

# 激光选区熔化成型免组装机机构的间隙特征研究

刘洋 杨永强 王迪 杨雄文 刘睿诚

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

**摘要** 间隙特征的成型是免组装机机构直接成型的关键问题,为了提高间隙特征的可成型性,采用倾斜摆放方式减少间隙内部支撑。建立悬垂结构尺寸误差的数学模型并进行试验验证;采用激光选区熔化(SLM)成型了间隙尺寸为0.2 mm、一系列倾斜角度的间隙特征,研究成型厚度、倾斜角度和能量输入等工艺参数对间隙大小的影响;成型了免组装的折叠算盘。结果表明,在倾斜角度大于 $40^\circ$ 时,通过增大倾斜角度、减小成型厚度或者能量输入,间隙尺寸增大,实验结果与该数学模型相符合。当激光功率150 W、扫描速度为800 mm/s时,层厚为25  $\mu\text{m}$ 和35  $\mu\text{m}$ 的间隙大小分别为140  $\mu\text{m}$ 和120  $\mu\text{m}$ 。采用以上的工艺参数成型的折叠算盘可以实现预设计的动作,为机构的直接制造提供了一个可行的方法。

**关键词** 激光技术;激光选区熔化;免组装机机构;间隙特征;倾斜角度;尺寸误差

**中图分类号** TH122; TH162 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1103007

## Study on the Clearance Feature of Non-Assembly Mechanism Manufactured by Selective Laser Melting

Liu Yang Yang Yongqiang Wang Di Yang Xiongwen Liu Ruicheng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

**Abstract** The manufacturing of clearance features is the crucial issue for direct manufacturing non-assembly mechanisms. To improve the processibility of clearance feature, tilted display is adopted to reduce the support within the clearance. A dimension error model for overhanging structure is established and a verification experiment is conducted, firstly. Then clearance feature of 0.2 mm with a series of tilt angles is manufactured by selective laser melting (SLM) to investigate the effects of process parameters, such as layer thickness, tilt angle and energy input on clearance size. Finally, a collapsible abacus is manufactured. Results show that the clearance size increases with increasing tilt angle, decreasing layer thickness or energy input when the tilt angle is larger than  $40^\circ$ . It shows that the theoretical dimension error fits the experimental results well. With laser power of 150 W, scan speed of 800 mm/s and layer thickness of 25  $\mu\text{m}$  and 35  $\mu\text{m}$ , the clearance sizes are 140  $\mu\text{m}$  and 120  $\mu\text{m}$ , respectively. A collapsible abacus manufactured under the above process parameters can achieve designed performances well. It provides a feasible method for direct manufacturing of mechanisms.

**Key words** laser technology; selective laser melting; non-assembly mechanism; clearance feature; tilt angle; dimension error

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

现代机械设备是多零件的组合物,在传统加工方法中,首先单独加工零件,再将零件组装成机构,

工序不仅繁琐,而且在设计阶段需要考虑组装手段和连接方式,这在一定程度上限制了零件的功能发挥。如何解放机构模型设计约束,让机构模型研究

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51275179)

作者简介: 刘洋(1987—),男,博士研究生,主要从事激光加工及激光快速成型等方面的研究。

E-mail: liuyang122325@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: meiyang@scut.edu.cn(通信联系人)

成果真正实现其工程应用价值,是目前急需解决的问题<sup>[1]</sup>。如果在计算机中将机构预先组装好,然后直接制造出来,免去后续的组装工序,可称此机构为免组装机构。

激光选区熔化(SLM)是一种能够直接制造冶金结合、致密组织、高尺寸精度和良好力学性能金属零件的技术,是当今直接快速成型领域的研究热点。吴伟辉等<sup>[2-3]</sup>研究了激光选区熔化技术的成型机理,分析了 SLM 成型过程中常见的缺陷如翘曲变形、球化等的原因,提出了相应的改进措施,并成型了高精度的个性化手术模板,成功地进行了临床试验。Wang 等<sup>[4]</sup>研究了能量输入对 SLM 成型悬垂结构的极限成型角和可靠成型角的影响,提出了提高悬垂结构成型可靠性的措施。刘杰等<sup>[5]</sup>以减小零件模型整体难成型悬垂面的面积为目标,建立了成型方向的优化模型,通过计算机辅助工艺参数优化,减少了悬垂结构处支撑的添加。

目前为止,关于免组装机构的研究报道是有限的。Mavroidis 等<sup>[6]</sup>采用光固化成型(SLA)和激光选区烧结(SLS)技术成型了旋转关节、球形关节和线性关节;Laurentis 等<sup>[7]</sup>采用 SLA 技术成型多关节的机械手,并研究了水平方向和垂直方向的间隙成型工艺;Calì 等<sup>[8]</sup>为了提高免组装关节的可成型性,设计了新型旋转关节和球面关节,标定了关节运动,并采用 SLS 技术成型了机械手。Su 等<sup>[9]</sup>研究了基于 SLM 成型免组装机构的数字化设计规则,初步分析了间隙摆放位置对成型的影响,并制造了万向节、曲柄滑块机构等;Lipson 等<sup>[10]</sup>利用三维打印技术复原了几种典型的机械机构。Chen 等<sup>[11]</sup>设计了鼓形关节,并研究发现鼓形关节运动时的冲击

力比传统关节小,受力更均匀。

以上都是针对特定快速成型技术成型免组装机构的可行性研究,但是没有考虑机构的关键元素——运动副的直接成型工艺问题。虽然免组装机构是一次性制造出来,但是相互运动的零件仍然是通过运动副连接,需要保证成型后的运动副能够满足机构的运动要求,这就使得免组装机构的 SLM 直接成型与单零件的成型工艺有很大的区别。

与传统机构一样,运动副的间隙大小和形状对免组装机构的运动性能有直接的影响。间隙尺寸设计过大会增大离心惯力,导致机构运动不平稳;若设计过小,可能会导致成型后的间隙特征模糊,甚至导致机构成型失败。因此,SLM 直接成型免组装机构的关键问题就是运动副的间隙特征成型。本文研究了倾斜角度、铺粉层厚以及能量输入对间隙特征成型的影响,并总结了 SLM 成型最小间隙特征的最优工艺参数,在此基础上成型了免组装机构。

## 2 实验设备及材料

实验设备采用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及光路传输系统、密封成型室及气体保护系统(包括铺粉装置)、机械传动及控制系统、工艺软件等部分组成。激光由扫描振镜导向,然后通过  $f-\theta$  透镜聚焦,选择性的将成型面上的金属粉末熔化堆叠成金属零件。激光最大功率为 200 W,波长为 1090 nm,扫描速度范围为 10~5000 mm/s,加工层厚为 20~100  $\mu\text{m}$ ,激光聚焦光斑直径为 70  $\mu\text{m}$ ,成型最大体积为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 120 mm。

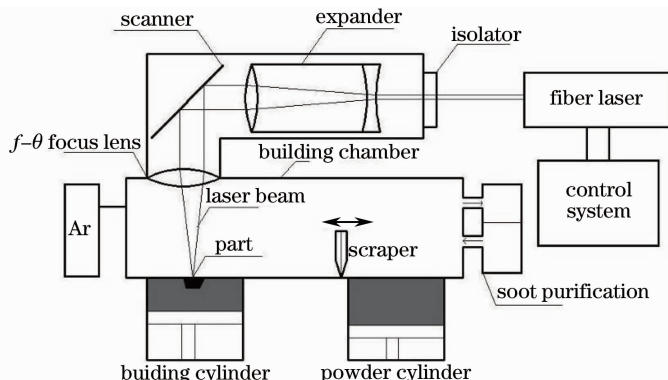


图 1 SLM 成型设备结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SLM fabricating equipment

材料为 316L 不锈钢球形粉末,平均粒径为 17  $\mu\text{m}$ ,最大粒径为 35  $\mu\text{m}$ ,松装密度为 4.04  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

主要化学组成如表 1 所示。

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分

Table 1 316L stainless steel powder chemical compositions

Chemical compositions	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	O	Fe
Mass fraction /%	0.03	17.53	12.06	2.16	0.86	0.38	0.13	Bal

### 3 结果与讨论

#### 3.1 SLM 成型间隙特征尺寸误差模型建立

相互运动的零件之间存在间隙,需要保证成型后的间隙能够满足机构运动的要求。间隙过大会导致机构运动不稳,应在成型条件允许的前提下,使间隙尽可能小。间隙特征的尺寸精度受到 SLM 成型技术的固有约束限制,包括分层约束、激光深穿透约束和光斑约束。分层约束会在斜面成型时引起阶梯效应,并由于激光深穿透约束使得 SLM 成型悬垂结构时引起“挂渣”现象;光斑约束降低了 SLM 成型小尺寸结构时的成型能力。除此之外,设备的机械精度也对间隙特征尺寸精度有很大影响。由此分析可知,间隙特征尺寸误差为

$$\delta = 2\delta_p + 2\delta_s + \delta_\Delta, \quad (1)$$

式中  $\delta_p$  表示分层约束和激光深穿透约束引起的尺寸误差,  $\delta_s$  表示光斑约束引起的尺寸误差,  $\delta_\Delta$  表示成型设备引起的尺寸误差。

如图 2(a) 所示,零件通过销轴链接,销轴之间采用间隙配合。按照图示成型方向进行成型加工,则深色实线部分都需要添加支撑,并且这些部位均在间隙内部,支撑难以清除。若采用倾斜摆放方式,使得间隙特征与成型水平面的夹角  $\theta$  大于可靠成型角度,如图 2(b) 所示,则间隙内部不存在悬垂面,不需要添加支撑,只需要在间隙端部添加一条线支撑,并且全部位于间隙外部,容易清除。

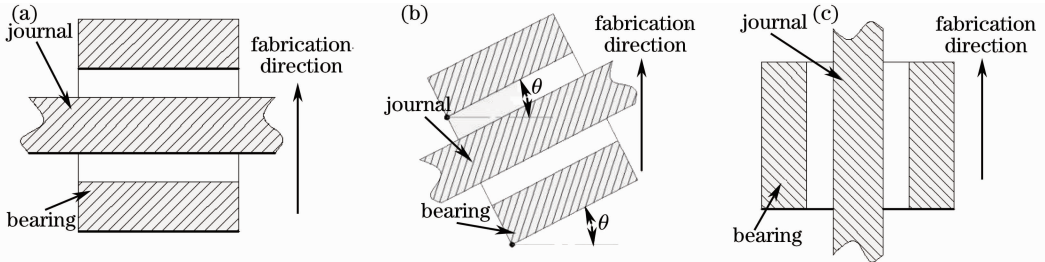


图 2 三种摆放方向。(a) 水平摆放; (b) 倾斜摆放; (c) 竖直摆放

Fig. 2 Three types of display. (a) Horizontal display; (b) tilted display; (c) vertical display

SLM 是基于离散/堆积原理而提出来的,需要将数字化零件模型沿着成型方向分成一定厚度的切片层,然后逐层堆积成实体。当采用倾斜摆放的方式成型免组装机件时,间隙特征的倾斜表面被离散化,这样就使得间隙内部由连续表面变成了切片层的轮廓包围面,如图 3 所示,点划线为间隙设计轮廓,由于阶梯效应,成型后的实际轮廓为锯齿状的深色实线。若成型厚度为  $h$ ,倾斜角度为  $\theta$ ,由其造成的尺寸误差为

$$\delta_p = h \cos \theta, \quad (2)$$

可以看出,阶梯效应造成的尺寸误差主要与成型厚度、倾斜角度相关。当层厚一定时,倾斜角度  $\theta$  越大,间隙尺寸误差越小。理论上  $\theta = 90^\circ$  时,间隙成竖直摆放,此时阶梯效应消失,但是这样会导致另外一个方向需要添加支撑,如图 2(c) 所示<sup>[12]</sup>。

在其他参数一定的情况下,激光光斑大小也对尺寸精度会产生较大的影响。如图 4 所示,当激光

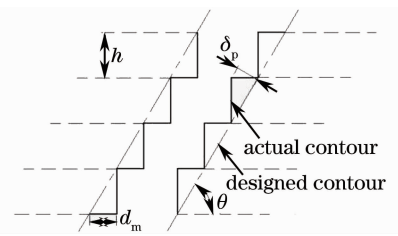


图 3 倾斜摆对放间隙特征成型的影响

Fig. 3 Effect of tilted display on manufacturing of clearance feature

与理论轮廓重合时,由于激光光斑具有一定的大小,则它的实际轮廓比理论轮廓大一个光斑半径。由其造成的尺寸误差为

$$\delta_s = \frac{1}{2} \phi \sin \theta. \quad (3)$$

光斑的实际大小受能量输入的影响,能量输入越大,热影响区域越大,则熔池尺寸也越大,导致尺寸加工误差越大。

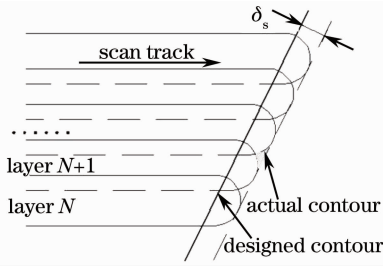


图 4 激光光斑造成的尺寸误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dimension error caused by laser beam

由于扫描振镜枕型畸变和偏转精度的影响,在

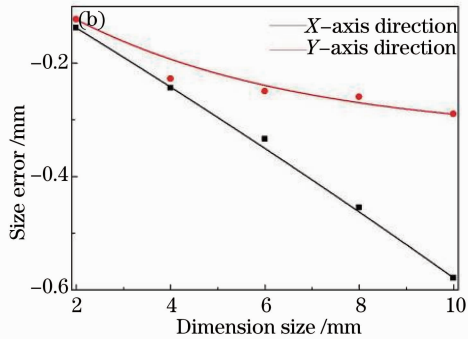
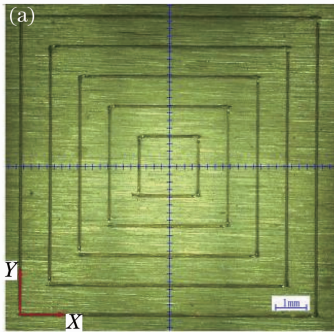


图 5 SLM 成型设备 X/Y 轴方向尺寸精度。(a) 激光扫描方框测量图;(b) 扫描尺寸与尺寸误差的关系

Fig. 5 Dimension accuracy of SLM equipment in X/Y axis. (a) Wire frame scanned by laser beam; (b) relationship between scan size and dimension error

### 3.2 模型验证

为了验证(1)式的合理性,设计并成型了不同角度的悬垂结构试件,如图 6 所示,其中  $H=10\text{ mm}$ ,  $W=2\text{ mm}$ ,  $D=3\text{ mm}$ ,在 X 轴方向的扫描线长度为  $\frac{W}{\sin \theta}$ ,将(2)~(4)式代入(1)式,得到

$$\delta = 2h \cos \theta + \phi \sin \theta - \left( 0.05 \frac{W}{\sin \theta} + 0.02 \right) \sin \theta. \quad (5)$$

铺粉厚度  $h$  取  $35\text{ }\mu\text{m}$ ,模型中有九个不同倾斜角度的独立模型,  $\theta$  分别为  $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、

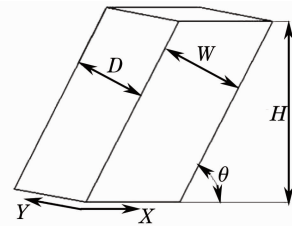


图 6 悬垂结构模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of overhanging structure model  $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $90^\circ$ ,激光功率  $P=150\text{ W}$ ,扫描速度  $v=600\text{ mm/s}$ ,扫描间距  $h_a=0.08\text{ mm}$ ,扫描方式采用 XY 方向层间错开正交扫描策略,样品成型 2 次,

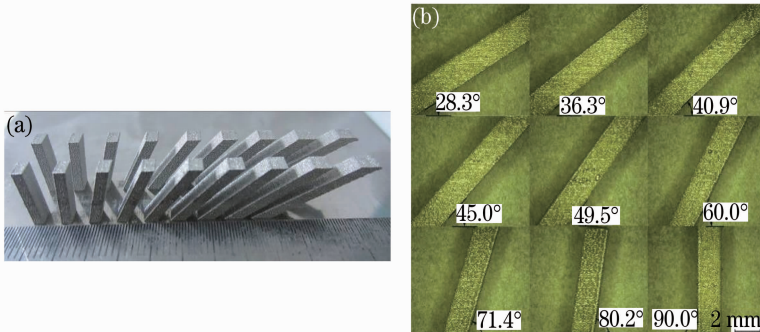


图 7 不同倾斜角度的斜面成型效果图。(a) 实物图;(b) 形貌图

Fig. 7 Manufactured overhanging structures with different tile angles. (a) Original parts; (b) morphology of parts

测量  $W$  的值。

图 7(a)是悬垂结构成型效果图,图 7(b)是悬垂结构形貌图,可以发现在激光功率  $P=150\text{ W}$ ,扫描速度  $v=600\text{ mm/s}$  的情况下,悬垂结构成型后的角度与设计角度误差不大,表明悬垂结构的形状精度较好。

图 8 是  $W$  值实际测量值和模型的曲线图。其趋势是随着倾斜角度增大, $W$  的测量值和理论值均减小。在  $\theta < 40^\circ$  时,测量值比理论值大很多, $\theta \geq 40^\circ$  后,两者趋于相同。原因是激光辐射在粉床上并通过热传导的方式传导到粉床内部,被粉末吸收,形成一定尺寸的熔池。当激光束扫描到悬垂下表面的粉末支撑区时,由于粉末材料的热导率只有相应实体材料的  $1/100$  左右,所以在相同的能量输入的情况下,粉末支撑区比实体支撑区吸收的能量多得多,导致上一已成型层的未熔化粉末也被熔化,粘附在实体上,成为试件的额外部分,此即激光深穿透效应。倾斜角度  $\theta$  越小,粉末支撑区长度  $d_m$  越大,激光深穿透效应越严重,实体的尺寸越大。在  $\theta \geq 40^\circ$  时,随着倾斜角度  $\theta$  增大, $W$  值的实验值与理论值渐趋一致,这是因为悬垂下表面的粉末支撑长度减小,则悬垂下表面上粘附的额外材料变得很少,此时影响  $W$  值的主要因素是光斑尺寸和设备成型误差。

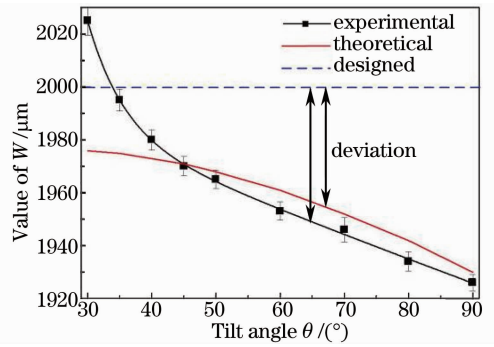


图 8 倾斜角度与  $W$  值的关系

Fig. 8 Relationship between the tilt angle and the value  $W$

### 3.3 间隙成型实验

为研究免组装机结构的倾斜角度对间隙特征成型的影响,设计并成型了不同角度的间隙模型,如图 9 所示,其中  $c=0.2\text{ mm}$ 。每组模型中有五个不同倾斜角度的独立模型, $\theta$  分别取  $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ ;为了研究不同成型厚度的影响, $h$  取  $25\text{ }\mu\text{m}$  和  $35\text{ }\mu\text{m}$ ;为了研究能量输入  $P/v$  的影响,将激光功率  $P$  设定为  $150\text{ W}$ ,扫描速度分别取  $400$ 、 $600$  和  $800\text{ mm/s}$ ,扫描间距  $h_a=0.08\text{ mm}$ ,扫描方式采用  $XY$  方向层间错开正交扫描策略。成型后的试件与设计模型进行对比,测量间隙特征  $c$  的实际值。

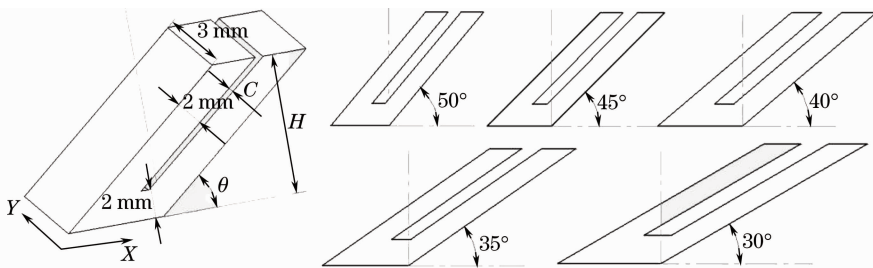


图 9 间隙特征模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of clearance feature model

图 10 是扫描速度  $v=400\text{ mm/s}$  时  $h=25\text{ }\mu\text{m}$  和  $35\text{ }\mu\text{m}$  的成型效果图,比较两图可知; $\theta=30^\circ$  时,前者出现严重翘曲变形,而后者则没有; $\theta=35^\circ \sim 50^\circ$  时,前者的间隙特征尺寸较大,粉末粘附较少,间隙结构特征明显,后者的间隙特征不仅尺寸小,而且粉末粘附现象非常严重,间隙几乎分不清楚,机构的可动性降低,原因是:激光照射在粉床上,一部分能量被吸收而熔化材料,另外一部分则主要通过热传导的形式传导到下面已成型层中,当粉末厚度较小时,被材料吸收的能量较少,较多的能量传导到下面已成型层,因此零件内部会累积较大的热应力,导致在成型过程中发生翘曲变形,并逐层累积,最终破坏

了间隙特征。当粉末厚度较大时,只有较少的能量传导到下面已成型层,大部分能量被粉末吸收,形成较大的熔池,熔池因重力和毛细管力的作用沉陷到粉末中,形成了较多的悬垂物。

图 11 反映出在特定的层厚和能量输入时,不同倾斜角度的间隙特征的成型能力。(a)和(b)分别对应成型厚度  $h=25\text{ }\mu\text{m}$  和  $h=35\text{ }\mu\text{m}$  时的间隙特征大小曲线图,曲线 I、II 和 III 分别对应扫描速度  $400$ 、 $600$  和  $800\text{ mm/s}$ 。图 11(a)中曲线 I 的虚线表示倾斜角度  $\theta=30^\circ$  时间隙特征发生翘曲变形,间隙大小已经超过了设计值。图 11(b)中曲线 I 的虚线表示倾斜角度  $\theta=30^\circ$  时间隙特征不明显,间隙尺寸

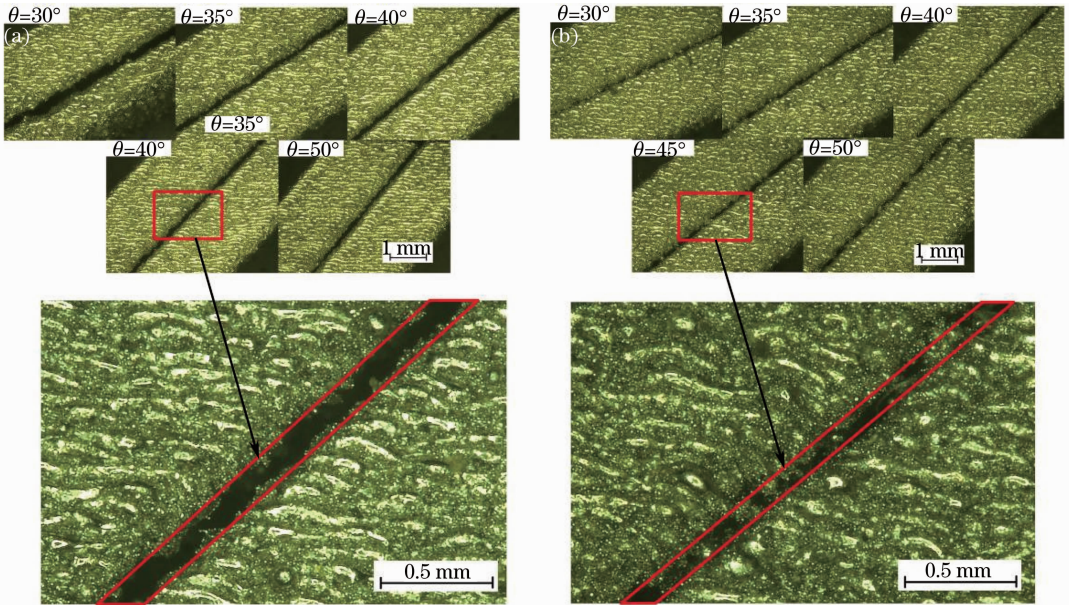


图 10 不同倾斜角度的间隙特征成型图。(a)层厚  $25\mu\text{m}$ ;(b)层厚  $35\mu\text{m}$

Fig. 10 Manufactured clearance features with different tilt angles. (a) Layer thickness of  $25\mu\text{m}$ ;  
(b) layer thickness of  $35\mu\text{m}$

几乎为零。

排除  $\theta=30^\circ$  时成型失败的情况,图 11(a) 中三条曲线对应的间隙尺寸为  $55\sim 85$ 、 $100\sim 130$  和  $115\sim 140\mu\text{m}$  之间,图 11(b) 中三条曲线的间隙尺寸为  $30\sim 70$ 、 $90\sim 105$  和  $105\sim 130\mu\text{m}$  之间。由此可知,在相同的能量输入时,随着倾斜角度  $\theta$  增大,间隙特征也随之增大,与倾斜角度  $\theta$  越大,间隙尺寸误差越小的趋势相一致。比较曲线 I、II 和 III,可以发

现,对于特定的倾斜角度,曲线 I 与曲线 II 之间相差  $50\sim 60\mu\text{m}$ ,而曲线 II 与曲线 III 之间仅相差  $20\sim 30\mu\text{m}$ 。分析认为,曲线 I 对应的能量输入分别是曲线 II 和 III 对应的 1.5 倍和 2 倍,能量输入越大,激光光束穿透的金属粉末层的深度也越大,这样就会使得上一已成型层的部分未熔化粉末被熔化,形成悬垂物,这部分材料成为间隙特征的额外部分,减小了间隙特征。

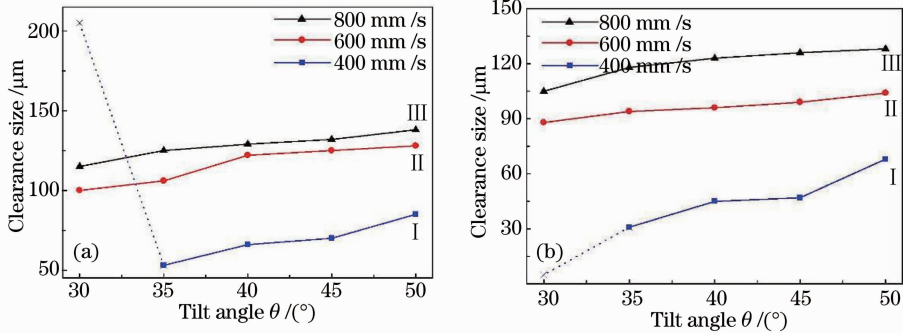


图 11 倾斜角度与间隙特征大小的关系。(a)层厚  $25\mu\text{m}$ ;(b)层厚  $35\mu\text{m}$

Fig. 11 Relationship between tilt angle and size of clearance feature. (a) Layer thickness is  $25\mu\text{m}$ ;  
(b) layer thickness is  $35\mu\text{m}$

### 3.4 小间隙折叠算盘成型实验

为验证免组装机构间隙特征成型工艺,设计并 SLM 直接成型了折叠算盘。由图 10 和 11 可知,在倾斜角度为  $45^\circ$ 、扫描速度为  $800\text{mm/s}$  时,层厚为  $25\mu\text{m}$  时的间隙尺寸为  $140\mu\text{m}$ ,而层厚为  $35\mu\text{m}$  时只有  $120\mu\text{m}$ ,说明相同的工艺条件下,采用较小的

铺粉层厚获得的间隙特征具有较大的尺寸和较好的下表面质量,但是过小的层厚导致成型效率降低。较大的铺粉层厚虽然使得间隙尺寸有一定的减小,但是可以提高成型效率。根据实际情况,成型工艺参数设置如表 2 所示。

表 2 成型工艺参数

Table 2 Process parameters of manufacturing

Laser power /W	Scanning speed /(mm/s)	Layer thickness /mm	Scan interval /mm	Scanning strategy
150	800	0.035	0.08	X-Y inter-layer stagger

图 12(a) 所示为折叠算盘的 CAD 模型,由框架、梁、珠档和珠子组成,珠档和珠子的间隙为 0.4 mm,框架与珠档的间隙为 0.2 mm,如图 12(b)和(d)所示。相对于水平摆放方式,采用 45°的摆放方式时的成型方向的高度增大到 37 mm,成型时间

大大增加。但是使得每一颗珠子只有两处支撑,分别支撑着珠子悬垂面、珠子和珠档之间的端头部分,如图 12(c)所示。支撑结构为线支撑,强度小,并且位于间隙外部,容易去除。

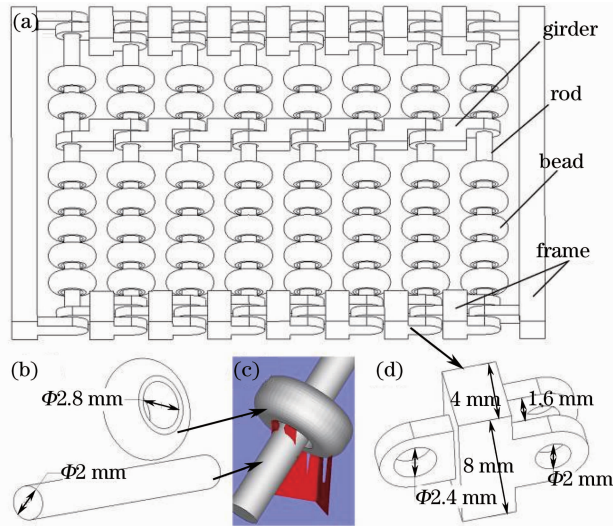


图 12 折叠算盘。(a) CAD 模型;(b) 珠子和珠档 CAD 模型;(c) 珠子支撑;(d) 框架 CAD 模型

Fig. 12 Collapsible abacus. (a) CAD model; (b) CAD model of bead and pole; (c) bead and pole with support; (d) CAD model of frame

图 13 为 SLM 直接成型的折叠算盘成型实物图。由于所有支撑均为线支撑,只需要采用工具强制将其去除。然后反复运动使间隙内部残留的粉末

脱落,保证框架可以折叠,每颗珠子可以运动。再采用砂纸打磨,喷砂等表面处理,最终得到的折叠算盘如图 13(b)和(c)所示。

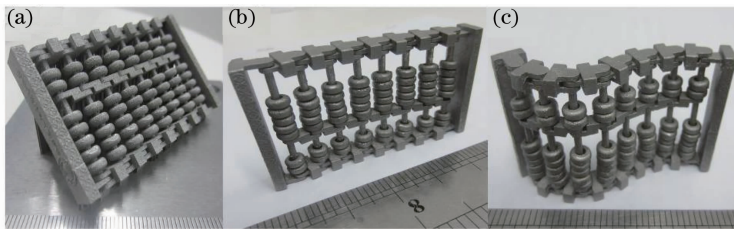


图 13 SLM 直接成型折叠算盘

Fig. 13 Collapsible abacus directly manufactured by SLM

## 4 结 论

1) SLM 成型免组装机构的难点是间隙特征的成型,间隙特征受分层、激光深穿透和光斑约束的影响。建立了 SLM 成型间隙特征尺寸误差数学模型,在倾斜角度大于 40°时,通过增大倾斜角度、减小成型厚度或者能量输入,可以增大间隙尺寸,实验

结果与该数学模型相符合。

2) 通过倾斜摆放的方式避免间隙内部添加支撑。激光功率为 150 W,扫描速度为 800 mm/s,层厚为 25  $\mu\text{m}$  和 35  $\mu\text{m}$  的间隙特征成型质量较好。

3) 在保证顺利成型能量输入范围内,采用较小的铺粉层厚成型的间隙特征具有较大的尺寸和较好

的下表面质量。但是过小的层厚导致成型效率急剧降低;而较大的铺粉层厚虽然使得间隙尺寸有一定的减小,但是可以极大提高成型效率。要根据实际工况,选择合理的成型厚度。

### 参 考 文 献

- 1 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): 229–234.  
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): 229–234.
- 2 Wu Weihui, Yang Yongqiang. Key technology 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 Yang Yongqiang, He Xingrong, Wu Weihui. Direct manufacturing of customized orthopedics surgery orienting model by selective laser melting [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(9): 2460–2464.  
杨永强, 何兴容, 吴伟辉. 选区激光熔化直接成型个性化骨科手术模板[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2460–2464.
- 4 Wang Di, Yang Yongqiang, Ye Ziheng, *et al.*. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 65: 1471–1484.
- 5 Liu Jie, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Computer-aided optimization of the process parameters for fabricating overhanging structure by selective laser melting [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0503001.  
刘杰, 杨永强, 王迪, 等. 选区激光熔化成型悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0503001.
- 6 C Mavroidis, K J De Laurentis, J Won. Fabrication of non-assembly mechanisms and robotic systems using rapid prototyping [J]. *J Mech Des*, 2001, 123(4): 516–524.
- 7 K J De Laurentis, C Mavroidis. Rapid fabrication of a non-assembly robotic hand with embedded components [J]. *Assembly Automation*, 2004, 24(4): 394–405.
- 8 J Cali, D A Calian, C Amati, *et al.*. 3D-printing of non-assembly, articulated models [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 1–8.
- 9 Xubin Su, Yongqiang Yang, Dongming Xiao, *et al.*. Processability investigation of non-assembly mechanisms for powder bed fusion process [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 64: 1193–1200.
- 10 H Lipson, F Moon, J Hai, *et al.*. 3-D printing the history of mechanisms [J]. *J Mech Des*, 2005, 127(5): 1029–1033.
- 11 Y Chen, J Lu. Minimise joint clearance in rapid fabrication of non-assembly mechanisms [J]. *Int J Computer Integrated Manufacturing*, 2011, 24(8): 726–734.
- 12 Su Xubin, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Study on progress of non-assembly mechanisms directly fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603021.  
苏旭彬, 杨永强, 王迪, 等. 免组装机件的选区激光熔化直接成型工艺研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603021.

栏目编辑:何卓铭