

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-08

# 激光选区熔化增材制造零件侧壁成型精度分析

吴伟辉<sup>1\*</sup>, 杨永强<sup>2</sup>, 毛星<sup>1</sup>, 王迪<sup>2</sup>, 毛桂生<sup>1</sup>

(1. 韶关学院 物理与机电工程学院, 广东 韶关 512005;  
2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**为提高增材制造金属零件时侧壁的成型精度,开展了提高激光选区熔化增材制造零件侧壁精度的工艺研究。结合实验分析了影响侧壁精度的粉末黏附、熔池端部凸起、热变形等现象,针对不同类型的侧壁提出了相应的侧壁精度优化方案。提出采用变向螺旋勾边+内缩填充扫描策略,同时在勾边时保持稍低的扫描速度,可以提高垂直及法向朝上侧壁的成型精度;法向朝下侧壁精度受热应力的影响最大,合理的扫描策略及支撑设计可有效防止该类侧壁热变形。根据工艺分析结果,成功成型了一个带有多种类型侧壁的金属零件。结果表明,采用上述工艺方案可以直接成型出尺寸精度最高可达到 $\pm 0.05$  mm/10 mm,表面粗糙度最高可达到 $R_a$ 为26.7  $\mu\text{m}$ 的金属零件。

**关键词:**选区激光熔化;增材制造;侧壁成型;金属零件;精度分析

中图分类号: TG665; TH161 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20152313.0000

## Sidewall precision analysis of metal part formed by selective laser melting

WU Wei-hui<sup>1\*</sup>, YANG Yong-qiang<sup>2</sup>, MAO Xing<sup>1</sup>, WANG Di<sup>2</sup>, MAO Gui-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering,  
Shaoguan University, Shaoguan 512005, China;

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of  
Technology, Guangzhou 510640, China)

\* Corresponding author, E-mail: wuweihui\_068@163.com

**Abstract:** To improve the precision of side wall forming in additive manufacturing of metal parts, a process method was explored in selective laser melting of metal parts. Some phenomena effecting on sidewall precision like powder adhesion, molten pool-end bulge, and thermal deformation were analyzed and corresponding process methods to obviously improve the precision were proposed for different sidewall types. It points out that the precisions of vertical sidewall and sidewall with upward normal can be improved distinctly by using the alternating direction spiral edge-scanning plus inside-filling scanning strategy and maintaining a lower edge-scanning speed. The precision of sidewall with downward normal is strongly affected by thermal stress, but this kind of thermal deformation can be avoided through the appropriate design of scanning strategy and sidewall support. According to process analysis, a metal part with different types of sidewalls was manufactured using

收稿日期: 2015-05-20; 修订日期: 2015-06-19.

基金项目: 广东省高等学校优秀青年教师培养计划资助项目 (No. Yq2013149); 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目资助 (No. 2013LYM\_0083)

selective laser melting technology. Test results show that the size precision of this part reaches  $\pm 0.05$  mm/10 mm and the surface roughness  $R_z$  is 26.7  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** selective laser melting; additive manufacturing; sidewall forming; metal part; precision analysis

## 1 序 言

激光选区熔化 (Selective Laser Melting-SLM) 是制造金属零件的主要增材制造技术之一<sup>[1]</sup>。由于采用细微聚焦光斑的激光束作为成型能量源、高速高精度扫描振镜作为加工光束控制单元及采用更薄的层厚控制技术,因而,SLM 技术在成型精密金属零件方面比其它增材制造技术更具有优势<sup>[1-2]</sup>。但是,由于 SLM 的成型过程是处于粉尘环境的热成型过程,热变形、粉末黏附、球化等影响成型精度的现象经常发生<sup>[3-4]</sup>,因此,从工艺角度控制 SLM 的成型精度十分重要。目前,SLM 成型精度研究多数集中在由单一层面形成的成型件顶面或成型件底面的精度上<sup>[3,5-7]</sup>。刘睿诚等<sup>[3]</sup>对 316L 不锈钢 SLM 成型件的上表面粗糙度展开的研究。Hao L 等<sup>[8]</sup>分析了不同扫描间距下羟磷灰石和 316L 不锈钢粉混合材料 SLM 成型件的上表面粗糙度。Baicheng Zhang 等<sup>[9]</sup>研究了 SLM 成型过程中,不同扫描速度及激光功率参数对纯 Ti 材料成型件上表面形貌的影响。苏旭彬<sup>[10]</sup>分析了 SLM 成型件悬垂底面精度与输入激光能量的关系。由于 SLM 成型过程是一个逐道熔池搭接成层片面、逐片堆积成体的过程,因而由多层片堆积形成的侧壁面是 SLM 成型件的重要组成部分,其成型精度对成型件整体的成型精度至关重要;但是目前国内外仅有少数针对 SLM 成型件侧壁精度展开研究的报道,例如 REHME 等<sup>[11]</sup>对 SLM 成型件的“台阶效应”的分析报道。为进一步提高 SLM 的成型精度,迫切需要针对侧壁成型展开更多的研究。

本文结合工艺实验,从分析影响 SLM 成型件侧壁精度的主要因素着手,针对不同的侧壁类型,采用工艺参数调整、扫描策略设计、支撑设计等手段优化侧壁的成型精度。最后综合各工艺措施,成型了有较高精度的具有多种侧壁类型的金属零件。

## 2 激光选区熔化原理及实验方法

### 2.1 激光选区熔化增材制造原理

图 1 是选区激光熔化技术原理示意图。激光束开始扫描前,铺粉装置先把金属粉末平刮到加工室的基板上,然后激光束将按当前层的轮廓信息选择性地熔化基板上的粉末,加工一个层片。接着升降台下降预设层片厚度的距离,铺粉装置在已加工好的层片上铺上金属粉末,设备调入下一图层成型,如此层层成型,直到整个零件成型完毕。整个加工过程在通有气体保护的加工室中进行,以避免金属在高温下与其它气体发生反应<sup>[12]</sup>。

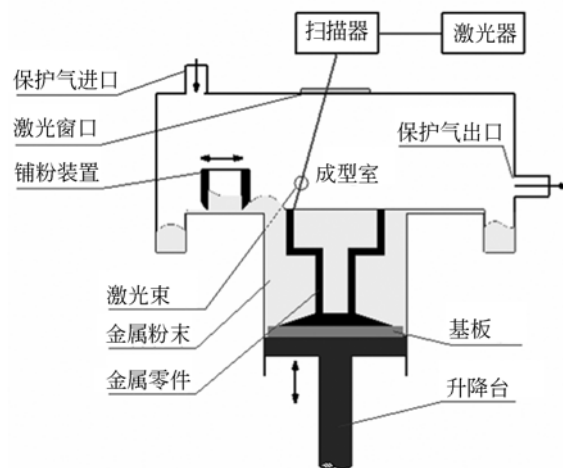


图 1 激光选区熔化技术成型原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SLM

### 2.2 实验方法

采用 400 目气雾化 316L 不锈钢粉末作为成型材料,基板材料为 304 不锈钢。采用韶关学院 Metal3DP-100 SLM 设备作为实验平台,该设备的最大成型尺寸为 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  90 mm,最小铺粉层厚为 20  $\mu\text{m}$ ,配备最大功率为 200 W 的连续式光纤激光器,激光聚焦光斑为 30 ~ 50  $\mu\text{m}$ 。针对成型精度缺陷设计相应的扫描策略,再根据该扫描策略配合工艺参数设计处理预设的实验用 CAD 模型,获得扫描数据,然后扫描数据驱动激

光束逐层选区熔化金属粉末成型。

实验后采用光切显微镜测量成型件尺寸精度及表面粗糙度,用体视显微镜观察成型件的表面形貌。

### 3 侧壁精度的优化工艺

#### 3.1 粉末黏附现象

SLM 成型过程始终是在粉末环境中的,每道熔池附近都或多或少存在着粉末颗粒。在激光扫描选区内粉末形成熔池时,熔池或多或少粘附住附近的粉末颗粒,这就是粉末黏附现象,如图 2 所示。

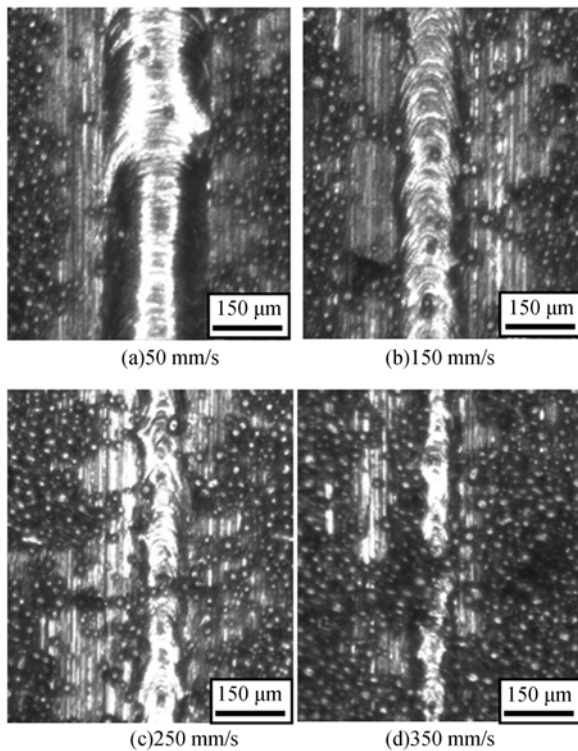


图2 不同扫描速度下基板上成型的单道熔池(未除粉末)

Fig. 2 Single channel pools formed on substrate with different scanning speeds (without removing powder)

粉末黏附可分成两类:第一类为仅仅接触到熔池表面,但没嵌入内部的黏附颗粒,这类颗粒如成型后轻轻清扫即可除去,对成型精度的影响不大;第二类粉末黏附颗粒会部分嵌入到熔池内,导致熔池表面有凸起毛刺,成型后无法通过清扫除去,大大降低了成型的精度。

由于采用粉末状材料,SLM 成型过程中的粉末黏附现象无法完全避免。为减小第二类粉末黏附颗粒对侧壁成型精度的影响,需要通过调整工艺参数来减少选区外粉末接触熔池的机会。

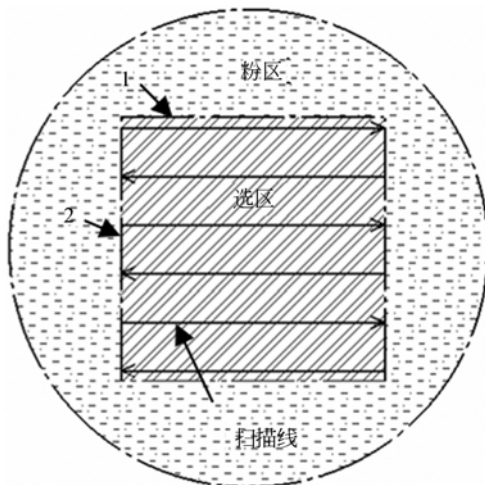
图 2 是不同扫描速度下在基板上成型的单道熔池形貌(未去除基板上的粉末)。图 2(a)和(b)是在较低扫描速度下的熔池形貌,单道熔池两边形成一个空白区,粉末黏附很少。其原因是 SLM 成型是在保护气氛中进行的,当激光熔化粉末形成熔池时,熔池两侧的气体也受到激光的部分能量辐射,受热膨胀,将熔池周边细小的粉末推离熔池,因此激光在某处停留的时间越长,气体受热膨胀越厉害,从而熔池周边的粉末驱散得越干净,这样粉末黏附就明显减少。当扫描速度为 50 mm/s 时,熔池两侧的粉末黏附较少;但当扫描速度达到 350 mm/s 时,由于气流驱离粉末的动力太弱,熔池的粉末黏附现象严重。

在选区内部,发生粉末黏附的熔池还有机会在后续的激光扫描中将黏附的粉末熔化掉,但侧壁正位于选区的边缘,第二类粉末黏附现象必将对成型侧壁的表面精度有着重要影响。由上述分析可知,为提高侧壁的成型精度,可适当降低扫描速度,以弱化粉末黏附现象。

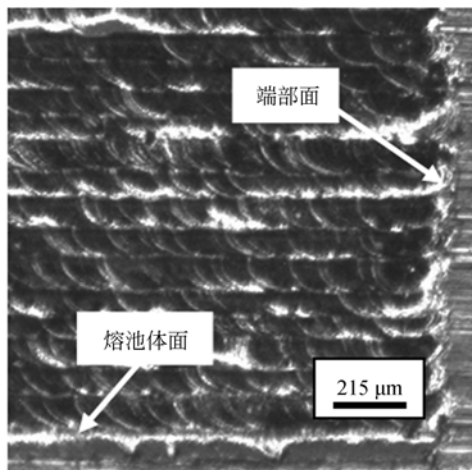
#### 3.2 轮廓上熔池形状与侧壁精度的关系

侧壁成型精度很大程度上取决于轮廓上熔池的形状。图 3(a)是一种常见的 SLM 扫描方式,激光沿箭头方向在选区内往复扫描,逐道搭接形成层片状固体。在仅成型一层的情况下,与扫描方向同向的侧壁形成面仅由单道熔池构成(见图 3(b),简称为熔池体面)。只要熔池形状控制得连续平滑,形成的侧壁面就会具有较高的表面精度。但在熔池端部,受表面张力的影响,理论上熔池头部及尾部为半圆状,因而相互搭接形成的侧壁面应为锯齿状(见图 3(b),简称为端部面),其精度较熔池体面差。实际上,除此之外,端部面还受到扫描加减速因素的影响。熔池的端部是激光扫描的起始或终止端,激光停留的时间要比熔池中中部位置的长,而该处又存在大量金属粉末,导致熔池成型时要吸入比理论分析结果更多的粉末,发生“端部凸起”现象<sup>[12]</sup>。各道熔池吸入的粉末量具有随机性,导致熔池端部形成的侧壁面更为粗糙。由于激光参数与扫描速度的配合难度大,通过改变激光束在此处的停留时间很难消除

齿状边缘以获得平滑的侧壁面。



(a)采用普通扫描策略的选区  
(a) Selected area using ordinary scanning strategy



(b)采用普通扫描策略形成的单层侧壁面  
(b) One-layer sidewall using ordinary scanning strategy

图 3 扫描策略与侧壁形状关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of relationship between scanning strategy and sidewall shape

为提高侧壁的成型精度,可设法使侧壁面都为熔池体类侧壁面,这可通过先勾边后填充的方式来实现。为使不规则的熔池端部不影响侧壁精度,在勾边填充中对填充线进行内缩处理,同时为减小热变形,对面积较大的切片采用了分区填充。为减少熔池端部位于侧壁面的数量,勾边线设计为螺旋式勾边线(见图 4)。这样,除起点外,轮廓边缘避免了扫描加减速的情况;此外,将填充线进行内缩处理后,填充内端部不再与粉末接触,使得激光在加减速时不与粉末接触,从而大大减少瘤

状凸起的程度。

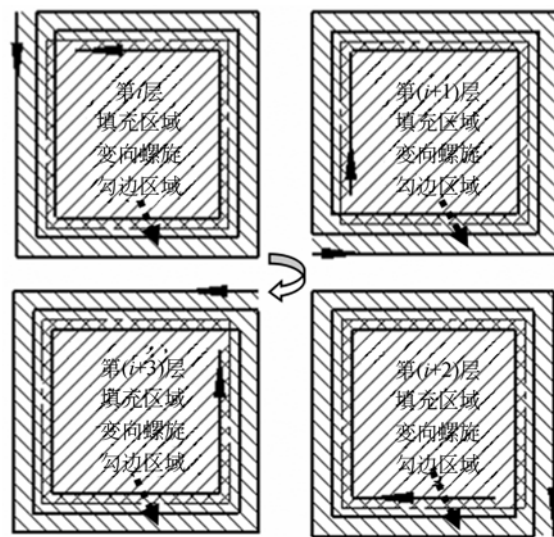
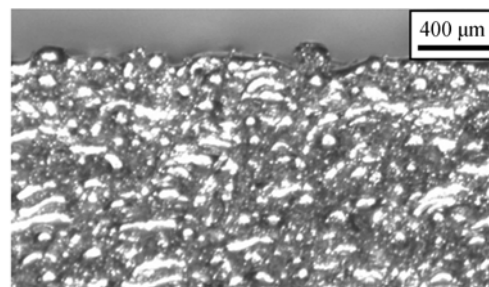


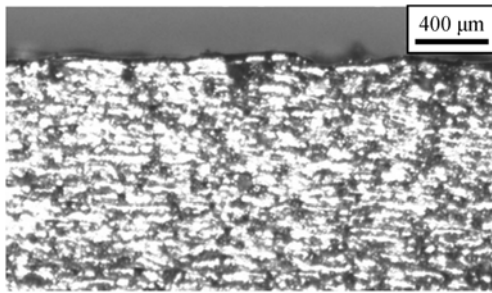
图 4 提高侧壁表面精度的变向螺旋勾边 + 内缩填充扫描策略(部面线表示切片形状)

Fig. 4 Scanning strategy using alternative direction spiral scanning line and retraction filling scanning lines (section line means the slice shape)

图 5 是两种不同扫描策略获得的侧壁成型效果照片。采用直线往复扫描策略时,侧壁成型十分粗糙,由于每一层的侧壁都为锯齿状轮廓,层与层间的锯齿轮廓就形成了一个凹坑。在逐步铺粉成型的过程中,下一层新铺的粉末不断进入上数层形成的凹坑中,致使成型后侧壁夹杂了大量的金属粉末,如图 5(a)所示。采用图 4 所示的勾边扫描策略后,每一层的侧壁基本都由平直的长线熔池构成,多层侧壁的轮廓相互叠加后难以形成凹坑状表面,因而,其侧壁的成型精度也得到了大大提高,如图 5(b)所示。



(a)采用直线往复扫描策略  
(a) Sidewall using scanning strategy



(b)变向螺旋勾边+内缩填充扫描

(b)Sidewall using alternative direction spiral edge-scanning plus inside-filling scanning strategy

图 5 两种扫描策略成型的侧壁(扫描速度:350 mm/s,激光功率:140 W,铺粉层厚:40 μm)

Fig. 5 Sidewalls using two different scanning strategies (Scanning speed: 350 mm/s; laser power: 140 W; layer thickness: 40 μm)

### 3.3 倾斜侧壁的成型分析

倾斜侧壁可分为两类:一类是法向朝上的面(图 6 标号 A,法向角  $\alpha < 180^\circ$ );一类是如图 6 中 B 所示的法向朝下的面(图 6 标号 B,法向角  $\beta > 180^\circ$ )。多数研究表明,倾斜侧壁受“台阶效应”影响<sup>[9]</sup>,相对于垂直侧壁,其成型精度更难保证。“台阶效应”是所有增材制造工艺的原理性误差,是无法根本消除的,如同采用多边形来模拟圆,边数越多则圆的精度越高一样。倾斜侧壁的分层厚度越小,成型精度越高。但是,“台阶效应”对不同侧壁的影响程度是不同的。

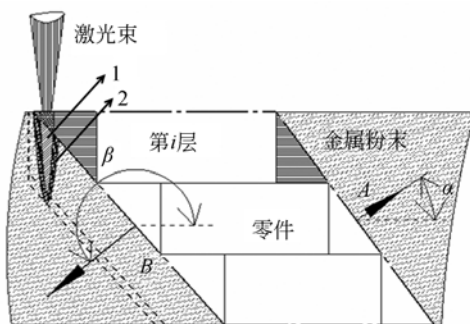
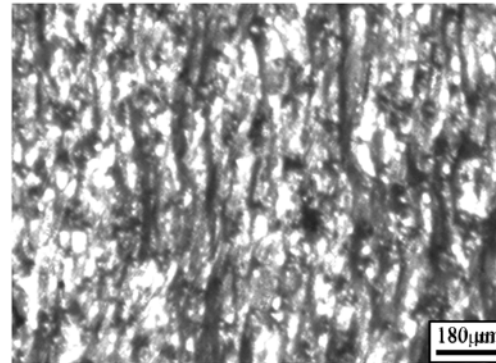


图 6 倾斜侧壁的两类型

Fig. 6 Two types of sidewall

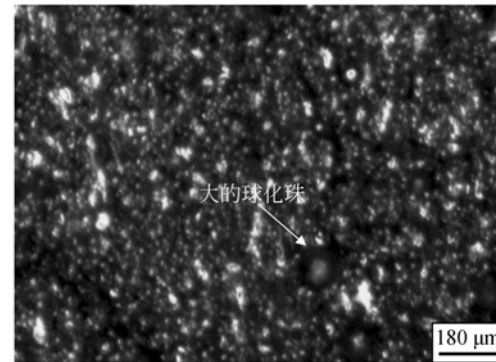
法向朝上的面(图 6 标号 A)成型时通常能得到较平滑的侧壁面,如图 7(a)所示。原因是法向朝上的侧壁面对应的选区内粉末底部总是处于上一层的固态基础上,在早前研究<sup>[13]</sup>中已发现:在基板上成型且对基板有一定的重熔量,可以有效

弱化球化现象,并获得良好的平滑连续熔池。另一方面,尽管该类侧壁也处在选区外粉末的包围中,但在成型过程中,通过上述气流驱散机制,还是可以将高于当前层高度的靠近选区边缘的粉末吹离,从而能有效弱化粉末黏附现象,因而其成型面的表面粗糙度主要受“台阶效应”影响,受粉末黏附的影响较小。只要将层厚控制得足够薄,就可以有效提高侧壁精度。



(a)法向朝上侧面显微照片(45°)

(a)Sidewall with upward normal (45°)



大的球化珠

(b)法向朝下侧面显微照片(225°)

(b)Sidewall with downward normal (225°)

图 7 两类倾斜侧壁面的成型显微照片(激光功率:140 W,扫描速度 350 mm/s,层厚:40 μm)

Fig. 7 Two inclined sidewall micrographs (laser power: 140 W; scanning speed: 350 mm/s; thickness: 40 μm)

法向朝下的面(图 6 标号 B)在第 i 层成型时,面 B 中的阴影区所示的区域下方不是固体基础,而是深度远较层厚大得多的粉末。由早前的研究可知<sup>[13]</sup>,直接在粉床上成型得到的熔池会产生严重的球化现象,因而形成的侧壁面也带有严重的球化现象,如图 7(b)所示。同时,为使成型件两层之间具有良好的冶金结合,激光穿透深度

要大于预设层厚<sup>[14]</sup>,但阴影区下方不是固体基础,而是松散的粉末,因而激光穿透部分除将部分粉末熔化外(图6标号1),还将更深的粉末烧结粘附起来(图6标识2),所以这类侧壁面往往呈现出严重的粉末黏附现象,这时“台阶效应”已不是主要的精度影响因素。因此,通常该类面的表面粗糙度要远大于其它面,打磨工作量也更多。

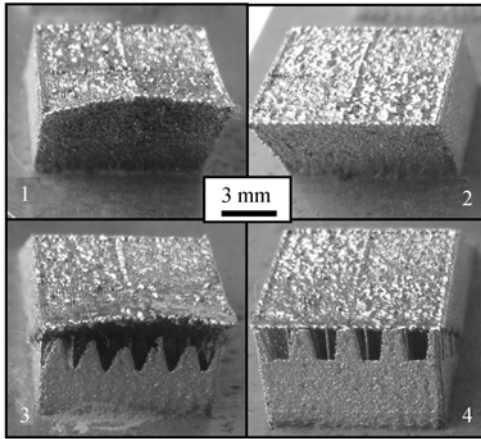


图8 法向朝下倾斜侧壁成型件照片(法向角:1-2号件 225°,3-4号件 240°;扫描方向:除1号件外,其余邻层勾边变向;支撑设计:3号支撑高度未达零件顶部;4号支撑高度到达零件顶部)

Fig. 8 Photos of sidewall parts with downward normal (Normal angle: No. 1-2, 225°; No. 3-4, 240°. Scanning direction; In addition to No. 1, rest of the parts have changed edge-scanning direction in adjacent layers. Support design; supporting level of No. 3 is under top surface of part; supporting level of No. 4 reaches top of part)

此外,由于 SLM 成型是热成型过程,激光迅速熔凝选区内金属粉末形成固态金属层面,因而选区内各处的温度梯度十分明显。由于法向朝下的侧壁底部没有固态基础的支撑及强制牵拉,在热应力的作用下极易产生热变形,从而导致倾斜侧壁处产生明显的尺寸误差(图8标识1)。通常侧壁倾斜角度越大,在相同层厚情况下,阴影区域面积越大,热变形的趋势也越明显。因而,法向朝下的侧壁成型的首要问题是尺寸精度的控制。

减少法向朝下倾斜侧壁热变形的的方法包括合适的扫描策略、预热、添加合理支撑等。当前很多 SLM 设备中都没有装备预热系统,因而采用合理的扫描策略及添加合理的支撑是当前 SLM 设备中减少法向朝下侧壁热变形的的主要手段。如上所

述,为提高侧壁的成型精度,采用了多重螺旋勾边的方式,但如果每层的螺旋勾边方式都是相同的,则侧壁上某点在随后的数层成型中,与同层内其它点的温度梯度变得越来越大,从而产生热应力的逐层累积形象,最终引发热变形。如果在相邻的两层间,交替变换螺旋的起始和终止方向以及起始位置顺序(每层起始位置旋转 90°),则相邻两层在侧壁某一位置的热应力逐层累积就会有效减少,从而减少热变形的可能(如图4所示)。测试结果表明,如果倾斜角度不大(图8中1,2号件的倾斜角为 225°),成型采得了良好的效果(图8标号2成型件)。如果倾斜角度进一步增加(图8中3,4号件倾斜角为 240°),可通过添加支撑进一步减小热应力对侧壁成型精度的影响。添加支撑的目的是通过支撑作用,强制牵引住侧壁的法向朝下面,使法向朝下侧壁面在成型过程中不受热应力影响而发生变形(图8中4号件)。在支撑设计时,支撑范围必须完全包括整个侧壁的法向朝下面(图8中4号件),否则法向朝下侧壁面还有可能发生局部变形(图8中3号件)。

#### 4 侧壁综合成型实例

为综合考察侧壁的成型精度,设计一个含各类侧壁的零件(如图9(a)所示)并进行成型,成型参数如表1所示。

表1 零件加工参数

Tab. 1 Processing parameters

参数名称	参数值
首层扫描速度 $v_1/(m \cdot s^{-1})$	0.15
激光功率 $P_1/W$	140
第2~500层扫描速度 $v_2/(m \cdot s^{-1})$	内部扫描速度 0.40
	轮廓扫描速度 0.32
扫描间距 $d/mm$	0.08
扫描方式	见图3
铺粉厚度 $\delta/mm$	0.04

成型结果如图9(b)所示,由于采取了合适的扫描策略及合理的勾边工艺参数,零件的垂直侧壁及法向朝上侧壁基本没有出现粉末黏附现象,其成型尺寸精度达到  $\pm 0.05 \text{ mm}/10 \text{ mm}$ ,采用光切显微镜测量这两类侧壁的表面粗糙度,结果为:

$R_z = 29.9 \mu\text{m}$  及  $R_z = 26.7 \mu\text{m}$ 。

由于采用了良好的支撑设计及合适的勾边扫描策略,零件法向朝下侧壁不受热应力影响,尺寸基本准确,但受支撑去除残留的影响,其尺寸精度比垂直侧壁及法向朝上侧壁稍低,为  $\pm 0.16 \text{ mm}/10 \text{ mm}$ ,表面粗糙度较差,底部粉末黏附现象较为

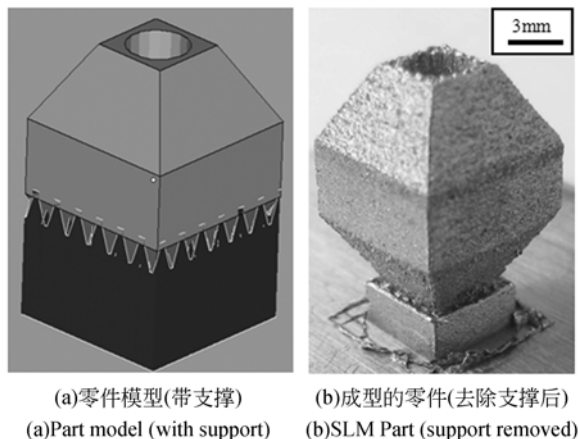


图9 一个侧壁综合测试零件

Fig.9 Comprehensive side-wall test part

严重。对精度要求高的场合,零件还需打磨抛光才能投入使用。

## 5 结 论

本文针对 SLM 增材制造件的侧壁精度展开了工艺研究,结果表明:通过减小扫描速度和控制热膨胀气流弱化粉末黏附现象,可提高侧壁的成型精度;通过先变向螺旋勾边,然后再在变向螺旋勾边基础上进行内缩填充能大大提高侧壁的成型精度;“台阶效应”不是法向朝下类侧壁精度的主要影响因素,它受热应力的影响最大,合适的扫描策略及支撑设计可有效防止该类侧壁的热变形。最后成型了一个带有多种类型侧壁的金属零件,分析表明:采用合适的扫描策略,配合合适的工艺参数及支撑设计,直接成型出垂直侧壁及法向朝上侧壁的尺寸精度达到  $\pm 0.05 \text{ mm}/10 \text{ mm}$ 、表面粗糙度  $R_z$  达到  $26.7 \mu\text{m}$  的金属零件,其法向朝下侧壁面无热变形,但受粉末黏附现象的影响,精度稍差。

## 参考文献:

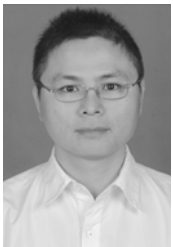
- [1] 杨永强,王迪,吴伟辉.金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展[J].中国激光,2011,38(6):0601007.  
YANG Y Q, WANG D, WU W H. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0601007. (in Chinese)
- [2] 顾冬冬,沈以赴.基于选区激光熔化的金属零件快速成形现状与技术展望[J].航空制造技术,2012(8):32-37.  
GU D D, SHEN Y F. Research status and technical prospect of rapid manufacturing of metallic part by selective laser melting [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012(8): 32-37. (in Chinese)
- [3] 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.  
LIU R CH. *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. (in

Chinese)

- [4] VRANCKEN B, CAIN V, KNUTSEN R, et al. Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting [J]. *Scripta Materialia*, 2014, 87: 29-32.
- [5] 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.  
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. (in Chinese)
- [6] 陈光霞,章群.选择性激光熔化快速成型复杂零件精度控制及评价方法[J].组合机床与自动化加工技术,2010(2):102-105.  
CHEN G X, QIN Q. Controlling and evaluation of precision of complex components produced by SLM [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2010(2): 102-105. (in Chinese)
- [7] CHERRY J A, DAVIES H M, MEHMOOD S, et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stain-

- less steel parts by selective laser melting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 5-8(76): 869-879.
- [8] HAO L, DADBAKHS S, SEAMAN O, *et al.*. Selective laser melting of a stainless steel and hydroxyapatite composite for load-bearing implant development [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209:5793-5801.
- [9] ZHANG B CH, LIAO H L, CODDET C. Selective laser melting commercially pure Ti under vacuum [J]. *Vacuum*, 2013, 95:25-29.
- [10] 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.  
SU X B. *Study on Digital Design and Direct Fabrication of Functional Parts Based on Selective Laser Melting* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] REHME O, EMMELMANN C. Reproducibility for properties of selective laser melting [C]. *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, Munich: WLT, 2005:1-6.
- [12] 吴伟辉. 选区激光熔化快速成型系统设计与工艺研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2007.  
WU W H. *Research on System Design and Process of Selective Laser Melting* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [13] 吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5):110-115.  
WU W H, YANG Y Q, WANG D. Balling phenomenon in selective laser melting process [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2010, 38(5):110-115. (in Chinese)
- [14] 王迪. 选区激光熔化成型不锈钢零件特性与工艺研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
WANG D. *Study on the Fabrication Properties and Process of Stainless Steel Parts by Selective Laser Melting* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)

#### 作者简介:



吴伟辉(1979-),男,广东化州人,博士,副教授,2001年,2004年于中南大学分别获得学士、硕士学位,2007年于华南理工大学获得博士学位,主要从事激光材料合成及成型方面的研究。E-mail:wuweihui\_068@163.com



杨永强(1961-),男,河北定州人,教授,博士生导师,1982年,1987年,1993年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光加工、快速原型以及金属材料等方面的研究。E-mail:meyqyang@scut.edu.cn