

悬垂圆孔激光选区熔化成形质量研究

段声勤^{1,2}, 刘婷婷^{1,2}, 廖文和^{1,2}, 张长东^{1,2}, 杨涛^{1,2}

¹南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

²数控成形技术与装备国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210094

摘要 对圆孔试样进行分区分析,研究了激光功率、扫描线角度以及轮廓扫描次数对悬垂圆孔结构成形质量的影响。结果表明,激光功率对圆孔成形质量的影响显著,随着激光功率的增大,圆孔圆度值增大,尺寸精度降低,同时悬垂面出现细而长的熔池,部分熔池断裂球化成球状熔滴;当扫描线方向平行于悬垂面边缘线时,悬垂面质量较好,但在成形圆孔顶部近水平悬垂面处出现严重塌陷;在设置的扫描次数范围内,增加轮廓扫描次数可降低悬垂面表面粗糙度,优化表面质量。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 悬垂圆孔; 激光功率; 轮廓扫描; 表面质量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0402007

Research on Forming Quality of Overhanging Round Hole by Selective Laser Melting

Duan Shengqin^{1,2}, Liu Tingting^{1,2}, Liao Wenhe^{1,2}, Zhang Changdong^{1,2}, Yang Tao^{1,2}

¹College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²National Joint Engineering Laboratory for Numerical Control Forming Technology and Equipment, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract By means of selective analysis for round hole specimen, the influences of laser power, scanning line angle and number of contour scans on the forming quality of overhanging round holes are investigated. The results show that, the laser power has a significant effect on the forming quality of round holes. With the increase of laser power, the roundness of round holes increases and the dimensional accuracy decreases. At the same time, there are many thin and long melt pools on the overhanging surface, and part of them are fractured into spherical droplets; the overhanging surface quality is better when the scanning line direction is parallel to the edge lines of the overhanging surface, but there occurs a serious collapse on the top of round holes and near to the horizontal overhanging surface. Within the setting number of scans, the increase of the number of contour scans can reduce the surface roughness of the overhanging surfaces and optimize the surface quality.

Key words laser technique; selective laser melting; overhanging round hole; laser power; contour scan; surface quality

OCIS codes 140.3390; 140.3590; 350.3390

1 引言

激光选区熔化(SLM)技术是一种基于粉末熔化成形的增材制造技术,通过控制高能量的激光束选择性熔化粉末材料并逐层堆积成形,可直接加工

出高致密度零件。SLM技术具有高制造自由度,在直接成形复杂结构零件方面优势明显^[1]。然而,复杂结构零件中会出现悬垂结构,利用SLM技术难以高质量成形该结构的零件。

悬垂结构是指在SLM成形过程中不被基板或

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1103000)

作者简介: 段声勤(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光选区熔化技术方面的研究。E-mail: duansqxy@163.com

导师简介: 刘婷婷(1975—),女,教授,博士生导师。主要从事数字化设计制造、增材制造技术方面的研究。

E-mail: liutingting@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

已固化层支撑而直接成形于粉层之上的实体部分^[2-4]。根据倾斜角度可将悬垂结构分为两大类:一类为倾斜角度固定不变的斜面或水平悬垂结构,在SLM加工过程中,每一层的粉末支撑面积保持不变;另一类为倾斜角度会随着材料堆积高度发生变化的曲面悬垂结构,如悬垂圆孔结构。SLM在成形曲面悬垂结构时,悬垂面倾斜角度随着曲面曲率的变化而变化,悬垂面粉末支撑区域大小会直接影响成形稳定性,最终影响成形悬垂曲面尺寸精度和表面粗糙度。另外,由于倾斜角度不同,不同位置的最优加工参数也不同,而当前商业化成形设备在加工过程中多采用单一的工艺参数,导致悬垂曲面成形质量不高。因此,曲面悬垂结构成形一直是SLM技术加工的难题之一。Kempen等^[5]研究了圆孔孔径大小对SLM成形悬垂内流道尺寸精度的影响。Pakkanen等^[6]通过成形圆孔内流道结构,分析了不同倾斜角度下悬垂曲面内外表面形貌特征,得到了成形曲面粗糙度随倾斜角度的变化规律。Thomas^[7]将圆孔设计成水滴状自支撑结构,通过补偿圆孔悬垂面塌陷,提高了圆孔成形尺寸精度。刘婷婷等^[8]采用岛形和Z型两种扫描策略,SLM成形了不同倾斜角度的悬垂结构,探究了不同的扫描策略和悬垂角度下熔池行为的变化规律。王迪等^[9-11]对SLM成形的不同孔径的悬垂圆孔圆度和直径误差进行了分析,并且研究了激光

能量密度对变截面圆弧结构SLM成形质量的影响,通过直接成形的免组装机件验证了研究结果。麦淑珍等^[12]通过正交实验,成形了不同空间位置摆放的曲面结构,并分析了曲面表面形貌特征和表面粗糙度随摆放角度的变化趋势。

以上国内外学者的研究主要集中于常见单因素对悬垂曲面SLM成形质量及表面形貌的影响规律,而关于轮廓重熔、扫描策略等参数对成形质量的影响鲜有报道。轮廓重熔是指对试件轮廓进行多次熔化凝固以消除表面气孔、粘粉问题,可改善表面质量。扫描策略是指改变扫描截面熔池的温度分布,对试件成形质量有重要影响。本文以倾斜角度连续变化的悬垂圆孔结构为研究对象,对圆孔内表面进行分区处理,讨论分析了激光功率对SLM成形悬垂圆孔结构质量的影响,并且设计了扫描策略和轮廓优化实验,探究了扫描线角度和轮廓扫描次数对悬垂圆孔不同位置成形质量的影响。

2 实 验

2.1 实验材料和设备

采用无锡飞而康公司的钛合金(Ti-6Al-4V)粉末,化学成分见表1,该粉末为近球形颗粒,粒径分布范围为0~53 μm,平均粒径为35 μm,粉末形貌如图1所示。

表1 Ti-6Al-4V粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V powder (mass fraction, %)

Composition	Al	V	Fe	C	O	N	H	Mo	Mn	Cu	Sn	Y	Zr	Ti
Value	5.5-6.75	3.5-4.5	0.14	0.007	0.13	0.007	0.002	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	Bal.

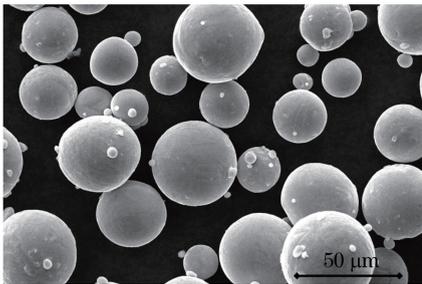


图1 Ti-6Al-4V粉末形貌

Fig. 1 Morphology of Ti-6Al-4V powder

实验设备采用德国Concept Laser公司生产的型号为M2的金属打印机,配备400 W的单模连续光纤激光器,激光波长为1070 nm,最大成形范围为250 mm×250 mm×280 mm。在实验过程中,为防止发生氧化反应,通入高纯度氩气(体积分数为99.999%),保证氧气体积分数小于0.1%。

2.2 实验方法

由于圆孔孔径越大,试件越容易出现严重的翘曲变形,根据加工经验,孔径8 mm为SLM成形圆孔结构的极限尺寸。为防止变形过大,确保试样能稳定成形,在16 mm×16 mm×10 mm的小方块中心设计直径为8 mm、深度为10 mm的悬垂圆孔试样,设计三组试件。

第一组试件在扫描速率不变的条件下,取Concept Laser M2默认的45°扫描线,改变激光功率以探究其对圆孔悬垂面成形质量的影响,具体工艺参数见表2,其中试件编号分别为1-1、1-2、1-3、1-4、1-5。

第二组试件改变扫描线与悬垂面边缘线间的夹角,设置0°,30°,45°,60°,90°这5种角度成形5个试件(对应的试件编号分别为2-1、2-2、2-3、2-4、2-5),研究扫描线角度对悬垂面表面质量的影响,具体扫

表 2 第一组实验的工艺参数

Table 1 Process parameters in the first group of experiments

Sample No.	Power P /W	Speed v /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Scanning strategy	Hatching spacing h / μm	Layer thickness t / μm
1-1	120	1250	Zig-zag	105	30
1-2	150	1250	Zig-zag	105	30
1-3	180	1250	Zig-zag	105	30
1-4	210	1250	Zig-zag	105	30
1-5	240	1250	Zig-zag	105	30

描路径如图 2 所示,其中悬垂面边缘线即图 2(a)所示黄色截面与圆孔内表面相交的红色截线,平行于 y 轴。试件成形参数为激光功率 180 W,扫描速度 $1650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

第三组试件调整轮廓扫描次数,试件轮廓成形参数见表 3,其中试件编号分别为 3-1、3-2、3-3。试件实体成形参数为激光功率 180 W,扫描速度 $1650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

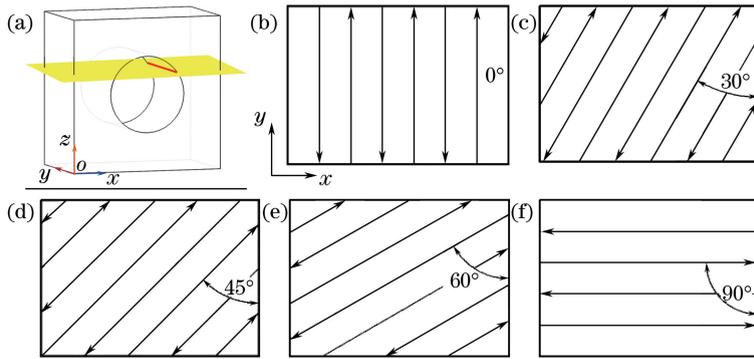


图 2 (a)悬垂面边缘线和(b)(c)(d)(e)(f)不同扫描线角度下激光扫描路径示意图

Fig. 2 Schematics of (a) edge line of overhanging surface and (b)(c)(d)(e)(f) laser scanning path under different scanning line angles

表 3 第三组实验的工艺参数

Table 3 Process parameters in the third group of experiments

Sample No.	Power P /W	Speed v /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Scanning strategy	Hatching spacing h / μm	Layer thickness t / μm	Scanning times
3-1	180	1250	Zig-zag	105	30	1
3-2	180	1250	Zig-zag	105	30	2
3-3	180	1250	Zig-zag	105	30	3

实验结束后,通过线切割将试件从基板上取下,采用美国海克斯康公司生产的 GLOBAL Classic SR 系列三坐标测量仪和七海测量技术(深圳)有限公司的型号为 Eagle-s 2010 的影像测量仪完成圆孔试样圆度和最大塌陷量的测量。使用 TESA(中国)公司的型号为 TESA-rugosurf 90-G 的表面粗糙度仪测量悬垂圆孔内表面不同区域的表面粗糙度,多次测量取平均值。用美国 FEI 公司生产的型号为 Quant 250FEG 的场发射环境扫描电子显微镜观察成形试样悬垂部分的微观形貌。

No.1-1~No.1-5 显示,激光功率对圆孔成形质量的影响明显,随着激光功率的增大,圆孔悬垂面变形越来越严重。同时,由于不同区域的塌陷量不同,圆孔逐渐变成一个水滴形状。第二组实验试样 No.2-1~No.2-5 显示, 0° 扫描线圆孔顶部出现塌陷,其余扫描线角度下成形圆孔出现不同程度的变形。第三组实验试样 No.3-1~No.3-3 显示,表面轮廓扫描 3 次的圆孔优化效果明显好于扫描 1 次和 2 次的圆孔的。

3.2 圆孔内表面分区处理

观察成形圆孔试样,根据圆孔悬垂区域不同的表面形貌特征,将悬垂圆孔分为三个部分,如图 4(a)所示。其中第 I 部分是圆心角 α_1 为 $140^\circ \sim 270^\circ$ 以及 $-90^\circ \sim -40^\circ$ 所对应的圆周范围,该部分成形表面光滑致密,在扫描电镜(SEM)下呈现出光亮的金属

3 实验结果

3.1 成形试样

成形试样如图 3 所示,第一组实验试样

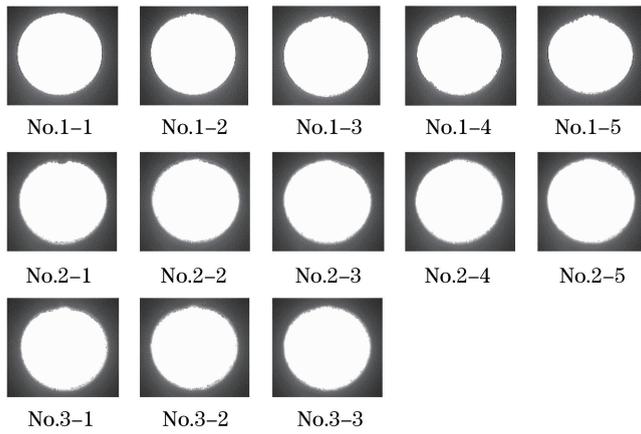


图 3 SLM 成形悬垂圆孔特征试样

Fig. 3 Overhanging hole specimen formed by SLM

光泽,熔道搭接状态清晰可见,且尺寸精度较高。第 II 部分是圆心角 α_2 为 $40^\circ \sim 83^\circ$ 和 $97^\circ \sim 140^\circ$ 所对应的圆周范围,此部分是悬垂圆孔塌陷最严重的区域,圆孔实际成形轮廓严重偏离模型设计边缘,并且表面粘附大量团聚颗粒,圆孔尺寸精度低、表面质量差。第 III 部分是圆心角 α_3 为 $83^\circ \sim 97^\circ$ 所对应的圆周范围,该部分悬垂面出现一定的塌陷,但塌陷量小

于第 II 部分的,同时表面粘附颗粒以未熔粉末颗粒为主,成形质量较第 II 部分的好。通过测量,第 III 部分悬垂面水平尺寸约为 1 mm,在孔径为 8 mm 的圆孔模型中,该水平尺寸对应的径向尺寸为 0.03 mm,故第 III 部分悬垂面表示圆孔加工的最后层。圆孔各部分表面形貌如图 4(b) 所示。

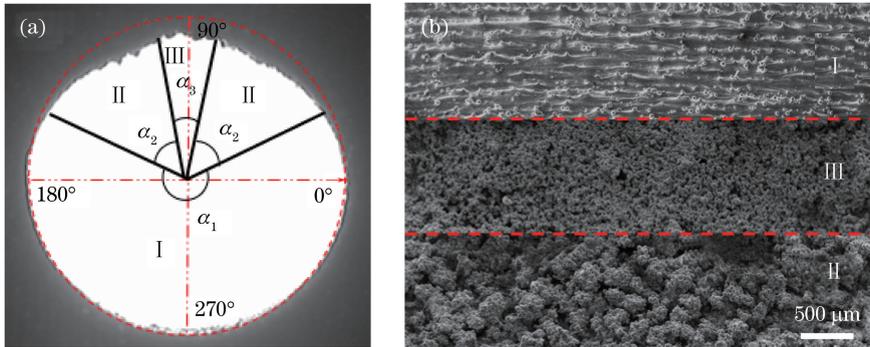


图 4 当激光功率为 240 W,扫描速度为 $1650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,SLM 成形悬垂圆孔结构。(a) 示意图;(b) 内表面形貌

Fig. 4 Overhanging round hole structure formed by SLM with laser power of 240 W and scanning speed of $1650 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. (a) Schematic; (b) internal surface morphology

4 结果分析

4.1 圆孔悬垂结构成形试件的表面粗糙度

实验结果显示,在采用默认的 45° 扫描线条件下,圆孔第 II 部分的悬垂面塌陷严重,表面粘附大的团聚颗粒,表面粗糙度(即表面轮廓算术平均偏差 R_a)高,都在 $20 \mu\text{m}$ 以上;第 III 部分为圆孔近水平悬垂面,该部分悬垂面被一层厚厚的小颗粒粉末覆盖,且受激光功率和轮廓重熔次数的影响较小,表面粗糙度 R_a 在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间;第 I 部分圆孔表面主要为成形上顶面,表面粘附少量小尺寸飞溅颗粒,表面

质量高, R_a 值在 $12 \mu\text{m}$ 以下。

圆孔悬垂面为变悬垂角度曲面,在分层切片后被简化成台阶面,如图 5 所示。可以看出,悬垂角度越大,台阶效应越明显,会形成一系列没有下层实体支撑的水平悬垂部分,其悬垂部分的长度 S 为

$$S = H \cot \theta, \quad (1)$$

式中 H 为切层厚度, θ 为该层轮廓与水平方向的夹角,即悬垂角度。在 H 保持不变的情况下,悬垂部分的长度 S 主要与倾斜角度 θ 有关。悬垂长度 S 越大,实体对悬垂部分的约束越小,由于金属熔融材料在固/液转变过程中体积会发生膨胀和收缩,自由

度高的悬垂部分更容易出现翘曲变形。同时,当悬垂长度 S 过大时,更多的激光能量直接辐射在粉床上,而粉末热传递能力差,导致熔池热量不能及时向周围介质传递,熔池冷却时间变长,浸入粉层的熔池增多,从而产生更多的悬垂物,这也是圆孔第 II、III 部分圆孔表面成形质量低于第 I 部分的主要原因。

由(1)式可知, θ 值越小, S 越大,图 5 中 B 处的倾斜角度 θ_2 小于 A 处的 θ_1 ,故 B 处的水平悬垂长度 S_2 大于 S_1 , B 处悬垂结构较 A 处更难成形。因此,在悬垂圆孔第 II 部分,随着圆心角 α_2 的增大,悬垂长度 S 不断增大,成形尺寸精度逐渐变小。

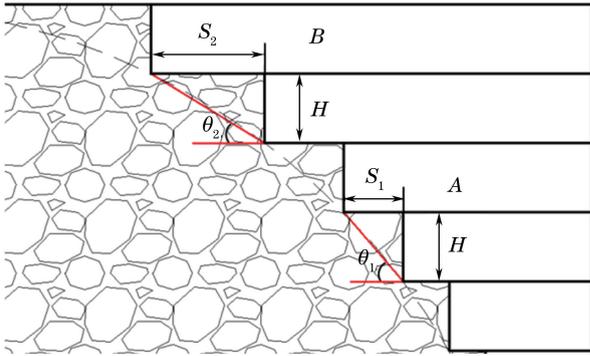


图 5 悬垂圆孔结构台阶效应示意图

Fig. 5 Schematic of step effect in overhanging round hole structure

4.2 激光功率对悬垂圆孔曲面成形质量的影响

不同功率下成形圆孔试样圆度和悬垂面最大塌陷量的测量结果分别如图 6 和图 7 所示。当激光功率为 120 W 时,圆孔圆度为 0.167 mm,第 II 和第 III 部分的最大塌陷量分别为 0.25 mm 和 0.17 mm,随着功率的增大,圆度值和最大塌陷量均逐渐增大;当激光功率增大到 240 W 时,圆孔圆度为 0.381 mm,第 II 和第 III 部分最大塌陷量分别为 0.8 mm 和 0.54 mm。分析认为,随着激光功率的增大,激光穿透深度变大,导致悬垂面底层更多的粉末被熔化。同时,悬垂面成形时熔池热量主要通过粉末传递,在室温条件下,厚度为 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 的金属粉末的有效热导率通常为 $0.1\sim 0.2\ \text{W}\cdot\text{mK}^{-1}$,仅为实体热导率的 $10^{-2}\sim 10^{-3}$ [13]。热量得不到及时扩散,容易产生热积聚,粉末熔化量增加,形成粘稠态熔池并沉入粉床中,导致悬垂面塌陷和粉末粘附,影响圆孔成形精度。

比较不同激光功率条件下成形圆孔第 II 部分的悬垂表面形貌,如图 8 所示,第 1 列为侧面形貌图,可以看出,第 II 部分悬垂面出现塌陷熔池(黄色虚线)和颗粒粘附(红色虚线)。当激光功率较小时,熔

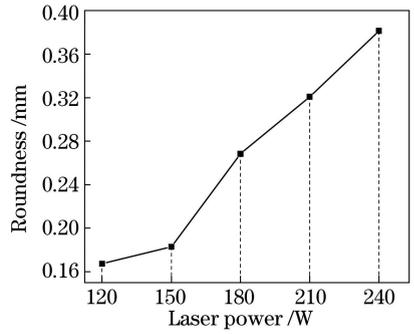


图 6 悬垂圆孔圆度随激光功率的变化
Fig. 6 Roundness of overhanging round hole versus laser power

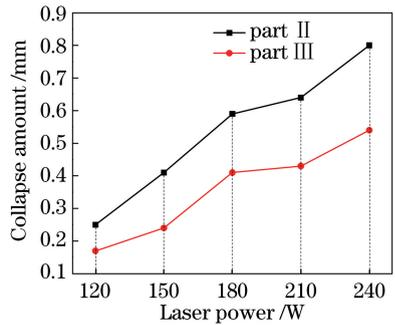


图 7 圆孔悬垂面塌陷量随激光功率的变化
Fig. 7 Collapse amount on overhanging surface of round hole versus laser power

池粘度大、尺寸小,熔池陷入粉层中的深度小,表面主要以粘附的粉末颗粒为主,如图 8(a)和图 8(c)所示。随着激光功率的增大,悬垂面底层更多的粉末获得高于熔点的能量,熔池温度高,粘度小,在重力和毛细管力作用下容易渗入松散的粉层中,悬垂面悬挂有大量细而长的熔池,熔池表面粘有粉末颗粒。同时,随着熔池尺寸的变大,在表面张力的作用下,为获得最小表面能,长尺寸熔池断裂球化成一个球状熔滴,并被大量的未熔粉末包裹[14],如图 8(e)、(g)、(i)中红色虚线所示。图 8 第 2 列为正面形貌图,在 120 W 和 150 W 较小的激光功率下,曲面粘附颗粒偏小,尺寸大小相对较均匀,当激光功率增大到 210 W 和 240 W 时,圆孔第 II 部分表面粘附的大尺寸团聚颗粒增多,严重影响悬垂面的成形质量,如图 8(f)、(h)、(j)所示。

4.3 扫描策略对悬垂圆孔曲面成形质量的影响

图 9 所示为不同扫描线角度下悬垂圆孔试件第 II 和第 III 部分表面粗糙度的测量结果,可以看出,第 II 部分悬垂面的表面粗糙度随着扫描线角度的增大而逐渐增大,其 R_a 值以及 R_z 值(即表面微观不平度十点高度)由 0° 时的 $21.859\ \mu\text{m}$ 和 $107.47\ \mu\text{m}$ 增

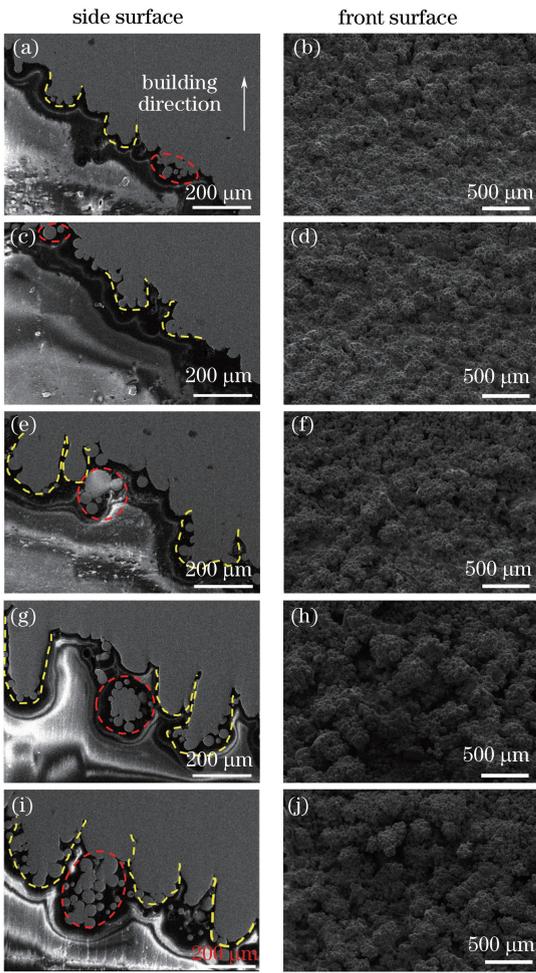


图 8 不同激光功率下悬垂圆孔第 II 部分表面形貌的 SEM 图。(a)(b) 120 W; (c)(d) 150 W; (e)(f) 180 W; (g)(h) 210 W; (i)(j) 240 W
 Fig. 8 SEM images of surface morphologies in part II of overhanging holes under different laser powers. (a)(b) 120 W; (c)(d) 150 W; (e)(f) 180 W; (g)(h) 210 W; (i)(j) 240 W

大到了 90° 时的 $27.53 \mu\text{m}$ 和 $123.46 \mu\text{m}$ 。而第 III 部分悬垂面的 R_a 值和 R_z 值在 0° 时最大, 分别为 $37.66 \mu\text{m}$ 和 $217.56 \mu\text{m}$, 当扫描线角度在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 变化区间内时, R_a 值以及 R_z 值变化不大, 分别在 $18 \mu\text{m}$ 和 $90 \mu\text{m}$ 左右。

在相同的成形条件下, 圆孔第 II、III 部分的表面质量变化趋势有所不同, 这与激光在这两个区域的扫描策略有重要的关系。图 10 所示为系统默认 45° 激光扫描示意图, 激光在扫描第 III 部分悬垂面时, 熔道始末端都集中在轮廓边缘部位, 悬垂面是熔体与底层粉末相互作用的结果, 如图 10(a) 所示。不同于第 III 部分, 第 II 部分悬垂面主要是由每个扫描平面的边缘线层层堆叠而成, 而在每个扫描平面内, 边

缘线由熔道的始末端搭接形成, 如图 10(b) 所示, 故悬垂面主要是熔道端部与底层粉末作用的结果。这种现象在图 7 中也有表现, 在相同激光功率条件下, 第 II 部分悬垂面最大塌陷量明显大于第 III 部分的。研究认为, 在扫描轨迹开始端, 激光入射点四周都是粉末材料, 大量粉末被吸引到熔池中, 熔池尺寸变大。同时, 激光头在扫描轨迹的始端和末端会出现加速和减速, 导致该区域扫描速度小于正常扫描速度, 激光停留时间变长, 更多的能量被施加到熔道的端部^[15]。当熔道的始末端出现在悬垂面边缘线时, 由于熔道底部是粉末材料, 容易出现能量集聚导致局部过热, 熔池陷入粉层中的深度加大, 形成大量的粉末颗粒团聚, 进而降低了尺寸精度和表面质量。

当扫描线角度为 0° 时, 激光扫描方向平行于悬垂面边缘线, 熔道端部都集中于非悬垂面, 第 II 部分悬垂表面主要由每道熔体逐渐相互搭接形成, 激光扫描速度稳定, 输入能量密度均匀, 陷入粉层中的熔池量少, 表面主要以熔池粘附的粉末为主。但在成形第 III 部分悬垂面时, 由于水平悬垂长度过大 (1 mm), 粉层支撑面积过大, 导致悬垂面塌陷, 因此 0° 扫描线成形圆孔第 III 部分悬垂面的表面质量较差, 而第 II 部分悬垂面成形质量好。当扫描线与悬垂面边缘线角度从 30° 增大到 90° , 更多的熔道始末端停留在悬垂面边缘线上, 导致圆孔第 II 部分悬垂面成形质量变差。而在成形第 III 部分悬垂面时, 水平悬垂长度是一个逐渐增大的过程, 熔池塌陷量小, 使得 $30^\circ \sim 90^\circ$ 扫描线成形第 III 部分悬垂面的表面质量较好且未出现太大的差别。从以上分析可知, 为获得好的成形表面, SLM 成形非水平悬垂面时, 宜采用平行于悬垂面边缘线的扫描线, 而在成形水平悬垂面时宜采用与悬垂面边缘线成一定角度的激光扫描路径。

4.4 轮廓扫描次数对悬垂圆孔曲面成形质量的影响

图 11 所示为圆孔内表面不同区域表面粗糙度随轮廓扫描次数的变化关系, 可以看出, 圆孔第 I 部分表面质量最好, R_a 均值约为 $11 \mu\text{m}$, 且几乎不受轮廓扫描次数的影响。第 II 部分表面质量最差, 表面 R_a 值从轮廓扫描一次的 $29.47 \mu\text{m}$ 减小到轮廓扫描三次的 $21.51 \mu\text{m}$, 优化效果达 27%。随着轮廓扫描次数的增大, 第 III 部分表面粗糙度值有少量减小。

圆孔第 I 部分表面主要是指圆孔内部非悬垂表面, 表面法向量与成形方向一致, 在加工该区域表面时, 熔池支撑部分为上一沉积层, 导热性好, 熔池稳定性高, 成形质量好, 轮廓重熔对其表面质量影响不

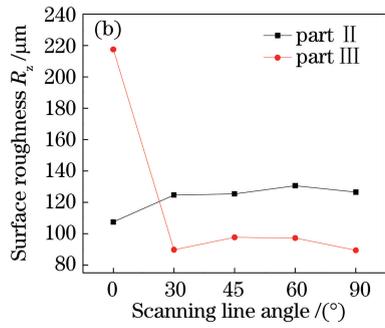
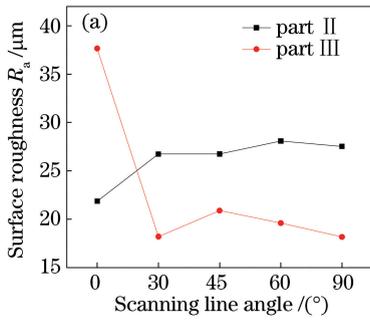


图 9 SLM 成形圆孔悬垂表面粗糙度。(a) R_a ; (b) R_z

Fig. 9 Overhanging surface roughness of round holes formed by SLM. (a) R_a ; (b) R_z

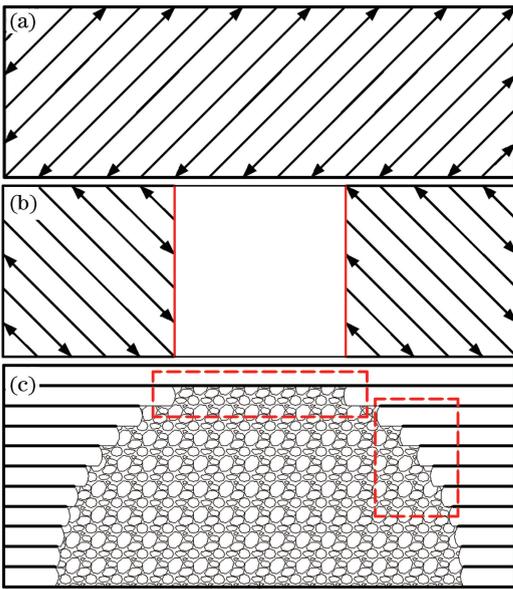


图 10 (a) 悬垂圆孔第 III 部分激光扫描轨迹;
(b) 悬垂圆孔第 II 部分激光扫描轨迹;
(c) 悬垂圆孔侧面成形示意图

Fig. 10 (a) Laser scanning trajectory in part III of overhanging hole; (b) laser scanning trajectory in part II of overhanging hole; (c) schematic of forming of overhanging round hole side

大。第 III 部分是圆孔悬垂面最后层,在默认的 45° 扫描线条件下,成形表面主要是熔体与底层粉末作用的结果,因此轮廓重熔主要影响该区域边缘部分的表面质量,而不会对中间部分产生影响。第 II 部分主要是熔道始末端堆叠成形悬垂面,轮廓多次扫描后,熔道始末端被重新熔化并形成熔池,降低了该区域表面粗糙度。圆孔第 II、III 部分悬垂表面形貌如图 12 所示,可以发现,圆孔第 III 部分悬垂表面粘附大量小尺寸粉末颗粒,且轮廓扫描次数对悬垂表面形貌的影响有限。在轮廓扫描一次条件下,大尺寸团聚颗粒粘附于圆孔第 II 部分悬垂表面,如图 12(a)。当轮廓扫描次数增大到 3 时,颗粒尺寸

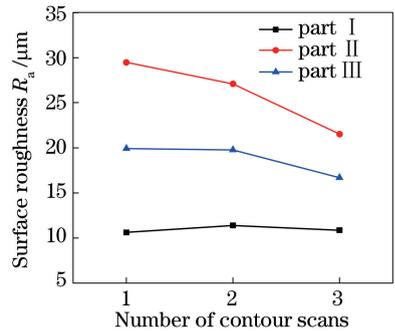


图 11 轮廓扫描次数对 SLM 成形圆孔内表面不同区域的影响

Fig. 11 Effect of number of contour scans on different areas of inner surface of overhanging round hole formed by SLM

明显减小,第 II、III 部分悬垂表面形貌差别减小,如图 12(c)。这说明轮廓重熔能够提高圆孔第 II 部分悬垂表面的成形质量。

5 结 论

以倾斜角度连续变化的悬垂圆孔结构为研究对象,研究了激光功率、扫描线角度以及轮廓扫描次数这三个工艺参数对圆孔悬垂部分成形质量的影响,得到以下结论。

1) 激光功率对 SLM 成形圆孔悬垂面质量的影响显著,随着激光功率的增大,悬垂圆孔圆度值增大,悬垂面变形塌陷量增大,成形精度下降。当激光功率过大时,悬垂面悬挂有细而长的熔池,部分断裂球化成球状熔滴,并被大量粉末颗粒包裹,严重影响悬垂表面的成形质量。

2) 为获得好的成形表面,SLM 成形非水平悬垂面时宜采用平行于悬垂面边缘线的扫描线,而在成形水平悬垂面时宜采用与悬垂面边缘线成一定角度的激光扫描路径。

3) 增加轮廓扫描次数能够有效改善 SLM 成形

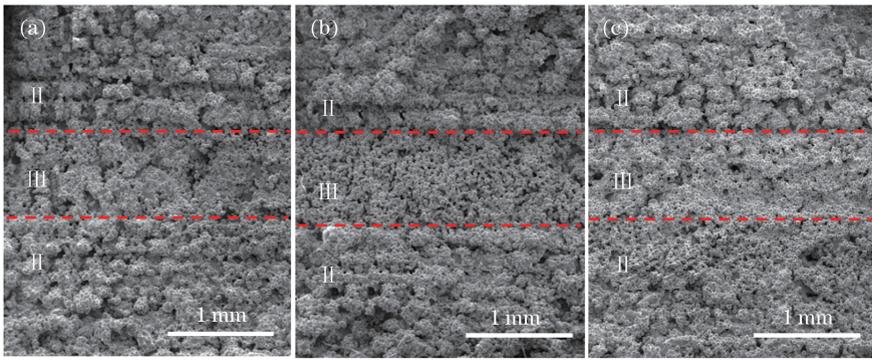


图 12 不同轮廓扫描次数下 SLM 成形圆孔第 II、III 部分的表面形貌。(a) 1; (b) 2; (c) 3

Fig. 12 Surface morphologies of part II and part III of overhanging round hole formed by SLM. (a) 1; (b) 2; (c) 3

圆孔悬垂面的表面质量,在设置的扫描次数范围内,轮廓扫描次数越大,优化效果越明显。

该研究结果为 SLM 成形悬垂结构提供了工艺参考。在此基础上,后期将重点关注多种工艺参数对悬垂结构的综合影响规律,以获得更优化的参数组合。

参 考 文 献

[1] Liu J H, Zhu H H, Hu Z H, *et al.* Control of elevated edges in selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202007.
 刘家赫, 朱海红, 胡志恒, 等. 激光选区熔化成形边缘堆高研究及控制[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202007.

[2] Craeghs T. A monitoring system for on-line control of selective laser melting[D]. Belgium: Catholic University of Leuven, 2012.

[3] Mertens R, Clijsters S, Kempen K, *et al.* Optimization of scan strategies in selective laser melting of aluminum parts with downfacing areas[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2014, 136(6): 061012.

[4] Clijsters S, Craeghs T, Kruth J. A priori process parameter adjustment for SLM process optimization [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2012: 553-560.

[5] Kempen K. Dimensional accuracy of internal channels in SLM produced parts[C]. ASPE Spring Topical meeting, 2014.

[6] Pakkanen J, Calignano F, Trevisan F, *et al.* Study of internal channel surface roughnesses manufactured by selective laser melting in aluminum and titanium alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(8): 3837-3844.

[7] Thomas D. The development of design rules for selective laser melting[D]. Cardiff: University of

Wales, 2009.

[8] Liu T T, Zhang C D, Liao W H, *et al.* Experimental analysis of pool behavior in overhang structure fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202004.
 刘婷婷, 张长东, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形悬垂结构熔池行为试验分析[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202004.

[9] Yang X W, Yang Y Q, Liu Y, *et al.* Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303004.
 杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303004.

[10] Wang D, Mai S Z, Xiao D M, *et al.* Surface quality of the curved overhanging structure manufactured from 316-L stainless steel by SLM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1/2/3/4): 781-792.

[11] Yang Y Q, Lu J B, Wang D, *et al.* A study of 316L stainless steel non-horizontal overhanging surface in selective laser melting[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(6): 94-99.
 杨永强, 卢建斌, 王迪, 等. 316L 不锈钢选区激光熔化成型非水平悬垂面研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(6): 94-99.

[12] Mai S Z, Yang Y Q, Wang D. Study on surface morphology and roughness variation of NiCr alloy curved surface manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1203004.
 麦淑珍, 杨永强, 王迪. 激光选区熔化成型 NiCr 合金曲面表面形貌及粗糙度变化规律研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203004.

[13] 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): 024905.
- [14] Zhang K, Liu T T, Zhang C D, *et al.* Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0903007.
张凯, 刘婷婷, 张长东, 等. 基于熔池数据分析的激光选区熔化成形件翘曲变形行为研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903007.
- [15] Cloots M, Zumofen L, Spierings A B, *et al.* Approaches to minimize overhang angles of SLM parts[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(2): 362-369.