

倪大慰. 基于数字图像处理的 SLM 熔化过程与成形熔道质量关联性研究[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(2): 118-127.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24042303

基于数字图像处理的 SLM 熔化过程与成形熔道质量关联性研究

倪大慰

(武汉科技大学 机械自动化学院, 武汉 430081)

摘要: 选区激光熔化过程 (Selective Laser Melting, SLM) 中不规则熔道的产生涉及复杂的物理、化学因素, 其中 SLM 过程的熔化状态对熔道的质量至关重要。激光功率、扫描速度、粉末层厚度等参数会决定了熔池的大小、形状和稳定性, 而熔池的状态直接影响熔道的连续性和均匀性。飞溅也是影响熔道表面形貌的重要因素, 飞溅产生的颗粒会落在粉床上和未完全凝固的打印区域, 从而在成形熔道表面引起颗粒的黏附, 导致打印零件的表面精度和成形质量降低。在 SLM 过程中, 高能激光束与金属粉末相互作用时会产生金属蒸气, 金属蒸气的反冲压力会对熔池产生扰动, 导致熔池不稳定和造成材料的飞溅, 进而影响熔道的质量。为了建立熔化过程和成形熔道之间的关联性, 本文基于自主搭建的高速相机监测平台, 利用图像处理技术探究了 SLM 熔化过程中熔池特征、飞溅特征和蒸气特征三者之间的变化规律, 并对熔池、飞溅、蒸气以及成形熔道形貌之间的相互影响关系进行了分析, 探讨了不规则熔道产生的机理, 为选区激光熔化中监测信号与成形质量的映射关系研究提供了新的思路。

关键词: 选区激光熔化; 图像处理; 不规则熔道; 过程监测

中图分类号: TP751; TG146

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)02-0118-10

Research on the correlation between SLM melting process and forming melt track quality based on digital image processing

NI Dawei

(School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The generation of irregular melt tracks in the Selective Laser Melting (SLM) process involves complex physical and chemical factors, among which the melting state during the SLM process is crucial to the quality of the melt tracks. Parameters such as laser power, scanning speed, powder layer thickness, etc., determine the size, shape, and stability of the melt pool, which directly affects the continuity and uniformity of the melt tracks. Spattering is also an important factor affecting the surface morphology of the melt tracks. Particles generated by spattering will adhere to the powder bed and the partially solidified printing area, causing the surface accuracy and forming quality of printed parts to decrease. During the SLM process, when the high-energy laser beam interacts with the metal powder, metal vapor is generated. The recoil pressure of metal vapor disturbs the melt pool, leading to instability and material spattering, thereby affecting the quality of the melt tracks. In order to establish the correlation between the melting process and the forming melt pool, this study, based on a self-built high-speed camera monitoring platform, utilizes image processing technology to investigate the changes in melt pool characteristics, spattering characteristics, and vapor characteristics during the SLM melting process. The study analyzes the interrelationship between melt pools, spattering, vapor, and the morphology of the melt tracks, explores the mechanism of irregular melt tracks generation, and provides new insights into the mapping relationship between monitoring signals and forming quality in selective laser melting.

Key words: selective laser melting; image processing; irregular melt track; process monitoring

0 引言

增材制造技术与产业研究是当前热点, 尤其在制造业智能化浪潮中备受关注。麦肯锡咨询公司预测增材制造将成为 2025 年经济发展的颠覆性技术

之一, 并认定其将成主流^[1]。选区激光熔化技术在制造复杂高精度金属产品上有独特优势, 但成形零件的质量难以保证成为主要挑战^[2-3]。这要求通过过程监测获取传感器数据, 建立工艺参数与加工状态的关联, 以便快速检测和纠正问题, 提高零件质

作者简介: 倪大慰 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 增材制造在线监测。Email: 1227043928@qq.com。

收稿日期: 2024-04-23

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

量^[4]。熔池监测是关键,因熔池状态反映了工艺参数和熔化状态,直接影响成形件质量。Li 等学者^[5]分析了熔池形貌与熔道表面球化缺陷之间的关系,发现当熔池与基体接触面积较小时,此时熔池呈现接近圆形的形貌,成形后的熔道更易形成球形形貌。Khanzadeh 等学者^[6]研究了熔池特性与增材制造中零件缺陷发生之间的关系,通过熔池形貌、温度场预测了成形样品内部孔隙信息,实验结果表明,熔池大小、长度、宽度等特征对零部件孔隙的产生有着重要影响。Clijsters 等学者^[7]通过对熔池强度、面积、长宽等特征识别熔池的缺陷和异常行为,通过光学显微镜、X 射线扫描样品内部等手段,证明了原位监测熔池数据与零件内部孔隙的关联性。飞溅行为和熔池的状态有着密不可分的关系,飞溅是由于在激光照射过程中,熔池周围的部分材料颗粒或液滴受到剧烈的蒸发和气流的夹带作用从熔池区域喷射出来,飞溅会落在已成形区域,影响表面质量并且会造成熔池总量的减小,与缺陷的形成之间也存在很大的因果关系^[8-10]。熔池和飞溅监测也成为了热点之一^[11-12]。Wang 等学者^[13]利用高速相机监测能量输入对飞溅的影响,分析了飞溅成形机理,研究发现飞溅现象受到激光能量输入的显著影响,高的能量输入导致更剧烈的飞溅,增加落在熔池周围的液滴飞溅和粉末飞溅。Snow 等学者^[14]研究了飞溅对成形缺陷的影响,利用 XCT 发现飞溅是导致欠熔化的直接原因,飞溅物越大造成的缺陷尺寸相对更大,建立了飞溅与成形缺陷之间的关联性。Bidare 等学者^[15]结合了高速成像和纹影成像,通过改变功率和扫描速度使得激光羽流的倾角从前向后移动,研究发现当扫描速度和功率相对较高时会导致接近羽流的颗粒会被烧结或者被熔化形成团聚体和大的球形颗粒喷出。

当前 SLM 监测研究现状大多仅仅针对熔池、飞溅、蒸汽等与 SLM 加工工艺参数的关系,未更多地关注到熔池、飞溅、蒸汽三者之间内在关联以及对成形质量影响。SLM 加工零件缺陷一旦产生,很难通过外部观测检测出来,并且传统的缺陷检测方法如超声^[16]、X 射线^[17]、涡流^[18]和 CT 检测^[19]等,只能在工件成型成形以后进行检测。对此本文基于高速相机监测平台,利用图像处理技术提取了 SLM 加工熔化过程熔池、飞溅、蒸汽三者的相关特征,分析了三者之间的相互作用关系,研究了工艺参数对熔化状态的影响进而探究了成形质量与加工状态的内在关联性,以为为选区激光熔化加工过程中的监测问

题提供新的思路与方法。

1 实验系统

实验是在 SLM 激光设备的基础上自主设计并搭建的高速纹影成像监测系统,该系统主要由高速相机、变焦镜头、滤光片、点光源、刀片、凹面镜、挡板等组成,如图 1 所示。

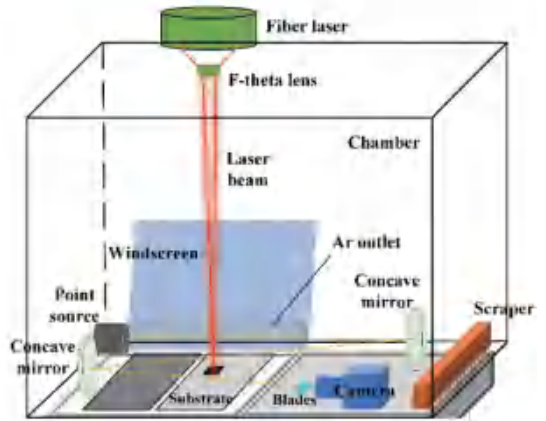


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

实验中使用的挡板是为了消除保护气体对监测熔池飞溅方向的影响,实验使用粉末材料为 NITI 粉末,相机拍摄时选用 36 000 fps,激光光束直径为 100 μm 。激光功率取 40 W、100 W、160 W、220 W、280 W、340 W,同时激光扫描速度取 80 mm/s、160 mm/s、240 mm/s、300 mm/s、460 mm/s、720 mm/s、880 mm/s、1 040 mm/s。相邻 2 条单熔道间距为 1.3 mm,每条熔道长 7 mm。

2 SLM 图像数据处理

2.1 图像预处理

在 SLM 过程中,熔池的状态变化直接影响成形后熔道的形貌,本文首先对熔池的特征信息进行了提取和分析,SLM 过程监测结果如图 2 所示。由图 2 可知,相机获取的原图中存在许多黑色空白区域及无用信息,为了研究激光成形过程中熔池的状态,首先需要图像进行 ROI 提取放大、滤波、图像增强等预处理,去除图像中的无用信息。



图 2 SLM 过程监测图

Fig. 2 Image of SLM process monitoring

使用适合的插值算法放大图像可以有效提高对图像处理的效率和准确度,图像插值如图 3 所示。其中,最近邻域插值算法放大图像的思想就是复制像素,其坐标计算变换公式为:

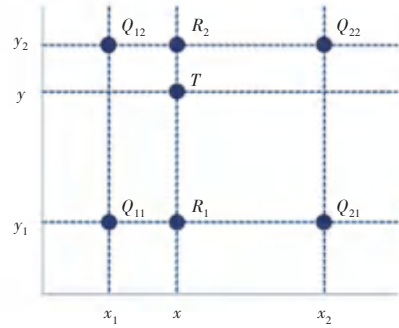
$$\text{srcX} = \text{dstX} \times (\text{srcWidth}/\text{dstWidth}) \quad (1)$$

$$\text{srcY} = \text{dstY} \times (\text{srcHeight}/\text{dstHeight}) \quad (2)$$



(a) 最近邻域插值

其中,dstX 与 dstY 分别表示目标图像的插值点周围点像素的纵横坐标;dstWidth 与 dstHeight 分别表示目标图像的长与宽;srcWidth 与 srcHeight 分别表示原图像的宽度与高度;SrcX,SrcY 分别表示目标图像在该点(SrcX,SrcY)对应的原图像的坐标。



(b) 双线性插值

图 3 图像插值

Fig. 3 Image interpolation

双线性插值是很多框架中的默认算法,其计算公式为:

$$f(R_1) = \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right)f(Q_{11}) + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right)f(Q_{21}) \quad (3)$$

$$f(R_2) = \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right)f(Q_{12}) + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right)f(Q_{22}) \quad (4)$$

$$f(T) = \left(\frac{y_2 - y}{y_2 - y_1}\right)f(R_1) + \left(\frac{y - y_1}{y_2 - y_1}\right)f(R_2) \quad (5)$$

其中, T 点表示插值点; x, y 分别表示 T 点横坐标和纵坐标; $f(T)$ 表示插入点的像素值。

Lanczos 插值利用卷积方法,通过对像素点周围的采样点进行加权平均,得到缩放后像素点的值,Lanczos 对应有个窗口模板 Window,窗口中每个位置的权重计算如下式:

$$L(x) = \begin{cases} \text{sinc}(x) \text{sinc}\left(\frac{x}{a}\right), & -a < x < a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$S(x) = \sum_{i=|x|-a+1}^{|x|+a} s_i L(x - i) \quad (7)$$

其中, s_i 表示横坐标为 i 处的像素值; $S(x)$ 表示插入点的像素值; a 通常取 2 或者 3。当 $a = 2$ 时,该算法适用于图像缩小的插值;当 $a = 3$ 时,算法适用于图像放大的插值。

为了凸显出图像信号中的主要部分信息,弱化背景等不相关部分区域,使用 Gamma 校正对图像进行处理, Gamma 图像校正是一种非线性变换方法。其公式为:

$$\text{output} = 255 \times \left(\frac{\text{input} + \xi}{255}\right)^{\text{gamma}} \quad (8)$$

其中, output 表示 Gamma 校正后的像素值; input 表示输入的像素值; ξ 表示补偿系数,取 0; gamma 表示校正系数。为了弱化背景凸显主要信息,校正系数取 1/2.2,使得图像较亮的区域灰度被压缩,较暗的区域灰度被拉伸得较亮。

在图 4 中运用 Gamma 和 3 种插值方法对原始图像进行处理,可以发现使用 Lanczos 插值和 Gamma 校正算法处理的图像更加清晰,最近邻域插值算法效果较差,出现了锯齿现象。

2.2 熔池提取

为了提取熔池几何形状等相关特征信息,获得熔池的轮廓,需要将图像中其它的飞溅、背景信息等全部弱化,从而突出熔池轮廓。在获取的图像数据中,熔池是相对较亮的部分,此时 gamma 应当大于 1,如图 5(b) 所示,从而使图像中的亮部细节更明显,熔池的细节更加清晰和突出。

为了进一步弱化其它区域的信息,采用图像滤波技术对熔池外的区域进行弱化处理。双边滤波可以同时考虑空间距离和像素值差异,不仅能够用于降噪,还可以保持图像中的边缘和细节,避免过度平滑,从而保持图像的清晰度。双边滤波的计算公式如下:

$$I_q^{bf} = \frac{1}{W_q^{bf}} \sum_{p \in S} G_{os}(\|p - q\|) G_{sr}(|I_p - I_q|) I_p \quad (9)$$

$$W_q^{bf} = \sum G_{os}(\|p - q\|) G_{sr}(|I_p - I_q|) \quad (10)$$

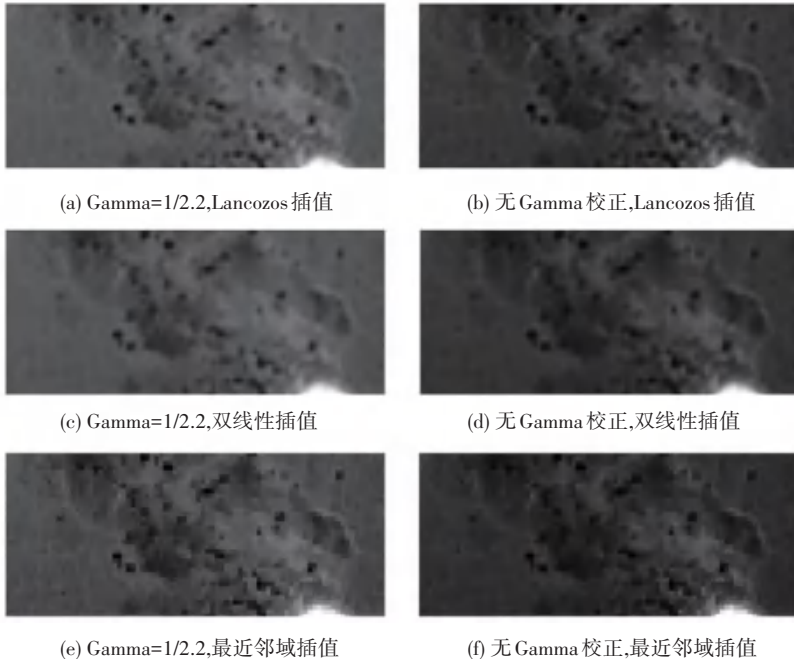


图 4 数据预处理图

Fig. 4 Data preprocessing diagram

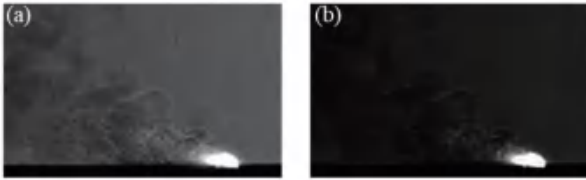
其中, I_q 表示输入图像; I_q^{bf} 表示滤波后的图像; σ_s, σ_r 表示衡量图像 I 滤除量系数; G_{σ_s} 表示用于减少较远像素点影响的空间距离函数; G_{σ_r} 表示用于减少窗口内灰度差值较大像素点影响的灰度差函数。

$$G_{\sigma_s} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{d(p,q)}{\sigma_s'} \right)^2} \quad (11)$$

$$G_{\sigma_r} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\delta(I(p), I(q))}{\sigma_r'} \right)^2} \quad (12)$$

其中, $d(p, q)$ 表示图像 2 个像素点的欧式距离; $\delta(I(p), I(q))$ 表示图像 2 个像素点的灰度差; σ_s', σ_r' 表示标准差。

熔池提取结果如图 6 所示。由图 6(b) 可知, 利用双边滤波可以有效去除熔池边缘噪声点和飞溅等无用的背景信息, 经过 ROI、Gamma 校正和双边滤波等处理后, 可以得到更为清晰的熔池图像, 之后利用阈值分割和形态学处理得到二值图 (见图 6(c)), 阈值设置为 180, 通过开运算先进行腐蚀再进行膨胀操作, 去除图像中孤立的邻近点, 使熔池轮廓变得更加平滑。



(a) 校正前 (b) 校正后

图 5 熔池 Gamma 校正图

Fig. 5 Gamma correction chart of melt pool

双边滤波的空间函数和灰度差函数取参数为欧氏距离的高斯函数, 计算公式如下:



(a) 熔池校正图 (b) 双边滤波图 (c) 熔池二值图

图 6 熔池提取图

Fig. 6 Diagram of melt pool extraction

2.3 飞溅提取

选区激光熔化加工过程中飞溅是指从熔池中溅射而出的粉末颗粒或液态金属, 飞溅的形成主要与激光与材料交互作用、熔池动态行为以及表面张力等因素有关, 为了对飞溅颗粒的特征进行提取, 首先需

要对飞溅颗粒进行检测。Shi-Tomas 角点检测^[20] 通过使用了图像局部的最小特征值作为衡量角点的指标。角点检测过程如图 7 所示。对于平坦区域, 某个子窗口向各个方向进行移动统计区域内梯度变化的时候, 不会有明显的梯度变化。



图7 角点检测过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of corner detection process

对于边来说,在某个方向上梯度有明显变化;对于角点来说,各个方向的梯度变化都很明显。Shi-Tomasi 角点检测首先在图像中选取一个局部窗口,对于选取的局部窗口,计算其每个像素点的梯度,使用 Sobel 滤波器计算水平和垂直方向上的梯度值;对于每个像素点,根据其周围邻域内的梯度信息构建结构矩阵。结构矩阵包含了局部梯度信息,使用结构矩阵的特征值来计算一个称为角点响应函数的函数值。根据响应函数的值,对图像中的像素点进行阈值化操作,将大于阈值的像素点标记为潜在的角点,将保留下来的像素点标记为检测到的角点。窗口在各个方向上移动所造成的像素灰度值的变化量公式如下:

$$E(u, k) = \sum_{(x, y)} w(x, y) \times [I(x + u, y + k) - I(x, y)]^2 \quad (13)$$

其中, (x, y) 表示检测窗口的坐标位置; $I(x, y)$ 表示位置 (x, y) 处的像素灰度值; u 表示检测窗口的横坐标位移; k 表示检测窗口的纵坐标位移; $w(x, y)$ 表示窗口内各像素的权重。

通过 Shi-Tomasi 角点检测得到的飞溅颗粒提取如图 8 所示。部分未检测到的点是由于设置了检测到的角点之间的最小距离 minDistance 函数,当检测两点距离小于该值时会舍弃该检测点,设定 minDistance 可以避免角点之间的重叠,否则会导致检测到的角点非常密集,产生角点大量重叠的情况,难以进行后续的处理和分析。

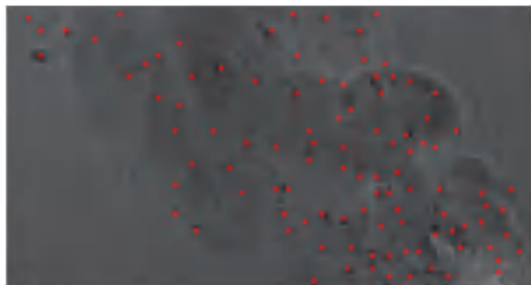


图8 Shi-Tomasi 飞溅颗粒检测图

Fig. 8 Shi-Tomasi splatter particle detection map

为了进一步对飞溅现象进行研究,本文通过提取飞溅颗粒的方向和速度特征对 SLM 过程的飞溅

行为进行分析。粒子追踪示意如图 9 所示。光流粒子追踪在图像处理技术中是一种用于分析和跟踪图像序列中单个粒子或物体运动的方法,在相邻帧图像之间,通过将前一帧检测到的粒子与下一帧中的对应粒子进行匹配来得到粒子轨迹。



图9 粒子追踪示意图

Fig. 9 Schematic diagram of particle tracking

光流是指连续相邻的 2 帧图像中,像素点运动的位移向量,令 $\mathbf{u} = [u_x \ u_y]^T$,表示该点所在的位置,下一帧图像的新位置表示为 $\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{d} = [u_x + d_x \ u_y + d_y]^T$, \mathbf{d} 即为该点的光流,定义 \mathbf{d} 是用来最小化差异函数 ε 的向量:

$$\varepsilon(\mathbf{d}) = \varepsilon(d_x, d_y) = \sum_{x=u_x-w_x}^{u_x+w_x} \sum_{y=u_y-w_y}^{u_y+w_y} (I(x, y) - J(x + d_x, y + d_y))^2 \quad (14)$$

其中, w_x 和 w_y 为整数,即在点周围取一个 $(2w_x + 1, 2w_y + 1)$ 的窗口,使得当前帧窗口中所有像素点与下一帧该窗口中位移 \mathbf{d} 的所有像素点进行差分平方后求和,当 $\varepsilon(\mathbf{d})$ 最小时, \mathbf{d} 即为计算所求的光流。飞溅颗粒粒子追踪示意如图 10 所示,通过矢量箭头可视化飞溅颗粒的运动轨迹,再通过相邻帧的飞溅颗粒运动轨迹可以提取不同加工工况下的飞溅颗粒的方向。



图10 飞溅颗粒粒子追踪图

Fig. 10 Schematic diagram of splatter particle tracking

2.4 蒸汽提取

SLM 过程中激光能量输入导致金属熔化并达到蒸发温度,随后熔融的液态金属气化形成金属蒸气,金属蒸气的剧烈程度可以反映出 SLM 过程粉末的熔化状态。熔池蒸气提取示意如图 11 所示。图 11 中, T 为某一时刻, t 为相邻 2 帧图像间隔时间。为了准确提取熔池蒸气的特征,减少蒸气在空气中

扩散的影响,提取时应该使得所提取的蒸气为当前帧 ($T + t$ 时刻) 刚喷射出的,而其前一帧 (T 时刻) 中没有出现。通过 ImageJ 以蒸气轮廓外接矩形左端和顶

端交点的水平、高度方向的平均运动距离和运动时间的比值定义为蒸气速度,以熔池质心 O 和 A 、 B 连线与水平方向夹角的平均值作为蒸气运动方向。

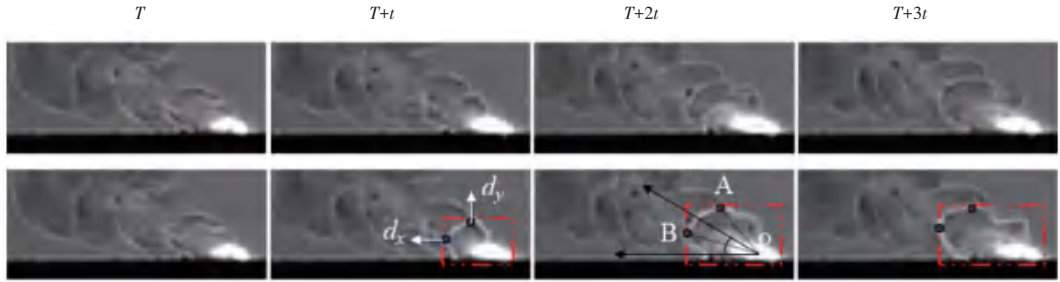


图 11 熔池蒸气提取图

Fig. 11 Diagram of melt pool steam extraction

3 熔化过程与成形熔道的关联性研究

3.1 工艺条件对熔池的影响

选区激光熔化加工时的工艺条件直接影响着熔池的形态、尺寸、稳定性以及所形成的最终构件的质

量。本文提取了不同工况条件下的熔池面积、周长等特征,以探究工况条件对熔池状态的影响。

图 12 提取了不同工艺参数下熔池平均面积、周长、长宽比、倾角的变化情况。

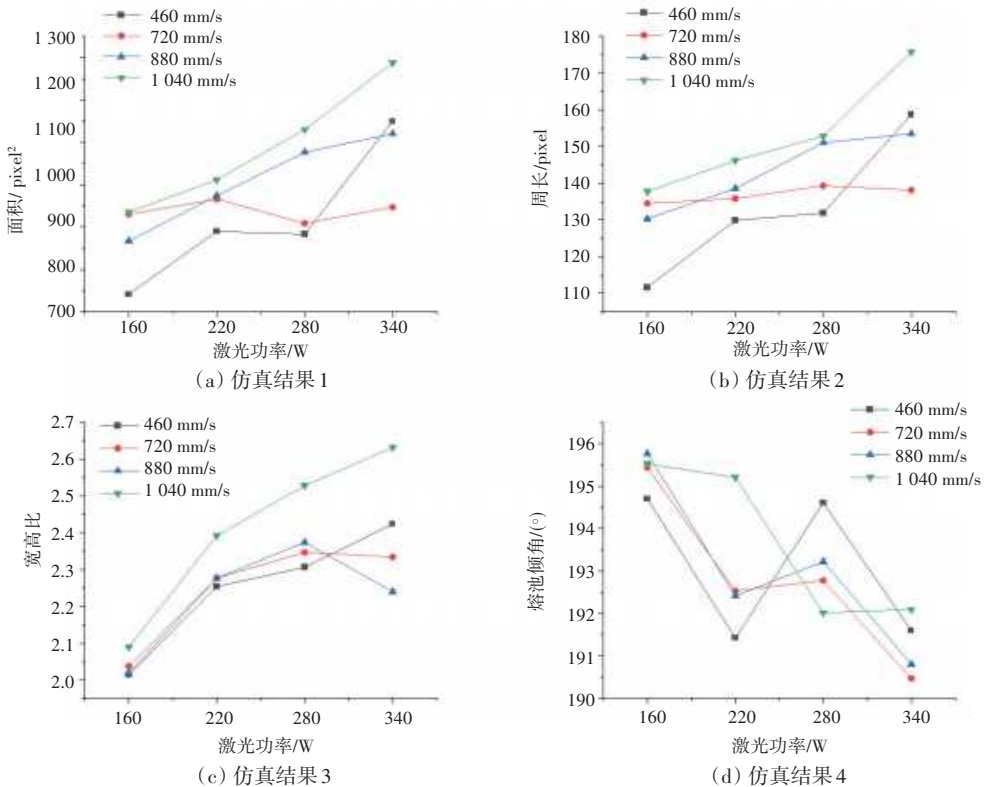


图 12 不同工艺条件下的熔池特征值图

Fig. 12 Melt pool characteristic value map under different process conditions

随着激光功率的升高,熔池的面积、周长以及宽高比均呈上升趋势,熔池倾角逐渐减小。激光功率的升高会导致更多的能量被输入到粉末材料表面,进而加剧了熔化,高功率激光可以将热量更深地传

递到材料内部,熔池周围的材料也会被加热,这导致了更多材料被熔化,从而形成更深更宽的熔池。熔池温度的升高,熔化的材料可以在更长的时间内保持液态,这使得熔池在激光束移动方向上延伸得更

长,从而增加了熔池的长宽比。扫描速度的增加使得激光在相同时间内可以照射到更多区域的粉末材料,使得熔池的面积变大,熔池整体更长。熔池倾角是指熔池边缘与基板平面的夹角,随着激光功率的增加,更多的能量被材料吸收,导致更多的材料熔化,导致熔池尺寸增大,熔池深度的增加,熔池表面的液体金属会在重力和表面张力的共同作用下向下流动,从而使熔池的倾角减小;同时由于金属的表面张力通常随温度的增加而降低,在高激光功率下,熔池的温度更高,这导致表面张力减小。较低的表面张力意味着液态金属更易于流动和扩散,使得熔池表面更平坦,进而导致倾角减小。

3.2 工艺条件对飞溅的影响

SLM 过程中飞溅颗粒会落在粉床上影响铺粉

和打印质量,同时飞溅会对熔池产生扰动,导致熔池的不稳定性。图 13 提取了不同工艺条件下飞溅的角度和方向的变化情况,随着激光功率和扫描速度的升高,飞溅角度呈下降趋势,飞溅颗粒的速度逐渐增大。激光功率的增大,熔池的温度会上升,导致熔池表面张力降低,熔池的表面会更趋于平坦,从而减少熔池表面的不稳定性,降低飞溅的概率,并且减小飞溅的角度。同样地,高功率激光会提供更多的能量,部分金属材料会从熔池中蒸发,形成高速气流,导致更强烈的蒸发和喷涌现象,当液态金属受热到足够高的温度时,其中的气化和蒸发过程会更加剧烈,从而产生更大的飞溅速度。

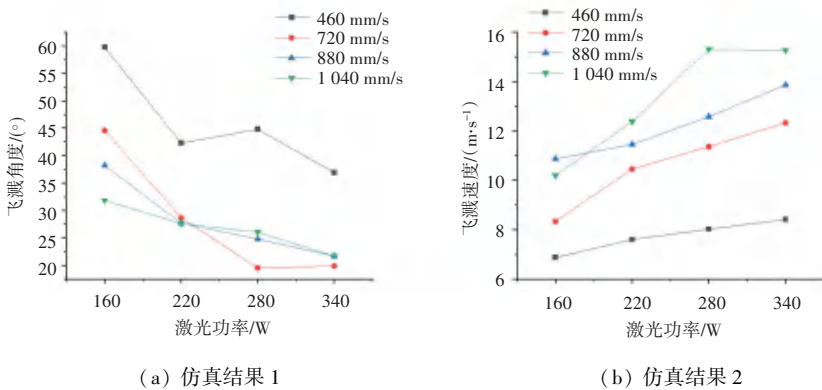


图 13 不同工艺条件下飞溅特征值图

Fig. 13 Splash characteristic value diagram under different process conditions

3.3 工艺条件对金属蒸汽的影响

图 14 提取了不同加工条件下金属蒸汽的平均速度和角度。从图 14 中可以发现随着激光功率的升高,蒸汽的喷射速度会随之增大,蒸汽的角度减小,与不同工艺条件下熔池蒸汽图的现象一致,如图

15 所示。增大激光功率会提供更多的能量作用到金属粉末上,导致粉末在熔池中的温度升高,从而加剧金属的蒸发,使得蒸气速度增大,高扫描速度和功率的激光会导致熔池形态的变化更加扁平,影响了金属蒸气喷射的方向和角度。

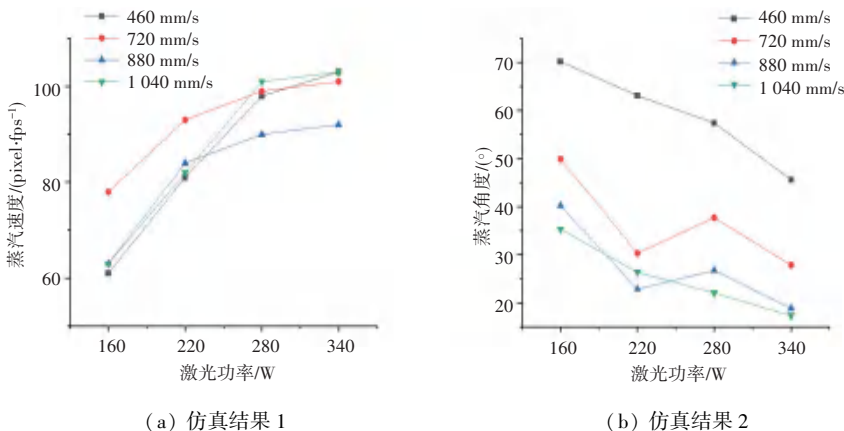


图 14 不同工艺条件下蒸气特征图

Fig. 14 Vapor characteristic diagrams under different process conditions

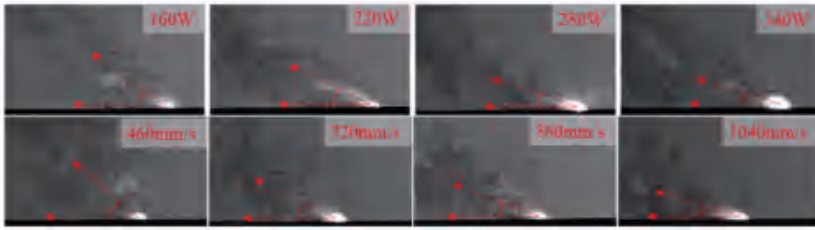


图 15 不同工艺条件熔池蒸气图

Fig. 15 Vapor diagrams of melt pools under different process conditions

3.4 熔池、飞溅、蒸气的关联性分析

SLM 过程中熔池、飞溅和金属蒸气行为是影响制造质量和性能的关键因素,熔池的状态直接影响凝固后熔道的形貌,熔池的不稳定会增加飞溅的发生,飞溅颗粒会重新凝固在周围的粉末层上,导致零件表面粗糙度增加和内部缺陷的形成,蒸气动力学行为又会影响飞溅的方向和速度,进而影响熔池的稳定性。因此,通过综合分析熔池、飞溅和蒸气行为特征之间的关联性,可以更好地研究激光增材制造过程中熔道形貌的形成机理,并为优化工艺参数提供理论指导和实践参考。

SLM 熔化过程示意如图 16 所示。在 SLM 加工过程中伴随着复杂的变化,飞溅、蒸气的行为和熔池熔化状态密不可分。熔池的表面张力是指熔融金属表面分子之间的相互吸引力会倾向于使熔池表面积最小化从而形成一个平滑的表面;马兰戈尼力是由于熔池内部存在温度梯度,表面张力也会随之变化,导致熔池内部流体的移动,高温区域的表面张力低于低温区域,引起流体从冷区向热区流动;金属蒸气的快速膨胀会在熔池表面产生向下的反冲压力,这种压力会增加熔池的深度和激发熔池内的湍流。

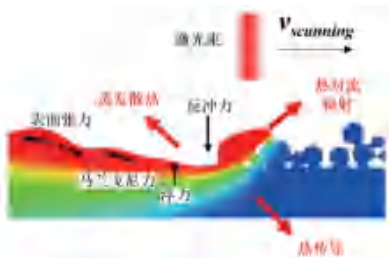


图 16 SLM 熔化过程示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the SLM melting process

蒸气作用飞溅颗粒示意如图 17 所示。SLM 加工过程中,当激光能量达到熔池液体沸点时,此时熔池中的液体会蒸发产生金属蒸气并从熔池中喷射而出,由伯努利效应可知,蒸发区域压强会降低,与熔池两侧压力形成压力差,导致粉末颗粒会在压力差和熔池的金属蒸气的作用下向熔池上方移动,因此飞溅颗粒会有朝着蒸气喷射方向运动的趋势。同样

地,当激光能量较高时,熔池蒸发更为剧烈,对应的蒸气和飞溅速度都会增加,与图 12、图 13 中飞溅和蒸气特征变化情况保持一致。

飞溅和蒸气从熔池中产生,同时也和熔池的熔化状态密不可分。不同激光能量时的熔化状态如图 18 所示,熔池前端沿着扫描方向的处于激光的直接照射下,温度较高,飞溅和蒸发通常发生在激光直接照射到金属表面的地方,即熔池的前端,这是因为激光能量在这里最集中,可以迅速加热表面并引发金属的飞溅。图 18(a)为当激光能量增高时,熔池的熔化模式为匙孔模式,熔池前部的形状被挤压成钥匙孔状,匙孔的前壁面几乎垂直,熔池中的熔液急剧蒸发,沿着该区域熔池表面法向量喷出,形成角度较小的蒸气射流。图 18(b)为当激光能量密度较低时,熔池的前部未出现明显的凹陷,此区域熔池上表面坡度较为平缓,蒸气从熔池中喷出,喷射方向与熔池表面法向量相同,此时蒸气的喷射角度较大。

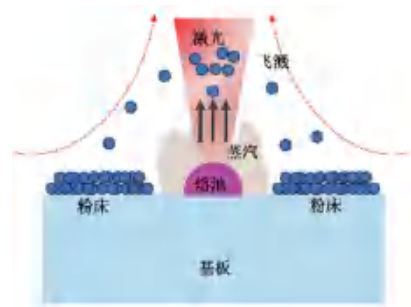
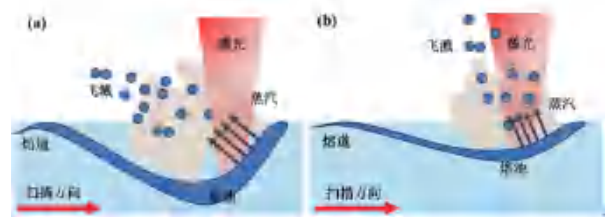


图 17 蒸气作用飞溅颗粒示意图

Fig. 17 Schematic diagram of particles splashed by vapor action



(a) 较高激光能量时熔化状态 (b) 较低激光能量时熔化状态

图 18 不同激光能量时的熔化状态

Fig. 18 Melting states at different laser energies

3.5 熔化状态对熔道宽度和粗糙度的影响

为了进一步分析 SLM 熔化状态对成形熔道形貌的影响,图 19 统计了不同工况条件下熔道的平均宽度。从图 19 中可以发现,激光功率增大,熔道的平均宽度随之增大;在激光功率相同时,扫描速度增大会导致熔道宽度减小,这是因为相同功率下扫描速度越小的工况条件下激光的能量密度会越大,激光能量密度增加使得熔池温度更高,熔化的金属粉末量增加,熔池尺寸增大,较大的熔池会产生更宽的熔道。同时熔池温度的升高,导致表面张力减小,较低的表面张力让液态金属更易于流动和扩散,并且激光能量的增大会加剧熔池的蒸发,增大飞溅和蒸气的喷射速度,蒸气的反冲压力会加剧熔池内部流动,导致凝固后成形熔道表面粗糙度的增加。熔道形貌如图 20 所示,能量密度较高时的熔道表面更加粗糙,熔道宽度更大。

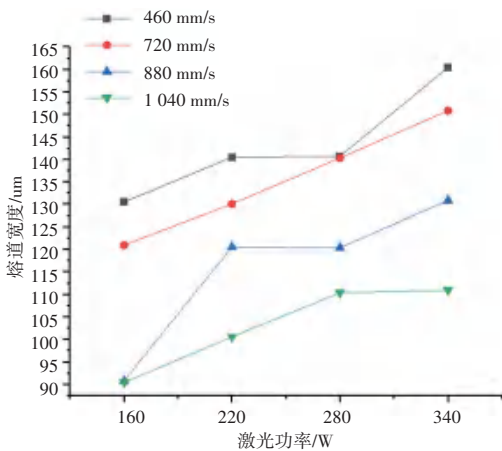


图 19 不同工况下的熔道平均宽度

Fig. 19 Average width of melt channel under different operating conditions



图 20 熔道形貌图

Fig. 20 Melt channel morphology diagram

4 结束语

本文利用计算机图像处理技术提取了 SLM 过程熔池的面积、周长等,飞溅的速度、角度和金属蒸气的方向、速度等特征,通过分析 SLM 不同加工工

况条件下熔池、飞溅、蒸气特征的变化情况,探究了熔池、飞溅、蒸气三者之间行为特征相互影响关系。结果表明在较高的激光能量条件下,会产生更大尺寸的熔池,使得熔池内部熔化模式发生变化,同时熔池前端接近垂直角度,从而影响了飞溅和蒸气的喷射方向和速度。结合实验现象和物理规律分析了熔池蒸发时的运动状态,发现飞溅颗粒方向和速度会受到金属蒸气的作用,高能量的激光会增加熔池内部的温度导致的熔池蒸发加剧,使得蒸气和飞溅颗粒的喷射速度都会增大;同时较高能量密度的激光会造成更宽的熔道,并且由于激光能量的增大使得的熔池内部流动的加剧,从而导致凝固后成形熔道表面粗糙度的增加。

参考文献

- [1] 王磊,卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 202-211.
- [2] PARK J M, KIM E S, KWON H, et al. Effect of heat treatment on microstructural heterogeneity and mechanical properties of 1% C-CoCrFeMnNi alloy fabricated by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102283.
- [3] 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.
- [4] GRASSO M, COLOSIMO B M. Process defects and in-situ monitoring methods in metal powder bed fusion: A review[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28: 044005.
- [5] LI Ruidi, LIU Jinhui, SHI Yusheng, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59: 1025-1035.
- [6] 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.
- [7] CLIJSTERS S, CRAEGHS T, BULS S, et al. In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75: 1089-1101.
- [8] QU Ruizhi, HUANG Liangpei, XIAO Dongming. Numerical simulation of melt pool evolution and metal spattering characterization during selective laser melting processing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 405-424.
- [9] LIN Xin, WANG Qisheng, FUH J Y H. Selective laser melting process state monitoring method based on motion feature of melt pool[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(12): 3403-3415.
- [10] 唐梓珏, 刘伟崑, 颜昭睿, 等. 基于熔池动态特征的金属激光熔化沉积形状精度演化行为研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 39-47.
- [11] 王奉涛, 杨守华, 吕秉华, 等. 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, 2023, 29(7): 2245-2259.
- [12] 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): 199-233.
- [13] WANG D, WU S, FU F, et al. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties [J]. *Materials & Design*, 2017, 117: 121-130.
- [14] SNOW Z, SCIME L, ZIABARI A, et al. Observation of spatter-induced stochastic lack-of-fusion in laser powder bed fusion using in situ process monitoring [J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 61: 103298.
- [15] BIDARE P, BITHARAS I, WARD R M, et al. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion [J]. *Acta Materialia*, 2018, 142: 107-120.
- [16] XU Wanli, ZHANG Jun, LI Xiaohong, et al. Intelligent denoise laser ultrasonic imaging for inspection of selective laser melting components with rough surface [J]. *NDT & E International*, 2022, 125: 102548.
- [17] KOELBLIN J, HASTIE J C, KARTAL M E, et al. Deformation of AlSi10Mg parts manufactured by Laser Powder Bed Fusion; In-situ measurements incorporating X-ray micro computed tomography and a micro testing stage [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 35: 168-172.
- [18] GUO Sai, REN Guanhui, ZHANG Bi. Subsurface defect evaluation of selective-laser-melted inconel 738LC alloy using eddy current testing for additive/subtractive hybrid manufacturing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34: 224-239.
- [19] GENG Luchao, WU Wenwang, SUN Lijuan, et al. Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 157: 231-242.
- [20] KAUR A, KUMAR M, JINDAL M K. Shi-Tomasi corner detector for cattle identification from muzzle print image pattern [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 68: 101549.