

## 激光与光电子学进展

## 激光选区熔化成形零件结构设计与分析

房立家<sup>1\*</sup>, 孙兵兵<sup>1,2</sup>, 张强<sup>1,2</sup>, 赵海生<sup>1,2</sup><sup>1</sup>航发优材(镇江)增材制造有限公司, 中国航发增材制造技术创新中心, 江苏 镇江 212132;<sup>2</sup>中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095

**摘要** 激光选区熔化成形技术作为一种近净成形的增材制造技术,可实现复杂结构零部件高精度成形。为此,结合激光选区熔化实际应用中发现的问题,总结了激光选区熔化成形工艺的零部件设计准则,包括变形、粉末去除、支撑去除、扫描策略、设备加工能力、加工余量等,同时,结合实际应用情况,进一步分析了应力收缩线形成机理及常规应力分布规律。该研究为设计人员进行零部件设计、模型优化提供了依据。

**关键词** 激光技术; 激光选区熔化; 激光成形; 结构设计; 增材制造; 三维打印

中图分类号 V232

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220615

## Structural Design and Analysis of Selective Laser Melting Forming Parts

Fang Lijia<sup>1\*</sup>, Sun Bingbing<sup>1,2</sup>, Zhang Qiang<sup>1,2</sup>, Zhao Haisheng<sup>1,2</sup><sup>1</sup>HFYC (Zhenjiang) Additive Manufacturing Co., Ltd., AECC Additive Manufacturing Technology

Innovation Center, Zhenjiang 212132, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

**Abstract** As the most desirable technology of additive manufacturing, selective laser melting is capable to fabricate sophisticated structures with high-precision, however, absence of standards in design for additive manufacturing leads to disadvantages in batch production. As a result, this paper summarizes a few design criteria for parts built by selective laser melting, including deformation control, redundant powder discharge, support detachment, scanning strategy, equipment processing capability, machining allowances, etc. In addition, stress shrinkage and regular stress distribution during parts building are discussed in details. This research provides a basis for designers to design parts and optimize models.

**Key words** laser technique; selective laser melting; laser-forming; structural design; additive manufacturing; three-dimensional printing

## 1 引言

激光选区熔化(SLM)成形是一种较为成熟的增材制造技术,目前已得到大批量商业化应用。激光选区熔化成形具有精度高、致密度高且力学性能优良等优点,可用于生产结构复杂、成形难度高的零件,解决了传统生产加工方式生产效率低、结构受限、成品率低等问题,在航空航天、汽车、模具及医疗领域具有广阔前景<sup>[1-2]</sup>。

传统的结构设计思维并不适用于增材制造成形技术,应进行基于增材制造的结构优化,在针对传统工艺的现有结构设计的基础上,结合增材制造的工艺特点进行形状控制,调整悬垂角,使优化结果尽量生成自支

撑结构,模型更易于进行增材制造。最后,总结归纳了几点设计要求。

## 2 设计要求

## 2.1 变形

SLM工艺在加工过程中,会产生变形,严重的会拉断支撑甚至零件,应力收缩产生翘曲,破坏刮刀或干涉刮刀运动,最终导致零件打印失败<sup>[3]</sup>。SLM工艺加工零件产生变形的根本原因是材料的热膨胀。激光加热金属粉末,熔化成为一体,在冷却的过程中,会因为体积收缩而与周围一直较冷的组织产生应力。零件加工时总是自下而上逐层堆积,因此应力的方向都是下层组织受压,上层组织受拉,表现形式为零件会从边缘

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-02-16; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-13

通信作者: \*flijia@foxmail.com

向上翘曲。

在设计零件结构时,应避免无支撑的大尺寸横孔,或者将大尺寸的孔竖向放置。当需要打印无支撑的大尺寸横孔时,横孔的直径不应过大,若横孔直径超过  $\Phi 8 \text{ mm}$ ,则会在孔顶下表皮位置出现明显塌陷现象。当设计需要无支撑下斜面时,下斜面与粉平面的夹角不应过小,一般下斜面逆刮刀成形时夹角应大于  $55^\circ$ ,顺刮刀方向成形时夹角应大于  $40^\circ$ 。设计零件不应出现与粉平面夹角过小的无支撑下表面,或无支撑长桥。当设计需要无支撑的长桥时,最大无支撑桥长度不应该过大,超过  $2 \text{ mm}$  的无支撑长桥下表皮位置会出现明显的翘曲塌陷现象。设计零件不应出现无支撑的悬臂结构,当设计需要无支撑的悬臂结构时,悬臂伸出长度不应该过大,大于  $1.5 \text{ mm}$  的悬臂端部出现翘曲变形现象。设计零件在仅有片体支撑的情况下,不应在

同一高度出现连续大截面尺寸的下表面。当设计需要有连续大截面尺寸的下表面时,尺寸不应该过大。当下表面的尺寸大于规定数值时,应在下表面的尖角、边缘、内部等距位置及其他薄弱位置添加实体支撑,以保证对下表面的拉接与支撑。零件在设计完成之后,应进行三维打印模拟加工实验,以验证零件设计与支撑搭建是否满足抵抗材料变形的要求。如果模拟实验中零件加工失败,则应在其基础上重新设计零件尺寸、摆放角度、支撑搭建等。设计零件时应尽可能减少零件结构所带来的应力及收缩变形,如避免零件过大过厚、壁厚的突然变化、存在尖角薄壁等情况,可使用轻量化结构替代过大过厚零件,减少内部应力。当零件壁厚突然变化时,应使用平滑过渡;当零件有尖角、薄壁等情况时,应使用圆角与周围结构相连,且圆角半径不应过小。图 1 为不同尺寸水平孔和穹顶结构。

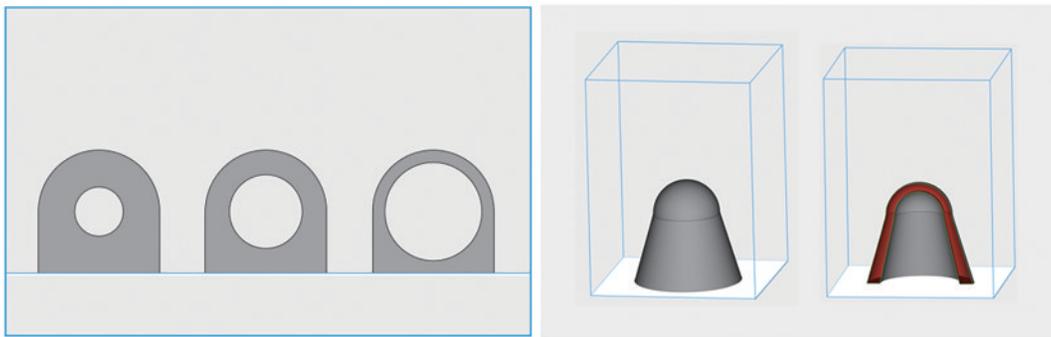


图 1 不同尺寸水平孔和穹顶结构

Fig. 1 Horizontal holes and dome structures of different sizes

## 2.2 粉料去除

在 SLM 工艺中,铺粉刮刀会将金属粉铺满成型区域,而激光只在有需要的地方进行选择性的烧结,因此在零件加工完成后,需要将多余的金属粉料去除。

零件在设计时,应保证不存在无法清理内部残留粉末的区域,如具有密闭腔体结构,还应考虑设计工艺孔,方便粉末的清理,如图 2 所示。当零件使用大面积网格支撑时,应在网格支撑中设计镂空结构,保证支撑间的残余粉末清理方便。

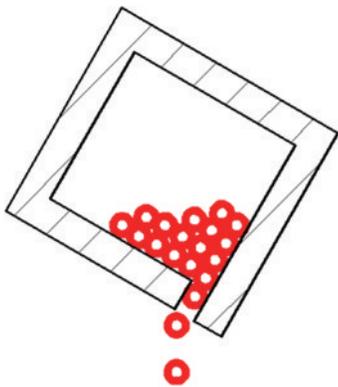


图 2 封闭腔体内设计排粉孔

Fig. 2 Powder discharge hole is designed in closed cavity

## 2.3 支撑去除

支撑在 SLM 零件打印过程中起着重要的作用,一方面将零件与基板拉接在一起,使得零件不至翘曲变形,另一方面为零件下表面的成型提供良好的基础。但支撑不是零件的一部分,在加工完成后,支撑需要从零件上去除掉。因此,支撑的设计需要考虑到去除环节。

支撑的设计应能满足零件拉接与下表面支撑的功能。当零件设计有支撑时,应考虑支撑的去除问题。搭建的支撑应能够使用相应工具方便地去除。当内部腔体下表面需要有支撑时,应当考虑使用轻量化结构代替支撑。当需要支撑的位置细小、狭窄,难以使用工具去除支撑时,可以考虑将支撑位置下表面设计为满足相应要求的下斜面,满足自支撑,支撑与零件的接触点应设计有易断开结构,如锯齿。设计零件时应考虑尽可能减少支撑的总量,以优化后续处理过程。减少零件支撑总量的方法包括:调整零件的摆放角度、减少支撑量、将下平面转变为满足条件的下斜面、形成自支撑结构以取消支撑等。在支撑设计时,应考虑支撑去除后,支撑面的后处理。为了保证支撑面处理后的表面质量,支撑面应便于打磨、抛光或机加工。

### 2.4 扫描策略

SLM 工艺逐层堆积的特点决定了加工成型的零件在一定程度上具有各向异性,即平行于加工平面方向的力学性能(X-Y向)与垂直于加工平面方向的力学性能(Z向)在热处理前并不完全一样<sup>[4]</sup>。因此,对于一些打印态直接使用的零件,还应考虑材料各向异性的影响。

在设计零件时,应考虑三维打印加工所产生的各向异性。对于零件材料严格要求不能有各向异性的情况,应考虑热处理或使用其他方法加工。对于设计零件没有各向异性要求的情况,也应考虑加工对零件的影响,如回转件,其轴线应垂直于粉平面放置。为了消除水平方向各向异性,增材制造成形过程每层旋转某个固定角度(如 67°),图 3 为水平截面与竖直截面组织状态。

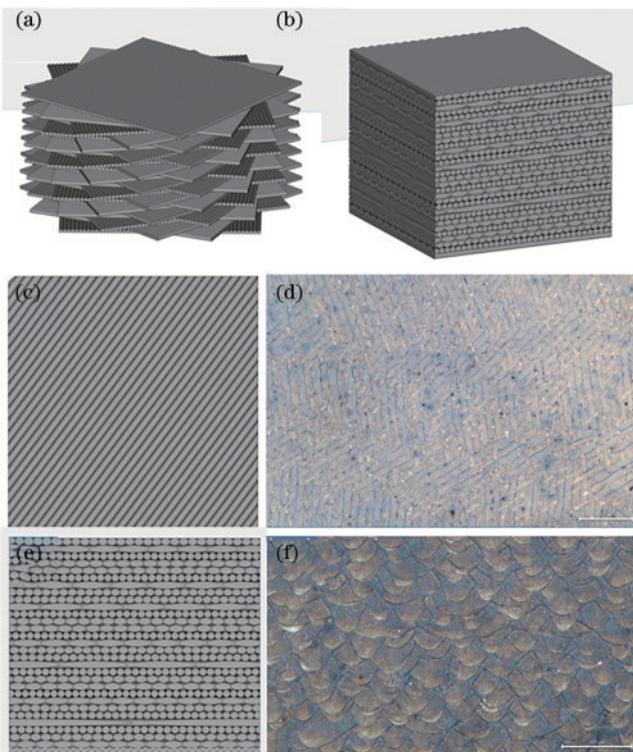


图 3 激光选区熔化成形组织状态。(a)逐层转角示意图;(b)成形试块截面状态;(c)成形试块水平截面示意图;(d)某高温合金水平截面组织;(e)成形试块竖直接面示意图;(f)某高温合金竖直接面组织

Fig. 3 Microstructure state of SLM samples. (a) Schematic diagram of layer-by-layer turning angle; (b) cross-sectional state of forming samples; (c) horizontal cross-sectional schematic diagram of forming samples; (d) horizontal cross-sectional microstructure of a superalloy sample; (e) vertical cross-sectional schematic diagram of forming samples; (f) vertical cross-sectional microstructure of a superalloy sample

### 2.5 设备加工能力

加工时激光的特性会对零件造成一定的影响。在一定的参数条件下,激光照射在粉末床表面形成熔池

的形貌、宽度是基本一致的,因此零件设计的最薄墙、最细缝、最细圆柱等尺寸不可能小于单道熔池的尺寸,零件的表面粗糙度也受熔池形貌的影响。一般激光选区熔化成形设备光斑直径为 80~100 μm,应用动态聚焦镜可达 200 μm。设计时应应对设备的加工精度有充分的了解,当零件的个别要求超出该增材制造设备加工精度极限时,应预留设计余量,为将来的辅助加工手段做好准备。设计零件时应考虑设备加工精细结构的能力和加工精度,对于超出设备加工能力的情况,应考虑使用其他设备,补充后处理加工,或选择其他工艺方法进行加工。

### 2.6 加工余量

零件在加工完成后,还要经过一系列后处理才能进行使用,设计时要对后处理可能去除的材料预留加工余量。

当零件从基板取下需要线切割加工时,零件设计应考虑在与基板接触部位增加线切割余量。当零件后处理需要机加工时,应考虑在机加工部位增加相应的机加工余量。当零件后处理需要进行表面处理时,应酌情考虑在加工面增加表面处理余量,以保证零件最终尺寸。同时,设计零件时还要适应后期夹具和刀具的配合工序。

### 2.7 常规应力变形及分布

激光选区熔化成形零件水平截面突变时,会产生应力收缩线。结合实际应用情况可以发现,当两竖直特征结构平行生长时,可保持较高的成形精度,当中间出现水平大截面将两部分连接为一个整体时,由于金属熔池凝固出现应力收缩变形,两处竖直部分向中心偏移,然而当前层激光束选择性烧结区域仍按原始指定轮廓进行烧结,会在收缩线部位出现台阶。如图 4 所示,随着打印高度厚度的增加,收缩应力不断增大,已成形部分抵抗应力变形的作用逐渐加强,直到收缩应力与抵抗应力变形的作用力平衡后,两侧收缩线停止向中心偏移。

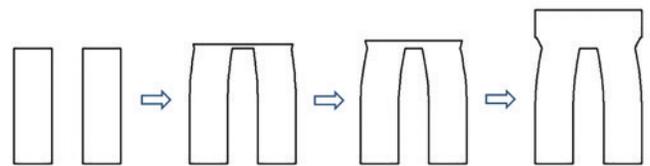


图 4 应力收缩线形成过程

Fig. 4 Stress contraction line forming process

为了减少支撑添加量优化成形角度,对于一般零件常选用倾斜摆放角度打印成形,零件靠近基板的部分往往存在较大应力,大幅面结构的边角部位易出现翘曲变形,严重时会出现卡刀现象。对于成形大幅面薄壁零件,应力作用关系较为复杂,表面会出现不确定性的波浪变形现象,应在薄壁单侧或两侧设置辅助成形结构,起到微连接作用来抑制大幅面变形。

### 3 结 论

本文介绍了激光选区熔化成形零件结构设计准则并进行了分析,并对应力收缩线的形成、成形过程的应力分布规律进行了综合分析,得出以下结论:

1)当设计结构存在横孔、长桥、低角度面时,可通过调整结构整体的摆放成形角度,满足自支撑成形条件。当结构复杂局部不能满足成形要求,可在该区域合理添加支撑结构,支撑添加部位应尽量避开工具不可达的内腔部分。如调整摆放角度和支撑添加部位均不满足条件时,只能通过优化设计结构实现成形效果。

2)为了避免形成较为明显的应力收缩线,模型结构设计时应尽量避免垂直生长方向截面积突变,可采用圆角过渡,也可优化整体结构将大截面分散为多处小截面,使已成形部分抵抗应力变形的能力与截面应力收缩作用力保持相对平衡,实现高精度成形。

#### 参 考 文 献

[1] 雷杨,房立家,孙兵兵,等.多激光束选区熔化成形 GH4169 微观组织及力学性能[J].焊接技术,2020,49

(7):5,27-32.

Lei Y, Fang L J, Sun B B, et al. Microstructures and mechanical properties of GH4169 alloy fabricated by multi-laser beam selective laser melting[J]. Welding Technology, 2020, 49(7): 5, 27-32.

[2] 孙兵兵,房立家,张学军.激光选区熔化 AlSi<sub>10</sub>Mg 工艺优化及显微组织研究[J].焊接技术,2020,49(2):5-8,113.

Sun B B, Fang L J, Zhang X J. Study on process optimization and microstructure of AlSi<sub>10</sub>Mg prepared by selective laser melting[J]. Welding Technology, 2020, 49(2): 5-8, 113.

[3] 熊华平,郭绍庆,刘伟.航空金属材料增材制造技术[M].北京:航空工业出版社,2019.

Xiong H P, Guo S Q, Liu W. Aeronautical metal material additive manufacturing technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2019.

[4] 唐鹏钧,闫泰起,李沛勇,等.激光选区熔化 AlSi<sub>10</sub>Mg 合金退火后的显微组织和断裂韧性研究[J].中国激光,2021,48(10):1002101.

Tang P J, Yan T Q, Li P Y, et al. Microstructures and fracture toughness of annealed AlSi<sub>10</sub>Mg alloy formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002101.