

文章编号: 0258-7025(2009)12-3233-07

光纤激光选区熔化 316L 不锈钢工艺优化

王 迪 杨永强 吴伟辉

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要 在装备 200 W 光纤激光器的快速成型设备 Dimetal-280 上进行选区激光熔化(SLM)成型工艺研究。为了优化 316L 不锈钢粉末的成型工艺参数, 设计了 6 因素 5 水平正交实验进行工艺实验, 总结出 6 种典型表面形貌, 并测量了 6 种典型表面形貌对应样品的相对密度与 z 轴方向尺寸精度。分析发现, 粉末熔化完全后样品能获得较高的密度, 而当粉末部分熔化或未熔时, 样品密度比较低; 实际加工层厚在成型过程中有逐渐增大的趋势, 影响了样品最终的尺寸精度。综合考虑表面形貌、样品相对密度与尺寸精度的影响, 获得优化的工艺参数, 设计了包含尖角、悬空等独立几何成型性能的样品测试系统, 几何样品相对密度达 89%, 尺寸精度 96.8%, 表面粗糙度 R_z 约 25 μm , 获得了良好效果。

关键词 激光技术; 快速成型; 选区激光熔化; 正交实验; 金属零件; 表面形貌

中图分类号 TN 249; TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093612.3233

Process Optimization for 316L Stainless Steel by Fiber Laser Selective Melting

Wang Di Yang Yongqiang Wu Weihui

(College of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract Study on the technology of selective laser melting (SLM) is carried out on Dimetal-280 system with 200 W fiber laser. Orthogonal experiment of six factors and five levels is designed to optimize parameters for 316L stainless steel powder. Six typical surface profiles are summarized, and the relative density and dimensional accuracy along z -direction are measured correspondingly. Results show that the density of samples is high when powders are fully melted and low when partially melted. Practical manufacturing layer trends thicker, which affects the dimensional accuracy. Considering the comprehensive effects of surface profile, relative density and dimensional accuracy, optimal parameters are obtained. Special specimen with sharp-angled and overhang features for geometrical performance test is manufactured. The relative density, dimensional accuracy and surface roughness R_z are 89%, 96.8% and 25 μm respectively, which show a good result.

Key words laser technique; rapid prototyping; selective laser melting; orthogonal experiment; metal part; surface profile

1 引 言

快速成型发展的方向是直接成型金属零件, 成型件要求满足高致密度、较低表面粗糙度、高的尺寸

精度和优良的机械力学性能。选区激光熔化 (Selective laser melting, SLM) 是一种能利用金属粉末直接制造出相对密度接近 100% 近终端金属产

收稿日期: 2009-01-13; 收到修改稿日期: 2009-03-24

基金项目: 粤港关键领域突破中标项目(2007Z1-D6091)和广东省教育部产学研结合项目省部产学研结合项目(2007A090302004)资助课题。

作者简介: 王 迪(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事激光加工与激光快速成型等方面的研究。

E-mail: scut061389@163.com

导师简介: 杨永强(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光材料加工、快速成型制造等方面的研究。

E-mail: meiyang@scut.edu.cn

品的新型快速成型工艺,属于当前快速成型领域的研究热点^[1-5]。光纤激光器可获得近基模光束($M^2 \leq 1.2$),具有高电光转换效率、寿命长等优点^[6],其输出激光能聚焦到 $30 \sim 50 \mu\text{m}$,因而非常适合应用于精密金属零件成型。光纤激光器另一个很大的优势是工作稳定,几乎零维护,这一优点使得光纤激光器成为长时间连续进行选区激光熔化快速成型金属零件最理想的能量源。

国外已经有 SLM 技术的较成熟设备,如德国 EOS 公司的 EOSINT M270 系统^[7]、英国 MCP 公司 MCP Realizer 系统^[8]、德国 Concept Laser 公司的 M3 系统^[9]、法国 Phenix-Systems 公司的 PM100 快速成型系统^[10]都可用于金属零件快速成型。国内在激光直接或间接制造金属零件技术上也有较多研究^[11,12],但很少有关于 SLM 技术研究的报道。华南理工大学在选区激光熔化技术领域有较深入的研究^[13,14],克服了激光烧结金属零件致密度低、机械性能差的缺陷,能够成型任意曲面形状,理论上可获得 100% 致密度的实体零件。影响选区激光熔化快速成型效果的工艺参数达几十个之多,为了直接获得较好成型效果的金属零件(高致密度、低表面粗糙度、高尺寸精度、高力学性能),需要进行细致的工艺探索研究,正交实验能够在实验次数较少的情况下,对多因素影响的快速成型工艺实验,得到有价值的结论或者结果。

2 实验设备、材料与方

2.1 Dimetal-280 实验设备

Dimetal-280 系统最大优势是使用 SPI 公司生产的 1075 nm 掺镱双包层连续式 200 W 光纤激光器。机械单元拥有高精度 5 轴自由度和 x/y 方向扫描控制(如图 1),5 轴分别包括激光焦点离焦量升降调节 z_1 ,铺粉辊平动 v 和转动 u ,成型缸和盛粉缸升降 z_2 和 z_3 。成型缸及盛粉缸的升降精度对成型质量有关键的影响,系统拥有升降精度达 $\pm 5 \mu\text{m}$ 的精密铺粉系统,实现 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ 的粉厚铺设。

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分与性能

Table 1 Chemical composition and property of 316L stainless steel powder

Element	C	Cr	Ni	Mo	Si	Fe	Mn	P	S	O
Chemical composition (mass fraction)/%	0.03	17.53	12.06	2.16	0.86	bal	0.38	0.02	0.01	0.13
Size / μm	0~10.48		10.48~27.63		27.63~49.43		>50			
Grain size distribution (mass fraction)/%	11.01		50.55		30.37		8.07			
Apparent density /(g/cm^3)						4.04				

系统配备高速高精度的振镜扫描单元及进口 $f \sim \theta$ 透镜,保证在扫描范围内的激光斑点功率密度几乎一致。自主开发的 SLM 成型控制软件、专业的切片软件和 SLM 扫描路径规划软件配合使用使得成型过程自动化,软件系统结构图如图 2 所示。同时成型过程由 CCD 实时监控,可方便查看加工历史记录。金属熔化后容易发生氧化,所以系统拥有高密封度的成型室,成型室中通入高纯氩气,保证成型过程在含氧量很低的气氛中进行。

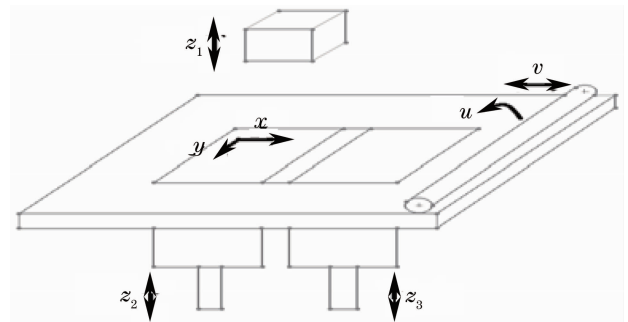


图 1 成型系统的 5 轴自由度与 x/y 方向扫描控制

Fig. 1 5-axes freedom and scan control in x/y direction

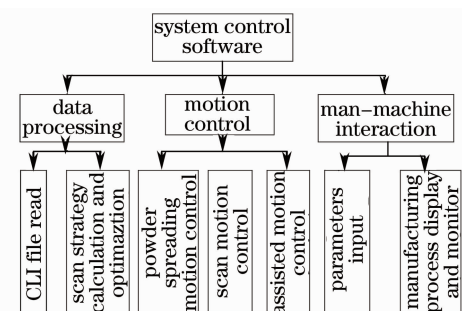


图 2 控制软件系统结构图

Fig. 2 Structure of the control software

2.2 实验材料

实验材料选用规格 400 目 316L 不锈钢粉,粉末在显微镜中观察 85% 的粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 。316L 不锈钢是奥氏体不锈钢,在工业领域和医疗领域有广泛应用。表 1 为 316L 不锈钢粉末化学成分、粒度分布及松装密度。

2.3 实验方法

设计 $L_{25}(5^6)$ 正交实验表以优化工艺参数,在立体显微镜下观察并总结出成型样品 6 种典型表面形貌,测定样品相对密度、计算 6 种典型形貌的理论尺寸相对误差与实际尺寸相对误差,总结获得良好的工艺参数。使用 pro/e 软件设计包含尖角、悬空、孔、圆柱体、薄板、四面体等独立几何成型性能的三维模型测试系统几何成型性能(如图 3),观察成型效果,并对设备的进行总结分析。

对于各个几何特征的描述与测试目的列于表 2。几何样品的成型实验不仅用于设备的几何性能成型测试,也可以通过几次相似的实验,获得优化的

工艺参数,包括 z 轴补偿量(z -compensation, tool compensation)、空间摆放、工具补偿等设定^[15]。

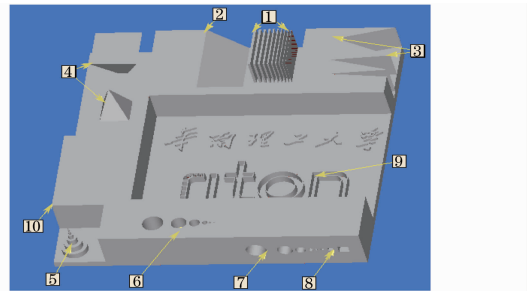


图 3 系统几何性能测试三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model for geometrical measurement of system

表 2 几何样品特征描述与测试目的

Table 2 Features description and fabrication purpose of the specimen

Number	Geometrical unit	Geometrical character	Test purpose
1	thin wall	thickness:0.15~0.5 mm,space:0.05 mm	precision and resolution
2	sloping plan	sloping angle: 25°	stair effect
3	sharp corners	10°,20°,40°	influence of heat accumulation
4	tetrahedron	positive angle:65°, negative angle:15°	stair effect
5	columns	diameter:5 mm,3.5 mm,2 mm,1 mm, 0.5 mm,0.3 mm,0.15 mm	precision and resolution
6	holes parallel to z axis	diameter: 4 mm,3 mm,2 mm, 1 mm,0.5 mm,0.2 mm	heat influence
7	holes vertical to z axis	diameter:0.15~0.5 mm,space:0.05 mm	z -compensation
8	overhangs	square:2 mm×2 mm,1 mm×1 mm, 0.5 mm×0.5 mm	overhangs without support
9	complex character	South China University of Technology“riton”(hollow)	scanning errors
10	whole sample	60 mm×60 mm×10 mm	process accuracy in $x/y/z$ direction

试样的相对密度采用 $\rho_{\text{rel}} = \frac{\rho}{\rho_0} \times 100\%$ 计算, ρ_0 为不锈钢的理论密度, ρ 为实际密度用 Archimedes 法测定,分析天平的称量精度为 0.01 g,计算公式为

$$\rho = \frac{W_{\text{air}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{W_{\text{air}} - W_{\text{H}_2\text{O}} - W_{\text{Cu}}}, \quad (1)$$

式中 $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 为试样在水中的重力, W_{air} 为试样在空气中的重力, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的密度, W_{Cu} 为铜丝的重力。使用手持式表面粗糙度仪 TR101 测量成型后样件的表面粗糙度 R_z ,在成型表面的 3 个地方分别测量 3 次粗糙度,3 个位置各算出平均值,取最大值作为此几何样品的表面粗糙度。使用游标卡尺测量样品尺寸,精度为 0.02 mm。

3 实验结果与讨论

3.1 正交实验

影响选区激光熔化成型效果的因素很多,主要

有激光参数(激光能量、光束质量、光斑直径)、机械运动参数(铺粉辊的平动与转动速度、铺粉层厚等)、扫描参数(扫描速度、扫描间距、扫描路径等)、粉末特性(粉末成分、粉末粒度分布、形状等)等。粉末选用 316L 水雾化不锈钢粉末,粉末物理特性相关参数为常量;光纤激光器激光模式为高斯模,光束质量为常量;另外,铺粉辊的平动与转动速度调节范围比较大,调节此参数的目的是为了得到紧实、较薄、平整的铺粉层,实验中选用调试好的铺粉辊运动参数。

为了制定有效的正交试验计划,首先进行单道扫描线的成型试验,如图 4 所示,当扫描速度为 200 mm/s,激光功率 $P = 150 \text{ W}$,离焦量为 $(0 \pm 0.05) \text{ mm}$,铺粉厚度 $50 \mu\text{m}$ 情况下,获得了连续、光滑的单道扫描线,在线侧边偶尔有小的金属球,分析原因可能是由于激光辐射粉末后的熔化飞溅造成的。在金相显微镜下测量扫描线线宽范围为 $120 \sim 150 \mu\text{m}$ 。

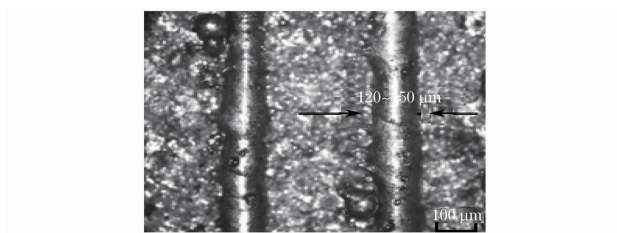


图 4 单道扫描线成型实验

Fig. 4 Single scan line experiment

由单道扫描线结果可知,扫描线间距不超过单道线的线宽 $120\ \mu\text{m}$ 。正交实验表设计如表 3 所示,

表 3 正交实验表设计

Table 3 Design of orthogonal experiment table

	Scan speed (mm /s)	Scan space /mm	Laser power /W	Defocus amount /mm	Layer thickness /mm	Scan strategy
level 1	80	0.04	80	0	0.03	<i>x</i> -direction
level 2	160	0.06	110	1	0.04	<i>x</i> / <i>y</i> orthogonal <i>x</i> -direction
level 3	320	0.08	140	-1	0.05	with frame
level 4	480	0.10	170	2	0.06	sectional scan
level 5	640	0.12	200	-2	0.07	scan quickly first, then slowly

对实验样品进行表面形貌观察,总结出 6 种典型的表面形貌,根据表面形貌的形态特征,分别命名为条虫状、过熔状、粒球状、砂散状、网结状与细线

正交表头设计选用 6 因素 5 水平,共需要 25 次实验。考虑成型过程是在若干层后才开始稳定,成型层数少不能对成型效果有客观说明(比如热量累积效应),成型层数多影响实验效率,单个实验样品扫描成型 40 层。实验基板选用 $10\ \text{cm}\times 10\ \text{cm}\times 1\ \text{cm}$ 的 A3 钢,为了使激光在基板不同位置扫描照射的功率密度相等,每个样品在基板的中心位置成型。实验的指标主要通过立体显微镜下观察成型样品的表面形貌、相对密度,以及样品的相对尺寸误差来衡量。

状,如图 5(a)~(f)所示。

6 种典型表面形貌的成型工艺参数及相对密度列于表 4。

表 4 6 种典型表面形貌对应工艺参数

Table 4 Process parameters corresponded to six typical surface profiles

Fig. 5	Scan space /mm	Scan speed (mm /s)	Laser power /W	Defocus amount /mm	Layer thickness /mm	Scan strategy	Relative density /%
(a)	80	0.04	80	0	0.03	<i>x</i> -direction	88.2
(b)	80	0.08	140	-1	0.05	<i>x</i> -direction with frame	80.8
(c)	160	0.08	170	-2	0.03	<i>x</i> / <i>y</i> orthogonal	85.3
(d)	480	0.08	80	2	0.04	scan quickly first, then slowly	65.5
(e)	320	0.04	170	0	0.05	<i>x</i> / <i>y</i> orthogonal	80.2
(f)	640	0.12	170	-1	0.04	<i>x</i> -direction	70.2

熔池中,因为在熔化的基体上固体质点对液体质点的作用力大于液体质点之间的作用力,润湿角为锐角,熔池的形状呈扇形。而基体上方,由于粉末固体质点对液体质点的作用力小于液体质点之间的作用力,润湿角为钝角,熔池的形状为球状,熔池在上下两种力的作用下,其形状发生了变化,成为椭圆形。图 5(a)条虫状表面形貌是在扫描速度与激光功率都很低的情况下形成的。激光前一道扫描线照射形成的熔池吸进了周边的粉末,而加工层厚小,使得下一道扫描线没有足够的粉末熔化填充。并且熔

化的粉末金属在表面张力作用下趋向于降低表面自由能,即有球化的倾向,所以不能与前一成型层完全润湿,造成每一道扫描线的截面近似椭球状;另外一个原因是粉末在熔化前的致密度远低于熔化后样品的密度,造成成型后体积的收缩。假设粉末密度为 ρ_1 ,激光熔化凝固后样品密度为 ρ_2 ,则每一层铺完粉后激光扫描熔化凝固的体积收缩近似为 $(1 - \rho_1/\rho_2)$,而收缩包括垂直方向收缩与横向收缩,横向的收缩对成型面有分割的效果。这些原因导致最终的成型面好像每条扫描线为分离状态。图 5(b)中

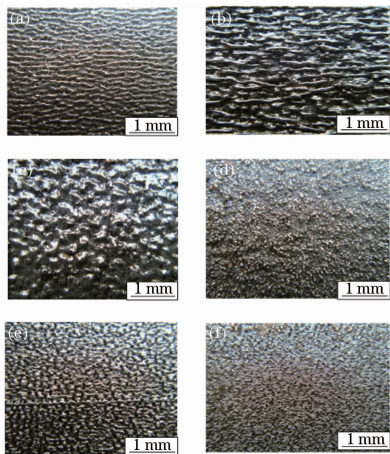


图 5 正交实验的 6 种典型表面形貌

Fig. 5 Six typical surface profiles in orthogonal experiment

过熔状表面形貌的形成根本原因是输入能量过大,造成“过烧根瘤”现象。从成型参数来看,激光功率与扫描速度的比值 P/v 比较大,激光熔化单道线后,激光光斑没有及时移动,长时间停留在同一位置点,使得“焊缝”金属溶液溢到周围的扫描线;其次能量较高容易导致气化,引起金属液过大的飞溅,造成成型表面材料损失严重,更加剧了过熔现象。0.05 mm 的加工层厚使得每层的粉末量过多,收缩较严重,从形貌图上也能看到粉末成型后收缩的“影子”,线与线之间保留了部分图 5(a) 中的条虫状表面形貌。图 5(c) 为粒球状的表面形貌,有部分过熔现象,且粒球之间较独立,因为扫描速度较低,激光功率较高造成。170 W 的激光功率使得粉末呈现稍微过熔现象,离焦量为 -2 mm,激光光斑较大,降低了激光功率密度,使表面形貌不会出现如图 5(b) 中明显的过熔或飞溅效果;正交扫描方式是表面粒球状独立的直接原因。图 5(d) 出现砂散状表面形貌的根本原因是激光能量输入太低,粉末未熔,为烧结态。从其成型参数看出,激光功率 80 W,而扫描速度 480 mm/s, P/v 的比值太小,使得粉末达不到熔化状态,且 2 mm 的离焦量导致光斑直径变大许多,使得激光功率密度更低,加剧了粉末未熔化的效果,这两个原因造成扫描线之间和层与层之间的结合力小,成型样品表面呈现砂散状。图 5(e) 为网结状表面形貌,金属粉末被完全熔化,但还有部分空隙,主要是因为金属粉末的收缩引起的。170 W 激光功率满足了金属粉末的完全熔化,320 mm/s 的扫描速度促使单道扫描线的快速凝固而不会过烧,0.04 mm 的扫描间距使扫描线之间不会“脱接”严重。从图中看不出扫描线的方向性,是因为 x/y 正

交扫描的原因。图 5(f) 细线状表面形貌是高速与高功率共同作用的结果,高功率首先保证粉末颗粒的表面快速熔化,而高速扫描使得熔池能够以较快的速度冷却,每条熔化扫描线都没有足够的时间影响周围;从图像中看出,此工艺参数下可以获得较平整的成型表面。

对 6 种典型表面形貌相对应的样品进行密度测试,图 5(a), (b), (c), (e) 的相对密度都达到 80% 以上,而图 5(d) 和 (f) 的相对密度比较低,分别为 65.5% 与 70%,说明当粉末获得足够的激光能量达到完全熔化后,样品密度大大提高,当粉末未熔或部分熔化时,获得样品呈现“烧结”态,相对密度低。

分析 6 种典型表面形貌和相对应的成型参数后发现,成型参数对表面形貌成型效果影响是交互的,成型参数之间的相互组合优化目的是为了获得良好的成型热量分布,使得激光作用于每一个单元都具有足够的能量熔化金属粉末,保证温度梯度足够小以防止翘曲变形等缺陷发生,同时也要防止能量输入过大而使样品表面发生球化、过熔等缺陷,如表面形貌图 5(c) 的粒球状对成型过程是非常不利的,它的球化现象对铺粉层的均匀性与铺粉辊的行走带来很大困难,国内外学者对其进行了大量而深入的研究^[16,17]。其余 19 个实验样品表面形貌或与图 5, 6 种形貌相似,或是此 6 种形貌的组合与过渡态。以实验 7 的表面形貌为例,它是介于粒球状与网结状之间的一种表面形貌,如图 6 所示。

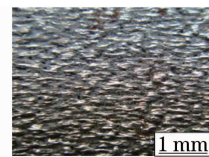


图 6 实验样品 7 表面形貌

Fig. 6 Surface profile of the 7th experiment

另外,成型后对样品尺寸进行测量,发现存在尺寸误差。尺寸变化的主要原因是粉末收缩造成的,次要因素包括铺粉缸的上下运动造成的啮合误差、测量误差等。成型过程中由于粉末凝固后收缩,使得加工层厚具有逐渐加大的趋势。假设每层加工层厚为 d , 不锈钢粉末相对密度为 ρ_1 , 成型件相对密度为 ρ_2 , 每一层金属粉末熔化凝固后收缩率近似为 $(1 - \rho_1/\rho_2)$, 则每层的加工层厚可表示为

$$d_n = d + d_{n-1}(1 - \rho_1/\rho_2), \quad (2)$$

当层数 $n \rightarrow +\infty$ 时, d_n 求极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[d \frac{1 - (\rho_1/\rho_2)^n}{1 - \rho_1/\rho_2} \right] = d \times \frac{1 - 0}{1 - \rho_1/\rho_2} = d \times \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

说明层厚 d_n 随着铺粉次数增加逐渐增加,但趋向一个固定极限值。如设定层厚 $d = 30 \mu\text{m}$, $\rho_1 = 50\%$, $\rho_2 = 85\%$, 则实际铺粉层厚趋向 $51 \mu\text{m}$ 后稳定,而当 $d = 50 \mu\text{m}$ 时,实际铺粉层厚将达到 $85 \mu\text{m}$ 后稳定。即每一个设定的加工层厚都趋向一个极限的层厚才稳定,实际加工层厚与 ρ_2 成正比,与 ρ_1 成反比。当激光扫描完样品最后一层填充层后,粉末收缩为 $(1 - \rho_1/\rho_2)d_n$, 不考虑机械误差和测量误差的情况下,此值即为样件 z 轴尺寸误差。实验中能观察到样品表面或多或少的凹陷现象,一般凹陷的程度随着扫描速度有明显的变化,扫描速度低,凹陷严重,扫描速度高,凹陷轻微甚至消失。

z 轴的收缩一般高于横向很多,即 z 向尺寸精度远小于横向尺寸精度,在不考虑机械误差与忽略测量误差情况下,正交实验样品的理论相对误差值(γ)与实际相对误差值(s)为

$$\gamma = \frac{(1 - \rho_1/\rho_2)d_n}{40d} = \frac{d \times \rho_2/\rho_1 - d}{40d} = \frac{\rho_2/\rho_1 - 1}{40} \times 100\%, \quad (3)$$

$$s = \frac{l - 40d}{40d} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 l 的测量值。

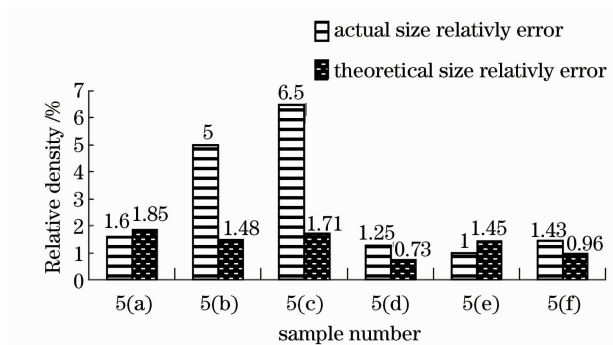


图 7 6 种典型表面形貌对应的理论与实际尺寸误差(%)
Fig. 7 Theoretical and practical dimensional accuracy corresponding to the six typical surface profiles(%)

图 7 描绘了 6 种典型表面形貌对应的样品尺寸实际相对误差与理论相对误差的关系图。从图 7 可以看出,理论相对误差值相差不大,在 1%~2%之间,而实际尺寸相对误差值样品 5(b)和 5(c)的误差比较大,分别为 5%和 6.5%,样品 5(a),5(d),5(e)和 5(f)的较小,也在 1%~2%之间,与理论计算相近。5(b)表面形貌为过熔化状,实际尺寸相对误差较大,原因是粉末收缩较其他几类表面形貌严重,以及较高 P/v 比值使得能量吸入增加,飞溅多,造成粉末“流失”严重,导致了尺寸精度低;5(c)实际尺寸相对误差过高

原因除了成型样品致密度比较大,导致最后一层收缩量理论上达到 $40 \mu\text{m}$ 外,0.03 mm 的加工层厚使相对误差计算基数较小,也是另外一个原因。

3.2 几何样品实验

工艺参数选择要综合考虑最终成型样品能否获得较好的表面成型质量、尽量小的尺寸误差和较高的致密度,通过上述分析,表面形貌 5(a)和 5(e)对应的工艺参数能够符合要求,但表面形貌 5(a)的扫描速度 80 mm/s 过小,降低了成型效率。所以,选择表面形貌 5(e)的工艺参数进行几何样品的成型实验,为了进一步提高几何样品致密性与加工过程稳定性,层厚设定为 $30 \mu\text{m}$ 。几何样品成型效果如图 8 所示,总成型时间大约 5 h。

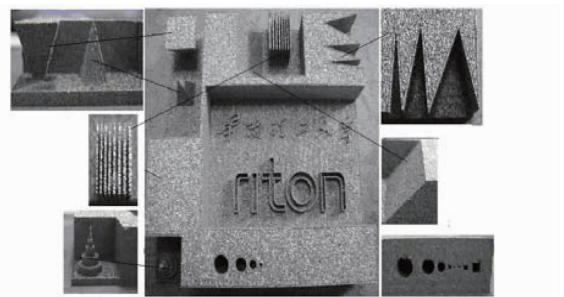


图 8 选区激光熔化快速成型实体
Fig. 8 Specimen manufactured by selective laser melting

测量几何样品的相对密度达 89%,表面粗糙度 R_z 约 $25 \mu\text{m}$, z 轴尺寸精度达 96.8%,总体成型效果良好。表 5 列出了几何样品各个特征的成型效果。

表 5 几何样品成型效果

Table 5 Fabrication result of the specimen

Number	Geometrical unit	Fabrication result
1	thin wall	fine
2	sloping plan	can not distinguish stair effect
3	sharp corners	fine
4	tetrahedron	fine
5	columns	even the smallest column can be made
6	holes parallel to z axis	when diameters as large as 0.5 mm and 0.2 mm, the holes can not be distinguished clearly
7	holes vertical to z axis	the top has bad bottom surface
8	overhangs	the same as 7 th
9	complex character	fine
10	whole sample size /mm ³	57.52×58.0×9.68

从表 5 中看出,几何特征如薄板、倒角、尖角、复杂字体等能够成型良好,平行于 z 轴的圆孔在直径小到 0.5 mm 情况下,肉眼已经看不清楚,是因为激光扫描圆孔轮廓时,对圆孔内的金属粉末有相当大的热影响,有部分粉末被“固相烧结”甚至熔化,将圆孔堵塞。垂直于 z 轴的圆孔与方孔顶部有一些“挂渣”,是因为激光束辐照到粉末上的射入深度大于加工层厚,而此处没有支撑,造成激光熔化计划之外的粉末。通过几何样品成型试验,当光斑补偿量为 0.1 mm 时,尺寸误差将缩小到 50 μm 。

4 结 论

1) 在 200 W 光纤激光选区熔化快速成型系统 Dimetal-280 上,使用正交实验优化选区激光熔化快速成型工艺,获得 6 种典型的表面形貌,分别为条虫状、过熔状、粒球状、砂散状、网结状与细线状,阐述了 6 种表面形貌可能的形成原因;

2) 测量 6 种典型表面形貌对应的相对密度,激光完全熔化粉末能获得较高的密度,而当粉末未熔或部分熔化时,密度比较低。实际加工层厚在成型过程中有逐渐增大的趋势,逐渐增大的层厚影响了样品最终的尺寸精度,过熔状与粒球状表面形貌相对应样品的尺寸精度较低,其他 4 种表面形貌的实际尺寸精度与理论计算相近;

3) 综合考虑样品的表面形貌、相对密度、尺寸精度以及成型效率,表面形貌 5(e) 对应的工艺参数为较优参数,为了进一步提高几何样品致密性与加工过程稳定性,层厚设定为 30 μm ;

4) 设计了用于金属零件快速成型的几何性能测试三维模型,使用表面形貌 5(e) (层厚设为 0.03 mm) 对应的工艺参数成型几何试品。总体成型效果良好,几何样品相对密度达到 89%, z 轴尺寸精度达 96.8%,表面粗糙度 R_a 约 25 μm 。

参 考 文 献

- 1 F. Abe, K. Osakada, M. Shiomi *et al.*. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting[J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2001, **111**(1-3): 210~213
- 2 Wu Weihui, Yang Yongqiang. Key techniques of selective laser

- melting rapid prototyping system[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(8): 175~180
- 吴伟辉,杨永强. 选区激光熔化快速成形系统的关键技术[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(8): 175~180
- 3 O. Rehme, C. Emmelmann. Reproducibility for properties of selective laser melting [C]. *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, Munich, Germany, 2005: 1~6
- 4 J. P. Krutha, L. Froyenb, J. Van Vaerenbergha *et al.*. Selective laser melting of iron-based powder [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2004, **149**(1-3): 616~622
- 5 F. Abe, E. C. Santos, Y. Kitamura *et al.*. Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process[J]. *Mech. Engin. Sci.*, 2003, **217**(1): 119~126
- 6 Liao Jianhong, Meng hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and application of fiber laser precision cutting system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 135~138
- 廖健宏, 蒙红云, 王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 135~138
- 7 <http://www.eos-gmbh.de>
- 8 <http://www.mcp-group.com>
- 9 http://www.tomex-d-sign.com/_domain/conceptlaser/content
- 10 I. Yadroitsev, P. Bertrand, I. Smurov. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8064~8069
- 11 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of the 316L ss fabricated by laser direct deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
- 席明哲, 张永忠, 章萍芝等. 工艺参数对激光快速成型 316L 不锈钢组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
- 12 Song Jianli, Deng Qilin, Hu Dejin *et al.*. Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1441~1444
- 宋建丽, 邓琦林, 胡德金等. 激光熔覆成型 316 L 不锈钢组织的特征与性能[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1441~1444
- 13 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Lai Kexian. Process analysis of rapid prototyping with selective laser melting[J]. *J. South China University of Technology*, 2007, **35**(3): 23~27
- 吴伟辉, 杨永强, 来克娴. 选区激光熔化快速成型过程分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(3): 23~27
- 14 Weihui Wu, Yongqiang Yang, Yanlu Huang. Direct manufacturing of Cu-based alloy parts by selective laser melting [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 37~40
- 15 J. P. Kruth, B. Vandenbroucke, J. Vandenbroucke *et al.*. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques [C]. *Int. Conf. Polymers&Moulds Innovations (PMI)*, Gent, Belgium, 2005
- 16 K. Nikolay, E. Sergei, A. Igor *et al.*. Balling processes during selective laser treatment of powders[J]. *Rapid Prototyping J.*, 2004, **10**(2): 78~87
- 17 Dongdong Gu, Yifu Shen. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder [J]. *J. Alloys and Compounds*, 2006, **8**(5): 34~38