

激光粉末床熔融过程因素与熔池辐射强度关联研究

张婷, 周鑫*, 段玉聪, 张佩宇, 郭西洋, 成星

空军工程大学航空等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038

摘要 利用光电二极管采集熔池辐射信息, 深入挖掘熔池辐射信号中的工艺及过程稳定性信息。基于统计学分析方法研究了不同层高、不同基板位置、不同扫描线角度等过程因素对熔池辐射信号的影响, 分析了熔池辐射信息与热积累、烟尘遮蔽等物理现象之间的内在联系, 建立了“信号-过程因素-物理机制”之间的对应关系。结果表明, 熔池辐射强度均值随层高的增加有明显升高趋势; 顺、逆风向的熔池辐射强度波形呈“左偏”、“右偏”形状特征; 不同位置的熔池辐射强度差异明显; 扫描线角度是否沿着样件摆放方向明显影响强度均值。其典型规律表明这些特征可以作为质量监控的重要参考。

关键词 激光技术; 激光粉末床熔融; 光电二极管; 过程因素; 熔池辐射强度

中图分类号 TH16; TP277

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1402005

1 引言

激光粉末床熔融 (Powder Bed Fusion-Laser, PBF-L) 是利用高能束激光辐照金属薄粉, 逐层熔凝堆积成形的新型增材制造技术^[1]。PBF-L 能够直接生产高致密度、高精度以及任意复杂形状的金属零件, 已经在航空航天、汽车、生物医药和模具等领域中得到大量应用^[2-3]。但 PBF-L 涉及的过程影响因素众多, 难以保证成形零部件质量的一致性和可重复性, 从而制约了其在航空航天等关键领域中的成熟应用^[4]。

为解决 PBF-L 增材制造产品的稳定性、可重复性等问题, 近年来过程实时原位监测受到越来越多的关注^[5-6]。在成形过程中, 一些关键的过程变量可以表征构建的质量, 国内外诸多学者对其开展了大量研究。Gunenthiram 等^[7-8]基于高速相机进行 PBF-L 过程监测, 并基于图像特征研究了飞溅等的内在机理, 提出采用热传导的制造方式, 减少飞溅的产生, 改善产品的质量。Kriczky 等^[9]使用双波长高温计获得熔池的同轴热图像, 然后提取温度梯度、长宽比、峰值温度和熔池面积等与温度相关的特征, 并进行空间重构, 以评估成形质量。Stutzman 等^[10]建立了一个多传感器系统, 将光谱仪和电荷耦合装置 (CCD) 相机相结合来捕捉羽流辐射, 进行实时缺陷检测和质量评估。Shevchik 等^[11]搭建了基于光纤光栅传感器的熔池监控系统实时收集熔池声信号, 监测孔隙率, 并与强化学习相结合, 建立声信号和质量之间的关系^[12]。上述研究以熔池形貌、温度分布、辐射信息、声信号等为监测对象, 采

用高速相机、高温计、光谱仪、光纤布拉格光栅等传感器探究了 PBF-L 过程变量与成形质量的关联, 但并不适合规模化工程应用, 原因在于: 1) 传感器的价格昂贵, 一台高速相机的价格甚至可能超过增材设备; 2) 采集的海量熔池信息 (例如高分辨率、高帧率熔池图像) 将极大限制数据的传输、存储和处理速度; 3) 开发相应的过程变量提取和数据分析算法较为复杂。

除上述提及的传感器外, 光电二极管也是常用的 PBF-L 过程变量监测手段。该方式具有硬件成本低、监测灵敏度高、鲁棒性好、响应时间短、采样数据小和易于集成等优势, 较为适合规模化工程应用^[13]。其基本原理^[14]是光电二极管将实时探测到的熔池光辐射信号转换为电压信号, 从而获得熔池光辐射信号。由于熔池光辐射信号包含了大量熔池实时信息, 监控并分析熔池信号可以实时准确地反映熔池内部动态状况, 有利于掌握粉末床激光成形过程规律、预测成形质量, 从而进一步优化工艺。因此对于熔池辐射监控数据的进一步挖掘与分析是非常重要的工作, 对于后续质量预判与质量控制非常关键。

目前国内外关于熔池辐射数据的研究相对较少, Coeck 等^[15]通过光电二极管对 PBF-L 加工过程监测到的熔池辐射光信号进行提取和分析, 提出了一种预测孔隙大小与位置的方法。段玉聪等^[16]基于光电二极管的熔池监控数据对 PBF-L 进行机器学习, 实现了对质量 (密度、表面粗糙度) 的预测以及对工艺参数的识别。Zhang 等^[17]依据光电二极管分区监测数据, 分析了熔池数据和工艺参数与几种缺陷之间的关系。杜

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2021-11-05; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金 (91860136)、广东省重点研发计划 (2018B090905001)、陕西省重大专项 (2018zdx01-04-01)

通信作者: *dr_zhouxin@126.com

道中^[18]对 PBF-L 不同工艺参数及边界条件下的熔池监控数据进行了分析,得到了不同工艺参数和边界条件下的熔池辐射强度变化规律。这些研究工作主要考量激光功率、激光速度等工艺参数与辐射信号关联,而没有考虑其他过程因素对辐射信号的影响。然而 PBF-L 是一个非常复杂的过程^[19],影响因素非常多,即使是同一设备同一工艺参数,其成形质量依然有可能不同,而追求工艺稳定与可重复性是增材制造大规模应用的关键,因此其他过程因素对粉末床成形稳定性和质量的影响研究非常重要。

本文对粉末床激光成形过程中光电二极管采集的熔池辐射监控信号进行提取和处理,并进行统计学分析,对不同层高、不同风向、不同位置、不同扫描线角度等过程因素对熔池辐射强度数据的影响进行了讨论,

并在此基础上分析了熔池辐射强度数据的变化规律与热积累、烟尘遮蔽等物理机制之间的内在联系。研究结果为后续利用机器学习等算法进行更精确的智能监控分析提供了参考,为粉末床激光成形生产工艺实现标准化和一致性提供了新的思路。

2 研究方法

2.1 实验设计

本文采用北京易加三维科技有限公司生产的 EP-M250 设备(图 1)进行成形,该设备由激光光学扫描系统(激光光学系统和扫描振镜)、工作舱、气体流通分析系统(气体循环系统、氧气分析报警系统)、控制系统(计算机、软件系统)以及由西安空天机电智能制造有限公司研发的在线监控系统组成。



图 1 PBF-L 成形及监控设备

Fig. 1 PBF-L forming and monitoring equipment

粉末采用的是 K438 高温合金粉末,为航空发动机热端部件常用材料;经过前期工艺参数实验,得到该高温合金粉末最佳工艺参数,并选取为本次成形实验参数,具体参数如表 1 所示。

表 1 工艺参数

Table 1 Process parameters

Parameter	Laser power / W	Scanning speed / (mm/s)	Spacing interval / mm	Powder layer thickness / μm
Value	275	1200	0.07	40

为了更贴近实际生产过程,扫描方式选取为蛇形扫描;在实际工程中为了避免应力集中,相邻两层扫描线会旋转一个角度。根据实际工程经验并尽可能避免各层扫描线角度有重叠,本文选取相邻两层扫描线角度旋转 17° 左右,扫描线角度不超过 $\pm 60^\circ$,超过时该层扫描线角度返回起始角度 $\pm 3^\circ$ 附近。本文为了验证风场对熔池辐射强度的影响,将样件距离出风口的位置分为 3 组,实体共打印 190 层,为了验证重复性,每组样件均打印两个,其具体位置如图 2 所示。

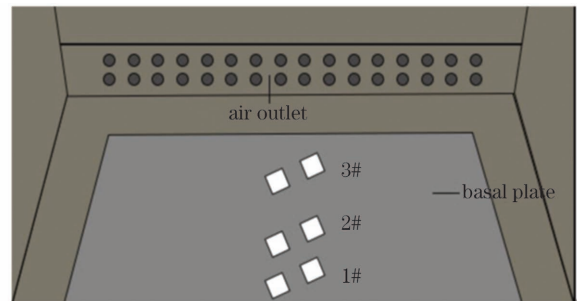


图 2 样件相对出风口位置

Fig. 2 Sample position relative to air outlet

2.2 数据获取

成形过程中,采用美国 Thorlabs 公司生产的 PDA10A2 硅光电二极管传感器收集熔池的辐射光,该光电二极管的波长范围为 $200\sim 1100\text{ nm}$,采集频率为 50 kHz 。图 3 是粉末床熔池在线监控系统示意图,激光通过激光器发射经扫描振镜反射至成形仓内,被粉末部分吸收进而熔化形成熔池,此过程中会伴随着发光发热且光热向周围扩散,进而产生熔池光辐射。由于成形仓内除了有熔池光辐射还有照明灯可视光 ($450\sim 460\text{ nm}$) 以及反射的激光 (1024 nm) 等,为了避免激光发射光干扰,全面反映熔池特征,因此设置一个 $600\sim 1000\text{ nm}$ 的带通滤波片。过滤干扰光波后,将处

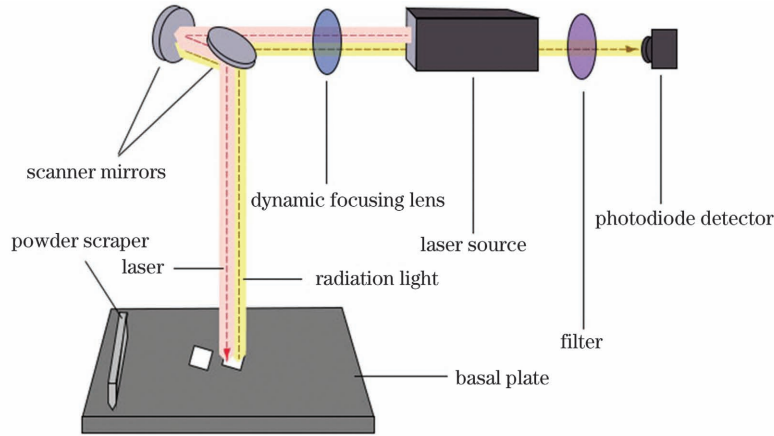


图 3 PBF-L 熔池在线监控系统

Fig. 3 Online monitoring system for PBF-L molten pool

于辐射光峰值附近的红外波段光采集至光电二极管,随后光电二极管将熔池辐射信号转化成电压信号,传至计算机存储,实现熔池辐射在线监控。

上述粉末床成形在线监控系统的数据采样率为 50 kHz, PBF-L 成形过程中的熔池辐射信号以及工艺参数等信息被采集卡实时收集,并按层形成 xml 及 txt 文件。其文件分别存储了激光功率、扫描速度、扫描线起止坐标、采集点强度、开关量等信息。

2.3 数据处理

本文利用 python 语言进行数据处理,首先将采集到的原始熔池辐射监控数据进行解析,通过中值滤波

对每一层的数据进行预处理,再根据开关量将强度数据按试样进行分割并与之对应。

利用统计学方法对分割后的数据进行处理,选取均值与标准差作为评估信号特征的指标,其中均值代表了平均强度,标准差则显示了实际信号围绕均值的波动状况,体现其离散程度,可以反映熔池的稳定状况。为了示图方便,将标准差归一化再除以 10 后记为相对标准差,与均值整合在同一图中,图 4 所示折线表示强度均值,围绕均值上下浅色条带代表了标准差的相对大小,条带越窄标准差越小,条带越宽标准差越大,清晰地展示了熔池的强度信息及稳定状况。

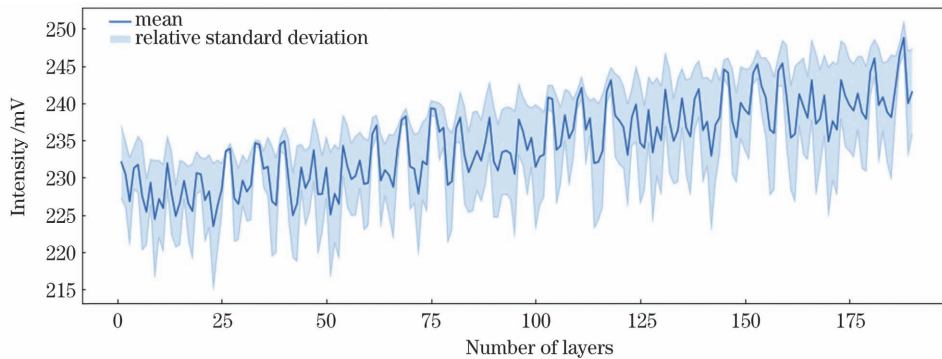


图 4 熔池辐射强度随层数的变化

Fig. 4 Radiation intensity of molten pool versus number of layers

3 结果分析与讨论

3.1 不同层数对熔池辐射强度的影响

图 4 为不同层数下熔池辐射强度的均值及标准差的变化趋势,可以明显看出随层数的升高,熔池辐射强度均值上下波动起伏,但整体呈现升高趋势,打印 190 层,辐射强度均值上升了约 6%,同时其相对标准差随着强度均值波动,且在均值峰值处较小。说明在实际工程应用中,并不能仅以“激光功率/速度-辐射强度”关系作为设备是否运行正常的判据,需要考虑构件大小、成形时间、成形层高等多种因素对熔池辐射强度的影响。

在 PBF-L 成形过程中,入射激光辐照粉末层,一部分能量被粉末吸收,粉末熔化形成熔池,另一部分传

递到熔池周围区域^[20]。这个过程中光谱辐射亮度与熔池辐射温度、光波长之间的关系可以用普朗克热辐射定律^[21]进行诠释:

$$L(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

式中: L 为黑体的光辐射出射度; T 为温度; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.7417 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 1.4387 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; λ 为真空中的波长。

光电二极管采集光电信号后输出的光电流为

$$i_p = \int_0^{\infty} L(\lambda, T) \cdot A \cdot \alpha \cdot R d\lambda, \quad (2)$$

式中: A 为辐射源面积,在本文中光斑直径为 $0.12 \mu\text{m}$,可近似认为点光源; α 为光电二极管立体角;

R 为光谱响应度, 为常量。

负载电阻将产生的光电流转换成电压信号, 则光电二极管输出电压(V)与温度关系为

$$V \propto i_p \propto \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) d\lambda. \quad (3)$$

在本文中, 经带通滤波片滤波后, 采集的波长范围为 600~1000 nm, 设温度范围为 1~4000 K, 积分后温度 T 与 V/k 的关系曲线如图 5 所示, 其中 k 为反馈电阻、光谱响应度、辐射源面积和光电二极管立体角的乘积。

由图 5 可知, 光电二极管的辐射亮度随温度的升高而升高。PBF-L 是逐层累积成形的, 随着层高的增

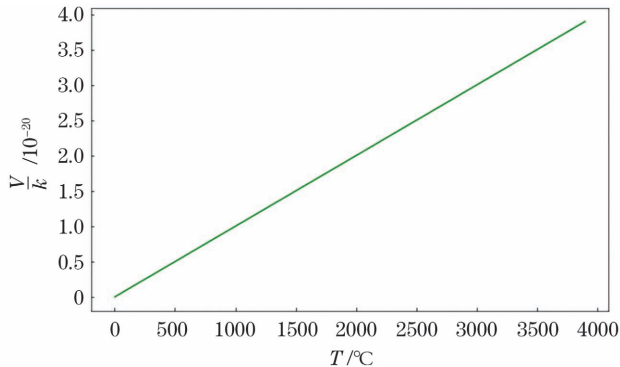


图 5 输出电压与温度的关系图

Fig. 5 Relationship between output voltage and temperature

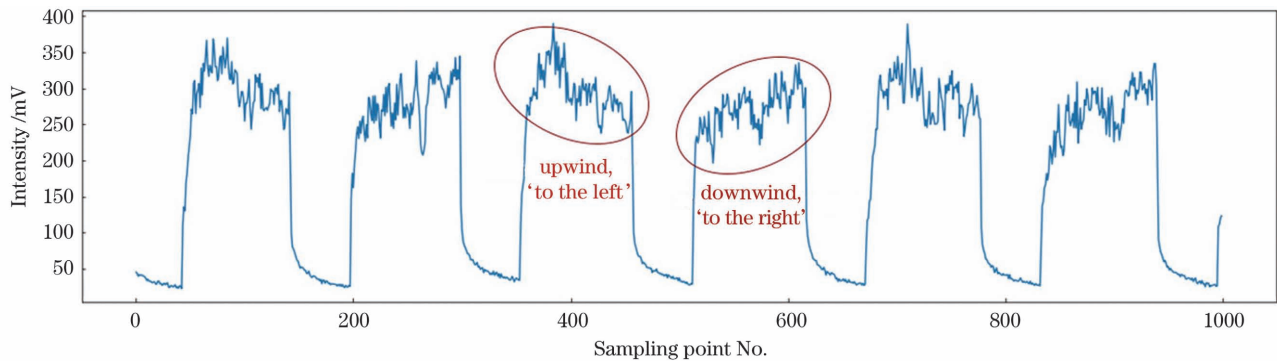


图 6 熔池辐射强度波形图

Fig. 6 Radiation intensity waveform of molten pool

究其原因主要为顺风向时, 气流与扫描方向一致, 烟尘及飞溅物等弥漫在熔化点前方并流向出口, 此时会产生遮蔽效应, 使得激光实际到达粉末层的能量减弱, 从而使得熔池辐射光强减弱。随着时间的推移, 烟尘及飞溅物浓度变大, 遮蔽效应变强, 熔池辐射光强更弱, 因

加, 下层积累的热量扩散, 使得当前层粉末预先加热, 粉末对激光的吸收率增大^[22], 熔池的温度随之升高, 熔池辐射强度也呈现整体上升的趋势。

3.2 风场对熔池辐射强度的影响

在 PBF-L 过程中, 高能激光辐照金属粉末使得一部分金属粉末熔化形成熔池, 随后熔池快速冷却并且快速流动, 产生飞溅; 另一部分直接气化的金属粉末和周围的夹带物质在熔池对流和蒸汽反冲力的作用下形成烟尘弥散在成形仓中^[23]。弥散的烟尘会使激光束被吸收和散射, 从而使得实际入射的激光功率降低, 产生的飞溅物还会影响下一层的铺粉与熔融^[24], 导致孔洞的产生。成形仓的风场可以很好地改善这些情况, 气流将绝大部分的烟尘和飞溅物带离成形仓, 从而保证较高的成形效率与质量。因此研究分析风场对熔池辐射强度的影响十分重要。

3.2.1 不同风向对熔池辐射强度的影响

随机取一样件的某一层前 1000 个采样点的强度波形图, 如图 6 所示, 可以看出, 顺风向的熔化道辐射强度值逐渐降低, 呈现“左偏”形状特征, 逆风向的熔化道辐射强度值逐渐升高, 呈现“右偏”形状特征。由于本文中的扫描方式是蛇形扫描, 即相邻熔化道一条为顺风向, 一条为逆风向, 该层扫描线角度为 -42° , 因此该层奇数熔化道为顺风向, 偶数熔化道为逆风向。

此熔池辐射光强数据呈现“左偏”现象。逆风向时, 气流与扫描方向相反, 烟尘与飞溅物等弥散在熔化点后方, 遮蔽效应的影响很小, 并随着时间的推移, 熔化点逐渐脱离烟尘等影响范围, 因此熔池辐射强度数据呈现“右偏”现象。烟尘及飞溅物与熔化点的位置关系如图 7 所示。

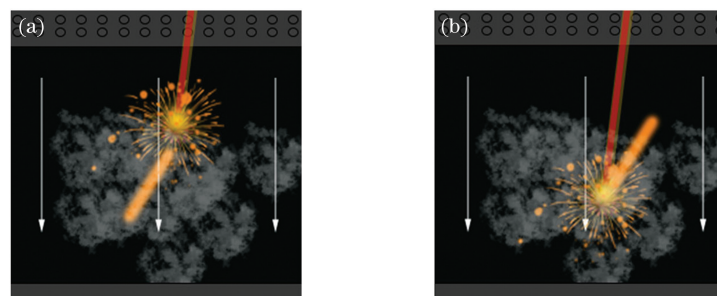


图 7 烟尘与熔化点的相对位置关系。(a) 逆风时; (b) 顺风时

Fig. 7 Relative position relationship between soot and melting point. (a) Upwind; (b) downwind

3.2.2 不同位置对熔池辐射强度的影响

图 8 为样件处于基板的不同位置(相对于出风口位置)时熔池辐射强度的均值,可知 1# 样件处的强度均值(225~240 mV)最高,2# 样件处的强度均值

(220~230 mV)次之,3# 样件处的强度均值(205~220 mV)最低,其中 1# 样件距离出风口最远,2# 次之,3# 最近(如图 2 所示),可知距离出风口越远,其强度均值越高。

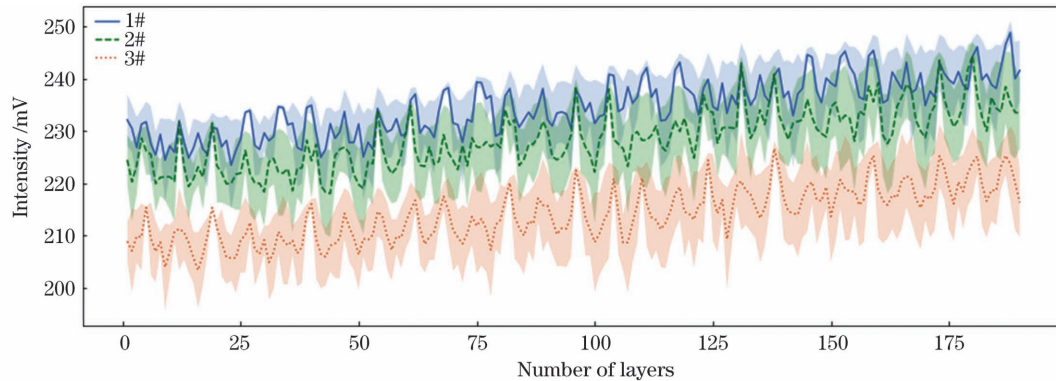


图 8 不同位置下的熔池辐射强度随层数的变化

Fig. 8 Radiation intensity of molten pool versus number of layers for different positions

分析不同位置对熔池辐射强度的影响。首先保护气循环流动一方面去除扫描过程中产生的大部分烟尘,但仍有烟尘聚集在距离粉末床上方 20 mm 附近,另一方面气流会带走一部分金属粉末熔化产生的热量^[25]。距离出风口越近,风速越大^[26],带走热量越多,熔池强度也会越低。激光扫描粉末层后,产生的烟尘及飞溅物等并不能立刻被带离至出口,会扩散并随着气流流向出口。图 9(a)~(c)反映的是近出风口位

置,激光扫描样件不同部位时烟尘扩散并被带离成形仓的过程;图 9(d)、(e)、(f)则反映了远出风口位置,激光扫描样件不同部位其烟尘扩散并被带离成形仓的过程。样件相对于出风口的位置决定了烟尘及飞溅物离开成形仓的路程,距离出风口越远,烟尘及飞溅物需要走的路程越短,其很快被带离成形仓,浓度逐渐减小,激光遮蔽的影响较小,熔池辐射强度越大,反之距离出风口越近,遮蔽效应的影响越大,熔池辐射强度越小。

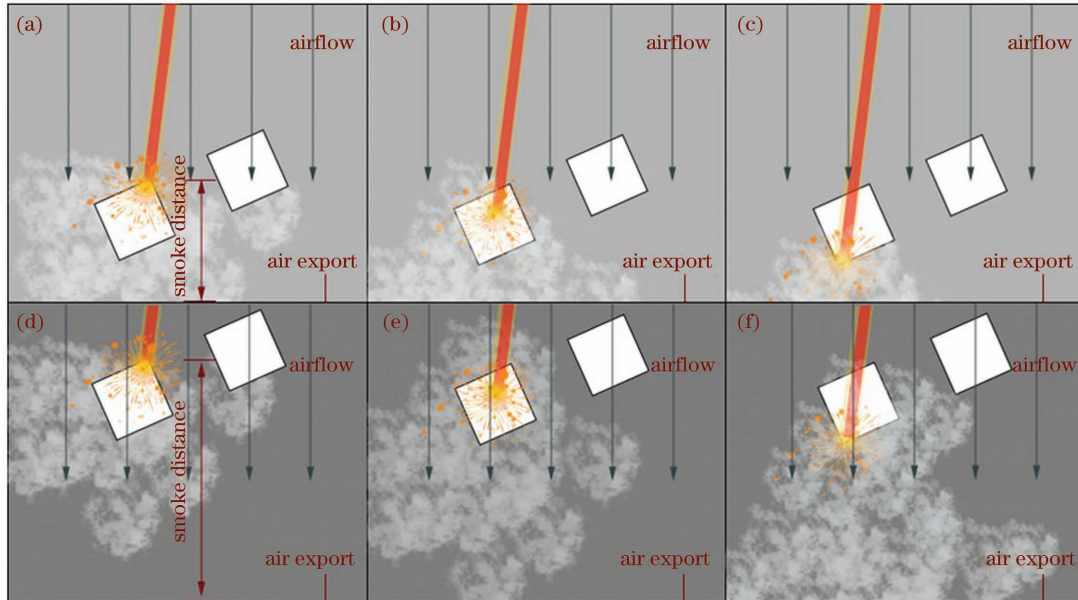


图 9 不同位置扫描烟尘被带出成形仓的过程。(a)近出风口位置,扫描初期;(b)近出风口位置,扫描中期;(c)近出风口位置,扫描后期;(d)远出风口位置,扫描初期;(e)远出风口位置,扫描中期;(f)远出风口位置,扫描后期

Fig. 9 Process of dust taken out of forming bin by scanning at different positions. (a) Near air outlet, in early scanning stage; (b) near air outlet, in middle scanning stage; (c) near air outlet, in final scanning stage; (d) far away from air outlet, in early scanning stage; (e) far away from air outlet, in middle scanning stage; (f) far away from air outlet, in final scanning stage

3.3 不同扫描线角度对熔池辐射强度的影响

图 10 为扫描线角度在不同层上的分布。可知扫描线角度在 $\pm 60^\circ$ 范围内变化,且每七层为一个周期;点的颜色深浅代表了该层强度均值的大小,每个周期

内强度均值最高的位置在扫描线角度为 20° 附近。图 11 则是熔池辐射强度在单个周期内的变化,更加清晰地显示出在扫描线角度为 20° 附近,该层的强度均值达到最高。

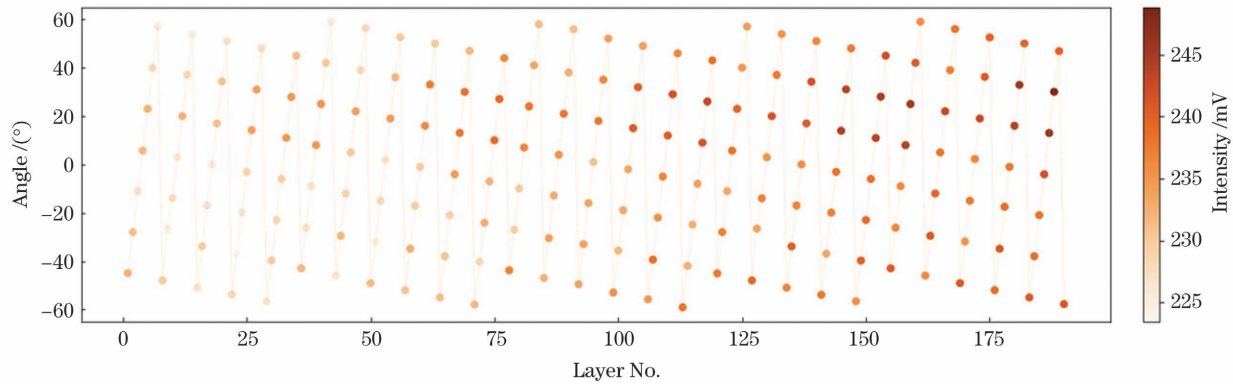


图 10 扫描线角度在不同层上的分布

Fig. 10 Distributions of scan line angles on different layers

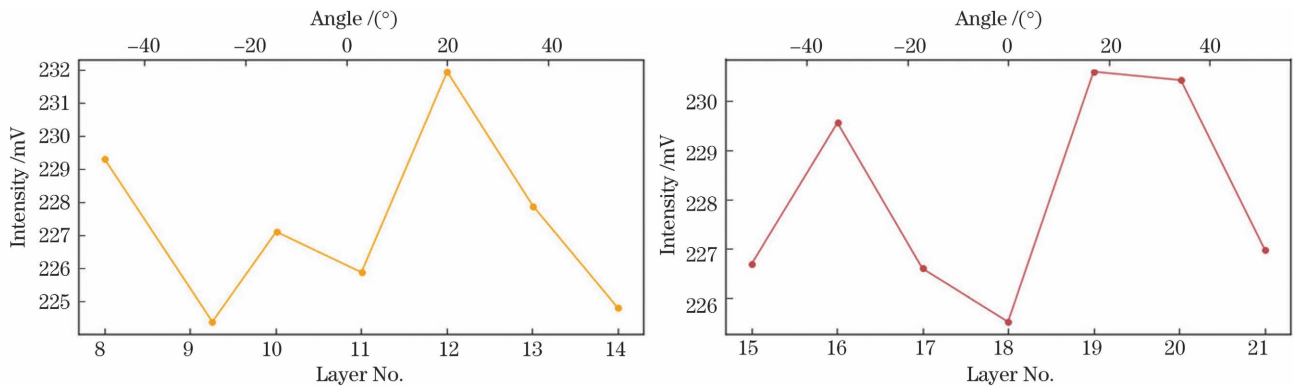


图 11 单个周期内强度均值随扫描线角度的变化。(a)第二个周期内；(b)第三个周期内

Fig. 11 Mean intensity versus scan line angle in single period. (a) In second period; (b) in third period

强度最大层的扫描线角度在 20° 附近,刚好与样件的摆放倾斜角度(以水平方向为基准)一致。可以判断,无论扫描线角度与样件摆放角度是否一致,只要样件面积一样,则激光扫过的面积(路径长度)一致。熔池辐射强度的差异应与激光扫描线的条数、激光开关

的占空比相关。图 12 (a)为不同角度下的扫描线示意图,可以看出,沿着样件摆放方向(20°)扫描,其扫描线为 L_1 条,倾斜于样件摆放方向扫描,扫描线为 L_2 条, $L_1 < L_2$, 所以沿着样件摆放方向扫描时的熔化道数最少。

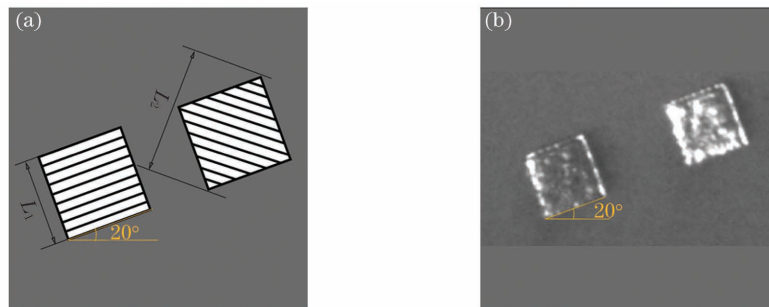


图 12 不同扫描角度下的扫描线对比。(a)不同角度下的扫描线示意图；(b)样件实体图

Fig. 12 Comparison of scan lines at different scan angles. (a) Diagram of scan lines at different angles; (b) sample solid drawing

不同扫描角度下的扫描线总长相同,激光功率、扫描速度也相同,因此不同扫描角度下整个样件扫描时激光开启的时间(记为 t_s)相同,即激光开关量中开的总量(记为 N_s)相同。由于沿着样件摆放方向扫描时的熔化道数最少,即激光开关的次数最少,此种情况下激光关闭时间(记为 t_c)或开关量中关的总量(记为 N_c)大于倾斜于样件摆放方向扫描。激光开关信号中的占空比^[27](记为 ψ)为激光开的时间占总时间的比

值,可表示为

$$\psi = \frac{t_s}{t_s + t_c} = \frac{N_s}{N_s + N_c} \quad (4)$$

沿着样件摆放方向扫描时的占空比记为 ψ_1 ,倾斜于样件摆放方向扫描时的占空比记为 ψ_2 ,由于激光开启量 N_s 是相等的,倾斜于样件摆放方向时的激光关闭量 N_{c2} 大于沿着样件摆放方向时的激光关闭量 N_{c1} ,因此 $\psi_1 > \psi_2$ 。强度均值是强度和(记为 Q)与总

采样点 N 之间的比值,表示为

$$M = \frac{Q}{N} = \frac{Q}{N_s} \cdot \psi. \quad (5)$$

由式(5)可知,在工艺参数(激光功率、扫描速度、扫描间距等)以及影响强度的其他环境因素不变的情况下,不同扫描方向下的强度和 Q 不变,又因为激光开启量 N_s 不变,所以激光开关占空比 ψ 越大,强度均值越大,沿着样件摆放方向扫描时强度的均值是最大的。

4 结 论

对粉末床激光成形过程中的主要监控数据——熔池强度进行了提取,分析了一些过程因素如层高、风向、基板位置及扫描线角度等对熔池强度变化的影响,深入探讨了其变化规律与热积累、烟尘遮蔽等物理机制内在的联系。主要研究结果如下。

1)随着层高的增加,熔池辐射强度均值呈整体升高趋势,打印 190 层的均值升高约 6%,主要原因是层间热积累导致熔池温度升高,使得熔池辐射强度升高。

2)风场中逆风向的熔池强度波形呈现“右偏”特征,顺风向的熔池强度波形呈现“左偏”特征,且距离出风口越远,熔池强度越大。其最大的影响因素是烟尘遮蔽,顺风向及近出风口位置的烟尘遮蔽效应更强,导致激光实际入射能量减弱,使得熔池辐射信号减弱。

3)扫描策略中扫描线沿着样件摆放方向(以水平方向为基准),强度均值最大,主要是因为该方向上激光开关占空比最大。

在实际工程中,这些过程因素对熔池辐射强度的影响应当予以考虑,这样才能更加准确地研究熔池的真实状态,从而实现精准控制。

参 考 文 献

- [1] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [2] 曾晓雁. 金属零部件激光增材制造技术与装备的发展现状与展望[J]. 现代制造, 2021(13): 10-11.
Zeng X Y. Development status and prospect of laser additive manufacturing technology and equipment for metal parts [J]. Maschinen Markt, 2021(13): 10-11.
- [3] 张家莲,李发亮,张海军. 选区激光熔化技术制备金属材料研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100003.
Zhang J L, Li F L, Zhang H J. Research progress on preparation of metallic materials by selective laser melting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100003.
- [4] Everton S K, Hirsch M, Stravroulakis P, et al. Review of *in situ* process monitoring and *in situ* metrology for metal additive manufacturing [J]. Materials & Design, 2016, 95: 431-445.
- [5] 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(17): 2839-2846, 2867.
Chan Y F, Chen C J, Zhang M. Review of on-line monitoring research on metal additive manufacturing process [J]. Materials Reports, 2019, 33(17): 2839-2846, 2867.
- [6] Chua Z Y, Ahn I H, Moon S K. Process monitoring and

- inspection systems in metal additive manufacturing: status and applications [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(2): 235-245.
- [7] Gunenthiram V, Peyre P, Schneider M, et al. Analysis of laser-melt pool-powder bed interaction during the selective laser melting of a stainless steel [J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(2): 022303.
 - [8] Gunenthiram V, Peyre P, Schneider M, et al. Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 376-386.
 - [9] Kriczky D A, Irwin J, Reutzel E W, et al. 3D spatial reconstruction of thermal characteristics in directed energy deposition through optical thermal imaging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 172-186.
 - [10] Stutzman C B, Nassar A R, Reutzel E W. Multi-sensor investigations of optical emissions and their relations to directed energy deposition processes and quality [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 333-339.
 - [11] 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.
 - [12] Wasmer K, Le-Quang T, Meylan B, et al. *In situ* quality monitoring in AM using acoustic emission: a reinforcement learning approach [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2): 666-672.
 - [13] Zhang P Y, Zhou X, Ma H Q, et al. Anomaly detection in laser metal deposition with photodiode-based melt pool monitoring system [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107454.
 - [14] 胡静. 光电二极管的工作原理及应用特性分析 [J]. 技术与市场, 2016, 23(12): 40-41.
Hu J. Analysis of working principle and application characteristics of photodiode [J]. Technology and Market, 2016, 23(12): 40-41.
 - [15] Coeck S, Bisht M, Plas J, et al. Prediction of lack of fusion porosity in selective laser melting based on melt pool monitoring data [J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 347-356.
 - [16] 段玉聪,王学德,周鑫,等. 粉末床激光成形熔池辐射强度信号的机器学习研究 [J/OL]. 航空学报: 1-11. [2021-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210803.1323.012.html>.
Duan Y C, Wang X D, Zhou X, et al. Study on radiation intensity signal of powder bed laser forming molten pool by machine learning [J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica: 1-11. [2021-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210803.1323.012.html>.
 - [17] Zhang K, Liu T T, Liao W H, et al. Photodiode data collection and processing of molten pool of alumina parts produced through selective laser melting [J]. Optik, 2018, 156: 487-497.
 - [18] 杜道中. 陶瓷材料激光选区熔化熔池光辐射监测技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 1-80.
Du D Z. Study on laser radiation monitoring technology of selective melting pool for ceramic materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 1-80.
 - [19] 曹龙超,周奇,韩远飞,等. 激光选区熔化增材制造缺陷智能监测与过程控制综述 [J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524790.
Cao L C, Zhou Q, Han Y F, et al. Review on intelligent monitoring of defects and process control of selective laser melting additive manufacturing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524790.
 - [20] 窦文豪. 粉末床激光熔融过程飞溅行为研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 1-83.
Dou W H. Research on the spatter behavior in laser powder bed fusion process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 1-83.
 - [21] 张凯. 氧化物陶瓷材料激光选区熔化成形机理与试验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 1-114.

- Zhang K. Forming mechanism and experimental study on oxide ceramics manufactured by selective laser melting[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019: 1-114.
- [22] Qian Q D, Wang Q T, Qian H Y. Theoretical study on material absorption during laser irradiation [C] // The 28th National Conference on Structural Engineering. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2019: 459-464. 钱秋冬, 汪庆桃, 钱浩勇. 激光辐照过程中材料吸收率的理论研究[C]//第28届全国结构工程学术会议. 北京: 中国力学学会, 2019: 459-464.
- [23] 魏东华. 选择性激光熔化成形设备除尘系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 1-62. Wei D H. Dust removal system of selective laser melting equipment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019: 1-62.
- [24] 王迪, 欧远辉, 窦文豪, 等. 粉末床激光熔融过程中飞溅行为的研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0900001. Wang D, Ou Y H, Dou W H, et al. Research progress on spatter behavior in laser powder bed fusion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0900001.
- [25] 梁平华, 唐倩, 余志强, 等. 激光选区熔化的风场仿真与流道结构优化[J]. 中国机械工程, 2019, 30(7): 858-863. Liang P H, Tang Q, Yu Z Q, et al. Gas field simulation and flow channel structure optimization of SLM [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(7): 858-863.
- [26] 肖建军, 谢洋生. 选区激光熔化金属三维打印设备的风场仿真与优化[J]. 装备机械, 2021(2): 34-39. Xiao J J, Xie Y S. Wind field simulation and optimization of 3D metal printing device with SLM [J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2021(2): 34-39.
- [27] 陈可, 季超, 蔡占秀, 等. 基于脉冲占空比调节灵敏度的光电开关传感器[J]. 传感技术学报, 2017, 30(1): 77-81. Chen K, Ji C, Cai Z X, et al. A photoelectric switch sensor with sensitivity adjustable based on pulse duty cycle [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(1): 77-81.

Relationship Between Powder Bed Fusion-Laser Forming Process Factors and Molten Pool Radiation Intensity

Zhang Ting, Zhou Xin^{*}, Duan Yucong, Zhang Peiyu, Guo Xiyang, Cheng Xing

Key Laboratory of Airborne Plasma Dynamics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China

Abstract

Objective Considering data quantity, reliability, cost and other factors, it is an effective method to monitor the additive process of powder bed fusion-laser (PBF-L) by using photodiode to collect radiation information of molten pools in engineering practice. The on-line radiation monitoring of molten pools based on photodiode can collect a large amount of information in real time reflecting the internal conditions of molten pools in real time, and thus plays a very important role in predicting and controlling the quality of molten pools. The key is to continuously collect the radiation information of molten pools and to extract and analyze the data characteristics in a wide time scale (from several seconds to tens of hours) by the statistical methods, so as to realize the stable state analysis and quality prediction of the forming process. In PBF-L, all process factors (laser parameters, scanning strategy, powder state, and air flow protection) eventually influence the change of radiation signals of the molten pool, among which as for the main effects of laser power, scanning speed, preheating temperature and others on temperature and radiation intensity of a molten pool, a lot of research has been done. However, in addition to radiation intensity, the radiation signal change of the molten pool over time also contains a lot of other technological information and process stability information and it is worth further digging and studying. In the actual production process, PBF-L is a very complex process and the forming quality is still uneven even when the same equipment and process parameters are monitored and controlled. In order to ensure the repeatability and process consistency of additive manufacturing, the influence of process factors such as floor height, substrate position and scan line angle on the radiation signals of the molten pool is analyzed, and it is found that these characteristics can be used as an important indicator of quality control in the future.

Methods In this paper, the forming experiment of K438 superalloy powder is carried out, and the photodiode is used to collect the radiation signal of the molten pool in the process of PBF-L. First it is analyzed and pretreated. Then it is segmented corresponding to the sample one by one. Statistical methods are used to process the segmented data, and the mean and standard deviations are selected as indicators to evaluate the signal characteristics, and the influence of process factors such as floor height, substrate position and scan line angle on the radiation signals of the molten pool is finally analyzed.

Results and Discussions The influence of the process factors of PBF-L on the radiation intensity of the molten pool can reflect some classical laws. With the increase of layer height, the mean radiation intensity of the molten pool shows an overall increase trend, and the mean radiation intensity of the printing layer No.190 increases by about 6% (Fig. 4). In the wind field, the intensity waveform of the upwind molten pool shows the feature of "right deviation", while that of the downwind molten pool shows the feature of "left deviation" (Fig. 6). The influence of relative position in the wind field on the radiation intensity of the molten pool is that the farther away from the air outlet, the greater the molten pool

strength, and the closer to the air outlet, the smaller the molten pool strength (Fig. 8). In the scanning strategy, the scan line angle is exactly consistent with the incline angle of the sample (based on the horizontal direction), in which the mean intensity is the maximum (Fig. 11).

Conclusions Through the processing and analysis of the intensity signal data of the molten pool, the influence law of some process factors on the radiation intensity of the molten pool is obtained, and the relationship between the radiation intensity law of the molten pool and the physical mechanism is established. The analysis shows that the effect of layer height on the radiation intensity of the molten pool is mainly due to heat accumulation among layers. In the wind field, the influence of wind direction and relative position on the radiation intensity of the molten pool is mainly the smoke masking effect. The effect of scan line angle on the radiation intensity of the molten pool is mainly due to the laser duty cycle. Through establishing the correlation between law and physical mechanism, it is clearer that in the practical engineering application and monitoring closed-loop control, it is necessary to consider the influence of layer height, scanning strategy, wind field conditions and other factors on the radiation intensity of molten pools. And its typical rules show that these characteristics can be used as an important indicator of quality control in the future.

Key words laser technique; laser powder bed fusion; photodiode; process factor; radiation intensity of molten pool