

激光选区熔化成型典型几何特征尺寸精度研究

杨雄文 杨永强 刘 洋 王 迪*

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

摘要 为了探讨激光选区熔化成型典型几何特征的尺寸精度,并为激光选区熔化直接成型金属零件提供设计参考依据,设计了薄板、尖角、圆柱体、圆孔、方孔等典型几何特征的三维模型,采用华南理工大学研发的激光选区熔化设备(DiMetal-100)在优化的工艺参数下选用316L不锈钢粉末对这些典型几何特征进行激光选区熔化成型。实验结果表明,激光光斑约束、台阶效应、粉末粘附、激光深穿透等因素是影响零件尺寸精度和激光选区熔化成型能力的主要原因。基于对激光选区熔化成型典型几何特征的尺寸精度及成型能力研究,提出了一些适用于激光选区熔化的零件设计规则,为产品的创新设计提供了参考依据。

关键词 激光技术; 设计规则; 激光选区熔化; 几何特征; 尺寸精度; 成型能力

中图分类号 TN249; TG665

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303004

Study on Dimensional Accuracy of Typical Geometric Features Manufactured by Selective Laser Melting

Yang Xiongwen Yang Yongqiang Liu Yang Wang Di

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

Abstract In order to investigate dimensional accuracy of geometric features manufactured by selective laser melting (SLM) and to provide design references for SLM to manufacture metal parts directly, several typical geometric features such as thin walls, sharp corners, cylinders, circular holes, square holes, etc are designed. Then SLM equipment DiMetal-100 is employed and 316L stainless steel powders are used to manufacture these typical geometric features under the condition of optimized process parameters. It is shown that laser spot restraint, step effect, powder adhesion and laser deep penetration are the main factors which affect dimensional accuracy of parts and affect manufacturing ability of SLM. The manufacturing ability of SLM and the dimensional accuracy of typical geometric features by SLM is studied. It puts forward some preliminary design rules suitable for SLM, which provides a reference for innovative design of products.

Key words laser technique; design rules; selective laser melting; geometric features; dimensional accuracy; manufacturing ability

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引 言

尺寸精度是衡量机械产品质量的重要指标之一,为使零件具有互换性,必须保证尺寸的一致性,即要求

收稿日期: 2014-08-22; 收到修改稿日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51275179,51405160)、佛山市科技创新专项资金项目(2013AH100042)

作者简介: 杨雄文(1989—),男,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: yangxiongwen.1989@163.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: mewdiaser@scut.edu.cn

尺寸在某一合理的范围内^[1]。在复杂精密金属零件制造领域,对零件的尺寸精度有严格的要求,提高尺寸精度,可以缩短零件的后处理时间,降低制造成本^[2]。传统制造对于产品的形状与结构设计约束很大^[3]。传统制造方法是基于去除材料原理通过多个工序逐步由坯料加工出来,刀具和装夹是零件设计时最主要的约束。而激光选区熔化(SLM)是逐层添加出实体零件,无需刀具和装夹。这意味着,传统的设计规则、设计方法等已不再适用于SLM^[4]。目前,国内外针对SLM成型典型几何特征的研究还比较少,且暂时没有适用于SLM的设计规则供设计工程师参考。罗子艺等^[5]采用SLM技术成型了变截面的薄壁零件,零件顶部壁宽为101.3 μm ,底部壁宽为142 μm ;卢建斌等^[6]对SLM成型悬垂面质量的影响因素进行了分析;刘洋等^[7]研究了成型厚度、倾斜角度和能量输入等工艺参数对SLM成型间隙特征大小的影响;王迪等^[8]对SLM成型间隙倾斜面的表面粗糙度进行了理论研究;刘利^[9]对光固化快速成型(SLA)精度问题进行了专题研究,研究了光斑直径补偿、层厚、扫描速度以及扫描间距对成型件尺寸精度的影响;邹国林^[10]对熔融沉积制造(FDM)的精度问题进行了研究,研究了材料收缩对尺寸精度的影响以及对收缩的控制和补偿方法。吴伟辉等^[11]从硬件因素、软件因素和材料因素3个方面对SLM的成型精度进行了初步探讨;王迪等^[12]对SLM成型件在Z方向的尺寸精度进行了初步研究。付立定等^[13]初步研究了激光功率、扫描间距、扫描速度对SLM成型件尺寸精度的影响。Kruth等^[14]采用SLS加工工艺对薄壁、尖角、小圆孔等进行成型,并对其进行了尺寸精度、表面粗糙度和机械性能的测量;Mumtaz等^[15]利用脉冲激光器对薄壁零件进行了SLM成型;Yadroitsev等^[16]采用PHENIX-PM100设备在不同的扫描策略下对薄壁零件进行了SLM成型,并最终加工出壁厚为0.14mm的薄壁零件;Adam等^[17]从基本几何单元、几何单元之间的过渡以及复合结构三方面对SLM的设计规则进行了一些探讨;Zhou等^[18]采用SLA技术成型了一些典型几何特征,并研究了工艺参数对典型几何特征精度的影响;Tang等^[19]通过对铜基合金进行SLM的原型件制造,发现增加扫描间距有利于提高精度,而扫描层厚对成型件精度几乎没有影响。

以上只是研究了非金属材料几何特征的成型精度;或者只是针对金属材料单一几何特征的研究,还没有对金属材料典型几何特征的成型工艺进行系统的总结。本实验设计了薄板、尖角、圆柱体、圆孔、方孔等典型几何特征,然后采用316L不锈钢粉末对其SLM成型,并对SLM成型能力和尺寸精度进行分析,初步提出一些适用于SLM的零件设计规则。

2 实验设备、材料与实验方法

2.1 实验设备和材料

实验设备为华南理工大学研发的激光选区熔化设备DiMetal-100。如图1所示,其主要由光纤激光器、光路传输单元、密封成型室(包括铺粉装置)、机械传动及控制系统、工艺软件等几个部分组成。激光由扫描振镜导向,然后通过 $f-\theta$ 透镜聚焦,选择性地将成型面上的金属粉末熔化堆叠成金属零件。其扫描速度范围为10~5000 mm/s,加工层厚为20~100 μm ,激光聚焦光斑直径为70 μm ,成型最大体积为100 mm×100 mm×120 mm。

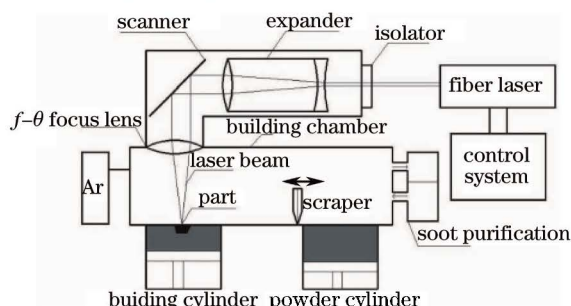


图1 SLM成型原理图

Fig.1 Principle of SLM process

2.2 实验材料

实验材料为316L不锈钢球形粉末,平均粒径为17.11 μm ,最大粒径为35 μm ,粉末的松装密度为4.42 g/cm^3 ,其化学成分如表1所示。

表1 316L不锈钢粉末化学组成成分(质量分数, %)
Table 1 Powder composition of 316L (mass fraction, %)

C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	O	Fe
0.03	17.5	12.06	2.06	0.86	0.3	0.09	Bal

2.3 实验方法

实验设计了薄板、尖角、圆柱体、圆孔、方孔等典型几何特征的三维模型(如图2所示),采用表2所示的加工参数成型,成型后采用万能工具显微镜和三坐标测量仪进行尺寸测量并与原设计尺寸值进行对比,然后从SLM的原理约束出发,对尺寸误差和成型缺陷进行分析,归纳总结SLM所能成型出的各几何特征的尺寸设计值,初步提出适用于SLM的零件设计规则。

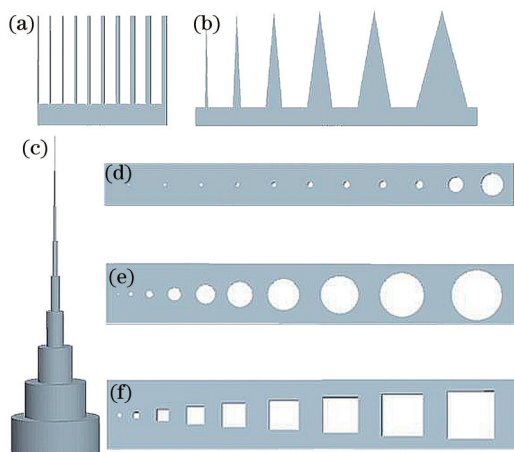


图2 各典型几何特征三维模型图。(a)薄板;(b)尖角;(c)圆柱体;(d)平行于Z轴圆孔;(e)垂直于Z轴圆孔;(f)垂直于Z轴方孔
Fig.2 Model of typical geometric features. (a) Thin walls; (b) sharp corners; (c) cylinders; (d) circular holes paralleling to Z axis; (e) circular holes vertical to Z axis; (f) square holes vertical to Z axis

表2 采用的主要加工参数

Table 2 Process parameters used by the equipment

Laser power /W	Scanning speed /(mm/s)	Layer thickness / μm	Scanning interval /mm	Scanning strategy	Spot compensation /mm
170	800	30	0.08	XY inter-layer stagger	0.03

3 结果与讨论

3.1 典型几何特征成型效果分析

3.1.1 薄 板

将厚度为0.05~0.5 mm(步进值为0.05 mm)的10块薄板沿X轴,Y轴以及与X轴成45° 3个方向摆放(如图3所示),并SLM成型,图4是3种情况下SLM成型效果图,从图4中可以看出,无论10块薄板沿X轴、Y轴或是沿与X轴成45°摆放,厚度大于等于0.15 mm的薄板均能顺利成型,厚度为0.1 mm的薄板只能成型出一半,而厚度为0.05 mm的薄板成型失败。图5为薄板成型尺寸误差曲线,由图可以看出,薄板厚度的绝对误差随薄板厚度增大而增大,但相对误差随薄板厚度增大而减小,故薄板越厚,成型精度越高。当薄板沿X轴摆放加工时,绝对误差在0.048~0.065 mm之间,相对误差在13%~48%之间,整体误差最小;所以,沿X轴摆放加工出的薄板精度最高,效果最好。

从以上分析可知,SLM能够成型出厚度小至0.15mm的薄板。但当薄板厚度小到一定程度时,就必须考虑激光光斑约束对成型件的影响。当设计尺寸小于激光光斑直径时,其实际成型尺寸会受到激光光斑直径的约束而保持为一个稳定值。这意味着光斑直径的大小决定了成型的尺寸精度。如图6所示,薄壁零件的壁厚小于光斑直径,在成型过程中,实际熔化区域面积大于零件的截面面积,最终成型的零件尺寸也大于设计的尺寸。DiMetal-100设备聚焦激光光斑的实际直径约为50~80 μm ,所以即使没有粉末粘附,实际制造的薄

壁厚度也不会小于 $50\ \mu\text{m}$ 。这种细微结构的成型能力的限制使得在零件设计时,对零件的细微结构(如薄板、尖角等)的设计就必须考虑实际成型能力的影响。

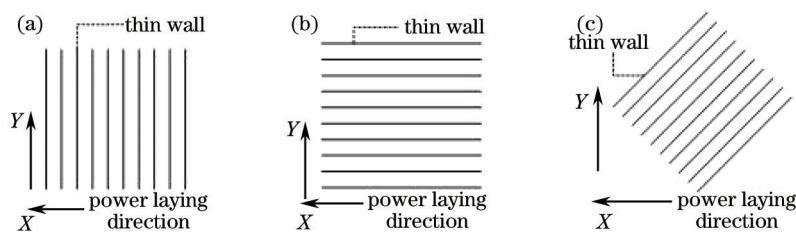


图3 薄板摆放方式。(a)沿X轴;(b)沿Y轴;(c)与X轴成45°

Fig.3 Display modes of thin walls. (a) Along X axis; (b) along Y axis; (c) at 45° with X axis

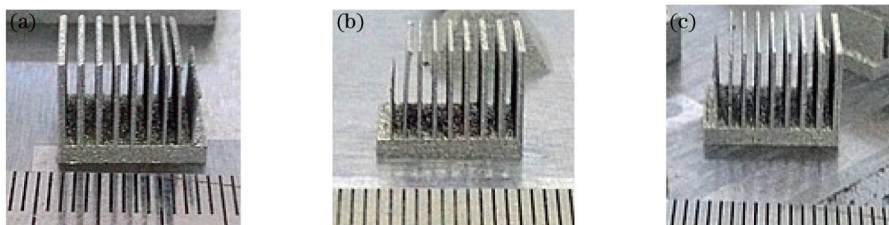


图4 薄板成型效果图。(a)沿X轴;(b)沿Y轴;(c)与X轴成45°

Fig.4 Thin walls by SLM. (a) Along X axis; (b) along Y axis; (c) at 45° with X axis

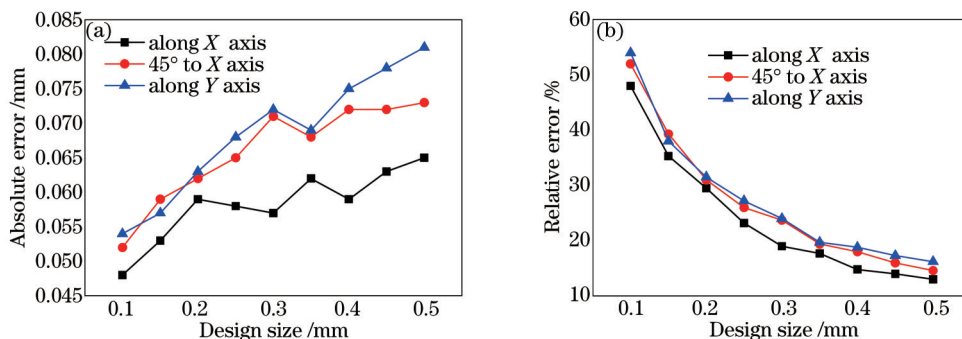


图5 薄板厚度误差变化曲线。(a)绝对误差曲线;(b)相对误差曲线

Fig.5 Thickness error changing curves of thin walls. (a) Curve of absolute error; (b) curve of relative error

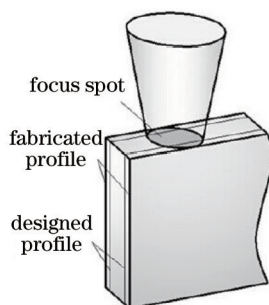


图6 光斑大小限制的薄板尺寸

Fig.6 Schematic of size limited by focus diameter

3.1.2 尖角

将角度为 2° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 30° 且高度为 20 mm 的尖角按水平和竖直两种方式摆放,然后 SLM 成型。图7是 SLM 成型效果图,从图7可以看出,SLM 能顺利成型出所有尖角。图8是尖角成型尺寸误差曲线,从图8可以看出,水平摆放时的绝对误差在 $-0.15\sim 0.2$ 之间波动,相对误差在 $-2.2\%\sim 3.8\%$ 之间波动。竖直摆放时的绝对误差在 $0.3\sim 2.6$ 之间,且随尖角角度增大而增大;相对误差在 $8.64\%\sim 14.3\%$ 之间,随尖角角度增大而减小。可以明显地看出,水平摆放的误差曲线偏离零水平线的幅度要小于竖直摆放的。因此,尖角

水平摆放加工要比竖直摆放加工尺寸精度高。这是因为SLM是基于离散/堆叠原理,采用逐层叠加的方式对零件进行成型,这一过程中,需要先沿着叠加方向将零件的模型进行分层。分层后,零件模型被分割成有限个厚度一定的切片层。切片层包含的信息仅是每一个层的轮廓以及对应的实体,而切片层之间的外轮廓信息并没有计算在内。因此,在实际成型中,零件模型的外表面是由若干个切片层的轮廓包络面构成,即台阶效应^[17]。如图9所示,虚线为竖直尖角的原始外形轮廓,而实际分层后得到的外轮廓是锯齿状的,如图9实线所示,而水平尖角不存在此种现象。一般情况下,可以通过减小层片厚度的方式来降低误差,但是这种原理误差无法根本性消除。因此,在零件设计时,不得不考虑这一因素对零件几何形状的影响。



图7 尖角SLM成型效果图

Fig.7 Sharp corners by selective laser melting

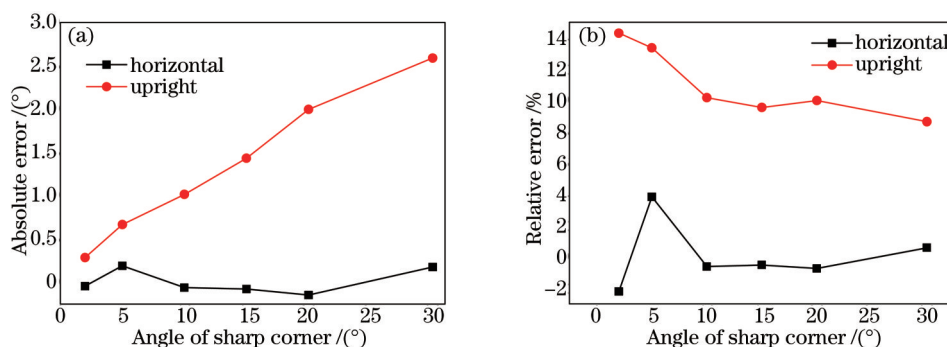


图8 尖角角度误差变化曲线。(a) 绝对误差; (b) 相对误差

Fig.8 Changing curves of angle error of sharp corners. (a) Absolute error; (b) relative error

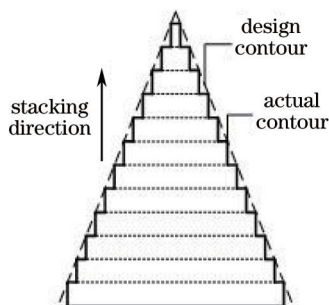


图9 分层原理对竖直摆放尖角精度的影响

Fig.9 Effect of slice principle on accuracy of vertical sharp corner

3.1.3 圆柱体

将直径为5、3.5、2、1、0.5、0.3、0.15、0.1和0.05 mm的圆柱体竖直摆放并SLM成型。图10为SLM成型效果图,从图10可以看出SLM能顺利成型出直径大于等于0.1 mm的圆柱体,但不能成型出直径为0.05 mm的圆柱体。这是因为其特征太小,在进行数据处理时,已经不能生成扫描路径,因而成型失败。图11为圆柱体成型尺寸误差曲线,从图11可以看出,圆柱直径的绝对误差在0.043~0.182 mm之间,相对误差在3.6%~43%之间,且绝对误差随直径增大而增大,相对误差随直径增大而减小并趋于平缓,故直径越大,圆柱成型精度越高。圆柱体的尺寸误差主要由轮廓误差引起,图12(a)为圆柱体截面扫描线填充示意图,设计轮廓为圆形,

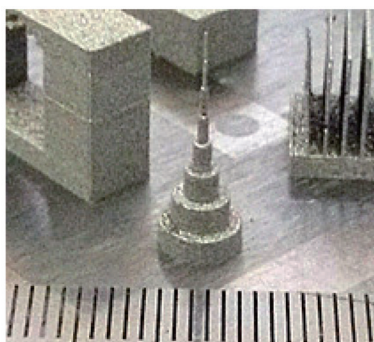


图10 圆柱体成型效果图

Fig.10 Cylinders by selective laser melting (SLM)

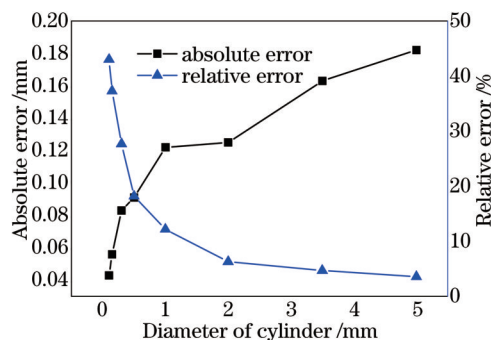


图11 圆柱体直径误差变化曲线图

Fig.11 Diameter error changing curve of cylinders

用点划线表示,受扫描熔道宽度和光斑直径的影响,实际成型的轮廓会超出设计轮廓范围,如黑色实线所示。可以通过加入轮廓扫描减小此类误差,如图12(b)所示,轮廓扫描使轮廓表面得到重熔,熔化后的材料进行重新填充,从而使轮廓表面变得圆滑。

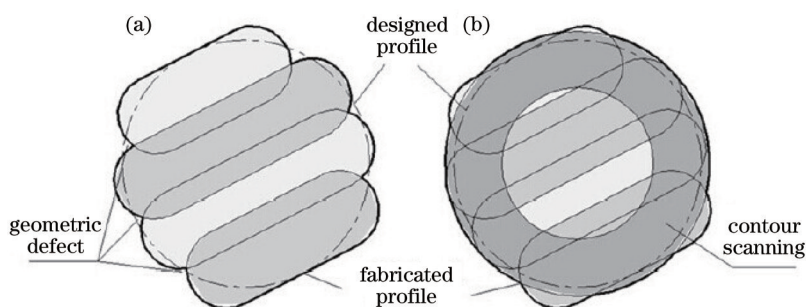


图12 圆柱体轮廓误差产生原理图。(a) 圆柱体轮廓误差; (b) 轮廓扫描改善精度

Fig.12 Schematic diagram of cylinder contour error. (a) Contour error of cylinder; (b) contour scanning to improve accuracy

3.1.4 平行于Z轴圆孔

将平行于Z轴且直径为0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1、2和3 mm的圆孔依次排列并SLM成型,图13为SLM成型效果图,从图13可以看出,SLM能成型出直径为0.4 mm及以上的圆孔,但直径小于等于0.3 mm的圆孔成型失败。其原因是SLM成型过程中的热传导作用使得熔池周围的粉末被部分熔化后粘附在小孔内部,同时,粉末熔化过程中对扫描线附近的粉末具有吸附作用,当圆孔直径太小时,半熔粉末将圆孔堵塞。图14为圆孔平行于Z轴成型尺寸误差图,从图14可以看出,圆孔直径的绝对误差在-0.085~0.06 mm之间,相对误差在-21.3%~2%之间。随着圆孔直径的增大,绝对误差从负值变为正值,并呈增大趋势;相对误差从负值变为正值后逐渐趋于平缓。

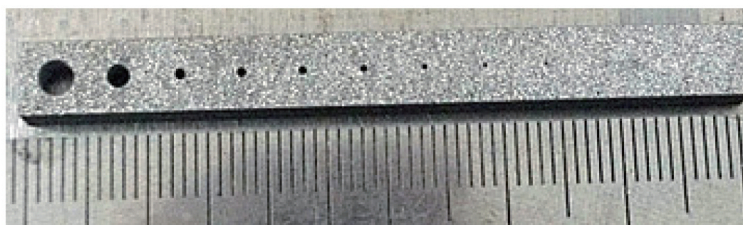


图13 平行于Z轴圆孔成型效果图

Fig.13 Circle holes paralleling to Z axis by selective laser melting (SLM)

同竖直摆放的圆柱体一样,平行于Z轴圆孔的尺寸误差主要由轮廓误差引起。图15为圆孔截面扫描线填充示意图,设计轮廓为圆形(如图15中虚线所示),受扫描熔道宽度及光斑直径的影响,实际成型轮廓如图15中加粗的黑实线所示。粉末粘附也会对圆孔的尺寸精度造成影响,使用的粉末最大粒径为35 μm,粉末粘附在圆孔内壁会造成孔径变小,尤其在成型小尺寸圆孔时,粉末粘附造成的绝对误差不可忽视。

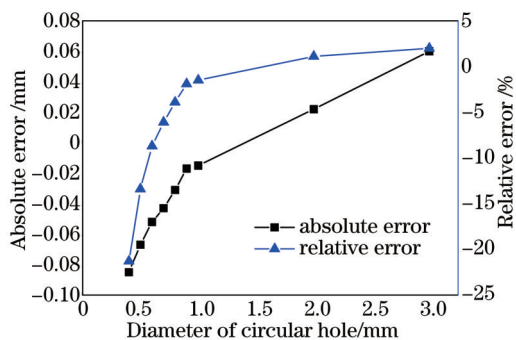


图 14 圆孔平行于 Z 轴直径误差变化曲线图

Fig.14 Diameter error changing curve of circle holes paralleling to Z axis

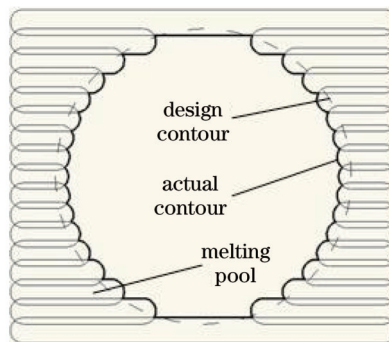


图 15 平行于 Z 轴圆孔轮廓误差

Fig.15 Contour error of circular hole paralleling to Z axis

3.1.5 垂直于 Z 轴圆孔

将垂直于 Z 轴且直径为 0.2、0.5、1、2、3、4、5、6、7 和 8 mm 的圆孔依次摆放并 SLM 成型,图 16 为 SLM 成型效果图,从图 10 可以看出,SLM 能顺利成型出直径大于等于 0.5 mm 的圆孔,直径为 0.2 mm 的圆孔成型失败。圆孔顶部存在“挂渣”,且孔径越大,“挂渣”越严重。图 17(a)为圆孔垂直于 Z 轴成型尺寸误差曲线,从图 17(a)可以看出,圆孔直径的绝对误差在 -0.08~0.22 mm 之间,相对误差在 -16%~3% 之间。随着圆孔直径增大,绝对误差从 -0.08 mm 变为正误差并逐渐增大;相对误差从 -16% 变为正误差并趋于平缓;图 17(b)为圆度变化曲线,可以看出圆度在 0.157~0.39 mm 之间,且随直径增大而增大。故圆孔直径越大,形状精度越差。



图 16 垂直于 Z 轴圆孔成型效果图

Fig.16 Circle holes vertical to Z axis by SLM

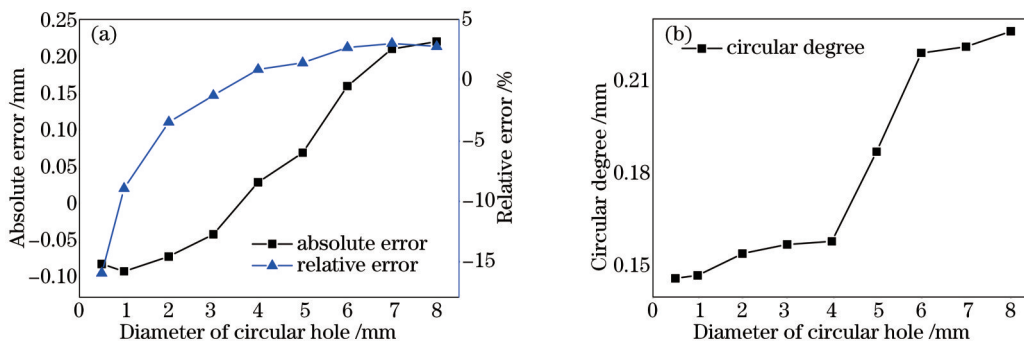


图 17 垂直于 Z 轴圆孔直径误差变化曲线。(a) 直径误差变化曲线; (b) 圆度变化曲线

Fig.17 Diameter error changing curve of circle holes vertical to Z axis. (a) Curve of diameter error; (b) curve of circular degree

从原理上来讲,圆孔顶部存在“挂渣”是由激光深穿透引起的。在 SLM 直接制造过程中,零件的层与层之间的搭接是依靠激光穿透当前成型层,熔化上一已成型层的部分体积,从而使两层之间产生冶金结合。若当前成型层刚好是零件的下表面时,上一已成型层并不存在,替而代之的是粉末层,这意味着,将有部分粉末被熔化,这种会出现激光深穿透而熔化粉末层的零件结构即为悬垂结构(如图 18 所示)。以粉末作为零件悬垂结构的支撑,熔池因重力和毛细管力的作用会沉陷到粉末中,导致悬垂结构出现“挂渣”现象。圆孔越大,悬垂结构越大,故“挂渣”现象越严重。“挂渣”会影响圆孔的尺寸精度和形状精度;此外,台阶效应也是造成悬垂圆孔直径误差的主要原因。

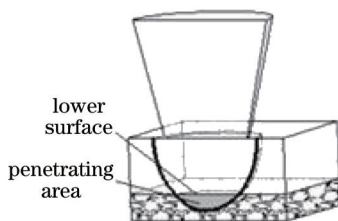


图 18 激光深穿透示意图

Fig.18 Schematic of laser deep penetration

3.1.6 垂直于 Z 轴方孔

将边长为 0.5、1、2、3、4、5、6、7 和 8 mm 的垂直于 Z 轴的正方形孔依次排列,并 SLM 成型,图 19 为 SLM 成型效果图,从图 19 可以看出,SLM 能良好地成型出边长为 1、2 和 3 mm 的方孔,且无明显缺陷。边长大于等于 4 mm 的方孔,虽然能成型出来,但由于激光深穿透的原因,孔的顶部“挂渣”较多,且翘曲现象比较严重。边长为 0.5 mm 的方孔,由于粉末粘附以及“挂渣”的存在,其结构特征只能勉强成型。因为方孔顶部“挂渣”严重,无法准确测量方孔的上下高度,故对方孔跨度进行测量,图 20 为方孔跨度误差曲线,从图 20 可以看出,方孔跨度的绝对误差在 -0.03~0.17 mm 之间,相对误差在 -6%~2.33% 之间。随着方孔跨度的增大,绝对误差从 -0.03 mm 向 0 靠拢并变为正误差,然后逐渐增大至 0.17 mm;相对误差从 -6% 向 0 靠拢并变为正误差,然后逐渐增大并趋于平稳。

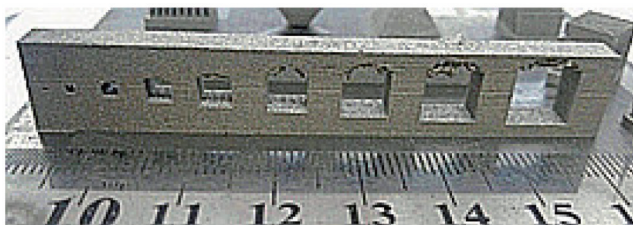


图 19 垂直于 Z 轴方孔成型效果图

Fig.19 Square holes vertical to Z axis by SLM

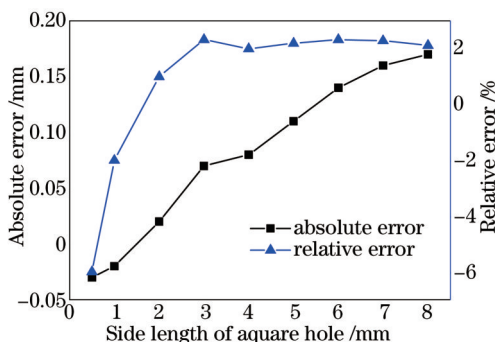


图 20 垂直于 Z 轴方孔跨度误差变化曲线

Fig.20 Span error changing curve of square holes vertical to Z axis

3.2 SLM 成型能力总结

通过以上分析对 SLM 的成型能力有了一个初步的认识:SLM 是基于离散/添加原理,采用逐层叠加的方式成型实体零件,理论上可以成型任意复杂结构的零件,但是受自身成型原理的固有约束,其并不能成型所有结构,比如激光光斑对薄板厚度的约束;粉末粘附对小孔的约束;激光深穿透对悬垂结构的约束等。所以在进行零件设计时,就必须考虑 SLM 自身成型原理约束对零件结构和尺寸的限制。

此外,没有讨论前期数据处理、热应力累积、材料收缩等因素对零件结构和尺寸精度的影响,还有进一步改进和完善的空间。

4 结 论

基于对 SLM 成型典型几何特征尺寸精度和成型能力研究,初步提出一些适用于 SLM 的零件设计规则,为设计工程师及产品的创新设计提供参考依据。

1) 零件设计时,要避免厚度小于 0.15 mm 的薄板结构,直径小于 0.1 mm 的圆柱体结构,直径小于 0.4 mm 的平行于成型方向的圆孔结构,直径小于 0.5 mm 的悬垂圆孔结构,边长小于 0.5 mm 的悬垂方孔结构以及跨度大于 3 mm 的水平悬垂结构;

2) 沿 X 轴摆放加工出的薄板精度要高于沿与 X 轴成 45° 以及沿 Y 轴摆放加工出的薄板精度;水平摆放加工出的尖角精度高于竖直摆放加工出的尖角精度。

3) 零件设计时要避免一些不恰当结构,以减小激光光斑、台阶效应、粉末粘附、激光深穿透等因素对零件成型的影响。

参 考 文 献

- 1 Hu Fenglan. Interchangeability and Technology Measurement Fundamental[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. 5.
胡凤兰. 互换性与技术测量基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 5.
- 2 Yang Yongqiang, Lu Jianbin, Wang Di, *et al.*. A study of 316L stainless steel non-horizontal overhanging surface in selective laser melting[J]. Material Science & Technology, 2011, 19(6): 94-99.
杨永强, 卢建斌, 王 迪, 等. 316L 不锈钢选区激光熔化快速成型非水平悬垂面研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(6): 94-99.
- 3 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.
- 4 Su Xubin. Study on Digital Design and Direct Fabrication of Functional Parts Based on Selective Laser Melting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
苏旭彬. 基于选区激光熔化的功能件数字化设计与直接制造研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- 5 Yang Yongqiang, Luo Ziyi, Su Xubin, *et al.*. Study on process and effective factors of stainless steel thin-wall parts manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103001.
杨永强, 罗子艺, 苏旭彬, 等. 不锈钢薄壁零件选区激光熔化制造及影响因素研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103001.
- 6 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.
- 7 Liu Yang, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Study on the clearance feature of non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103007.
刘 洋, 杨永强, 王 迪, 等. 激光选区熔化成型免组装机件的间隙特征研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103007.
- 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件间隙设计及工艺优化[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203004.
- 9 Liu Li. Study on the Part Precision of Rapid Prototyping of Stereo Lithography Apparatus[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
刘 利. 光固化快速成型制件的精度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- 10 Zou Guolin. Study on Precision of FDM and Rapid Tooling Based on FDM & LOM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
邹国林. 熔融沉积制造精度及快速模具制造技术的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- 11 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wei Guoqiang. Direct manufacturing of precision metal parts by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(S1): 175-179.
吴伟辉, 杨永强, 卫国强. 选区激光熔化快速成型制造精密金属零件技术[J]. 中国激光, 2007, 34(增刊): 175-179.
- 12 Wang Di, Yang Yongqiang, Wu Weihui. Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting[J]. Chinese J

- Lasers, 2009, 36(12): 3323–3329.
- 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): 3323–3329.
- 13 Fu Liding. Investigation into Manufacturing Metal Parts Direct from Stainless Steel Powders via Selective Laser Melting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- 付立定. 不锈钢粉末选择性激光熔化直接制造金属零件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- 14 J P Kruth, B Vandenbroucke, J Van Vaerenbergh, *et al.*. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques[J]. Int Conf Polymers & Innovations (PMI), 2005.
- 15 K A Mumtaz, N Hopkinson. Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping[J]. Journal of Material Processing Technology, 2010, 210(2): 279–287.
- 16 I Yadroitsev, Ph Bertrand, I Smurov. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8064–8069
- 17 G A O Adam, D Zimmer. Design for additive manufacturing—element transitions and aggregated structures[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology, 2014, 7(1): 20–28.
- 18 J G Zhou, D Herscovici, C C Chen. Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(3): 363–379.
- 19 Y Tang, H Y Loh, Y S Wong, *et al.*. Direct laser sintering of a copper-based alloy for creating three-dimensional metal parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1): 368–372.
- 20 Wang Lei, Qin Lanyun, Tong Ming, *et al.*. Multistip-like behavior and error evaluation method in rapid prototyping manufacturing [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(2): 318–321.
- 王 雷, 钦兰云, 佟 明, 等. 快速成型制造台阶效应及误差评价方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(2): 318–321.

栏目编辑: 宋梅梅