

# 激光选区熔化成形边缘堆高控制

刘家赫<sup>1</sup>, 朱海红<sup>1</sup>, 胡志恒<sup>1</sup>, 柯林达<sup>2</sup>, 曾晓雁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>上海航天精密机械研究所, 上海 201600

**摘要** 激光选区熔化(SLM)成形中,常产生边缘位置高于内表面即边缘堆高现象,边缘堆高将会对 SLM 成形过程产生不良影响。理论分析了 SLM 成形中边缘堆高的产生机制,提出了轮廓-实体和边缘重熔两种控制方法。进一步研究了这两种控制方法下工艺参数,如边缘宽度、边框厚度、扫描速度和激光功率,对堆高高度的影响。结果表明:两种方法均能有效地消除边缘堆高。对于轮廓-实体控制方法,堆高高度随扫描速度的增大而减小,随激光功率的升高而增大,轮廓间距对边缘堆高无影响;对于边缘重熔控制方法,堆高高度随扫描速度的增大而减小,随激光功率的升高而增大,随边框厚度的增大而增大。

**关键词** 激光光学; 激光选区熔化; 边缘堆高; 堆高高度; 控制方法; 工艺区间

**中图分类号** TG146.2+1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.1202007

## Control of Elevated Edge in Selective Laser Melt Molding

Liu Jiahe<sup>1</sup>, Zhu Haihong<sup>1</sup>, Hu Zhiheng<sup>1</sup>, Ke Linda<sup>2</sup>, Zeng Xiaoyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup>Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China

**Abstract** In selective laser melt (SLM) molding process, the edge position is usually higher than the inner surface, which is also called elevated edge phenomenon. Elevated edge has bad effects on SLM molding process. We theoretically analyze the production mechanism of elevated edge in SLM molding process, and propose a contour-entity control method and an edge remelting control method. Effects of processing parameters on edge height are studied. Processing parameters include contour spacing, border thickness, scanning speed and laser power. Results show that these methods can effectively reduce the elevated edge. For the contour-entity control method, the height of elevated edge decreases with the increase of scanning speed, increases with the increase of laser power, and is not susceptible to contour spacing. For the edge remelting method, edge height decreases with the increase of scanning speed, and increases with the increase of laser power and contour thickness.

**Key words** laser optics; selective laser melt; elevated edge; edge height; control method; process interval

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900

## 1 引言

激光增材制造(LAM)技术是一种新型成型工艺,近年来迅速发展<sup>[1]</sup>。该技术基于离散/叠加的原理,以计算机辅助设计(CAD)建模为基础,将三维 CAD 模型进行切片分层处理,以高能量激光束为热源,将材料

**收稿日期:** 2017-07-09; **收到修改稿日期:** 2017-08-28

**基金项目:** 国家安全重大基础研究(613281)、国家自然科学基金(61575074)、华中科技大学院系自主创新研究基金(2016YXZD005)

**作者简介:** 刘家赫(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光选区熔化、激光材料加工制造方面的研究。

E-mail: liujh118@gmail.com

**导师简介:** 朱海红(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光增材制造、激光与材料相互作用方面的研究。

E-mail: zhuhh@hust.edu.cn(通信联系人)

通过熔融烧结或熔化凝固的方式逐层堆积成高精度<sup>[2]</sup>、高性能<sup>[3-4]</sup>、近乎全致密的三维金属零件<sup>[5]</sup>。与传统的材料去除成形技术相比,LAM 技术可节约材料,缩短生产周期,降低成本,适用于制造结构复杂的金属零件<sup>[6]</sup>。目前,用于高性能金属零件的 LAM 技术主要有基于送粉的激光沉积制造(DLF)技术以及基于铺粉的激光选区熔化成形(SLM)技术。与 DLF 技术相比,SLM 技术采用细微聚焦光斑进行高速扫描,成形零件的强度大、精度高、表面质量好<sup>[7]</sup>,但成形结构更为复杂,在生物医疗、航空航天等领域具有广泛的应用前景<sup>[8-10]</sup>。

SLM 技术较传统制造技术有很多优点<sup>[11-13]</sup>。然而在成形过程中,边缘位置与内部成形时的热累积和导热环境不同,导致各成形层存在边缘明显高于内表面的现象,即边缘堆高。通过层层叠加,边缘堆高的高度不断累积,导致边缘与内表面之间的高度差不断增大,影响刮刀的正常行进,甚至损坏刮刀表面,导致铺粉质量下降,从而降低各成形层的表面质量与成形实体的致密度和性能<sup>[14]</sup>。更严重时,刮刀断裂直接导致成形失败,极大地降低刮刀的使用寿命和零件的成形率。因此,对 SLM 成形时的边缘堆高的研究很有必要。

目前,关于 SLM 边缘堆高问题的研究鲜有文献报道。Craeghs 等<sup>[15]</sup>认为边缘堆高由单一因素引起,即边缘位置和内表面成形时的导热环境不同。在各成形层中,首道成形时,熔道两侧均为粉体,热量只能向下部实体传导,导热环境差,使得首道形成大而高的熔道;其他道次成形时熔道一侧为粉体,另一侧为实体,导热相对较强,形成的熔道高度相对较低。Yasa 等<sup>[16]</sup>采用直线光栅成形块体,研究了工艺参数与扫描策略对边缘堆高的影响。研究发现:边缘堆高随扫描速度的增大而增高;当扫描速度较大时,激光功率对边缘堆高的影响并不显著;当扫描速度较小时,边缘堆高随着激光功率的升高而增高。改变工艺参数虽然能够改善边缘堆高,但不能兼顾块体的致密度。同时,研究人员还发现采用分区扫描对边缘堆高的影响不大;轮廓扫描使得边缘堆高更为显著;渐变式激光功率扫描能够改善边缘堆高但无法兼顾成形块体的致密度。

目前来讲,SLM 成形过程中边缘堆高的产生机制尚不明确,本文对如何在致密成形的同时改善并控制边缘堆高的方法进行研究。

## 2 实验装备及方法

### 2.1 实验装备

实验采用华中科技大学自主研发的 SLM 300 型 SLM 设备<sup>[17]</sup>,该设备由一台 IPG YLR-500 型光纤激光器(波长为 1064 nm,最大输出功率为 500 W)及光路传输系统、自动送粉系统、成型室、计算机控制系统等部分组成。整个加工过程采用氩气作为保护气体<sup>[18-19]</sup>。

采用气雾化 Inconel 718 合金球形粉末作为实验材料,其扫描电子显微镜(SEM)图如图 1 所示,粉末的化学成分如表 1 所示。粉末粒径范围为 10~74  $\mu\text{m}$ ,平均粒径为 33.2  $\mu\text{m}$ 。采用尺寸为 250 mm $\times$ 250 mm $\times$ 80 mm 的不锈钢板作为基板。激光经聚焦后,光斑大小为 100  $\mu\text{m}$ 。

实验固定铺粉层厚度为 40  $\mu\text{m}$ ,扫描间距为 110  $\mu\text{m}$ 。成形块体尺寸为 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 3 mm。

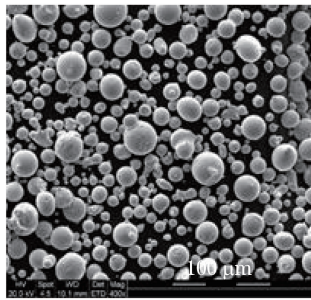


图 1 Inconel 718 粉末的 SEM 图

Fig. 1 SEM image of Inconel 718 powder

### 2.2 测试方法

采用激光共聚焦显微镜对成形试样进行拍摄和测量<sup>[20-21]</sup>。激光共聚焦显微镜采用非接触测量方式,测量精度高,可在普通的环境下进行表面分析。图 2(a)为试样边缘位置的高度云图。

表 1 Inconel 718 粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of Inconel 718 powder

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	Co	Cu	Fe
Mass fraction /%	0.030	0.050	0.040	19.310	52.380	3.080	4.990	0.880	0.496	0.110	0.060	Balance

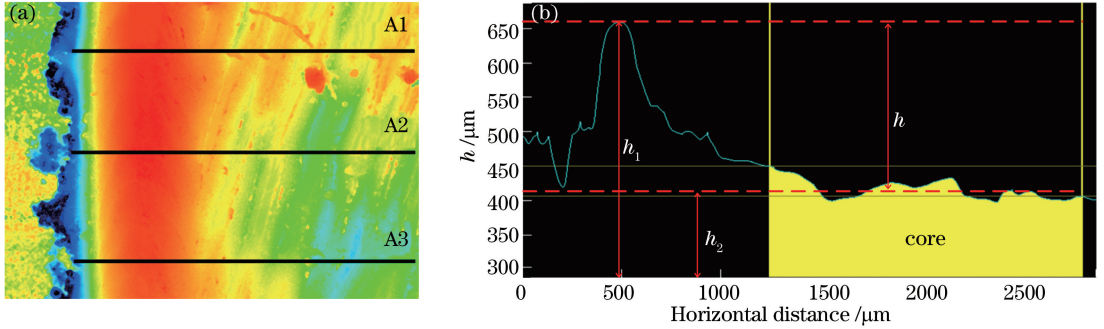


图 2 测量结果。(a)高度云图;(b)高度曲线

Fig. 2 Measurement results. (a) Cloud-picture of height; (b) height curve

定义试样边缘位置与内表面的高度差值为堆高高度  $h$ 。测量方法如图 2(a)所示,首先在高度云图中选取 A1、A2、A3 三条水平线,得到如图 2(b)所示的高度曲线,黄色区域为内表面取值区域。堆高高度  $h$  可表示为

$$h = h_1 - h_2, \quad (1)$$

式中  $h_1$  为边缘位置最高点高度,  $h_2$  为内表面平均高度。

最终将 3 条水平线计算结果的平均值作为该试样的堆高高度。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 堆高现象及其形成机制

采用激光功率  $P=350 \text{ W}$ 、扫描速度  $v=0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的工艺参数形成单层单道和单层多道。可以发现两种明显的堆高现象:

1) 激光起始位置堆高。在 SLM 成形中,无论是单层单道还是单层多道,均可以看到激光起始位置堆高高高于内表面部位。图 3(a)为典型单层单道的高度云图,可以看到单层单道起始位置明显高于中间部位。图 3(b)为熔道长度方向熔池高度的变化曲线,0 点为熔道起点。由图 3(b)可见,单层单道起始位置形成较大熔池且高度明显较高,之后熔池趋于稳定且高度明显低于起始位置熔池。测量得到此单层单道堆高的高度为  $70 \mu\text{m}$ 。

2) 首道堆高。在 SLM 成形中还发现首道的高度大于其他熔道。图 4(a)为单层多道的高度云图和高度曲线。从图 4(a)可以看到,单层多道中首道熔道的高度明显高于其他熔道。通过测量各道熔道高度可得到图 4(b)所示的曲线,熔道高度从第 3 道开始趋于稳定,且稳定在  $65 \mu\text{m}$  左右,首道熔池比稳定高度的熔道高约  $51 \mu\text{m}$ 。

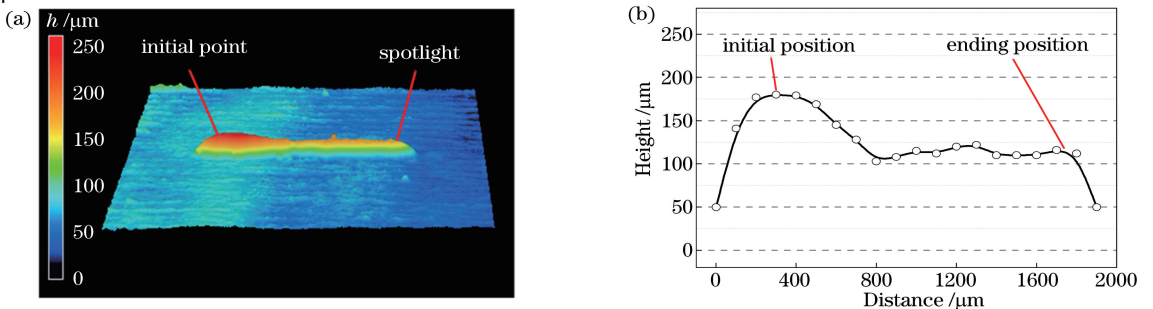


图 3 单层单道。(a)高度云图;(b)熔池高度曲线

Fig. 3 Single layer single track. (a) Cloud-picture of height; (b) height curve of molten pool

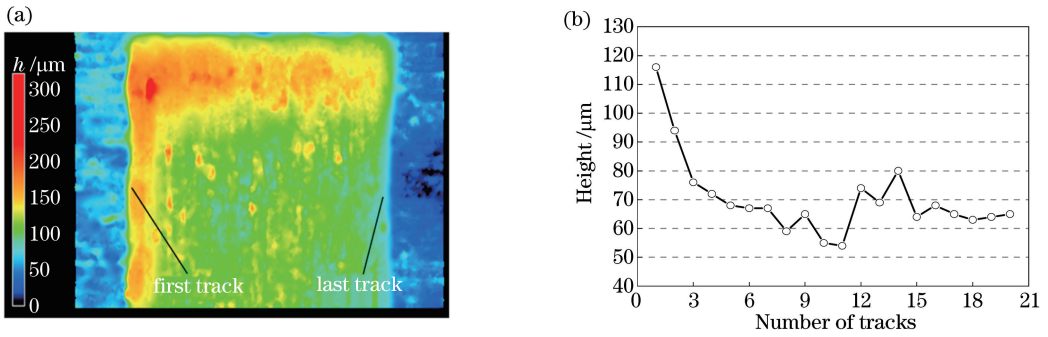


图 4 单层多道。(a)高度云图;(b)高度曲线

Fig. 4 Single layer multi tracks. (a) Cloud-picture of height; (b) height curve

激光起点堆高主要由以下两个原因造成:1)激光起点成形时熔池四周均为粉末,相比于熔道中部和尾部区域,其导热环境差,粉末熔化量多,从而使得激光起点形成较大熔池;2)激光光斑能量的高斯分布使得熔池内部存在明显的温度梯度<sup>[22]</sup>,从而形成强烈的 Marangoni 对流<sup>[23-24]</sup>。如图 5 所示,SLM 成形中熔池中心温度最高,头部次之,尾部最低,金属熔体总是向温度较低的方向流动,因此金属熔体向着与熔池运动相反的方向流动。粉末熔化量的增多和液相流动方向使得起点形成较高的熔池<sup>[25-27]</sup>。

造成首道熔道堆高的原因包括:1)首道成形时,无热累积或者热累积较小,熔池存在时间短<sup>[28]</sup>,使得金属熔体流动不充分,从而形成较高的熔道,热累积使得后续熔道的熔池存在时间长,液体金属能够充分流动和铺展,形成高度低于首道的熔道;2)与后续熔道相比,首道成形时两侧均为金属粉末,其热导率远小于实体,金属粉末熔化量较多,凝固时获得大而高的熔道,造成堆高高度较高<sup>[29-30]</sup>。若仅通过加大首道熔池的激光输入能量,则会进一步增加熔池高度,从而增加边缘高度。成形时边缘位置布满激光起点和首道熔道,使得 SLM 成形产生严重的边缘堆高现象。

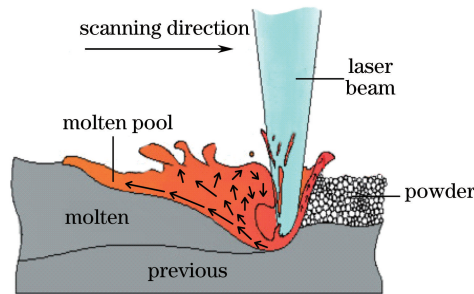


图 5 Marangoni 对流示意图

Fig. 5 Diagram of Marangoni convection

### 3.2 控制方法研究

由图 4 可见:SLM 成形过程中,激光起点和首道熔道高于内表面,表现为边缘堆高。SLM 成形的层层叠加,使得边缘堆高不断增加。当边缘位置高度增加到一定值时,将对成形过程及成形质量产生严重影响,因此必须对边缘位置进行控制。这里采用两种方法对边缘位置进行控制:

1) 轮廓-实体控制方法,如图 6 所示。采用两道轮廓结合实体的成形方式,轮廓 1、轮廓 2 与中心之间的间距称为轮廓间距,大小为  $w$ 。扫描顺序依次为:轮廓 1、轮廓 2、中心。轮廓的扫描采用薄壁墙的扫描方式,实体的扫描则采用直线光栅的扫描方式,最终成形块体长宽均为  $D$ 。此控制方法建立的理论依据为轮廓-实体控制方法将各成形层拆分成了轮廓和中心两部分。由于粉末导热率远小于实体,若不采取任何控制方法,边缘位置成形时两侧均为粉末,导热环境差,粉末熔化量多,形成的熔池大而高;若轮廓先于中心成形,则边缘位置一侧变为实体,与内部成形环境完全相同。此外,对于轮廓成形,可采用低能量输入的方法减小堆高。粉末颗粒之间的气体是致使导热率降低的主要原因,气体导热系数随温度的升高而增大<sup>[31-32]</sup>。预先扫描边缘轮廓,边缘粉末间气体被加热,导热系数增大。因此在轮廓-实体控制方法中,通过改变边缘位置的成形环境,可提升导热性能并改善边缘堆高。

2) 边缘重熔控制方法,如图 7 所示。先对中心成形,然后对堆高的边缘进行重熔,并将其铺平,减小高度,从而改善堆高现象。重熔边框厚度为  $b$ ,扫描顺序依次为:中心、重熔边框。二者均采用直线光栅的扫描方式,最终成形块体的长宽均为  $C$ 。

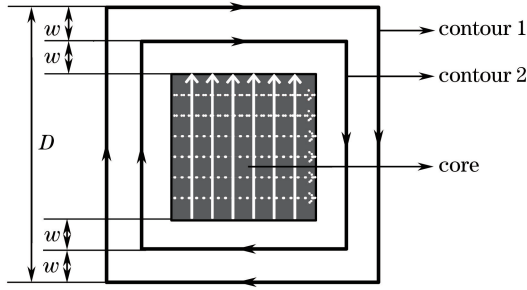


图 6 轮廓-实体示意图

Fig. 6 Schematic of contour-entity

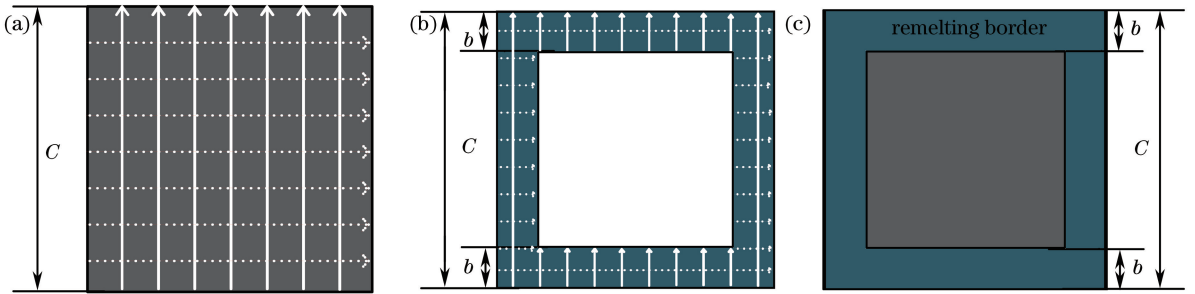


图 7 边缘重熔示意图。(a)中心;(b)重熔边框;(c)单层成形形貌

Fig. 7 Schematic of edge remelting. (a) Core; (b) remelting border; (c) forming morphology of single layer

两种控制方法仅对成形块体的边缘位置进行处理,中心部分采用已经优化的工艺参数成形,因此在改善边缘堆高的同时,兼顾了块体成形的致密性。通过设置不同的工艺参数,研究边缘堆高的控制方法。工艺参数如表 2 所示,表中  $P$  为激光功率, $v$  为扫描速度, $w$  为轮廓间距, $A$  为相位角。

表 2 工艺参数

Table 2 Process parameters

	No.	$P / W$	$v / (m \cdot s^{-1})$	$w / \mu m$	$A / (^{\circ})$
Core	1	350	1.0	60,80,100	105
	2				90
Contour 1/2	1	2	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5	80	90
	150	350			
Remelting border	1	2	0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0	100,200,300	90
	250	450			

采用与中心相同的工艺参数成形一个相同尺寸的块体,称之为无控制试样,并将其作为衡量边缘堆高改善程度的标准。

轮廓-实体控制方法采用激光功率  $P=150\text{ W}$ 、扫描速度  $v$  的变化范围为  $0.5\sim 2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、扫描间距  $w=60\sim 100\ \mu\text{m}$  的工艺参数,得到不同轮廓间距下堆高高度随扫描速度的变化曲线,如图 8 所示。从图 8 可以看出,堆高高度随扫描速度的增大呈近乎正比下降趋势;当扫描速度很小时,边缘高度甚至大于无控制试样,随着扫描速度的增大,堆高高度逐渐降低,当扫描速度进一步增大,堆高高度甚至为负值,意味着中心高度大于轮廓高度。这是因为随着扫描速度的增大,粉末吸收的激光能量减少,熔化的金属粉末减少,熔池变小,使得轮廓高度随之减小。从图 8 中还可以发现,3 条曲线之间不存在明显差异,从而可判定轮廓间距对堆高高度几乎没有影响。轮廓先成形,增强了中心导热并减少了中心部位激光起点的粉末熔化量,使得堆高高度大大减少。

固定扫描间距  $w = 80 \mu\text{m}$ 、激光功率  $P$  为 150 W 和 350 W、扫描速度  $v$  的变化范围为  $0.5 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,得到不同功率下堆高高度随扫描速度的变化曲线,如图 9 所示。由图 9 可见,扫描速度相同时,激光功率越大,堆高高度越大。 $P = 350 \text{ W}$  时,无论采用何种扫描速度,其堆高高度均比无控制试样大,说明采用高功率激光是无法减小堆高高度的。

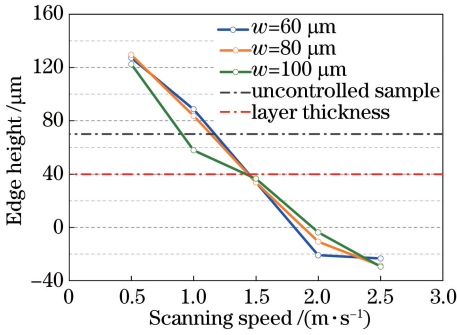


图 8 固定激光功率为 150 W 时不同轮廓间距下堆高高度随扫描速度的变化

Fig. 8 Variation in elevated edge height with scanning speed under different contour spacings at fixed laser power of 150 W

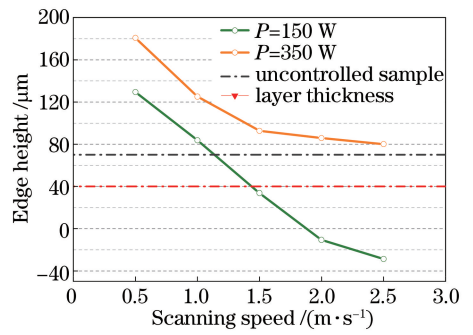


图 9 固定轮廓间距为  $80 \mu\text{m}$  时不同激光功率下堆高高度随扫描速度的变化

Fig. 9 Elevated edge height versus scanning speed under different laser powers at fixed contour spacing of  $80 \mu\text{m}$

SLM 形成一层之后,将堆高高度控制在一个层厚以下,可消除边缘堆高对铺粉和成形的影响。由上述实验结果可知,在轮廓-实体的控制方法中,采用低功率、大扫描速度能够有效改善甚至消除边缘堆高现象。当  $P = 350 \text{ W}$  时,堆高高度全部大于一个层厚,因此无法改善边缘堆高现象;当  $P = 150 \text{ W}$ 、 $v \geq 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时堆高高度小于一个层厚,均可以实现良好的铺粉。

边缘重熔控制方法采用  $P = 250 \text{ W}$ 、 $v = 0.5 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $b = 100 \sim 300 \mu\text{m}$  的工艺参数,得到不同边框厚度下堆高高度随扫描速度的变化曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,堆高高度随扫描速度的增大而减小,且逐渐趋于稳定,这是由于边缘重熔过程中,不仅存在对边缘位置重熔的平铺过程,还会有部分边缘粉末被熔化,从而增加堆高高度。输入的能量越大,被熔化的边缘粉末越多,因此堆高高度随扫描速度的变化表现为上述变化规律。从图中还可以发现,3 条曲线的变化规律相同,但当扫描速度相同时,堆高高度随着边框厚度的增大而增大。因为当边框厚度增大时,重熔面积增大,使热累积增多,导致重熔时边缘粉末熔化量增加,最终使堆高高度增大。实验采用的激光光斑大小约为  $100 \mu\text{m}$ ,若继续减小边框厚度则失去意义,因此边框厚度最小限定为  $100 \mu\text{m}$ 。

采用  $b = 200 \mu\text{m}$ 、 $P$  为 250 W 和 450 W、 $v$  的变化范围为  $0.5 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的工艺参数,得到不同功率下堆高高度随扫描速度的变化曲线如图 11 所示。由图 11 可见,扫描速度相同时,堆高高度随激光功率的增大而增大。

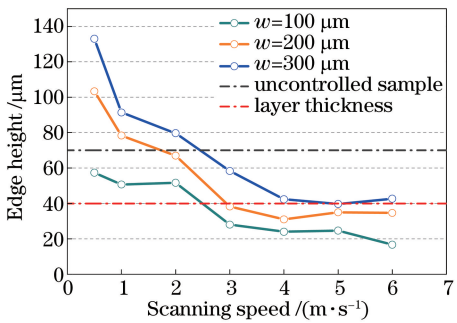


图 10 固定激光功率为 250 W 时不同边框厚度下堆高高度随扫描速度的变化

Fig. 10 Elevated edge height versus scanning speed under different border thicknesses at fixed laser power of 250 W

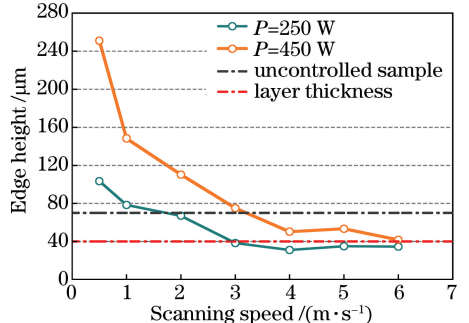


图 11 固定边框厚度为  $200 \mu\text{m}$  时不同激光功率下堆高高度随扫描速度的变化

Fig. 11 Elevated edge height versus scanning speed under different laser powers at fixed border thickness of  $200 \mu\text{m}$

由上述实验结果可知,在边缘重熔控制方法中,采用低功率高扫描速度和较小的边框厚度(最小为 $100\ \mu\text{m}$ )能够有效改善边缘堆高现象。由图 11 可知,当 $P=450\ \text{W}$ 时,堆高高度全部大于一个层厚,因此无法改善边缘堆高现象;由图 10 可知,当 $P=250\ \text{W}$ , $100\ \mu\text{m}\leq b\leq 200\ \mu\text{m}$ , $\nu>3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时堆高高度小于一个层,并在 $b=100\ \mu\text{m}$ , $\nu=6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时获得最小值,为 $17\ \mu\text{m}$ 。

## 4 结 论

SLM 成形中,边缘堆高的机制主要有两种。第一种是激光起点堆高,由于起点导热环境差,粉末熔化量较多,且在激光前行过程中金属熔体向熔池后部流动,形成较高的起点。第二种是首道堆高,其形成机制为首道扫描时,热累积最小,液相停留时间短,使得首道熔道来不及铺展,同时首道扫描时两侧均为粉末,粉末熔化量相对较多,从而形成高大的熔池;边缘位置布满激光起点和首道熔池,从而使得 SLM 成形产生严重的边缘堆高现象。

所提出的轮廓-实体和边缘重熔两种边缘堆高控制方法均可以有效控制边缘堆高。在轮廓-实体控制方法中,堆高高度随扫描速度的增大而减小,随激光功率的升高而增大,轮廓间距对堆高高度则无影响。选用 $P=150\ \text{W}$ , $\nu>1.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的工艺参数能有效改善甚至消除边缘堆高现象。在边缘重熔控制方法中,堆高高度随扫描速度的增大而减小,随激光功率的升高而增大,随边框厚度的增大而增大。选用 $P=250\ \text{W}$ , $100\ \mu\text{m}\leq b\leq 200\ \mu\text{m}$ , $\nu>3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的工艺参数能有效改善边缘堆高现象。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Zhihui, Wang Huaming, Liu Dong. Microstructure and mechanical properties of AF1410 ultra-high strength steel using laser additive manufacture technique[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0403001.  
王志会, 王华明, 刘栋. 激光增材制造 AF1410 超高强度钢组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403001.
- [2] Yang Xiongwen, Yang Yongqiang, Liu Yang, *et al.* Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J 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.
- [3] Zhang H, Zhu H H, Nie X J, *et al.* Effect of Zirconium addition on crack, microstructure and mechanical behavior of selective laser melted Al-Cu-Mg alloy[J]. Scripta Materialia, 2017, 134: 6-10.
- [4] Hu Z H, Zhu H H, Zhang H, *et al.* Experimental investigation on selective laser melting of 17-4PH stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 87: 17-25.
- [5] Zhang Hu, Nie Xiaojia, Zhu Haihong, *et al.* Study on high strength Al-Cu-Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0503007.  
张虎, 聂小佳, 朱海红, 等. 激光选区熔化成型高强 Al-Cu-Mg 合金研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503007.
- [6] Chen Hongyu, Gu Dongdong, Gu Ronghai, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of 5CrNi4Mo die steel parts by selective laser melting additive manufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0203003.  
陈洪宇, 顾冬冬, 顾荣海, 等. 5CrNi4Mo 模具钢选区激光熔化增材制造组织演变及力学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203003.
- [7] Chen Guangxia, Zeng Xiaoyan. Comparative research on direct laser fabrication and selective laser melting[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010, 5: 72-75.  
陈光霞, 曾晓雁. DLF 与 SLM 激光快速成型方法的比较研究[J]. 现代制造工程, 2010, 5: 72-75.
- [8] Yang Y Q, Lu J B, Luo Z Y, *et al.* Accuracy and density optimization in directly fabricating customized orthodontic production by selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(6): 482-489.
- [9] Tian Zongjun, Gu Dongdong, Shen Lida, *et al.* Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 480 (11): 36-42.  
田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 480 (11): 36-42.
- [10] Cruz M F, Borille A V. Decision methods application to compare conventional manufacturing process with metal additive manufacturing process in the aerospace industry[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(1): 177-193.

- [11] Yang Xiongwen. Study on dimensional accuracy of parts manufactured by selective laser melting and its application in manufacturing non-assembly mechanisms directly[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.  
杨雄文. 激光选区熔化成型件尺寸精度研究及在免组装机直接制造中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [12] Huang Wenpu, Yu Hanchen, Yin Jie, *et al.* Microstructure and mechanical properties of K4202 cast nickel base superalloy fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(9): 1089-1095.  
黄文普, 喻寒琛, 殷杰, 等. 激光选区熔化成形 K4202 镍基铸造高温合金的组织和性能[J]. *金属学报*, 2016, 52(9): 1089-1095.
- [13] Hou Huipeng, Liang Yongchao, He Yanli, *et al.* Microstructural evolution and tensile property of hastelloy-X alloys produced by selective laser melting[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(2): 0202007.  
侯慧鹏, 梁永朝, 何艳丽, 等. 选区激光熔化 Hastelloy-X 合金组织演变及拉伸性能[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0202007.
- [14] Zhao Jinyan, Zhang Yongzhi, Li Dongfang, *et al.* Properties study of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1103006.  
赵进炎, 张永志, 李东方, 等. 选区激光熔化钴铬合金的性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1103006.
- [15] Craeghs T, Clijsters S, Yasa E, *et al.* Determination of geometrical factors in layerwise laser melting using optical process monitoring[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49 (12): 1440-1446.
- [16] Yasa E, Deckers J, Craeghs T, *et al.* Investigation on occurrence of elevated edges in selective laser melting [C]. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2009: 180-192.
- [17] Yang J J, Han J, Yu H C, *et al.* Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 558-570.
- [18] Wang Di, Liu Ruicheng, Yang Yongqiang. Clearance design and process optimization of non-assembly mechanisms fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0203004.  
王迪, 刘睿诚, 杨永强. 激光选区熔化成型免组装机间隙设计及工艺优化[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0203004.
- [19] Mai Shuzhen, Yang Yongqiang, Wang Di. Study on surface morphology and roughness variation of NiCr alloy curved surface manufactured by selective laser melting[J]. *Chinese J 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.
- [20] Wang Zhiying, Rao Yuchun, Liu Min. Research of test sample pretreatment technology in confocal laser scanning microscopy[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(26): 10602-10603.  
王志颖, 饶玉春, 刘敏. 激光共聚焦显微镜的样品前处理技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(26): 10602-10603.
- [21] Ma Kang, Zhou Qingfeng, Shi Chuanxin, *et al.* The progress of confocal laser scanning microscope[J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(6): 30-35.  
马亢, 周庆峰, 施传信, 等. 激光共聚焦显微镜技术进展[J]. *农学学报*, 2016, 6(6): 30-35.
- [22] Li Jie. The analysis and research on the spot energy distribution and the center location of the laser[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.  
李洁. 激光光斑能量分布及中心定位的分析与研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [23] Jia Ziyang. Research of manufacturing micro-convex points on 45# steel surface by long pulse-width laser [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.  
贾子扬. 脉冲激光作用下45#钢表面微凸起形貌研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [24] Wang D, Wu S B, 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.
- [25] Fu Yonghong, Li Chengdong, Hua Xijun, *et al.* Study on friction and wear properties of the laser textured mold surface with micro-convex[J]. *Tribology*, 2009, 29(5): 475-480.  
符永宏, 李成冬, 华希俊, 等. 激光毛化微凸形模具钢表面摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(5): 475-480.
- [26] Lai Peng, Zhang Qingmao. Reviews and prospects of laser texturing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 53-59.  
赖鹏, 张庆茂. 激光毛化技术的评述及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 53-59.
- [27] Ye Xiaohu, Chen Xi. Simulation of the fluid flow and heat transfer in laser heating melt pool using a region-dividing method[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(9): 855-858.  
叶晓虎, 陈熙. 激光加热熔池流动和传热的分区数值模拟[J]. *中国激光*, 2002, 29(9): 855-858.



- [28] Yin J, Zhu H H, Ke L D, *et al.* A finite element model of thermal evolution in laser micro sintering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9/12): 1847-1859.
- [29] Yadroitsev I, Bertrand P, Antonenkova G, *et al.* Use of track/layer morphology to develop functional parts by selective laser melting[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(5): 052003.
- [30] Yadroitsev I, Smurov I. Surface morphology in selective laser melting of metal powders[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 264-270.
- [31] Zhang Jingzhou, Chang Haiping. Heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2009: 21-26.  
张靖周, 常海萍. 传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 21-26.
- [32] Sih S S, Barlow J W. Measurement and prediction of the thermal conductivity of powders at high temperatures[J]. Department of Chemical Engineering, 1994: 321-329.