

免装配机构的选区激光熔化直接成型工艺研究

苏旭彬¹ 杨永强¹ 王迪¹ 陈永华²

(¹华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; ²香港大学机械工程系, 中国 香港)

摘要 为了自由设计并快速制造出机构,引入了免装配机构的概念,即采用数字化设计和装配并采用选区激光熔化(SLM)一次性直接成型、无需实际装配工序的机构。分析了机构直接成型的难点和不同摆放方式对间隙内部支撑的影响;并分析了倾斜摆放方式对间隙成型质量的影响。采用不同的扫描速度加工出不同倾斜角度的样块,测试其极限成型角;设计最小间隙为 0.2 mm 的曲柄滑块机构并采用水平摆放方式和倾斜摆放方式分别直接成型,验证了机械机构的 SLM 直接成型方法的可行性。结果表明,在 150 W 激光功率、600 mm/s 扫描速度、0.035 mm 铺粉厚度、0.12 mm 扫描间距的工艺参数下,所直接成型的曲柄滑块机构可以实现预设计的动作。机械机构的直接快速成型方法使机构的形状和结构更加多样化,且无需装配工序,实现了机构的快速制造。

关键词 激光技术; 直接成型; 倾斜摆放方式; 免装配机构; 选区激光熔化

中图分类号 TN249; TH162 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603021

Study on Process of Non-Assembly Mechanisms Directly Fabricated by Selective Laser Melting

Su Xubin¹ Yang Yongqiang¹ Wang Di¹ Chen Yonghua²

¹ School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China
² Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

Abstract To obtain more design freedom and realize fast fabrication of mechanisms, a concept of non-assembly mechanism is introduced, which is digitally assembled and later directly fabricated using selective laser melting (SLM) technology. The effect of display on the number of support within the clearance is analyzed when the key points of directly fabrication of metal mechanism are obtained; then the effect of titling display on fabrication quality of clearance is studied. Some specimens with different angles are fabricated under different scanning speeds in order to obtain the critical fabrication angle; for experimental verification, a slider-crank mechanism with a minimum clearance of 0.2 mm is designed and two ones are fabricated by SLM using horizontal display and tilting display respectively under the process parameters of laser power of 150 W, scanning speed of 600 mm/s, powder thickness of 0.035 mm and track space of 0.12mm. Result shows that the slider-crank mechanism can be successfully fabricated by SLM. The methodology of directly fabrication of non-assembly mechanism will allow more design freedom and fast fabrication of mechanisms.

Key words laser technique; direct fabrication; titling display; non-assembly mechanism; selective laser melting

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

机构是机械设备的核心部件之一。在传统的加工理念中,是先单独制造出零件,再将零件装配成机构,工序相对繁琐。由于必须考虑装配工序,在机构

设计时不得不考虑装配手段和装配空间,这在一定程度上限制了机构的形状和结构。因此,有必要寻求一种既可以自由设计,又能够快速制造机构的方法。

快速成型(RP)是一种利用基于离散/堆积原理

收稿日期:2011-03-21; 收到修改稿日期:2011-04-15

作者简介:苏旭彬(1981-),男,博士研究生,主要从事激光加工及快速成型等方面的研究。

E-mail: scutsxb@yahoo.com.cn

导师简介:杨永强(1961-),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工等方面的研究。E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn (通信联系人)。

的先进制造技术,不受零件几何形状的限制^[1]。这意味着如果将机构当作一个零件,利用快速成型方法有可能一次性将机构制造出来。有学者已经对此做了探索,但报道有限。Mavroidis 等^[2]采用光固化(SLA)设备和选区激光烧结(SLS)设备成型出 0.5 mm 间隙的旋转关节和球关节以及 0.3 mm 间隙的线性关节;Lipson 等^[3]采用三维打印方法研究了机构的原型制作;Rajagopalan 等^[4]利用机构原型对机构运动过程可能出现的运动误差进行评估;Chen 等^[5]则提出了鼓形销等改进的间隙形状,最终提高了机构的可加工性。这些研究大多是针对机构原型的建立,采用的原材料都是非金属,尚未有采用金属原材料的报道。

选区激光熔化(SLM)是快速成型的主要发展方向之一^[6]。近年来,国内外研究团队对 SLM 的材料、工艺和应用做了很多研究并取得很大进展。如 Yadroitsev 等^[7]通过实验获得壁厚 140 μm 的薄壁件;Wu 等^[8]直接成型出高致密度的铜基合金成型件;Childs 等^[9]则通过实验与模拟的结合研究了能量输入与熔道之间的关系;Wang 等^[10]采用光纤激光器,通过正交实验优化了 316L 不锈钢的成型工艺并获得高致密度零件。国外的 EOS 等公司采用 SLM 直接成型出冷却镶嵌件、个性化牙冠、齿轮等零件^[11]。国内的华南理工大学直接成型出手术模板并成功应用于临床^[12]。在诸多应用中,SLM 是用于单零件的直接成型。SLM 采用的原材料都为金属,通过快速熔凝产生冶金结合,成型件具有良好的力学性能。若采用 SLM 直接成型机构,则有可能直接应用于实际场合,不再停留于原型制作,具有重大意义。本文分析 SLM 直接成型机械机构的难点,采用理论分析和实验验证相结合的方法,以求实现机械机构的直接快速制造。

2 免装配机构的定义和直接成型方法

机构一般是由两个或两个以上的零件组合而成,也即只有通过两个或两个以上的零件的装配才可能构成一个机构。因此,SLM 一次性直接成型的机构并不代表不存在零件之间的装配关系,相对于传统理念,新方法是将机构的装配操作在数字化环境中完成。为了区别于传统机构,将采用数字化设计和装配并直接制造成型,无需实际装配工序的机构称为免装配机构。如图 1 所示,免装配机构的 SLM 直接成型方法的主要步骤如下:

1) 建立机构中各零件的三维模型,并将各零件模型进行数字化装配,得到机械机构的三维模型;

2) 将机械机构的三维模型作为一个零件进行数据处理,如格式转换、切片、扫描路径规划等;

3) 将数据导入 SLM 成型设备直接成型,最终得到机构。

相对于传统的机构,SLM 直接成型的免装配机构无需后续的装配工序,机构设计时不必考虑装配手段和装配空间,机构的外形和结构也可以更加自由化。

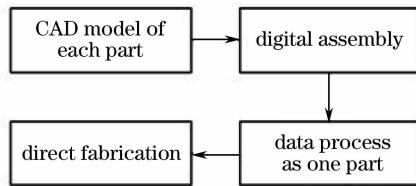


图 1 免装配机构的直接成型流程
Fig. 1 Procedure of direct fabrication of non-assembly mechanisms

3 理论分析

3.1 免装配机构的 SLM 直接成型难点

尽管机构的 SLM 直接成型流程与单零件类似,但是机构中存在间隙,需要保证成型后的间隙能满足机构的运动要求,这使得机构的成型策略与单零件不一样。在 SLM 成型中,由于激光的深穿透作用,成型件的下表面与成型水平面夹角小于某个角度时,必须添加支撑以防止悬垂物、翘曲等缺陷的产生^[13]。这个角度即为极限成型角;这种需要添加支撑的表面即为悬垂面。支撑通常在成型结束后再采取一些措施进行清除。

如图 2 所示,机构由两个零件装配而成,零件间存在间隙;机构沿着图示方向进行成型。设极限成型角为 θ_c ,在图示中深色圆弧线段的切线与成型水平面的夹角均小于 θ_c ,因此也需要添加支撑。在机构成型结束后,机构间隙外部的支撑比较容易清除;但对于间隙内部的支撑,由于一般情况下机构的间隙都比较小,没有足够的工具操作空间,因此难以清除;另一方面,与非金属免装配机构不同,SLM 成型

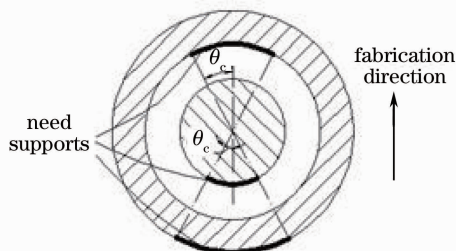


图 2 间隙中需要添加支撑的悬垂面
Fig. 2 Support needed surface within the clearance

的支撑原材料与成型件一样都是金属,难以采用特殊的后处理工艺清除[如熔融挤出成型(FDM)可以利用支撑与成型件的熔点温度差使支撑熔化]。因此,避免机构间隙内部添加支撑或者尽量减少支撑数量是SLM直接成型机构很关键的技巧之一。

3.2 摆放方式对间隙成型的影响

既然支撑是由于悬垂面的存在而不得不添加的,那么如果能够使间隙内部的表面与成型水平面的夹角大于极限成型角,则可以消除悬垂面,从而避免添加支撑。要改变成型角度,最直接的方法就是改变机构的摆放方式。从间隙内部表面的成型角度出发,有水平、倾斜和垂直3种摆放方式。

如图3(a)所示,机构采用水平摆放方式,间隙内部表面的成型角度为 0° ,间隙内部的下表面均为悬垂面,需要添加大量支撑。在成型结束后,位于间隙两端头的支撑可能可以清除,但是当间隙较小并且机构的配合段较长时,位于间隙中间的支撑是很难清除的。如图3(b)所示,机构采用倾斜摆放方式,间隙内部表面的成型角度为 θ 。此时,如果极限成型角小于 θ 。那么间隙内部不存在悬垂面,无需添加支撑;在这种情况下,需要添加支撑的间隙表面仅是位于间隙端头的一段线段(图中以深色黑点表示),支撑结构可以是线结构,并且全部位于间隙外部,方便清除。

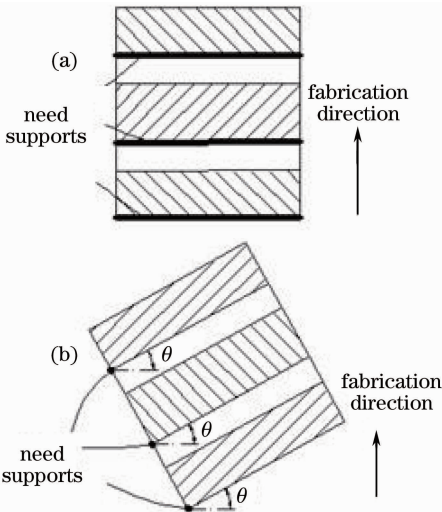


图3 两种摆放方式。(a)水平摆放,(b)倾斜摆放
Fig. 3 Two types of displays. (a) horizontal display, (b) tilted display

与其他RP方法一样,SLM是基于离散/堆积原理,采用逐层叠加的方式对零件进行加工的,这一过程中,需要先沿着叠加方向将零件的数字化模型进行分层。分层后,零件模型被分割成有限个厚度

一定的切片层,模型的连续表面也被离散化。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的,当外表面为倾斜面时,即会出现台阶效应^[14]。

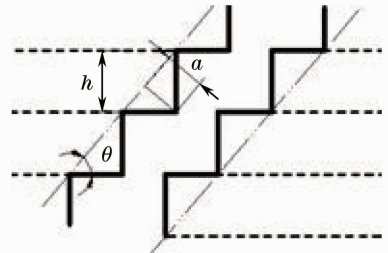


图4 倾斜摆放方式对间隙成型质量的影响
Fig. 4 Effect of tilted display on fabrication quality of clearance

倾斜摆放方式虽然减少了间隙内部的支撑数量,同时也使间隙内部表面产生台阶效应。如图4所示,点划线为间隙内部表面的理论轮廓,由于台阶效应,成型后的实际轮廓变为图中的锯齿状的深色实线。若令切片厚度为 h ,则实际轮廓与理论轮廓的最大绝对误差为

$$a = h \cos \theta, \quad (1)$$

由(1)式可以看出,间隙误差在 $\pm h \cos \theta$ 之间波动。另一方面,表面面积的增加以及锯齿的出现,导致间隙内部表面的摩擦系数变大。鉴于锯齿在机构运动过程中易于磨损,因此在保证可成型的基础上,应使间隙误差为正误差。由(1)式可知,随着摆放角度的增大,摆放方式对间隙成型质量的影响会减小;当 $\theta=90^\circ$ 时,台阶效应消失,机构采用垂直摆放方式成型。理论上讲,垂直摆放方式可以从根本上消除间隙内部的悬垂面,使间隙内部表面不存在台阶效应。但是,机构中经常存在多个间隙,如图5所示的最常见的销和孔装配的机构。从间隙A出发,机构是垂直摆放,该间隙不存在悬垂面,无需添加支撑;但此时,从间隙B出发,机构却是水平摆放,当间隙B较小

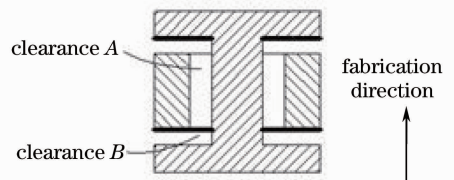


图5 水平或垂直摆放方式难以减少多个间隙内部的支撑
Fig. 5 Horizontal or vertical display can't reduce the number of support within several clearances

并且该处配合面积比较大时,需要添加大量支撑,内部支撑是难以清除的。这种情况下仍然需要采用倾斜摆放方式,并且当极限成型角 θ_c 小于 45° 时,倾斜摆放方式可以同时避免间隙A和间隙B内部需要添加大量支撑的问题。从图例可以看出,机构与单零件的成型有很大区别。虽然尽量减少悬垂面面积,避免支撑添加都是机构和单零件成型时摆放方式的选择依据,但是单零件成型时仅是从成型质量出发,而机构件成型时除了从成型质量出发,还必须慎重考虑可成型性,甚至有时不得不采取非最优成型质量的摆放方式,毕竟首先需要保证能够成功成型才能进而解决成型质量问题。值得注意的是,当机构存在多个间隙并且间隙之间的空间位置关系比较复杂时,是很难同时减少每个间隙内部的支撑的。通常,在计算机辅助设计(CAD)造型软件或Magics软件中为机构设计支撑时,通过改变零件的相对装配位置或者调整机构与成型平台的倾斜角度,尽可能地使更多间隙的成型角度大于极限成型角,避免添加支撑。对于无法通过成型角度的改变而减少支撑的间隙,则有必要考虑改进机构设计或者在机构成型后采用强制手段破坏支撑。

4 加工实验

采用华南理工大学自主研发的第二代SLM设备Dimetal280进行加工实验。设备激光器为光纤激光器,聚焦光斑为 $30\sim 50\ \mu\text{m}$;所用原材料为316L不锈钢球形粉末,平均粒径约 $17\ \mu\text{m}$,最大粒径约 $35\ \mu\text{m}$;采用氮气作为保护气体,氧的体积分数控制在 0.02% 以下;实验采用Q235作为基板。

4.1 极限成型角测试

在上述理论分析中可以看出,极限成型角是判别悬垂面的重要依据。采用图6所示的具有不同倾斜角度的方块($5\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$)测试极限成型角, θ 分别为 $50^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ$ 和 25° ;从原理上分析,极限成型角是基于激光深穿透造成的,与激光的输入能量有关,因此采用200, 600, 1000 mm/s的扫描速度分别成型不同倾斜角度的方块,利用不同的扫描速度来改变激光的输入能量。其他的工艺参数为:激光功率150 W,扫描间距0.12 mm,铺粉层厚0.035 mm;扫描策略为层间交错扫描。

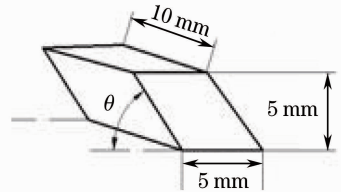


图6 成型角实验模型示意图

Fig. 6 Schematic of fabrication angle model

图7为成型完成后方块的由上往下的俯视图,图7对应的扫描速度依次为200, 600, 1000 mm/s,各图从左到右的倾斜角度依次为 $50^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$ 。观察成型表面,图7(a)的各个方块表面都不是很平整,并且在方块的上端尖角处出现翘曲,翘曲程度随着倾斜角度的变小而逐渐变严重;图7(b)中倾斜角度为 $50^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ$ 的4个方块的表面相对平整,倾斜角度为 30° 和 25° 的2个方块的表面在靠近上端交角的位置变得不平整,并且略有翘曲;图7(c)的表面质量与图7(b)类似,但是从表面可以

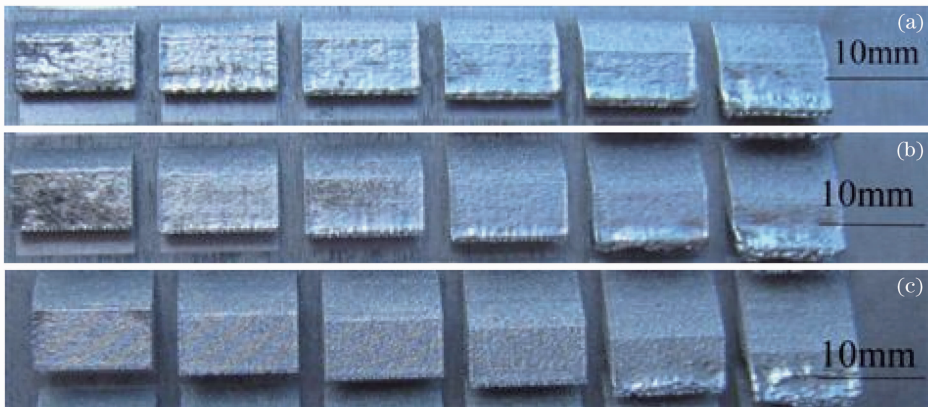


图7 极限成型角实验。扫描速度:(a)200 mm/s,(b)600 mm/s,(c)1000 mm/s(成型角度从左到右依次为: $50^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$)

Fig. 7 Experiment on critical fabrication angle. Scanning speed: (a) 200 mm/s, (b) 600 mm/s, (c) 1000 mm/s (the fabrication angle from left to right: $50^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 35^\circ, 30^\circ, 25^\circ$)

看出,粉末的熔化程度不是很好。从观察结果分析,在总体上,倾斜角度越小,成型质量则越差;在相同倾斜角度情况下,相对于 600 mm/s 的扫描速度,200 mm/s 扫描速度时的成型质量要差一些,这说明随着激光能量的增大,激光深穿透现象更严重,极限成型角也变大;而 1000 mm/s 的扫描速度时,激光能量过小。

图 8 为 600 mm/s 扫描速度时倾斜角度为 25° 方块的侧视图。可以看出,倾斜下表面基本能够成型出来。但是结合图 7(b) 的表面质量进行分析,尽管此倾斜角度下的下表面基本能够成型,方块上端尖角处的表面质量并不是很好,因此实际的极限成型角应该在 25°~30° 之间。需要特别说明的是,决定极限成型角的因素有很多,除了激光能量输入大小,还有粉末特性、铺粉厚度等影响,并且在成型接近极限成型角的结构中,某种工况条件的瞬时变化都可能导致缺陷的产生。因此极限成型角只能作为选择机构倾斜摆放角度的参考,当倾斜角度接近极限成型角时,依然视为悬垂面,才能确保成型可靠性。



图 8 扫描速度 600 mm/s 时的极限成型角
Fig. 8 Critical fabrication angle under 600 mm/s scanning speed

4.2 样品加工实验

曲柄滑块机构是最常见也是最基本的机构形式之一,由基座、曲柄、连杆和滑块装配而成。图 9 是样品的数字化模型,最小间隙 0.2 mm,曲柄可沿着图示箭头作 360° 圆周运动,通过连杆带动滑块在基座的滑轨中作直线运动;为了减小滑块与导轨的配合面积,将滑块设计成环形,其相当于轴承的作用,将滑块与导轨侧面之间的滑动摩擦转化为滚动摩擦。

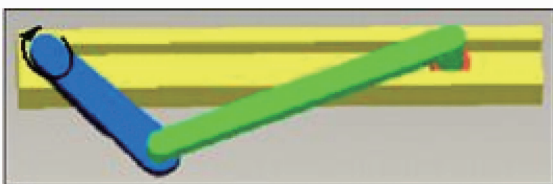


图 9 曲柄滑块机构的数字化模型
Fig. 9 Digital model of slider-crank mechanism

表 1 加工参数和扫描策略

Table 1 Process parameters and scanning strategy

Laser power /W	150
Scanning speed /(mm/s)	600
Track space /mm	0.12
Powder thickness /mm	0.035
Scanning strategy	X-Y inter-layer stagger

加工参数和扫描策略如表 1 所示。分析机构的间隙,曲柄与基座、曲柄与连杆、连杆与滑块这 3 个连接处的旋转副存在间隙;曲柄与基座、曲柄与连杆、连杆与滑块、滑块与基座的上下面之间也存在间隙,并且与旋转副的间隙相互垂直;这种情况与图 5 所示的间隙情况类似,根据理论的分析,应该采用倾斜摆放方式为宜。为了探讨免装配机构与单零件的直接成型之间的不同,采用水平摆放方式和倾斜摆放方式分别进行加工。

图 10 为水平摆放方式成型的机构的两个视图,机构基座的下表面与基板平行。从图中可以看出,机构的表面成型质量良好。如果该成型件是单零件的话,这样的结果应该是满意的。但是对于机构,还需要保证机构的运动功能。采用线切割将机构隔离基板,清除外表面的支撑;在清除间隙内部支撑时,发现曲柄与基座、连杆与滑块以及滑块与基座的上下面之间的间隙处有大量支撑,难以清除,并且由于激光深穿透作用,平行于成型平面的间隙中的粉末受热粘结于间隙内部表面,最终机构无法运动。

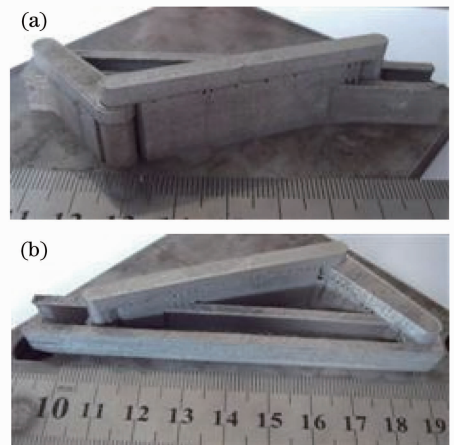


图 10 水平摆放方式成型的机构。(a) 视图 1, (b) 视图 2
Fig. 10 Fabricated mechanism using horizontal display

(a) view 1, (b) view 2

图 11 为倾斜摆放方式下成型的机构。如图 11(a) 所示,在摆放时,使机构基座 ABCD 的短边 AB 与基板夹角为 25°,长边 AD 与基板的夹角为 30°,并在基座下表面最先成型的长边处添加一薄壁线支

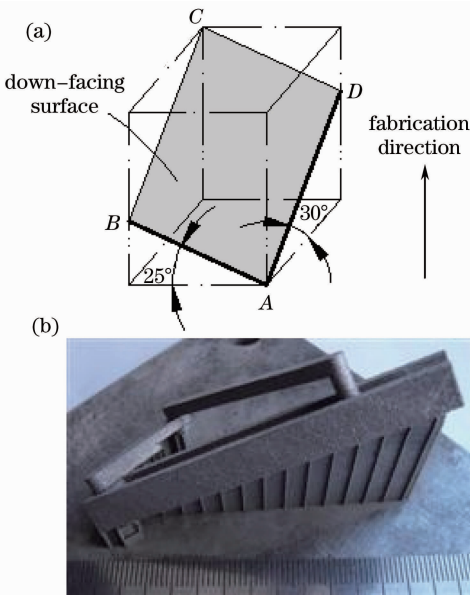


图 11 倾斜摆放方式的机构。(a)支撑添加分析示意图，(b)成型的机构

Fig. 11 Mechanism using titling display. (a) schematic for analysis of support addition, (b) fabricated mechanism

撑。分析机构的结构，主要间隙有两种：1) 平行于底面 $ABCD$ 的间隙，即杆与杆之间的间隙，2) 垂直于底面 $ABCD$ 的间隙，即各旋转副的间隙。在这样的成型角度下，机构各个间隙处的支撑添加与底面短边 AB 相似，仅为一小段的线支撑。成型后的机构如图 11(b) 所示。将机构切离基板后，只需使机构沿着预设计的运动轨迹进行强制性地运动即可使支撑断裂进而清除掉。需要特别说明的是，由于成型过程中间隙内部粉末受到热影响，会粘结成团甚至粘附于间隙表面，因此在成型结束后需要通过机构的运动使间隙中的粉末脱落，并采用高压气体清理。最终得到的曲柄滑块机构如图 12 所示，动作位置 1 到 4 依次是曲柄与基座夹角为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和

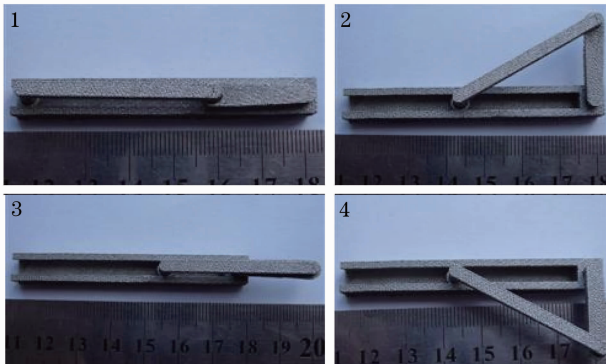


图 12 SLM 直接制造的曲柄滑块机构

Fig. 12 Slider-crank mechanism fabricated by SLM

270° 时的位置。机构可以完成预设计的动作。采用水平摆放方式时，各个旋转副的间隙垂直于成型平面，不受台阶效应影响。在更改为倾斜摆放方式后，受台阶效应影响，各个间隙的表面的相对摩擦系数增大。观察机构的表面成型质量，倾斜摆放方式成型的机构的表面也不如水平摆放方式成型的机构的上表面，但是倾斜摆放方式成型的机构却可以实现运动功能。这也反映了直接成型机构和单零件之间的区别，即机构的直接成型不仅要考虑表面成型质量，还要考虑到机构的可运动性。

5 结 论

1) 在 150 W 激光功率、600 mm/s 扫描速度、0.035 mm 铺粉厚度、0.12 mm 扫描间距的工艺参数下，SLM 的极限成型角在 $25^\circ \sim 30^\circ$ 之间。

2) SLM 直接成型免装配机构的关键技术是避免机构间隙内部添加支撑或者尽量减少支撑数量；在上述工艺参数下，采用倾斜摆放方式并使机构间隙的成型角度大于 30° 可以减少间隙内部的支撑数量。

3) 采用上述工艺参数，SLM 可以直接成型出间隙为 0.2 mm 的免装配机构，机构能够实现预设计的运动功能。

参 考 文 献

- 1 E. Pessard, P. Mognol, J. Y. Hascoet *et al.*. Complex cast parts with rapid tooling: rapid manufacturing point of view[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2008, **39**(9-10): 898~904
- 2 C. Mavroidis, K. DeLaurentis, J. Won. Fabrication of non-assembly mechanisms and robotic systems using rapid prototyping [J]. *J. Mech. Des.*, 2001, **123**(4): 516~524
- 3 H. Lipson, F. Moon, J. Hai *et al.*. 3-D printing the history of mechanisms[J]. *J. Mech. Des.*, 2005, **127**(5): 1029~1033
- 4 S. Rajagopalan, M. Cutkosky. Error analysis for the in-situ fabrication of mechanisms[J]. *J. Mech. Des.*, 2003, **125**(4): 809~822
- 5 Y. Chen, Z. Chen. Major factors in rapid prototyping of mechanisms[J]. *J. Key Engng. Mater.*, 2010, **443**(6): 516~521
- 6 J. Krutha, L. Froyenb, J. Vaerenbergha *et al.*. Selective laser melting of iron-based powder [J]. *J. Mater. Processing Technol.*, 2004, **149**(1-3): 616~622
- 7 I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8064~8069
- 8 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
- 9 T. Childs, C. Hauser, M. Badrossamay. Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: experiments and modeling [J]. *J. Engng. Manuf.*, 2005, **219**(4): 339~357
- 10 Wang Di, Yang Yongqiang, Wu Weihui. Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting[J]. *Chinese*

- J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3233~3239
- 王 迪, 杨永强, 吴伟辉. 光纤激光选区激光熔化 316L 不锈钢工艺优化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3233~3239
- 11 E-Manufacturing Solutions. E-Manufacturing Applications[OL]. [2011-04-21]. <http://www.eos.info/en/applications.html>
- 12 He Xingrong, Yang Yongqiang, Wu Weihui *et al.*. Research on direct forming of comminuted fracture surgery orienting model by selective laser melting [J]. *J. Biomedical Engineering*, 2010, **27**(3): 519~523
- 何兴容, 杨永强, 吴伟辉 等. 粉碎性骨折个体化手术模板的选区激光熔化直接成型研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2010, **27**(3): 519~523
- 13 E. Yasa, T. Craeghs, M. Badrossamay *et al.*. Rapid manufacturing research at the catholic university of leuven[C]. Istanbul: US Turkey Workshop on Rapid Technologies, 2009
- 14 D. Olaf, S. Sarat, R. Stephen *et al.*. Tools for sustainable product design: additive manufacturing [J]. *J. Sust. Dev.*, 2010, **3**(3): 68~75