

激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计

张国庆¹ 杨永强¹ 张自勉¹ 宋长辉^{1,2} 王安民¹ 余家阔²

¹华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

²北京大学第三医院运动医学研究所, 北京 100083

摘要 激光选区熔化(SLM)成型零件过程中常出现零件的翘曲变形,这与零件支撑的添加有关。因此,有必要对 SLM 成型零件支撑添加方式进行研究。通过对不同支撑结构 SLM 成型零件的成型效果进行研究,发现在相同支撑参数条件下,支撑片分割未倾斜支撑在成型零件时具有较好的成型效果;零件使用的支撑高度越高,零件越容易翘曲。通过优化支撑结构,发现采用分块 0°倾斜导热支撑可以有效地减小零件的翘曲变形。这为 SLM 成型高精度零件提供了参考。

关键词 激光技术; 激光选区熔化; 支撑结构; 翘曲变形; 优化设计

中图分类号 TG13; TH161; TH162

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1202002

Optimal Design of Support Structures in Selective Laser Melting of Parts

Zhang Guoqing¹ Yang Yongqiang¹ Zhang Zimian¹ Song Changhui^{1,2}

Wang Anmin¹ Yu Jiakuo²

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

²Institute of Sports Medicine, Peking University Third Hospital, Beijing 100083, China

Abstract Warping deformation often occurs during the process of selective laser melting (SLM) of parts, which is related to addition of part supports. Therefore, it is necessary to investigate the addition manner of part supports in the SLM process. The molding effects in the SLM of parts with different support structures are investigated and one found that, under the condition of same support parameters, the support sheet which is separated and non-inclined has better molding effects; the larger the height of support structure is, the stronger the warping deformation is. After the optimization of support structures, it is found that the separated and non-inclined support structure mixed with heat conduction columns can effectively reduce the warping deformation of parts. This study provides a reference basis for the molding of high precision parts by SLM.

Key words laser technique; selective laser melting; support structure; warping deformation; optimal design

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

激光选区熔化(SLM)是一种基于激光熔化金属粉末的增材制造技术^[1]。增材制造技术是通过专用软件对三维模型进行切片分层来获取截面数据,然后将数据导入快速成型设备并采用材料逐层累加的方法来制造实体零件。通过逐层累加的方法几乎可以完成任意几何形状零件的制造,可小批量加工复杂几何结构单件,加工后零件组织致密^[2-3]。

收稿日期: 2016-07-22; **收到修改稿日期:** 2016-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(81327001, 51275179)、广东省重大科技专项(2016B090914002, 2014B010131003, 2015B090920002)、广州市产学研协同创新重大专项(201604010045)

作者简介: 张国庆(1986—),男,博士研究生,主要从事激光选区熔化方面的研究。E-mail: zhangguoqing1202@sohu.com

导师简介: 杨永强(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事激光选区熔化方面的研究。

E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn(通信联系人)

SLM 成型是采用不需要夹具的逐层累积成型方式,在成型过程中常需要添加支撑以保证零件成型。支撑在 SLM 成型零件过程中起关键作用,具体体现如下^[4-7]。1) 大悬垂零件成型时,如果没有支撑,激光扫描时激光会直接打在金属粉末上,零件会发生塌陷,且下层铺粉时刮板会直接将已成型部分刮走;2) 成型过程中,粉末受热熔化冷却后内部存在收缩应力,零件发生翘曲变形,支撑结构连接已成型部分与未成型部分;3) SLM 成型零件时,如果没有支撑,零件直接成型在基板上,通常采用线切割方法取下,影响零件尺寸精度。

曹冉冉等^[4]在光固化立体成型(STL)模型的基础上,针对具有不同复杂曲面的零件设计了按不同密集度分布的支撑,并进行了系统的实验,得到了支撑密度、支撑半径补偿与零件表面倾斜角度的关系。洪军等^[5]基于 STL 模型进行了支撑区域的分类技术研究,针对不同支撑区域提出了十字支撑类、带垂直板的单墙支撑类、斜板支撑类、轮廓支撑类、自由单墙支撑类等结构设计策略。刘洋^[8]研究发现,较小支撑间距非均匀支撑成型效果较好。Calignano^[9]对铝合金支撑结构进行研究发现,“田”支撑和“口”支撑能消除或减小零件的翘曲变形。Zeng^[10]对基于非均匀支撑的长方体零件的 SLM 成型工艺进行了研究,发现所有零件均成功成型,没有发现肉眼可见的裂纹。沈威等^[11]对快速成型支撑结构设计的算法进行了研究,通过建立 SLM 模型拓扑结构设计出相应支撑结构。

上述研究分别对支撑的类型、支撑片与实体零件的接触大小和非均匀支撑进行了研究,但在实际零件支撑添加过程中,非均匀支撑等方法往往不太适用于一些结构复杂的零件。因此,本文对不同支撑结构 SLM 成型零件的成型效果进行了研究,并提出了相关支撑优化方法。

2 材料与方 法

2.1 零件设计要求

支撑结构优化实验选择典型的细长条零件,该零件依据 GB/T229 标准进行设计及开展相关性能测试分析。零件尺寸如图 1 所示。实验过程中分别对冲击零件添加不同支撑结构,对比不同支撑结构对零件翘曲变形的影响。

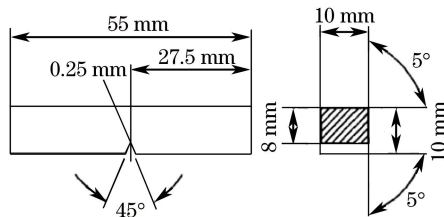


图 1 V 型缺口零件

Fig. 1 V-notched specimen

2.2 支撑优化方法

在 SLM 成型零件过程时,可根据不同零件选择不同支撑。支撑的主要参数通常有齿顶宽、齿根宽、齿高、齿间隔和齿间是否切割等,如图 2 所示。实验中的支撑参数优化主要通过调节齿的倾斜角度、齿间是否切割和齿交叉等来实现。

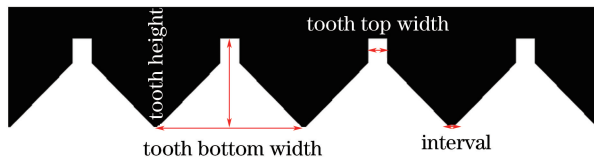


图 2 支撑结构基本参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of basic parameters of support structure

2.3 零件的成型材料、设备与方法

成型材料为英国 Sandvik Osprey 公司生产的钴铬钼(CoCrMo)合金金属粉末,成分满足 ASTM F1377 标准

要求,成分对比见表 1。粉末以气雾化方式制备,呈球形状,如图 3 所示,其中粒度分布为窄区集中分布。

表 1 SLM 成型所用粉末材料与 ASTM F1377 标准对比(质量分数,%)

Table 1 Comparison of powder materials manufactured by SLM with ASTM F1377 standard (mass fraction, %)

Element	CoCrMo powder	ASTM F1377 standard	Element	CoCrMo powder	ASTM F1377 standard
Cr	29.4	27-30	C	0.15	<0.35
Mo	6	5-7	Ni	0.09	<0.5
Si	0.8	<1	Al	<0.010	<0.1
Mn	0.75	<1	Ti	<0.010	<0.1
Fe	0.26	<0.75	W	<0.010	<0.2
N	0.19	<0.25	Co	Bal.	Bal.

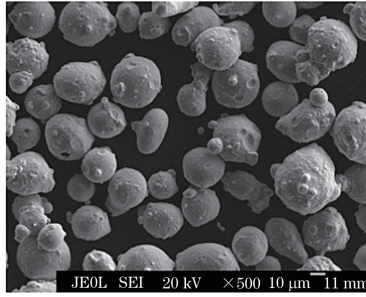


图 3 CoCrMo 合金粉末显微形貌

Fig. 3 Micromorphology of CoCrMo alloy powder

实验采用设备为华南理工大学自主研发的 DiMetal-100 激光选区熔化成型设备,其核心部分主要有英国 SPI 公司生产的连续光纤激光器、扫描振镜、光路传输单元、水循环冷却系统、烟尘过滤系统、粉刷铺粉机构、粉料缸与成型缸控制系统、扫描控制软件等。DiMetal-100 设备的主要技术参数见表 2。

表 2 DiMetal-100 的主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of DiMetal-100

Parameter	Content
Spot diameter / μm	60-80
Laser wavelength /nm	1075
Volume fraction of oxygen /%	<0.03
Beam quality factor	≤ 1.1
Protective gas	Ar or N_2
Maximum molding volume / mm^3	$100 \times 100 \times 150$
Laser maximum power /W	200

实验中成型零件性能的研究主要是基于 CoCrMo 合金进行的,因此,在课题组前期对 CoCrMo 合金工艺研究的基础上,选择 CoCrMo 合金 SLM 成型工艺参数为:激光加工功率 170 W,扫描速度 500 mm/s,扫描线间距 80 μm ,加工的层厚 35 μm ,采用邻层错开隔层正交的扫描方式。实验样件加工每组不少于三个。

3 结果与讨论

3.1 SLM 成型零件问题讨论

在无悬垂结构零件成型过程中,下层已成型实体部分相当于添加的支撑。若无支撑或支撑添加不合理,成型失败的主要体现为:1) 小悬垂结构的成型零件边缘发生翘曲变形,大悬垂结构成型失败;2) 成型后有较大尺寸误差。

零件翘曲变形与尺寸精度如图 4 所示,其中图 4(a)为采用 SLM 成型的膝关节股骨假体正面,方向面向成型机窗口($x-z$ 方向),可以发现零件发生了翘曲变形。图 4(b)为采用 SLM 成型的膝关节股骨假体侧面,可以发现其在面向刷子铺粉方向($y-z$ 方向)发生了严重翘曲变形,加工失败。图 4(c)为采用普通支撑方式成型的冲击零件,可以发现零件开裂,最终成型后零件尺寸为 7 mm,而原设计尺寸为 10 mm,两者存在 30% 的尺寸精度误差。图 4(d)为 SLM 成型的下颚骨假体侧面,可以发现支撑拉断引起了翘曲变形。因此,针对当前支撑添加过程中出现的问题进行研究是非常必要的。

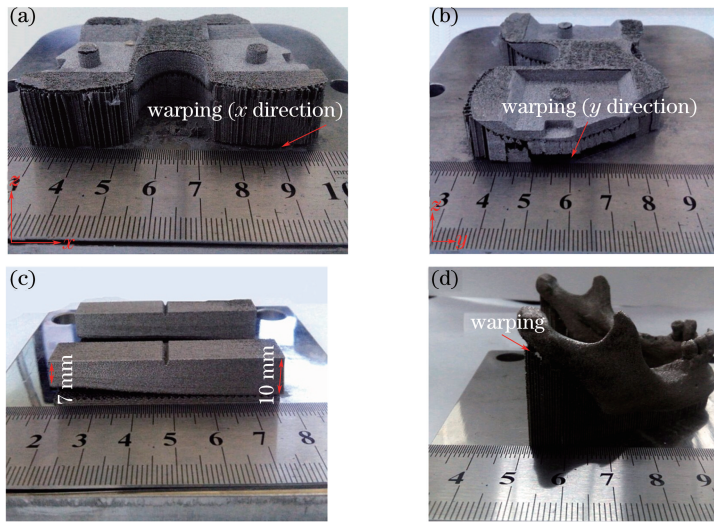


图4 零件翘曲变形与尺寸精度示意图。(a)股骨假体正面;(b)股骨假体侧面;(c)冲击样背面;(d)下颞骨侧面
Fig. 4 Schematic diagram of part warping deformation and size accuracy. (a) Frontage of femoral prosthesis;
(b) side face of femoral prosthesis; (c) reverse side of impact specimen; (d) side face of jawbone

3.2 设计测试支撑类型

根据上述支撑添加过程中存在的问题,设计了不同结构支撑。根据已有论文研究结果可知,齿顶宽与成型零件下表面是否直接接触是零件能否成型的关键影响因素,因此,实验过程中将齿顶宽略微增大0.2 mm。 x 方向与 y 方向支撑填充距离均为1 mm,齿高为1.52 mm,齿间隔为0.1 mm,齿跟宽为1.52 mm。通常情况下认为零件上添加交叉筋可以提高零件的强度,因此,分别设计了 0° 、 20° 、 45° 的倾斜支撑。同时,为了对比支撑齿交叉前后对零件成型效果的影响,设计了齿交叉支撑。根据SLM成型零件应力产生规律,设计了分割距离为0.5 mm和0.2 mm的 0° 支撑。各种支撑方式如图5所示,设计的支撑结构相关参数见表3。

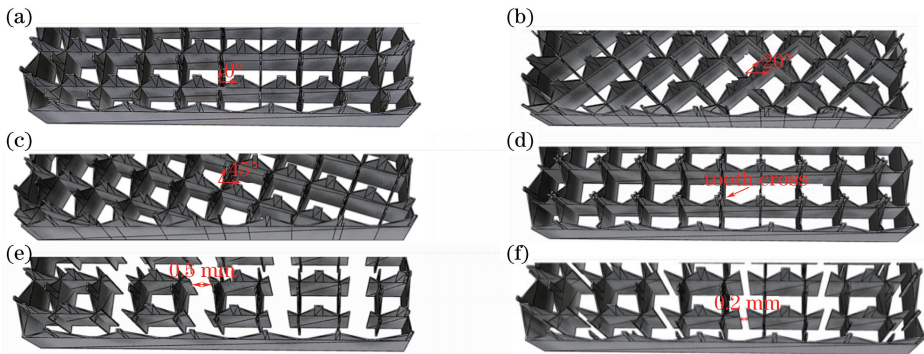


图5 常规块状支撑。(a)常规 0° 支撑;(b)常规倾斜 20° 支撑;(c)常规倾斜 45° 支撑;(d)齿交叉 0° 支撑;
(e)分割距离为0.5 mm的 0° 支撑;(f)分割距离为0.2 mm的 0° 支撑

Fig. 5 Conventional block adding supports. (a) Conventional 0° support; (b) conventional 20° incline support; (c) conventional 45° incline support; (d) tooth cross 0° support; (e) 0.5 mm split and 0° support; (f) 0.2 mm split and 0° support

表3 不同支撑结构相关参数

Table 3 Parameters of different support structures

Item	Tooth spacing /mm	Tooth crown width /mm	Angle of inclination /($^\circ$)	Tooth cross	Cutting distance /mm
(a)	0.1	0.2	0	No	0
(b)	0.1	0.2	0	No	0
(c)	0.1	0.2	20	No	0
(d)	0.1	0.2	45	No	0
(e)	0.1	0.2	0	No	0.5
(f)	0.1	0.2	0	No	0.2

3.3 不同支撑结构成型结果分析

不同支撑结构的 SLM 成型效果如图 6 所示,其中 part 1~part 6 零件的支撑方式分别对应图 5(a)~(f)。由图 6 可以看出,成型零件均发生了不同程度的翘曲,支撑结构为倾斜 20°、45°和齿交叉的零件最先发生翘曲,零件加工被迫停止。支撑结构未发生倾斜的零件随后发生翘曲,同样被迫停止加工。分割距离为 0.5 mm 和 0.2 mm 的未倾斜支撑的零件发生轻微翘曲,但不影响加工并最终完成了加工。SLM 成型开始之初,支撑的拉扯作用使得零件不会发生翘曲变形,随着后续激光能量不断输入,热量来不及散去并持续累积,最终转变为应力;当支撑拉力小于零件热应力时,零件会发生翘曲变形。20°和 45°倾斜支撑比 0°倾斜支撑先发生翘曲,原因可能是粉刷在铺粉过程中刮到倾斜支撑,导致粉刷铺粉效果较差,最终导致成型零件发生翘曲变形。齿交叉支撑比 0°倾斜支撑先发生翘曲,原因可能是设置齿交叉后齿的数目减少,最终表现为支撑与零件的接触总面积减小,支撑总强度低于翘曲变形应力,进而发生翘曲。分割距离为 0.5 mm 和 0.2 mm 未倾斜支撑最终成功成型,原因可能是成型零件和成型支撑在 SLM 成型零件时均会产生应力,支撑分割相当于缩短了激光扫描线长度,减小了支撑内部的残余应力,最终减小了支撑和实体零件的总应力,因此,分割距离为 0.5 mm 和 0.2 mm 未倾斜支撑成型效果较好。

观察图 6 中不同支撑结构的成型零件翘曲方向发现,零件发生翘曲方向为粉刷铺粉方向。这可能是因为在粉刷铺粉时,靠近粉刷位置的支撑与粉刷最先接触,粉刷发生弯曲,粉刷离开时弹粉,因此最开始与粉刷接触的支撑前端粉末较少,零件成型效果较差,且成型后支撑强度不够,导致零件发生翘曲变形。粉刷高度原本大于成型支撑第一层层厚,粉刷与成型支撑接触的现象除了与粉刷铺粉时的弹粉有关,还与激光功率过大有关,过大的激光功率不仅熔化了粉末成型支撑,也造成了支撑表面过多的粉末粘附。观察图 6 不同支撑结构的零件前后部位翘曲方向可以发现,后端最先发生翘曲,这可能是因为在零件靠近 SLM 成型机成型室窗口,窗口加快了零件热量的散出。

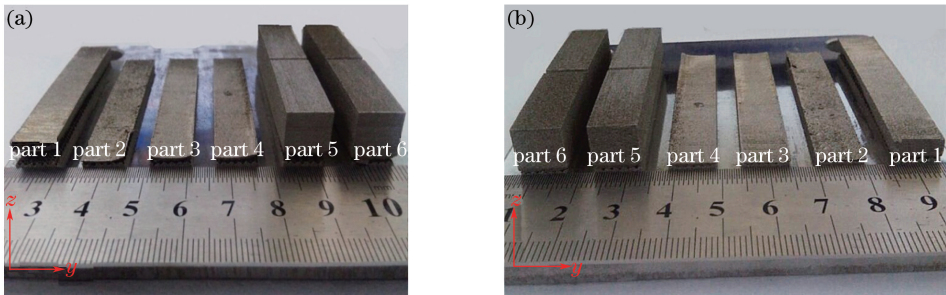


图 6 不同支撑结构 SLM 成型效果。(a)靠近粉刷方向的零件;(b)远离粉刷方向的零件

Fig. 6 Molding effects of different support structures by SLM. (a) Specimen close to paint direction; (b) specimen away from paint direction

3.4 不同高度支撑成型结果分析

为了评判不同支撑高度对成型零件的影响,设计了高度分别为 1,2,3,4 mm 的常规 0°支撑,分别对应图 7 中的 part 7~part 10。part 7~part 10 分别在加工到 47,73,100,126 层时被迫停止,减去相应的支撑高度

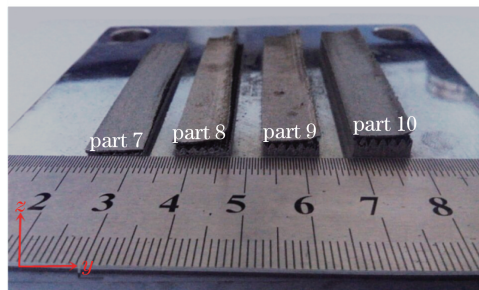


图 7 不同高度支撑成型效果

Fig. 7 Molding effects of supports with different heights by SLM

后实际实体加工层数分别为 18,15,14,11 层。根据不同高度支撑对零件成型效果的影响,绘制出图 8 所示的支撑高度与成型层数关系曲线。由图 8 可以发现,支撑高度越高,零件越容易翘曲,这可能与 SLM 成型零件的导热规律有关,支撑的高度越高,导热效果越差,零件中热量越不容易散去,进而造成热量累积。另外,支撑高度越高,支撑受到拉扯时变形越严重,零件越容易翘曲。

对支撑翘曲变形的方向进行观察发现,靠近刷子初始位置方向的零件易发生翘曲变形,且零件后端更易于发生翘曲变形。SLM 成型零件时采用正交扫描的方式,加工方向为从上到下、从左到右,零件后端的加工间隔时间更短,后端累积了更多的热量。路径规划软件在处理数据时,零件不能被激光扫描线整分,最后将不足一条扫描线的零件分为一条,这样就导致了零件后端部位发生悬垂,这也可能是导致零件后端发生翘曲的原因之一。

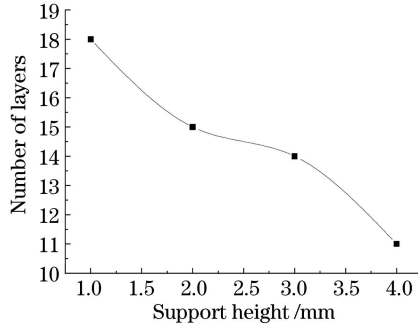


图 8 支撑高度与成型层数关系

Fig. 8 Relationship between number of layers and support height

3.5 支撑结构优化设计及成型分析

3.5.1 支撑结构的优化设计

通过 3.3 节和 3.4 节分析可以发现,分割未倾斜支撑和降低支撑高度可以降低零件发生翘曲变形的程度。然而,在实际支撑添加过程中,可降低的支撑高度有限,通常通过添加不同导热柱和支撑片分割的方法来降低 SLM 成型零件发生翘曲变形的程度、提高零件的成型精度。

零件支撑结构设计参数:齿分割 0° 未倾斜,齿顶宽为 0.2 mm, x 方向与 y 方向支撑填充距离均为 5 mm、齿间隔为 0.1 mm 和齿跟宽为 1.52 mm 的未交叉支撑, x 方向与 y 方向的导热柱填充距离均为 4 mm,导热柱距离支撑 0.2 mm。零件高度为 6 mm,分别在零件下方添加 1.5,3,4.5 mm 导热柱,优化后的支撑结构如图 9 所示。

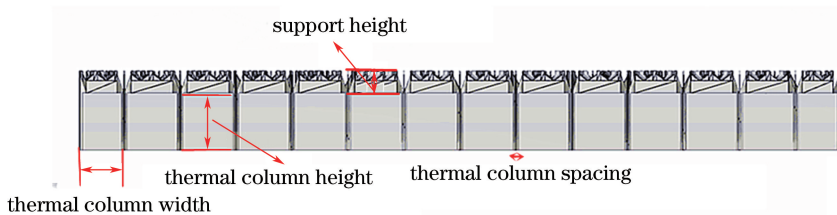


图 9 优化后的支撑结构

Fig. 9 Optimized support structure

3.5.2 支撑结构优化后零件成型分析

优化后支撑零件成型效果如图 10 所示。由图 10(a)可知,添加 1.5,3,4.5 mm 导热柱支撑后,零件均未出现明显拉断现象,成型零件质量随导热柱高度的增加而逐渐得到提升,仅在成型零件两端发生轻微翘曲,零件成型效果较好。发生轻微翘曲的原因是刷子铺粉过程中的弹粉现象,可通过改变刷子材料或设置柔性铺粉结构来改善该现象。对成型后零件高度进行测量发现,零件高度设计尺寸为 10 mm,实际测量尺寸为 9.92 mm,误差仅为 0.08 mm。由此可知,通过添加导热柱支撑可有效地减小零件的翘曲变形,提高了零件的成型精度。

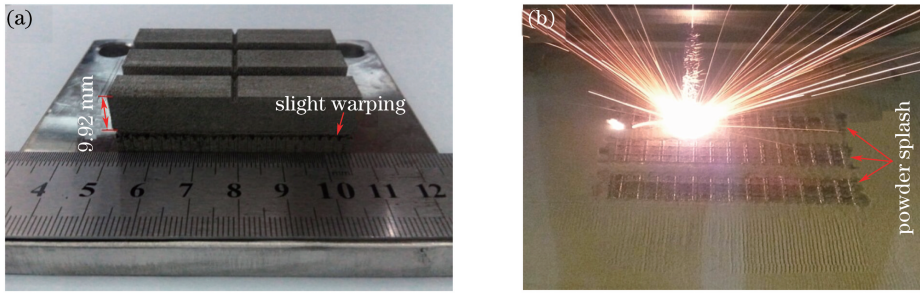


图 10 优化后支撑零件成型效果。(a)添加分块导热柱支撑;(b)SLM 成型零件过程

Fig. 10 Molding effects of optimized support parts. (a) Addition of separated heat-conduction-column supports; (b) molding process of parts by SLM

3.5.3 植入体的优化支撑结构成型效果分析

添加导热柱支撑可大大提高零件的成型质量,但导热柱过高或面积过大会增加零件的成型时间,浪费成型粉末,增加零件的成型成本。因此,依据支撑结构的优化设计方法和成型效果,可根据成型植入体形状结构特点添加支撑,降低零件的成型成本。以股骨假体的支撑添加和成型为例进行说明。

根据股骨假体结构特点,设计零件支撑结构为支撑片分割、 0° 未倾斜、齿顶宽 0.2 mm、齿间隔 0.1 mm 和齿跟宽 1.52 mm、不交叉支撑。股骨假体成型横截面积较大,应力集中,设计 x 方向与 y 方向的支撑填充距离均为 2.5 mm。为缩短加工时间和减少粉末浪费,设计 x 方向与 y 方向的零件导热柱填充距离均为 0.5 mm。在 Magics 软件中零件添加支撑后效果如图 11(a)所示,导入图 11(b)所示的优化后的支撑结构导热柱和支撑片,最终 SLM 成型了图 11(c)所示的股骨假体。由图 11(c)可知,优化 SLM 成型零件支撑添加工艺后,股骨假体在成型过程基本无翘曲,提高了成型零件的成型精度。

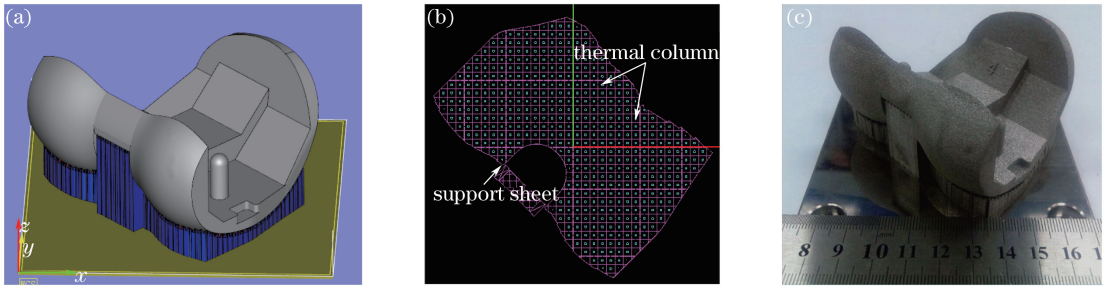


图 11 SLM 成型的股骨假体。(a)Magics 软件中添加支撑后效果图;(b)优化后的支撑结构导热柱和支撑片设计图;(c)股骨假体
Fig. 11 Femoral prosthesis manufactured by SLM. (a) Effect chart of adding support in Magics software; (b) design chart of optimized support structure heat-conductive-column and support sheet; (c) femoral prosthesis

4 结 论

对不同支撑结构 SLM 成型零件的成型效果进行研究发现,支撑片分割未倾斜支撑在成型零件时具有较好的成型效果,靠近粉刷初始位置的零件易发生翘曲变形;使用的支撑高度越高,零件越容易翘曲,且成型零件后端易发生翘曲变形。通过优化支撑结构,采用分块 0° 倾斜导热支撑,可有效减小零件的翘曲变形,提高零件成型精度。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Su Haijun, Wei Kaichen, Guo Wei, *et al.* New development of laser rapid forming and its application in high performance materials processing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1567-1574.

- 苏海军, 尉凯晨, 郭 伟, 等. 激光快速成形技术新进展及其在高性能材料加工中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1567-1574.
- 3 Sun Tingting, Yang Yongqiang, Su Xubin, *et al.* Research of densification of 316L stainless steel powder in selective laser melting process[J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 443-446.
孙婷婷, 杨永强, 苏旭彬, 等. 316L 不锈钢粉末选区激光熔化成型致密化研究[J]. 激光技术, 2010, 34(4): 443-446.
- 4 Cao Ranran, Li Qiang, Qian Bo. Design of support structure in SLM rapid prototyping[J]. Mechanical Research and Application, 2015, 28(3): 69-71.
曹冉冉, 李 强, 钱 波. SLM 快速成型中的支撑结构设计研究[J]. 机械研究与应用, 2015, 28(3): 69-71.
- 5 Hong Jun, Li Dichen, Tang Yiping, *et al.* Design of RP support structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(9): 58-61.
洪 军, 李涤尘, 唐一平, 等. 快速成型中的支撑结构设计策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(9): 58-61.
- 6 Wang D, Yang Y Q, Yi Z H, *et al.* Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(9-12): 1471-1484.
- 7 Lu Jianbin, Yang Yongqiang, Wang Di, *et al.* Designing optimization of directly fabricating overhanging structures of precision metal parts[C]. National Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 2011: 37-45.
卢建斌, 杨永强, 王 迪, 等. 精密金属零件悬垂结构直接成型的设计优化[C]. 全国快速成形与制造学术会议, 2011: 37-45.
- 8 Liu Yang. Research on the mechanism of selective laser melting and direct manufacturing of structural features [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
刘 洋. 激光选区熔化成型机理和结构特征直接制造研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- 9 Calignano F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting[J]. Materials and Design, 2014, 64: 203-213.
- 10 Zeng K. Optimization of support structures for selective laser melting[J]. Electronic Theses and Dissertations, 2015(3): 69-71.
- 11 Shen Wei, Tao Menglun, Li Lijie, *et al.* Study on algorithm of support generation in rapid prototyping[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(6): 63-68.
沈 威, 陶孟仑, 李立杰, 等. 快速成型支撑结构设计的算法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(6): 63-68.