

激光选区熔化成形悬垂结构熔池行为试验分析

刘婷婷 张长东* 廖文和 张凯 吴根丽

南京理工大学高端装备数字化设计制造研究中心, 江苏 南京 210094

摘要 采用 Z-型和岛式两种扫描策略,利用激光选区熔化(SLM)技术成形了具有不同悬垂角度的 Ti6Al4V 试件,研究了熔池行为与悬垂角度和成形质量之间的关系。结果表明,成形过程中,熔池面积先快速变大,达到峰值后,再随着成形高度的增加而缓慢减小。与面扫描相比,轮廓扫描时熔池明显不稳定,熔池面积振幅大。随着悬垂角度的减小,熔池面积变小,悬垂表面粗糙度变大。与 Z-型扫描方式相比,岛式扫描策略下熔池面积较小,熔池更为不稳定,且悬垂表面粗糙度高。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 悬垂角度; 扫描策略; 熔池行为; 成形质量

中图分类号 TN249; TF124

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1202004

Experimental Analysis of Pool Behavior in Overhang Structure Fabricated by Selective Laser Melting

Liu Tingting Zhang Changdong Liao Wenhe Zhang Kai Wu Genli

Advanced Equipment Digital Design and Manufacturing Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract With the Z-scan and Island-scan two schemes and selective laser melting (SLM) technology, Ti6Al4V specimens with different overhang angles are fabricated, and the relationships among molten pool behavior, overhang angle and forming quality are studied. The results show that, in the forming process, the molten pool area first increases sharply till arrives at a peak value, and then decreases slowly with the increment of fabrication height. Compared with that for the plane-scan scheme, the molten pool for the contour-scan scheme is more obviously instable and its area has a larger amplitude. With the decrement of overhang angle, the molten pool area becomes small and the overhang surface becomes rough. Compared with that for the Z-scan scheme, the molten pool area for the Island-scan scheme is smaller, the molten pool is more instable, and the overhang surface roughness is higher.

Key words laser technique; selective laser melting; overhang angle; scanning strategy; molten pool behavior; forming quality

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 350.2660

1 引言

激光选区熔化(SLM)技术作为近年来获得广泛关注与快速发展的主流增材制造技术^[1],具有成形精度高、组织致密、工序简单等优点。SLM 技术基于完全熔化机制^[2-3],理论上可以成形任意复杂金属零件。但在实际加工中,SLM 技术目前尚不能高质量地成形具有悬垂特征的零件,存在表面粗糙度高、易于产生翘曲变形等问题^[4]。

为了改善悬垂表面的成形质量,研究人员通常采用辅助支撑技术,即通过添加支撑来保证成形过程的稳定性,并采用去除支撑、表面打磨或者机械加工方法来保证悬垂面形状^[5]。Calignano^[6-7]等针对悬垂结构提

收稿日期: 2016-07-27; **收到修改稿日期:** 2016-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51375242)、江苏高校优势学科建设工程二期项目(高端装备与微纳器件设计制造)

作者简介: 刘婷婷(1975—),女,博士,教授,主要从事激光选区熔化、高端装备数字化设计制造技术方面的研究。

E-mail: liutingting@mail.njust.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zcd@mail.njust.edu.cn

出了一种支撑优化设计方法。然而,对于复杂悬垂结构及内腔悬垂结构,支撑往往难以去除,采用无支撑设计更具优势。Kruth 等^[8-9]通过在光路系统中增加监测和反馈装置来灵活改变激光功率大小,从而改善悬垂面的成形质量。Cloots 等^[10]提出了一种支撑结构最小化策略——分割策略,该策略能够在不添加任何支撑情况下成形与水平方向夹角小于 35°的悬垂结构。卢建斌等^[5,11]认为调整零件成形方向和控制局部参量可以优化悬垂表面质量,阐述了悬垂面成形缺陷类型及其产生原因。然而,上述研究仅仅提供了一种宏观的工程解决方法。

从微观层次看,悬垂面成形层下表面是粉末而非金属实体,产生了区别于实体结构的热传导、微熔、黏附等行为。熔池的行为变化可以直接反映出悬垂表面 SLM 成形的基本规律。Lott^[12]等初步阐述了熔池的动力学行为。Khan^[13]等对 SLM 成形中的熔池不稳定性进行了数值模拟,认为熔池面积依赖于边界条件。Alkahari^[14]等通过单道扫描试验研究了在不同激光功率、扫描速度和层厚等工艺参数下第一层成形过程中的熔池行为。Wen^[15]等研究了 SLM 成形拉伸试件的熔池边界形貌及其对力学性能的影响。Gong^[16]等通过单道扫描试验研究了 Ti6Al4V(6%、4%分别指对应组分所占的原子分数)在不同激光功率和扫描速度下的熔池特征,认为熔池特征为工艺参数的选择提供了重要的信息。除了以上关于单道扫描试验下的熔池行为研究,更多研究聚焦于熔池监测系统^[17-19]。然而,关于熔池动态行为如何影响悬垂结构成形质量的研究鲜见报道。

本文采用岛式扫描和 Z 型扫描方式分别加工了具有不同悬垂角度的试件,分析了熔池行为与悬垂角度、成形质量之间的内在关系,阐述了悬垂角度对熔池行为的影响规律以及不同扫描策略下熔池行为对成形质量的影响规律。

2 试 验

2.1 试验材料

采用无锡飞而康公司生产的 Ti6Al4V 合金粉末,化学组分见表 1。粉末的扫描电镜(SEM)形貌如图 1 所示,粉末呈规则球形,粒径范围为 0~53 μm,平均粒径为 35~40 μm。

表 1 Ti6Al4V 粉末的化学组分(原子数分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Ti6Al4V powders (atomic fraction, %)

Element	Al	V	Fe	C	O	N	H	Mo	Mn	Cu	Sn	Y	Zr	Ti
Content	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.

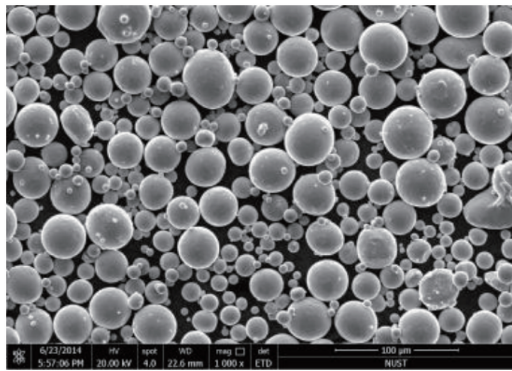


图 1 Ti6Al4V 粉末的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphology of Ti6Al4V powders

2.2 试验设计

设计两组试件,悬垂角度分别为 30°、35°、40°、45°和 50°,如图 2 所示。试件横截面尺寸为 10 mm×10 mm,分别采用岛式和 Z 型扫描策略进行成形,激光波长为 1064~1100 nm,激光功率为 100 W,扫描速度为 600 mm/s,扫描间距为 150 μm,铺粉层厚 30 μm,氩气保护(氩气体积分数为 99.99%),成形舱的氧气体积分数小于 0.1%。

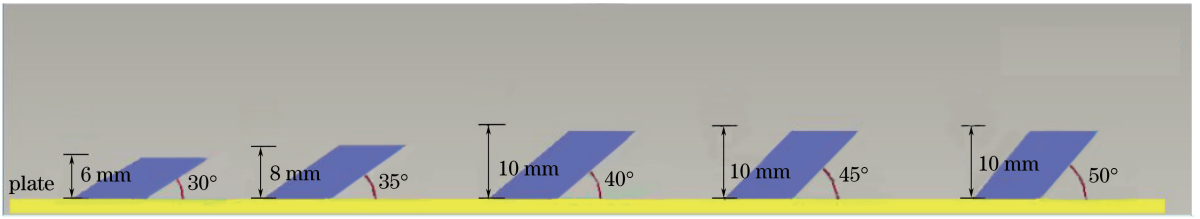


图 2 试件悬垂角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of overhang angle of specimens

岛式扫描在成形过程中利用随机曝光的策略,将一个成形面分成若干正方形的孤岛,孤岛尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,岛屿和扫描方向相邻的岛屿之间旋转 90° 。Z-型扫描方式是一种常用的 SLM 扫描方式,层间扫描线交错 90° ,且每层所有的扫描线都相互平行,两种扫描策略的扫描方式如图 3 所示。

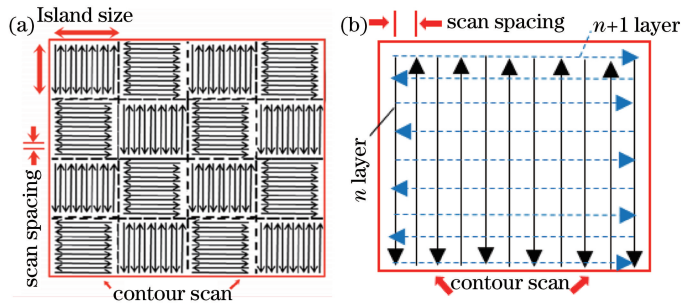


图 3 两种扫描策略的扫描方式。(a)岛式扫描;(b)Z-型扫描

Fig. 3 Scanning roads of two scanning schemes. (a) Island-scan; (b) Z-scan

通过熔池监测系统实时记录试件成形过程中的熔池面积,监测系统原理如图 4 所示。高速相机监测熔池的红外辐射强度,并实时捕捉熔池图像,通过分析图像的亮度值来获得熔池面积。试验分别记录面扫描和轮廓扫描的熔池面积。为了方便,后文除明确说明轮廓扫描外,其他均指面扫描数据。

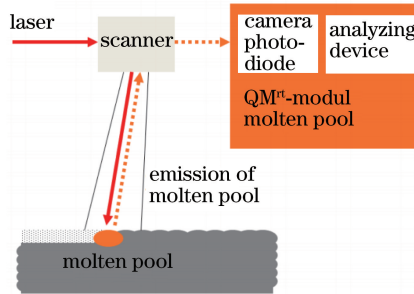


图 4 监测系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of monitoring system

试件成形后,采用千分尺测量成形件的尺寸精度;采用泰勒表面粗糙度测量仪测量粗糙度,以轮廓算术平均偏差 R_a 值来计量。所有数据均测量 6 次并取平均值作为结果。

3 试验结果讨论

3.1 悬垂角度引起的熔池变化规律

试验获得试件前 10 层熔池面积数据如图 5 所示。在成形初始阶段,不同悬垂角度的试件熔池面积均急剧变大,在成形 6 层后达到峰值,随后熔池面积趋于稳定,且第一层熔池面积小于支撑结构熔池面积。分析认为,加工第一层(上一层为支撑最后一层)时,较大幅面的实体结构需要在粉层上成形,熔池由于重力和毛细力的作用侵入到粉末里;同时,熔池的温度较低、液相黏度较大,熔池向外的铺展性较差,导致熔池面积较小。在随后几层的成形过程中,由于成形高度较铺粉层小,实际铺粉量大于设定值,熔化深度大于正常量,熔

池面积仍然小于正常值。随着层数的增加,前后层之间的铺粉量差异快速减小,实际铺粉量很快接近设定值,同时热量快速积聚,熔池向外铺展性变好,熔池面积快速变大,并趋于稳定。

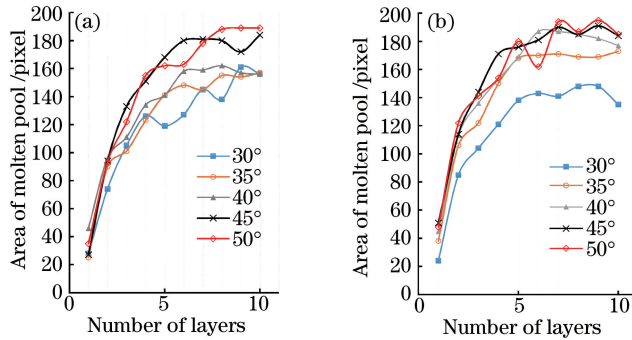


图 5 1~10 层熔池面积。(a)岛式扫描;(b)Z-型扫描

Fig. 5 Molten pool areas for 1-10 layers. (a) Island-scan; (b) Z-scan

进一步分析试件前 10 层熔池数据,30°悬垂的试件熔池面积随层数增加的速率最低,熔池面积从第三层开始已经明显低于 40°~50°的悬垂试件。分析认为,悬垂角度较小时,粉末支撑区域变大,试验中 30°悬垂试件比 50°悬垂试件粉末支撑区域大 22.32 mm²,粉末支撑区域的热导率只有成形实体材料的 1/100,热传导效果差。粉末支撑区域可以熔化的粉末多于正常量,熔化深度大,熔池由于重力和毛细力的作用侵入到粉末里,造成熔池面积减小。加工结果显示,30°、35°悬垂试件在悬垂特征结构顶部出现严重翘曲变形现象,试件底部与基板之间的支撑结构出现开裂、翘曲变形现象,粉末粘结现象明显;40°悬垂试件出现轻微翘曲变形;45°和 50°悬垂试件没有发生翘曲变形现象,成形了完整的悬垂特征结构面,悬垂面质量较好,如图 6 所示,标号 1~5 试件采用 Z-型扫描策略,标号 6~10 试件采用岛型扫描策略。由此分析可知,30°试件发生了翘曲变形,试件的部分区域裸露于粉床表面,铺粉之后没有被粉末完全覆盖,当激光加工到这些区域时,由于熔池周围没有粉末,热传导效果好,熔池面积进一步变小^[20]。

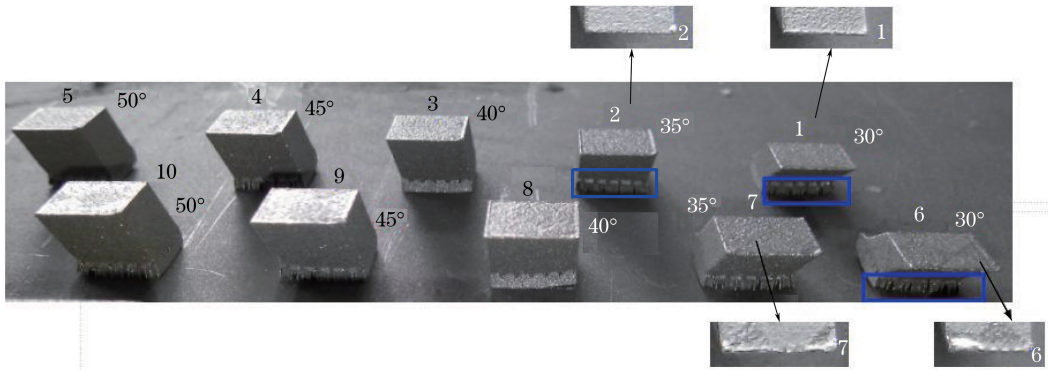


图 6 成形试件

Fig. 6 Fabricated specimens

试件成形初期熔池面积快速变大,达到峰值后,不同悬垂角度的试件熔池面积均在振荡中呈逐渐变小的趋势,如图 7 所示。这是因为,随着成形层数的增加,试件已成形金属部分的热传导能力逐渐加强,导致熔池面积缓慢减小。另外,随着悬垂角度的变化,当角度大于 40°时,熔池面积均值趋于稳定,如图 8 所示。这是因为当倾斜角度大于 40°时,实体支撑区域变多,热传导效果得到明显改善,熔池能量大部分被熔融层吸收,多余能量沿着成形实体快速传递,降低了热应力集中,熔深变化较小,熔池形态较稳定;同时,合理的工艺参数使得能量密度分布均匀,没有产生明显的热量积聚效应和过熔现象,成形过程变得稳定,保证了熔池形态。当角度小于 40°时,翘曲变形和粉末支撑区域的增加,使得熔池面积随着悬垂角度的减小而减小。

熔池轮廓线反映切层形状特征,是试件与粉末的交接边缘。图 9 为试件轮廓线扫描熔池面积散点图。由图可知,激光扫描切层轮廓线时,熔池振荡明显。随着悬垂角度的变化,轮廓线熔池振幅离散度高且呈现随机性,如图 10 所示。计算可知,当悬垂角度为 30°时,振荡幅度最大达到 82.53 pixel,不同悬垂角度、扫描

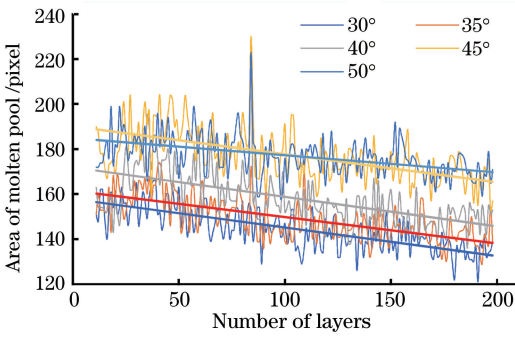


图 7 岛式扫描方式下熔池面积

Fig. 7 Molten pool area under Island-scan scheme

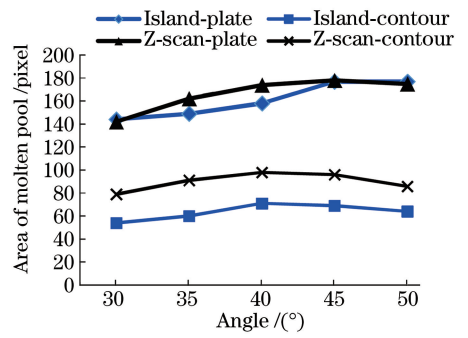


图 8 不同悬垂角度熔池面积均值

Fig. 8 Mean values of molten pool areas for different overhang angles

策略下轮廓熔池面积最大振幅为 99.23 pixel。研究认为,激光扫描轮廓线时,受轮廓线特征的影响,激光可熔化的粉末量不稳定,热传导能力也随着特征的变化而忽高忽低,从而使得熔池面积变化随机性高,振幅偏高。

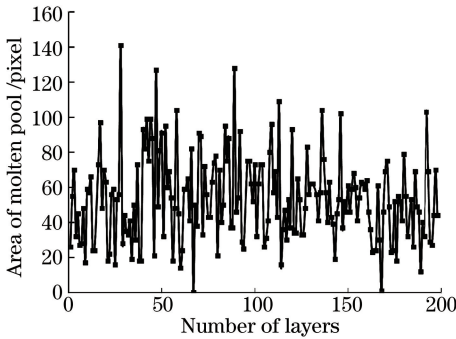


图 9 岛式扫描方式下,30°悬垂试件的轮廓熔池面积

Fig. 9 Contour molten pool area for specimen with overhang angle of 30° under Island-scan scheme

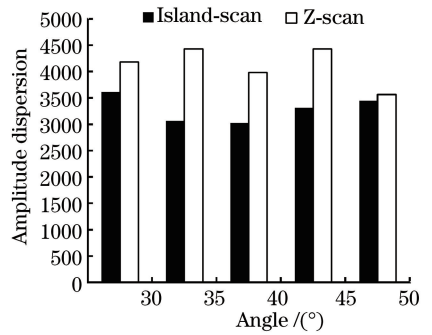


图 10 轮廓线熔池振幅离散度

Fig. 10 Amplitude dispersion of contour molten pool

比较轮廓线熔池面积,发现随着悬垂角度从 30°变化到 50°,轮廓熔池面积先增长,到 40°时趋于稳定并开始缓慢下降,与面扫描时熔池面积变化规律近似,而面扫描时的熔池面积远大于轮廓熔池面积,如图 8 所示。

3.2 熔池变化与悬垂面成形质量的关系

悬垂角度影响成形过程的熔池面积大小、熔池的形态,并进一步影响成形件质量。测量了 10 个试件的表面粗糙度,结果如图 11 所示,随着悬垂角度从 30°变化到 50°,零件成形表面粗糙度不断降低。

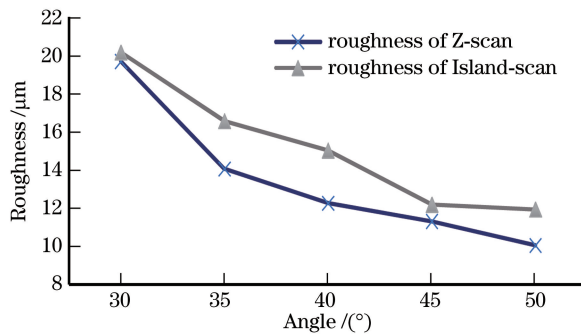


图 11 成形试件的表面粗糙度

Fig. 11 Surface roughness of fabricated specimen

分析认为,当悬垂角度较小时,由于粉末支撑区域变大,该区域激光热量主要沿试件横向扩散,并向粉末支撑传导,热传导效率低,可供熔化的粉末多,熔池由于重力和毛细管力的作用侵入到粉末里。熔池的沉降

导致激光烧结层底下的金属粉末颗粒熔化,悬垂面出现严重的粉末黏结,增大了悬垂面的表面粗糙度。试验试件在悬垂角度为 30°时,表面粗糙度 R_a 达到 20 μm 左右。当悬垂角度增大至 50°时,表面粗糙度 R_a 只有 10 μm 左右,表面质量较 30°得到明显改善。

3.3 扫描路径对试件质量影响分析

比较两种扫描策略下的熔池面积大小(图 8),岛式扫描策略方式下的熔池面积总体低于 Z-型扫描方式,轮廓扫描时熔池面积小 30%左右。而对于熔池面积的振荡幅度,轮廓加工时,Z-型扫描策略熔池振幅大于岛式扫描方式(图 10);切面加工时,岛式扫描方式熔池振幅大于 Z-型扫描策略,如图 12 所示。

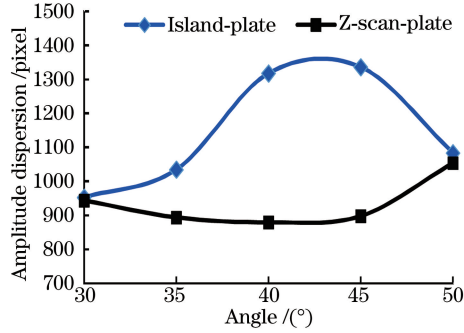


图 12 熔池振幅离散度

Fig. 12 Amplitude dispersion of molten pool

分析认为,岛式扫描策略是将熔融层按固定大小划分为一个个的孤岛,并随机曝光。由于孤岛面积小,与 Z-型扫描方式相比,岛式扫描策略是一种短边扫描,能量积聚较低,从而使得熔池温度较低,面积较小。同时,岛式轮廓扫描导致热传导不稳定,熔池面积振幅大。岛式扫描方式使得岛的边缘位置出现二次极速温升,在悬垂部位引起粉末层更为严重的浸润与黏附,悬垂面粗糙度低于 Z-型扫描策略。从试验结果来看,当角度从 35°变化到 50°时,采用岛式扫描策略的成形件悬垂面粗糙度高于 Z-型扫描策略试件。

4 结 论

悬垂角度的变化可直接引起熔池面积和熔池振幅的变化,并进一步影响成形件的表面粗糙度和尺寸精度,甚至引起翘曲变形。扫描策略在一定程度上可改善或者恶化成形状态,进而影响成形件性能。

在试件加工初始阶段,熔池面积迅速增加并趋于稳定。同时,熔池面积的振荡非常剧烈,轮廓线的熔池振荡远高于切面的熔池振荡。当悬垂角度较小时(低于 40°),悬垂角度的减小引起粉体支撑区域的变大,熔池面积变小,残余应力增加,进而引起翘曲变形。岛式扫描策略的随机曝光原理导致悬垂面出现多次温升,热传导不稳定,从而降低了成形表面质量。与 Z-型扫描方式相比,岛式扫描方式下的悬垂面粗糙度较高。

参 考 文 献

- 1 Kruth J P, Levy G, Klocke F, *et al.* Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2007, 56(2): 730-759.
- 2 Kruth J P, Mercelis P, van Vaerenbergh J, *et al.* Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- 3 Meiners W, Wissenbach K, Gasser A. Selective laser sintering at melting temperature: US6215093[P]. 2001-10-04.
- 4 Wang D, Yang Y, Zhang M, *et al.* Study on SLM fabrication of precision metal parts with overhanging structures[C]. IEEE, 2013: 222-225.
- 5 Lu Jianbin, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.* Analysis of affecting factors of overhanging surface quality by selective laser melting[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 148-151
- 6 Calignano F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2014, 64(9): 203-213.
- 7 Hussein A, Hao L, Yan C, *et al.* Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing[J]. Journal of

- Materials Processing Technology, 2013, 213(7): 1019-1026.
- 8 Kruth J, Mercelis P, van Vaerenbergh J, *et al.* Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 11(1): 26-36.
 - 9 Kruth J, Vandenbroucke B, van Vaerenbergh J, *et al.* Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques[C]. Proceedings of the International Conference Polymers & Moulds Innovations (PMI), 2005: 1-7.
 - 10 Cloots M, Spierings A B, Wegener K. Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM[C]. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, 2013: 631-643.
 - 11 Yang Yongqiang, Lu Jianbin, Wang Di, *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形非水平悬垂面研究 [J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(6): 94-99.
 - 12 Lott P, Schleifenbaum H, Meiners W, *et al.* Design of an optical system for the *in situ* process monitoring of selective laser melting (SLM) [J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 683-690.
 - 13 Khan M, Sheikh N A, Ali L, *et al.* Numerical simulation of melt pool instability in the selective laser melting (SLM) process[J]. Lasers in Engineering, 2014, 28: 319-336.
 - 14 Alkahari M R, Furumoto T, Ueda T, *et al.* Melt pool and single track formation in selective laser sintering/selective laser melting[C]. Advanced Materials Research, 2014, 933: 196-201.
 - 15 Wen S, Li S, Wei Q, *et al.* Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2660-2667.
 - 16 Gong H J, Gu H F, Zeng K, *et al.* Melt pool characterization for selective laser melting of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder [C]. 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2014: 1-4.
 - 17 Scharowsky T, Osmanlic F, Singer R F, *et al.* Melt pool dynamics during selective electron beam melting[J]. Applied Physics A, 2014, 114(4): 1303-1307.
 - 18 Craeghs T, Bechmann F, Berumen S, *et al.* Feedback control of layerwise laser melting using optical sensors[J]. Physics Procedia, 2010, 5(5): 505-514.
 - 19 Thombansen U, Abels P. Process observation in selective laser melting (SLM) [C]. SPIE, 2015, 9356: 93560R.
 - 20 Zhang Kai, Liu Tingting, Zhang Changdong, *et al.* Study on deformation behavior in selective laser melting based on the analysis of the melt pool data[J]. Chinese J 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.