

激光选区熔化成型免组装机机构间隙设计及工艺优化

王 迪 刘睿诚 杨永强*

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要 为了改善激光选区熔化成型免组装机机构间隙结合处的成型质量,制造出具有高表面质量和高致密度的免组装机机构,对间隙倾斜面的表面粗糙度进行了理论研究,并对间隙特征进行了设计,分析了激光表面重熔和工艺参数对间隙成型质量的影响。结果表明:间隙倾斜面的表面粗糙度(R_a)理论上由倾斜角和切片厚度两个因素决定, R_a 随着倾斜角的增大和切片厚度的减小而减小。采用鼓形孔的间隙特征可以使粉末更容易去除并提高机构的稳定性;采用激光表面重熔工艺,不仅可以提高机构的致密度,也可以改善表面粗糙度。加工过程中,保持激光体能量密度在顺利成型的区域,加工到间隙顶部时,加快扫描速度,能够减少间隙处的挂渣,提高表面质量。采用以上优化条件可以顺利加工出万向节机构,其中外表面 $R_a=8.25 \mu\text{m}$,间隙表面 $R_a=12.47 \mu\text{m}$,致密度为 99.1%。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 免组装机机构; 表面粗糙度; 体能量密度

中图分类号 TG665; TG84 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0203004

Clearance Design and Process Optimization of Non-Assembly Mechanisms Fabricated by Selective Laser Melting

Wang Di Liu Ruicheng Yang Yongqiang

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract To improve the clearance surface roughness of non-assembly mechanisms fabricated by selective laser melting (SLM) and to manufacture non-assembly mechanisms with good surface quality and high density, the inclined surface roughness of the clearance is studied theoretically firstly. Then the clearance junction structure is designed. The effects of laser surface remelting and process parameters on surface roughness are analyzed, respectively. Results show that the inclined surface roughness (R_a) of the clearance is affected by inclined angle and the slice thickness theoretically. R_a decreases as the inclination angle increases and the slice thickness decreases. The clearance is designed as drum shaped hole to improve fabrication quality. Laser surface remelting process can not only improve the density, but also improve the surface quality. During the process, volume energy density should be controlled in success prototyping zone. When fabrication reaches the top of the clearance, the scanning speed should be increased to reduce the dross to improve surface quality. At last, the universal joint is fabricated successfully. The outside surface R_a is $8.25 \mu\text{m}$, the clearance surface R_a is $12.47 \mu\text{m}$, and the relative density is 99.1%.

Key words laser technique; selective laser melting; non-assembly mechanisms; surface roughness; volume energy density

OCIS codes 140.3390; 350.3850

收稿日期: 2013-07-15; 收到修改稿日期: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(51275179)、广东省自然科学基金(S2012040007516)、中央高校基本科研业务费(2014ZM0010)、教育部博士点基金(2012017212004)、中山市科技计划(20123A380)

作者简介: 王 迪(1986—),男,讲师,主要从事激光加工与快速成形技术等方面的研究。

E-mail: mewdlaser@scut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn

1 引言

机械机构在工业领域中应用广泛,如转轴机构和各种运动转换机构等。在传统的加工方式中,一般是先单独制造出组成机械机构的各种零件,然后再将各个零件通过销钉、螺栓等紧固件连接成完整的机械机构。这种加工方法工序繁琐,成型周期长,而且装配方法限制了设计思路。而免组装机可以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。要实现一次性制造,传统的机加工方法难以完成,因此免装配机构其实是基于快速成型技术而提出的。尤其是可以加工出组织致密、机械性能良好、高精度的金属零件的激光选区熔化(SLM)方法^[1-2]应用最为广泛。

Mavroidis 等^[3-7]已经采用光固化、激光选区烧结和激光选区熔化等快速成型技术加工出了一些免组装机。虽然同传统制造技术相比,选区激光熔化技术有很多的优势,但是成型件表面质量较差是该成型技术最大的缺陷。尤其是免组装机机构的间隙结合处,表面更加粗糙。免组装机机构的间隙处如果表面太粗糙,或者粘粉严重,部件之间可能会粘在一起,导致机构无法运动,最后成型失败。针对 SLM 成型件的表面粗糙度,国内外的研究学者已经针对提高成型件表面质量作了一些研究。Mumtaz

等^[8]采用脉冲激光器熔化镍基合金粉末,研究了激光功率、扫描速度和搭接率等参数对成型件上表面和侧表面粗糙度的影响。Song 等^[9]研究了工艺参数对 SLM 成型钛合金件的微观组织和机械性能的影响,获得了激光功率和扫描速度对于表面粗糙度的影响关系。Yasa 等^[10-12]研究了激光表面重熔对成型件表面粗糙度改善的作用。

然而,针对 SLM 制造免组装机机构的间隙表面质量的研究还较少,因此本文以免组装机万向节机构为例,对间隙特征进行设计,并优化其成型工艺,改善间隙表面粗糙度,提高免组装机机构的制造成功率。

2 实验设备与材料

实验设备为自主研发的 DiMetal-100 快速成型设备,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)、控制系统、工艺软件和成型室气体保护系统等几个部分组成。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^[13]。其中扫描速度 10~5000 mm/s,加工层厚 20~100 μm ,激光聚焦光斑直径 70 μm ,成型最大体积为 100 mm \times 100 mm \times 120 mm。

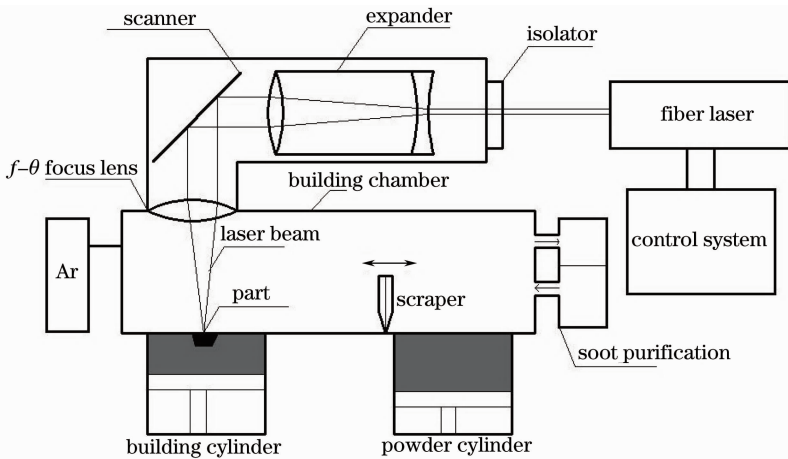


图 1 SLM 成型设备构成图

Fig. 1 SLM fabricating equipment

粗糙度测量采用 JB-8C 型触针式精密粗糙度仪,该粗糙度仪灵敏度高达 0.001 μm ,可以测量包括表面粗糙度 R_a 。在内的 20 多项参数,操作简单快捷。零件致密度采用阿基米德原理法进行测量。

实验材料为气雾化方法制得的 500 目(25 μm)球形 316L 不锈钢粉末,其组成成分(质量分数,%)为:C (0.03%),Cr (17.5%),Ni (12.06%),Mo

(2.06%),Si (0.86%),Mn (0.3%),O (0.09%),Fe (Bal.);粒度分布(质量分数,%)为:<15 μm (50%),<30 μm (90%),平均粒径为 17.11 μm ;粉末的松装密度是 4.42 g/cm³。

3 理论分析

免组装机制造研究的关键点是间隙特征的直

接快速制造,间隙处的表面质量也直接决定了免组装机器的整体性能。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极限成型角时,必须添加支撑以防止悬垂物和翘曲等缺陷的产生。若调整机构的摆放方式,使倾斜角大于极限成型角,则可以避免添加支撑。从间隙内部表面的成型角度出发,有水平、垂直和倾斜三种摆放方式。

如图 2 所示,若机构采用水平或垂直摆放方式,间隙内部表面的成型角度为 0° ,间隙内部的下表面

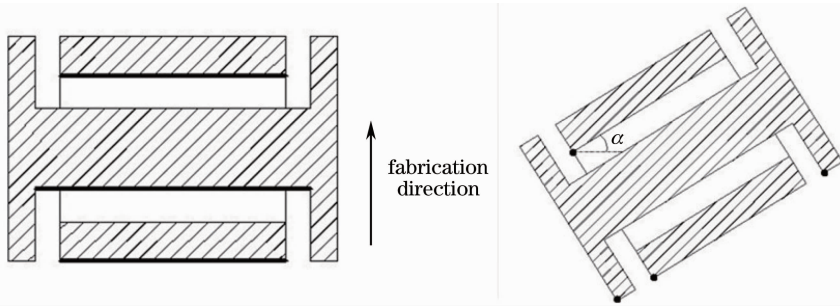


图 2 不同的摆放方式

Fig. 2 Different display

倾斜摆放方式虽然减少了间隙内部的支撑数量,但同时也使间隙内部表面产生台阶效应,使得间隙内部表面较为粗糙。下面对免组装机倾斜摆放时的间隙表面进行建模,对间隙内表面的粗糙度进行理论分析。

如图 3 所示,点划线为间隙内部表面的理论轮廓,设切片层厚为 h ,倾斜角度为 α ,将倾斜面的理论轮廓曲线放入平面坐标系中建模,可以看出粗糙度曲线方程是一个周期函数,单个周期内的方程为

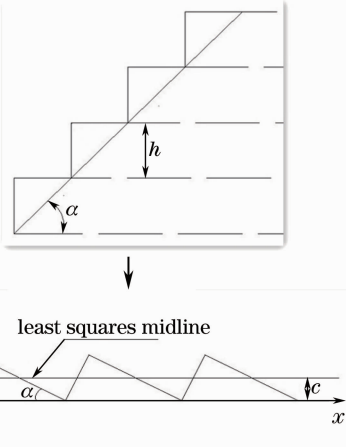


图 3 倾斜摆放方式下间隙处的表面理论轮廓
Fig. 3 Theoretical profile of clearance surface in inclined display

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。因此采用水平或垂直摆放不利于免组装机器的顺利成型。若机构采用倾斜摆放方式时,间隙内部表面的成型角度为 α 。此时,如果极限成型角小于 α ,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),支撑全部位于间隙外部,方便清除。

$$y = \begin{cases} \cot \alpha \cdot x (0 \leq x \leq h \cdot \sin \alpha) \\ -\tan \alpha \cdot x + \frac{h}{\cos \alpha} (h \cdot \sin \alpha \leq x \leq \frac{h}{\sin \alpha}) \end{cases} \quad (1)$$

由于建模所得表面粗糙度曲线是周期性的曲线,故在计算轮廓的算术平均偏差 R_a 时,不需要考虑取样长度和评定长度,只需要选取一个周期内的曲线进行计算即可。

如图 3 所示,为了计算 R_a 必须先确定最小二乘中线的位置,令 $\int_0^{h/\sin \alpha} (y - c)^2 dx$ 取最小值,其中 c 为最小二乘中线与 x 轴之间的距离。则

$$c = \frac{h \cdot \cos \alpha}{2} \quad (2)$$

最后推出 R_a 的表达式

$$R_a = \frac{\int_0^{h/\sin \alpha} |y - c| dx}{h/\sin \alpha} = \frac{h \cdot \cos \alpha}{4} \quad (3)$$

从(3)式可以看出,倾斜面的表面粗糙度理论上由倾斜角和切面厚度两个因素决定。倾斜角越大,切片厚度越小,倾斜面的表面粗糙度越小。因此,为了获得更好的表面质量,则需要更小的切片厚度,以减小“台阶”效应。同时也要调整成型机在加工时的倾斜角度,使倾斜角尽量大,减少成型缺陷对表面质

量的影响。

4 实验过程和讨论

为了提高免组机构间隙处的表面质量,分别分析了间隙特征、激光表面重熔和工艺参数对间隙表面质量的影响,从中得到最优化的组合条件,制造出具有高表面质量和高结合精度的免组机构。

4.1 间隙特征的优化

间隙的大小是影响间隙成型质量的关键因素,太小的间隙影响机构的灵活性;太大的间隙影响机构的稳定性。理论上讲,只要机构的间隙大于粉末颗粒的最大粒径,就可以利用高压吹气等方法去除间隙中的粉末。但是由于受到成型过程的热影响,间隙中的粉末可能会结团形成较大尺寸的团块。因此,能够方便去除粉末的最小间隙要远远大于理论值。这就有必要对免装配机构的间隙特征作一些修改。

如图 2 所示,在传统的机构中,配合间隙是均匀分布的,也即销和孔均采用圆柱体。采用这种结构形式很容易使粉末堵塞,即使采用高压吹气也比较难以去除间隙中的粉末,机构的灵活性受到影响。针对这种情况,提出了一种鼓形孔的间隙特征(图 4):孔不再是简单的圆柱形,而是鼓形结构;最小间隙为 a ,两端的间隙则增大为 b 。鼓形孔使得粉末更加容易去除;同时,也使得可成型的最小间隙进一步减小,提高了机构的稳定性。

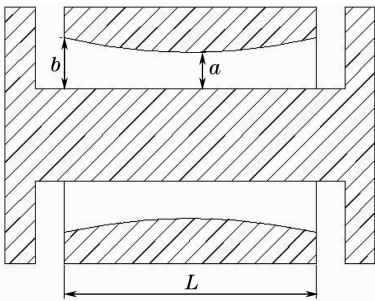


图 4 改进的间隙特征(鼓形孔)

Fig. 4 Improved clearance feature (drum shaped hole)

值得注意的是,配合间隙的设计是需要结合原材料特性和工艺条件的。其中销与孔的配合长度 L 可以根据机构的尺寸(如连接杆的厚度等)而确定,而 a 和 b 却与粉末颗粒粒径以及工艺条件密切联系,往往需要一系列的实验后才能获得经验值,从而得到优化的设计参数。

4.2 表面重熔工艺

为了保证免组机构的致密度和强度,也为了改善表面粗糙度,在加工过程中对每一层都进行激

光表面重熔处理。如图 5 所示,在每层扫描结束后,将该层扫描线偏转 90° ,以相对 SLM 快的速度和大的间距对表面进行重熔。每一道重熔的扫描线垂直扫过 SLM 层的扫描线,重新熔化 SLM 扫描线顶峰,并填平相邻或多道扫描线之间的沟壑,使扫描层表层趋于平滑致密,令下一层铺粉均匀,降低扫描时产生微孔的可能性。

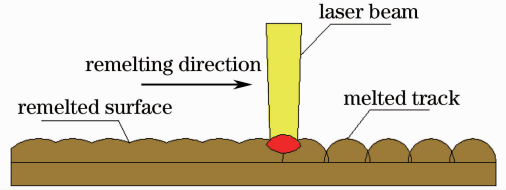


图 5 激光表面重熔原理图

Fig. 5 Schematic of laser surface remelting

为了验证激光表面重熔对于改善 SLM 成型件表面粗糙度的作用,分别加工出未采用表面重熔的方块和采用激光表面重熔的方块,对表面粗糙度进行对比研究。方块尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,其中方块 1 采用的加工参数是:功率 140 W ,层厚 $30\text{ }\mu\text{m}$,扫描间距 $80\text{ }\mu\text{m}$,扫描速度 500 mm/s 。方块 2 的加工参数与方块 1 相同,进行重熔时,扫描方向偏转 90° ,用 600 mm/s 的速度进行重熔扫描。加工出的方块表面形貌如图 6 所示。

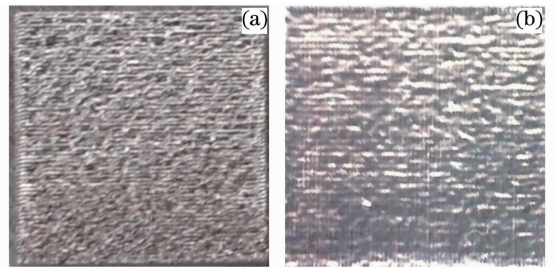


图 6 两个方块的表面宏观形貌。(a) 方块 1;(b) 方块 2

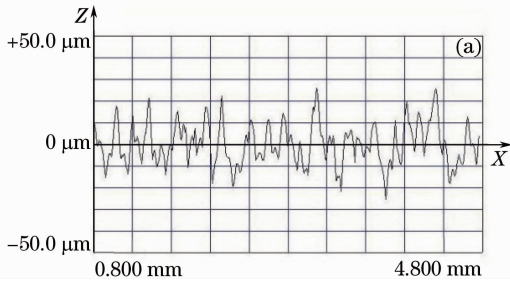
Fig. 6 Surface macroscopic morphology of two boxes.

(a) Box 1; (b) box 2

从图 6 可以看出,成型件经过激光表面重熔处理之后,表面更加光亮。未重熔的表面上散沙状和沟壑形态较为明显,经过表面重熔处理之后,表面变得平整。

对比图 7(a)和(b)可以看出,经过激光表面重熔处理之后,成型件表面轮廓更加平滑,轮廓单元里的峰高和峰谷距离减小,轮廓也更规则。方块 1 的表面粗糙度 $R_a = 7.33\text{ }\mu\text{m}$,经过表面重熔处理后,方块 2 的表面粗糙度 $R_a = 2.34\text{ }\mu\text{m}$ 。 R_a 减小了 71.43% 。从该对比实验中可以看出,采用激光表面重熔处理后,SLM 表面质量有极大的改善。未进行

表面重熔的方块 1 的致密度为 97.2%，而进行了表面重熔处理的方块 2 的致密度达到了 99.5%。由



此可以验证激光表面重熔不仅能改善表面粗糙度，还能极大地提高零件的致密度。

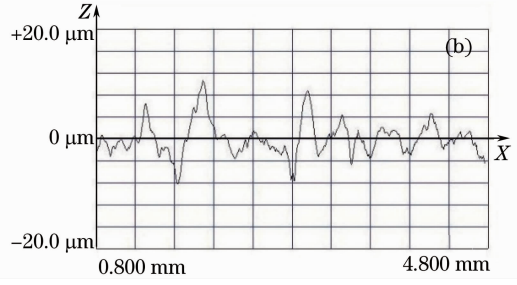


图 7 两个方块 的表面微观形貌。(a) 未重熔的表面轮廓微观图；(b) 重熔后的表面轮廓微观图

Fig. 7 Micro profiles of two boxes. (a) Micro profile of un-remelting surface; (b) micro profile of remelting surface

4.3 工艺参数的控制

SLM 成型是一个激光熔化金属粉末形成熔道，熔道搭接形成面，成型面再叠加形成体的过程。在加工过程中涉及诸多相互关联、相互影响的工艺参数，这无疑增加了成型过程的复杂性与难控制性。为解决上述问题，可将诸多工艺参数综合为“体能量密度”这一参数，通过对其进行优化，使整体调控激光熔化过程及成形质量成为可能。

体能量密度 ω 计算公式为

$$\omega = \frac{P}{vsh}, \quad (4)$$

式中 P 为激光功率， v 为扫描速度， s 为扫描间距， h 为铺粉层厚。

通过实验调查了体能量密度对 SLM 成型质量的影响，综合考虑激光功率、扫描速度、扫描间距和铺粉层厚 4 个因素，在不同的体能量密度下加工出尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的小方块，分别测量其致密度和表面粗糙度，找出最优的成型质量对应的体能量密度区间。实验结果如图 8 所示。

当体能量密度过低时，能量不足以完全熔化扫描的金属粉末，无法形成熔道形态，部分粉末处于烧

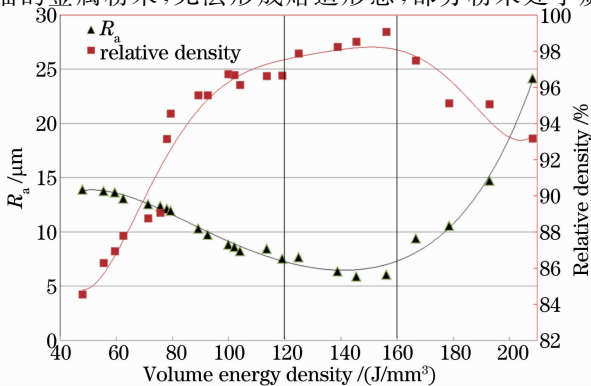


图 8 体能量密度对 SLM 致密度和表面粗糙度的影响
Fig. 8 Influence of volume energy density on SLM relative density and surface roughness trend

结态，如图 9 所示。此外由于激光对粉末的熔化量较少，熔道的熔深不够，液体熔道对固体基体的润湿性不好，还容易造成球化效应。这样成型的 SLM 样品，致密度较低，表面粗糙呈砂粒状。

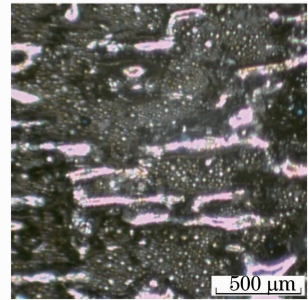


图 9 低体能量密度样品的微观形态($\omega=59.52 \text{ J/m}^3$)
Fig. 9 Sample micro morphology with low volume energy density ($\omega=59.52 \text{ J/m}^3$)

当体能量密度过高时，粉末熔化量太多，会造成过熔现象。液体熔道剧烈流动，熔体飞溅严重，还会使熔道区域内可供熔化的粉末太少，产生气化。如图 10 所示，在该区域会出现凹陷缺陷，致使致密度较低，表面粗糙。

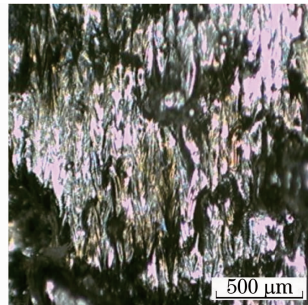


图 10 高体能量密度样品的微观形态($\omega=208.33 \text{ J/m}^3$)
Fig. 10 Sample micro morphology with high volume energy density ($\omega=208.33 \text{ J/m}^3$)

以上两种情况对于 SLM 成型都是极为不利的，会使成型失败，而当体能量密度在 120 ~

160 J/mm³时,如图 11 所示,SLM 成型处于顺利成型区。在此区域,激光熔化金属粉末,形成连续光滑的熔道,熔道的深度适宜,对固体基体形成较好的润湿性,极大地缓解了球化的趋势。熔道宽度较合理,熔道搭接理想。在此区域致密度较高,可以达到 97% 以上,表面较光滑。

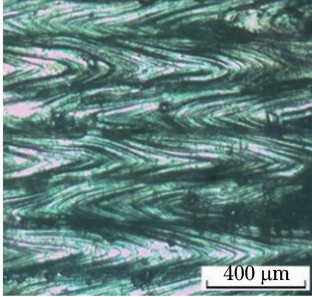


图 11 顺利成型区样品的微观形态($P=150\text{ W}$,
 $v=400\text{ mm/s}$, $s=80\text{ }\mu\text{m}$, $h=30\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 11 Sample micro morphology of successful prototyping zone ($P=150\text{ W}$, $v=400\text{ mm/s}$,
 $s=80\text{ }\mu\text{m}$, $h=30\text{ }\mu\text{m}$)

图 11 所示样品的体能量密度为 156.25 J/mm³,位于顺利成型区域。该样品熔道连续平滑,搭接理想,黑色凸点少,基本无球化。致密度为 98.93%,表面粗糙度 $R_a=4.79\text{ }\mu\text{m}$ 。因此为了保证零件的致密度,并改善表面粗糙度,在加工过程中应该使体能量密度保持在顺利成型的区域。

激光熔化粉末形成的熔池附近,存在一定的热影响区域,使得熔道周围粉末颗粒部分熔化或者被烧结固化。能量输入越大,热影响区越大,造成的粘粉越严重。当激光入射到粉末支撑区时,热传导率较低,导致粉末支撑区的熔池过大,熔池因重力和毛细管力的作用沉陷到粉末中。这些原因导致成型悬垂面时出现悬垂物,下表面质量差,尺寸精度也差。

因此为了保证免组装机机构间隙上表面的表面质量,在加工时应该调整工艺参数来改变体能量密度。如图 12 所示,在免装配机构的制造中,沿着成型方向进行叠层制造时,间隙特征内部存在悬垂结构。在加工到间隙顶部时,应提高扫描速度从而适当减

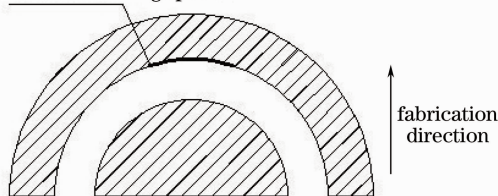


图 12 间隙顶部的特殊加工工艺

Fig. 12 Special processing on the top of clearance

小激光体能量密度,可以减小激光的穿透深度,尽可能地减少悬垂面的粉末粘附现象,避免粉末堵塞在间隙特征中,影响机构的灵活性。

4.4 成型免组装机机构样品

通过以上的分析和优化,综合考虑倾斜面的表面粗糙度理论计算结果和工艺实验结果,将免组装机机构设置为 45° 倾斜摆放,间隙的形状设置为鼓形孔,其中两端间隙 b 为 0.2 mm,中间的最小间隙 a 为 0.1 mm。采用如表 1 所示的优化后工艺参数,顺利加工出如图 13 所示的免组万向节机构。

表 1 优化的工艺参数

Table 1 Optimized process parameters

Process parameter	Value
Laser power /W	150
Scan speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	400 (increase to 600 when fabricating the top of clearance)
Scan space / μm	80
Layer thickness / μm	30
Scan strategy	Inter-layer and then orthogonal scanning
Surface remelting strategy	After scanning each layer, orthogonal remelting at the speed of 500 mm/s

成型过程顺利,中途没有出现球化和翘曲缺陷。如图 13 所示,成型后的万向节能够顺利去除间隙处的支撑,没有出现间隙堵塞现象,转动很平顺,可以顺利实现预设的相对运动。成型后的机构致密度为 99.1%,显微硬度 HV 为 240 MPa,外表面的表面粗糙度 $R_a=8.25\text{ }\mu\text{m}$ 。

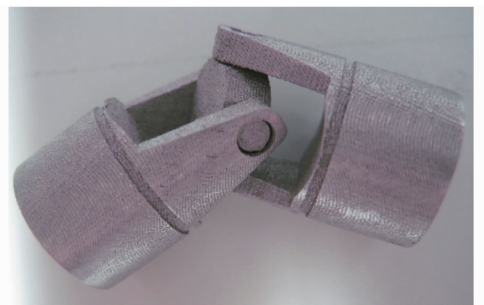


图 13 去除支撑后的万向节免组装机机构

Fig. 13 Universal joint parts after removing the support

将该万向节的组装结合部位剪开,观察间隙处的表面形貌,如图 14 所示,发现其成型良好,没有出现粘粉和挂渣现象,表面粗糙度 $R_a=12.47\text{ }\mu\text{m}$ 。

对免组装机机构的间隙表面拍摄立体显微镜照片,从图 15 的表面微观形貌可以看出,间隙表面熔道连续平滑,凸起小球较少,搭接紧密。

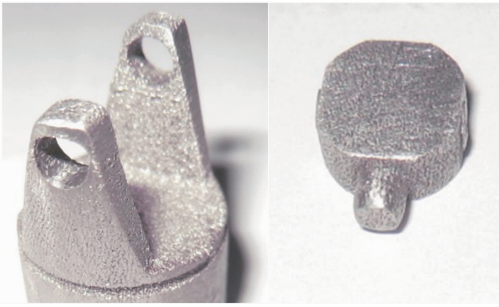


图 14 免组装万向节间隙处的表面宏观形貌
Fig. 14 Surface macroscopic morphology of universal joint in the clearance

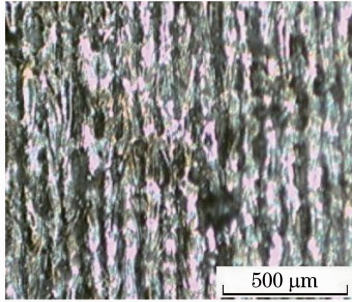


图 15 免组装万向节间隙处的表面微观形貌
Fig. 15 Surface micro topography of universal joint in the clearance

从以上的加工结果可以看出,通过改进免组装机机构的间隙特征,采用表面重熔工艺和优化的工艺参数,可以加工出具有高致密度和高表面质量的免组装机机构,其中间隙处也具有较好的表面质量,没有出现粘粉和挂渣缺陷。

4 结 论

1) 免组装机机构结合处有水平、倾斜和垂直三种摆放方式。综合考虑,倾斜摆放方式最有利于机构的顺利成型。间隙处倾斜面的表面粗糙度 R_a 理论上由倾斜角和切片厚度两个因素决定, R_a 随着倾斜角的增大和切片厚度的减小而减小。

2) 采用鼓形孔的间隙特征可以使粉末更容易去除并能提高机构的稳定性。加工过程中采用激光表面重熔工艺,不仅可以提高机构的致密度,也可以改善表面粗糙度。

3) 加工过程中,保持激光体能量密度在顺利成型的区域,加工到间隙顶部时,加快扫描速度,能够减少间隙处的挂渣,提高表面质量。成型后的免组装机

构在去除支撑后可以顺畅地相对运动,致密度为 99.1%,显微硬度 HV 为 240 MPa,外表面的表面粗糙度 $R_a=8.25 \mu\text{m}$,间隙表面粗糙度 $R_a=12.47 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Research on variable density rapid manufacturing process based on selective laser melting technology [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1879-1884.
吴伟辉, 杨永强, 王 迪, 等. 激光选区熔化变密度快速制造工艺研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1879-1884.
- 2 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.
- 3 Mavroidis C, DeLaurentis K J, Won J. Fabrication of non-assembly mechanisms and robotic system using rapid prototyping [J]. J Mechanical Design, 2001, 123(4): 516-524.
- 4 Lipson H, Moon F C, Hai J. 3-D printing the history of mechanisms[J]. J Mechanical Design, 2005, 127(5): 1029-1033.
- 5 Park K, Kim Y S, Kim C S. Integrated application of CAD/CAM/CAE and RP for rapid development of a humanoid biped robot[J]. J Mater Process Technol, 2007, 187-188: 609-613.
- 6 Chen Y H, Chen Z Z. Major factors in rapid prototyping of mechanisms[J]. Key Engineering Materials, 2010, 443: 516-521.
- 7 Su Xubin, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.*. Study on process 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. 免组装机机构的选区激光熔化直接成型工艺研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603021.
- 8 Mumtaz K, Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(2): 96-103.
- 9 Song B, Dong S, Zhang B, *et al.*. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V[J]. Materials & Design, 2012, 35: 120-125.
- 10 Yasa E, Kruth J. Application of laser re-melting on SLM parts [J]. Advances in Production Engineering & Management, 2011, 6(4): 259-270.
- 11 Yasa E, Kruth J, Deckers J. Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 263-266.
- 12 Kruth J, Yasa E, Deckers J. Roughness improvement in selective laser melting[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Polymers and Moulds, Gent, September 17-19, 2008. Leuven: KU Leuven Publication, 2008. 170-183.
- 13 Yang Yongqiang, Wang Di, Wu Weihui. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601007.
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.

栏目编辑: 宋梅梅