

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

麦淑珍 杨永强* 王迪

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

摘要 为快速直接制造具有复杂曲面的个性化金属零件, 需要保证激光选区熔化(SLM)成型曲面特征的表面成型质量。通过正交实验获得 NiCr 合金优化工艺参数, 采用 S 型正交层错扫描策略成型两种柱面体模型; 在超景深显微镜、扫描电镜下观察成型件内、外侧曲面表面形貌, 并测量相应表面粗糙度。结果表明: 成型不同空间位置摆放的曲面零件, 各层面轮廓误差、层面间台阶效应的逐层堆叠最终使曲面形成台阶状、网结状形貌, 成型倾斜切角小于 60° 的悬垂曲面时因粉末粘附严重甚至会形成条虫状、粒球状形貌; 表面粗糙度 R_a 值与曲面特征表面形貌变化规律具有相关性, 这为提高 SLM 成型曲面零件的表面成型质量提供了重要参考。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 曲面特征; 表面形貌; 表面粗糙度; 台阶效应

中图分类号 TG665; TH164 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1203004

Study on Surface Morphology and Roughness Variation of NiCr Alloy Curved Surface Manufactured by Selective Laser Melting

Mai Shuzhen Yang Yongqiang Wang Di

*School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510640, China*

Abstract In order to directly fabricate customized metallic parts with complicated surface, the surface quality of curved surface feature manufactured by selective laser melting (SLM) technology should be ensured. The parameters of NiCr alloy are optimized by orthogonal experiment and two kinds of cylinders are fabricated with X-Y inter-layer staggered scan strategy. The surface morphologies of curved surfaces of the parts are studied using three dimensional super depth digital microscope and scanning electron microscope, and the corresponding surface roughness is measured. The results show that when fabricating the parts with curved surface placed in different spatial positions, contour error in layer and stair effect among layers stacked lead to the staircase-shaped profile and anastomosing morphology on curved surfaces, and even the worm-like or granular morphology on overhanging curved surfaces when the tilt angle is larger than 60° . Variation of the value of R_a is consistent with surface morphology. The results provide important guidance to improve surface quality of the parts with curved surface fabricated by SLM.

Key words laser technique; selective laser melting; curved surface feature; surface morphology; surface roughness; stair effect

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

收稿日期: 2015-08-03; 收到修改稿日期: 2015-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(51275179, 51405160)、2014年公益研究与能力建设专项(2014A010104008)、佛山市科技创新专项(2013AH100042)、广东省科技计划项目(2014B010131002, 2014B010129003)

作者简介: 麦淑珍(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光加工及激光快速成型等方面的研究。

E-mail: maishuzhen@21cn.com

导师简介: 杨永强(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光快速成型及自动化焊接技术等方面的研究。

E-mail: meiyqiang@scut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: meiyqiang@scut.edu.cn

1 引言

激光选区熔化(SLM)是一种基于激光熔化金属粉末的快速成型技术,成型原理是将设计的三维模型离散成一层一层的轮廓信息,控制激光束扫描金属粉末形成熔道,熔道相互搭接形成层面,逐个层面堆叠成三维金属零件^[1-3]。与传统制造技术相比,SLM技术突出的优点之一是几乎可以直接成型任意复杂结构且具有完全冶金结合的功能零件,致密度可达到近乎100%^[4-5],其应用范围已拓展到生物医疗、航空航天、汽车等领域^[6-7]。

虽然SLM技术适用于多曲面、非对称、内部结构精细等复杂产品的个性化定制,但成型的零件在尺寸精度、表面质量等方面依然存在缺陷^[8-9]。尤其是成型多曲面零件,由于曲面具有外形复杂、拐点多、变截面、悬空等特点,其成型能力与规则直壁件有较大差异。Wang等^[10]采用SLM技术成型了变截面的圆弧悬垂结构,研究了不同激光能量输入对非水平悬垂结构成型的影响;杨雄文等^[11]基于SLM成型典型几何特征的尺寸精度及成型能力的研究,提出了适用于SLM成型的零件设计规则;王续跃等^[12]研究了几何形状的差异对激光熔覆成形的影响,获得向内倾斜和向外倾斜圆形薄壁件偏移量、成型高度和倾斜角度的差异关系;穆存远等^[13]针对快速成型技术研究了台阶误差的变化规律,提出优化分层、加工方向可有效较少台阶效应对零件成型质量的影响;Strano等^[14]综合台阶效应和粉末粘附对悬垂结构表面质量的影响,建立了SLM成型倾斜悬垂面的表面粗糙度计算模型;Yan等^[15]发现SLM成型曲面或倾斜平面产生的台阶效应使得多孔结构显示出具有粗糙的波纹表面。

上述国内外学者主要从工艺参数对成型能力的影响、台阶效应对表面粗糙度的影响等方面对SLM成型具有曲面特征的零件进行了研究,但针对曲面零件的特征表面形貌及粗糙度变化规律的分析却鲜有报导。曲面特征几乎存在于所有零件结构中,曲面特征表面形貌随成型条件发生变化,同时将影响零件表面质量。因此设计并采用医用NiCr合金成型不同的柱面体模型,从SLM成型的机理上分析曲面特征表面形貌的变化规律,并归结出其特征与表面粗糙度之间的关系,为进一步提高激光选区熔化成型个性化医用金属植入体的表面成型质量提供了重要参考。

2 实验条件

2.1 实验设备

实验采用的SLM成型设备为华南理工大学自主研发的激光选区熔化快速成型机Dimetal-100,该成型设备由光纤激光器、光路传输单元、粉末送给机构、成型室、气体循环系统及人机交互软件等部分组成,如图1所示。成型精度可达 ± 0.1 mm,铺粉厚度为20~100 μm ;系统拥有高速高精度的振镜扫描单元及 $f-\theta$ 透镜,保证在扫描范围内的激光斑点功率密度几乎一致,可在成型平面上聚集成30~50 μm 的光斑。特别适合于精密细小零件的精确加工。

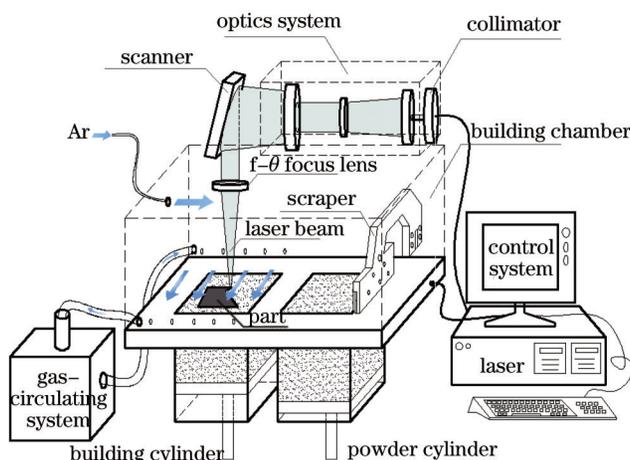


图1 SLM成型原理图

Fig.1 SLM manufacturing principle

2.2 实验材料

本研究使用的成型材料为医用 NiCr 合金金属粉末,膨胀率为 $14.1 \mu\text{m}/\text{km}$,成分满足 ASTM F75 要求,其主要成分见表 1。粉末以气雾化制备,呈球形状,粒度分布分别为: $d(0.5)<12.69 \mu\text{m}$, $d(0.9)<30.19 \mu\text{m}$,平均粒径为 $13.46 \mu\text{m}$ 。采用 A3 钢加工成 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的正方块作为基板,成型过程中采用氮气作为保护气体。

表 1 NiCr 合金粉末主要成分(质量分数,%)

Table 1 NiCr alloy powder chemical compositions (mass fraction, %)

Ni	Cr	Mo	Mn	Si	C
60.5	26.25	11.21	0.04	1.8	0.01

2.3 模型设计及实验方法

2.3.1 工艺参数优化

致密性和表面粗糙度分别是 SLM 快速成型技术中决定零件的力学性能和判定表面成型质量的重要指标^[6],优化工艺参数以确保获得具有良好致密度和粗糙度的零件是本研究的前提。在课题组前期工艺研究基础上,选用 S 型正交层错扫描策略,设定加工层厚为 0.03 mm ,并选取激光功率 P 、扫描速度 v 和扫描间距 H 等 3 个关键因素作为变量参数,各选 3 个水平,采用正交实验方法对 NiCr 合金 SLM 成型进行工艺探究。不考虑因素间的交互作用,选用表 2 的正交表 $L_9(3^4)$ 安排实验方案。通过 DiMetal-100 设备成型 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的 NiCr 合金小方块试样,利用排水法测量计算试样的致密度,并采用 Talysurf CLI 1000 表面轮廓仪测量零件的表面粗糙度 R_a 值。

表 2 $L_9(3^4)$ 正交实验因素水平

Table 2 Factors and levels of $L_9(3^4)$ orthogonal test

Experiment No.	Laser power /W	Scan speed /(mm/s)	Scan space /mm
1	130	400	0.07
2	130	600	0.08
3	130	700	0.09
4	150	500	0.08
5	150	600	0.09
6	150	700	0.07
7	170	500	0.09
8	170	600	0.07
9	170	700	0.08

2.3.2 曲面零件设计及测试方法

如图 2 所示,任意曲线面可看作是以平行 Z 轴的直线为母线形成的直线面和以 X-Y 平面内任一直线为母线形成的直线面的非线性叠加。分别定义上述两种直线面为纵柱面和横柱面,并设计如图 3 所示的纵柱面体和横柱面体,以研究 SLM 成型具有曲面特征的零件的表面形貌及表面粗糙度规律。两种柱面体各分别取 0.5 、 1.5 、 2.5 mm 这 3 个不同的壁厚,内壁半径 R_i 均为 5 mm ,外壁半径 R_o 随壁厚变化分别为 5.5 、 6.5 、 7.5 mm ,其中纵柱面体高度为 10 mm ,横柱面体宽度为 10 mm ,且横柱面体的曲面切线与水平面的最小悬垂夹角设计为 30° ,以确保悬垂曲面在不添加支撑的情况下稳定成型^[7]。

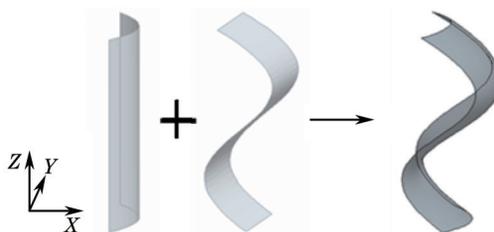


图 2 直线面叠加组成任意曲线面

Fig.2 Any curved surface by superposition of planareas

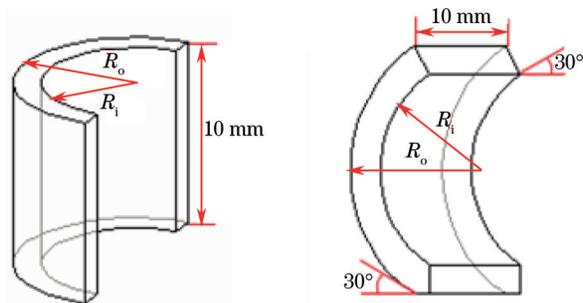


图3 柱面体模型示意图。(a) 纵柱面体; (b) 横柱面体

Fig.3 Schematic diagrams of cylinder models. (a) Vertical cylinder; (b) transverse cylinder

采用优化后的工艺参数成型高致密度的NiCr合金柱面体试样,成型后如图4所示各选取5个测试角 α ,其中纵柱面体的 α 分别取 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° ,横柱面体的 α 分别取 30° 、 60° 、 90° 、 120° 和 150° ,采用VHX-600E超景深三维显微镜、Carl Zeiss-EVO MA15扫描电镜(SEM)分别对试样内外曲表面形貌进行观察,并用Talysurf CLI 1000表面轮廓仪测量其表面粗糙度 R_a ,其中取样长度为 0.8 mm ,评定长度为 4 mm ,测量精度为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$,测量3次取平均值。

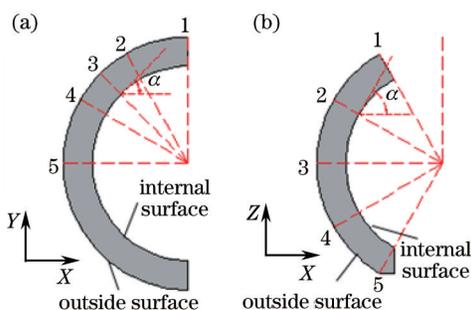


图4 柱面体的测试方案

Fig.4 Testing schemes of cylinders

3 结果与讨论

3.1 优化工艺结果分析

表3为方块试样的致密度和表面粗糙度测量结果,在参数范围内均可获得94.50%以上的致密度。通过采用综合平衡法对正交实验结果进行处理,获得3个因素对致密度的影响的主次关系为: $P > v > H$,对表面粗糙度影响的主次关系为: $v > H > P$ 。综合权衡各指标得到最优工艺参数为 $P=150\text{ W}$, $v=500\text{ mm/s}$, $H=0.07\text{ mm}$,但考虑到成型效率及熔道搭接率对表面粗糙度的影响,使熔道之间的搭接率保持在30%~40%之间^[18],选用次优工艺实验号4的参数: $P=150\text{ W}$, $v=500\text{ mm/s}$, $H=0.08\text{ mm}$,加工成型不同壁厚的柱面体,成型效果如图5

表3 方块试样的测量结果

Table 3 Measurement results of cubes

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Relative density /%	96.85	95.97	94.90	97.47	96.02	96.38	95.66	97.84	96.49
Surface roughness / μm	7.18	10.23	14.91	5.47	13.75	8.42	6.76	10.06	11.45

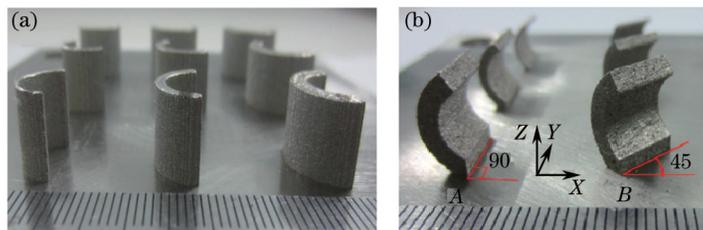


图5 不同壁厚的柱面体成型效果。(a) 纵柱面体; (b) 横柱面体

Fig.5 Fabricating results of cylinders with different wall thicknesses. (a) Vertical cylinders; (b) transverse cylinders

所示,零件成型效果良好,没有明显挂渣、翘曲等缺陷。

3.2 曲面形貌特征

3.2.1 纵柱面体表面形貌分析

图6为纵柱面体不同测试角的表面形貌图。从纵柱面体不同测试角 α 的表面形貌图可看到,其内、外侧曲面沿横截面曲线边界均呈现台阶轮廓形貌,且以 $\alpha=45^\circ$ 为轴,表面台阶形貌特征对称分布,而沿Z轴成型方向层间的搭接熔道间沟壑状形态明显,呈现波纹形貌。图7为1/4外侧曲面的SEM图,清晰可见层间熔道搭接状态,在 $\alpha=90^\circ$ 附近,曲面形貌特征为中间凹两侧凸的平台,平台两侧沿曲面呈现宽窄相间的台阶形貌,且随着 α 减小,台阶间距逐渐变小,宽窄相间特征减弱,在 $\alpha=45^\circ$ 处台阶最小。

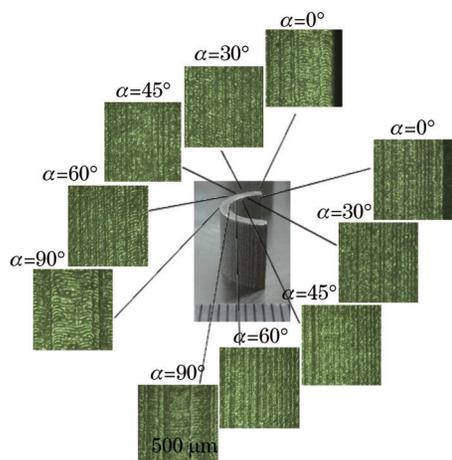


图6 纵柱面体不同测试角的表面形貌图

Fig.6 Surface morphologies in different testing angles of vertical cylinder

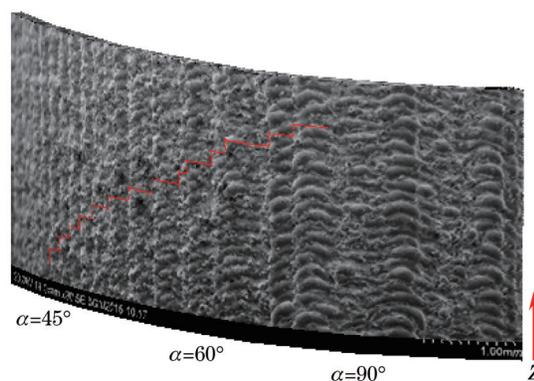


图7 纵柱面体外侧曲面SEM图

Fig.7 SEM morphology of outside surface of vertical cylinder

如图8所示,当模型表面与熔道扫描线方向存在一定的角度时,会产生轮廓误差,上述纵柱面体的表面形貌特征主要是由轮廓误差引起的。图8(a)为纵柱面体分层切片的扫描线填充示意图,设计的柱面体横截面轮廓为半圆环,如红色虚线所示,受熔道宽度和光斑直径的影响,实际成型的轮廓大于设计轮廓且并非光滑连续圆弧^[11];如实线所示,造成切片层轮廓特征发生畸变,层内边界呈现台阶形轮廓,台阶形轮廓与设计轮廓的形状误差为轮廓误差,且随着 α 减小台阶宽度 w 减小,轮廓误差减小,实际成型轮廓如图8(b)所示。采用S型正交层错扫描策略,相邻层错层间熔道错落堆叠,从而形成宽窄相间的台阶特征;相邻正交层间熔道正交堆叠,使得台阶形貌特征以 $\alpha=45^\circ$ 为轴对称分布,因在 $\alpha=90^\circ$ 或 $\alpha=0^\circ$ 附近台阶宽度 w 交替出现最大值,最终形成宽度为边缘扫描线长的平台形貌。同时在扫描过程中,切片层边界对应熔道始末端的热输入量大而形成较大尺寸熔池,实际熔道尺寸大于光斑直径,导致了所谓的“凸点效应”^[19],在正交层错的扫描策略下沿Z轴方向形成起伏明显的波浪形貌。

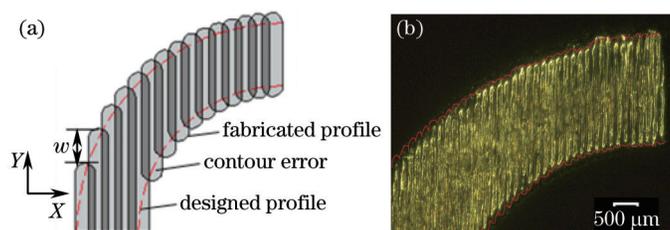


图8 纵柱面体轮廓误差原理图。(a) 层面扫描线填充示意图; (b) 成型件的轮廓形貌

Fig.8 Schematic diagram of vertical cylinder contour error. (a) Schematic diagram of scan line filling; (b) profile morphology of the part

3.2.2 横柱面体表面形貌分析

图5(b)中横柱面体A的曲面母线与Y轴平行,其内、外侧曲面表面形貌如图9所示。当 $\alpha=90^\circ$ 时,外侧曲面呈现明显台阶形貌,且台阶宽度随 α 减小而逐渐增大,内侧曲面形貌则随 α 减小逐渐呈现粒球状;当 $\alpha>90^\circ$ 时,外侧曲面随着 α 增大台阶效应减弱,且当 $\alpha>120^\circ$ 时,曲面逐渐呈现断续的条虫状、粒球状形貌,而内侧曲

面形貌从粒球状逐渐呈现台阶状;当 $\alpha=90^\circ$ 时,横柱面内外曲面的台阶效应基本消失。

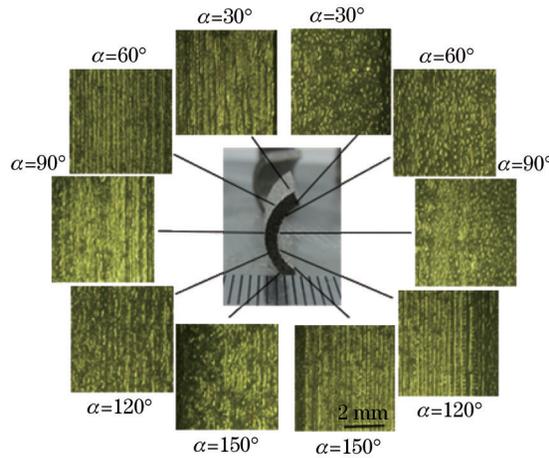


图9 横柱面体不同测试角的表面形貌图

Fig.9 Surface morphology in different test angles of transverse cylinder

根据SLM成型的离散原理,经过切片处理后,实体模型的外表面是由一系列切片层的轮廓表面组成,故当模型表面与零件成型方向存在一定的角度时,会产生台阶效应^[20]。横柱面体的纵截面轮廓为圆环曲线,零件表面与成型方向的夹角连续变化,使得柱面体表面呈现台阶形貌,同时形成非水平悬垂面,台阶宽度 h 可表示为

$$h = H \cot \alpha . \quad (1)$$

可见随着 α 由 150° 减小到 30° ,台阶宽度 h 先增大后减小,在 $\alpha=90^\circ$ 处 h 为0,即台阶效应消失。

非水平悬垂面在分层切片时会形成没有实体支撑的悬垂部分,如图10所示,悬垂曲面下为粉末支撑区,粉末支撑区的热传导率低于实体支撑区,在激光深穿透的作用下,熔化金属因重力和毛细管力的作用凹陷至金属粉末中^[17],悬垂部分长度 h 越长,产生的粉末粘附现象也越严重,甚至引起“挂渣”现象,从而减弱非水平悬垂面的台阶特征,当倾斜切角 $\alpha < 60^\circ$ 时,悬垂面逐渐呈现出条虫状、粒球状等形貌。

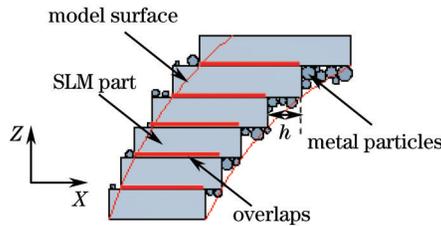


图10 SLM成型悬垂曲面

Fig.10 SLM manufacturing process of overhanging surface

3.2.3 轮廓误差及台阶效应对表面形貌影响分析

为进一步研究SLM成型的轮廓误差及台阶效应对曲面表面形貌特征的影响,改变横柱面体在 X - Y 平面内的摆放角度,使曲面母线与 X 轴的夹角为 45° ,SLM成型结果如图5(b)所示的横柱面体 B 。图11(a)为横柱面

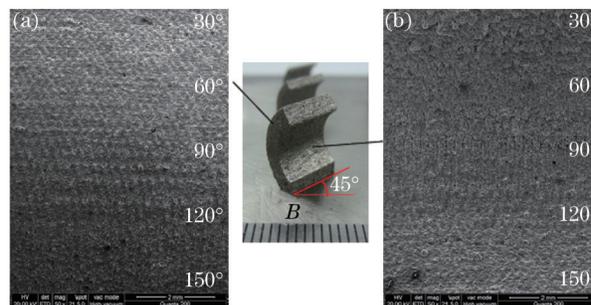


图11 横柱面体 B 内外侧曲面SEM图。(a)外侧曲面形貌;(b)内侧曲面形貌

Fig.11 SEM morphology of transverse cylinder B . (a) Outside surface; (b) internal surface

体外侧曲面SEM图,可见当 $\alpha < 120^\circ$,曲面形貌呈现网结状,这是由于每一切片层轮廓与熔道扫描线方向的夹角为 45° ,形成图12所示的等宽度 w 的台阶状轮廓误差,同时零件表面与成型方向的夹角连续变化,形成宽度 h 连续变化的台阶效应,轮廓误差与台阶效应叠加作用最终形成网结状形貌;当 $\alpha > 120^\circ$,悬垂曲面粘附松散粉末颗粒,呈现烧结状。图11(b)为横柱面内侧曲面SEM图,同理可见当 $\alpha < 90^\circ$,曲面形貌从网结状逐渐过渡到烧结状,表面粘附大量的粉末颗粒,这是因为各熔道始末端在曲面内凹凸错落堆叠,使悬垂表面形成许多网格坑洼而易于粘附粉末支撑区的烧结粉末颗粒。

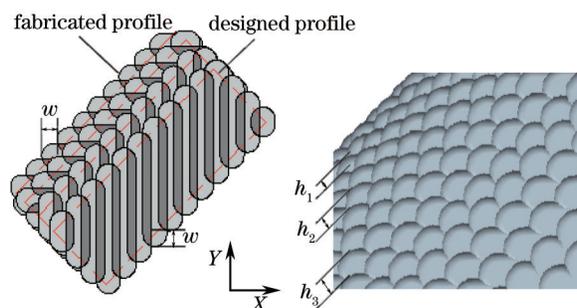


图12 网结状形貌原理图

Fig.12 Schematic diagram of anastomosing morphology

3.3 表面粗糙度测量分析

表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和峰谷不平度^[18],是判定表面成型质量的重要指标。图13、14为不同壁厚的纵、横柱面体的表面粗糙度测量结果,测量精度为 $0.4 \mu\text{m}$,可见柱面体的 R_a 随壁厚增大的变化规律不明显。因测量时接触探针与零件产生干涉,未能获取内侧曲面各测试角处的 R_a ,图13仅为纵柱面体外侧曲面不同 α 处对应的 R_a ,可见随着 α 增大, R_a 总体呈现先减小再增大的变化规律,在 $\alpha = 45^\circ$ 处达到最小值,即使纵柱面体表面形貌具有对称性,但 $\alpha > 45^\circ$ 处的 R_a 略大于 $\alpha < 45^\circ$ 处的 R_a 。从图7可看到,纵柱面体的外侧曲面在 $\alpha = 90^\circ$ 区域附近处最大轮廓误差与最小轮廓误差在该区域附近正交层错堆叠,形成起伏明显的波纹形貌,导致 R_a 较大;而 $\alpha = 45^\circ$ 区域的轮廓误差均匀叠加,且粘附夹藏的小颗粒粉末可能填充表面凹坑,表面起伏度较小,相应 R_a 较小。

图14(a)为横柱面体A外侧曲面不同 α 处对应的 R_a 值,随着 α 增大, R_a 先减小再增大,虽然在 $\alpha = 30^\circ$ 处台阶宽度 h 最大,但由于在多层堆积成型中,各层形貌会逐渐累积变差^[21],台阶面变粗糙,而在 $\alpha = 60^\circ \sim 90^\circ$ 区域,台阶效应减弱甚至消失, R_a 达到最小值,随后过渡到悬垂曲面,逐渐严重的粉末粘附及挂渣缺陷使 R_a 随之增大。图14(b)为横柱面体A内侧曲面的 R_a 测量结果,可见 R_a 随 α 增大而逐渐减小,同理当从条虫状、粒球状形貌的悬垂面过渡到台阶状非悬垂面时,表面粗糙度逐渐降低,且 $\alpha = 150^\circ$ 处层面形貌接近首层平滑形貌, R_a 最小。

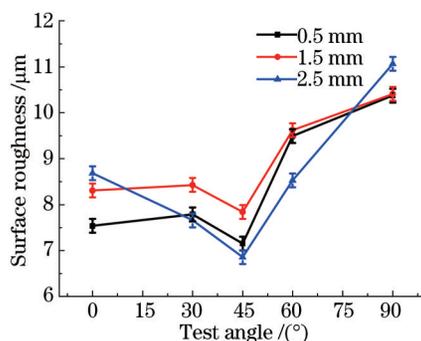


图13 不同壁厚的纵柱面体外侧表面的表面粗糙度

Fig.13 Surface roughness of vertical cylinders with different wall thicknesses

为探究摆放角度所引起零件的轮廓误差与台阶效应的叠加作用对表面粗糙度的影响,对不同壁厚的横柱面体A、B的 R_a 值取均值,绘制摆放角度对横柱面体表面粗糙度的影响关系图,如图15所示。可见横柱面体B外侧曲面的 R_a 值大体小于横柱面体A的 R_a 值,特别在 $\alpha = 0^\circ$ 处, R_a 值降低约 $5 \mu\text{m}$,而其内侧曲面的 R_a 值却大于横柱面体A的 R_a 值。这说明当曲面母线与 X 轴的夹角为 45° 时,层间产生的轮廓误差有利于降低外侧曲

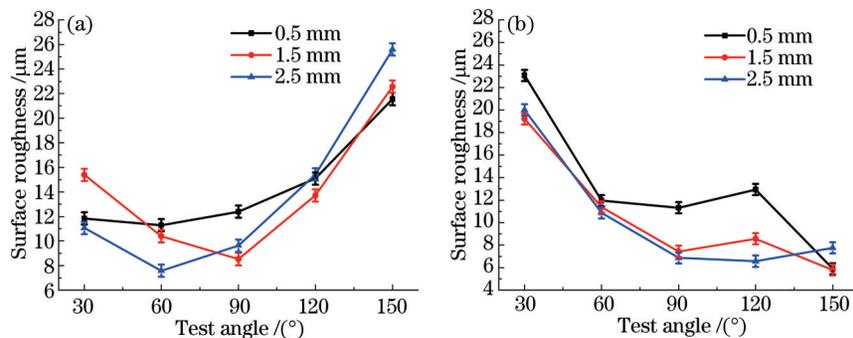


图 14 不同壁厚的横柱面体 A 的表面粗糙度。(a) 外侧曲面; (b) 内侧曲面

Fig.14 Surface roughness of transverse cylinder A with different wall thicknesses. (a) Outside surface; (b) internal surface

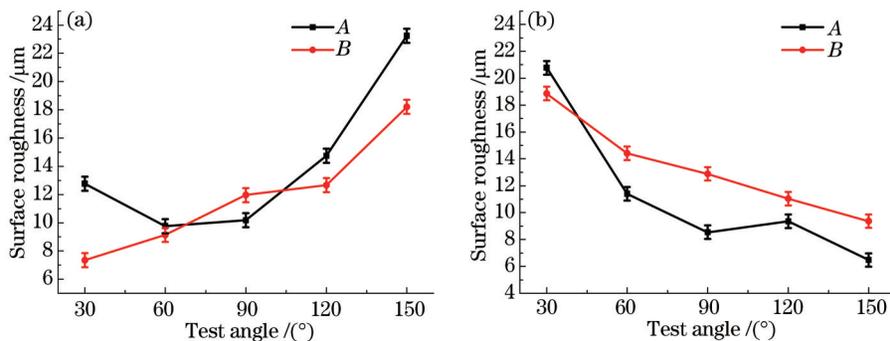


图 15 摆放角度对横柱面体表面粗糙度的影响关系图。(a) 外侧曲面; (b) 内侧曲面

Fig.15 Relationship between laying angle and surface roughness of transverse cylinders. (a) Outside surface; (b) internal surface
面表面粗糙度,但却增大了内侧曲面的表面粗糙度。

3.4 讨论

上述结果显示当采用S型正交层错扫描策略成型不同空间位置摆放的曲面零件时,层面内的轮廓误差及层面间的台阶效应逐层堆叠会使曲面形成台阶状、网结状等表面形貌,而当成型悬垂曲面时由于粉末粘附严重甚至会形成条虫状、粒球状等烧结形貌,且曲面特征表面形貌的变化对表面粗糙度 R_a 有较大影响,充分考虑曲面的空间位置摆放,减少甚至避免悬垂曲面的条虫状、粒球状等形貌,有利于降低曲面特征的表面粗糙度。可为提高激光选区熔化成型具有复杂曲面的个性化医用金属植入体的表面成型质量提供参考,如成型牙冠固定桥等尺寸较小的薄壁曲面零件,因用于固位粘贴的牙冠内表面的成型精度要求高却又难以进行后续打磨加工,如图 16(a)所示,故直接成型高表面质量的牙冠内表面是关键,通过调整空间摆放位置,使内表面朝上避免悬垂曲面以保证成型质量,同时整体优化曲面各切线与切片层面的夹角,减少外表面难成型悬垂面面积,减小轮廓误差及台阶效应对表面质量的影响,最终成型出达到良好成型精度的个性化 NiCr 合金牙冠固定桥,如图 16(b)所示。

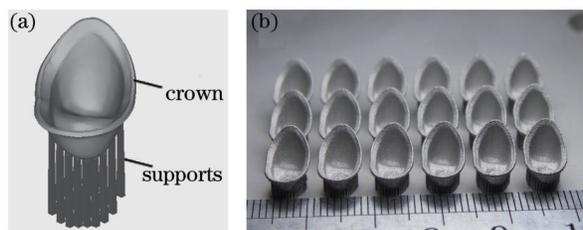


图 16 个性化牙冠成型。(a) CAD 模型; (b) SLM 牙冠

Fig.16 Fabrication of customized crowns. (a) CAD model; (b) SLM crowns

当然,本实验设计仍有不周全,如摆放角度只设计了 45°和 90°两组对照组,未能探索中间角度的表面形貌及 R_a 的变化规律;因曲面连续变化,实际 R_a 测量区域存在随机性, R_a 数值并不准确代表曲面实际表面粗糙度,只能获得表面粗糙度随曲面特征表面形貌变化的大致规律等。同时,实验在设定的一组工艺参数下进

行,一些未讨论的因素,如SLT文件预处理、堆积层厚、扫描策略等对曲面表面形貌和粗糙度影响也非常大:STL转化过程中用三角面片逼近曲面时会造成形状特征畸变,寻求最佳误差表征参数可减少成型精度损失;堆积层厚是影响台阶效应的因素之一,对于台阶效应较大的曲面区域可采用自适应分层的方法,以减少零件的台阶误差,获得更光滑连续的曲面;目前商品化设备中大多数采用轮廓勾边然后内部填充的扫描方式,以提高零件表面质量等。限于文章的篇幅,暂未能逐一进行实验讨论,在作者以后的研究中将继续对上述3个因素深入展开,以便进一步获得高成型精度的曲面功能件。

4 结 论

1) 采用S型正交层错扫描策略成型纵柱面体时,由于切片层内产生轮廓误差,在 $\alpha=0^\circ\sim 90^\circ$ 内,纵柱面体内、外侧曲面沿横截面曲线边界呈现以 $\alpha=45^\circ$ 为轴对称分布的宽窄相间台阶特征形貌,同时热输入量的不均匀导致层间搭接熔道间沟壑状形态明显,沿Z轴成型方向呈现波纹形貌。

2) SLM成型横柱面体的表面形貌主要受台阶效应和粉末粘附缺陷影响,随着 α 增大,横柱面体外侧曲面表面形貌从明显台阶形貌逐渐过渡到条虫状、粒球形形貌,而内侧曲面形貌则从粒球状逐渐过渡呈现台阶状,当 $\alpha=90^\circ$ 时,横柱面内、外侧曲面的台阶效应基本消失;改变摆放角度,横柱面体内、外侧表面在轮廓误差与台阶效应叠加作用最终形成网结状形貌。

3) 轮廓误差和台阶效应的另一直观表现是影响SLM成型零件的表面粗糙度。纵、横柱面体的表面粗糙度 R_a 值随壁厚增大的变化规律不明显,但与表面形貌变化规律具有一致性:纵柱面体的表面粗糙度 R_a 值随 α 增大先减小再增大,在 $\alpha=45^\circ$ 处达到最小值;横柱面体外侧曲面的 R_a 值随 α 增大先减小再增大,在 $\alpha=60^\circ\sim 90^\circ$ 内达到最小值,而内侧曲面的 R_a 值逐渐减小;改变摆放角度,层间产生的轮廓误差可有利于降低横柱面体外侧曲面表面粗糙度,但可能会增大内侧曲面的表面粗糙度。

参 考 文 献

- 1 Shi Yusheng, Lu Zhongliang, Zhang Wenxian, *et al.*. The technology and equipment of selective laser melting[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(5): 150-153.
史玉升,鲁中良,章文献,等.选择性激光熔化快速成形技术与装备[J].中国表面工程,2006,19(5):150-153.
- 2 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Mao Guisheng. Morphology analysis of molten pools lapping and accumulation in selective laser melting of 316L stainless steel[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014, (4): 46-49.
吴伟辉,杨永强,毛桂生.316L选区激光熔化增材制造熔池搭接堆积形貌分析[J].制造技术与机床,2014,(4):46-49.
- 3 Wang Yunda, Yang Yongqiang, Song Changhui, *et al.*. Process optimization and electrochemical behavior of CoCrMo alloy fabricated by selective laser melting based on response surface method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(10): 2497-2505.
王贇达,杨永强,宋长辉,等.基于响应面法优化激光选区熔化成型CoCrMo合金工艺及其电化学行为[J].中国有色金属学报,2014,24(10):2497-2505.
- 4 Song Changhui, Yang Yongqiang, Ye Ziheng, *et al.*. Development of freeform design and manufacturing based on selective laser melting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080026.
宋长辉,杨永强,叶梓恒,等.基于选区激光熔化快速成型的自由设计与制造进展[J].激光与光电子学进展,2013,50(8):080026.
- 5 Wehmoller M, Warnke P H, Zilian C, *et al.*. Implant design and production—a new approach by selective laser melting[C]. International Congress Series, Elsevier, 2005, 1281: 690-695.
- 6 Campbell I, Bourell D, Gibson I. Additive manufacturing: Rapid prototyping comes of age[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(4): 255-258.
- 7 Chen Xiaodong, Xing Wenzhong. Rapid prototyping technology and its application in prosthodontics[J]. Chinese Journal of Practical Stomatology, 2013, 6(6): 326-330.
陈小东,邢文忠.快速成型技术及其在口腔修复中的应用[J].中国实用口腔科杂志,2013,6(6):326-330.
- 8 Wang Di, Liu Ruicheng, Yang Yongqiang. Clearance design and process optimization of non-assembly mechanisms fabricated by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203004.
王迪,刘睿诚,杨永强.激光选区熔化成型免组装机机构间隙设计及工艺优化[J].中国激光,2014,41(2):0203004.
- 9 Li Ruidi, Wei Qingsong, Liu Jinhui, *et al.*. Research progress of key basic issue in selective laser melting of metallic powder[J].

- Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, (5): 26–31.
- 李瑞迪, 魏青松, 刘锦辉, 等. 选择性激光熔化成形关键基础问题的研究进展[J]. 航空制造技术, 2015, (5): 26–31.
- 10 Wang D, Yang Y Q, Zhang M H, *et al.*. Study on SLM fabrication of precision metal parts with overhanging structures[C]. Assembly and Manufacturing (ISAM), IEEE, 2013: 222–225.
- 11 Yang Xiongwen, Yang Yongqiang, Liu Yang, *et al.*. Study on dimensional accuracy of typical geometric features manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303004.
- 杨雄文, 杨永强, 刘 洋, 等. 激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303004.
- 12 Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, *et al.*. Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. Chinese J Lasers, 2014, 42(1): 0103006.
- 王续跃, 王彦飞, 江 豪, 等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J]. 中国激光, 2014, 42(1): 0103006.
- 13 Mu Cunyuan, Liu Menglin, Li Nan. The negative step deviation in rapid prototyping and its reduction measurements[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(2): 361–366.
- 穆存远, 刘孟林, 李 楠. 快速成型中的台阶负偏差及其降低措施[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(2): 361–366.
- 14 Strano G, Hao L, Everson R M, *et al.*. Surface roughness analysis, modeling and prediction in selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(4): 589–597.
- 15 Yan C, Hao L, Hussein A, *et al.*. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting [J]. Materials and Design, 2014, 55: 533–541.
- 16 Zhao Jinyan, Chou Yi, Liu Furong, *et al.*. Research of surface roughness and relative density of SLM medical Co-Cr alloy[J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 524–527.
- 赵进炎, 仇 毅, 刘富荣, 等. SLM成型医用钴铬合金的表面粗糙度与致密度研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 524–527.
- 17 Lu Jianbin, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Analysis of affecting factors of overhanging surface quality by selective laser melting[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 148–151.
- 卢建斌, 杨永强, 王 迪, 等. 选区激光熔化成型悬垂面质量的影响因素分析[J]. 激光技术, 2011, 35(2): 148–151.
- 18 Liu Ruicheng. The Study on Surface Roughness of Metal Parts Fabricated by Selective Laser Melting and the Application on Non-assembly Mechanisms[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 36–39.
- 刘睿诚. 激光选区熔化成型零件表面粗糙度研究及在免组装机中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 36–39.
- 19 Lu Jianbin. Design Optimization and Process Study on Directly Manufacturing of Customized Precise Metal Parts by Selective Laser Melting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 26–27.
- 卢建斌. 个性化精密金属零件选区激光熔化直接成型设计优化及工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 26–27.
- 20 Gebhardt A, Hotter J S, Ziebur D. Impact of SLM build parameters on the surface quality[J]. Rapid Technology Journal, 2014.
- 21 Sun Tingting, Yang Yongqiang, Guo Minghua. Analysis of the morphology of 316L stainless part formed by selective laser melting[J]. Laser Journal, 2009, 30(5): 68–70.
- 孙婷婷, 杨永强, 郭明华. 选区激光熔化316L不锈钢粉末形貌分析[J]. 激光杂志, 2009, 30(5): 68–70.

栏目编辑: 张浩佳