

SLM 工艺参数对表面成形质量的影响规律

吕海卿¹, 李明川¹, 马瑞², 常帅¹, 李俐群^{1,3}

(1. 哈尔滨工业大学, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 北京动力机械研究所, 北京 100074;
3. 哈尔滨工业大学 郑州研究院, 郑州 450046)

摘要: 较差的表面成形质量是选区激光熔化技术 (selective laser melting, SLM) 在应用与推广中亟待解决的问题, 凹凸不平的成形表面给 SLM 制备零件的力学性能和耐腐蚀能力带来了诸多不利影响。文中通过 SLM 制备了包含向上、向下表面的 45°倾斜试样以及包含垂直表面的 90°垂直试样, 以此 3 种不同典型建造角度的成形表面作为研究对象, 对比研究了不同建造角度之下的表面成形特征, 并分析讨论其成因, 认为 45°倾斜试样的上表面主要呈现为阶梯与轻微颗粒粘附特征, 颗粒的严重粘附与团聚现象出现在下表面, 90°垂直表面的成形质量则主要受到粘附颗粒的影响; 结合表面三维形貌观察与非接触式表面粗糙度测量, 对比探究了激光功率和扫描速度两种主要工艺参数对表面成形质量的影响规律。最终, 在各自的工艺参数窗口下, 分别得到了 4.0 μm、21.6 μm 和 7.8 μm 的最光滑表面, 优化的参数组合使得表面粗糙度水平实现了 44%、47% 和 56% 的降低效果。此外, 还从激光热输入、粉末颗粒与熔池热过程等角度分析了 3 种不同建造角度的目标表面上不同表面特征在变化的工艺参数下的转变规律, 解释了工艺参数的影响规律并提出有助于获得更优表面成形质量的参数组合策略。

创新点: (1) 在 SLM 过程与分析研究中考虑了试件核心区域、表面填充区域、轮廓扫描区域的过程及参数差别。
(2) 详细对比了不同建造角度下的表面成形特征并解释其成因。
(3) 同时探究激光功率和扫描速度对不同建造角度表面成形质量的影响规律, 采用优化的工艺参数组合实现了表面粗糙度的大幅降低。

关键词: 选区激光熔化; 表面成形质量; 工艺参数

中图分类号: TG 456 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20230615001

Research on the influence of SLM process parameters on surface forming quality

LYU Haiqing¹, LI Mingchuan¹, MA Rui², CHANG Shuai¹, LI Liqun^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 2. Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing, 100074, China; 3. Harbin Institute of Technology Zhengzhou Research Institute, Zhengzhou, 450046, China)

Abstract: The inferior surface forming quality is a pressing issue that needs to be addressed for the application and promotion of SLM technology. The uneven forming surface has adverse effects on the mechanical performance and corrosion resistance of parts fabricated by SLM. Samples with a 45° inclination containing both up-facing surface and down-facing surface, as well as 90° vertical samples with vertical surfaces were fabricated by SLM. Taking these typical surfaces with 3 different construction angles as the research object, the surface formation characteristics under different construction angles were studied and compared, then the causes of these characteristics were analyzed and discussed. The SEM images showed that the up-facing surface of the 45° inclined sample mainly exhibited characteristics of stairs and slight particles adhesion, while severe particles adhesion and aggregation phenomena occurred on the down-facing surface. The formation quality of the 90° vertical surface was primarily affected by the particles adhesion. Combining observation of the three-dimensional surface topography with non-contact surface roughness measurement and comparison, the influence of 2 main process parameters, laser power and scanning speed, on the surface formation quality was explored. Ultimately, under their respective process parameter windows, the smoothest surfaces of 4.0 μm, 21.6 μm,

and 7.8 μm were achieved, and the optimized parameter combinations resulted in a reduction in surface roughness of 44%, 47%, and 56%, respectively. Additionally, the transformation patterns of different surface characteristics on the target surfaces of the 3 different construction angles under varying process parameters were analyzed from perspectives such as laser energy input, powder particles, and molten pool thermal processes. This helped to explain the influence of process parameters and propose strategies for parameter combinations leading to better surface formation quality.

Highlights: (1) The process and parameter differences of the core filling region of the samples, the skin filling region, and the contour scanning region had been considered in the SLM process and the whole research.

(2) A detailed comparison of the surface forming characteristics under different construction angles was conducted, and their causes were explained.

(3) The influence patterns of laser power and scanning speed on the surface forming quality at different construction angles were explored at the same time, helping to achieve a significant reduction in surface roughness by using optimized combinations of process parameters.

Key words: selective laser melting; surface formation quality; process parameters

0 引言

金属增材制造 (additive manufacturing, AM) 被认为是为下一次工业革命的基石^[1]. 基于粉末床激光熔融的选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 技术, 是最受欢迎的金属增材制造技术之一. 相比其他 AM 技术, SLM 得益于其更复杂、更精细的成形能力, 适用于精密复杂结构零件的制造, 例如内部流道结构^[2]、晶格阵列结构^[3]等. 此外, SLM 制备零件展现出优异的致密性和力学性能, 正被广泛用于航空航天^[4]、生物医疗^[5]等关键领域. 尽管近年来 SLM 工艺及材料发展越发成熟, 所成形零件的各项性能也取得重大突破, 但其表面成形质量问题仍亟待解决. 较粗糙的表面不仅会导致零件过早失效^[6], 也会对零件的其他性能如表面阻力、硬度和耐腐蚀性等产生不利影响, 因此在许多应用场景下, 光洁表面的获得至关重要.

目前已有一些学者针对 SLM 工艺参数与表面成形质量的关系进行了研究. Gu 等人^[7]发现, 通过降低扫描速度, 增大激光功率或减小粉末层厚度等来增加体积能量密度或熔池稳定性, 可以降低表面球化趋势, 得到粗糙度较低的表面. Rombouts 等人^[8]提出, 当激光功率过大时, 由于熔池的吸收的能量过高, 加剧了粉末飞溅, 导致表面成形质量变差. Rombouts 等人^[9]认为, 激光在熔化不同铁基粉末时, 扫描速度和扫描间距是影响表面粗糙度的主要因素. Qiu 等人^[10]的研究显示, 高扫描速度和铺粉层厚会导致形状不规则且不稳定的熔池, 从而增加表面粗糙度和孔隙率, 降低了表面成形质量.

Shi 等人^[11]同样指出高铺粉层厚恶化了表面质量. Wang 等人^[12]证明了激光功率和扫描速度的组合效应决定了扫描轨迹特征, 如轨迹宽度等, 这对实现 SLM 制备零件表面质量优化至关重要. Mumtaz 等人^[13]研究了 SLM 制备的 Inconel 625 零件的顶部和侧表面粗糙度, 研究结果表明, 高激光功率带来更平坦的熔池并增加其润湿性, 降低了顶部和侧面粗糙度; 较低的扫描速度提高了顶部表面的光洁度, 但降低了侧表面的光洁度. Zhang 等人^[14]指出, 垂直表面的粗糙度与熔池尺寸呈正相关, 在相同的能力密度下, 激光功率的增加或扫描速度的降低会同时增加熔池尺寸和表面粗糙度, 在低能量密度下, 粘粉和熔道轮廓主导了垂直表面的粗糙度, 而表面形成的团聚渣滓是高能量密度下垂直表面成形质量恶化的主要因素. Yang 等人^[15]在进行了单道和块体的 SLM 后得出结论, 随着热输入增加, 熔融轨道的稳定性先增加后降低, 垂直表面的粗糙度则呈现相反的趋势, 但当热输入很大并超过一定阈值时, 热输入将不再影响熔融轨道的稳定性和试样的表面粗糙度. 此前, 大多数关于工艺参数对表面成形质量影响的研究都集中在水平表面和垂直表面上, 而实际上试样的倾斜表面往往拥有更大的表面粗糙度, 尤其是下表面. Han 等人^[16]研究了扫描速度和扫描间距对 45° 倾斜试样表面粗糙度的影响, 研究结果表明, 扫描速度和扫描间距对上表面的影响不大, 而由于熔池对粉末的渗透作用减弱, 较高的扫描速度使得下表面的成形质量变差. Tian 等人^[17]的研究得到了相似结论, 上表面的粗糙度几乎不受激光功率和扫描速度的影响, 而下表面的粗糙度随激光功率增加而增加, 随扫描速度的增大而减

小. Yang 等人^[18]研究了工艺参数对 30°、45°、60°倾斜试件的下表面成形质量的影响, 证明在调节工艺参数优化下表面的粗糙度时, 轮廓参数中扫描速度的优先级高于激光功率, 此外, 填充参数中激光功率对表面粗糙度的影响几乎可以忽略不计。

虽然通过优化工艺参数来改善 SLM 表面成形质量的效果比较有限, 大多数表面仍然需要经过机械磨削、喷丸和电化学抛光等后处理才能满足服役要求, 但是以工艺参数对表面成形质量的影响为研究目标仍具有重要的实际意义, 因为较差的表面成形质量也给后处理增加了难度。以电化学抛光为例, 结合 Lee 等人^[19]的研究, 电化学抛光效果与零件初始表面特征及粗糙度具有显著的关系, 更光滑的初始表面倾向于获得更好的抛光效果。

1 试验方法

1.1 材料与设备

文中采用的 IN738LC 粉末经气雾化法在 Ar 环境下制得, 其名义化学成分如表 1 所示。原始粉末形貌及粒径分布如图 1 与图 2 所示, 可以发现大部分粉末球形度良好, 并且存在一定数量的卫星粉及少量的不规则形状粉末。粉末粒径的主要分布区间为 15~60 μm 之间, 其中 D_{10} 为 18.04 μm、 D_{50} 为 33.85 μm、 D_{90} 为 57.82 μm、平均粒径为 42.74 μm。用于试样制备的打印设备为 EOS290 选区激光熔化系统, 配有 Yb 光纤激光器, 最高激光功率为 400 W, 激光光斑尺寸为 90 μm, 波长为 1070 nm, 制备过程在氩气保护下进行。

表 1 IN738LC 粉末的名义化学成分(质量分数, %)

Table 1 The nominal composition of IN738LC powder

含量范围	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Ti	Nb	C	B	Zr
最小值	余量	15.7	8.0	1.5	2.4	1.5	3.2	3.2	0.6	0.09	0.07	0.02
最大值	余量	16.3	9.0	2.0	2.8	2.0	3.7	3.7	1.1	0.13	0.01	0.08

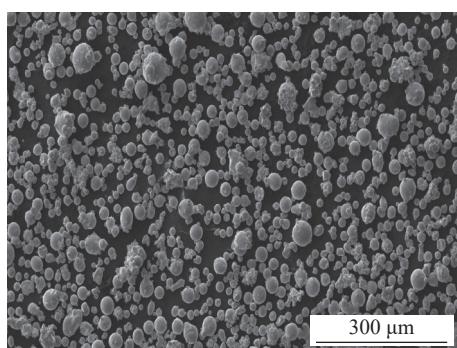


图 1 IN738LC 原始粉末形貌

Fig. 1 Morphology of original IN738LC powder

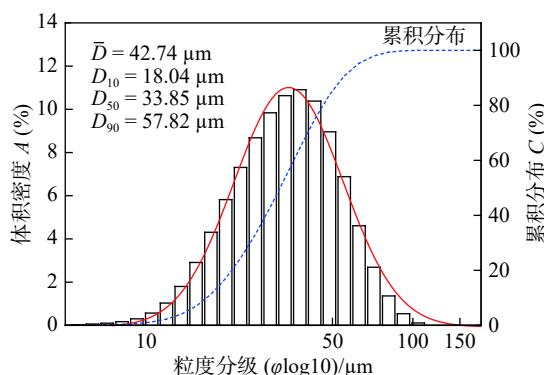


图 2 IN738LC 粉末粒径分布

Fig. 2 IN738LC particle size distribution

1.2 试验设计

在 SLM 技术制备零件的实际策略中, 实体填充参数主要影响零件“核心”区域的组织及性能, “表皮”填充参数和“轮廓”扫描参数则用于改善零件的表面成形质量。文中设计的两种不同规格的试件如图 3 所示, 其中 45°倾斜试样包含了上表面和下表面, 垂直轮廓试样包含了 90°的垂直表面, 代表了 SLM 过程中形成的 3 种典型表面; 每种表面在多组不同的激光功率和扫描速度下制备, 铺粉层厚度均为 40 μm, “核心”区域扫描间距为 90 μm, 选取的其他工艺参数如表 2 所示。

零件制备过程中, 激光束按照区域顺序依次扫描, 先填充核心区域, 再填充表皮区域, 最终扫描轮廓区域, 相邻层间激光运行轨迹的角度差值固定为 67°, 具体的扫描策略如图 4 所示。文中主要关注表皮填充参数对倾斜表面成形质量的影响, 而由于垂直表面不具有表皮填充参数, 所以文中主要关注垂直表面的轮廓扫描参数。

1.3 试验过程

试件制备完成后, 采用线切割将试件与基板分离, 并放入丙酮中超声清洗 30 min 再行取出。使用

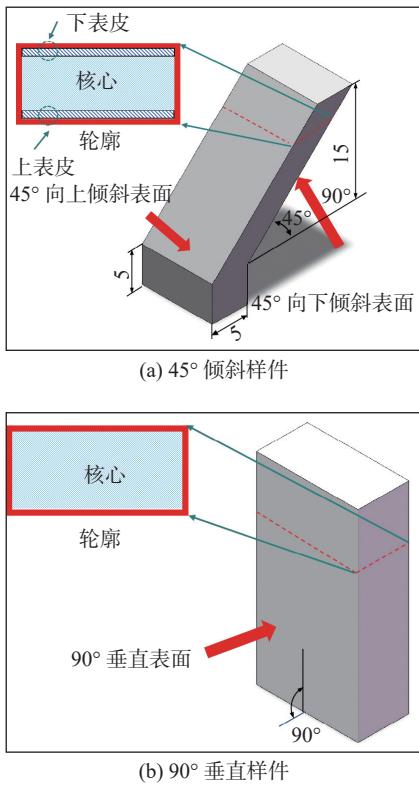


图 3 样件设计示意图

Fig. 3 Schematic of specimens design. (a) 45° inclined specimens; (b) 90° vertical specimens

表 2 SLM 工艺参数
Table 2 SLM process parameters

适用区域	建造角度 $\theta/(\text{°})$	激光功率 P/W	扫描速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	扫描间距 $H/\mu\text{m}$
表皮	45°向上表面	60, 90, 120	300, 400, 500	50
	90°垂直表面	—	—	—
	45°向下表面	60, 80, 100	800, 1 000, 1 200	50
轮廓	45°向上表面	150	300	—
	90°垂直表面	100, 140, 180	500, 700, 900	—
	45°向下表面	50	1 600	—

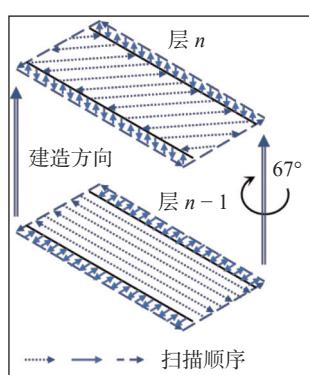


图 4 扫描策略示意图

Fig. 4 Schematic of scanning strategy

JXA-8230 电子探针显微分析仪观察试样的表面形貌。试件表面的成形质量以表面平均粗糙度 S_a 作为衡量标准, 根据 ISO 4287:1997 国际标准与 ISO 25178 国际标准, S_a 也被称为表面算数平均高度, 定义为

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy \quad (1)$$

式中: A 为测量取样面积; $Z(x,y)$ 为取样面上相应坐标位置的轮廓高度。

S_a 实际上是基于线粗糙度 R_a 由线到面的二维扩展参数, 通过非接触式方式测量, 文中采用 S_a 以提高轮廓信息利用率, 采用 OLYMPUS 3000 激光共聚焦显微镜, 在 20 倍的放大倍数下对目标表面轮廓进行观察并测量 S_a , 绘制零件表面的三维轮廓, 可视范围为 $A = 640 \mu\text{m} \times 640 \mu\text{m}$, 粗糙度值在每个试件目标表面的不同位置上测量 5 次并取平均值, 如图 5 所示。

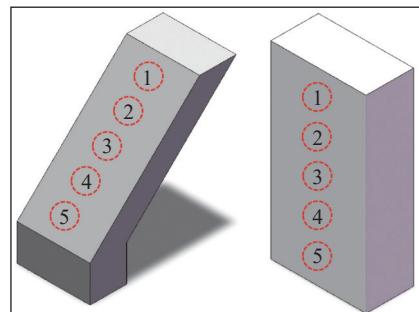


图 5 测量策略示意图

Fig. 5 Schematic of measurement strategy

2 试验结果与分析

2.1 不同表面建造角度导致的表面成形特点差异

在不同建造角度的表面上, 不同的表面特征决定了它们粗糙度水平的差异^[20]。几种主要的表面特征在国内外相关研究中屡屡被提及, 分别是阶梯效应^[21]、波纹效应^[22]、颗粒粘结^[23]、球化^[24]、粉末及液滴的飞溅^[25]。粉末熔化及凝固过程因建造角度不同处于不同散热条件, 导致不同的表面成形特征。在国内外相关研究中, 同时讨论工艺参数对向上、垂直及向下表面成形质量影响的先例还很少, 文中旨在通过制备试验及分析表征, 针对 45°倾斜试样上表面、下表面以及 90°试样的垂直表面 3 种具有不同表面成形特征的典型表面, 探明激光功率和扫描速度两种主要工艺参数对 SLM 制备零件表面成

形质量的影响规律。正因为 SLM 技术层层堆叠的原理, 实际制得的零件和人为设计的模型之间存在着几何偏差, 即使不考虑熔池的几何形状波动, 这种差异也会在倾斜表面上自然形成, 如图 6 所示,许多研究中称其为阶梯效应。从几何角度来看, 表面建造角度 θ 和铺粉层厚 δ 应该是影响阶梯效应的主要因素, 当表面建造角度接近 0° 且铺粉层厚极小时, 阶梯效应被最小化, 即表面趋近水平。

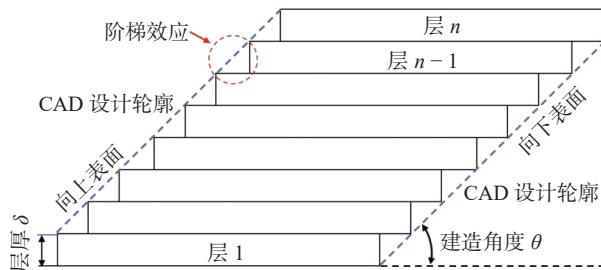


图 6 阶梯效应示意图
Fig. 6 Schematic of stair effect

不同建造角度下的表面形貌如图 7 所示, 图 7(a) 是 45° 倾斜试样上表面在 SEM 下的表面形貌, 可以观察到明显的熔池轮廓, 并形成周期性的峰-谷结构(即阶梯), 阶梯间偶有部分熔化的粉末, 这些粉末粒径较小($< 20 \mu\text{m}$)且很少团聚, 可能源于粉末飞溅。如果熔池在某个方向上紧邻粉末区域, 其吸收的热量将会通过周围低导热系数的粉末

传递, 若这些热量不足以完全熔化粉末, 则会有部分熔化的粉末在熔池表面张力的作用下被吸入熔池, 进而在制备表面上形成大量附着的金属颗粒, 这种颗粒粘附现象在下表面上十分明显。在图 7(b) 中, 下表面几乎完全由粘附的粉末颗粒覆盖, 甚至掩盖了倾斜表面典型的阶梯效应, 并在粘附颗粒间观察到明显的微裂纹, 下表面上粘附的粉末颗粒绝大多数以团簇的形式存在, 还在表面法向上叠加形成大型渣滓, 带来极度不平整的表面, 损害表面的尺寸精度。在 90° 垂直表面上, 则理论上不会出现阶梯效应, 因为层与层之间不存在水平方向上的尺寸偏移。在图 7(c) 中, 垂直表面上熔道清晰可见, 但尺寸波动较大, 存在扁平的大型球体, 球化现象明显; 此外, 垂直表面上也粘附着许多部分熔化的粉末颗粒, 其数量较向上表面明显增多。与向下表面不同的是, 粘附在垂直表面上的粉末颗粒大部分独立存在, 仅小部分形成团簇。文中球化和飞溅现象几乎影响了所有表面的成形质量, 在不同建造角度和工艺参数下成形的表面受到影响程度也不同。 45° 倾斜试样的上表面粗糙度主要取决于阶梯效应, 而下表面和 90° 垂直表面的成形质量则主要受到粘附颗粒的影响, 不同的是, 粘附在下表面的颗粒结合形成团聚渣滓, 往往导致更高的表面粗糙度。

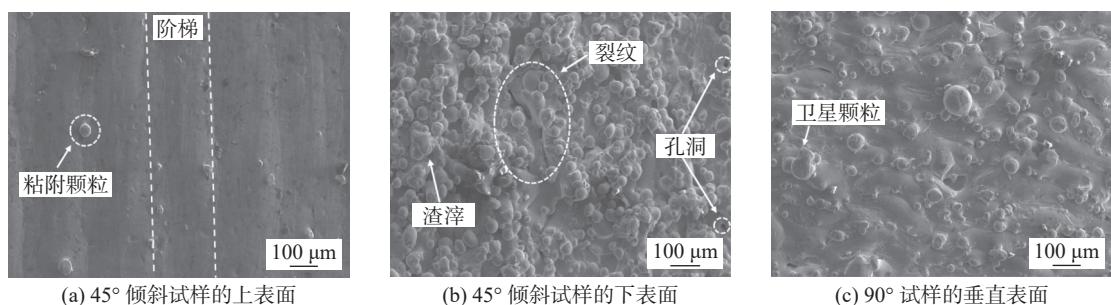


图 7 不同建造角度下的表面形貌

Fig. 7 Surface morphologies of different building angles. (a) 45° up-facing surface; (b) 45° down-facing surface; (c) 90° vertical surface

2.2 工艺参数对倾斜试样上表面成形质量的影响

在不同激光功率和扫描速度组合下 45° 倾斜试样上表面的表面粗糙度值变化如图 8 所示。向上表面粗糙度分布在 $4.0 \sim 7.2 \mu\text{m}$ 之间, 且随着激光功率的增加有明显的降低趋势, 最多降低了 44%, 而对扫描速度的增加不敏感, 当扫描速度从 300 mm/s 增加到 500 mm/s 时, 粗糙度值虽呈增加趋势, 但仅有 $1 \mu\text{m}$ 左右的总增加量。最佳的粗糙度水平 $4.0 \mu\text{m}$ 出现在最高的激光功率 120 W 和最低的扫描速

度 300 mm/s 下。

激光共聚焦显微镜下绘制的表面三维轮廓如图 9 所示, 当激光功率升高, 45° 向上表面出现的阶梯效应减弱, 同时扫描速度的升高使得表面更容易在扫描方向上出现高度差异, 即增加了熔池的不稳定性, 在所有的激光功率和扫描速度下, 在表面上发现的粉末颗粒粘附现象都十分微弱。当激光功率增加, 粉末将从激光中得到更多的热量, 熔化形成更深更宽的熔池, 与先前的熔道相互重叠搭接, 形

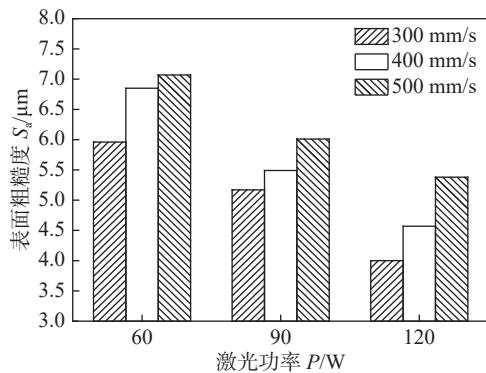


图 8 不同参数组合下 45° 倾斜试样上表面的表面粗糙度水平

Fig. 8 Surface roughness of 45° up-facing surface with different parameters combination

成良好的结合, 带来更好的表面成形质量, 并且高激光功率带来更大的反冲压力, 使熔池变的更加平整. 但激光功率并非越高越好, 结合文献 [26] 可

知, 过高的功率会导致能量输入过多和材料过热, 从而产生更大的温度梯度和表面张力, 只有采用很高的扫描速度, 整体的能量输入才能达到平衡, 避免表面成形质量恶化.

在文中的工艺参数组合下, 整体热输入偏低, 需要增加激光功率以提升热输入量, 粗糙度水平呈现出对扫描速度的不敏感特点. 除熔池尺寸外, 表面成形质量也与熔池的稳定性高度相关, 在激光功率很低时, 粉末吸收的激光能量少, 熔池润湿性不足, 熔道可能断裂成破碎的液滴, 凝固后产生表面球化, 而激光功率过高时, 则会带来不可避免的粉末飞溅, 降低表面光洁度. 以优化激光功率为主, 再搭配合理的扫描速度控制整体热输入, 得到尺寸适中且搭接良好的熔道, 尽可能弱化阶梯效应对上表面的影响, 同时控制表面球化的出现, 是优化倾斜试样上表面成形质量的有效手段.

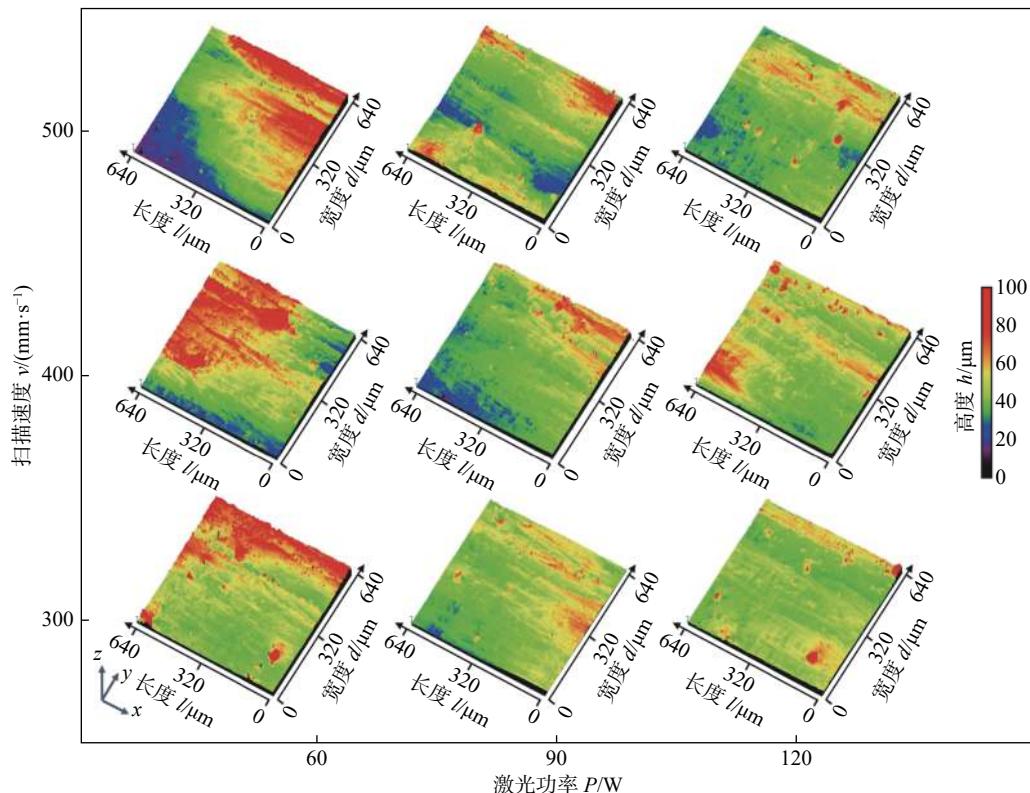


图 9 不同参数组合下 45° 倾斜试样上表面的三维轮廓

Fig. 9 3D profile of 45° up-facing surface with different parameters combination

2.3 工艺参数对倾斜试样下表面成形质量的影响

不同参数组合下 45° 倾斜试样下表面的表面粗糙度水平由 图 10 给出, 总体变化范围在 21.6 ~ 40.4 μm 之间, 变化范围相比于上表面和垂直表面明显更大. 下表面的粗糙度值随激光功率升高而降低, 随扫描速度增加而增加, 同样在最高的激光功率 100 W 和最小的扫描速度 800 mm/s 的参数组合

下获得了最小的表面粗糙度, 为 21.6 μm, 与其他参数组合对比, 最多降低了 47%. 结合文献 [27] 可以认为, 熔池的渗透能力决定了向下斜面的表面特征, 对热输入非常敏感, 当热输入很低, 较小的熔池尺寸带来较小的热影响区, 这时熔池对粉末床的渗透能力最差, 由于能量密度随着熔池深度的增加而降低, 熔池仅仅到达周围粉末的边缘, 这些粉末凝

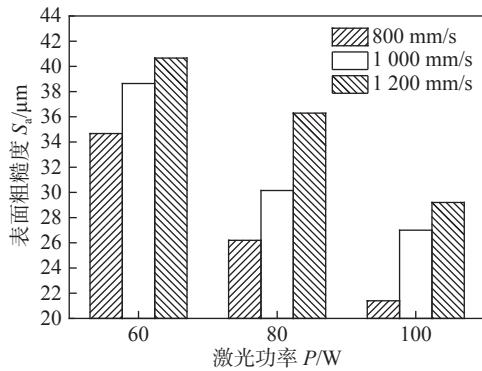


图 10 不同参数组合下 45° 倾斜试样下表面的表面粗糙度水平

Fig. 10 Surface roughness of 45° down-facing surface with different parameters combination

固后便粘附在下表面上；当热输入很高，熔池尺寸增大，高温下低粘度的熔池可以不断深入粉末床，包裹熔池接触到的所有粉末并最大程度的将它们熔化，在下表面上形成具有一定孔隙率和熔合缺陷的渣滓。有研究指出了高能量密度下粉末熔化模式向匙孔的转变可能^[28]。周围粉末的低导热系数导致积热也为匙孔的形成提供了条件。Tian 等人^[29]的研究表明，当热输入量恰使熔池深度与粉末中位粒径相近时，熔池尺寸适中，从而在向下表面获得了最佳的表面轮廓，热输入偏大或是偏小都会带来下表面的表面粗糙度的升高，对于文中的 45° 倾斜试

样下表面，100 W 激光功率和 800 mm/s 的扫描速度或许提供了接近最佳的能量密度。

通过图 11 所示的表面三维轮廓，发现随着激光功率升高和扫描速度降低，颗粒粘附现象明显减弱，因为整体热输入的升高给原本因为熔化不充分而粘附的颗粒提供了足以完全熔化的能量，更多的粉末完全熔化并进入熔池。同时发现热输入的增高使得表面轮廓的最大峰高增加了，这是因为粘附颗粒的存在开始过渡到渣滓形式。与 Charles 等人^[30]在研究中发现的形貌特点相似，即热输入较低时形成的“倒蘑菇”形颗粒团簇引入了更大的峰与谷，而热输入较高时形成的渣滓虽然尺寸较大但十分均匀，反而获得了更低的表面粗糙度。

综上所述，对于倾斜试样的下表面，其表面成形质量取决于颗粒粘附及团聚的严重程度，并且普遍呈现为粘附颗粒与团聚颗粒的混合形貌，即使热输入的升高减弱了向下表面的颗粒粘附现象，但在每个参数组合下仍然能观察到十分严重的颗粒粘附，倾斜表面典型的阶梯效应以及扫描过程中出现的飞溅都难以被观察，因此它们对向下表面的粗糙度水平影响微弱。文中虽然主要关注激光功率和扫描速度对表面成形质量的影响，但值得强调的是，即使在粘附与团聚颗粒已经完全覆盖了下表面上形成的阶梯特征，建造角度仍然是影响下表面表面

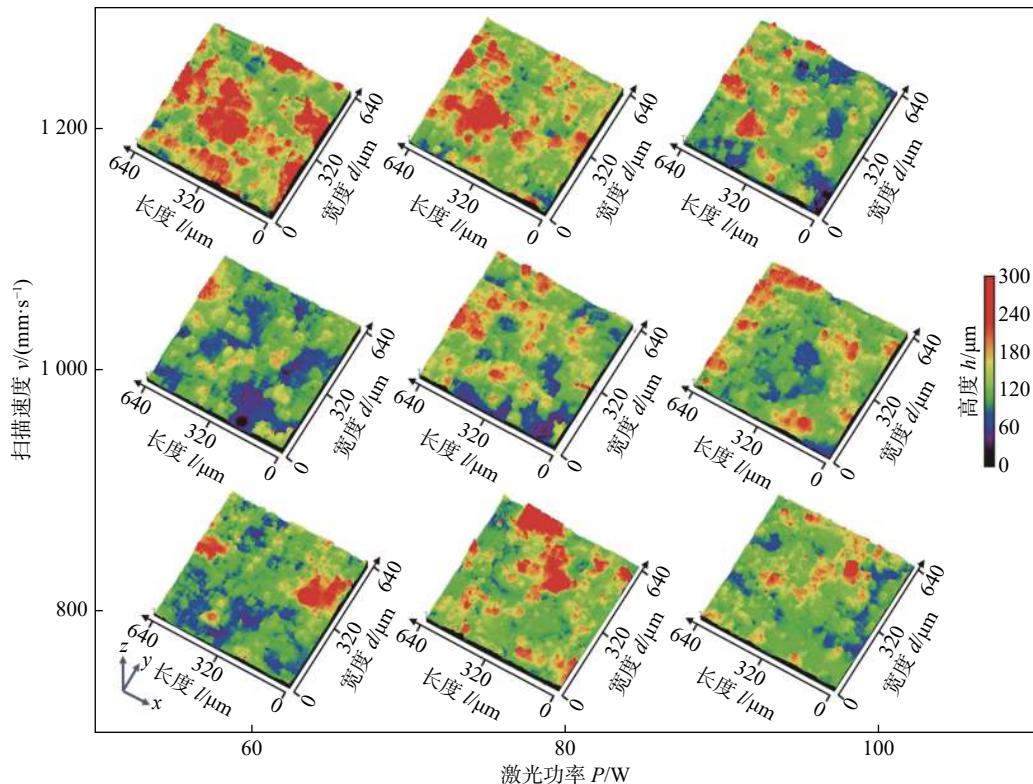


图 11 不同参数组合下 45° 倾斜试样下表面的三维轮廓

Fig. 11 3D profile of 45° down-facing surface with different parameters combination

成形质量的主要因素。在追求更平滑的成形表面时, 尺寸精度问题同样不可忽略, 虽然较大的均匀渣滓可能呈现出较低的粗糙度, 但同样带来了显著的尺寸精度问题。熔池在不采取支撑的情况下受重力下沉, 加剧了渣滓的形成及其不均匀性, 造成尺寸偏差。随着与水平面的夹角变小, 下表面逐渐趋近于悬空, 表面高粗糙度和低尺寸精度问题愈加凸显, 当下表面的建造角度小于一定值时, 甚至必须添加支撑才能保证表面的正常成形, 这个角度可能取决于材料、设备以及采取的工艺参数^[31]。因此, 文中探讨的激光功率和扫描速度对表面成形质量的影响也会因为倾斜试样建造角度的变化而有所差异, 此外, 虽然在文中初步研究认为, 高激光功率和低扫描速度趋向于形成粗糙度较低的表面, 但是考虑下表面特殊的成形特征, 其工艺参数的选择往往要综合考虑致密度、尺寸精度以及表面光洁度, 在三者中达到平衡。

2.4 工艺参数对 90° 垂直表面的影响

90° 垂直表面的粗糙度值分布在 7.8 ~ 17.9 μm 之间, 且无论是激光功率的升高还是扫描速度的降低都使得粗糙度值降低。在激光功率较低 (100 W) 时, 粗糙度随扫描速度增加变化强烈, 扫描速度从 500 mm/s 增加至 900 mm/s, 粗糙度增加量为

6.73 μm; 而在激光功率较高 (180 W) 时, 增加量仅有 2.42 μm, 此时, 垂直表面的粗糙度已经达到较低的水平。在最高的激光功率 180 W 和最小的扫描速度 500 mm/s 的参数组合下获得了最小的表面粗糙度, 为 7.8 μm, 与其他的激光功率和扫描速度组合下的最大粗糙度值相比, 降低了 56%, 如图 12 所示。

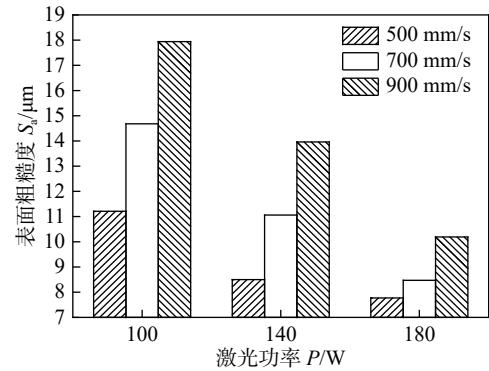


图 12 不同参数组合下 90° 垂直表面的表面粗糙度水平
Fig. 12 Surface roughness of 90° vertical surface with different parameters combination

在垂直表面的三维轮廓上都没有发现阶梯效应, 普遍出现的高峰代表了粘附在表面的粉末颗粒, 随着激光功率的升高和扫描速度的降低, 颗粒粘附现象逐渐减弱, 表面变得光滑平整, 在最佳参数组合下, 颗粒粘附现象已经十分微弱, 如图 13 所示。以上结果与文献 [32] 一致, 即部分熔化的粘附

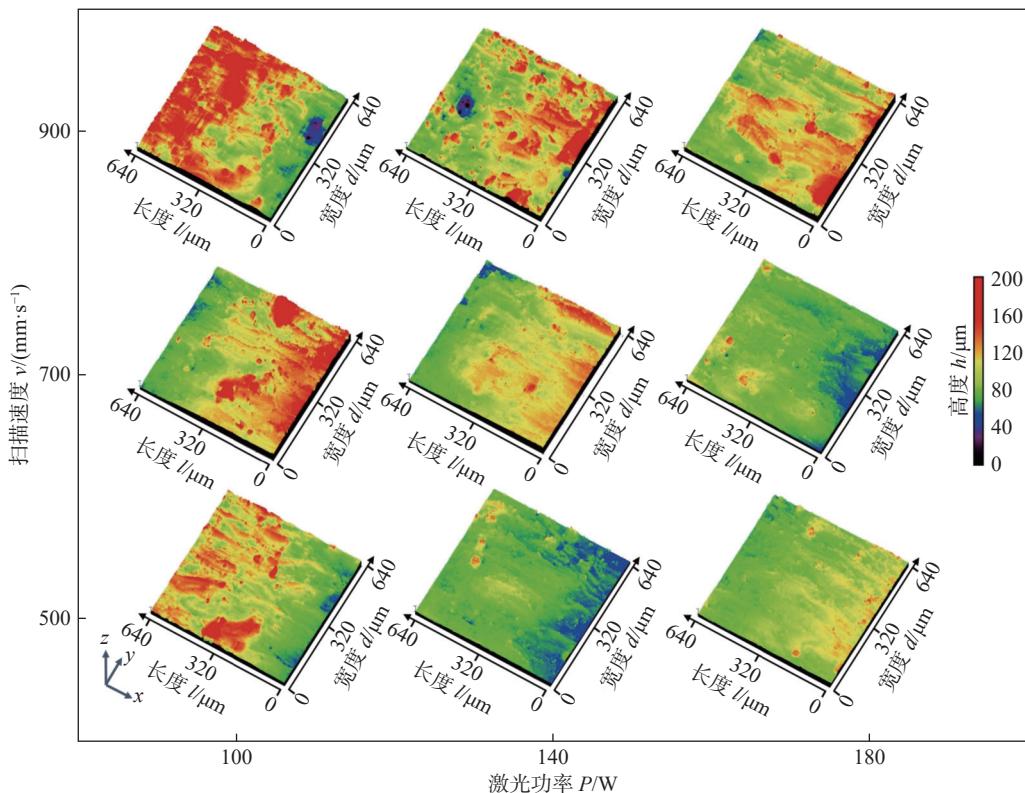


图 13 不同激光功率下 90° 垂直表面的三维轮廓

Fig. 13 3D profile of 90° vertical surface surface with different parameters combination

粉末颗粒强烈影响垂直表面粗糙度。粘附粉末的数目与激光功率相关性明显，高激光功率扩大了瞬时热影响区的范围，将更多的粉末拉向熔池区域，这些粉末部分熔化并粘附在垂直表面上。因为粉末向熔池表面的聚集是在很短时间内完成的，所以即使在热输入一定的情况下，激光功率的增加也会导致粉末粘附趋势加重。高激光功率还会使氩气气氛中产生气旋，将粉末颗粒拉向熔池，并粘附在其表面上^[33-34]。理论上，同时采用较低的激光功率和较小的扫描速度，可以很好的减少垂直表面的颗粒粘附现象，虽然较低的激光功率减小了激光能量的穿透能力和影响范围，但较小的扫描速度为热量在粉末之间的传导和粉末熔化提供了更长的时间，有利于粘附粉末进入熔池并完全熔化。实际上，文中所采用的激光功率和扫描速度的组合可能使得整体热输入偏小，随着激光功率的提高和扫描速度的降低，整体热输入增大，垂直表面的球化现象不断减弱，粘附着的颗粒数目明显减少，继续提高热输入可以进一步改善垂直表面的成形质量。

3 结论

(1) 45°倾斜试样上表面的表面粗糙度主要受控于阶梯效应，与激光功率呈负相关，对扫描速度的变化不敏感。采用较高的激光功率，使熔池尺寸和熔道搭接率趋近最佳，并改变扫描速度以保证总体的均衡热输入和扫描稳定性，最终在 120 W 和 300 mm/s 的参数组合下实现了最低的表面粗糙度。

(2) 45°倾斜试样的下表面有着最差的表面成形质量，阶梯效应被严重的粘附颗粒覆盖，粘附的颗粒由部分熔化的粉末和团聚渣滓组成，并伴有孔洞及微裂纹的出现。激光功率增高和扫描速度降低减弱了向下表面上的颗粒粘附现象，在不形成更大尺寸渣滓的前提下，将表面粗糙度降低了 47%。

(3) 粘附颗粒主导了垂直表面的成形质量，激光功率越高，扫描速度越低，成形表面越光滑，总体热输入的升高实现了层间的良好熔合，并减少颗粒粘附，在最高的激光功率 180 W 和最小的扫描速度 500 mm/s 的参数组合下可以获得最小的表面粗糙度，为 7.8 μm，与其他参数组合下的最大值 17.9 μm 相比降低了 56%。

参考文献

[1] Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution[J]. Busi-

ness Horizons, 2012, 55(2): 155 – 162.

- [2] Thompson S M, Aspin Z S, Shamsaei N, et al. Additive manufacturing of heat exchangers: a case study on a multi-layered Ti-6Al-4V oscillating heat pipe[J]. Additive Manufacturing, 2015, 8: 163 – 174.
- [3] Chang S, Liu A H, Ong C Y A, et al. Highly effective smoothening of 3D-printed metal structures via overpotential electrochemical polishing[J]. Materials Research Letters, 2019, 7(7): 282 – 289.
- [4] Li K, Ji C, Bai S W, et al. Selective laser melting of magnesium alloys: necessity, formability, performance, optimization and applications[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 154: 65 – 93.
- [5] Demir A G, Previtali B. Additive manufacturing of cardiovascular CoCr stents by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2017, 119: 338 – 350.
- [6] Leon A, Aghion E. Effect of surface roughness on corrosion fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting (SLM)[J]. Materials Characterization, 2017, 131: 188 – 194.
- [7] Gu D D, Shen Y F. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: metallurgical mechanisms and control methods[J]. Materials & Design, 2009, 30(8): 2903 – 2910.
- [8] Rombouts M, Froyen L, Bourell D, et al. Roughness after laser melting of iron based powders[C]// Virtual Modeling and Rapid Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, January 1, 2005, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium. London: CRC Press, 2007: 329-335.
- [9] Rombouts M, Froyen L, Gusarov A V, et al. Photopyroelectric measurement of thermal conductivity of metallic powders[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(2): 4905 – 4914.
- [10] Qiu C, Panwisawas C, Ward M, et al. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2015, 96: 72 – 79.
- [11] Shi X Z, Yan C, Feng W W, et al. Effect of high layer thickness on surface quality and defect behavior of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106471.
- [12] Wang D, Liu Y, Yang Y Q, et al. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(4): 706 – 716.
- [13] Mumtaz K, Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(2): 96 – 103.
- [14] Zhang T Y, Yuan L. Understanding surface roughness on vertical surfaces of 316 L stainless steel in laser powder bed fusion addi-

- ive manufacturing[J]. Powder Technology, 2022, 411: 117957.
- [15] Yang T, Liu T T, Liao W H, et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 26 – 36.
- [16] Han X S, Zhu H H, Nie X J, et al. Investigation on selective laser melting AlSi10Mg cellular lattice strut: molten pool morphology, surface roughness and dimensional accuracy[J]. Materials, 2018, 11(3): 392.
- [17] Tian Y, Tomus D, Huang A J, et al. Experimental and statistical analysis on process parameters and surface roughness relationship for selective laser melting of Hastelloy X[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(7): 1309 – 1318.
- [18] Yang T, Liu T T, Liao W H, et al. Effect of processing parameters on overhanging surface roughness during laser powder bed fusion of AlSi10Mg[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61: 440 – 453.
- [19] Lee E S, Shin T H. An evaluation of the machinability of nitinol shape memory alloy by electrochemical polishing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(4): 963 – 969.
- [20] Strano G, Hao L, Everson R M, et al. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(4): 589 – 597.
- [21] Chen Z E, Wu X H, Tomus D, et al. Surface roughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy components[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 91 – 103.
- [22] Ramos J A, Bourell D L, Beaman J J. Surface over-melt during laser polishing of indirect-SLS metal parts[C]//2002 MRS Fall Meeting & Exhibit: Symposium LL-Rapid Prototyping Technologies, December 1-5, 2002, The University of Texas at Austin, Austin, Texas. Berlin: Springer Nature, 2003: 53-64.
- [23] Nasab M H, Gastaldi D, Lecis N F, et al. On morphological surface features of the parts printed by selective laser melting (SLM)[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 373 – 377.
- [24] Kruth J P, Froyen L, Van Vaerenbergh J, et al. Selective laser melting of iron-based powder: observation of melting mechanism and densification behavior via point-track-surface-part research[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149: 616 – 622.
- [25] Liu Y, Yang Y Q, Mai S Z, et al. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder[J]. Materials & Design, 2015, 87: 797 – 806.
- [26] Calignano F, Manfredi D, Ambrosio E P, et al. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67: 2743 – 2751.
- [27] Streck A, Regenfuss P, Exner H. Fundamentals of energy conversion and dissipation in powder layers during laser micro sintering[C]//LiM 2013: Proceedings of the Seventh International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, May 13-16, 2013, Munich, Germany. Berlin: Springer Nature, 2013: 858-869.
- [28] Bayat M, Thanki A, Mohanty S, et al. Keyhole-induced porosities in laser-based powder bed fusion (L-PBF) of Ti6Al4V: high-fidelity modelling and experimental validation[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100835.
- [29] Tian Y, Tomus D, Rometsch P, et al. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 13: 103 – 12.
- [30] Charles A, Elkaseer A, Paggi U, et al. Down-facing surfaces in laser powder bed fusion of Ti6Al4V: effect of dross formation on dimensional accuracy and surface texture[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102148.
- [31] Wang D, Yang Y Q, Yi Z H, et al. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65: 1471 – 1484.
- [32] Mutke C, Geenen K, Roettger A, et al. Interaction between laser radiation and metallic powder of 316L austenitic steel during selective laser melting[J]. Materials Characterization, 2018, 145: 337 – 346.
- [33] Chen Z, Xiang Y, Wei Z Y, et al. Thermal dynamic behavior during selective laser melting of K418 superalloy: numerical simulation and experimental verification[J]. Applied Physics A, 2018, 124(4): 313.
- [34] Wischeropp T M, Emmelmann C, Brandt M, et al. Measurement of actual powder layer height and packing density in a single layer in selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 176 – 83.

第一作者: 吕海卿, 博士研究生; 主要从事激光增材制造及电化学技术研究. Email: lmy1135571214@163.com

通信作者: 李俐群, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: liliqun@hit.edu.cn