

工艺参数对选区激光熔化中成形形变的影响

吴懋亮*, 孙翰霆, 孙玄镨, 刘中俊, 李汝润

上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 200090

摘要 对采用选区激光熔化(SLM)技术打印 316L 不锈钢进行数值模拟,并研究了零件在水平面内的摆放角度和竖直面内的倾斜角度对 SLM 过程热力行为的影响。研究表明:对尺寸为 50 mm×5 mm×10 mm 的长条形加工零件采用短直线的扫描策略,在零件摆放的水平面内,当长边与刮刀之间的夹角为 45°时,由热应力产生的形变量最小;在竖直面内,零件与垂直方向的夹角为 15°时产生的形变量最小;零件在基板上和取下后的形变量会产生较大的差异,取下后形变量将增大 70%左右。

关键词 激光光学; 选区激光熔化; 热力场; 倾角; 形变

中图分类号 TG655; TG142.33; TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.051403

Effect of Process Parameters on the Deformation of Selective Laser Melting

Wu Maoliang*, Sun Hanting, Sun Xuankai, Liu Zhongjun, Li Rurun

College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China

Abstract Numerical simulations on 316L stainless steel is conducted using selective laser melting (SLM) technology, and the effects of the placement angle of the printed parts in the horizontal plane and the inclination angle in the vertical plane on the thermal behavior of the SLM process are investigated. By adopting the short straight-line scanning strategy, the research results show that for a bar with dimensions of 50 mm × 5 mm × 10 mm, when the angle between the longer side of the bar and the scraper is 45°, the deformation generated by thermal stress is the smallest. In the vertical plane, the corresponding deformation generated when the angle between the bar and the vertical direction is 15° is the smallest as well. The deformations on the substrate prior and subsequent to the removal exist a considerable difference, which amounted to approximately 70%.

Key words laser optics; selective laser melting; thermodynamic field; angle; deformation

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

选区激光熔化(SLM)技术是一种新兴的金属零件直接成形技术,采用 SLM 加工时,根据导入的路径信息控制激光器的振镜系统,使激光有选择性地扫描铺粉层,从而熔化凝固金属粉末,得到零件的一个截面层。重复上述过程,零件的截面层逐渐累积直至形成整个零件。近年来 SLM 技术已经被广泛应用于航空航天、汽车及生物医疗等领域,为工业产品的研发、设计与制造提供了新的思路^[1]。与传统制造技术相比,采用 SLM 技术

加工的零件具有结构复杂、材料利用率高和短周期^[2]等优势。

SLM 过程中大多采用单光纤激光器或者多路光纤激光器,成形材料范围广泛(单一金属粉末、复合粉末、高熔点难熔合金粉末等),成形过程中金属粉末能达到完全熔化形成冶金结合,理论上可以制得任意形状的致密度达到 99.999%、精度达到 0.05% 的金属成形件^[3-4]。但是由于成形过程中激光束的功率密度很高,扫描速度较快,金属粉末在极短时间内经历了固-液-固状态的转变,导致成形过程中零件各部分温度分布不均匀、温

收稿日期: 2019-07-03; 修回日期: 2019-08-07; 录用日期: 2019-09-02

* E-mail: wumaoliang@shiep.edu.com

度梯度大,从而产生巨大的热应力,在成形件中产生的残余应力甚至能导致成形件翘曲变形。因此,对 SLM 的成形过程进行数值模拟,可以揭示其热力场的分布规律,这对不同形状的复杂零件选择合适的工艺参数和适宜的材料特性,提高零件成形的成功率,增强成形件力学特性,降低打印成本具有重要的意义。

本文采用 316L 不锈钢材料,对零件在基板上的不同放置角度的 SLM 成形零件的热力场进行研究分析。同时,通过对 SLM 成形过程的三维瞬态热力场的分布变化进行数值模拟,研究了在水平方向上打印物体与刮刀倾角,以及在垂直方向上打印物体与基板的倾斜角度对 SLM 过程热力行为的影响。

2 模拟与结果分析

2.1 热力场模拟

该模拟模式是通过预测热循环如何影响零件内每一层的应变积累来估算最高精度。采用热棘轮效应衍生出的热棘轮算法^[5]进行模拟,计算时将应力分解为初级应力和次级应力两部分。初级应力可以理解为稳定不变的应力,随着过程形变逐渐增加,作用在零件上的初级应力为常数,而次级应力在这个过程中循环变化。首先在熔池凝固时为零件成形的各个位置分配初级应变,每当零件在当前层被加热到高于温度阈值(打印材料绝对熔化温度的 40%)时,该层就会发生应变累积。一旦当前层重新熔化,应变将被重置为初级应变。温度加热到阈值以上而不熔化的次数越多,应变累积就越高。当前层位置的温度通过 ANSYS 软件中的温度场“生死单元法”模拟得出。过程温度控制方程、高斯热源模型、边界条件、初始条件和相变潜热的方程^[6]可表示为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (1)$$

表 1 加工参数

Table 1 Machining parameters

Layer thickness L_1/mm	Slicing stripe width $L_2/\mu\text{m}$	Hatch spacing $L_3/\mu\text{m}$	Power P/W	Scanning speed $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Baseplate temperature $T/^\circ\text{C}$
0.04	8	200	295	860	60

$$q = \frac{2AP}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = T_0, \quad (3)$$

$$q_c = \alpha(T - T_0), \quad (4)$$

$$q_r = \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4), \quad (5)$$

$$H = \int \rho c(T) dT, \quad (6)$$

式中: ρ 为 316L 不锈钢粉末的密度; c 为比热容; T 为温度场的分布函数; t 为激光扫描时间; Q 为内热源; k 为导热系数; P 为激光功率; A 为 316L 粉末对激光的吸收率,取为 0.83; r_0 为光斑半径; r 表示粉末上任一点到光斑中心的距离; T_0 为环境温度,选取为 25°C ; q_c 为对流热量; q_r 为热辐射; α 为表面对流系数; σ 为 Boltzmann 常数, ε 为热辐射系数; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; H 为热焓。

使用热棘轮算法计算得出零件内每个位置的循环次级应变,根据弹塑性基本理论,假设材料的变形遵循 von Mises 准则和 Prandtl-Reuss 塑性流动准则,即

$$\dot{\varepsilon}_{\text{total}} = \dot{\varepsilon}_{\text{elastic}} + \dot{\varepsilon}_{\text{plastic}} + \dot{\varepsilon}_{\text{thermal}}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] = \bar{\sigma}^2, \quad (8)$$

$$\sigma_0 = \sigma_y + K \varepsilon_{\text{total}}, \quad (9)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{\text{total}}$ 为次级应力; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为 3 个方向上的主应力; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; σ_y 为屈服极限; σ_0 为总应力; K 为材料硬化系数^[7]。对应变进行计算,即可得到局部应变量和局部扫描方向的各向异性应变。

2.2 材料参数与打印模拟参数

本次模拟的零件为 $50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的长条形零件,由于 SLM 打印所产生的翘曲形变主要集中在垂直方向,因此选取长条形零件进行模拟,以更加清晰地突显这一特征。所划分的网格单元边长为 0.4 mm 。在 SLM 打印机的切片填充软件中选取短直线型的激光扫描策略,每层扫描方向逆时针旋转 30° 。

根据实验结果以及相关文献,采用的加工参数及 316L 材料参数分别如表 1 和表 2 所示。

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

Powder absorptivity	Solid absorptivity	Thermal expansion coefficient α / K^{-1}	Elastic ratio E / GPa	Poisson ratio	Material yield strength R / MPa
0.76	0.45	0.0000165	185	0.25	530

对零件在水平和竖直方向上不同倾斜角度的打印方式进行模拟,零件的摆放方式如图1所示,其中在水平面内零件与刮刀运动方向之间的夹角为 α ,在竖直方向上零件与基板之间的夹角为 β 。在两个方

向上各选取7个角度:0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°,进行7组共计49次模拟,得到零件从基板切除前、后两种状态下热应力产生的形变情况。零件未被切除状态下, z 轴方向的最大形变量如表3所示。

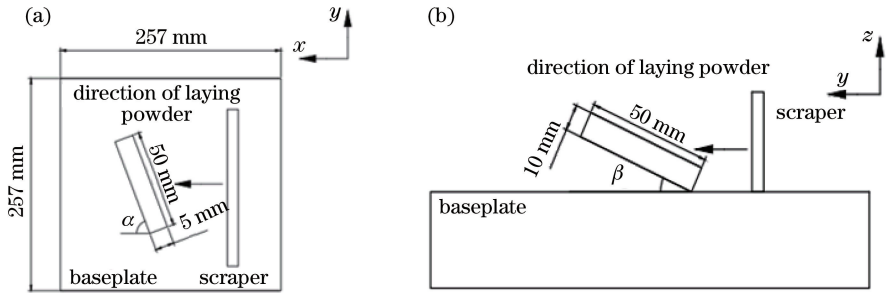


图1 零件摆放方式。(a)水平方向;(b)竖直方向

Fig. 1 Placement of part. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

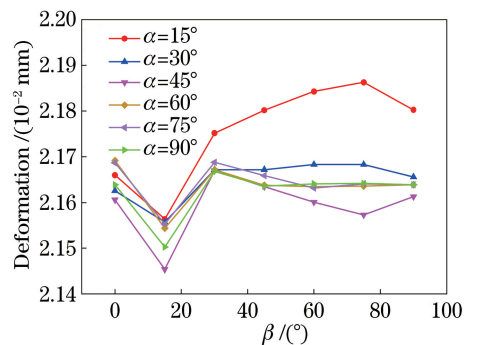
表3 不同倾斜角度下的最大形变

Table 3 Maximum deformation at different angles

$\beta / (^{\circ})$	Maximum deformation $/(10^{-2} \text{ mm})$						
	$\alpha = 0^{\circ}$	$\alpha = 15^{\circ}$	$\alpha = 30^{\circ}$	$\alpha = 45^{\circ}$	$\alpha = 60^{\circ}$	$\alpha = 75^{\circ}$	$\alpha = 90^{\circ}$
0	2.3769	2.1660	2.1626	2.1606	2.1692	2.1687	2.1639
15	2.6802	2.1564	2.1557	2.1454	2.1544	2.1553	2.1503
30	2.8157	2.1752	2.1672	2.1670	2.1672	2.1688	2.1668
45	2.7225	2.1802	2.1672	2.1635	2.1638	2.1659	2.1636
60	2.2096	2.1843	2.1683	2.1601	2.1635	2.1632	2.1641
75	1.9515	2.1863	2.1683	2.1573	2.1636	2.1641	2.1642
90	1.5491	2.1803	2.1656	2.1613	2.1639	2.1639	2.1639

由表3可知,当 $\alpha = 0^{\circ}$ 时,改变零件与基板之间的夹角,零件的最大形变值与其余6组相差较大并且变化趋势不相同,因此对该组数据进行单独分析。竖直方向上其余6组($\alpha = 15^{\circ}$ 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90°)摆放角度下零件的最大形变折线如图2所示。水平方向上7组($\beta = 0^{\circ}$ 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90°)倾斜角度下零件的最大形变折线如图3所示。

由图2可知,在竖直方向上,随着倾角的增大,6组摆放角度下零件的最大形变呈现先减小再增大,最后缓慢减小的趋势。当零件与基板的倾角 $\beta = 15^{\circ}$ 时,6组摆放角度下零件的最大形变都最小。此外,当水平方向上倾角 $\alpha = 45^{\circ}$ 时,零件的最大形变最小,为0.021454 mm。值得注意的是,倾角 β 在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围内,零件与基板之间倾角的改变对零件形变的影响较大。然而,倾角 β 在 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内,零件形变量的大小没有很大的差别,即在该范围

图2 竖直方向上不同 β 的形变Fig. 2 Deformation of different β at vertical direction

内倾角对打印过程的形变量没有显著影响。主要原因是:当倾斜角较小时,成形过程中一部分热量沿着竖直方向扩散,还有一部分会沿着水平方向扩散,这样就会增加一个横向应力^[8]。此外,在竖直方向上,当前层打印时的热量绝大部分是通过已经成形的部

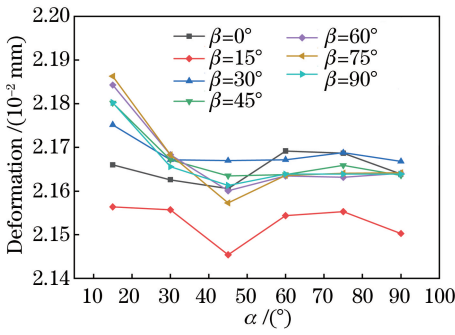


图 3 水平方向上不同 α 的形变

Fig. 3 Deformation of different α at horizontal direction

分零件进行传递,该部分零件为实体固体零件;在水平方向上,当前层是通过与周边接触的金属 316L 粉末进行热量传递,然而粉末的热传导效果相对较差,随着在竖直方向上倾角的逐渐增大,零件每层打印的水平面积逐渐减小,相对于 $30^\circ \sim 90^\circ$, $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内面积变化率较大,因此累积的热应力越大,即角度 β 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时零件与基板之间倾角的改变对零件形变的影响较大,在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内对形变量的影响较小。同时,由于倾角较小的情况下积累了较多的热应力,应力一旦释放就容易导致轮廓边缘出现较大的形变,这也解释了模拟图中形变较大的位置在底部和顶部的边缘处,并且向内部延伸。

随着零件(在基板上)与刮刀之间的倾角 α 的改变,7 组倾角下零件的最大形变如图 3 所示。零件最大形变的变化趋势与图 2 中改变倾角 β 的零件最大形变的变化趋势相似,即最大形变呈现先减小再增大,最后缓慢减小的变化趋势。当倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时,零件产生的最大形变量最小。值得注意的是,当竖直方向上倾角 $\beta = 15^\circ$ 时,零件的最大形变量最小,这与改变竖直方向倾角 β 时,水平方向倾角 $\alpha = 45^\circ$ 对应最小的零件最大形变相一致。此外,倾角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,倾角的大小与形变量有较大关系。这可能是当倾角为 45° 时,铺粉时刮刀与零件的接触面小^[9],减小了磕碰的概率并能将零件边缘铺粉相对更均匀,由于热应力多数集中在零件边缘^[10],因此边缘处出现最大形变量差异。

从表 3 可以清楚地看到,当 $\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ$ 时,零件最大形变值最小,仅有 0.0155 mm。零件在该角度下的模拟结果如图 4 所示,其中 A 面正对着刮刀, C 面是顶面, B 是侧面。然而,在此位置下 C 面上最大形变值虽然最小,但在 A 面上却产生了较大的形变。此外, A 面不仅在零件表面上面积占比最大,而且其方向与刮刀的铺粉方向垂直,这可能会导

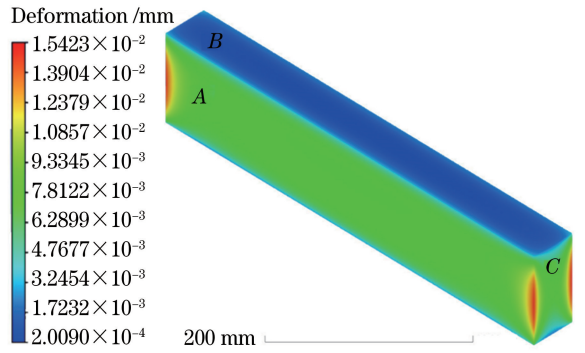


图 4 $\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ$ 的热应力模拟结果

Fig. 4 Thermal stress simulation of $\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ$

致零件在竖直方向上与刮刀发生碰撞。当高温的金属与刮刀接触时会导致刮刀局部熔化变形,从而导致之后铺粉效果变差,最终打印失败。

在相同角度等工作参数下对零件切割前、后的形变量进行比较,从零件切割前与切割后的形变量中各选取 49 个数据,结果如图 5 所示。可以看出,两条折线的变化趋势基本相似,经过计算得出切割后的形变量比切割前的形变量大 70%,这表明在零件切割过程中,零件与基板交界处的部分残余应力被释放出来,并累积在零件上,使其再一次产生形变,继而增大了翘曲的程度,同时降低了零件的屈服强度、疲劳强度和耐腐蚀性能^[11-12],严重时会导致零件的结构损坏。尤其对于复杂零件的打印,这部分应力的释放更容易导致零件产生明显变形,从而导致打印失败。目前,应力退火工艺虽然可以消除零件内部少量的残余应力,但高温加热会引起零件的显微组织结构发生变化^[13-14]。

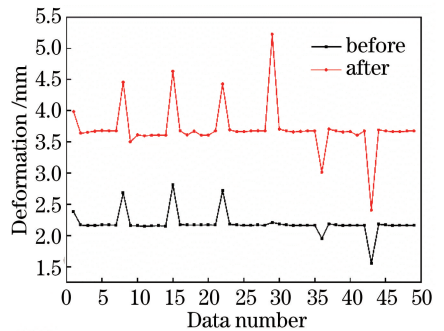


图 5 相同角度的切割前、后的形变

Fig. 5 Deformation before and after cutting with the same angle

3 实验验证

采用易加三维 EP-M250 金属 3D 打印机进行实验,选取的工艺参数与仿真计算时相同,材料选取

316L 不锈钢粉末, 根据模拟结果进行两组实验, 一组实验的工艺参数为 $\beta=0^\circ$, $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, 另一组实验的工艺参数为 $\alpha=45^\circ, \beta=$

$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, 打印结果如图 6 所示。使用千分尺对零件进行形变测量, 结果如表 4 和表 5 所示。

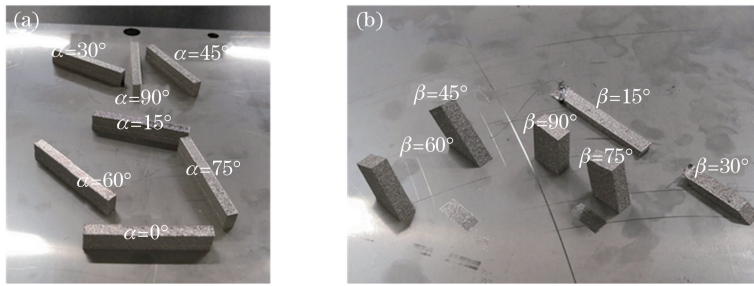


图 6 两组实验的结果。(a) $\beta=0^\circ$; (b) $\alpha=45^\circ$

Fig. 6 Experimental results of two groups. (a) $\beta=0^\circ$; (b) $\alpha=45^\circ$

表 4 $\beta=0^\circ$ 时的最大形变

Table 4 Maximum deformation at $\beta=0^\circ$

$\alpha / (^\circ)$	0	15	30	45	60	75	90
Deformation / (10^{-2} mm)	5.038	5.036	5.034	5.019	5.024	5.025	5.026

表 5 $\alpha=45^\circ$ 时的最大形变

Table 5 Maximum deformation at $\alpha=45^\circ$

$\beta / (^\circ)$	0	15	30	45	60	75	90
Deformation / (10^{-2} mm)	5.019	5.007	5.009	5.015	5.018	5.020	5.021

由表 4 和表 5 的数据可知, 实验结果的整体趋势与模拟结果相同, 随着 α 从 0° 增大到 90° , 最大形变量先减小再增大, 且在 45° 时最大形变量最小。同时随着垂直方向的倾角 β 从 0° 增大到 90° , 最大形变量先减小再增大, 且在 15° 时最大形变量最小。然而从图 6 可以看到, 当 $\beta=15^\circ, 30^\circ$ 时, 所打印的零件出现了严重变形, 为了防止刮刀被高温零件熔化破坏而导致铺粉效果较差影响其他零件的打印, 因此终止了这两个零件的打印。这主要是因为在该打印参数时倾角较小, 粉末支撑区域的范围较大, 但粉末对零件打印部分的支撑能力较弱, 热传导效率较低, 因此在实际打印过程中产生了明显的形变, 影响打印的进行。但经过测量, 已打印出的该角度的部分形变却是最小的, 因此可以考虑在打印参数 $\beta=15^\circ, 30^\circ$ 的条件下, 增加部分支撑, 以保证零件可以以最小的形变量成形。

4 结 论

在竖直面内, 零件与基板之间的倾角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内对零件的变形量有着较大的影响, 在 15° 时零件的最大形变量最小; 在水平面内, 零件与刮刀之间的倾角在 45° 时零件的最大形变量最小; 在打印的零件与基板之间的倾角在 30° 以内时需要添加支

撑; 对基板上的零件进行切割, 会使得零件的翘曲变形量增加 70% 左右, 该过程的优化对打印结果有着积极的影响。本实验结果可为金属零件 SLM 打印和切割后处理方面的优化提供参考, 以提高零件打印成功率。

参 考 文 献

- [1] Yang Z, Li J Y, Gao X H, et al. Simple descriptions of the characteristics and applications of additive manufacturing technology in manufacture [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(3): 189-192. 杨泽, 李建永, 高兴华, 等. 浅析增材制造技术在制造业中的特点与应用 [J]. 机床与液压, 2017, 45(3): 189-192.
- [2] Wen S F, Ji X T, Zhou Y, et al. Development status and prospect of selective laser melting of mould steels [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011404. 文世峰, 季宪泰, 周燕, 等. 激光选区熔化成形模具钢的发展现状及前景 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011404.
- [3] Shi Y S, Lu Z L, Zhang W X, et al. The technology and equipment of selective laser melting [J]. China Surface Engineering, 2006, 19(z1): 150-153. 史玉升, 鲁中良, 章文献, 等. 选区激光熔化快速成

- 形技术与装备[J]. 中国表面工程, 2006, 19(z1): 150-153.
- [4] Yang Y Q, Chen J, Song C H, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011401.
杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011401.
- [5] Jeya R P K, Bouzid A H. Effect of thermal ratcheting on the mechanical properties of Teflon and fiber based gasket materials [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(13): 47265.
- [6] He B B. Numerical simulation and experimental investigation on thermal-mechanical behavior during selective laser melting of TiNi shape memory alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
何贝贝. 选区激光熔化 TiNi 形状记忆合金热-力耦合数值模拟及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [7] Dixit U S, Joshi S N, Davim J P. Application of lasers in manufacturing [M]. Singapore: Springer, 2019.
- [8] Wu G L, Liu T T, Zhang C D, et al. Research on forming quality of overhanging structure by selective laser melting [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(13): 1810-1815.
吴根丽, 刘婷婷, 张长东, 等. Ti6Al4V 激光选区熔化成形悬垂结构的质量研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(13): 1810-1815.
- [9] Jiang X F, Xiong Z Y, Wang T H, et al. Investigation on the mechanical properties of 316L metal powders by SLM [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2017, 45(5): 510-515.
姜献峰, 熊志越, 王同鹤, 等. 选区激光熔化成形中零件成形角度对其机械性能的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(5): 510-515.
- [10] Mugwagwa L, Dimitrov D, Matope S, et al. Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 21: 92-99.
- [11] Mazur M, Brincat P, Leary M, et al. Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93: 881-900.
- [12] Ma T, Liu T T, Liao W H, et al. Fatigue properties of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1102012.
马涛, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 Ti-6Al-4V 疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102012.
- [13] Chen H Y, Gu D D, Dai D H, et al. Microstructure and composition homogeneity, tensile property, and underlying thermal physical mechanism of selective laser melting tool steel parts [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 682: 279-289.
- [14] 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.