

# 基于分区扫描的选区激光熔化钛合金的成形质量

万乐<sup>1\*\*</sup>, 王思琦<sup>2</sup>, 张晓伟<sup>1\*</sup>, 蒋业华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093;

<sup>2</sup>江苏永年激光成形技术有限公司, 江苏 昆山 215300

**摘要** 为提高选区激光熔化(SLM)医用 Ti6Al4V 钛合金的成形质量,优化了激光分区扫描工艺参数。通过正交实验和单因素实验,对比分析了分区扫描策略和传统整体扫描策略下成形零件的显微组织结构特征、致密度、尺寸精度和表面质量,总结了 SLM 成形医用 Ti6Al4V 钛合金的典型表面形貌。研究表明,分区扫描策略不仅能获得尺寸精度高和表面质量良好的钛合金成形件,而且能显著改善悬垂面的成形效果。

**关键词** 激光技术; 选区激光熔化(SLM); 钛合金; 尺寸精度; 表面质量

中图分类号 TB31 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091401

## Forming Quality of Titanium Alloys by Selective Laser Melting Based on Partition Scanning

Wan Le<sup>1\*\*</sup>, Wang Siqi<sup>2</sup>, Zhang Xiaowei<sup>1\*</sup>, Jiang Yehua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;

<sup>2</sup>Jiangsu Yongnian Laser Forming Technology Co., Ltd., Kunshan, Jiangsu 215300, China

**Abstract** In order to improve the forming quality of medical Ti6Al4V titanium alloys by selective laser melting (SLM), the process parameters of laser partition scanning are optimized. By the orthogonal experiment and single factor experiment, the microstructure characteristic, efficiency of space filling, dimensional accuracy and surface quality of formed parts under the partition scanning strategy and the traditional overall scanning strategy are compared and analyzed. The typical surface morphologies of medical Ti6Al4V titanium alloys formed by SLM are summarized. The research results show that the partition scanning strategy can not only increase the dimensional accuracy and surface quality of titanium alloys, but also significantly improve the forming effect of overhanging surfaces.

**Key words** laser technique; selective laser melting (SLM); titanium alloy; dimensional accuracy; surface quality

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 120.6660; 140.3300

## 1 引言

金属增材制造技术是近年来迅速发展起来的一种金属成形技术,又称金属三维(3D)打印。选区激光熔化(SLM)可利用多种类型的激光器进行增材制造。光纤激光器具有可获得近基模光束、高电光转换效率、长寿命、输出光斑尺寸为 30~50 μm 等优点,非常适于精密金属零件的快速制造。SLM 以

光固化立体成形(STL)文件作为基础,以激光作为制造热源,以“离散+堆积”的增材制造方式直接成形出具有几何形状的结构复杂的金属零件。SLM 在航空航天和医疗器械等领域显示出极为广泛的应用前景<sup>[1-6]</sup>。

医用 Ti6Al4V 钛合金是一种具有大变形抗力、高熔点、高熔融态的活性合金,其传统机械加工具有一定难度,而 SLM 成形的钛合金医疗器械具有加

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-03-08; 录用日期: 2018-03-28

基金项目: 云南省重点研发计划项目(2018BA064)、云南省科学技术厅人才引进项目(KKSY201551068)

\* E-mail: zhwx72@kmust.edu.cn; \*\* E-mail: 727660399@qq.com

工周期短、强度高、可满足患者个性化需求等优势。成形精度和表面粗糙度是衡量 SLM 成形钛合金医疗器械成形质量的两个重要指标。目前,国内外 SLM 钛合金成形件的相对密度约为 96%,表面粗糙度约为  $20\ \mu\text{m}$ ,有效悬垂面成形的最大宽度约为 5 mm,最小有效成形薄壁尺寸约为 0.2 mm,SLM 可成形任意曲面形状<sup>[7-16]</sup>。孙婷婷等<sup>[17-27]</sup>进行了层间扫描策略、表面质量、致密度、尺寸精度、机械性能等研究,Stamp 等<sup>[3,28-30]</sup>进行了优化表面质量与组织结构的相关研究。

尽管如此,目前 SLM 成形医用钛合金所采用的整体式设置扫描参数策略,很难同时达到高致密度、良好表面质量、高尺寸精度、优良的内部组织结构等要求。这是因为同一种扫描参数往往不能同时适合于成形零件的不同结构。如适合内部填充的扫描参数在成形悬垂面部分时往往效果不理想,而适合悬垂面的参数又不能很好地成形内填充部分和上表面部分。故有必要设计一种方法,将零件的各个部分分开单独设置合适参数,以优化成形效果,从而有效提高钛合金 SLM 成形件的质量。

本文采用 SLM 工艺,利用激光分区扫描策略,配合正交实验和单因素实验优化了工艺参数,对比分析了分区扫描和整体扫描策略条件下 Ti6Al4V 合金成形件的内部组织结构、尺寸精度和表面质量。

## 2 实验设备、材料方法

### 2.1 实验设备

成形利用 YLM-300-III 型 SLM 设备,该设备主要由激光器系统、振镜扫描系统、精密铺粉系统、气体循环保护系统和工控机集成控制系统组成,如图 1 所示,其中 X-Y 为扫描坐标系。所配脉冲式光

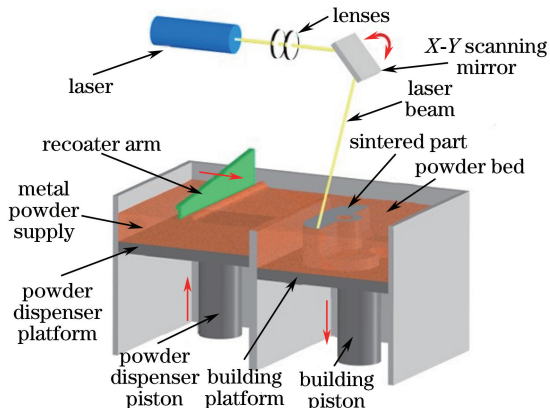


图 1 SLM 系统的原理图

Fig. 1 Schematic of SLM system

纤激光器的额定功率为 500 W,激光波长为 1060 nm,最小聚焦光斑直径为  $30\ \mu\text{m}$ ,光束质量因子不大于 1;采用的振镜系统是美国 CTI 公司生产的三轴振镜系统,如图 2 所示;成形缸的移动精度为  $\pm 5\ \mu\text{m}$ ;利用自主研发的 Z-flash 成形控制软件及专业三维模型分层软件,对激光扫描参数、铺粉参数、温控参数和气体保护参数进行调节。

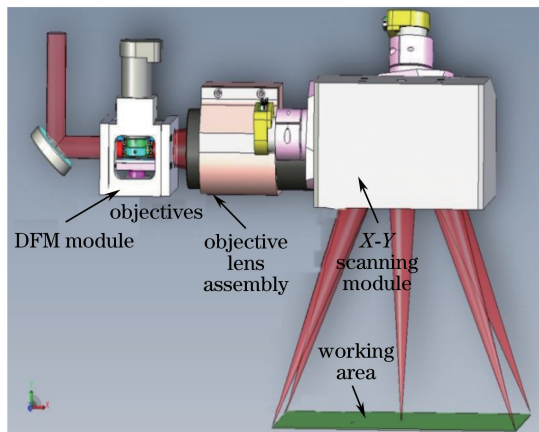


图 2 CTI 三轴振镜系统的原理图

Fig. 2 Schematic of CTI three-axis galvanometer system

### 2.2 实验材料

成形基板是尺寸为  $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$  的方形钛合金板。上下表面的平面度为 0.05 mm,成形仓中的保护气体为高纯氩气(体积分数 99.99%),成形过程中成形仓的氧含量(体积分数,全文同)在  $5 \times 10^{-4}$  以下。实验用粉末材料为雾化粉末制造技术生产的 Ti6Al4V 医用钛合金粉末,粉末粒径分布为  $0 \sim 53\ \mu\text{m}$ ,原始氧含量为  $9.62 \times 10^{-4}$ ,松装密度为  $2.60\ \text{g/cm}^3$ ,各参数符合医用钛合金标准。借助扫描电子显微镜所测球形 Ti6Al4V 钛合金粉末的显微组织形貌如图 3 所示。激光粒度仪测得粒径小于 16, 32,  $50\ \mu\text{m}$  的粉末粒数分别占总粒数的 10%、50%、90%。利用扫描电镜附带的能谱仪测得的粉末化学成分见表 1。

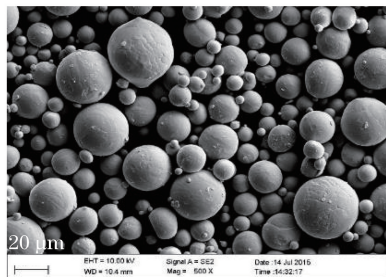


图 3 粉末材料的显微组织形貌

Fig. 3 Micro-morphology of powder material

表1 材料成分表(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of materials (mass fraction, %)

Element	Ti	Al	V	Fe	C	Y	O	N	H
Value	Bal.	6.15	3.95	0.03	0.04	<0.005	0.1016	0.0120	0.0012

### 2.3 实验方法及过程

将激光扫描面分为上表面、内填充面和下表面三个区,制定分区扫描策略。设计分面参数的6因素5水平正交实验来优化工艺参数,同时进行整体扫描策略的单因素对比实验。通过光学显微镜观察成形样品的表面形貌,总结出4种典型的表面形貌。采用粗糙度仪测试成形样品的表面粗糙度 $R_a$ ,分析得到表面质量与成形能力工艺参数。

通过若干组实验进行单独设置悬垂面参数的研究,并设置整体扫描策略的对比实验组,得出合适的悬垂面成形工艺参数。设置合适的轮廓线扫描方式和相应的参数,设置Z轴补偿值、内填充方式、光斑补偿、层间搭接方式等参数,从而得到完整的优化搭配的分区扫描工艺参数。使用SolidWorks软件设计包含圆柱、圆台、倒圆台、方块、四棱锥、倒四棱锥、圆孔、方孔、尖角和薄壁、球体等多种典型几何特征的零件成形能力测试模型,如图4所示,导出STL

格式文件,并使用Materialise-Magics软件对STL文件进行编辑和切片处理。通过该模型对零件成形能力进行系统测试,分析成形效果,总结各成形参数对不同几何特征成形质量的影响。成形能力测试模型的组成部分及其测试功能见表2,其中各特征成形实验结果分别反映各参数的成形能力,并得到相应的成形能力初步量化数值。

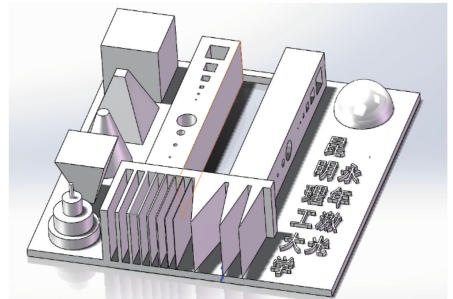


图4 成形能力测试模型

Fig. 4 Model for testing forming ability

表2 样品几何特征描述与测试目的

Table 2 Geometric feature description and test purpose of specimen

No.	Test purpose (forming ability)	Geometrical unit
1	Thin-wall	Thin-wall
2	Plane and vertical	Square
3	Sphere forming ability	Ball
4	Sharp angle	Sharp corner
5	Sloping plan	Pyramid
6	Sloping and bending plan	Circular truncated cone
7	Vertical and bending plan	Column
8	Round hole	Hole parallel to Z-axis
9	Square hole	Hole vertical to Z-axis
10	Arc overhang	Circular hole vertical to Z-axis
11	Square overhang	Square hole vertical to Z-axis

打印完成后,通过电火花线切割方法,从成形基板取下成形试样并制成金相试样,将试样在装有 $38\ \mu\text{m}$ 的预磨机上预磨,并依次在 $25, 18.75, 12.5, 10\ \mu\text{m}$ 的砂纸上进行手工研磨,再使用 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 的金刚石抛光剂在抛光机上抛光试样,以去除试样表面的细微划痕。用氢氟酸、硝酸和水(体积比为 $2:1:17$ )的混合溶液揩拭抛光面 $30\sim 60\ \text{s}$ 后,用无水乙醇洗净并吹干,然后在DML5000型倒置金相显微镜下观察其显微组织形貌,获得相应的显微组织图。试样的相对密度<sup>[19]</sup>为

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 $\rho_r$ 为相对密度, $\rho_0$ 为理论密度, $\rho$ 为实际密度。实际密度采用排水法<sup>[19]</sup>测量,计算公式为

$$\rho = \frac{W_{\text{air}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{W_{\text{air}} - W_{\text{H}_2\text{O}} - W_{\text{line}}}, \quad (2)$$

式中 $W_{\text{air}}$ 为试样在空气中的重力测量值, $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 为试样在水中的重力测量值, $W_{\text{line}}$ 为悬挂试样所用细线的重力测量值, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的密度。

使用JB-8C型触针式精密粗糙度仪对成形表面

采用三点取样法测量粗糙度,并取平均值作为此成形表面的表面粗糙度。借助 TZTEK-VMA 手动影像测量仪测量样品的成形精度,测量精度为  $1\ \mu\text{m}$ ,测量方法是将零件显微轮廓拟合为理想直线,从而测得精确尺寸值,计算得到的平均值即为零件的精确尺寸值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 正交实验结果

在 SLM 成形钛合金的过程中,激光与钛合金粉末相互作用形成单熔道,进而多道多层堆积。因此,实验前进行了单熔道的成形实验,结果如图 5 所示。激光脉冲频率为  $30\ \text{Hz}$ ,脉冲宽度为  $7\ \text{ms}$ 。在激光功率  $P=180\ \text{W}$ ,扫描速度  $V=1000\ \text{mm/s}$ ,光斑直径  $D=30\ \mu\text{m}$ ,铺粉厚度  $\Delta l=20\ \mu\text{m}$ ,工作平面处于焦点下方  $0.05\ \text{mm}$  处的情况下,获得了连续光滑的单熔道。但熔道线侧边偶尔会出现微小金属球,单熔道的直线度不够理想,这可能是由于熔道线宽很细且成形基板经喷砂处理后有实际粗糙度等。另外,激光器发射激光的参数轻微变化、成形过程存在球化效应、激光辐射粉末后产生的微熔池大小形态不够稳定等因素共同导致了打印过程中熔池熔滴飞溅与微小气孔的产生。通过光学显微镜观察并测量得知单熔道线宽为  $100\sim 130\ \mu\text{m}$ ,整体形貌的连续性较好。

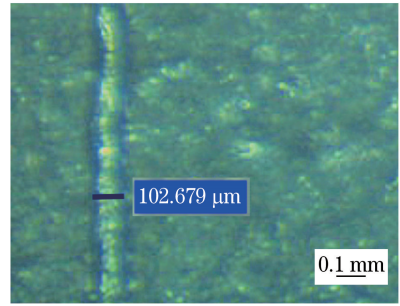


图 5 单熔道形貌图

Fig. 5 Morphology of single melting line

考虑单熔道实验的成形结果,设置扫描线搭接间距参数时应不超过  $100\ \mu\text{m}$ (大线宽参数容易导致同一层熔道之间未熔合等缺陷)。结合分区扫描模式 3D 示意图(图 6)的思路,设计正交实验表(见表 3),正交表选用 6 因素 5 水平设计模式。选用 25 个  $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$  的方块作为初步实验成形零件。零件成斜  $45^\circ$  均匀摆放在成形基板上,打印层数为 520。实验基板选用尺寸为  $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 15\ \text{mm}$  的经倒圆角处理后的 TC4 钛合金材料基板。由于实验采用了 CTI 三轴振镜系统,激光对非中心区域边缘扫描时产生的光斑形状、热作用效果、成形温度场和成形精度与中心区域的差异可以忽略。样品成形效果的优劣由宏观表面形貌与显微镜下的表面形貌来衡量,成形件的显微组织、相对密度与成形精度的测量值同样重要。

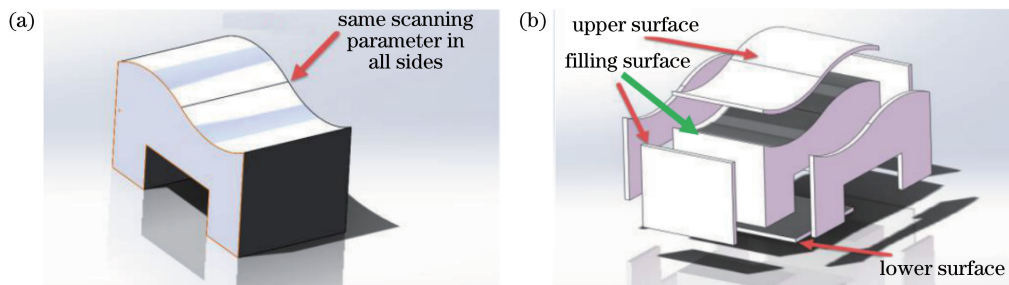


图 6 扫描模式示意图。(a)整体;(b)分区

Fig. 6 Schematic of scanning modes. (a) Whole; (b) partition

表 3 正交实验结果

Table 3 Results from orthogonal experiments

Level	Scanning speed on filling surface / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Laser power on filling surface / W	Hatch distance of filling surface / $\mu\text{m}$	Scanning speed on upper surface / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Laser power on upper surface / W	Hatch distance of upper surface / $\mu\text{m}$
1	700	140	60	700	140	60
2	800	150	70	800	150	70
3	900	160	80	900	160	80
4	1000	170	90	1000	170	90
5	1100	180	100	1100	180	100

对正交实验的样品进行检测和分析,得到了几种典型的宏观和微观表面形貌。根据热输入能量密度和表面形貌特征大致分为4种:波浪表面、平滑表面、

粒条表面、细砂表面,分别如图7(a)~(d)所示,对应的200倍放大倍数下的表面微观形貌如图8所示。典型样品的实验工艺参数与检测结果见表4。

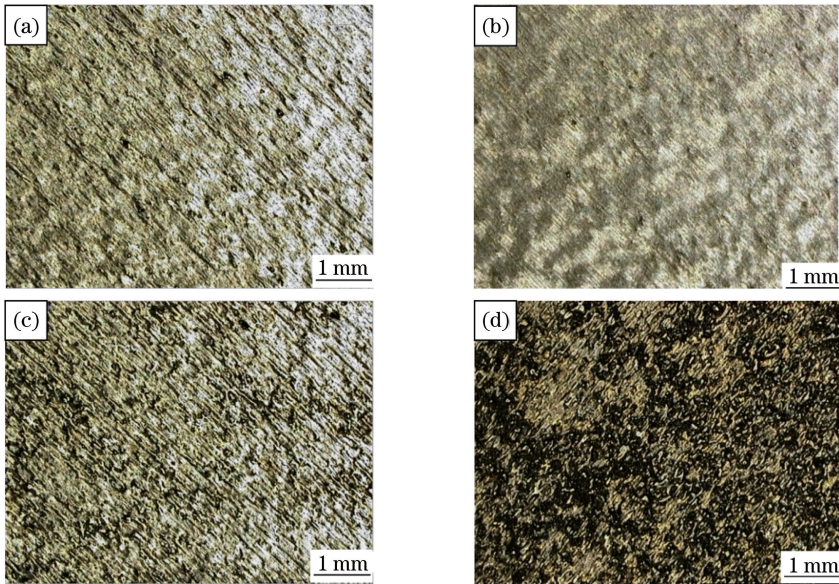


图7 典型表面形貌的宏观影像图。(a)波浪表面;(b)平滑表面;(c)粒条表面;(d)细砂表面  
Fig. 7 Macro-images of typical surface morphologies. (a) Wave-like surface; (b) smooth surface;  
(c) grain strip-like surface; (d) fine sand-like surface

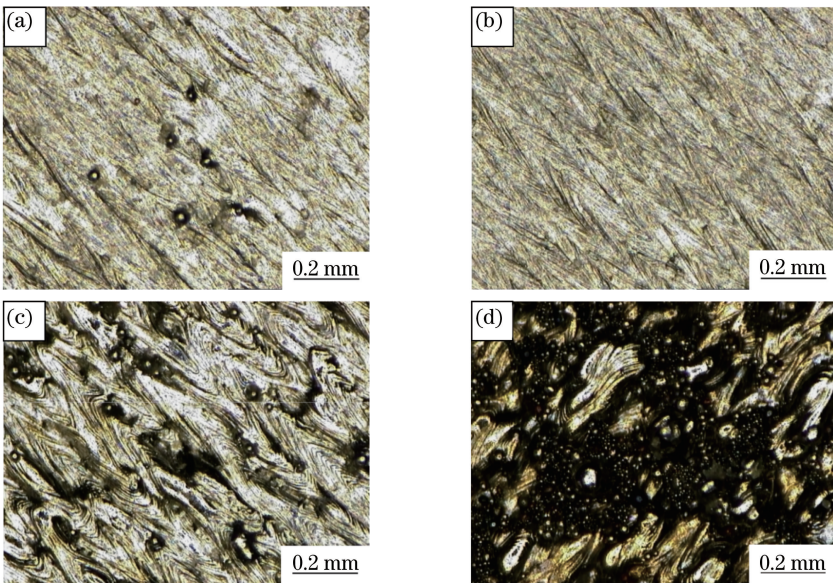


图8 典型表面形貌的显微影像图。(a)波浪表面;(b)平滑表面;(c)粒条表面;(d)细砂表面  
Fig. 8 Micro-images of typical surface morphologies. (a) Wave-like surface; (b) smooth surface;  
(c) grain strip-like surface; (d) fine sand-like surface

在成形过程中,前一层与后一层熔接时,已成形部分的固态金属与微熔池中液体之间的固液相间作用力大于微熔池中液体之间的液液相间作用力,故微熔池中的液体与前一层的接触处的曲面曲率较大,而微

熔池与气体接触的上半部分液体之间的相互作用力较小,微熔池中液体上表面形成的曲面曲率较小,总体形状呈上宽下窄的椭球形形状。选用 Simchi 等<sup>[23]</sup>提出的能量密度公式作为能量密度的估量标准。图7(d)所

示的砂粒状表面形貌是在较低激光扫描能量密度下形成的。激光束与粉末作用形成高温金属微熔池,扫描速度过快、激光功率较低及扫描速度、激光功率与扫描间距不匹配等因素都会造成粉末熔化不充分,导致成形件致密度低以及表面呈未熔透的砂粒状。熔化状态不稳定时,前一道扫描激光束辐射形成的熔池吸入了周边的粉末,下一道扫描线没有足够的粉末熔化填充。另外,在表面张力作用下,熔化的金属趋向于降低表面

表4 典型样品的分区参数与检测结果

Table 4 Partition parameters and test results of typical specimens

Sample No.	Scanning	Laser	Hatch	Scanning	Laser	Hatch	$R_a/\mu\text{m}$	Relative density /%
	speed on filling surface / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	power on filling surface / W	distance of filling surface / $\mu\text{m}$	speed on upper surface / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	power on upper surface / W	distance of upper surface / $\mu\text{m}$		
a	900	160	100	800	170	60	5.5	99.0
b	1000	180	80	700	170	70	4.3	99.4
c	800	140	70	900	170	100	9.5	97.7
d	1000	160	60	1000	150	100	11.6	97.0

图7(c)所示为粒条状表面形貌,其金属粉末熔化程度比图7(d)的稍高,但总体上仍呈未充分熔化状态。主要原因是扫描能量密度与熔池热循环不能使粉末完全熔化,不能与已凝固的部分产生良好的冶金结合<sup>[21]</sup>。上表面参数中激光扫描间距值为 $100\mu\text{m}$ ,由于材料热导率较高,在激光辐射下,还未完全熔化的金属粉末与上一层熔合时就已经凝固了。部分由球化效应产生的小金属粒伴随凝固的细金属线在零件表面均匀分布。由显微图可观察到,熔道不连续的现象较多,且熔道与熔道之间的连接性较差,样品表面呈不连续的粒条状,微观表面呈凹凸不均状。其相对密度值为 $97.7\%$ ,表面粗糙度 $R_a$ 为 $9.5\mu\text{m}$ ,较图7(d)的有所提高。

由于钛合金的热导率高,预热充分,成形过程中气体保护效果好,每一层扫描过程中均未产生较大的飞溅,成形过程较稳定。图7(b)所示样品在成形过程中产生的飞溅较图7(a)、(c)、(d)的少,这是由于该样品的内填充面能量密度参数较为合适且各参数搭配较好。在该组合参数下,上表面熔道之间的搭接效果较好,表面质量也有所提高,且与前层的连接更加紧密。最终样品表面呈平滑状,其相对密度值为 $99.4\%$ ,表面质量值 $R_a$ 为 $4.3\mu\text{m}$ ,成形效果较为理想。

当零件成形的能量密度较高时,会产生较大的局部热应力,伴随产生局部热裂纹,同时成形过程中金属易气化,飞溅较为严重。图7(a)所示样品的上表面

自由能而产生球化效应<sup>[40]</sup>。这些原因都会导致后一条熔道与前一条熔道无法良好连接,后成形的一层不能与前一层良好连接,造成每一层扫描面都会呈微观凹凸不均状,并有大量的球状颗粒附着。选用的内填充面参数中能量密度较高,但与之匹配的最上层的上表面参数中能量密度较低,上表面参数与内填充面参数组合下成形的样品表面呈未熔透的砂粒状,其相对密度值为 $97.0\%$ ,表面质量 $R_a$ 值为 $11.6\mu\text{m}$ 。

金属粉末已经充分熔化,其能量密度比图7(b)、(c)、(d)的要大,成形时产生的金属液飞溅现象较严重,粉末熔化后的蒸发较内部成形时的多。而 $20\mu\text{m}$ 的加工层厚使得每层的粉末量较少,成形热循环的温度梯度大,逐层形成的微熔池冷却速度快,凝固的金属晶粒细小,形成的内部应力场较大,易产生内部热裂纹。其上表面的成形效果不如图7(b)的稳定,最终样品表面呈波浪状,其相对密度值为 $99.0\%$ ,表面质量值 $R_a$ 为 $5.5\mu\text{m}$ 。

样品成形参数对表面形貌成形效果的影响是交互的。为了获得良好的成形效果,可优化内填充参数与上表面参数之间的相互组合,使激光作用于内部与外表面的成形效果有所侧重,最终使内部结构强度高、成形稳定、缺陷少,外表面表面质量好、粗糙度 $R_a$ 值低、球化效应少,且彼此之间连接良好。图7(b)所示的样品内部结构均匀,层与层之间连接良好,未出现明显的孔洞和裂纹缺陷,表面粗糙度 $R_a$ 值为 $4.3\mu\text{m}$ ,成形效果理想。该分区扫描策略实现了兼顾良好的内部结构与表面质量的效果,这是传统整体扫描策略所不能达到的。

### 3.2 单因素对比实验

取消设置上表面参数而其他参数不变以进行对比实验,具体参数见表5,B1样品的表面形貌显微图如图9所示。可以看出,样品的致密度基本无变化,而表面粗糙度值相比分区扫描策略的增大明显, $R_a$ 值达到 $20.7\mu\text{m}$ 。这是由于原样品的内填充面

参数直接作为外表面的扫描参数,而零件表面质量主要由内填充面的参数决定。但实际上,内填充面的参数仅适合内部结构成形,不适合外表面成形,无法单独得到较好的表面质量,故表面质量有所下降。

表 5 单因素实验参数表

Table 5 Parameters for single factor experiments

Sample No.	Scanning speed on filling surface / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Laser power on filling surface / W	Hatch distance of filling surface / $\mu\text{m}$
A1	900	160	100
B1	1000	180	80
C1	800	140	70
D1	1000	160	60

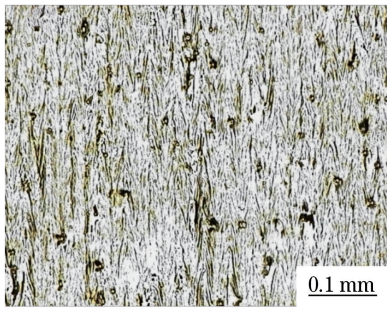


图 9 B1 样品的表面形貌显微图

Fig. 9 Surface micro-morphology of sample B1

### 3.3 悬垂面实验

在传统整体扫描策略下,SLM 成形悬垂结构时,易出现挂渣、过烧等成形缺陷。导致这些缺陷的原因是成形悬垂面时,辐射的激光与粉末材料作用产生大量热量,而金属粉末的热传导能力不如凝固态金属的,热量易聚集,形成比较大的熔池,导致挂渣、过烧等缺陷的产生。故成形悬垂结构时,需要控制好悬垂结构与粉末接触的悬垂面扫描激光的能量密度。通常在较低的能量密度下能获得较好的成形效果。另外,增大悬垂面成形时的能量散失也可优化悬垂结构的成形效果。

实验单独设置下表面参数,进行多次匹配正交实验,选取合适的实验工艺参数。由于悬垂面的下表面直接与粉末接触,应采用较小的能量密度以防止烧穿现象。最终成形悬垂面效果良好,如图 10 所示。

### 3.4 成形能力测试实验

样品的最终成形效果由多个因素共同决定,选择最终成形参数时,应综合考虑内部组织结构、表面质量、零件致密度和尺寸精度。分析实验结果后,选

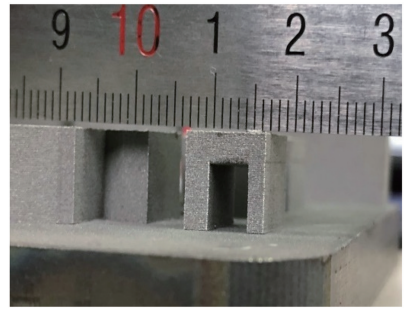


图 10 悬垂面成形效果图

Fig. 10 Forming effect of overhanging surface

定合适的上表面参数、内填充面参数、下表面参数,层厚为  $20 \mu\text{m}$ ,选择条带式扫描方式,扫描顺序为由内至外,上表面的识别公差设置为  $0.25 \text{ mm}$ ,层间旋转角为  $70^\circ$ 。STL 格式的模型用 Materialise-Magics 分层软件处理后分为 850 层,每层设置相应的扫描信息后导出加工文件。通过控制软件识别加工文件从而进行加工。使用高纯氩气形成氧含量极低的气氛环境保护加工过程,成形样品如图 11 所示,各部分的成形效果见表 6。可以看出,薄壁、圆台、尖角、圆柱、锥体和球体等几何特征都能够良好成形,各特征面也成形良好,且得到了各特征的初步成形极限。成形曲面时产生的球化效应比水平面的严重,而悬垂面的表面质量远低于其余面。这是由于成形过程是一层层叠加的,存在影响曲面成形效果的台阶效应,而水平面不存在台阶效应。悬垂面成形时,第一层往往是激光直接辐射在金属粉末上,没有已经凝固的金属作为依托,需维持吉布斯自由能最小化,进而产生了表面张力作用,很难保证悬垂面的成形质量。测得样品的相对密度达  $99.2\%$ ,上表面粗糙度  $R_a$  为  $4.6 \mu\text{m}$ ,与之前的测量结果相差不大。放大原始模型并进行光斑补偿后,零件大尺寸和小尺寸的精度误差均小于  $0.05 \text{ mm}$ ,平均值为  $0.026 \text{ mm}$ 。

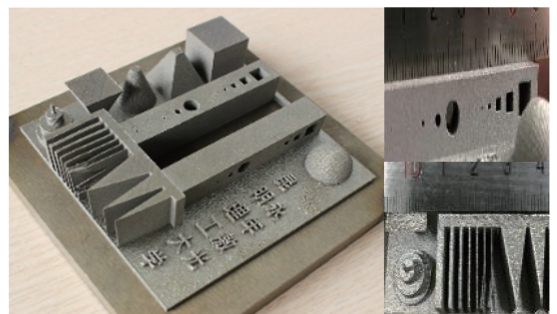


图 11 成形件

Fig. 11 Forming parts

表6 成形件各部分的成形效果

Table 6 Forming effect of each part of forming parts

Test No.	Test purpose (forming ability)	Test result
1	Thin-wall	Fine (0.15 mm)
2	Plane and vertical	Few balling behaviors
3	Sphere forming ability	Few balling behaviors
4	Sharp angle	Fine (10°)
5	Sloping plan	Fine (30°)
6	Sloping and bending plan	Almost no balling behaviors
7	Vertical and bending plan	Almost no balling behaviors
8	Round hole	A lot of balling behaviors
9	Square hole	Balling behaviors
10	Arc overhang	Fine (70° tilt angle)
11	Square overhang	Fine (9 mm)

## 4 结 论

采用金属 SLM 工艺,通过分区扫描策略,配合正交实验和单因素实验优化工艺参数,获得了 SLM 医用钛合金的 4 种典型表面形貌,阐述了 4 种典型表面形貌的成形过程、原理和影响因素,研究了不同特征表面的医用钛合金件的致密度、表面质量、尺寸精度等表征值。研究表明,分区扫描策略在 SLM 成形医用钛合金中具有独特优势,能有效提高成形质量。结合悬垂面分区扫描策略实验,综合考虑了 SLM 医用钛合金的表面质量、致密度、尺寸精度和内部显微组织结构,确定了工艺参数:内填充面扫描速度为 1000 mm/s,激光功率为 180 W,搭接间距为 80  $\mu\text{m}$ ;上表面的扫描速度为 700 mm/s,激光功率为 170 W,搭接间距为 70  $\mu\text{m}$ 。采用优化后的参数,测试了典型特征表面与特征几何体的成形能力,所得成形件的相对密度达 99.2%,粗糙度  $R_a$  为 4.6  $\mu\text{m}$ ,尺寸精度误差均值为 0.026 mm。

## 参 考 文 献

- [1] Murr L E, Martinez E, Amato K N, *et al.* Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: Examples of 3D materials science[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 1(1): 42-54.
- [2] Frazier W E. Metal additive manufacturing: A review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [3] Stamp R, Fox P, O'Neill W, *et al.* The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2009, 20(9): 1839-1848.

- [4] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, *et al.* Rapid manufacturing of metal components by laser forming [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12/13): 1459-1468.
- [5] Wang X, Wang D S, Gao X S, *et al.* Research status and development in laser additive manufacturing of light alloy components[J]. Applied Laser, 2016(4): 478-483.  
王霄, 王东生, 高雪松, 等. 轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2016(4): 478-483.
- [6] Yi H, Bai P K, Liu B, *et al.* Present situation and development trend of selective laser melting technology for metal powder [J]. Casting Forging Welding, 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]. 金属铸锻焊技术, 2010, 39(1): 140-144.
- [7] Gu D, Hagedorn Y, Meiners W, *et al.* Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium [J]. Acta Materialia, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [8] Yadroitsev I, Bertrand P, Smurov I. Parametric analysis of the selective laser melting process [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8064-8069.
- [9] Li H X, Huang B Y, Sun F, *et al.* Microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V alloys fabricated by selective laser melting [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(2): 209-212.
- [10] Li R D, Liu J H, Shi Y S, *et al.* Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9/10/11/12): 1025-1035.



- [11] Heil P, Müller L, Korner C, *et al.* Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting[J]. *Acta Biomaterialia*, 2008, 4(5): 1536-1544.
- [12] Wu S Q, Lu Y J, Gan Y L, *et al.* Microstructural evolution and microhardness of a selective-laser-melted Ti-6Al-4V alloy after post heat treatments [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 672: 643-652.
- [13] Brunello G, Sivoletta S, Meneghello R, *et al.* Powder-based 3D printing for bone tissue engineering [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34 (5): 740-753.
- [14] Gu D D, Shen Y F. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 432(1/2): 163-166.
- [15] Facchini L, Magalini E, Robotti P, *et al.* Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of pre-alloyed powders [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2010, 16(6): 450-459.
- [16] Yang Y Q, Wang D, Wu W H, *et al.* Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0601007.  
杨永强, 王迪, 吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成形技术研究进展[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0601007.
- [17] Sun T T, Yang Y Q, Su X B, *et al.* Research of densification of 316L stainless steel powder in selective laser melting process [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 443-446.  
孙婷婷, 杨永强, 苏旭彬, 等. 316L 不锈钢粉末选区激光熔化成形致密化研究[J]. *激光技术*, 2010, 34(4): 443-446.
- [18] Wang D, Yang Y Q, Huang Y L, *et al.* Impact of inter-layer scan strategy on quality of direct fabrication metal part in SLM process [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 447-451.  
王迪, 杨永强, 黄延禄, 等. 层间扫描策略对 SLM 直接成形金属零件质量的影响[J]. *激光技术*, 2010, 34(4): 447-451.
- [19] Wang D, Yang Y Q, Wu W H. Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3233-3239.  
王迪, 杨永强, 吴伟辉. 光纤激光选区熔化 316L 不锈钢工艺优化[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3233-3239.
- [20] Liu R C, Yang Y Q, Wang D. Research of upper surface roughness of metal parts fabricated by selective laser melting[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 425-430.  
刘睿诚, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成形金属零件上表面粗糙度的研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(4): 425-430.
- [21] Wang D, Yang Y Q, Huang Y L, *et al.* Density improvement of metal parts directly fabricated via selective laser melting [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(6): 107-111.  
王迪, 杨永强, 黄延禄, 等. 选区激光熔化直接成形金属零件致密度的改善[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(6): 107-111.
- [22] Yang X W, Yang Y Q, Liu Y, *et al.* Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0303004.  
杨雄文, 杨永强, 刘洋, 等. 激光选区熔化成形典型几何特征尺寸精度研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303004.
- [23] Simchi A. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, 428(1): 148-158.
- [24] Sun J F, Yang Y Q, Yang Z. Study on surface roughness of selective laser melting Ti-6Al-4V based on powder characteristics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0702004.  
孙健峰, 杨永强, 扬州. 基于粉末特性的选区激光熔化 Ti-6Al-4V 表面粗糙度研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0702004.
- [25] Chen D N, Liu T T, Liao W H, *et al.* Temperature field during selective laser melting of metal powder under different scanning strategies [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0403003.  
陈德宁, 刘婷婷, 廖文和, 等. 扫描策略对金属粉末选区激光熔化温度场的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403003.
- [26] Yan A R, Yang T T, Wang Z Y, *et al.* Thermal properties and mechanical properties of selective laser melting different layer thicknesses of Ni powder[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0203004.  
闫岸如, 杨恬恬, 王智勇, 等. 选区激光熔化不同层厚镍的热特性与机械性能[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0203004.

- [27] 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.
- [28] Yadroitsev I, Smurov I. Surface morphology in selective laser melting of metal powders [J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 264-270.
- [29] Evren Y, Jan D, Kruth J. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts [J]. Rapid Prototyping Journal, 2011, 17(5): 312-327.
- [30] Nersisyan H H, Yoo B U, Kim Y M, *et al.* Gas-phase supported rapid manufacturing of Ti-6Al-4V alloy spherical particles for 3D printing [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 304: 232-240.