

# 离焦量对 3D 打印 18Ni-300 马氏体时效钢组织和力学性能的影响

张佳琪<sup>1</sup>, 王敏杰<sup>1\*</sup>, 刘建业<sup>2</sup>, 牛留辉<sup>2</sup>, 王金海<sup>2</sup>, 伊明扬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

<sup>2</sup>广东汉邦激光科技有限公司, 广东 中山 528427

**摘要** 采用激光选区熔化(SLM)工艺打印 18Ni-300 马氏体时效钢零件,研究了正离焦量对 18Ni-300 成型零件打印质量和力学性能的影响规律。结果表明:当离焦量较小(+1.5 mm)时,功率密度过高,导致熔池内部产生湍流,熔道表面出现明显的球化现象,成型试样内部出现较大的孔隙缺陷,力学性能下降,拉伸断口呈准解理断裂特征;随着离焦量增加,功率密度减小,光斑和熔道随之变宽,改善了试样的性能,试样的拉伸断裂机制转变成塑性断裂;当离焦量为+2.5 mm 时,功率密度适中,熔道之间形成了良好搭接,内部组织均匀,增强了层间结合,试样的硬度和抗拉强度分别为 37.7 HRC 和 1215 MPa;当离焦量增加至+3 mm 以上时,熔道之间的搭接率过大,出现过度堆叠现象,功率密度过低,光斑穿透力减弱,影响了层间结合,试样性能下降。

**关键词** 激光技术; 激光选区熔化; 离焦量; 18Ni-300 马氏体时效钢; 打印质量; 力学性能

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0502004

## Influence of Defocusing Distance on Microstructure and Mechanical Properties of 3D-Printed 18Ni-300 Maraging Steel

Zhang Jiaqi<sup>1</sup>, Wang Minjie<sup>1\*</sup>, Liu Jianye<sup>2</sup>, Niu Liuhui<sup>2</sup>, Wang Jinhai<sup>2</sup>, Yi Mingyang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

<sup>2</sup>Guangdong Hanbang 3D Tech Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528427, China

**Abstract** Herein, 18Ni-300 maraging steel parts were printed using selective laser melting process to examine the influence of positive defocusing distance on the printing quality and mechanical properties of 18Ni-300 forming parts. Results show that the power density is too high for a small defocusing distance (+1.5 mm), causing turbulence in the molten pool and obvious spheroidization is observed on the molten channel surface. Moreover, large pore defects appear inside the formed sample, the mechanical properties deteriorate, and the tensile fracture shows quasi-cleavage fracture characteristics. With an increase in the defocusing distance, the power density decreases and the spot and melting channel become wider, which improves the properties of the samples. Thus, the tensile fracture mechanism transforms into plastic fracture. For +2.5 mm defocusing distance, the power density is moderate, weld channels are well formed, internal structure is uniform, and interlayer bonding is enhanced. The hardness and tensile strength are 37.7 HRC and 1215 MPa, respectively. When the defocusing distance increases to more than +3 mm, the overlap ratio between the melt channels is too large and the over stacking phenomenon occurs. Furthermore, the power density is too low and the spot penetration force is weakened, thereby affecting the interlayer bonding and decreasing the sample performance.

**Key words** laser technique; selective laser melting; defocusing distance; 18Ni-300 maraging steel; print quality; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460

收稿日期: 2019-11-02; 修回日期: 2019-12-08; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51675079)、广东省省级科技计划(2017B090911006)

\* E-mail: zhangcgwwzjq@mail.dlut.edu.cn

# 1 引言

激光选区熔化(SLM)技术是现今使用最广泛的3D打印技术之一。在SLM加工过程中,材料的冷却凝固速率较快,而且打印零件内部组织细小均匀,有利于形成全致密零件<sup>[1]</sup>。已有学者研究发现,SLM打印零件的质量和性能主要受激光工艺的影响,通过优化激光工艺参数,可以获得高质量零件<sup>[2-3]</sup>。迄今为止,研究人员已对激光功率、扫描速度、扫描间距和层厚等激光工艺参数进行了大量研究<sup>[4-5]</sup>,但对离焦量这一参数的研究尚不深入。现今,SLM 3D打印设备多采用动态聚焦装置,需要研究离焦量对SLM成型零件打印质量和性能的影响规律。

SLM打印零件是基于分层叠加原理,由点一线一面一体构成的,而最初形成的点是通过聚焦光斑与粉末共同作用打印出来。影响聚焦光斑的最主要因素就是离焦量的大小。在3D打印过程中,离焦量是指激光焦点到作用物质间的距离。当焦平面位于工件上方时为正离焦,当焦平面位于工件下方时为负离焦。在保证其他激光工艺参数不变的条件下,通过改变离焦量的大小,可以直接影响聚焦光斑,显著改变熔池的成型状态<sup>[6]</sup>。此外,在3D打印过程中,适宜的聚焦光斑不仅有助于保证最终打印零件的尺寸精度,还能提供足够的功率密度,保证粉末充分熔化,形成高致密零件。因此,需要研究离焦量这一激光工艺参数对打印零件质量和性能的影响规律。Bean等<sup>[7]</sup>在不同离焦量下打印了IN718零件,研究了离焦量对打印零件表面粗糙度、致密度和拉伸性能的影响,结果表明,离焦量对打印零件的孔隙率有直接影响。当打印零件内部的孔隙率较高时,虽然打印零件的屈服强度和抗拉强度满足要求,但其延伸率和断面收缩率均较差。Jitka等<sup>[8]</sup>在不同离焦量下对316L不锈钢粉末进行了单熔道试验,并对熔池的形貌进行了分析,结果发现,离焦量对熔池的尺寸和形貌有显著影响:采用负离焦时,聚焦光束呈收敛形式,能量密度过大,易产生较大穿透,导致熔道内部产生蚀孔;相较于负离焦,正离焦对热输入变化的敏感度较低,聚焦光束呈发散形式,SLM过程更加稳定。

18Ni-300马氏体时效钢作为一种高强度、高韧性的合金钢,在金属模具3D打印领域应用广泛,已得到较为深入的研究<sup>[9-10]</sup>。但是,尚未有文献报道离焦量对18Ni-300钢的影响。由于负离焦在实际

应用中主要适用于熔深较大的情况,而SLM打印更宜采用正离焦。因此本文以18Ni-300合金钢粉末为原料,在正离焦量下进行SLM打印,重点分析了正离焦量对成型试样打印质量和力学性能的影响规律,为优化SLM成型工艺提供参考。

## 2 试验条件

### 2.1 试验设备

采用广东汉邦激光科技有限公司生产的HBD-280 3D打印设备进行SLM打印试验。HBD-280打印机采用500 W光纤激光器,激光器波长 $\lambda_0$ 为1070 nm,最小聚焦光斑直径 $\omega_0$ 为50  $\mu\text{m}$ 。根据(1)~(3)式<sup>[7,11]</sup>可以计算出不同离焦量下的光斑半径和功率密度,计算结果如表1所示。

$$Z_r = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda_0}, \quad (1)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_r}\right)^2}, \quad (2)$$

$$P_D = \frac{P}{\pi\omega^2}, \quad (3)$$

式中: $Z_r$ 为瑞利长度; $z$ 为到激光焦点的距离,即离焦量的大小; $\omega$ 为光斑半径; $P$ 为激光功率; $P_D$ 为功率密度。

表1 不同离焦量下的光斑半径和功率密度

Table 1 Spot radius and power density under different defocusing distances

Defocusing distance /mm	Spot radius / $\mu\text{m}$	Powder density / ( $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ )
+1.5	51.04	36.66
+2	51.82	35.56
+2.5	52.82	34.23
+3	54.01	32.74
+3.5	55.39	31.12

### 2.2 试验材料

SLM试验采用气雾化18Ni-300马氏体时效钢粉末为原料,该粉末的化学成分(质量分数,%)为: Ni 18.3, Co 8.9, Mo 4.9, Ti 0.66, Cr 0.12, Al 0.08, Fe余量。粉末粒径为15~45  $\mu\text{m}$ ,粉末松装密度为4.01  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,图1为18Ni-300粉末的微观形貌,粉末主要呈球形和近球形。

### 2.3 工艺参数

SLM试验采用条形分区扫描策略,在激光功率为300 W、扫描速度为1000  $\text{mm}/\text{s}$ 、扫描间距为0.1 mm、层厚为50  $\mu\text{m}$ 的条件下成型尺寸为13 mm $\times$ 13 mm $\times$ 13 mm的18Ni-300马氏体时效

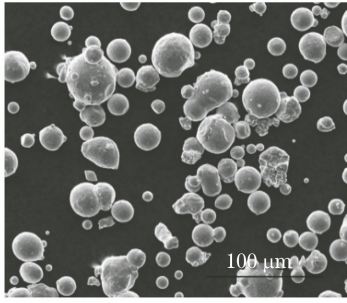


图 1 18Ni-300 马氏体时效钢粉末的微观形貌

Fig. 1 Morphology of 18Ni-300 maraging steel powder

钢块体,用于性能测试和组织分析。

## 2.4 试验方法

采用 Archimedes 法测量成型试样的致密度。通过场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察打印试样的表面形貌。对成型试样进行镶嵌、磨抛后,采用腐蚀溶液 (12 mL H<sub>2</sub>O+2 mL HNO<sub>3</sub>+4 mL HCl) 对成型试样进行腐蚀,腐蚀时间为 60 s,然后使用 CDM-806C 金相显微镜 (OM) 和 SEM 观察试样内部的微观组织。采用 D/Max 2400 型 X 射线衍射仪 (XRD) 进行物相分析。使用 OLS4100 激光共聚焦显微镜测试打印试样的表面粗糙度。采用千分尺分别测量试样在 X、Y、Z 方向的尺寸,每个试样的每个方向测量三次求平均值,并计算出尺寸偏差。采用 DigiRock DR3 洛氏硬度仪测试试样的表面硬度。依据 GB/T 228—2010 设计用于常温拉伸测试的棒状试样。采用 C51.105 型电子万能拉伸试验机在室温下进行测试,拉伸速度为 5 mm/min。拉伸试验完成后,采用 SEM 对断口形貌进行观察和分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 离焦量对表面粗糙度的影响

SLM 打印过程是一个由层及体的过程,单层成型是多层块体成型的基础。影响单层表面粗糙度的最主要因素是熔道之间的搭接状况,通过改变熔道之间的搭接率可以形成不同的波峰波谷差。在动态聚焦系统中,离焦量和扫描间距均会影响相邻熔道之间的搭接率。因此,为了更为准确地对比离焦量的影响,本文采用相同的扫描间距进行试验。图 2 为采用不同离焦量打印的单层材料与多层材料块体的表面粗糙度,可以发现:随着离焦量增加,单层材料和多层材料块体的表面粗糙度均呈现先降低后增大的趋势;在相同的离焦量下,随着打印层数增加,表面粗糙度随之升高。

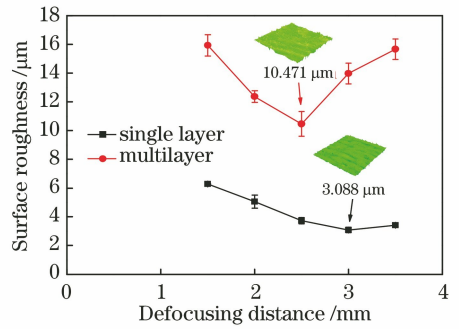


图 2 离焦量对表面粗糙度的影响

Fig. 2 Effect of defocusing distance on surface roughness

对于单层材料,离焦量为+3 mm 时,试样的表面粗糙度最低。这是因为离焦量会直接影响光斑的大小;离焦量较小 (+1.5 mm) 时,形成的熔池较窄,降低了相邻熔道之间的搭接率,形成了较大的波峰波谷差,使得表面粗糙度增大,如图 3(a) 所示;随着离焦量逐渐增大,光斑和熔道随之变宽,不仅增大了搭接率,而且所形成熔道的平行度增加,熔道之间的起伏减小,降低了表面粗糙度;当离焦量过大 (+3.5 mm) 时,熔道之间的搭接率过大,表面出现颗粒飞溅,表面粗糙度升高,如图 3(e) 所示。

相较于单层材料,多层块体试样上表面的表面粗糙度也随着离焦量的增大而呈现先降低后增大的趋势,当离焦量为+2.5 mm 时,试样的表面粗糙度达到最低值。当离焦量较小时,激光功率密度较大,激光束与熔池的相互作用导致熔池内部产生湍流,引发熔池中的液滴飞溅,增大了表面粗糙度;而功率密度过大,会导致熔道变形,扫描的轨迹路线变得不均匀,波峰波谷差增加。此外,搭接率较低时,还会导致大量未熔化粉末黏附在熔道表面,如图 4(a) 所示,打印层数越多,这种变化趋势越明显。随着离焦量逐渐增加,这种现象得到改善,表面粗糙度降低,如图 4(b) 和图 4(c) 所示。当离焦量增加至 3 mm 以上时,熔道之间的过度堆叠现象加剧,打印层数越多,表面凸起越明显,从而增大了试样的表面粗糙度。此外,随着离焦量增加,激光能量就会不足,粉末熔化量减少,试样表面出现黏附颗粒,也会导致表面粗糙度增大,如图 4(d) 和图 4(e) 所示。

### 3.2 离焦量对尺寸偏差的影响

在 SLM 成型过程中,粉末受激光加热而熔化,向四周扩散,扩散过程使打印零件在 X、Y、Z 方向产生了尺寸偏差。为了更准确地研究离焦量对尺寸精度的影响,分别沿 X、Y、Z 方向测量不同离焦量下试样的尺寸,并将其与原始模型尺寸进行对比,尺

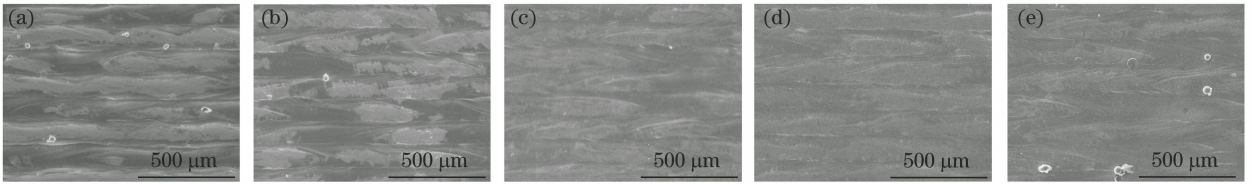


图 3 不同离焦量下单层打印试样上表面形貌。(a) +1.5 mm;(b) +2 mm;(c) +2.5 mm;(d) +3 mm;(e) +3.5 mm

Fig. 3 Upper surface morphology of single layer samples printed at different defocusing amounts.

(a) +1.5 mm; (b) +2 mm; (c) +2.5 mm; (d) +3 mm; (e) +3.5 mm

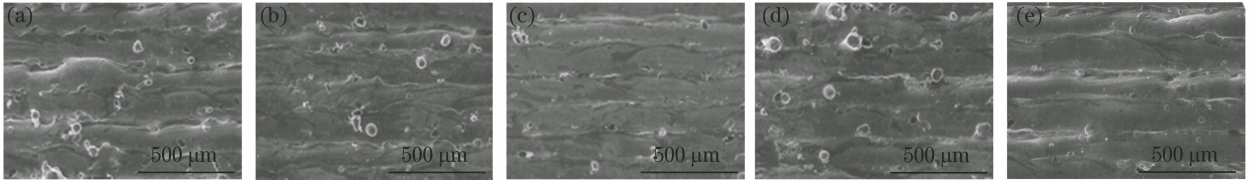


图 4 不同离焦量下多层块体打印试样上表面形貌。(a) +1.5 mm;(b) +2 mm;(c) +2.5 mm;(d) +3 mm;(e) +3.5 mm

Fig. 4 Upper surface morphology of multilayer block samples printed at different defocusing distances.

(a) +1.5 mm; (b) +2 mm; (c) +2.5 mm; (d) +3 mm; (e) +3.5 mm

寸偏差结果如图 5 所示。由图 5 可知,试样沿 X 方向和 Y 方向的尺寸偏差随着离焦量的增加而逐渐增加, X 方向的尺寸偏差均大于 Y 方向的尺寸偏差,而 Z 方向的尺寸偏差则随着离焦量的增加而减小,当离焦量增大至 3.5 mm 时, Z 方向的尺寸偏差再次升高,呈现收缩趋势。

图 6 为不同离焦量下打印试样纵截面的显微组织。在图 6 中可以观察到不同离焦量下打印试样的层状结构,可见,随着离焦量增加,熔宽  $w$  逐渐增加,熔高  $h$  逐渐减小。在不同的离焦量下所形成的熔池的熔宽  $w$  和熔高  $h$  的变化规律与尺寸偏差测量结果相对应。当离焦量较小(+1.5 mm)时,聚焦

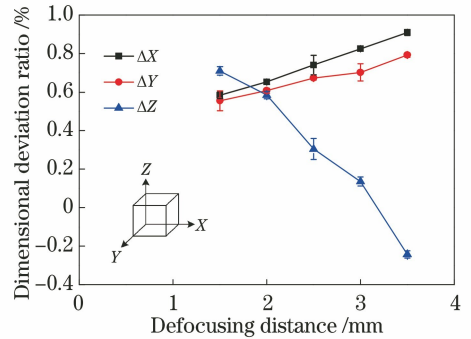


图 5 离焦量对打印尺寸偏差的影响

Fig. 5 Effect of defocusing distance on dimensional deviation

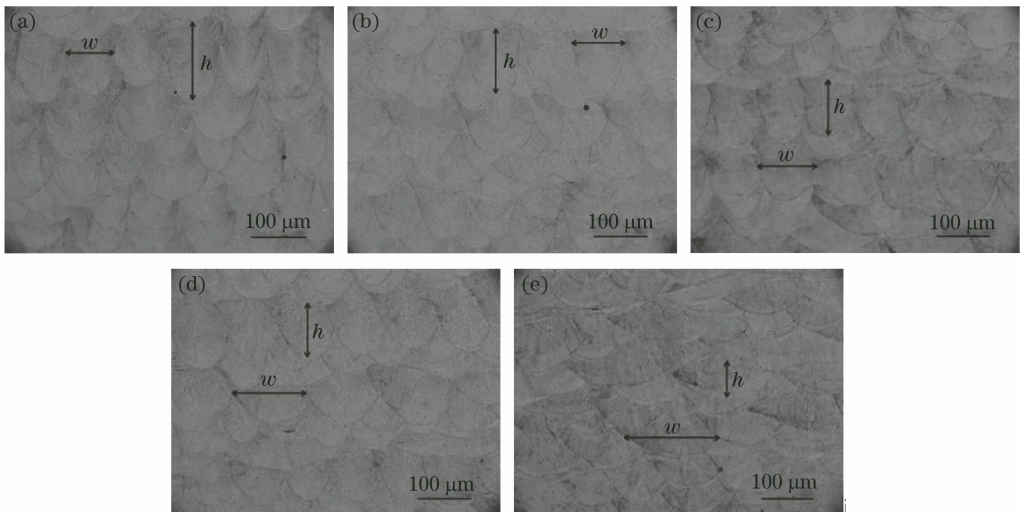


图 6 不同离焦量下打印试样纵截面的 OM 像。(a) +1.5 mm;(b) +2 mm;(c) +2.5 mm;(d) +3 mm;(e) +3.5 mm

Fig. 6 OM images of longitudinal section of samples printed at different defocusing distances.

(a) +1.5 mm; (b) +2 mm; (c) +2.5 mm; (d) +3 mm; (e) +3.5 mm

光斑尺寸较小,熔化的粉末颗粒有限,所形成的熔宽  $w$  较小,熔道之间搭接不理想,粉末颗粒间的孔隙没有被填满,熔道没有向四周扩散,因此沿水平方向的尺寸偏差较小。在相同的热输入条件下,离焦量较小(+1.5 mm)时,功率密度较大,产生的熔深  $h$  较大,使得各层实际所形成的厚度大于铺粉层厚,因此增大了  $Z$  方向的尺寸偏差,如图 6(a)所示。此外,过大的功率密度使得熔池流动加剧,导致表面粗糙度增加,从而在一定程度上增大了  $Z$  方向的尺寸偏差。随着离焦量增加,聚焦光斑尺寸逐渐增大,熔道之间的搭接率增加,熔道逐渐向四周扩散,熔宽  $w$  增加,沿  $X$  方向和  $Y$  方向的尺寸偏差增加。但随着离焦量增大,功率密度减小,光斑穿透力减弱,熔高  $h$  逐渐减小, $Z$  方向上的尺寸偏差减小。但当离焦量过大(+3.5 mm)时,熔高  $h$  就会大幅降低,沿  $Z$  方向产生较大的收缩,尺寸偏差再次增大,如图 6(e)所示。对同一试样来说, $X$  方向的尺寸偏差均大于  $Y$  方向,且离焦量越大,两方向的偏差越大。产生这一现象的原因是激光振镜在  $X$ 、 $Y$  轴扫描过程中的运动不一致,存在一定的偏转误差。

### 3.3 离焦量对致密度的影响

致密度是 SLM 技术中影响打印零件质量和性能的重要指标,主要受众多工艺参数的影响<sup>[12]</sup>。为了进一步掌握离焦量对致密度的影响规律,利用排水法分别测量试样的相对密度,测量结果如图 7 所示。可见:在其他激光工艺参数确定的情况下,随着离焦量增加,打印试样的相对密度呈先增加后减小的趋势,在离焦量为 +2.5 mm 时,相对密度达到最

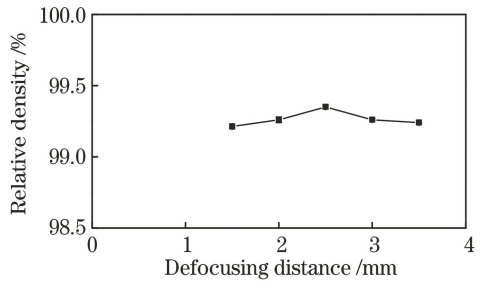


图 7 离焦量对相对密度的影响

Fig. 7 Effect of defocusing distance on relative density  
大值,为 99.35%。

为了进一步分析其原因,对打印试样的纵截面进行研磨和抛光,用光学显微镜观察试样的显微组织,结果如图 8 所示。在 SLM 成型过程中,熔体的动力黏度会直接影响成型零件的致密性,熔体动力黏度  $\eta$  主要受熔池内部温度的影响,两者之间的关系为<sup>[13]</sup>

$$\eta = \frac{16}{15} \sqrt{\frac{m}{kT}} \sigma, \quad (4)$$

式中: $m$  为原子质量; $k$  为玻尔兹曼常数; $T$  为熔体温度; $\sigma$  为液体的表面张力。当离焦量为 +1.5 mm 时,功率密度过大,熔池内部产生了较大的温度梯度,熔体的动力黏度  $\eta$  迅速减小,熔池内部产生剧烈流动,导致试样表面形成了图 4(a)所示的球化现象,降低了成型试样的致密度。此外,当离焦量较小时,所形成的熔池宽度较小,易导致未完全熔化的粉末堆积,在进行下一层扫描时,堆积的粉末不能被完全熔化,使得打印表面变得粗糙,影响了后续粉末的分布,从而形成了如图 8(a)所示的月牙形孔隙缺陷,

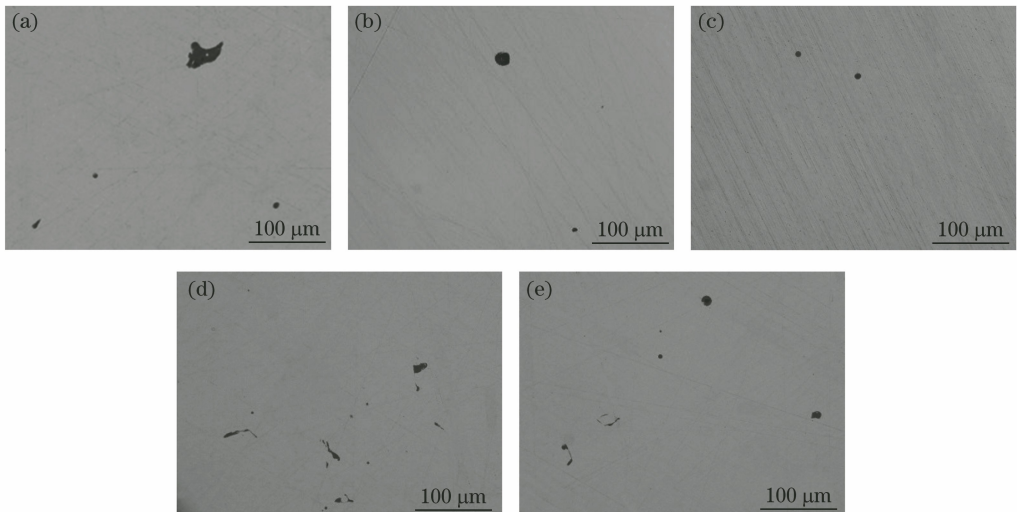


图 8 不同离焦量下打印试样的光学形貌。(a) +1.5 mm;(b) +2 mm;(c) +2.5 mm;(d) +3 mm;(e) +3.5 mm

Fig. 8 Optical morphology of samples printed at different defocusing distances.

(a) +1.5 mm; (b) +2 mm; (c) +2.5 mm; (d) +3 mm; (e) +3.5 mm

缺陷直径可达  $48.91\ \mu\text{m}$ ,成型试样的相对密度仅为  $99.21\%$ 。当离焦量增加至  $+2.5\ \text{mm}$  时,功率密度适中,熔道之间搭接良好,形成了较好的冶金结合,试样内部的孔隙较小,仅存在少量的球形孔隙,相对密度达到最大值( $99.35\%$ ),如图 8(c)所示。随着离焦量进一步增加,功率密度降低,熔池温度降低,液体动力黏度增大,熔池内部熔体的流动减缓,熔体没有均匀铺展,导致层间结合不良,试样表面再次出现不规则的孔隙缺陷,如图 8(d)和图 8(e)所示,试样的致密度下降。

### 3.4 离焦量对显微组织与物相的影响

图 9 为  $+2.5\ \text{mm}$  SLM 成型试样上表面光学显微图和纵截面 SEM 图。由图 9(a)可以看出,该试样的组织主要为板条马氏体,此外还可观察到不同层的熔道轨迹,这些轨迹路线存在一定的不连续性,产生这一现象的原因可能是因为磨抛腐蚀不完

全<sup>[14]</sup>。从试样纵截面的 SEM 图中可以观察到,熔道扫描轨迹的排列和形状并不均匀。这主要是因为试验所采用的扫描策略是条形分区扫描,扫描方向逐层改变,形成的熔池边界尺寸和形状具有一定的差异,形成了周期性熔池<sup>[15]</sup>。在高倍 SEM 下可以发现,熔池边界产生了向外延生长的联生结晶,这种柱状晶主要沿着熔池边界向熔池内最大温度梯度方向生长,如图 9(b)所示。为了进一步分析对比不同离焦量下打印试样的内部组织,在高倍 SEM 下观测其内部显微结构,结果如图 10 所示。由图 10 可知,熔池内部没有出现明显的晶界,中心区域的显微组织主要为胞状晶,这种晶粒的生成主要与冷却速度有关,冷却速度越快,就越能促进最初生成的平面晶向胞状晶发生转变,并且胞状晶的尺寸随着离焦量的不同而发生变化。根据(5)式<sup>[16]</sup>可计算出不同离焦量下打印试样的胞晶间距  $\delta$ <sup>[17]</sup>,计算结果如表 2 所示。

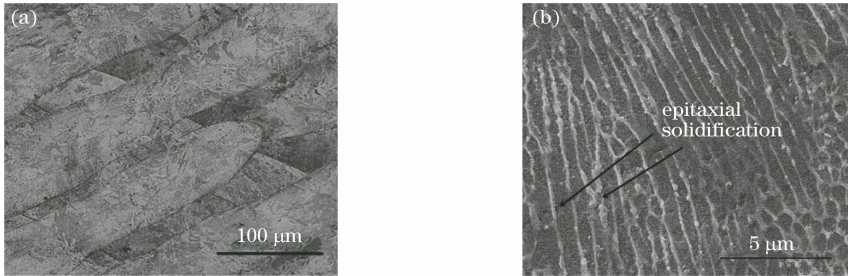


图 9  $+2.5\ \text{mm}$  试样的显微组织。(a)上表面 OM 像;(b)纵截面 SEM 像

Fig. 9 Microstructures of sample printed at defocusing distance of  $+2.5\ \text{mm}$ . (a) OM image of upper surface; (b) SEM image of longitudinal section

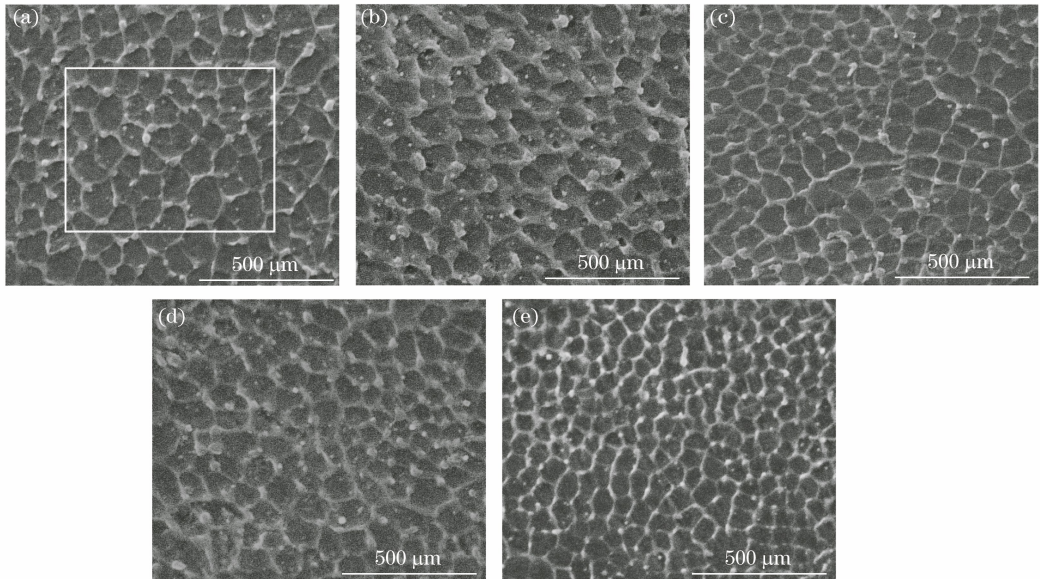


图 10 不同离焦量下打印试样的高倍 SEM 形貌。(a)  $+1.5\ \text{mm}$ ;(b)  $+2\ \text{mm}$ ;(c)  $+2.5\ \text{mm}$ ;(d)  $+3\ \text{mm}$ ;(e)  $+3.5\ \text{mm}$

Fig. 10 High-magnification SEM morphology of samples printed at different defocusing distances.

(a)  $+1.5\ \text{mm}$ ; (b)  $+2\ \text{mm}$ ; (c)  $+2.5\ \text{mm}$ ; (d)  $+3\ \text{mm}$ ; (e)  $+3.5\ \text{mm}$

$$\delta = \frac{1}{M} \left( \frac{A}{N} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中： $M$  是 SEM 显微照片的放大倍数； $N$  是图 10(a) 中白色框内的胞状晶数量； $A$  是白色框区域的面积。从表 2 可以看出，胞晶间距随着离焦量的增加而逐渐减小。在 SLM 打印过程中，粉末受热熔化变成熔融金属，当熔融金属不断向晶核沉积时，晶粒不断长大，从而实现熔融金属凝固<sup>[18]</sup>。根据凝固理论可知，可以通过降低生长速率与增大形核率来细化晶粒，而晶粒的形核率  $N$  和生长速率  $G$  主要与熔池的冷却速度有关。熔池的冷却速度  $v$  被定义为<sup>[19]</sup>

$$v = \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (6)$$

式中： $\Delta T$  为温度变化量； $\Delta t$  为冷却时间。随着冷却速度增加，熔池凝固加快，形核率  $N$  随之增加，生长速率  $G$  受到抑制。在激光功率、扫描速度、扫描间距和层厚确定的情况下，离焦量 (+1.5 mm) 较小时，功率密度较高，导致热输入较大，熔池温度上升。大量能量聚集在晶粒周围，为晶粒生长提供充足的能量，导致冷却时间增加，冷却凝固速度降低，减缓了内部胞晶的形核率，形成了较大的胞状晶，如图 10(a) 所示。随着离焦量逐渐增加，功率密度逐渐减小，冷却时间变短，冷却凝固速度

加快，晶胞逐渐细化。所以，随着离焦量增加，胞晶间距逐渐减小。

表 2 不同离焦量下打印试样的胞晶间距

Table 2 Intergranular spacing of samples printed at different defocusing distances

Defocusing distance /mm	Spacing / $\mu\text{m}$
+1.5	0.269
+2	0.254
+2.5	0.233
+3	0.228
+3.5	0.176

图 11 为不同离焦量下成型试样的 XRD 图谱。由图 11(a) 可知，不同试样内部均检测到了  $\alpha$ -马氏体 (体心立方) 和  $\gamma$ -奥氏体 (面心立方) 的衍射峰。通过观察图 11(b) 可以发现，随着离焦量增加，马氏体衍射峰均向右产生了偏移。由布拉格方程<sup>[20]</sup>可知

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (7)$$

式中： $d$  为晶格间距； $\lambda$  为入射线波长； $\theta$  为入射 X 射线与相应晶面的夹角。当衍射峰向右偏移时，衍射角增加，晶格间距减小，内部晶格发生畸变。因此，随着离焦量增加，功率密度降低，晶格间距减小，晶粒得以细化。XRD 的测试结果进一步验证了显微组织的观测分析结果。

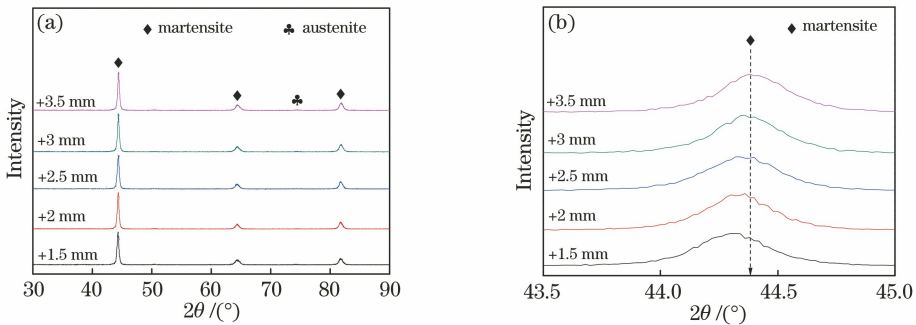


图 11 不同离焦量下打印试样的 XRD 图谱。(a) 衍射角为 30°~90°；(b) 衍射角为 43.5°~45°

Fig. 11 XRD spectra of samples printed at different defocusing distances.

(a) Diffraction angle of 30°-90°; (b) diffraction angle of 43.5°-45°

### 3.5 离焦量对力学性能的影响

图 12 和表 3 为不同离焦量下成型 18Ni-300 马氏体时效钢试样的表面硬度和室温拉伸性能。由曲线的变化趋势可知，随着离焦量增加，试样的表面硬度、抗拉强度、屈服强度和延伸率均呈先增加后降低的趋势。试样侧表面硬度的变化规律与上表面的规律相同，同一离焦量下打印试样的侧表面硬度均高于上表面，其中，+2.5 mm 试样的力学性能最好，抗拉强度可达 1215 MPa，上表面

硬度为 37.7 HRC。

由图 7 和 12(a) 可知，试样硬度的变化规律与致密度的变化规律相似，试样内部的孔隙率越高，表面硬度越低，可通过增大试样的致密度来提高试样的硬度<sup>[21]</sup>。对于同一成型参数下的打印试样，其侧表面硬度均高于上表面，这是因为在逐层堆积过程中，所形成的马氏体组织会沿成型方向向熔道的外延边界延伸，从而使得侧表面的硬度高于上表面。

表 3 不同离焦量下打印试样的力学性能

Table 3 Mechanical properties of samples printed at different defocusing distances

Defocusing distance /mm	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Upper surface hardness /HRC	Side surface hardness /HRC
+1.5	1175±2	950±47	5.19±0.11	36.48±0.85	37.26±1.3
+2	1193±3	1033±32	8.32±0.28	37.52±0.58	37.76±1.16
+2.5	1215±2	1086±3	8.83±0.50	37.7±0.77	38.64±0.66
+3	1188±5	989±11	8.59±0.86	37.38±0.73	37.72±1.11
+3.5	1187±3	983±2	7.85±0.46	37.24±0.46	37.34±0.67

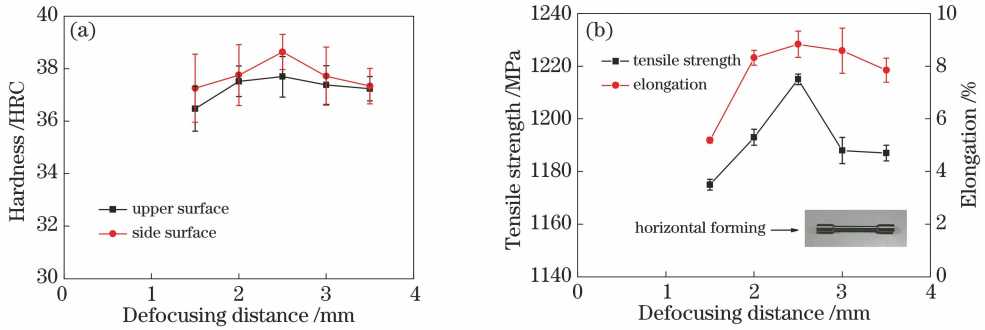


图 12 离焦量对力学性能的影响。(a)表面硬度;(b)拉伸性能

Fig. 12 Effect of defocusing distance on mechanical properties. (a) Surface hardness; (b) tensile property

为了进一步研究拉伸断口的断裂机理,采用 SEM 观察拉伸试样的断口表面。由图 13(b)可知,相较于图 13(a)所示的典型的韧性拉伸断口,

+1.5 mm 拉伸试样的断口上没有出现颈缩,断口扩展区更大,剪切唇起伏减小,纤维区出现了明显的塑坑区和解理区,且塑坑区所占比例较大。

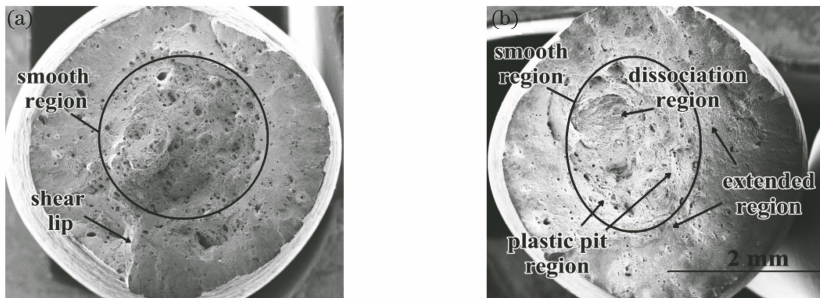


图 13 不同离焦量下打印试样的拉伸断口形貌。(a) +2.5 mm;(b) +1.5 mm

Fig. 13 Tensile fracture of samples printed at different defocusing distances. (a) +2.5 mm; (b) +1.5 mm

在高倍 SEM 下观察 +1.5 mm 试样的拉伸断口可以发现,断口表面出现了解理台阶,且内部还包裹着细小的韧窝,形成了脆性穿晶断裂与韧窝断裂组成的混合型断裂,呈现出准解理断裂特征,如图 14(a)所示。从图 14 可以看出,除 +1.5 mm 试样以外,其他拉伸试样的断口表面均由不同尺寸的韧窝构成,这些韧窝受力变形时,会沿撕裂棱迅速生长,形成韧性穿晶断裂,呈现塑性断裂特征<sup>[22]</sup>。造成上述脆塑转变机制的主要原因是功率密度的影响。功率密度过大会使成型过程的温度急剧升高,试样内部产生较大的残余应力,增加了内部的脆性,易导致成型试样过早失效<sup>[23]</sup>。此外,由于力学性能的高低

与晶粒尺寸有很大关系。当离焦量为 +1.5 mm 时,过大的功率密度使试样内部晶粒粗化,如图 10(a)所示,晶界减少,降低了裂纹扩展的阻力,从而导致脆性增加,力学性能大幅下降,表面硬度不均匀性增加,试样的延伸率仅为 5.19%。当离焦量为 +2 mm 时,断裂模式转变为塑性断裂,表面韧窝数量增多,抗拉强度升高,但断口表面仍存在颗粒状夹杂物,如图 14(b)所示,影响了试样的力学性能。当离焦量为 +2.5 mm 时,在高倍 SEM 下观察发现,断口表面分布着大量的等轴韧窝,这些韧窝不仅分布均匀,而且深度较大,表现出了良好的塑性。因此,+2.5 mm 试样的抗拉强度和延伸率最高,分别为



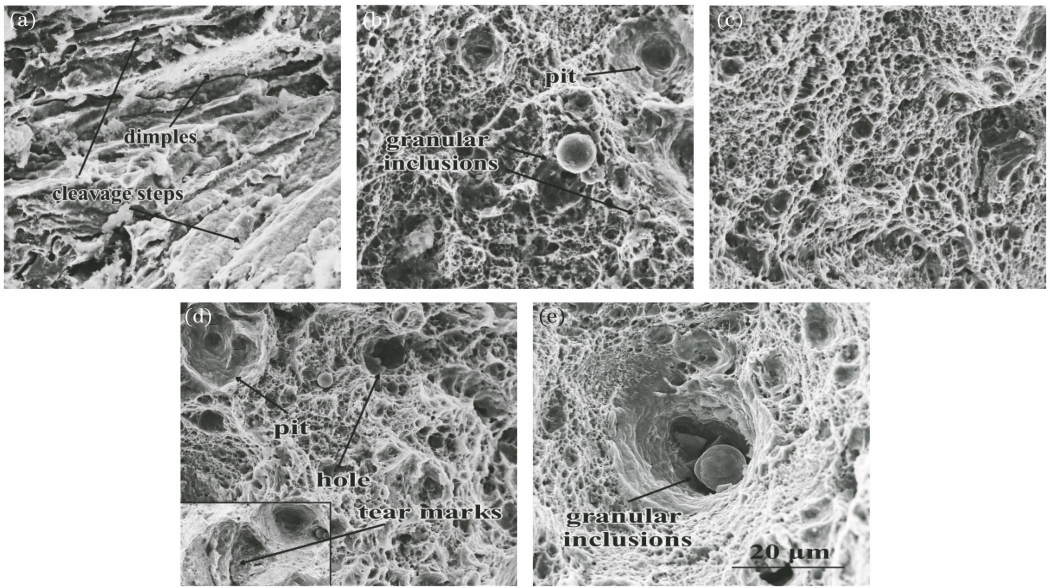


图 14 不同离焦量下打印试样的拉伸断口形貌。(a) +1.5 mm;(b) +2 mm;(c) +2.5 mm;(d) +3 mm;(e) +3.5 mm

Fig. 14 Tensile fracture of samples printed at different defocusing distances.

(a) +1.5 mm; (b) +2 mm; (c) +2.5 mm; (d) +3 mm; (e) +3.5 mm

1215 MPa 和 8.83%。当离焦量增加至 3 mm 时,断口表面的韧窝尺寸逐渐减小,深度变浅,断口表面还出现了明显的撕裂痕,如图 14(d)所示,降低了试样的拉伸性能。当离焦量增加至 +3.5 mm 时,虽然内部晶粒尺寸逐渐细化,晶界增多,在一定程度上阻碍了裂纹的扩展;但由于功率密度较低,导致成型过程中出现较多缺陷,拉伸断口表面不仅出现了较深的孔洞,孔洞内部还出现了较大的颗粒状夹杂物。在拉伸过程中,这些孔洞会加速裂纹的扩展,引发试样断裂,如 14(e)所示。上述结果表明,+2.5 mm 试样的力学性能优于其他离焦量下成型试样的。

## 4 结 论

本文通过试验研究了正离焦量对 18Ni-300 打印试样表面粗糙度、尺寸偏差、致密度、显微组织、硬度和拉伸性能的影响规律,结果表明,离焦量会对试样的打印质量和性能产生较大影响:1)随着离焦量增加,单层材料和多层材料块体的表面粗糙度均呈先降低后增大的趋势;在相同的离焦量下,表面粗糙度随着打印层数的增加而升高。2)随着离焦量增加,X、Y 方向的尺寸偏差增加,呈胀大的趋势,而 Z 方向的尺寸偏差减小,呈收缩趋势。3)随着离焦量增加,打印件的致密度和硬度呈先增大后降低的趋势,当离焦量为 +2.5 mm 时,功率密度适中,形成了较好的冶金结合,试样的相对密度最高,为 99.35%,上表面硬度达到了 37.7 HRC。4) SLM 成

型 18Ni-300 材料的显微组织为板条马氏体,熔池内部中心区域分布着胞状晶粒,熔道边界分布着柱状晶粒;随着离焦量由 +1.5 mm 增加到 3.5 mm,晶粒逐渐细化,胞晶间距减小。5)随着离焦量增加,打印件的抗拉强度、屈服强度和延伸率均呈先增大后降低的趋势,当离焦量为 +2.5 mm 时,打印件的拉伸性能最好,抗拉强度可达 1215 MPa。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X Y, Li X B, Tan Z, et al. Microstructure and mechanical properties of water atomized Cu-10Sn alloy powder formed parts by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (10): 1002009.  
张晓雅, 李现兵, 谈震, 等. 激光选区熔化水雾化 Cu-10Sn 合金粉末成形件的微观组织结构及力学性能研究[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1002009.
- [2] Read N, Wang W, Essa K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development[J]. Materials & Design, 2015, 65: 417-424.
- [3] Abele E, Kniepkamp M. Analysis and optimisation of vertical surface roughness in micro selective laser melting [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2015, 3(3): 034007.
- [4] Gao P, Wei K W, Yu H C, et al. Influence of layer thickness on microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-5Al-2.5Sn alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(7): 999-1009.

- 高飘, 魏恺文, 喻寒琛, 等. 分层厚度对选区激光熔化成形 Ti-5Al-2.5Sn 合金组织与性能的影响规律[J]. 金属学报, 2018, 54(7): 999-1009.
- [5] Guo Y L, Jia L N, Kong B, et al. Single track and single layer formation in selective laser melting of niobium solid solution alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(4): 860-866.
- [6] Demtröder W. Optics of Gaussian beams[M]//Laser Spectroscopy. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 421-429.
- [7] Bean G E, Witkin D B, McLouth T D, et al. Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 207-215.
- [8] Metelkova J, Kinds Y, Kempen K, et al. On the influence of laser defocusing in selective laser melting of 316L[J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 161-169.
- [9] Yao Y Z, Huang Y H, Chen B, et al. Influence of processing parameters and heat treatment on the mechanical properties of 18Ni300 manufactured by laser based directed energy deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 171-179.
- [10] Yin S, Chen C Y, Yan X C, et al. The influence of aging temperature and aging time on the mechanical and tribological properties of selective laser melted maraging 18Ni-300 steel [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 592-600.
- [11] McLouth T D, Bean G E, Witkin D B, et al. The effect of laser focus shift on microstructural variation of Inconel 718 produced by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2018, 149: 205-213.
- [12] Mai S Z, Yang Y Q, Wang D. Study on surface morphology and roughness variation of NiCr alloy curved surface manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of 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.
- [13] Gu D D, Shen Y F. Effects of processing parameters on consolidation and microstructure of W-Cu components by DMLS[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473(1/2): 107-115.
- [14] Casati R, Lemke J, Tuissi A, et al. Aging behaviour and mechanical performance of 18-Ni300 steel processed by selective laser melting[J]. Metals, 2016, 6(9): 218.
- [15] Asgari H, Mohammadi M. Microstructure and mechanical properties of stainless steel CX manufactured by direct metal laser sintering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 709: 82-89.
- [16] Ma M M, Wang Z M, Gao M, et al. Layer thickness dependence of performance in high-power selective laser melting of 1Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 142-150.
- [17] Wang D, Song C H, Yang Y Q, et al. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts[J]. Materials & Design, 2016, 100: 291-299.
- [18] Hu H Q. Principle of metal solidification [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 164-168.  
胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 164-168.
- [19] Chen S, Tao F H, Jia C Z. Microstructure and micro-hardness of 4Cr5MoSiV1 die steels fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102007.  
陈帅, 陶凤和, 贾长治. 选区激光熔化成型 4Cr5MoSiV1 模具钢显微组织及显微硬度研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102007.
- [20] Song B, Dong S J, Liu Q, et al. Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: microstructure, residual stress and tensile behavior[J]. Materials & Design, 2014, 54: 727-733.
- [21] 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: 120-125.
- [22] Kurz W, Fisher D J. Fundamentals of solidification [M]. Zürich: Trans Tech Publications, 1986
- [23] Zhong Y, Liu L F, Wikman S, et al. Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting[J]. Journal of Nuclear Materials, 2016, 470: 170-178.