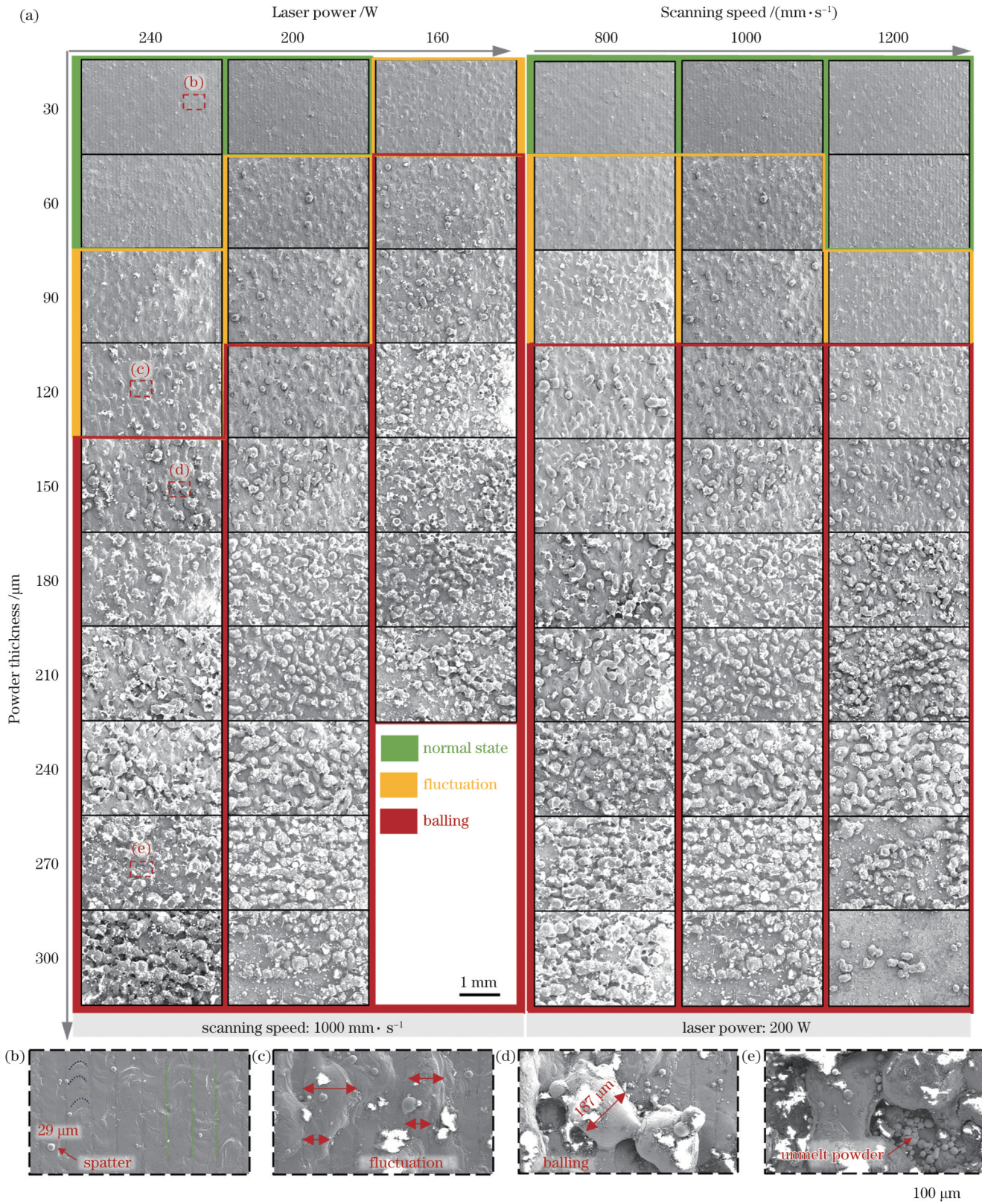


图9 表面形貌 SEM 图及放大图。(a)不同激光工艺参数下表面沉积缺陷与粉末厚度的关系;(b)~(e)虚线框对应的局部放大图像
Fig. 9 SEM images of surface morphologies and enlarged images. (a) Relationship between surface deposition defects and powder thickness under different laser process parameters; (b)~(e) enlarged images of areas in dotted boxes

对不同粉末厚度下的样品进行纵向截面熔池形貌分析,光镜图像如图 10 所示。随着粉末厚度从 30 μm 增加至 300 μm,沉积物厚度不断增加,与凹槽底部的搭

接情况逐渐变差。当粉末厚度为 30 μm 时,铣槽内的粉末完全熔化,沉积后材料与周围基板上表面基本平齐。当粉末厚度为 90 μm 时,熔池深度在 50 μm 左右,

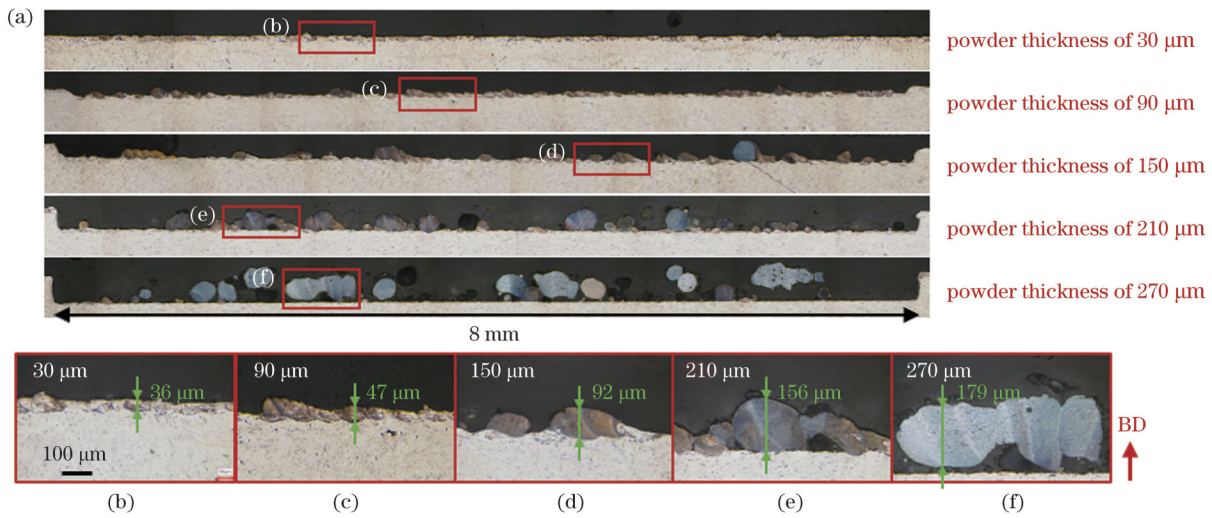


图 10 不同粉末厚度下熔池尺寸与内部孔隙缺陷的关系。(a)抛光腐蚀后的样品截面形貌;(b)~(f)局部放大图像

Fig. 10 Relationship between melt pool size and internal pore defect under different powder thicknesses. (a) Cross-sectional morphologies of samples after polishing and corrosion; (b)~(f) locally magnified images

尽管粉末材料的熔化程度较高,但是XY平面上的分布开始出现不均匀现象,沉积高度不稳定,且明显低于基板平面。当粉末厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 时,熔池搭接明显不良,出现个别球化缺陷。当粉末厚度增加至 $210\ \mu\text{m}$ 时,熔池球化严重,球与球之间的薄弱黏结使得沉积材料与基板之间形成未熔合缺陷。当粉末厚度继续增加至 $270\ \mu\text{m}$ 时,激光无法完全熔透粉末,沉积材料“漂浮”在铣槽内。

4 分析与讨论

4.1 粉末厚度对沉积缺陷的影响

上述结果表明,激光粉末床熔融过程中的粉末厚度与球化缺陷紧密相关,且激光功率和扫描速度也会对球化缺陷的演化进程产生影响。结合样品表面形貌(图8和图9)和内部缺陷(图10)可以发现,随着粉末厚度的增加,熔池熔化程度显示出三个阶段:1)表面平整,熔道及凝固波纹清晰,熔池深度统一,材料与基底熔合良好;2)表面熔道依然连续,但凝固波纹消失,熔池尺寸(宽度、高度、深度)波动大;3)熔道断裂,出现 $150\ \mu\text{m}$ 以上的大尺寸球体,球体下表面与基底熔合度低,导致道间及底部出现未熔合孔隙缺陷。

第一阶段属于正常打印状态,粉末厚度较薄,激光能量充足,可将材料完全熔化,且与基底结合质量较好,如图10(a)所示。由于热量迅速消散到基材上,熔池获得了更高的冷却速率^[27],在较短的液相存在时间内形成了图10(a)所示的小尺寸熔池。此时,较薄的粉末也使得激光束在粉末颗粒之间的反射过程相对较少,熔池状态与激光能量吸收过程达到动态平衡,熔道稳定性好,熔池尺寸波动小。

当粉末厚度增加时,激光作用于粉末产生的光线反射现象增加,有可能使得局部熔池深度增加,周

围粉末熔化,局部熔池尺寸增大,如图10(b)所示。这与Cunningham等^[28]使用超高速X射线成像技术观察到的粉末厚度增加导致熔池振荡加剧的结果一致。在马兰戈尼和反冲压力作用下,熔池流速不断变化是造成图10(b)熔池尺寸波动增加的重要原因^[29-30]。

当粉末厚度继续增加时,激光能量不足以穿透粉末层,造成粉末不能完全熔化。此时,材料表面的温度略高于熔化温度,因此马兰戈尼效应在金属和激光之间的相互作用中占主导地位^[31-32],熔体润湿性不足。在液体的表面张力驱使下,为了降低表面自由能,液体倾向于形成最小的表面积,最终导致熔池聚集并球化。同时,热量向下传导困难,趋向于在平面内传导。在凝固速率降低的情况下,熔池未能及时冷却,多个球体同时处于液态,增加了熔池面积。殷杰等^[33]采用高时空分辨原位成像系统观察到熔池附近未直接参与成形的粉末颗粒在横向受热后表层润湿,与邻近颗粒形成烧结颈,进而团聚长大,这与本文图10(e)中观察到的大尺寸球体一致。烧结颈以及球体的存在,使得打印过程中形成了未熔合内部缺陷。此外,粉末的团聚效应将导致部分基板直接暴露在激光下,产生垂直反射,进一步增加了打印过程中的温度分布离散性。此外,铝合金极易与氧气发生反应,生成氧化膜,从而影响熔池接触角及润湿性^[34-35]。在这种情况下,铺粉厚度的少量增加都会使其熔道更容易出现断裂,凝固波纹完全消失,球化缺陷特征更加明显,这与文献[26]中的报道产生较大差异。

图8与图9的结果表明,在不同工艺参数条件下,虽然球化缺陷产生的进程略有不同,但是随着铺粉厚度的增加,熔池熔化过程中均会出现表面平整状态到熔道断裂状态的过渡。在粉末厚度相同的条件下,熔

池的温度以及凝固时间会随着输入能量密度的增加(增加激光功率或降低扫描速率)而增加,促进了润湿和铺展,形成了更均匀连续的熔道^[36-37]。值得注意的是,在低能量密度条件(160 W, 1000 mm/s)下,激光能量仅能满足 30 μm 常规打印粉末厚度下的连续打印要求。一旦铺粉厚度波动造成局部区域厚度增加,就会产生球化缺陷,从而影响零件的成形质量。当粉末厚度增加至熔池呈现完全球化状态(与基底完全无法粘结)时,打印状态不会随着粉末厚度的继续增加而产生显著的变化。

4.2 不同在线监测信号间的映射关系

本文所采用的光电探测器的基本原理是将实时探测到的熔池光辐射信号转换为电压信号^[38-39]。此外,张婷等^[21]研究了激光粉末床熔融过程中,光谱辐射亮度与熔池辐射温度、光波长之间的关系,结果表明光电探测器所采集的电压信号强度会随熔池温度的升高而升高。根据图 6 和图 7 的统计结果可知,在工艺参数相同的条件下,光强会随着粉末厚度的增加而降低,而高速相机捕捉的熔池图像的面积变化规律相反。考虑到两种监测信号本质上反映了同一时刻

熔池的不同信息,对两者关系作进一步分析,结果如图 11 所示。结合 4.1 节的分析,根据熔池状态将不同粉末厚度下的监测信号分成了对应的三类,这样分类的优势在于在线监测信号的异常判断不再依赖于特定的工艺参数,而是直接与打印质量相关,更有利于普适缺陷规律的探究。三种情况下两种信号的关系发生了较大的变化。对于正常的打印状态,熔池的光强较大且分布集中,对应较小的熔池面积。这与 4.1 节的讨论相一致,在完全熔化的状态下,熔池温度较高,所以光强值较大。同时,由于更快的冷却速率,稳定较小的熔池尺寸得到保持。对于第二种熔化状态,监测信号与表征结果也有较好的映射结果。当熔池由于输入能量不足而产生波动时,熔池的光强及面积信号离散性也明显增加,图 6 中的变异系数也反映出此阶段波动程度增加。当产生球化缺陷时,信号最明显的特征是光强的减小及熔池面积的增加,与此时温度低且面积大的球状熔池相匹配。值得注意的是,此时熔池尺寸波动变大,但是整体能量的降低使熔池温度持续偏低,光强更集中在低于 0.50 V 的区域,变异系数反而较低。

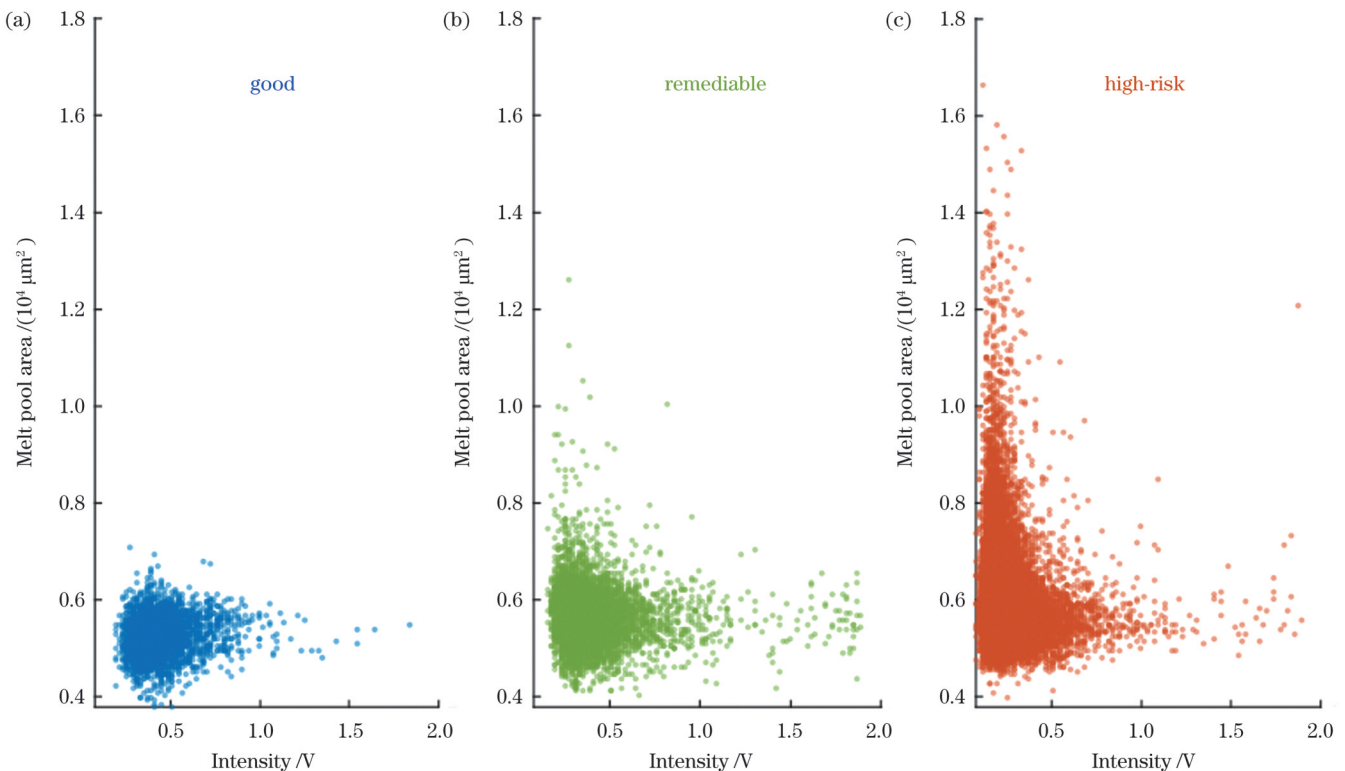


图 11 熔池光强与熔池面积的关系。(a)质量良好情况;(b)质量可修复情况;(c)沉积缺陷高风险情况

Fig. 11 Relationship between melt pool intensity and melt pool area. (a) Good quality; (b) remediable quality; (c) high risk with deposition defects

4.3 基于在线监测信号的沉积缺陷诊断方法

通过 4.1 节的讨论可知,随着粉末厚度的增加,铺粉状态可分为正常铺粉状态、欠佳铺粉状态以及球化缺陷高风险状态。其中,欠佳铺粉状态下熔池虽然部分失稳,但还未产生实际缺陷,有机会可以在后续的

打印中恢复打印状态。而在球化状态下,已经产生了较为严重的表面及内部孔隙缺陷,需要设备及时监测到异常情况,并在下一层打印中快速作出响应。4.2 节的讨论表明光强信号与熔池面积信号存在显著的关联关系,所以在判断球化缺陷方面有相似的效果。

高速相机采集的熔池图像在表征熔化状态时具有优势,但是分析时间长,在工业生产中的效率难以支持缺陷的实时识别与反馈。因此,本文在缺陷诊断部分选择对效率较高的光电探测器作进一步分析。此外,图 11 的结果表明光强偏小是铺粉缺陷产生时的显著特征,本节考虑采用阈值百分比的方法进行沉积缺陷诊断。

本文采用接收器操作特性(ROC)曲线分析评估分类模型,选取能够识别铺粉打印缺陷的小值阈值及小值占比的阈值(阈值百分比)。ROC 曲线是通过绘制不同决策阈值下的真阳性率(TPR)与假阳性率(FPR)曲线评估分类性能的一个标准工具。

首先计算了不同光强小值阈值下的 TPR 和 FPR,

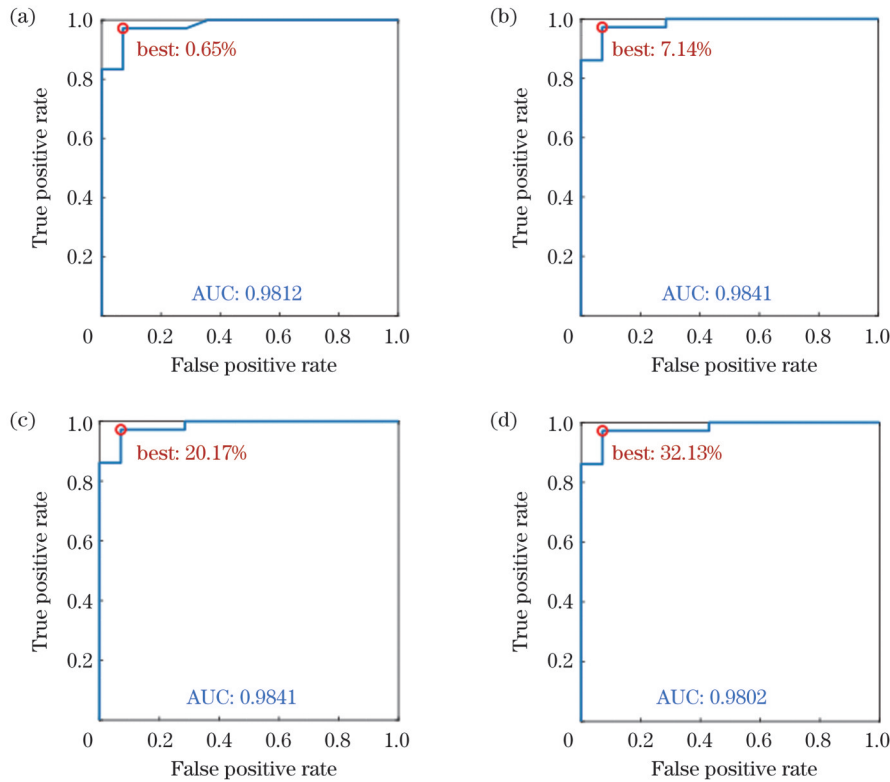


图 12 不同阈值下的 ROC 曲线分析。(a) 0.18 V; (b) 0.21 V; (c) 0.25 V; (d) 0.29 V

Fig. 12 ROC curve analysis under different thresholds. (a) 0.18 V; (b) 0.21 V; (c) 0.25 V; (d) 0.29 V

根据图 12 的阈值选择,以 0.21 V 作为光强的小值阈值,以 7.14% 作为小值占比的阈值,对试验中 50 个样本进行了分类,监测信号分布情况如图 13 所示,不同样本中异常信号的占比如表 2 所示,其中加粗数据大于 7.14% 的阈值百分比。将表 2 与图 13 中基于监测数据诊断出的异常样本与基于表面缺陷形貌的人工分类结果(图 9)进行对比,可知沉积缺陷样本的识别度较高,最高识别精度可达 97.22%。

5 结 论

研究了激光粉末床熔融增材制造过程中不同粉末厚度条件下的零件质量特征,阐明了粉层厚度对零件

使用 Matlab 软件绘制了 ROC 曲线。小值阈值分别选取了无缺陷样本数据的一分位(0.18 V)、五分位(0.21 V)、十分位(0.25 V)、二十分位(0.29 V),如图 12 所示。采用 ROC 曲线下面积(AUC)值评估分类器的性能,其中,AUC 值越接近 1,表示分类性能越好。结果显示,0.21 V 和 0.25 V 作为阈值时,AUC 高达 0.9841,可以较好地实现样品分类。在这两个小值阈值下,最佳阈值百分比分别是 7.14% 和 20.17%。考虑到本研究的目的是更好地识别缺陷样本,而正常打印情况下样本所展现的异常小值占比应该较小,所以选择 0.21 V 作为小值阈值,7.14% 作为阈值百分比。通过计算可知,此时的准确率达到 96%,表明模型对样本具有较好的分类能力。

沉积缺陷的影响规律。分析了光电探测器采集的光强和高速相机捕捉的熔池面积两种在线监测信号之间的映射关系。在此基础上,提出了一种诊断铺粉异常引起的沉积缺陷的方法。

1) 在 LPBF 成形过程中,粉末厚度的增加会显著降低零件的表面质量,导致内部孔隙缺陷的产生。在铺粉厚度从 30 μm 增加至 300 μm 的过程中,打印质量经历三个阶段:正常、熔道波动、球形。在优化的打印参数下,粉末厚度超过 90 μm 时容易形成 150 μm 以上的大尺寸球体并在内部形成未熔合缺陷。

2) 基于光电探测器及高速相机的熔池光信号在线监测方法对铺粉异常导致的沉积缺陷的敏感度高。

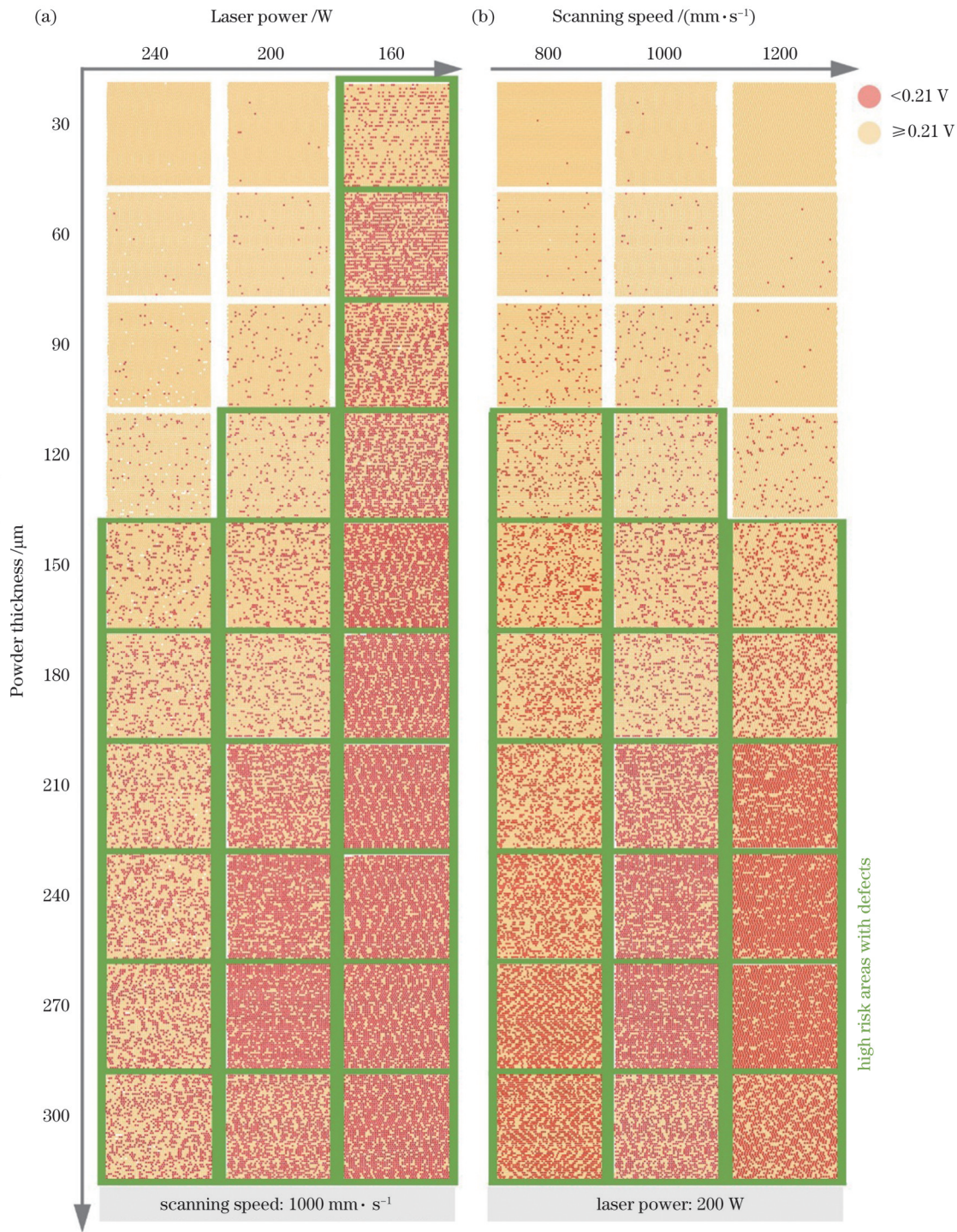


图 13 在小值阈值为 0.21 V 的条件下试验样本异常监测信号的分布。(a)不同激光功率与粉末厚度下的样本;(b)不同扫描速度与粉末厚度下的样本

Fig. 13 Distributions of abnormal monitoring signals of test samples when small threshold is 0.21 V. (a) Samples under different laser powers and powder thicknesses; (b) samples under different scanning speeds and powder thicknesses

其中,熔池光强随着铺粉厚度的增加而减小,随着粉末厚度从 30 μm 增加至 300 μm ,熔池光强均值从 0.6 V 左右降低至 0.2 V 左右,反映了球化过程中熔池温度的降低。同时,熔池面积会随着铺粉厚度的增加而增加,这与球化过程中熔池凝固时间增加导致的多个液态区域共存密切相关。

3) 结合在线监测信号特征与零件质量分析,提出了一种基于光强信号的沉积缺陷在线诊断方法,用以识别铺粉异常:当光强值小于 0.21 V 的比例超过 7.14% 时,可以诊断为铺粉异常,真阳性率可达 97.22%。

LPBF 在线监测的目标是实现打印过程的“监测、

表 2 试验样本异常信号的占比情况
Table 2 Proportions of abnormal signals in test samples

Powder thickness / μm	Proportion of abnormal signals /%				
	Laser power of 240 W and scanning speed of 1000 m/s	Laser power of 200 W and scanning speed of 1000 m/s	Laser power of 160 W and scanning speed of 1000 m/s	Scanning speed of 800 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and laser power of 200 W	Scanning speed of 1200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and laser power of 200 W
30	0	0.24	17.90	0.08	0
60	0.27	1.23	54.15	1.01	0.04
90	1.10	4.48	42.95	6.21	0.04
120	3.96	8.90	55.40	12.74	2.17
150	13.49	21.49	66.32	23.47	11.44
180	20.70	35.79	74.60	28.22	22.19
210	29.05	57.78	78.04	35.09	63.85
240	33.73	72.51	77.27	48.86	75.02
270	40.05	80.52	77.01	57.92	77.45
300	40.50	58.69	77.73	59.20	53.47

诊断、反馈和控制”。基于两种监测手段研究了缺陷的“监测”，并在一定程度上对铺粉缺陷的“诊断”提出了见解。未来将更精准地实现“诊断”和“控制”：一是利用机器学习的方法实现打印过程的分区识别，将本文的缺陷判定准则用于局部铺粉异常信息的判断和提取；二是根据缺陷识别的结果为缺陷区域提供反馈以调整控制策略。

参 考 文 献

- [1] 宋长辉, 付厚雄, 严仲伟, 等. 激光粉末床熔融成形内部质量缺陷及其调控方法[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402801.
Song C H, Fu H X, Yan Z W, et al. Internal defects and control methods of laser powder bed fusion forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402801.
- [2] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [3] 郭朦, 戴延丰, 黄斌达. 典型航空机电产品激光粉末床熔融技术应用现状与发展[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602304.
Guo M, Dai Y F, Huang B D. Application status and development of laser powder bed fusion technology in typical electromechanical aviation products[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602304.
- [4] 秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402002.
Qin Y L, Sun B H, Zhang H, et al. Development of selective laser melted aluminum alloys and aluminum matrix composites in aerospace field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402002.
- [5] Yang G, Xie Y L, Zhao S, et al. Quality control: internal defects formation mechanism of selective laser melting based on laser-powder-melt pool interaction: a review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(3): 100037.
- [6] Sun X Y, Chen M A, Liu T T, et al. Characterization, preparation, and reuse of metallic powders for laser powder bed fusion: a review[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(1): 012003.
- [7] 李军, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化 GH3536 高温合金成形特征与缺陷研究[J]. 中国激光, 2023, 50(12): 1202302.
Li J, Liu T T, Liao W H, et al. Forming characteristics and defects of GH3536 superalloy by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(12): 1202302.
- [8] 闫泰起, 唐鹏钧, 陈冰清, 等. 能量密度对激光选区熔化成形 AlSi10Mg 合金缺陷及力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(24): 96-105.
Yan T Q, Tang P J, Chen B Q, et al. Effect of energy density on defects and mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24): 96-105.
- [9] 吕新蕊, 刘婷婷, 廖文和, 等. 高强铝合金 7075 激光粉末床熔融凝固裂纹的消除与质量控制[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402209.
Lü X R, Liu T T, Liao W H, et al. Solidification crack elimination and quality control of high-strength aluminum alloy 7075 fabricated using laser powder bed fusion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402209.
- [10] Zhang C C, Liu T T, Liao W H, et al. Investigation of the laser powder bed fusion process of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 32.
- [11] Mukherjee T, Elmer J W, Wei H L, et al. Control of grain structure, phases, and defects in additive manufacturing of high-performance metallic components[J]. Progress in Materials Science, 2023, 138: 101153.
- [12] Zhu X, Zhu Z G, Liu T T, et al. Crack-free and high-strength AA2024 alloy obtained by additive manufacturing with controlled columnar-equiaxed-transition[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 156: 183-196.
- [13] Yang T, Liu T T, Liao W H, et al. Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 849: 156300.
- [14] Chen X Y, Liao W H, Wei H L, et al. Formation mechanisms and control strategies of metallurgical defects and microstructures during laser powder bed fusion of AlSi10Mg lattice structures[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 139-153.
- [15] Altmeyen J, Nekić R, Wagenblast P, et al. Transient simulation of particle transport and deposition in the laser powder bed fusion process: a new approach to model particle and heat ejection from the melt pool[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102135.
- [16] Bevans B, Barrett C, Spears T, et al. Heterogeneous sensor data

- fusion for multiscale, shape agnostic flaw detection in laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, 18(1): 2196266.
- [17] Liu M N, Wei K W, Zeng X Y. High power laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy: effect of layer thickness on defect, microstructure and mechanical property[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 842: 143107.
- [18] Jansen D, Hanemann T, Radek M, et al. Development of actual powder layer height depending on nominal layer thicknesses and selection of laser parameters[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 298: 117305.
- [19] Grasso M, Remani A, Dickins A, et al. *In-situ* measurement and monitoring methods for metal powder bed fusion: an updated review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(11): 112001.
- [20] Wu B, Ji X Y, Zhou J X, et al. *In situ* monitoring methods for selective laser melting additive manufacturing process based on images: a review[J]. *China Foundry*, 2021, 18(4): 265-285.
- [21] 张婷, 周鑫, 段玉聪, 等. 激光粉末床熔融过程因素与熔池辐射强度关联研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 1402206.
- Zhang T, Zhou X, Duan Y C, et al. Relationship between powder bed fusion-laser forming process factors and molten pool radiation intensity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 1402206.
- [22] Kleszczynski S, Jacobsmühlen J Z, Reinartz B, et al. Improving process stability of laser beam melting systems[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://www.lfb.rwth-aachen.de/bibtexupload/pdf/JAC14a.pdf>.
- [23] 李中伟, 张禹泽, 钟凯, 等. 激光粉末床熔融光学原位监测技术综述[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(12): 1-9, 27.
- Li Z W, Zhang Y Z, Zhong K, et al. *In-situ* monitoring techniques for laser powder bed fusion additive manufacturing: a review[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(12): 1-9, 27.
- [24] Taherkhani K, Sheydaian E, Eischer C, et al. Development of a defect-detection platform using photodiode signals collected from the melt pool of laser powder-bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 46: 102152.
- [25] Booth B G, Heylen R, Nourazar M, et al. Encoding stability into laser powder bed fusion monitoring using temporal features and pore density modelling[J]. *Sensors*, 2022, 22(10): 3740.
- [26] Zou Z Y, Zhang K, Zhu Z G, et al. Multi-sensor monitoring of powder melting states via melt pool optical emission signals during laser-based powder bed fusion[J]. *Optics Laser Technology*, 2024, 169: 109880.
- [27] Zheng M, Wei L, Chen J, et al. A novel method for the molten pool and porosity formation modelling in selective laser melting[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 1091-1105.
- [28] Cunningham R, Zhao C, Parab N, et al. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed X-ray imaging[J]. *Science*, 2019, 363(6429): 849-852.
- [29] Tseng C C, Li C J. Numerical investigation of interfacial dynamics for the melt pool of Ti-6Al-4V powders under a selective laser[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 134: 906-919.
- [30] Wei H L, Cao Y, Liao W H, et al. Mechanisms on inter-track void formation and phase transformation during laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101221.
- [31] Jin P, Tang Q, Song J, et al. Numerical investigation of the mechanism of interfacial dynamics of the melt pool and defects during laser powder bed fusion[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107289.
- [32] Zhang L, Liao W H, Liu T T, et al. *In situ* elimination of pores during laser powder bed fusion of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(3): 439-452.
- [33] 殷杰, 郝亮, 杨亮亮, 等. 激光选区熔化增材制造中金属蒸气与飞溅相互作用研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 1402202.
- Yin J, Hao L, Yang L L, et al. Investigation of interaction between vapor plume and spatter during selective laser melting additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 1402202.
- [34] Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. *International Materials Reviews*, 2012, 57(3): 133-164.
- [35] Olakanmi E O, Cochrane R F, Dalgarno K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: processing, microstructure, and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 401-477.
- [36] 梁平华, 唐倩, 冯琪翔, 等. 激光选区熔化单道扫描与搭接数值模拟及试验[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(22): 56-67.
- Liang P H, Tang Q, Feng Q X, et al. Numerical simulation and experiment of single track scanning and lapping in selective laser melting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(22): 56-67.
- [37] Zhao M Z, Wei H L, Mao Y M, et al. Predictions of additive manufacturing process parameters and molten pool dimensions with a physics-informed deep learning model[J]. *Engineering*, 2023, 23: 181-195.
- [38] 张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903007.
- Zhang K, Liu T T, Zhang C D, et al. Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0903007.
- [39] 陈锦堂, 张凯, 刘婷婷, 等. 激光粉末床熔融成形件的翘曲变形监测[J]. *中国激光*, 2024, 51(16): 1602306.
- Chen J T, Zhang K, Liu T T, et al. An approach of online monitoring for laser powder bed fusion warping deformation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(16): 1602306.

***In-Situ* Monitoring and Diagnostics for Deposition Defects in Laser Powder Bed Fusion Process Based on Optical Signals of Melt Pool**

Chen Xiangyuan, Wei Huiliang*, Liu Tingting**, Zhang Kai, Li Jiansen,
Zou Zhiyong, Liao Wenhe

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract

Objective Laser powder bed fusion (LPBF) is a highly promising technique that affords significant advantages in mitigating the high costs and lengthy procedures associated with manufacturing precise and complex components in the aerospace industry. However, the

printing process encounters uncontrollable issues, such as fluctuations in laser energy, unstable airflow, and damage to the recoater. These issues can lead to uneven powder spreading thickness, causing deposition defects that critically impact part quality. To improve the formation quality, the deposition defects caused by abnormal powder thickness must be monitored. Despite rapid advancements in online monitoring technologies, the complexity of signal data and its unclear correlation to actual part defects present significant challenges. Establishing the relationship between the deposition defect and monitoring signal for different powder thicknesses is necessary to address the issues related to powder spreading anomalies. Moreover, developing rapid and effective diagnostic methods is crucial to providing a foundation for the feedback control of defects. This study demonstrates the use of an online monitoring system that integrates proprietary photodiodes and high-speed cameras to collect and analyze data across various powder thicknesses. We establish a foundation for the online monitoring and real-time diagnostics of defects by investigating the evolution patterns of part surface quality and internal defects.

Methods In the experimental study, substrates pre-treated with milling are customized with designs of grooves with different depths ranging from 30 μm to 300 μm in 30- μm steps (Fig. 4). The powder is spread across these grooves, and a recoater is used to ensure that each groove reaches the designated thickness. Single-layer laser exposure is performed in different areas using different laser parameters (Table 1). The light intensity and melt pool area are monitored online at a frequency of 10 kHz during the printing process by using three off-axis photodiodes and a coaxial high-speed camera. After printing, the surface morphology and internal defects of the samples are characterized using confocal laser scanning microscope and scanning electron microscope. The impact of powder thickness on deposition defects is investigated by integrating online monitoring signals with offline material characterization data.

Results and Discussions The mapping images of light intensity and melt pool area distribution (Fig. 5) reveal that, as powder thickness increases under the same process parameters, the light intensity gradually decreases, and the melt pool area increases. Additionally, under the same powder-layer thickness, the average intensity of the melt pool decreases with decreasing energy density (Fig. 6). The surface roughness increases with powder thickness (Fig. 8). For instance, with the laser power at 200 W and scanning speed at 1000 mm/s, the surface roughness increases from 4.16 μm to 117.86 μm as the powder thickness increases from 30 μm to 300 μm . The surface morphology (Fig. 9) and internal porosity defects (Fig. 10) indicate the following three stages of the melt pool with increasing powder thickness: 1) smooth surface with clear melt tracks and uniform melt pool depth; 2) continuous melt tracks on the surface but large fluctuations in melt pool size (width, height, and depth); 3) melt track discontinuities with the emergence of large balling defects over 150 μm , leading to porosity between melt tracks and at the bottom. Monitoring signals under different powder thicknesses can be categorized into three corresponding stages based on melt pool conditions. The balling state requires the device to immediately detect anomalies and quickly respond in subsequent layers. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis shows that selecting 0.21 V as the threshold for low values and 7.14% as the threshold percentage yields a model with a good capability to identify deposition defects (Figs. 12 and 13).

Conclusions In summary, printing characteristics under different powder thicknesses during the LPBF process are investigated. When the powder thickness increases in LPBF, the surface quality worsens, and internal porosity defects occur. When the powder thickness exceeds 90 μm , large balling defects can exceed 150 μm in size. The relationship between the light intensity collected by photodiodes and melt pool area captured by high-speed cameras is analyzed. The monitoring of the melt pool light signal is highly sensitive to deposition defects due to powder spreading anomalies. As the powder-layer thickness increases, the light intensity decreases, while the melt pool area increases. As the thickness increases from 30 μm to 300 μm , the average intensity of the melt pool decreases from 0.6 V to 0.2 V. On the basis of these results, a novel diagnostic method for deposition defects is devised by employing threshold percentages derived from optical monitoring signals. When the proportion of light intensity values less than 0.21 V exceeds 7.14%, it can be diagnosed as abnormal powder spreading with a true positive rate of 97.22%.

Key words additive manufacturing; laser powder bed fusion; *in-situ* monitoring; optical signals of melt pool; deposition defects