

工艺参数对 H13 钢激光选区熔化成形缺陷的影响

徐锦岗¹, 陈勇², 陈辉^{2*}, 杨冰¹

¹西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;

²西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要 对 H13 钢粉末材料进行了激光选区熔化(SLM)成形,通过改变激光功率、扫描速度、扫描间距、扫描方式等参数,对比研究了工艺参数对试件成形缺陷的影响规律。结果表明,在一定激光功率和扫描速度范围内,增大激光功率或减小扫描速度有利于试件的成形;过大或过小的扫描间距都会影响成形质量,形成气孔或未熔合缺陷;相对于 Z 型正交扫描和单 X 方向扫描, S 型正交扫描的成形件质量最好。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 工艺参数; 成形缺陷; H13 钢

中图分类号 TN249; TG665

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041405

Influence of Process Parameters on Forming Defects of H13 Steel Processed by Selective Laser Melting

Xu Jingang¹, Chen Yong², Chen Hui², Yang Bing¹

¹State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

²School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract The formation of H13 steel powder material is conducted by using the selective laser melting (SLM) technology, and the influence rules of process parameters on the forming defects are obtained via a comparative study by changing the parameters including laser power, scanning speed, scanning pitch and scanning method. The results show that, in a certain range, the increase of laser power or the decrease of scanning speed is beneficial to the formation of parts. A too large or too small scanning pitch has a significant impact on the forming quality and thus the pores or fusion-incomplete defects occur. The quality of forming parts under S-shaped orthogonal scanning is the best if compared with those under Z-shaped orthogonal scanning and single X-direction scanning.

Key words laser technique; selective laser melting; process parameters; forming defects; H13 steel

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

1 引言

金属零件激光增材制造技术经过近二十年的发展,在航空航天、船舶工业、生物医学等诸多领域得到了很好的应用^[1-2]。现有的激光增材制造金属零件的材料主要有钛合金、镍基合金、铝合金等^[3-6]。然而,在轨道交通、装备制造业和国防工业等领域发挥重要作用的高性能合金钢材料,其激光增材制造

的发展仍受诸多技术难题制约^[7-8]。

激光选区熔化(SLM)技术利用激光选择性熔化金属粉末,逐点逐层凝固成形,具有成形精度高、柔性高、可成型复杂结构等特点。针对激光选区增材技术,国内外学者已开展了较多的理论与实验研究,并取得了大量的成果^[9-12]。H13 是一种热作模具钢,是在碳工钢的基础上加入合金元素而形成的高性能合金钢,应用非常普遍。高性能合金钢由于其合金成

收稿日期: 2017-10-18; 收到修改稿日期: 2017-10-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100202)、国家自然科学基金(51675446,51474178)

作者简介: 徐锦岗(1995—),男,硕士研究生,主要从事激光增材制造、车辆结构强度方面的研究。

E-mail: 2990310095@qq.com

导师简介: 杨冰(1979—),男,博士,副研究员,博士生导师,主要从事车辆结构强度理论方面的研究。E-mail: yb@swjtu.cn

* 通信联系人。E-mail: xnrpt@163.com.

分、物相和相变过程复杂,其 SLM 过程存在易产生缺陷、性能难以控制等问题。关于高性能合金钢激光选区增材过程中工艺参数对成形及缺陷的影响规律缺乏系统全面的研究。因此,本文以 H13 模具钢为对象,研究了 SLM 过程中工艺参数(激光功率、扫描速度、扫描间距、扫描方式)对成形及缺陷的影响规律。

2 实验设备与材料

采用广东汉邦激光科技有限公司的 SLM-280 型 SLM 设备,该设备采用了波长为 1064~1100 nm

表 1 H13 钢的成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of H13 steel (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
Content	0.32-0.45	0.80-1.20	0.20-0.50	4.75-5.50	1.10-1.75	0.80-1.20	≤0.030	≤0.030

3 实验结果与分析

3.1 单层单道成形研究

对 H13 合金钢粉末进行单道扫描分析,以确定激光功率、扫描速度对单道形貌的影响规律,并分析其成形特征。单层单道成形参数见表 2。

表 2 单层单道成形参数

Table 2 Single-layer single-channel forming parameters

Parameter	Laser power / W	Scanning speed / (mm · s ⁻¹)	Powder thickness / μm	Spot diameter / μm
Value	250-450	800-1600	40	100

3.1.1 激光功率的影响研究

设定扫描速度为 $v=800$ mm/s,其他参数保持不变,改变激光功率,在功率分别为 250,300,350,400,450 W 的情况下进行单道熔融。图 1 所示是单道成形形貌。从图中可以看出,随着激光功率的增大,单道形貌的熔宽逐渐增大,球化现象逐渐消失,成形过程中表面也逐渐光滑,表现出较好的熔融效果。

为了更好地研究工艺参数对成形质量的影响规律,引入激光能量密度(LED)^[13]表征输入的能量,定义为

$$L_{LED} = \frac{P}{v \cdot h \cdot d}, \quad (1)$$

式中 P 为激光功率, v 为扫描速度, h 为扫描间距, d 为铺粉层厚。激光能量密度 L_{LED} 与激光功率 P 成正比,与扫描速度 v 成反比,(1)式表明了单位时间单位体积内的激光能量与激光功率及扫描速度间的关系。

的光纤激光器。主要参数指标如下:最大激光功率 500 W,扫描速度 100~7000 mm/s,铺粉厚度 20~80 μm,最大成形尺寸 250 mm × 250 mm × 300 mm。

实验所用材料为 H13 模具钢雾化粉末,粉末粒径为 15~45 μm,其成分见表 1。不锈钢作为基板材料,在加工前对其表面进行打磨以去除铁锈、油污,并用酒精清洗,保证表面干净光滑。在实验过程中通过控制变量法,研究不同工艺参数对成形及缺陷的影响规律。

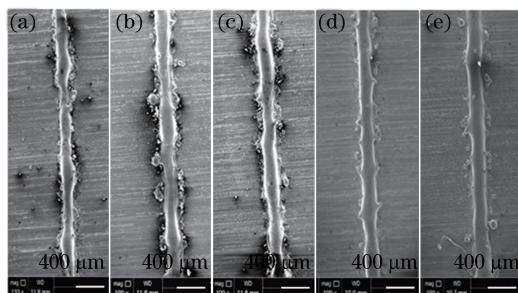


图 1 不同激光功率下的单道形貌。

(a) 250 W;(b) 300 W;(c) 350 W;(d) 400 W;(e) 450 W

Fig. 1 Single-channel morphologies under different laser

powers. (a) 250 W; (b) 300 W; (c) 350 W;

(d) 400 W; (e) 450 W

通过分析可知,在铺粉层厚度和扫描速度等一定的条件下,当激光功率较小时,输入的能量较小,金属粉末的熔化量也相对较少,导致所形成的熔池尺寸较小^[14];未熔化的金属粉末在冷却时会形成不连续的熔池,影响熔融层的外形,增大了熔融层的表面粗糙度。随着激光功率的增大, L_{LED} 也逐渐增大,形成的熔池更大,熔体的流动性更强并具有更好的润湿性和铺展能力,不连续熔滴减少,熔融层的外形更加光滑、美观。

3.1.2 扫描速度的影响研究

当激光功率为 $P=350$ W 时,其他工艺参数保持不变,扫描速度依次采用 800,1000,1200,1400,1600 mm/s 进行实验,得到的单道形貌如图 2 所示。由图 2 可以看出,随着扫描速度的增大,单道形貌的熔宽尺寸逐渐减小,甚至出现了不连续的现象。

当其他参数一定时,随着扫描速度的增大, L_{LED} 逐渐减小,金属粉末吸收的能量也减少^[15]。当扫描速度

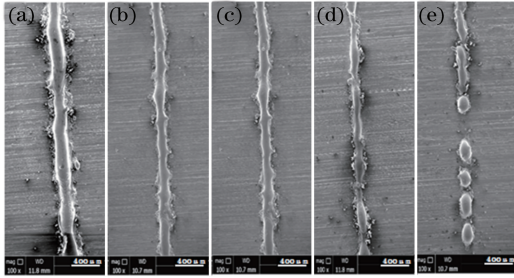


图2 不同扫描速度下的单道形貌。

(a) 800 mm/s; (b) 1000 mm/s; (c) 1200 mm/s;
(d) 1400 mm/s; (e) 1600 mm/s

Fig. 2 Single-channel morphologies under different scanning speeds. (a) $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;

(c) $1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) $1400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) $1600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

较小时,激光与金属粉末的相互作用时间长,金属粉末可吸收更多的能量;基板吸收的热量多,熔池的尺寸变大。随着扫描速度的增大,金属粉末吸收的能量不足,熔化量减小,导致熔池内没有足够的金属液,从而熔池成形不均匀。当扫描速度过大时,金属粉末不能充分熔化,液相金属不足以润湿粉末,使得熔道粘结了较多的粉末颗粒,熔道甚至出现断续的情况。

此外,当扫描速度为 800 mm/s 时,发现有明显的飞溅现象;当速度达到 1000 mm/s 和 1200 mm/s

时,飞溅现象有所减少;扫描速度进一步增大至 1400 mm/s 和 1600 mm/s 时,飞溅现象再次增多。分析原因可知,当激光功率一定时,金属粉末在高能量激光的照射下吸收了大量能量,温度上升到熔点以上,有时甚至在沸点以上。在金属气流以及粉层气体受热膨胀的影响下,金属粉末会飞离熔池发生飞溅。飞溅主要受以下两方面因素影响:一是金属粉末的气化量;二是金属蒸气从熔池溢出的溢出量。当扫描速度较小时,金属粉末发生大量气化,飞溅现象明显;随着扫描速度的增大,金属气化量减少,且大部分溢出,飞溅现象减少;而当扫描速度过大时,虽然金属粉末气化量少,但是由于熔池反应速度较快,大部分金属蒸气来不及溢出,飞溅现象又明显增多。

3.2 多层多道成形研究

在单层单道的实验基础上,进行了多层多道实验,分析工艺参数在成形过程中的影响规律,实验所采用的工艺参数见表 3。

3.2.1 激光功率的影响研究

在扫描速度 $v = 400 \text{ mm/s}$, 保持扫描方式、扫描间距等参数不变的情况下,激光功率分别采用 250, 350, 400, 450 W 进行实验,得到的成形形貌如图 3 所示。

表 3 多层多道成形参数

Table 3 Multi-layer multi-channel forming parameters

Parameter	Laser power /W	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Scanning pitch / μm	Scanning method
Item	250-450	300-1600	40-80	Z-shaped orthogonal scanning, S-shaped orthogonal scanning, single X-direction scanning

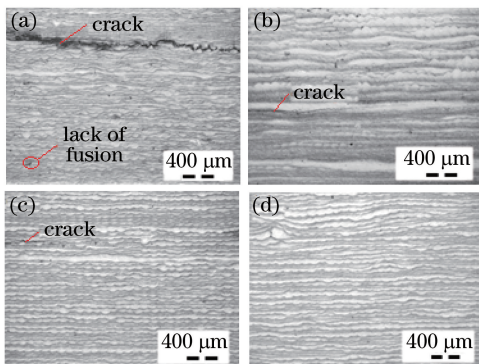


图3 激光功率对成形件质量的影响。(a) 250 W;
(b) 350 W; (c) 400 W; (d) 450 W

Fig. 3 Effect of laser power on forming part quality.

(a) 250 W; (b) 350 W; (c) 400 W; (d) 450 W

由图 3 可知,在 250~450 W 之间,随着激光功率的增大,试样缺陷显著减少,当激光功率达到

450 W 时,试样成形良好,基本没有可见的缺陷。分析原因可知,当激光功率较小时,金属粉末吸收的能量较少,难以使全部金属粉末完全融化,会有部分粉末来不及融化而产生未熔合缺陷。随着激光功率的增大,未熔合现象得到明显的改善,并且由于加工过程是快速加热和冷却过程,内部有较大的残余应力,激光功率增大将增加冷却凝固时间,能在一定程度上减小内应力,抑制裂纹的产生。

3.2.2 扫描速度的影响研究

设定功率为 $P = 450 \text{ W}$, 扫描速度分别选择 300, 400, 500, 800, 1200 mm/s 进行实验,得到 5 个试样成形形貌,如图 4 所示。结果表明,随着扫描速度的增大,试样中气孔、裂纹等缺陷明显增多。当扫描速度为 1200 mm/s 时,甚至出现了贯穿整个试件的裂纹。

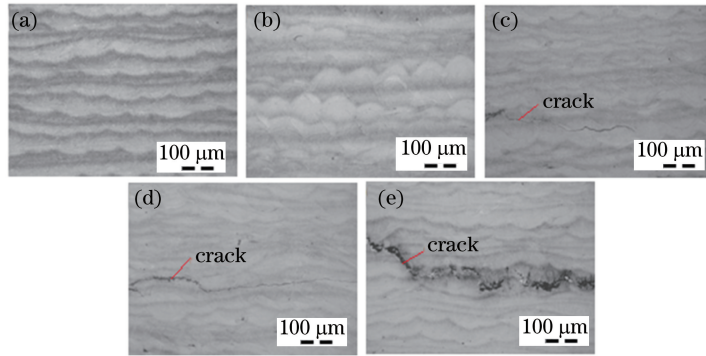


图4 扫描速度对成形件质量的影响。(a) 300 mm/s;(b) 400 mm/s;(c) 500 mm/s;(d) 800 mm/s;(e) 1200 mm/s

Fig. 4 Effect of scanning speed on forming part quality.

(a) $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d) $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (e) $1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

通过分析可知,扫描速度主要影响加工过程中激光与粉末之间的作用时间。当扫描速度较小时,金属粉末充分熔化,无明显缺陷产生;熔池的温度梯度较小,残余应力较小。随着扫描速度的增大,金属粉末及基体的加热时间减少,粉末吸收的能量减少,甚至可能有部分金属粉末未熔化或熔化不充分,形成未熔合或夹渣缺陷。当内应力较大时,会在缺陷处形成应力集中,造成裂纹的产生。

3.2.3 扫描间距的影响研究

在激光功率 350 W 和扫描速度 1000 mm/s 不变的情况下,分析扫描间距对成形件质量的影响规律。扫描间距是两相邻扫描激光束之间的距离,在加工过程中将影响成形件熔道之间的搭接率。由于激光光斑内的能量呈高斯分布,光斑中心的能量密度最大,离中心较远的边缘处的能量密度较小。为了保证金属粉末能够完全熔化,一般扫描间距应比激光光斑直径小,使熔道之间有一定的搭接。扫描间距不同,则搭接率不同,搭接率可定义如下

$$\eta = \frac{D - S}{D}, \quad (2)$$

式中 η 为熔道之间的搭接率, D 为熔池的宽度, S 为扫描间距。在激光功率和扫描速度不变的条件下,熔宽 D 基本为定值,增大扫描间距时,搭接率将减小。

在本次实验中,扫描间距 S 分别设定为 40, 60, 70, 80 μm ,图 5 所示分别给出了 4 种扫描间距下试样的成形形貌。可以看出,当扫描间距 S 为 40 μm 时,试件中有较多的气孔;当扫描间距 S 为 60 μm 和 70 μm 时,试件的气孔有所减少;而当扫描间距 S 为 80 μm 时,试件出现了孔洞和裂纹。

通过分析可知,当扫描间距 S 为 40 μm 时, $L_{\text{LED}} = 218.75 \text{ J}/\text{mm}^3$,此时扫描间距较小,搭接率

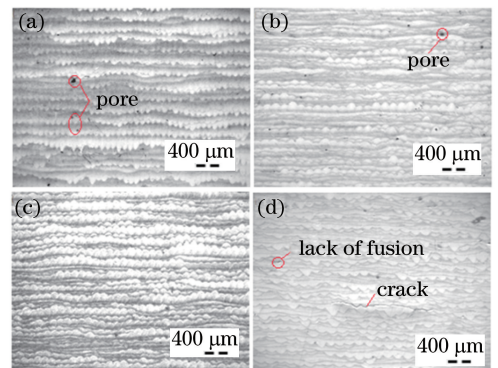


图5 扫描间距对成形件质量的影响。

(a) 40 μm ; (b) 60 μm ; (c) 70 μm ; (d) 80 μm

Fig. 5 Effect of scanning spacing on forming part quality.

(a) 40 μm ; (b) 60 μm ; (c) 70 μm ; (d) 80 μm

大,熔道之间容易发生重熔现象。重熔区域的金属粉末被激光光束扫描之后,又会被相邻的激光光束再一次扫描,导致重熔区熔池内的金属液容易发生过热,产生气体。这些气体在熔池内部来不及溢出,最终在试件内部形成气孔。另一方面,重熔区熔池的金属液具有较高的能量,极易粘附周围熔道未熔的金属粉末,周围熔道因为金属液不足而发生未熔合。当扫描间距增大至 60 μm 和 70 μm 时,相邻熔道之间的搭接较小,熔道之间的重熔现象相对较少。在该范围内,较大的能量可使金属粉末完全熔化,但又不会使熔池内的金属液发生过烧产生气体。因此,在该参数下成形件的气孔较少,成形质量较好。当扫描速度进一步增大到 80 μm 时, L_{LED} 减小为 $109.38 \text{ J}/\text{mm}^3$,熔道之间的搭接率过小,重熔率较小使熔道激光能量不足,导致该范围内的金属粉末不能完全熔化。这些未完全熔化的金属粉末的黏度较大,在冷却凝固过程中易形成球化颗粒。球化颗粒间易产生

孔洞,并易在内应力的作用下成为裂纹源,导致裂纹的产生。

3.2.4 扫描方式的影响研究

加工过程中的扫描方式对零件的成形质量有很

大的影响,不同的扫描方法下会有不同的热循环过程,从而影响零件的应力状态和组织性能^[16]。采用三种扫描方式:单 X 方向扫描、Z 型正交扫描、S 型正交扫描,其扫描路径如图 6 所示。

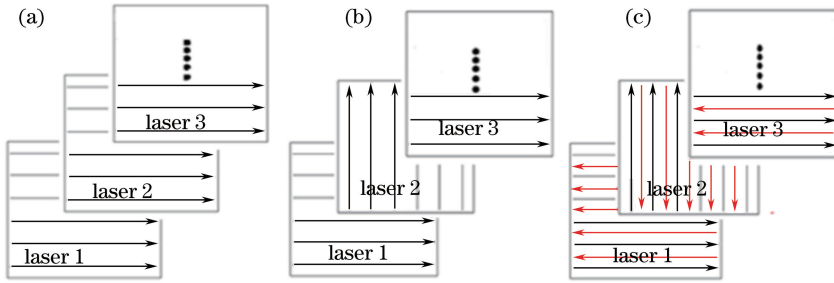


图 6 SLM 扫描方式示意图。(a) 单 X 方向扫描;(b) Z 型正交扫描;(c) S 型正交扫描

Fig. 6 Schematic of SLM scanning strategy. (a) Single X direction scanning; (b) Z-shaped orthogonal scanning; (c) S-shaped orthogonal scanning

图 7 所示为不同扫描方式下的成形件形貌。分析可知,S 型正交扫描的试件中只有少量气孔,Z 型

正交扫描的试件中的气孔较多,单 X 方向扫描的试件中甚至出现了裂纹,试件的成形质量较差。

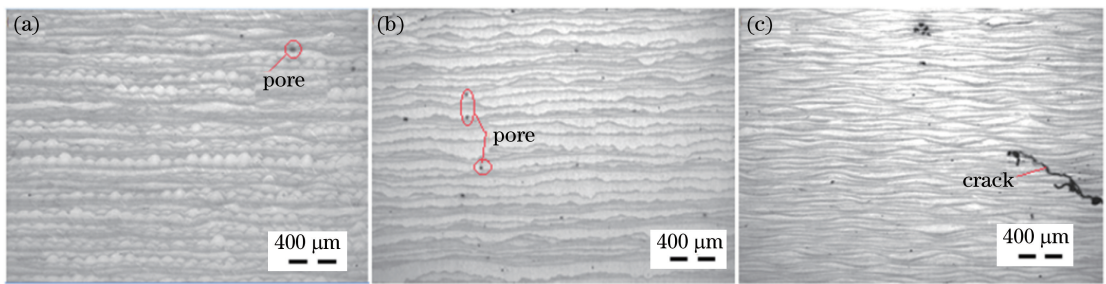


图 7 不同扫描方式下的成形质量。(a) S 型正交扫描;(b) Z 型正交扫描;(c) 单 X 方向扫描

Fig. 7 Forming quality under different scanning modes. (a) S-shaped orthogonal scanning; (b) Z-shaped orthogonal scanning; (c) single X direction scanning

在单 X 方向扫描方式下,各层的扫描线重复叠加,形成明显的波形结构,使得熔道高低起伏,造成熔道上各处金属粉末熔化的难易程度不一,金属熔池不稳定,有些位置易于吸收粉末,从而在周围形成孔洞。同时,单一方向堆积会造成较大的残余应力累积,在缺陷处起裂,形成裂纹。在 Z 型正交扫描方式下,下层形成波纹结构,造成熔道高低起伏;后一层的正交方向扫描能够减轻熔道的波纹效应,使金属粉末熔化时更为均匀,减少了孔洞等缺陷的产生,成形质量有所改善。S 型正交扫描相对于 Z 型正交扫描,在扫描过程中增加了层错扫描。层错扫描的扫描线相互错开,没有叠加在一起,能够改善上一层扫描形成的缺陷,金属液能够在上一层熔道的凹陷处润湿基体,使熔融层之间的连接更为紧密。S 型正交扫描方式可以改善应力的分布,减小残余应力的累积。因此相对于 Z 型正交扫描,S 型正交扫描的成形件质量更好。

4 结 论

以 H13 模具钢为对象,研究了 SLM 过程中激光功率、扫描速度、扫描间距和扫描方式对成形及缺陷的影响规律,得到以下结论。

1) 通过对单层单道工艺以及多层多道工艺的研究发现,在 SLM 成形过程中,激光功率、扫描速度都会影响到成形质量。在相同的扫描速度下,激光功率在一定范围内增加会改善成形过程中的未熔合等现象,从而提高成形质量;在相同的激光功率下,扫描速度的增加能够减少热输入,从而改善成形件的残余应力状态,但当扫描速度过大时,能量输入不足会造成未熔合等缺陷。

2) 在多层多道成形中,扫描间距过小时易发生过烧,形成气孔缺陷;扫描间距过大时,易产生未熔合缺陷。同时,相对于单 X 方向扫描和 Z 型正交扫描,S 型正交扫描的成形质量最优。

3) 对 H13 钢粉末而言,优化的工艺参数范围为:激光功率 400 ~ 450 W,扫描速度 400~500 mm/s,扫描间距 60~70 μm ,光斑直径 100 μm ,铺粉厚度 40 μm 。

参 考 文 献

- [1] Liu Y S, Han P L, Hu S F, *et al.* Development of laser additive manufacturing with metallic materials and its application in aviation engines[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 454(10): 62-67.
刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2014, 454(10): 62-67.
- [2] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2015, 45(9): 1111-1126.
林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. *中国科学:信息科学*, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [3] Xiao Z N, Liu T T, Liao W H, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting after heat treatment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0902001.
肖振楠, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金热处理后微观组织和力学性能[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0902001.
- [4] Qian D Y, Chen C J, Zhang M, *et al.* Study on microstructure and micro-mechanical properties of porous aluminum alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403002.
钱德宇, 陈长军, 张敏, 等. 选区激光熔化成形多孔铝合金的显微组织及微观力学性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403002.
- [5] Pan A Q, Zhang H, Wang Z M. Molten pool microstructure of Ni-based single crystal superalloys fabricated by selective laser melting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071402.
潘爱琼, 张辉, 王泽敏. 选区激光熔化镍基单晶高温合金的熔池显微组织[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071402.
- [6] Lin H, Yang Y Q, Zhang G Q, *et al.* Tribological performance of medical CoCrMo alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1114003.
林辉, 杨永强, 张国庆, 等. 激光选区熔化医用钴铬钼合金的摩擦性能[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1114003.
- [7] Yang Q, Lu Z L, Huang F X, *et al.* Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 507(12): 26-31.
杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2016, 507(12): 26-31.
- [8] Yin H, Bai P K, Liu B, *et al.* Present situation and development trend of selective laser melting technology for metal powder[J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(1): 140-144.
尹华, 白培康, 刘斌, 等. 金属粉末选区激光熔化技术的研究现状及其发展趋势[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(1): 140-144.
- [9] Liu F C, Lin X, Huang C P, *et al.* The effect of laser scanning path on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nick-base superally Inconel 718[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(13): 4505-4509.
- [10] Song B, Dong S J, Zhang B C, *et al.* Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V[J]. *Materials & Design*, 2012, 35(3): 120-125.
- [11] Wang P, Huang Z H, Qi W J, *et al.* Effect of the 3D printing process parameters based on SLM technology on the structure defect of 316 stainless steel[J]. *Welding Digest of Machinery Manufacturing*, 2016, 23(2): 2-7.
王沛, 黄正华, 戚文军, 等. 基于 SLM 技术的 3D 打印工艺参数对 316 不锈钢组织缺陷的影响[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2016, 23(2): 2-7.
- [12] Wang D, Yang Y Q, Huang Y L, *et al.* Impact of inter-laser scan strategy on quality of direct fabrication metal parts in SLM process[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 447-451.
王迪, 杨永强, 黄延录, 等. 层间扫描策略对 SLM 直接成型金属零件质量的影[J]. *激光技术*, 2010, 34(4): 447-451.
- [13] Laakso P, Riipinen T, Laukkanen A, *et al.* Optimization and simulation of SLM process for high density H13 tool steel parts[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83(9): 26-35.
- [14] Wang L, Wei Q S, He W T, *et al.* Influence of powder characteristic and process parameters on the SLM formability[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*,

- 2012, 40(6): 20-23.
- 王黎, 魏青松, 贺文婷, 等. 粉末特性与工艺参数对 SLM 成形的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 20-23.
- [15] Liu J H, Shi J G, Li Y. Study on selective laser melting process and forming of AlSi10Mg alloy powder[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2015, 25(5): 509-515.
- 刘锦辉, 史金光, 李亚. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末的成形工艺[J]. 黑龙江科技大学报, 2015, 25(5): 509-515.
- [16] Deng S S, Yang Y Q, Li Y, *et al.* Planning of area-partition scanning path and its effect on residual stress SLM molding parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202003.
- 邓诗诗, 杨永强, 李阳, 等. 分区扫描路径规划及其对 SLM 成型件残余应力分布的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202003.