



·前沿技术与交叉科学·

面曝光选区激光熔化成形形状精度研究*

王开甲¹, 沈显峰¹, 王国伟¹, 王晨光¹, 陈金明¹, 刘宁昭¹, 吴华玲²

(1. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 主要研究面曝光选区激光熔化单层成形时, 激光光斑搭接率和电流对形状精度的影响。实验通过控制变量法研究搭接率、曝光时间、电流等工艺参数对激光光斑、熔道、圆环、尖角等成形形状精度的影响。实验结果表明: 一定范围内, 电流越大, 激光光斑更均匀, 成形一致性更好; 搭接率 38.4% 能够获得最低的形状误差的熔道; 搭接率一定, 圆环成形误差随电流的增加而增加; 尖角成形误差随着电流增加, 呈现先增后减的趋势; 搭接率为 46.1%、38.4% 时, 零级衍射带来的形状误差降低。

关键词: 增材制造; 选区激光熔化; 面曝光; 形状精度; 工艺参数; 光斑搭接

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210039

Investigation on shape precision of surface exposure selective laser melting

Wang Kaijia¹, Shen Xianfeng¹, Wang Guowei¹, Wang Chenguang¹, Chen Jinming¹, Liu Ningzhao¹, Wu Hualing²

(1. Institute of Machinery Manufacturing Technology, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Having a new generation of selective laser melting process, surface exposure selective laser melting technology has the advantages of high forming efficiency and uniform temperature field, and is becoming a research focus in additive manufacturing field. The influence of laser spot overlap rate and electric current on the shape accuracy of single-layer laser melting with surface exposure was investigated. The effects of overlap rate, exposure time and electric current on the forming of laser spot, track, circular ring and sharp angle were studied by the control variable method. The experimental results show that: within a certain range, the larger the electric current is, the more uniform the laser spot is, and the more conducive to forming; The lowest shape error can be obtained with overlap rate of 38.4%. The forming error of the circular ring increases with the increase of electric current. The forming error of sharp angle increases first and then decreases with the increase of electric current. The shape error caused by zero-order diffraction can be reduced when the overlap rate is 46.1% and 38.4%.

Key words: additive manufacturing; selective laser melting; surface exposure; shape accuracy; process parameter; laser spot overlap

选区激光熔化技术(SLM)是目前金属增材制造技术(AM)领域应用最广泛的粉末床熔融技术之一,其特点是利用高功率密度激光熔化金属粉末^[1],制造接近全致密度的零件。随着增材制造效率要求的不断提高,SLM系统制造商提出增加单点激光功率或集成多个并行光纤激光器于一个系统的新方案,但成形速度仍受到振镜机械运动的限制^[2]。面曝光选区激光熔化技术是一种新兴的增材制造工艺方法,该技术特点是将激光光斑根据成形部件横截面几何形状调制成对应形状,一次曝光完成单层成形,整体自下而上顺次曝光,堆叠成型。

德国工业 3D 打印系统制造商 EOS(EOS Electro Optical System)的新型面曝光技术采用近百万个二极管激光器熔化聚合物粉末材料并逐层制造零件,而不是使用单个激光束来回覆盖整个构建平台,激光器阵列可实现高达 5 kW 的最大总输出功率。劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)面曝光选区激光熔化技术以光寻址光阀(OALV)作为掩膜,由低成本二极管激光器阵列和 Q 开关脉冲激光器组成的混合光源一次打印整个金属粉末层^[3]。英国谢菲尔德大学开发的面曝光选区激光熔化工艺,利用可单独寻址的结构阵列低功率激光二极管发射器,进行高速并行处理,选

* 收稿日期:2021-02-03; 修订日期:2021-04-16

基金项目:四川省科技计划项目(2018GZ0535)

作者简介:王开甲(1995—),男,硕士研究生,从事金属选区激光熔化增材制造方面的研究工作。

通信作者:沈显峰(1977—),男,博士,高级工程师,从事高能束流加工技术方面的研究工作。

择性地熔化预沉积粉末床中的金属粉末^[4]。中国工程物理研究院机械制造工艺研究所利用波长为 915 nm 的二极管连续激光器作为光源,结合电寻址反射式纯相位液晶空间光调制器,搭建了面曝光选区激光熔化增材制造原理装置平台,基于光敏纸和低熔点金属粉末材料进行面曝光熔化成形并获得了样品,实现了面曝光选区激光熔化的原理性验证^[5]。面曝光选区激光熔化技术取消了传统的振镜扫描,因此具有成形速度快、加工成本较低等优点。金属材料的面曝光选区激光熔化是目前选区激光熔化技术的发展趋势,但在不损伤光学器件的条件下进行面曝光选区激光熔化仍然是目前研究热点。

面曝光选区激光熔化技术工艺过程必须保证较高的形状精度^[6],才能满足其未来工程化应用的需求。针对目前面曝光选区激光熔化成型精度未开展规律性研究的现状,本文对单层一次曝光成形的图形进行形状精度的表征,以探究功率、搭接率对形状误差的影响规律。进而探究成形过程中的形状精度的变化规律,提出降低曝光过程中的形状误差的技术途径。

1 面曝光选区激光熔化单层成形形状精度分析

基于本课题组先前构建的面曝光选区激光熔化实验装置,如图 1 所示。

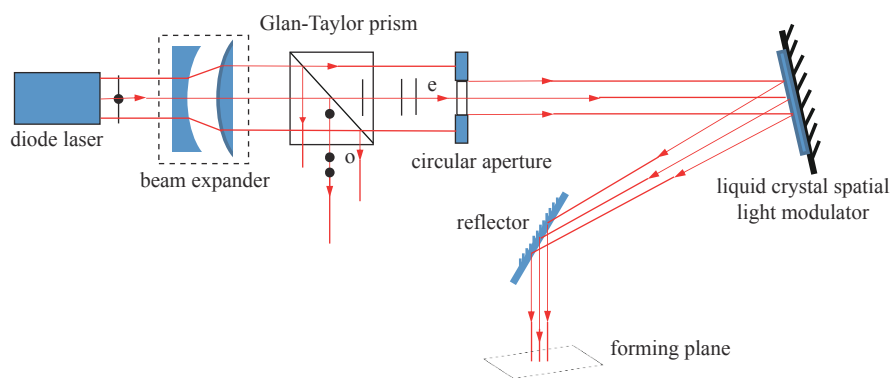


Fig. 1 Schematic diagram of experimental device for surface exposure selective laser melting

图 1 面曝光选区激光熔化实验装置示意图

在选区激光熔化的成型加工过程中,影响单层成形精度的因素主要有两个:扫描误差与熔道^[7]。成型过程中的扫描误差主要由扫描振镜系统的偏转误差造成,振镜系统的偏转决定形状精度;熔道是成型的基本组成单元且熔道搭接形成成型面,研究单熔道及搭接是研究选区激光熔化成型件形状精度的基础。

面曝光选区激光熔化单层一次曝光成形,激光光斑是单层成型的基本单位。根据选区激光熔化精度影响因素,将光斑搭接率作为研究对象,在不同激光功率等工艺参数条件下对光斑进行形状精度的研究。

点扫描选区激光熔化成形过程中,熔道搭接率是影响成型件表面粗糙度的重要因素,搭接关系如图 2 所示^[8]。其中点扫描选区激光熔化熔道搭接率(β_0)定义为

$$\beta_0 = \frac{D_0}{w_0} 100\% \quad (1)$$

式中: w_0 为单熔道宽度; D_0 为相邻熔道间的搭接宽度。

若 β_0 偏小,则说明相邻熔道之间会有凹陷区,但高度一致;若 β_0 适中,则有较好的熔化效果,成型件表面具有较好的粗糙度;若 β_0 偏大,则搭接区出现凸出区,相邻熔道高度不同,随着熔化的进一步进行,缺陷会进一步累积,导致成形的失败^[9]。

类似的,对于面曝光选区激光熔化单层成形时,成型部件横截面几何形状的熔化将由光束的多个子光斑一次完成,激光光子光斑搭接是成型件形状精度的重要影响因素。面曝光选区激光熔化成形过程中,子光斑搭接关系如图 3 所示。其中子光斑搭接率(β_1)定义为

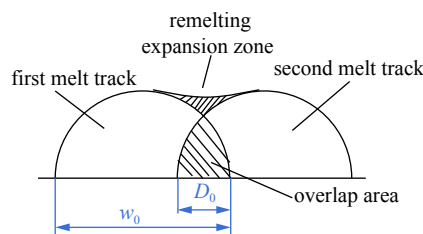


Fig. 2 Schematic diagram of two-track overlapping

图 2 两熔道搭接示意图

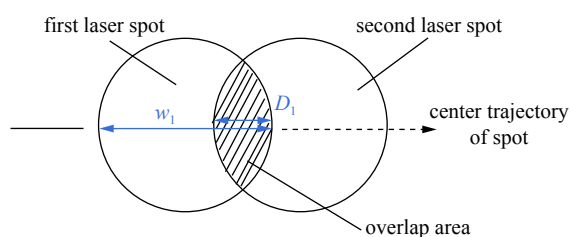


Fig. 3 Schematic diagram of overlapping of laser beamlet

图 3 激光光子光斑搭接示意图

$$\beta_1 = \frac{D_1}{w_1} 100\% \quad (2)$$

式中： w_1 为激光光斑直径； D_1 为相邻光斑间的搭接宽度。

面曝光选区激光熔化中，成形部件横截面由点、线、角等几何要素构成。针对形状精度，分解的形状精度表征参数如图 4 所示，将以激光光斑为基础，在不同搭接率与工艺参数条件下进行单点精度与多点精度的研究^[10]，探究面曝光选区激光熔化中形状精度。

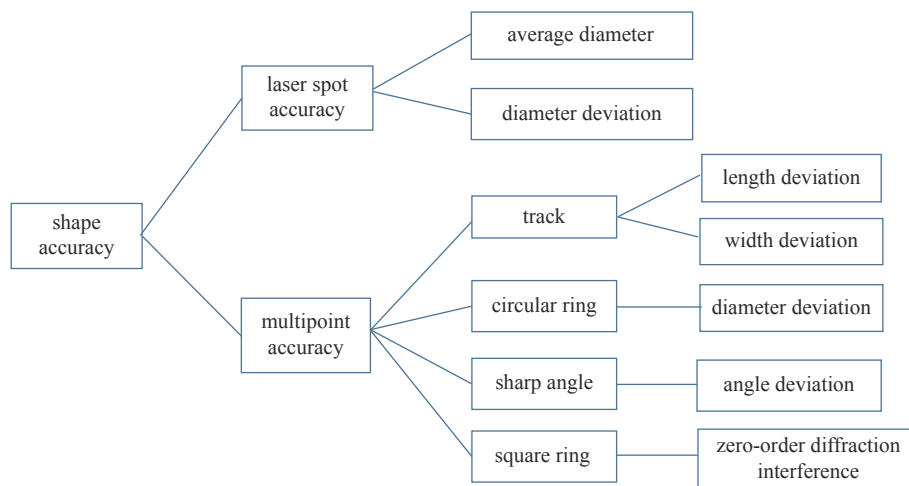


Fig. 4 Representation tree of shape accuracy

图 4 形状精度的表征树状图

2 实验

2.1 实验设备与材料

本文使用的面曝光激光输出光路及实验装置，主要组成功能器件有：波长为 915 nm 的二极管激光器、连续可调扩束镜、格兰-泰勒棱镜、可调圆孔光阑、反射式纯相位液晶空间光调制器^[11]。激光器工作电压 25 V，激光功率与电流呈正相关，通过调节电流控制激光功率变化。实验材料采用统一规格激光调光纸，电流调节、曝光时间可通过激光器电源控制软件实现定量控制，搭接率可通过空间光调制器载入图形进行调制。

实验结果由奥林巴斯 GX53 金相显微镜测量、数显式游标卡尺测量，取 3 次测量值的平均值。实验前，通过光学标尺对金相显微镜进行校正，游标卡尺测量前归零，避免其它误差干扰实验测量结果。

2.2 实验方法

2.2.1 激光功率、曝光时间对激光光斑形状精度的影响

针对激光光斑存在的形状误差，设计曝光时间不同的测试方案，具体测试方案如表 1 所示。通过单次定时曝光，在激光调光纸上成形 200×200 像素图中白色单点光斑，加载图形如图 5 所示。根据预实验， X 、 Y 方向上分别为直径最大值与最小值，统计激光光斑平均直径及 X 、 Y 垂直方向上直径偏差 $D_D = |D_X - D_Y|$ 。

2.2.2 激光功率、搭接率对熔道、尖角、圆环形状精度的影响

通过控制激光的两束子光束，可形成不同搭接率的激光光斑，如图 6 所示。选区激光熔化成形中，熔道搭接率一般为 30%~60%^[12]。利用 23%、30.7%、38.4%、46.1%、53.8% 五种搭接率，研究曝光时间一定 (0.6 s) 而搭接率不同时，功率对熔道、指定直径圆、指定尖角成形的形状精度的影响规律。

单层成形熔道、圆环、尖角三种基础几何元素时，统计其成形值与理论值之间的误差，可反映出面曝光选区激光熔化成形形状精度的变化规律，为后续单层复杂成形至零件多层成形的形状精度研究奠定基础^[13]。熔道、圆

表 1 激光光斑形状精度实验表

Table 1 Experimental scheme of laser spot size accuracy test table

exposure time/s	current/A
0.1	0.05
0.2	0.10
0.3	0.15
0.4	0.20
0.5	0.25
0.6	0.30

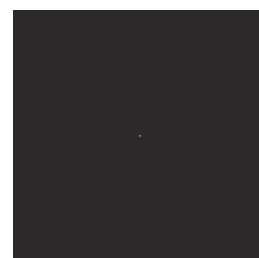


Fig. 5 Laser spot test chart

图 5 激光光斑测试图

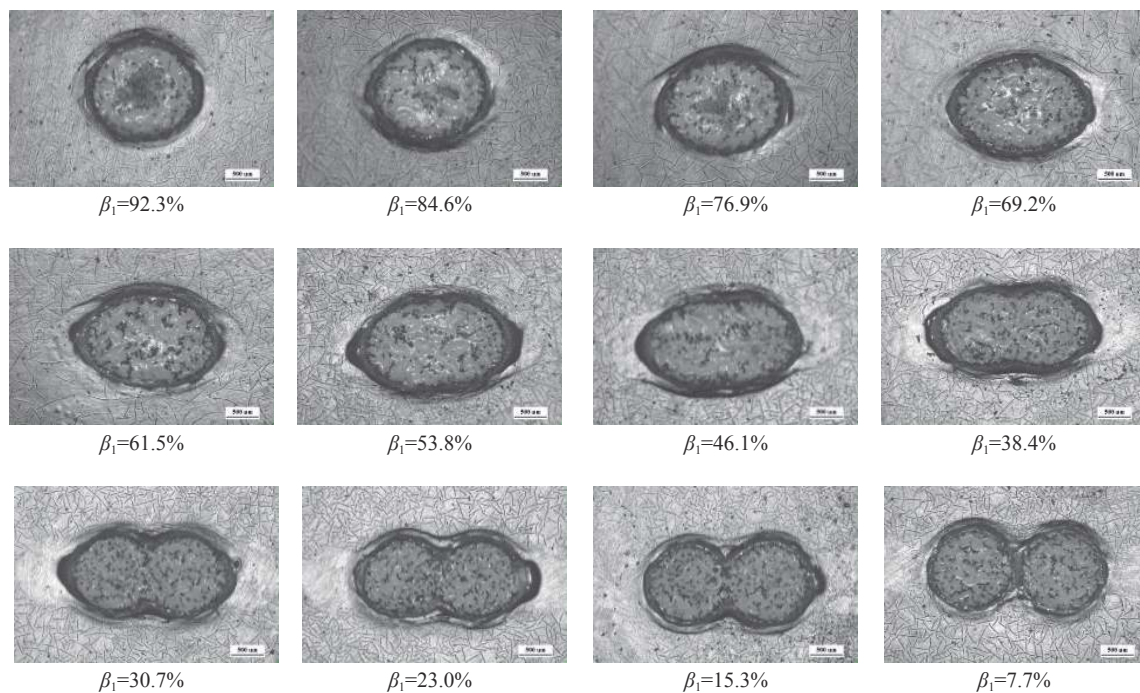


Fig. 6 Laser spot overlap image

图 6 激光光斑搭接图

环、尖角加载图形如图 7 所示。

2.2.3 激光功率、搭接率对线框成型的影响

以往研究表明,选区激光熔化成形过程中,激光功率、扫描速度等工艺参数会对粉末扫描轨迹形成具有较大的影响^[14]。面曝光选区激光熔化成形复杂形状时,激光通过空间光调制器调制时,成形图案中会出现明显的零级衍射光斑,多层成型时,将显著影响成型件的形状精度^[15]。而零级衍射光斑出现的原因是:空间光调制器单个像素点之间存在像素间距,部分激光照射在像素间距,无法被调制,进而产生零级衍射光斑,如图 8、图 9 所示。通过调

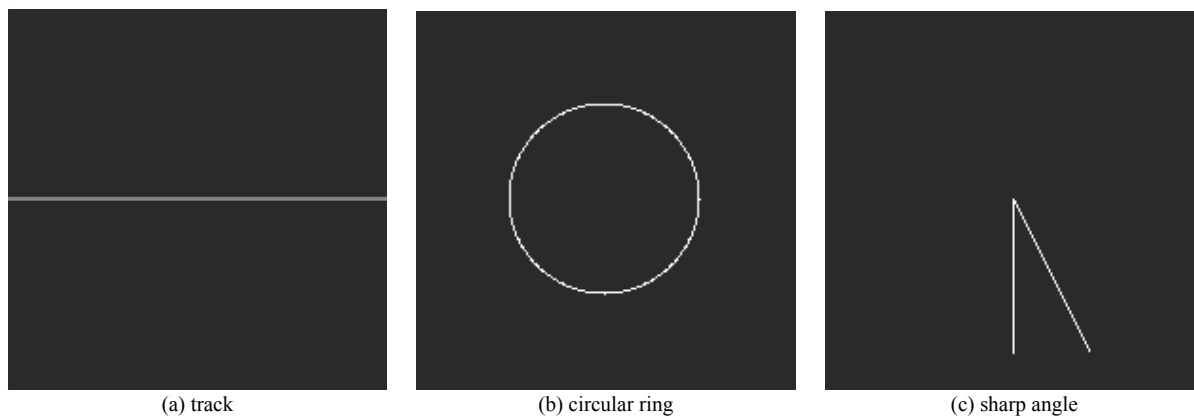


Fig. 7 Test drawings of track, circular ring and sharp angle

图 7 熔道、圆环、尖角测试图

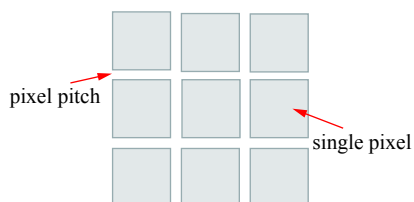


Fig. 8 Schematic diagram of the causes of zero-order diffraction

图 8 零级衍射产生示意图

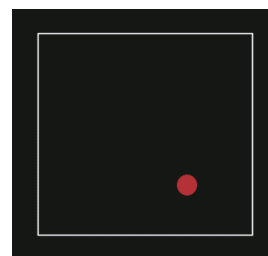


Fig. 9 Wireframe and zero-order diffraction spot

图 9 线框及零级衍射光斑

整搭接率,有望进一步的减弱零级衍射带来的形状误差^[16]。线框作为线段、尖角基本元素的组合,其成形将进一步说明复杂成形时功率、搭接率对形状精度的影响,成形过程中可能出现的影响因素及解决方法。

3 结果与分析

3.1 激光功率、曝光时间对激光光斑形状精度的影响

实验得到激光光斑如图 10 所示。通过统计光斑平均直径 D_{ave} ,如图 11 所示。可以看出:电流一定的情况下,曝光时间对激光光斑平均直径 D_{ave} 的影响并不显著,激光光斑平均直径较为稳定,且不同电流水平光斑平均直径差距较小。

进一步地,为探究激光功率对光斑垂直两方向直径差距的影响规律,统计 x, y 方向上测量值直径的偏差 $D_D = |D_x - D_y|$ 随着功率变化的趋势,结果如图 12 所示。从图中可以看出:曝光时间一定的情况下,电流对激光光斑两垂直方向上直径具有显著的影响。电流越大,激光光斑在 x, y 两垂直方向上直径偏差 D_D 呈现先增后减的趋势。即随着功率增加,由于激光调光纸上热量积累,激光光斑会出现一定程度的变形。一定范围内,电流极小或极大处,激光光斑更均匀,更有利于后续的熔化成形。

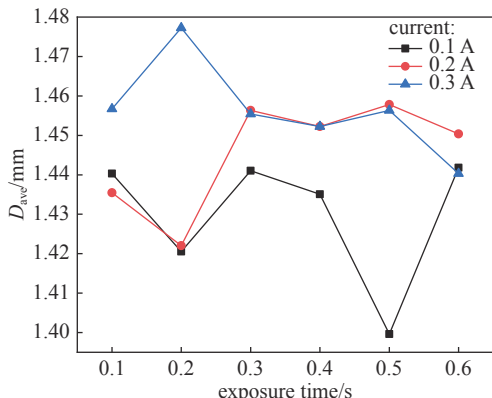


Fig. 11 Influence of laser power and exposure time on spot diameter

图 11 功率、曝光时间对光斑直径影响

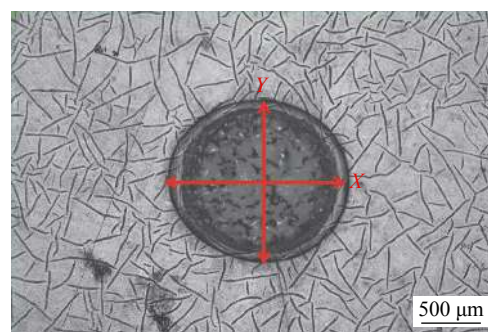


Fig. 10 Laser spot shape

图 10 激光光斑形貌

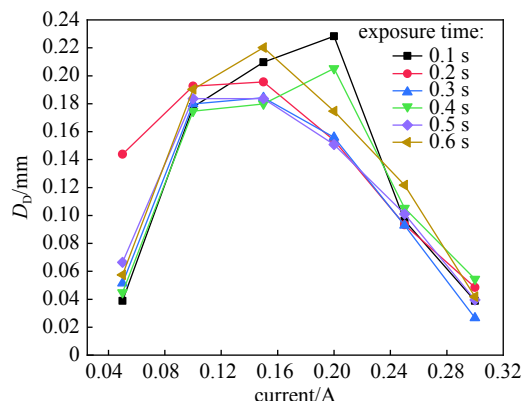


Fig. 12 Influence of laser power on D_D

图 12 激光功率对 D_D 影响

3.2 激光功率、搭接率对熔道、尖角、圆环形状精度的影响

在面曝光选区激光熔化成形激光光斑搭接分析基础上,以熔道为例,搭接率不同,会造成一定的形状误差,如图 13 所示。由图可看出,选区激光熔化成形中单熔道最常见的方式是搭接率为 92.3% 的熔道。但面曝光选区激光熔化成形时,单个光斑能量取决于激光光子光束总数,故搭接率会影响到能量分配,进而影响形状精度^[17]。实验结果如表 2 所示, L_1 为熔道测量长度, L_0 为熔道理论长度; B_{max} 为成形熔道最大宽度, B_{min} 为成形熔道最小宽度。统计测量长度与理论长度之间的误差 $D_L = |L_1 - L_0|$ 、最大宽度与最小宽度之间的误差 $D_B = |B_{max} - B_{min}|$ 随功率、搭接率变化的趋势,如图 14 所示。

根据图 14 可知,搭接率一定时, D_L 随激光功率增大呈现先减后增的趋势,一定范围内, D_L 存在极小值;功率一定时,误差随着搭接率增加而呈现起伏,搭接率为 23%、38.4% 时, D_L 更容易出现较小值,有利于熔道的精确成形。搭接率一定时,除搭接 23% 情况外,其余熔道宽度误差 D_B 均随电流增大而先减后增;电流为 2~3 A 时,熔道整体成形较好,熔道宽度误差 D_B 随搭接率先减后增,搭接率在 30% 至 40% 间,熔道

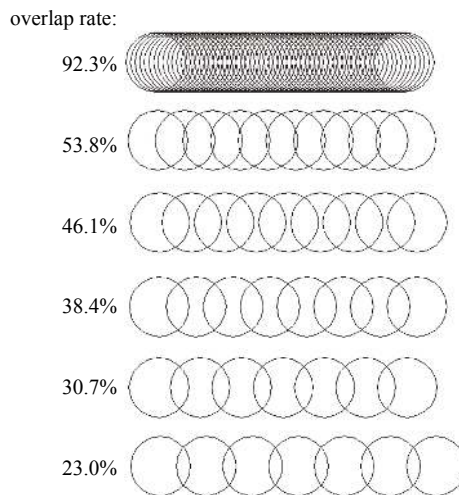


Fig. 13 Tracks with different overlap rates

图 13 不同搭接率的熔道

表 2 激光功率、搭接率对熔道影响
Table 2 Influence of laser power and overlap rate on track

current/A	53.8%	46.1%	38.4%	30.7%	23%
1					
2					
3					
4					

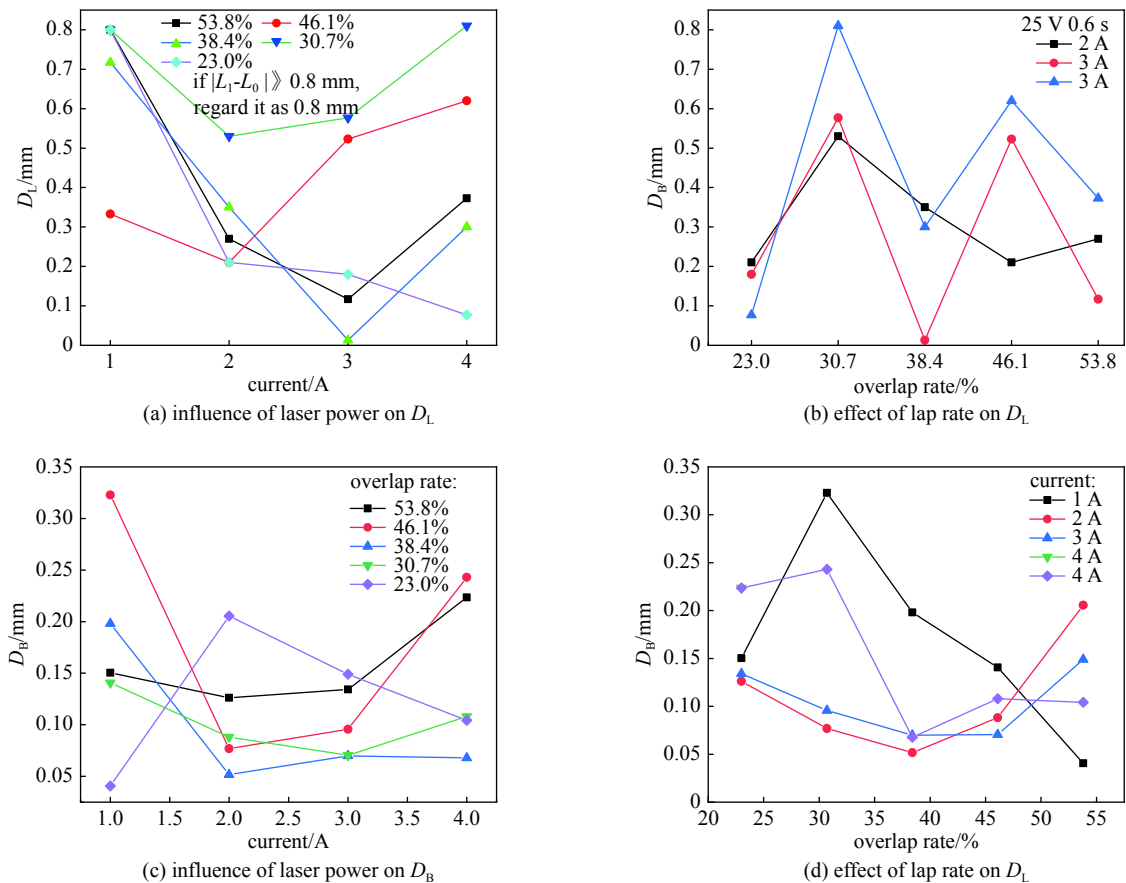


Fig. 14 Influence of laser power and lap rate on D_L , D_B

图 14 激光功率、搭接率对 D_L , D_B 影响

宽度误差较小。而综合熔道长度、熔道宽度方向上偏差变化趋势,可以看出:搭接率 38.4% 与电流 3 A 更有利于降低形状误差,得到形状较好的熔道,与实验相符合。

圆环作为一种基础几何元素,在成形圆柱类金属零件时,对形状精度的影响至关重要。面曝光选区激光熔化成形需要激光光斑的误差可控,也需要几何图形的精确成形。统计实验结果,如表 3 所示。部分实验因为电流过低,成形失败。成形完整的实验结果显示,激光功率对圆环直径成形误差具有较为显著的影响。

统计成形圆的理论直径与实际成形直径之间误差记为 D_C 。电流为 2 A 时,无法成形圆,不计入实验结果;仅统计电流为 3~6 A 工况下 D_C 的实验结果,如图 15 所示。数据显示,无论搭接率如何变化,圆成形误差 D_C 均随着电流增加而逐渐增加。由此可知,面曝光选区激光熔化在成形具有圆形特征的零件,需选择合适的工艺参数,避免成形

表 3 圆环成形实验结果

Table 3 Experimental results of circular ring forming

current/A	92.3%	53.8%	46.1%	38.4%
2				
3				
4				
5				
6				

误差累积对形状精度的影响。

选区激光熔化成形复杂构件时具有一定优势，而复杂构件往往由一些典型结构构成，比如：尖角、悬垂、薄壁等，而尖角往往是成形这些结构的基础特征之一。尖角的精确成形，将进一步说明面曝光选区激光熔化成形复杂构件的潜力^[18]。搭接率不同时，进行固定角度 30°的曝光实验，实验结果如表 4 所示。由实验结果可知，随着激光功率的增加，成形尖角呈现熔化不均匀的情况。有两个原因：(1)空间光调制器调制效率不高，能量大部分集中在顶点处积累，造成了过度熔化^[19]；(2)零级衍射的影响，非调制光能量造成了过度熔化。

角度特征理论度数与实际成形度数之间误差记为

表 4 成形角度实验结果

Table 4 Experimenta results of forming sharp angle

current/A	92.3%	53.8%	46.1%	38.4%
1				
2				
3				
4				
5				
6				

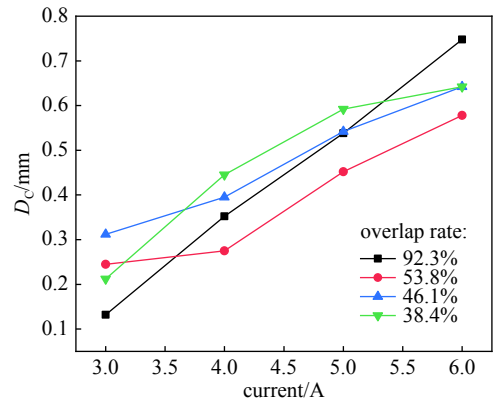


Fig. 15 Effect of laser power on forming circular ring

图 15 激光功率对成形圆环的影响

$D_\alpha = |\alpha_1 - \alpha_0|$ (其中: α_1 为测量角度, α_0 为理论角度)。统计结果如图 16 所示: 搭接率一定的情况下, 在一定范围内, D_α 随着电流的增加, 呈现波动状态, 具有下降趋势, 在 2 A 处出现了偏差极大值。结合实验结果来看, 1 A 至 3 A 范围内熔化不足, 可能导致出现较大偏差^[20]。

3.3 激光功率、搭接率对线框成形的影响

不同于点、线、圆、尖角特征的成形, 成形 16 mm×16 mm 线框是面曝光选区激光熔化成形大面积图形的探索^[21]。通过实验定性说明搭接率、电流影响形状精度和成形质量。成形线框实验结果如表 5 所示, 搭接率一定, 电流越大更有利于线框成形; 一定范围内, 随着搭接率降低, 空间光调制器对能量分配更加均匀, 衍射效率提高, 零级衍射减弱, 线框整体成形效果更好。受限于实验条件, 电流无法继续增加进行试验。对于大面积成形, 零级衍射现象的干扰不可避免, 但在电流 8 A 或更大情况下, 搭接率 46.1%, 38.4% 时可以降低零级衍射光斑带来的干扰。

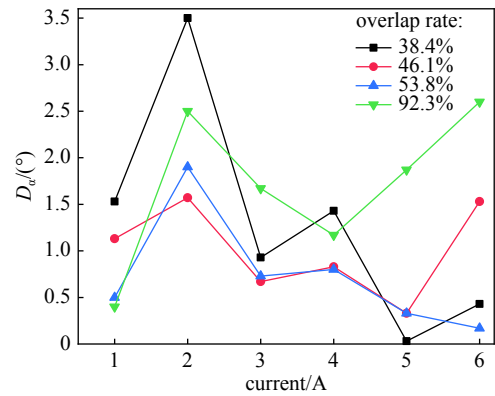


Fig. 16 Effect of laser power on forming sharp angle

图 16 激光功率对成形尖角的影响

表 5 线框成形实验

Table 5 Results of wireframe forming experiments

current/A	92.3%	53.8%	46.1%	38.4%
6				
7				
8				
zero-order diffraction light spot				

4 结 论

本文基于面曝光选区激光熔化成形平台, 研究了面曝光选区激光熔化单层成形中不同电流、搭接率对几何元素(点、线、圆、尖角)成形形状精度的影响规律等。研究了电流、激光光斑搭接率对面曝光选区激光熔化单层成形形状精度的影响规律。在电流一定的情况下, 曝光时间对激光光斑平均直径 D_{ave} 的影响不显著, 且不同电流水平光斑平均直径差距较小; 曝光时间一定的情况下, 电流对激光光斑两垂直方向上直径具有显著的影响, 直径偏差 D_D 呈现先增后减的趋势; 一定范围内, 电流越大, 激光光斑更均匀, 有利于提高成形精度。获得了熔道在长度、熔道宽度方向上的误差变化趋势, 结果表明: 搭接率 38.4% 有利于降低形状误差, 得到形状精度较高的熔道; 搭接率一定时, 圆环成形误差 D_C 随着电流增加而逐渐增加; 尖角成形误差 D_α 随着电流的增加, 呈现先增后减的趋势, 较大形状误差可能与电流不足导致的曝光不充分有关。探索了面曝光选区激光熔化成形大面积图形线框时的成形规律和零级衍射现象, 在一定范围内, 电流越大更有利于线框成; 零级衍射现象对成形精度影响较大, 搭接率为 46.1%, 38.4% 时可减弱零级衍射, 进而降低了形状误差。

致 谢 感谢实验过程中孙凯华博士、钟华、孙铭给予的指导和帮助。

参考文献:

[1] Yap C Y, Chua C K, Dong Z L, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2: 041101.

- [2] Zavala-Arredondo M, Boone N, Willmott J, et al. Laser diode area melting for high speed additive manufacturing of metallic components[J]. *Materials & Design*, 2017, 117: 305-315.
- [3] Matthews M J, Guss G, Drachenberg D R, et al. Diode-based additive manufacturing of metals using an optically-addressable light valve[J]. *Optics express*, 2017, 25(10): 11788-11800.
- [4] Zavala-Arredondo M, Groom K M, Mumtaz K. Diode area melting single-layer parametric analysis of 316L stainless steel powder[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5): 2563-2576.
- [5] 王晨光, 沈显峰, 王国伟, 等. 金属面曝光选区激光熔化原理装置及试验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 029001. (Wang Chenguang, Shen Xianfeng, Wang Guowei, et al. Principle device and experimental research of surface exposure selective laser melting for metal powder[J]. *Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 029001)
- [6] Kamarudin K, Wahab M S, Raus A A, et al. Benchmarking of dimensional accuracy and surface roughness for AlSi10Mg part by selective laser melting (SLM)[C]//American Institute of Physics Conference Series. 2017.
- [7] 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]. 华南理工大学, 2015. (Yang Xiongwen. Study on dimensional accuracy of parts manufactured by selective laser melting and its application in manufacturing non-assembly mechanisms directly[D]. South China University of Technology, 2015)
- [8] 陈光霞, 王泽敏, 关凯, 等. 工艺参数对SLM激光快速成型件表面粗糙度的影响[J]. *制造技术与机床*, 2009(12): 86-89. (Chen Guangxia, Wang Zemin, Guan Kai, et al. Effects of parameters on surface roughness of samples by selective laser melting[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2009(12): 86-89)
- [9] Zhao Yu, Yu Tianbiao, Sun Jiayu, et al. Effect of laser cladding on forming microhardness and tensile strength of YCF101 alloy powder in the different full lap joint modes[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 820: 150230.
- [10] Presotto A G C, Barão V A R, Bhering C L B, et al. Dimensional precision of implant-supported frameworks fabricated by 3D printing[J]. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2019, 122(1): 38-45.
- [11] Lin Liu, Li Lin, Zhao Zhu, et al. A remote laser focusing system with spatial light modulator[J]. *Computer Communications*, 2020, 154: 92-98.
- [12] 祁斌, 刘玉德, 石文天, 等. 脉冲式激光选区熔化成形搭接率的研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(3): 311-317. (Qi Bin, Liu Yude, Shi Wentian, et al. Study on overlap ratio of pulse laser selective melting forming[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(3): 311-317)
- [13] Uhlmann Eckart, Saber Yassin. Conceptualization of a measurement procedure for determination of characteristic properties of SLM produced parts by means of computed tomography[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 47: 1016-1022.
- [14] Guo Meng, Gu Dongdong, Xi Lixia, et al. Formation of scanning tracks during selective laser melting (SLM) of pure tungsten powder: Morphology, geometric features and forming mechanisms[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 79: 37-46.
- [15] Liu Ning, Yang Chao. The elimination of zero-order diffraction of 10.6 μm infrared digital holography[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2017, 82: 133-139.
- [16] Yurlov V, Lapchuk A, Sang K Y, et al. A study of image contrast restriction in displays using diffractive spatial light modulators[J]. *Displays*, 2010, 31(1): 15-24.
- [17] Weiner A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(5): 1929-1960.
- [18] Li Nanman, Wang Di, Liu Chao, et al. Large-size holographic display method based on effective utilization of two spatial light modulators[J]. *Optics Communications*, 2019, 453: 124311.
- [19] Moreno I, Gutierrez B K, Sánchez-López M M, et al. Diffraction efficiency of stepped gratings using high phase-modulation spatial light modulators[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 126: 105910.
- [20] Li Sensen, Lu Zhiwei, Wang Yulei, et al. Spatial beam shaping for high-power frequency tripling lasers based on a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 181-185.
- [21] 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: 176-183.