

金属粉末选区激光熔化成形表面粗糙度预测及控制方法研究

宋剑锋¹, 宋有年¹, 王文武¹, 郎跃东², 董永刚^{1*}, 杨瑞兴³

¹燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

²北京航天控制仪器研究所, 北京 100854;

³中联农业机械有限公司, 安徽 芜湖 241000

摘要 为了分析选区激光熔化过程中工艺参数对成形件表面形貌的影响, 首先基于 SLM125HL 打印机采用不同激光功率、扫描速度将 316L 不锈钢粉末打印成斜六面体试样, 采用场发射扫描电镜和三维形貌仪实测了不同工艺参数下斜六面体不同位置表面微观形貌和表面粗糙度, 分析了工艺参数对表面成形缺陷和粗糙度的影响。另外考虑熔道宽度、扫描间距、粉末直径以及粘粉和成形角度的影响, 给出了不同位置表面理论粗糙度预测模型, 在此基础上给出了表面质量和表面粗糙度控制策略。研究结果表明: 熔道宽度与激光功率成正比, 与扫描速度成反比, 与线能量密度成正比, 熔宽越大则上表面粗糙度越小; 激光功率越大, 侧表面温度越高, 会导致侧表面与粉末床接触区域出现愈加严重的粉末球化、粘粉现象, 成形件侧面粗糙度越大。

关键词 激光技术; 增材制造; 选区激光熔化; 微观形貌; 表面粗糙度; 金属粉末

中图分类号 TH132.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0202008

1 引言

选区激光熔化(SLM)作为近几年快速发展的新型增材制造技术, 具有材料利用率高、污染小、工艺周期短、可制备结构复杂的零件等优点^[1-2]。但 SLM 成形过程中熔池和粉末的流动规律比较复杂, 成形件的表面质量很难控制, 表面存在微孔、裂纹、粘粉、球化等表面缺陷^[3-4], 因此非常有必要对 SLM 成形工艺参数对其表面形貌和表面质量的影响进行定量研究和预测, 以减少表面缺陷并改善其表面质量。

Gu 等^[5]通过实验表明颗粒堆积密度低、不连续松散的粉体层极易产生表面粗糙度较高的表面, 致使 SLM 加工零件含有大量缺陷, 如气孔、球化、熔道不连续等。Sadali 等^[6]研究了 SLM 扫描速度对微孔、表面形貌和粗糙度的影响, 结果表明: 在

775 mm/s 的扫描速度下, 实验可获得较好的表面形貌和显微组织。Vaglio 等^[7]研究在 Ti-6Al-4V 粉末上施加直径为 50 μm 的小激光光斑对单熔道形成的影响, 激光功率过低会产生部分粉末未熔化现象, 扫描速度过快则会使熔道不连续。罗子艺等^[8]通过研究成型 316L 不锈钢薄壁零件, 分析了离焦量对成形件质量的影响, 结果表明离焦量在 -3 mm ~ 3 mm 范围内变化时, 其对熔宽的影响很小, 并且激光光斑直径对熔宽影响不明显。宗学文等^[9]基于激光选区熔化的 316L 激光能量密度的研究, 发现随着激光能量密度增大, 熔道连续且搭接状况良好, 但激光能量密度过大时球化明显。

Zakrzewski 等^[10]研究了激光功率、扫描速度、粉末层厚度和体能量密度等 SLM 参数对 CoCr 粉末样品表面粗糙度的影响, 结果发现随着激光功率的增加, 表面粗糙度降低; 扫描速度的增加会导致平

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-06-20; 录用日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875501)、河北省自然科学基金面上项目(E2018203442)、2019 年河北省留学回国人员资助项目(优秀类)(C20190515)

通信作者: *d_peter@163.com

均表面粗糙度的增加。Shrestha 等^[11]通过金相实验分析了 SLM 成形件的熔池边界,结果表明:随着线能量密度的增加,熔池的深度与宽度显著增加,试件的孔隙率降低,成形零件质量提高。Greco 等^[12]研究 SLM 参数对成形质量的影响,恒定的输入线能量密度下,增加激光功率会导致垂直于堆积方向的表面粗糙度减小,相对密度增加。Woźniak 等^[13]观察了 SLM 制备样品的表面形貌,发现激光功率和扫描速度对获得的高耐腐蚀全密度无缺陷材料有显著影响。黄卫东等^[14]完成了 SLM 实验,结果表明:激光功率和扫描速度扫描间距对成形件上表面粗糙度影响比较明显,铺粉厚度对成形件表面粗糙度影响较小;激光功率、铺粉厚度、扫描速度和扫描间距对成形件垂直表面粗糙度的影响由大到小,但这四个参数对垂直表面粗糙度影响均不显著。余春风等^[15]研究了扫描间距等工艺参数对 SLM 成形质量的影响,得出单熔道随激光功率的增大而变宽,随扫描速度的增大而变窄,激光功率的增大和扫描速度的减小均有利于熔道连续。

综上所述,目前国内外学者对 SLM 成形过程

表 1 316L 不锈钢粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel powder (mass fraction, %)

Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	O	N	S	P	Fe
16.82	12.63	2.27	1.2	0.2	0.0253	0.0853	0.1104	0.0013	0.0097	Bal.

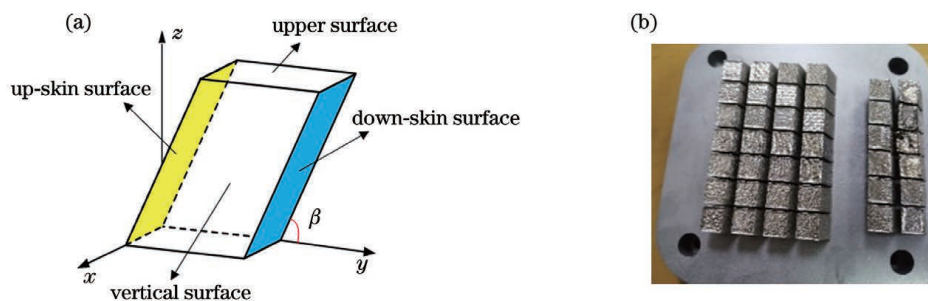


图 1 试样的示意图。(a)试样简图;(b)成形试样

Fig. 1 Schematic diagram of sample. (a) Schematic diagram of sample; (b) molded sample

2.1 实验方案

由文献[8]可知,离焦量和光斑直径对 316L 成形件熔道及表面质量的影响不明显,因此本文选区激光熔化成形实验只考虑了激光功率和扫描速度的影响,其他参数为固定值:铺粉厚度为 $50 \mu\text{m}$,扫描间距为 $120 \mu\text{m}$,离焦量为 0 mm 。实验选取 5 个不同的激光功率(P),以及与其对应 5 个不同的激光扫描速度(v),实验打印成形 25 个试样,对比不同

中工艺参数对成形件表面质量、金相组织、微观缺陷的实验研究比较多,得到了一些比较有意义的成果。但对 SLM 成形过程中工艺参数对成形件不同位置表面形貌、粗糙度的影响机理以及定量预测缺乏比较深入的研究。本文通过实验研究了不同激光功率和扫描速度对 SLM 成形件不同位置表面形貌、质量以及粗糙度的影响,并且考虑了熔道宽度、扫描间距、粉末直径以及粘粉的影响,并定量分析了扫描策略中扫描路径的角度、试样成形角度与侧面粗糙度的关系,在此基础上建立了 SLM 成形件不同位置表面的粗糙度预测数学模型,可用于 SLM 成形件表面质量及形貌的优化控制。

2 选区激光熔化实验

实验采用 AISI 316L 不锈钢金属粉末,化学成分如表 1 所示。实验打印成形与水平方向成 $\beta=60^\circ$ 的斜六面体试样,如图 1(b)所示,试样的几何尺寸为 $8 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$,高为 9 mm 。根据实验的试样绘制简图,试样的上表面、上斜侧面、垂直侧面以及下斜侧面如图 1(a)所示。

的激光功率和激光扫描速度对表面形貌、表面缺陷以及粗糙度的影响。具体实验方案的参数如表 2 所示。

用线能量密度来表示单位时间内激光输入粉床的能量,线能量密度的表达式为

$$\rho_{\text{LED}} = \frac{P}{v}, \quad (1)$$

式中, P 为激光功率, v 为扫描速度。

表 2 选区激光熔化工艺参数

Table 2 Experimental parameters of SLM

Serial number	Laser power	Scanning speed
	P / W	$v / (m \cdot s^{-1})$
1	200	0.5
2	200	0.6
3	200	0.7
4	200	0.8
5	200	0.9
6	235	0.5
7	235	0.6
8	235	0.7
9	235	0.8
10	235	0.9
11	275	0.5
12	275	0.6
13	275	0.7
14	275	0.8
15	275	0.9
16	325	0.5
17	325	0.6
18	325	0.7
19	325	0.8
20	325	0.9
21	350	0.5
22	350	0.6
23	350	0.7
24	350	0.8
25	350	0.9

2.2 实验设备

场发射扫描电镜(SUPRA55)如图2所示,观察

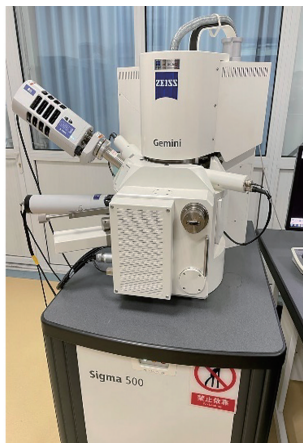


图 2 场发射扫描电镜 SUPRA55

Fig. 2 Field emission scanning electron microscope SUPRA55

到形状近似球形的 316L 不锈钢粉末颗粒如图 3 所示,粉末颗粒的粒径^[16]分布范围为 20~45 μm ,平均直径为 31 μm 。实验采用 SLM 125HL3D 金属打印设备,如图 4 所示。成形试样冷却至室温用超声波清洗机对试样进行清洗,为进一步探究选区激光熔化成形试样的三维形貌结构特征及表面粗糙度,基于三维形貌仪选取 4 mm \times 3 mm 扫描区域进行取样观察,三维形貌仪如图 5 所示。

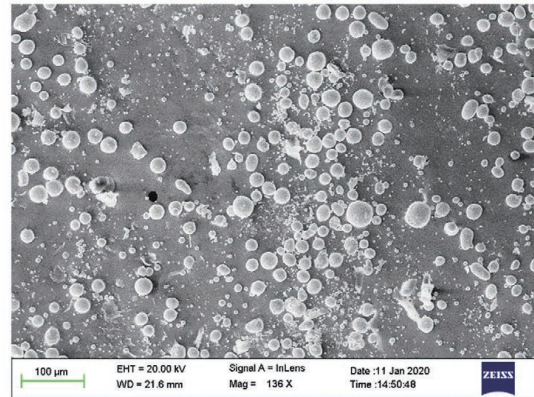


图 3 316L 不锈钢粉末图

Fig. 3 316L stainless steel powder



图 4 SLM 125HL 打印机

Fig. 4 SLM 125HL printer



图 5 三维形貌仪

Fig. 5 Three-dimensional profiler

3 试样表面形貌及表面缺陷

3.1 上表面形貌及表面缺陷

基于场发射扫描电镜,观察到的上表面形貌熔道走向以及熔道之间的搭接情况如图 6 所示,并且在 14 号试样的上表面粘粉现象清晰可见,19 号试样上表面的粘粉现象更严重,24 号试样激光功率为

350 W,过高的能量输入导致熔池内液体产生飞溅。对比试样可得出,随着激光功率的增加,上表面的粘粉程度会增加;同时,过高的激光功率导致熔池产生飞溅,造成表面更大的缺陷,进而影响试样的上表面质量。此外,试样的上表面都存在不同程度的粘粉现象,可能是工作舱内散落的粉末随保护气体流动后落在试样上表面形成的。

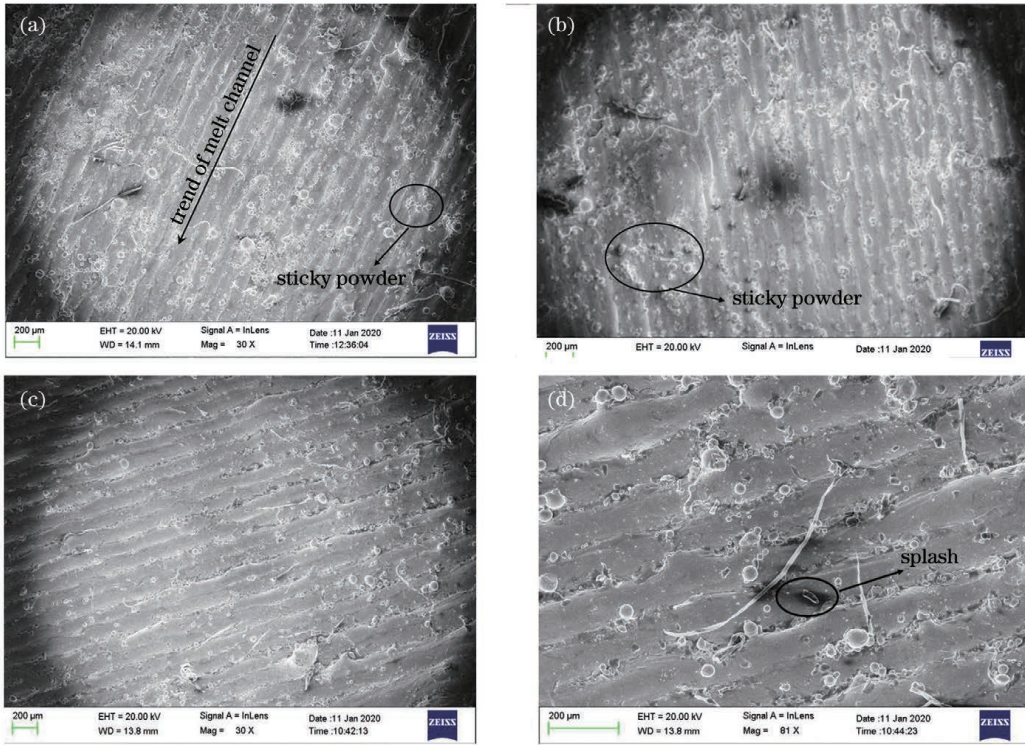


图 6 上表面形貌($v=0.8$ m/s)。(a)14 号试样($P=275$ W);(b)19 号试样($P=325$ W);(c)24 号试样($P=350$ W)

Fig. 6 Topography of upper surface ($v=0.8$ m/s). (a) Sample No. 14 ($P=275$ W); (b) sample No. 19 ($P=325$ W); (c) sample No. 24 ($P=350$ W)

3.2 垂直侧面形貌及表面缺陷

11 号和 13 号试样采用激光功率为 275 W,激光扫描速度分别为 0.5 m/s 和 0.7 m/s 进行成形,垂直侧面的形貌如图 7 所示,11 号和 13 号试样的

垂直侧面有不规则的球化和粘粉现象。相对于 11 号试样,13 号试样球化现象更加严重。对比得出:在激光功率相同的条件下,激光扫描速度越快,单位时间内输入的线能量密度越少,粘连在垂直侧面的

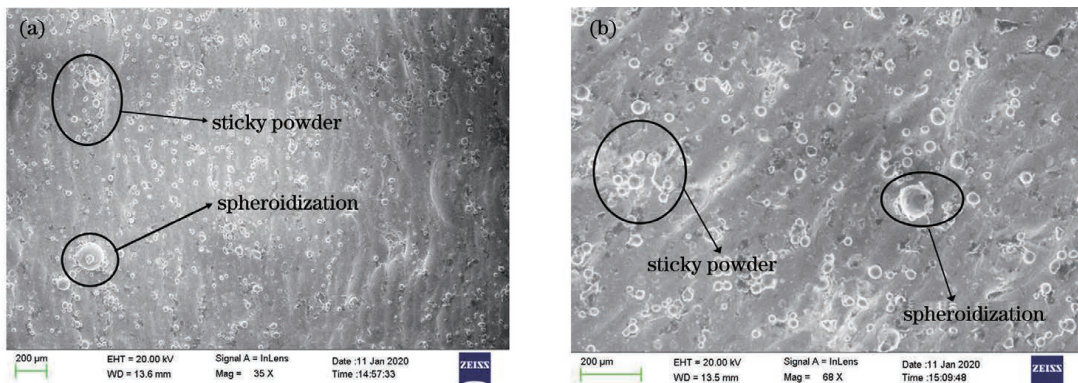


图 7 垂直侧面形貌($P=275$ W)。(a)11 号试样($v=0.5$ m/s);(b)13 号试样($v=0.7$ m/s)

Fig. 7 Topography of vertical surface ($P=275$ W). (a) Sample No. 11 ($v=0.5$ m/s); (b) sample No. 13 ($v=0.7$ m/s)

金属粉末未完全熔化,产生球化凸起现象,导致 13 号试样球化和粘粉现象严重。

3.3 上斜侧面形貌及表面缺陷

25 个试样的上斜侧面形貌近似相同,所以此处只展示 13 号试样的上斜侧面形貌图。13 号试样的激光功率为 275 W,扫描速度为 0.7 m/s,上斜侧面表面形貌如图 8 所示,上斜侧面不如上表面光滑平整,上斜侧面的表面形貌呈明显的阶梯状。阶梯效应的出现是因为上斜侧面与平面存在 60° 夹角堆积

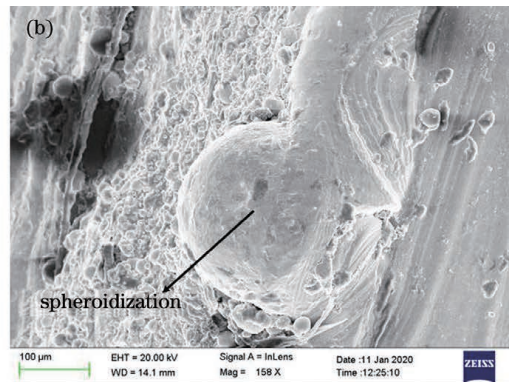
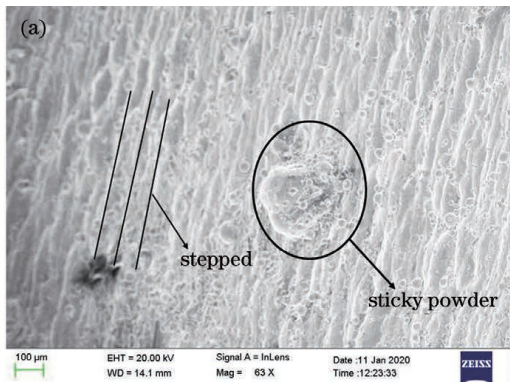


图 8 上斜侧面形貌($P=275$ W, $v=0.7$ m/s)。(a)放大倍数 63;(b)放大倍数 153

Fig. 8 Topography of up-skin surface ($P=275$ W, $v=0.7$ m/s). (a) Magnification is 63; (b) magnification is 153

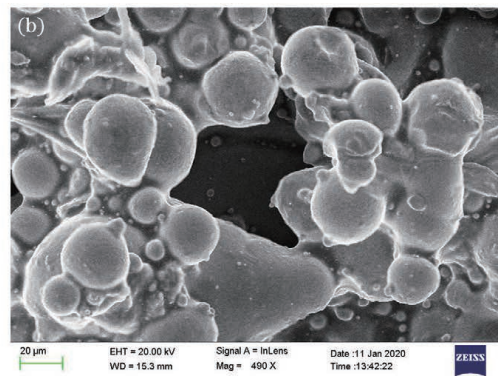
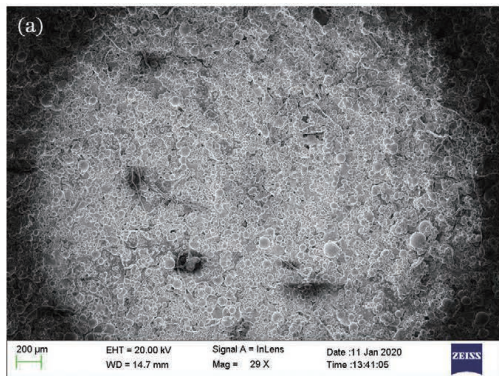


图 9 下斜侧面形貌($P=275$ W, $v=0.7$ m/s)。(a)放大倍数 29;(b)放大倍数 490

Fig. 9 Topography of down-skin surface ($P=275$ W, $v=0.7$ m/s). (a) Magnification is 29; (b) magnification is 490

4 SLM 成形件表面三维形貌及表面粗糙度

分析不同工艺参数对表面微观形貌以及粗糙度的影响以及变化规律。分别选取不同激光功率和扫描速度的两组试样,一组为激光功率为 275 W,激光扫描速度分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 m/s 的 11 号~15 号试样。另一组为激光扫描速度为 0.6 m/s,激光功率分别为 200、235、275、325、350 W 的 2 号、7 号、12 号、17 号、22 号试样。

而成。阶梯状的上斜侧面会增加打印过程中熔池中的多余热量散失以及与粉末的接触面积,导致上斜侧面的粘粉概率变大,进而降低表面质量。此外,试样表面有较严重的球化现象。

3.4 下斜侧面形貌及表面缺陷

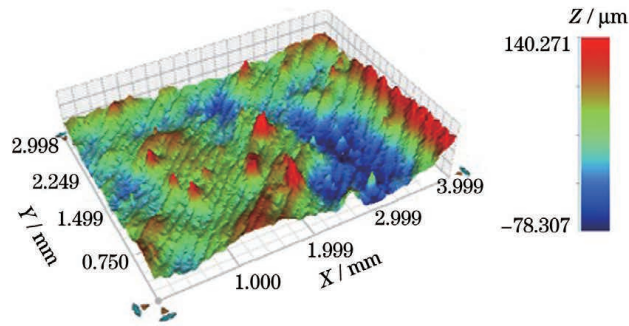
实验所得试样下斜侧面形貌粘粉严重,其中 13 号试样下斜侧面的形貌如图 9 所示,只能看到粘连的粉末,并且多数粉末未熔化,过多的粘粉会造成后续三维形貌仪无法测量其表面粗糙度的现象。

4.1 上表面的三维微观形貌及表面粗糙度

试样上表面三维微观形貌结构特征如图 10 所示,11 号试样的上表面熔道清晰可见,存在少量轮廓峰并且轮廓峰的值相对较小。13 号试样轮廓峰的值较高,这是由于粘连的金属粉末使得表面粗糙度增加。13 号试样的激光扫描速度快,单位时间内积累在粉床内的热量多,试样表面的热量不断积累,进而导致表面粘连了少数未完全熔化的金属粉末,粘连以及球化现象都会使得粗糙度增加。

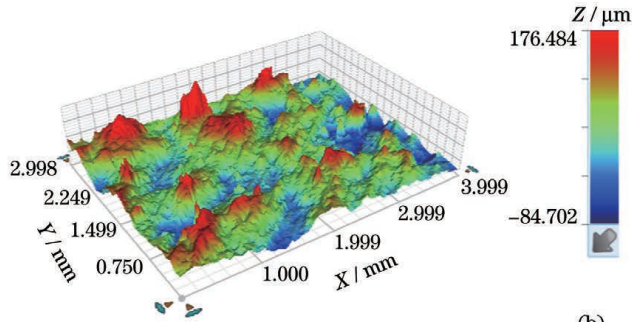
4.2 上斜侧面的三维微观形貌及表面粗糙度

上斜侧面的部分三维微观形貌结构特征如图 11 所示,试样上斜侧面三维微观形貌也能观察到



(a)

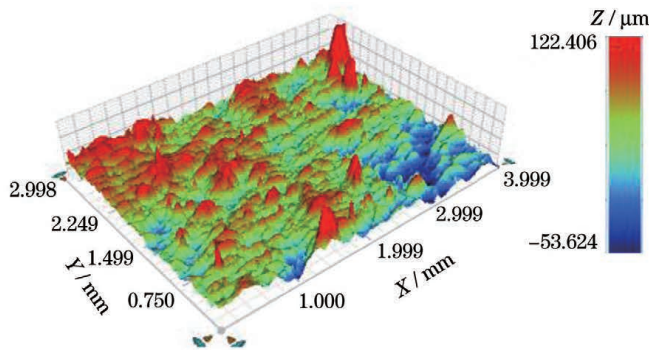
Analytical results		
Label	Value	Units
Average	0.314	μm
Data points	760284.032	
Percent data points	100	%
R_a	20.734	μm
R_p	140.271	μm
R_q	26.559	μm
R_t	218.577	μm
R_v	-78.307	μm



(b)

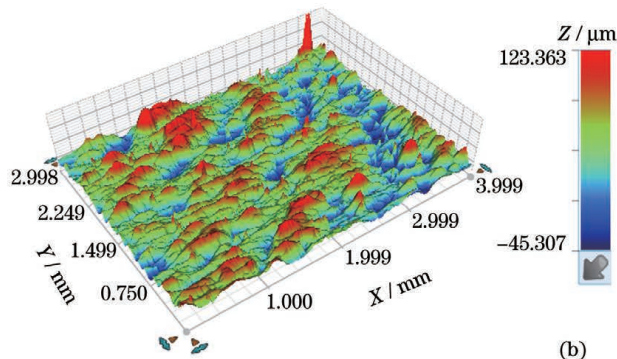
Analytical results		
Label	Value	Units
Average	-9.474	μm
Data points	758576	
Percent data points	99.78	%
R_a	23.917	μm
R_p	176.484	μm
R_q	30.081	μm
R_t	261.187	μm
R_v	-84.702	μm

图 10 上表面三维微观形貌 ($P=275\text{ W}$)。 (a) 11 号试件 ($v=0.5\text{ m/s}$) ; (b) 13 号试件 ($v=0.7\text{ m/s}$)
 Fig. 10 Mesoscopic morphology of upper surface ($P=275\text{ W}$). (a) Sample No. 11 ($v=0.5\text{ m/s}$) ; (b) sample No. 13 ($v=0.7\text{ m/s}$)



(a)

Analytical results		
Label	Value	Units
Average	3.535	μm
Data points	760284.992	
Percent data points	100	%
R_a	13.661	μm
R_p	122.406	μm
R_q	17.93	μm
R_t	176.03	μm
R_v	-53.624	μm



(b)

Analytical results		
Label	Value	Units
Average	-0.489	μm
Data points	760284.992	
Percent data points	100	%
R_a	10.613	μm
R_p	123.363	μm
R_q	13.426	μm
R_t	168.67	μm
R_v	-45.307	μm

图 11 上斜侧面三维微观形貌 ($P=275\text{ W}$)。 (a) 12 号试样 ($v=0.6\text{ m/s}$) ; (b) 15 号试样 ($v=0.9\text{ m/s}$)
 Fig. 11 Mesoscopic morphology of up-skin surface ($P=275\text{ W}$). (a) Sample No. 12 ($v=0.6\text{ m/s}$) ; (b) sample No. 15 ($v=0.9\text{ m/s}$)

因阶梯效应导致的阶梯形貌,阶梯形貌所粘的粉末以及球化等表面缺陷造成轮廓峰增多,所以阶梯形貌导致上斜侧面比垂直侧面的粗糙度大。12 号试样表面由于粉末黏附沉积造成的凸起明显增多。15 号试样表面的凸起明显减少,轮廓峰值也相应较小,三维微观形貌明显光滑,粗糙度低。12 号试样扫描速度比 15 号试样慢,单位时间内输入的线能量密度多,熔池的热量未及时散出,使得更多的粉末附着在

已成形的试样表面产生球化和粘粉现象。

4.3 垂直侧面的三维微观形貌及表面粗糙度

垂直侧面部分三维形貌如图 12 所示,垂直侧面的表面粗糙度要低于上表面、上斜侧面。这是由于垂直侧面和水平方向垂直,没有阶梯形貌,垂直侧面与粉末床的接触面积小于上斜侧面与粉末床的接触面积,从而导致垂直侧面的热量积累小于上斜侧面,因此粉末粘连、球化和表面粘粉也相应减少。

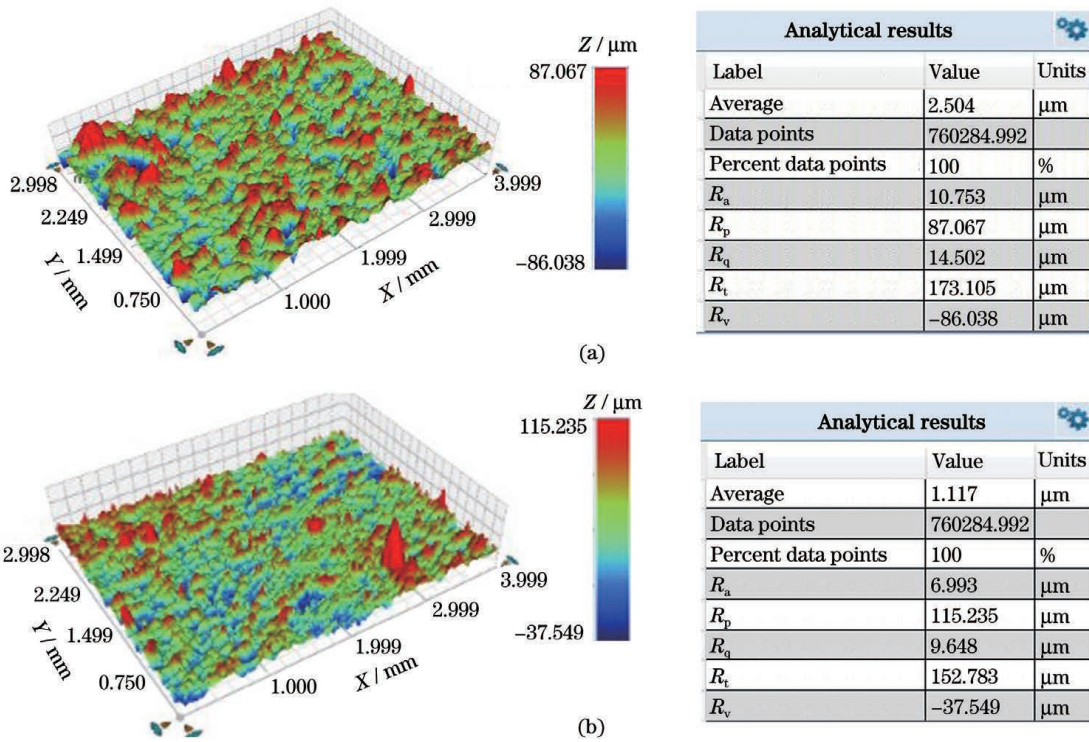


图 12 垂直侧面三维微观形貌($P=275\text{ W}$)。(a)12 号试样 ($v=0.6\text{ m/s}$);(b)15 号试样($v=0.9\text{ m/s}$)

Fig. 12 Mesoscopic morphology of Vertical surface ($P=275\text{ W}$). (a) Sample No. 12 ($v=0.6\text{ m/s}$); (b) sample No. 15 ($v=0.9\text{ m/s}$)

4.4 成形件表面理论粗糙度预测模型

4.4.1 熔道宽度预测

SLM 的上表面粗糙度主要由成形熔道的形貌决定,形貌的主要表征是熔道的熔宽,所以对熔宽进行预测计算。在已知研究中^[8],激光光斑直径对熔宽影响很小,故不考虑光斑直径对熔宽的影响。熔池形成过程中熔池宽度 a 由下式得到^[17]

$$\xi P = \pi k(T_s - T_0)a + \frac{e\pi\rho C_p(T_s - T_0)va^2}{10}, \quad (2)$$

式中, ξ 为粉床对激光的吸收率, $\xi=0.35$, T_0 为初始温度,打印之前基板需要预热到 $100\text{ }^\circ\text{C}$,故 $T_0=373.15\text{ K}$, T_s 为 316L 粉末的熔点,取固液相临界温度 1650 K ,导热系数 $k=35.1698$,比热容 $C_p=683.1\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, ρ 是材料的密度, $\rho=$

$72.835\text{ g}/\text{cm}^3$, e 为自然常数。根据(2)式,基于 MATLAB 计算熔道的熔宽,如表 3 所示。

从表 3 中的理论值可以得出,随线能量密度的增加,熔宽也随之增加,呈正比例关系。随着扫描速度的增大熔宽变小,而随着激光功率升高,熔宽随之变大。工艺参数与熔宽的关系如图 13 所示。

4.4.2 熔道搭接曲线建模

上表面的粘粉现象存在一定的偶然性,因此不考虑粘粉对上表面粗糙度的影响,只考虑熔道形貌及相邻两熔道搭接程度的影响。熔道搭接的示意图如图 14 所示,其中熔道的截面简化为标准圆的一部分,设熔道宽度为 a ,熔道高度为 b ,扫描间距为 s 。设熔道圆弧曲线上的点满足 $x^2 + y^2 = R^2$,把圆弧上的点带入圆的方程得

表 3 熔道宽度预测值

Table 3 Predicted value of melt channel width

Serial number	Laser power P / W	Scanning speed $v / (m \cdot s^{-1})$	Line energy density $\rho_{LED} / (J \cdot m^{-1})$	Melting width $a / \mu m$
2	200	0.6	333.33	121.67
7	235	0.6	391.66	133.44
11	275	0.5	550.00	157.85
12	275	0.6	458.33	145.88
13	275	0.7	392.85	136.37
14	275	0.8	343.75	128.55
15	275	0.9	305.56	121.99
17	325	0.6	541.67	160.25
22	350	0.6	583.33	167.02

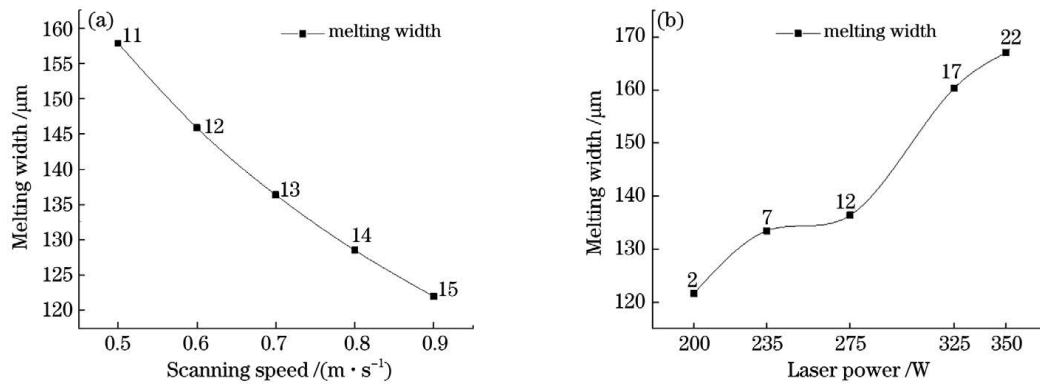


图 13 工艺参数与熔宽的关系。(a)扫描速度与熔宽的关系；(b)激光功率与熔宽的关系

Fig. 13 Relationship between process parameters and melting width. (a) Relationship between scanning speed and melting width; (b) relationship between laser power and melting width

$$R = \frac{a^2}{8b} + \frac{b}{2}. \quad (3)$$

在图 14 所示的坐标系中,单熔道曲线的曲线方程为^[18]

$$y = f(x) = \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2} + b - R. \quad (4)$$

熔道搭接图中阴影区域为相邻熔道的搭接区域,搭接区域发生重熔,设重熔的高度为 h ,两个熔道的交点在圆弧曲线上,故搭接深度为

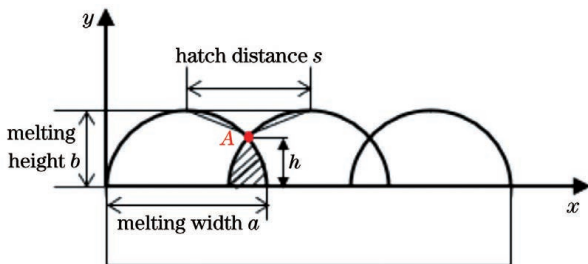


图 14 熔道搭接截面示意图

Fig. 14 Schematic diagram of lap joint section

$$f_h\left(\frac{a+s}{2}\right) = \sqrt{R^2 - \frac{s^2}{4}} + b - R. \quad (5)$$

由实验分析得,决定试样表面粗糙度主要是 A 点以上的部分,故将图 14 熔道搭接的截面图向 y 周围的负方向平移 h ,并向 x 轴负方向平移 $(a-s)/2$,得到平移后的有效熔道搭接曲线,平移后的曲线如图 15 所示。平移后曲线表达式为

$$y_1 = \sqrt{R^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2} + b - h - R. \quad (6)$$

4.4.3 试样上表面的粗糙度预测模型

由于熔道搭接曲线是以 s 为周期的周期函数,故计算粗糙度时只需要取一个周期内的曲线进行计算。在一定测量长度 l 范围内,由粗糙度计算公式^[19]得

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y_1(x)| dx. \quad (7)$$

结合粗糙度公式,基于简化后的有效的熔道搭接图,构建计算粗糙度所需要的模型,如图 15 所示。

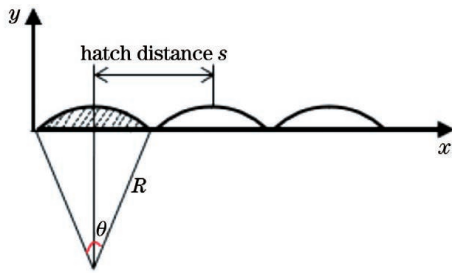


图 15 有效的熔道搭接示意图

Fig. 15 Schematic diagram of effective melt channel overlap
熔道的截面如阴影区域所示,是标准圆的一部分,根据(7)式可得

$$R_a = \frac{\pi R^2 \arcsin \frac{s}{2R}}{180s} - \frac{1}{2} R \cos \left(\arcsin \frac{s}{2R} \right) \quad (8)$$

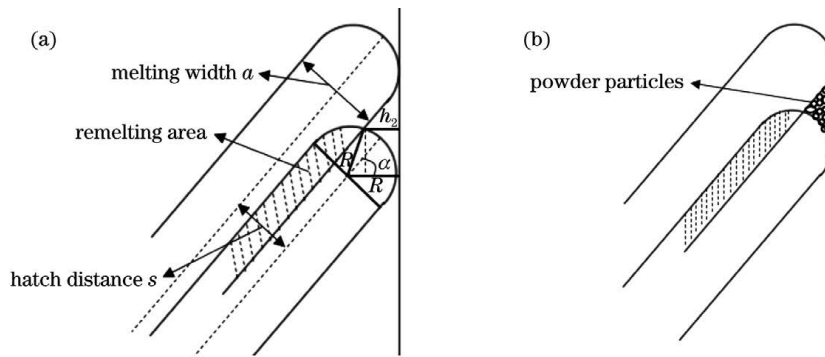


图 16 垂直侧面粗糙度与熔宽等相关因素的示意图。(a) 侧面粗糙度与熔宽的关系图;(b)侧面粘粉原理

Fig. 16 Schematic diagram of related factors such as roughness of vertical surface and melting width. (a) Relationship between side roughness and melting width; (b) principle of side sticking powder

在实际打印过程中,每一层 SLM 成形侧面都会与粉末床直接接触,侧面熔道的熔池热量累积会导致与侧表面接触的粉末部分熔化,这些粉末会黏附在已成形的试样侧面形成粘粉,如图 16(b)所示。为了考虑粘粉对侧面粗糙度的影响,首先针对理想平面粘粉现象做出以下假设:1)粉末均匀覆盖侧表面上;2)相邻粉末表面互相接触,粉末颗粒间无间隙;3)粉末颗粒的一半被熔化。基于以上假设,粘粉后的表面形貌轮廓与图 14 相符,侧面粘粉颗粒半径 r 取粉末平均半径 $15.5 \mu\text{m}$,图中参数 a 和 s 均为粉末直径 $31 \mu\text{m}$,而 b 用粉末半径 $15.5 \mu\text{m}$ 表示,将其带入(8)式计算可得理想平面粘粉后的粗糙度 $R_{a1} \approx 5.42 \mu\text{m}$ 。

由实验结果可知,随着熔宽的增加,熔池的热量积累效应也就越明显,熔道搭接产生的侧表面粗糙度 R'_a 值随着熔宽的增加而变小,理想平面粘粉产生的粗糙度 R_{a1} 随着熔宽的增大而变大,此现象是由粘粉增多引起的。另外,当侧表面与水平面有一定倾斜

4.4.4 试样侧表面的粗糙度预测模型

考虑到试样在打印过程中可以根据实际需求设置扫描策略,扫描路径的角度设置在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,试样侧面的粗糙度形成机理如图 16(a)所示。侧面的熔道搭接也是以周期为 s 的周期函数,得出轮廓最大深度计算公式

$$h_2 = R - \left[\sqrt{R^2 - \left(s - \frac{a}{2} \right)^2} - \left(s - \frac{a}{2} \right) \tan \alpha \right] \times \cos \alpha \quad (9)$$

结合粗糙度计算公式(8)式,不考虑粘粉影响时,侧表面的粗糙度公式为

$$R'_a = \frac{\pi R^2 \arcsin \frac{s}{2R}}{180s} - \frac{1}{2} (R - h_2) \quad (10)$$

角度时,侧表面与粉末床的接触面积和散热面积随着倾斜角度的减小逐渐变大,粘粉现象越来越严重。

同时考虑侧面熔道搭接、粘粉以及侧表面倾斜角度对侧表面粗糙度的影响,在(10)式基础上做了以下修正:1)每层切片的熔道搭接应该考虑熔宽 a 和扫描间距 s 之间的关系。以相邻两熔道搭接为模型, $2a - s = a + a - s$ 表示搭接之后,熔宽和重熔部分的总宽度; $a - s$ 则表示重熔部分的宽度。如图 16(b)所示,重熔区域越大,则粘粉区域越小,相应地由于粘粉所导致粗糙度在单层粗糙度计算的区域越小。2)侧面成形角度对成形表面和粉末床接触面积存在几何关系 $\sin \beta$,接触面积的大小会影响热量散失以及接触面周围的粉末熔化程度。

综上,对(10)式进行修正可得 SLM 成形过程侧表面粗糙度预测模型

$$R''_a = \left[R'_a \times \left(\frac{a - s}{2a - s} \right) + \left(1 - \frac{a - s}{2a - s} \right) \times \frac{R_{a1}}{\sin \beta} \right] \times \frac{1}{\sin \beta}, s \leq a \quad (11)$$

式中, β 为侧表面与水平面的夹角, $\beta=90^\circ$ 时是垂直侧面, $\beta=60^\circ$ 时是上斜侧面。根据公式计算实验中

不同工艺参数下, 试样表面的粗糙度, 计算所得如表 4 所示, 并分析熔宽与试样表面粗糙度的关系。

表 4 熔宽及表面粗糙度的预测值

Table 4 Predicted value of melting width and surface roughness

Serial number	Melting width $a / \mu\text{m}$	Roughness / μm		
		Upper surface	Up-Skin surface	Vertical surface
2	121.67	34.32	8.01	6.11
7	133.44	24.38	11.37	9.04
11	157.85	16.41	13.74	11.22
12	145.88	19.49	12.94	10.49
13	136.37	22.98	11.81	9.48
14	128.55	27.32	10.26	8.10
15	121.99	33.85	8.14	6.22
17	160.25	15.92	13.84	11.31
22	167.02	14.64	14.08	11.54

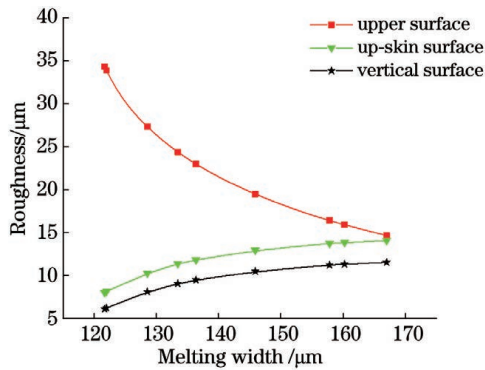


图 17 熔宽与粗糙度之间的关系

Fig. 17 Relationship between melting width and roughness

从图 17 得出, 从理论值的计算角度出发, 随着熔宽的增大, 上表面的粗糙度逐渐变小。随着熔宽的增大, 上斜侧面和垂直侧面的粗糙度逐渐变大, 侧面的

粗糙度主要受粘粉的影响。要想保证试样表面低粗糙度, 在保证大于扫描间距的熔宽前提下, 还应该避免线能量密度的过多输入而造成的粘粉等表面缺陷。

4.5 工艺参数对表面粗糙度的影响规律分析

4.5.1 工艺参数对上表面粗糙度的影响规律分析

工艺参数激光功率和扫描速度对上表面粗糙度的影响, 如图 18 所示。从整体变化趋势来看, 当激光功率恒定不变时, 随着激光扫描速度的不断增加, 实验粗糙度 R_a 也随之不断增加。当激光扫描速度恒定不变时, 改变其激光功率, 随着激光功率的不断增大, 试样表面的 R_a 值呈现减小的趋势。对比粗糙度的实验值与理论计算值, 计算所得粗糙度与实际粗糙度的变化规律一致, 计算值与实验值的误差小于 20%。由于在实际打印工况中, 偶然的粘粉现象会造成实验值与计算值存在偏差。

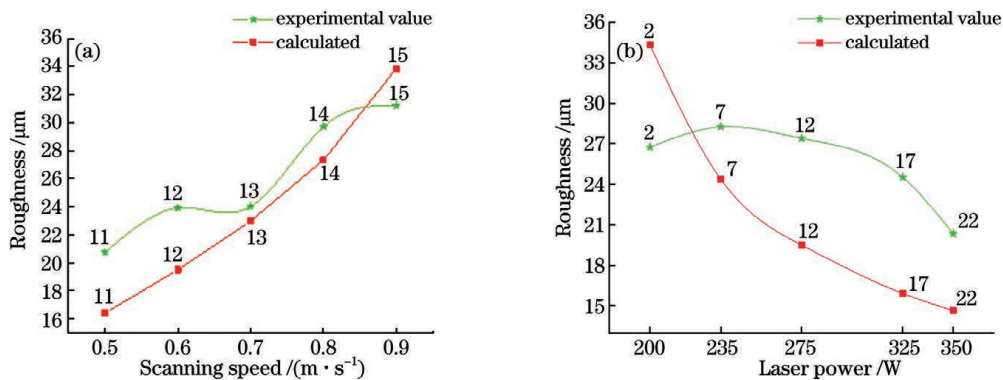
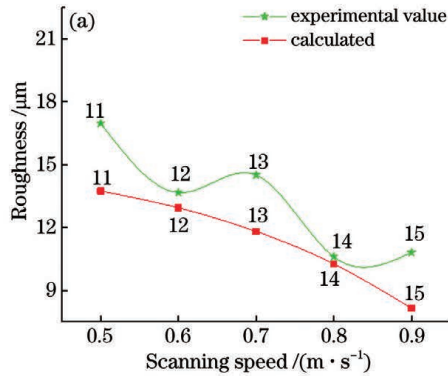


图 18 不同工艺参数对上表面粗糙度的影响。(a) 不同扫描速度 ($P=275 \text{ W}$); (b) 不同激光功率 ($v=0.6 \text{ m/s}$)

Fig. 18 Influence of different process parameters on the roughness of upper surface. (a) Different scanning speeds ($P=275 \text{ W}$); (b) different laser powers ($v=0.6 \text{ m/s}$)

激光功率恒定,随着激光扫描速度的增加,单位时间内熔道对激光能量的吸收减少,金属粉末熔化不充分,熔道宽度变窄,搭接效果变差,导致表面粗糙度变大。激光扫描速度恒定时,激光功率增加时单位时间内激光的能量输入变多,使得搭接区域重叠效果变好,粗糙度逐渐降低。



4.5.2 工艺参数对上斜侧面粗糙度的影响规律分析

分析工艺参数激光功率和扫描速度对上斜侧面粗糙度的影响,结果如图 19 所示。在激光功率不变的条件下,扫描速度不断增加,上斜侧面实验算数平均粗糙度的变化整体呈现变小的趋势。当激光扫描速度恒定,随着激光功率的增加,粗糙度也相应地增加。

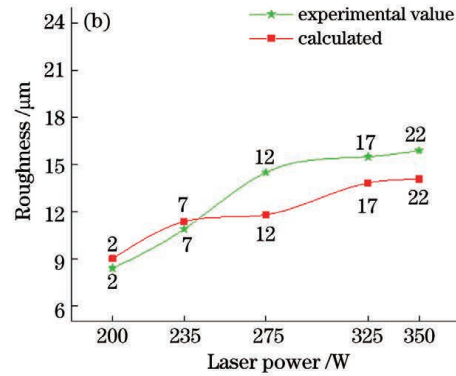
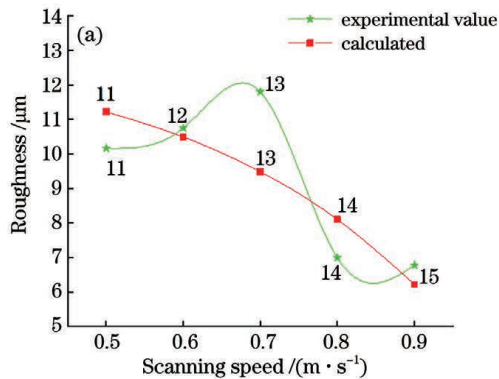


图 19 不同工艺参数对上斜侧面粗糙度的影响。(a)不同扫描速度($P=275\text{ W}$);(b)不同激光功率($v=0.6\text{ m/s}$)
Fig. 19 Influence of different process parameters on surface roughness of up-skin surface. (a) Different scanning speeds ($P=275\text{ W}$); (b) different laser powers ($v=0.6\text{ m/s}$)

对比粗糙度的实验值与理论计算值,计算得上斜侧面的粗糙度与实验的粗糙度变化规律一致。分析扫描速度对粗糙度的影响,可知计算值与实验值误差较小。分析激光功率对粗糙度的影响,发现随着功率的增加,实验粗糙度值逐渐增加。整体对比实验值与计算预测值,误差在可以接受的范围内,误差值不超过 15%,验证了上斜侧面粗糙度计算公式的有效性。

无论是激光功率还是激光扫描速度的改变,改变的都是单位时间内输入粉床的线能量密度。激光功率减小和扫描速度加快,都会使单位时间内的线能量密度减少,粉床中热量的减少导致粘连的未完全熔化粉末减少,粗糙度降低。



4.5.3 工艺参数对垂直侧面粗糙度的影响规律分析

分析工艺参数激光功率和扫描速度对垂直侧面粗糙度的影响,结果如图 20 所示。当激光功率恒定,随着激光扫描速度的不断增加,粗糙度变小。当激光扫描速度恒定,随着激光功率升高,粗糙度值变大,垂直侧面 R_a 值也由 $8.0\ \mu\text{m}$ 增加到 $17.9\ \mu\text{m}$ 。粗糙度预测值与实验测得的粗糙度变化规律一致。不同激光扫描速度条件下,垂直侧面粗糙度的实验值与预测值变化趋势有一定误差,主要是个别球化现象引起的,误差在 5%~20%之间。功率的增加会造成粘粉现象的出现,进而导致粗糙度增加。实际打印工况比理想情况下粘粉的工况复杂,因此随着激光功率增加,实验值与计算值的误差会增大。

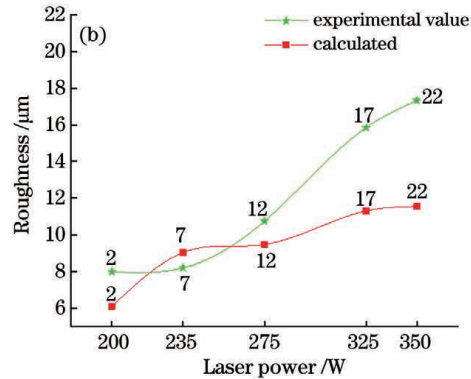


图 20 不同工艺参数对垂直侧面粗糙度的影响。(a)不同扫描速度($P=275\text{ W}$);(b)不同激光功率($v=0.6\text{ m/s}$)
Fig. 20 Influence of different process parameters on roughness of vertical surface. (a) Different scanning speeds ($P=275\text{ W}$); (b) different laser powers ($v=0.6\text{ m/s}$)

在不同功率条件下,垂直侧面粗糙度实验值与预测值变化趋势基本一致,误差在 10%~30%之间。

从热量积累的角度分析,激光功率和激光扫描速度对试样表面粗糙度的作用机理相同,都是由于过多的热量未及时消散,进而出现粘粉和球化现象,使得粗糙度增加。激光功率对试样的上斜侧面和垂直侧面的粗糙度影响规律相同,均具有显著影响。

5 结 论

通过观察不同打印方案下的试样表面形貌,分析造成不同表面粗糙度的原因,结合理论计算出表面粗糙度,得出不同工艺参数对改善表面粗糙度的影响,主要结论如下:

1) 试样的上表面形貌主要与熔宽相关,个别区域有少量粘粉、球化和飞溅现象;上斜侧面与垂直侧面形貌受粘粉、粉末球化影响比较大,并且与熔道宽度、扫描间距、粉末直径以及成形角度有直接关系;无论何种工艺参数,斜侧面粘粉比垂直侧面更严重,粉末互相粘连且多数粉末未熔化,致使斜侧表面质量更差;

2) 随着线能量密度的升高,熔池液相区增大,因此熔宽与激光功率成正比,与扫描速度成反比,与线能量密度成正比,熔宽越大则上表面粗糙度越小;

3) 随着线能量密度的升高,能量累积效应导致成形件表面温度升高。上斜侧面和垂直侧面温度升高会导致其与粉末堆接触区域粉末球化、粘粉现象越来越严重,因此导致 SLM 成形件表面粗糙度值变大;

4) 理论粗糙度预测值与实测值在不同工艺参数条件下的变化规律基本一致,上表面预测误差小于 20%,垂直侧面预测误差小于 30%,上斜侧面预测误差值不超过 15%,因此可用于预测不同工艺参数条件下 316L 不锈钢金属粉末 SLM 成形件表面粗糙度。

参 考 文 献

- [1] Jafari D, Wits W W, Vaneker T H J, et al. Pulsed mode selective laser melting of porous structures: Structural and thermophysical characterization [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101263.
- [2] Kim W R, Bang G B, Kwon O, et al. Fabrication of porous pure titanium via selective laser melting under low-energy-density process conditions[J]. Materials & Design, 2020, 195: 109035.
- [3] Parry L, Ashcroft I A, Wildman R D. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 1-15.
- [4] Mishra A K, Upadhyay R K, Kumar A. Surface wear anisotropy in AlSi10Mg alloy sample fabricated by selective laser melting: effect of hatch style, scan rotation and use of fresh and recycled powder [J]. Journal of Tribology, 2021, 143(2): 021707.
- [5] Gu D D, Xia M J, Dai D H. On the role of powder flow behavior in fluid thermodynamics and laser processability of Ni-based composites by selective laser melting [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 137: 67-78.
- [6] Sadali M F, Hassan M Z, Ahmad F, et al. Influence of selective laser melting scanning speed parameter on the surface morphology, surface roughness, and micropores for manufactured Ti6Al4V parts[J]. Journal of Materials Research, 2020, 35(15): 2025-2035.
- [7] Vaglio E, de Monte T, Lanzutti A, et al. Single tracks data obtained by selective laser melting of Ti6Al4V with a small laser spot diameter[J]. Data in Brief, 2020, 33: 106443.
- [8] Luo Z Y. Study on process and effective factors of thin-wall parts manufactured by selective laser melting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
罗子艺. 薄壁零件选区激光熔化制造工艺及影响因素研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [9] Zong X W, Gao Q, Zhou H Z, et al. Study on 316L anisotropy and laser energy density based on laser selective melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502003.
宗学文, 高倩, 周宏志, 等. 基于激光选区熔化的 316L 各向异性及激光能量密度研究[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502003.
- [10] Zakrzewski T, Kozak J, Witt M, et al. Dimensional analysis of the effect of SLM parameters on surface roughness and material density[J]. Procedia CIRP, 2020, 95: 115-120.
- [11] Shrestha S, Chou K. An investigation into melting modes in selective laser melting of Inconel 625 powder: single track geometry and porosity[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(11/12): 3255-3267.
- [12] Greco S, Gutzeit K, Hotz H, et al. Selective laser melting (SLM) of AISI 316L: impact of laser power, layer thickness, and hatch spacing on roughness, density, and microhardness at constant input energy density[J]. The International Journal of Advanced

- Manufacturing Technology, 2020, 108(5/6): 1551-1562.
- [13] Woźniak A, Adamiak M, Ziębowicz B. The surface morphology and electrochemical properties of pure titanium obtained by selective laser melting method [J]. Solid State Phenomena, 2020, 308: 21-32.
- [14] Huang W D, Zhang W J, Lian G F, et al. Effect of SLM forming process parameters on surface roughness of 316L stainless steel parts[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 35-41.
黄卫东, 张伟杰, 练国富, 等. SLM 成形工艺参数对 316L 不锈钢成形件表面粗糙度的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 35-41.
- [15] Yu C F, Hu Y J, Lu B W, et al. Effect of hatch spacing on phase transformation behavior and mechanical properties of NiTi shape memory alloy fabricated by selective laser melting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914008.
余春风, 胡永俊, 卢冰文, 等. 扫描间距对选区激光熔化 NiTi 形状记忆合金相变行为及力学性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914008.
- [16] Hu Y, Yang X K, Kang W J, et al. Effects of combination of powders with different particle sizes on surface roughness and internal defects of IN738 alloy formed by selective laser melting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0114003.
胡勇, 杨小康, 康文江, 等. 不同粒径粉末搭配对激光选区熔化 IN738 合金成形件表面粗糙度及内部缺陷的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0114003.
- [17] Hu Z H. Study on the melting and solidification behavior of AlCu5MnCdVA alloy fabricated by selective laser melting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
胡志恒. AlCu5MnCdVA 铝合金的激光选区熔化成形熔凝行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [18] Liu R C, Yang Y Q, Wang D. Research of upper surface roughness of metal parts fabricated by selective laser melting[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 425-430.
刘睿诚, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成形金属零件上表面粗糙度的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 425-430.
- [19] Sun J F, Yang Y Q, Yang Z. Study on surface roughness of selective laser melting Ti6Al4V based on powder characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702004.
孙健峰, 杨永强, 杨洲. 基于粉末特性的选区激光熔化 Ti6Al4V 表面粗糙度研究[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702004.

Prediction and Control on the Surface Roughness of Metal Powder using Selective Laser Melting

Song Jianfeng¹, Song Younian¹, Wang Wenwu¹, Lang Yuedong², Dong Yonggang^{1*},
Yang Ruixing³

¹ College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

² Beijing Aerospace Control Instrument Research Institute, Beijing 100854, China;

³ Zhonglian Agricultural Machinery Co. LTD, Wuhu, Anhui 241000, China

Abstract

Objective Selective laser melting (SLM) is a recently developed additive manufacturing technology that has the advantages of high material utilization, low pollution, short process cycle, and the ability to fabricate complex structures. However, the flow law of the molten pool and powder during the SLM molding process is complicated, so the surface quality of the molded part is difficult to control, resulting in surface defects such as micropores, cracks, sticky powder, and spheroidization. Therefore, it is crucial to quantitatively study and predict the influence of the SLM molding process parameters on the surface morphology and quality to reduce surface defects and enhance the surface quality. The effect of different laser power intensities and scanning speeds on the surface morphology, quality, and roughness of SLM molded parts at various positions are studied experimentally. Furthermore, the impact of melt channel width, hatch distance, powder diameter, and sticky powder is considered and the scanning strategy is quantitatively analyzed. A mathematical model for predicting the surface roughness of various SLM molded component positions is established based on the relationship among the angle of the scanning path, the forming angle of the sample, and the side roughness, which can be used to optimize the control on the surface quality

and the topography of the SLM molded part.

Methods First, an SLM125HL printer was employed to print 316L stainless metal powder into oblique hexahedron samples using different laser power intensities and scanning speeds. Then, the surface micromorphology and roughness of the oblique hexahedron at various positions were measured using a field emission scanning electron microscope and three-dimensional profilometer under different process parameters. Next, the influence of process parameters on the surface forming defects and roughness were analyzed considering the melt channel width, hatch distance, powder diameter, sticking powder, and forming angle. Finally, the surface quality and roughness control strategy are presented based on the theoretical surface roughness prediction model at various positions.

Results and Discussions The roughness calculation formula (Eq. 8) of the upper surface is derived according to the morphology of the melt channel and the degree of overlap between two adjacent melt channels by considering the melt width, powder diameter, hatch distance, and side surface inclination angle. Additionally, a mathematical model (Eq. 11) of the side surface roughness is derived to predict the influence of the side surface roughness. The following conclusions are obtained from the experimental results and the theoretical prediction model. As the melting width increases, the roughness of the upper surface gradually decreases and the roughness of the up-skin and vertical surfaces gradually increase (Fig. 17). A decrease in laser power and an increase in scanning speed can reduce the linear energy density per unit time. Furthermore, the decrease in heat in the powder bed leads to a decline in the adhesion of incompletely melted powder and a decrease in roughness (Figs. 19 and 20). Additionally, the sticky powder has a significant effect on the roughness of the up-skin and vertical surfaces (Figs. 11 and 12).

Conclusions The morphology of the sample's upper surface is primarily related to the melting width, and there is slight powder sticking, spheroidization, and splashing in some areas; the morphology of the up-skin and vertical surfaces is greatly affected by the powder sticking and spheroidization, which is related to the width of the melt channel. Furthermore, the hatch distance, powder diameter, and forming angle are directly related. The powder adheres more on the up-skin surface than the vertical surface regardless of the process parameters, and most of the powder does not melt, which decreases the surface quality of the oblique side. The liquid phase area of the molten pool increases with the increase in the line energy density. Hence, the melt width is directly proportional to the laser power and line energy density and inversely proportional to the scanning speed. The larger the melt width, the smaller the upper surface roughness; as the line energy density increases, the energy accumulation effect increases the surface temperature of the molded part. Moreover, the temperature rise on the up-skin and vertical surfaces cause the powder spheroidization and sticking phenomenon in the contact area and the powder pile substantially grows in size, thereby increasing the surface roughness value of the SLM molded part. The predicted value of theoretical roughness and the actual measured value are basically the same under different process parameters. Additionally, the prediction error of the upper, vertical, and up-skin surfaces are less than 20%, 30%, and 15%, respectively, which can be used to predict the surface roughness of 316L stainless steel SLM molded metal powder parts under different process parameters.

Key words laser technique; additive manufacturing; selective laser melting; microscopic morphology; surface roughness; metal powder