

金属零件自动超轻结构化设计及激光增材制造

吴伟辉¹,肖冬明²,毛 星¹

(1. 韶关学院 物理与机电工程学院, 广东 韶关 512005;

2. 湖南科技大学 先进矿山装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为解决金属超轻结构零件设计技术复杂、设计周期长、难添加蒙皮进行增材制造等难题,提出一种基于激光选区熔化增材制造工艺的金属零件自动超轻结构化设计方法:根据激光选区熔化工艺特点,编制程序将原始零件 CAD 模型自动转化为设定孔隙率的带蒙皮类蜂窝状超轻结构零件模型,且其数据可直接驱动设备实现零件增材制造。研究了带蒙皮超轻结构的构造形式及设计方法;探讨了合适的成型棱长及合理蒙皮结构形式;成功实现复杂零件自动带蒙皮超轻结构化设计及增材制造,所得零件孔隙率误差 2.79%,表明能较准确按预期减重。该方法能根据原始零件 CAD 模型自动、快速地构建带蒙皮金属超轻结构零件模型,大大减轻该类零件设计负担及提高其实用性。

关键词:增材制造; 激光选区熔化; 超轻结构; 金属零件

中图分类号: TH122; TG665 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1106009

Automatic design and laser additive manufacturing of super-light structure of metal part

Wu Weihui¹, Xiao Dongming², Mao Xing¹

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China;

2. Engineering Research Center of Advanced Mine Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to solve the problems when designing super-light structure part such as needing complex design techniques, long design cycle, difficult to add skin if making it by additive manufacturing technology, based on selective laser melting technology, a method which can automatically add skinned super-light structure to traditional metal part CAD model was put forward in this paper. Considering the selective laser melting process characteristics, through an algorithm, a skinned super-light quasi-honeycomb structure part model with a preset porosity can be automatically designed by transforming an original CAD model. And the new part model data format can direct drive a selective laser melting machine for additive manufacturing without any data format transformation. The construction and design method of the skinned super-light structure of metal part were studied. Through process analysis, appropriate processing unit length and reasonable skin tissue of super-light structure metal part were gotten. The above method was tested successfully on a part model with complex shape in a selective

收稿日期: 2016-03-24; 修订日期: 2016-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(51405156); 广东省高等学校优秀青年教师培养计划(Yq2013149); 广东高校优秀青年创新人才培养计划(2013LYM_0083)

作者简介: 吴伟辉(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光增材制造方面的研究。Email: wuweihui_068@163.com

laser melting experiment. The error of porosity is 2.79%, which means that this method can accurately reduce part mass according to preset porosity value. Therefore, in this way, skinned super-light structure part can be design automatically and quickly based on an original CAD model without super-light structure, the burden to design this kind of parts will be greatly reduced, and the practicability of the parts made through this method will be improved greatly.

Key words: additive manufacturing; selective laser melting; super-light structure; metal part

0 引言

超轻结构,亦称为超轻多孔结构,由于具有轻质,比刚度、比强度高,散热性、隔音性好等优点,因而在在汽车、航天航空、电子等高新技术领域有广泛的应用前景^[1]。增材制造技术的日益成熟使得直接制造具有各种复杂内腔结构的零件成为可能,直接制造超轻结构体零件也是当前增材制造技术的典型应用之一^[2]。

多位研究者也提出了各种基于增材制造技术的金属超轻结构零件设计方法及制造工艺,其中激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)^[2]技术是较为成功的一种。

早在 2005 年,Wehmoller M 等^[3]就采用 SLM 技术制备了具有宏观及微观形貌的多孔人造骨。随着 SLM 技术的成熟,展开基于 SLM 技术的超轻结构设计及制造研究的人越来越多,例如 Rehme O 等^[4]通过实验证实以 SLM 技术可以非常灵活地直接制造开孔超轻结构材料;Yadroitsev I 等^[5]结合 CAD 辅助设计及 SLM 实验,获得了有规律排布的最小孔隙结构的开孔式过滤芯零件。Van Bael S 等^[6]采用 SLM 技术制备了 Ti6Al4V 多孔结构,并从孔洞尺寸、形貌,孔隙率等方面对比了设计尺寸与成型后尺寸的差别,发现设计尺寸与成型后尺寸相差较小,能够满足工程实际需要。孙健峰^[7]采用 Ti6AlV4 材料以 SLM 技术制备了正六面体和正八面体可控多孔结构。尽管这些研究表明 SLM 技术能较好制备多孔金属超轻结构体零件,但其超轻结构形状多是通过三维 CAD 软件精心设计的,这需要耗费大量的精力和时间,同时要求设计人员必须掌握专业的超轻结构设计技巧。

为对超轻结构的结构与性能进行分析及得到更优化的设计结果,Smith M 等^[8]采用了有限元软件构建开孔超轻结构单元模型,并采用 SLM 技术打印,

超轻结构单元的形状可通过参数设定自由设定。肖冬明^[9]通过有限元生成单元模型,然后将单元模型与三维 CAD 零件进行布尔运算获得了用于 SLM 成型的超轻结构零件模型。他们的工作中,金属超轻结构零件的基本单元体已能实现自动化设计,其基本单元体的设计方法对此文研究有一定的参考意义,但复杂外形金属超轻结构零件的生成还需较多的手工设计,设计过程繁琐耗时,并需较多的设计技巧。

另一方面,为使制造后的金属零件中的粉末更易去除,上述的增材制造金属超轻结构研究还是无蒙皮层或少蒙皮层的(超轻多孔结构直接外露,无或少“皮肤”包裹),这使得制造出来的零件实用性较差。

为提高金属零件超轻结构的设计效率,同时简化设计过程,获得实用性强的超轻结构形式,文中提出了一种基于 SLM 技术的金属零件自动超轻结构化设计方法,研究了适合 SLM 增材制造工艺的超轻结构形式及自动设计方法,并采用 316L 不锈钢粉对该方法进行了制造验证。

1 金属零件自动超轻结构化设计及制造流程

如图 1 所示,基于 SLM 增材制造工艺的金属零件自动超轻结构化设计及制造流程包括以下步骤。

(1) 原始零件 CAD 模型的获取

在原始零件 CAD 模型的获取方面,设计者没有受到任何限制,可通过传统的三维 CAD 软件如 UG、Solidworks、Pro/E 等进行设计,也可以用逆向工程法(如用 CT 设备采集三维数据并转化为三维 CAD 模型)获得。在原始零件设计过程中,设计者无需考虑超轻结构是如何实现的。所得原始零件先以 STL 格式保存,然后转化为 CLi(Common Layer Interface)层片格式。

(2) 原始零件的自动超轻结构化设计

将 CLi 格式代表的原始零件 CAD 模型导入扫描

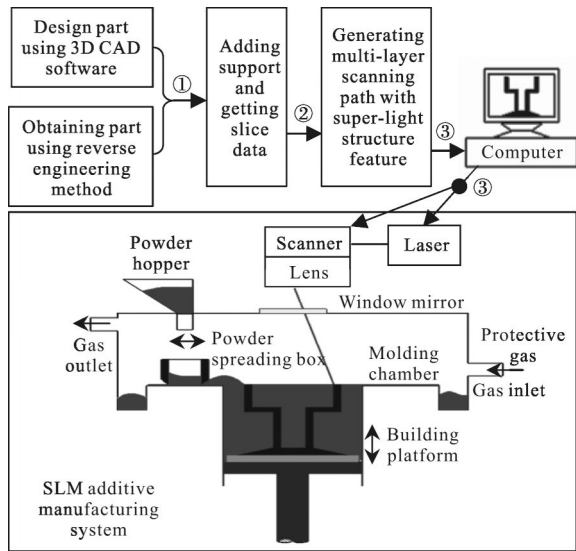


图 1 金属零件自动超轻结构化设计及 SLM 增材制造流程图
Fig.1 Flow chart of automatic design and additive manufacturing of super-light structure of metal part based on SLM process

路径规划软件,设置好孔隙率、壁厚、扫描间距等参数,由该软件自动生成所有层片的扫描路径,在扫描路径产生过程中,软件会根据预定参数,按一定的超轻结构化规则,自动对原始零件进行超轻结构化设计,最终得到一个由多层扫描路径数据表达的带蒙皮的超轻结构化零件模型。

(3) 超轻结构化金属零件的增材制造

超轻结构化金属零件的制造采用 SLM 增材制造技术实现,其过程结合图 1 中 SLM additive manufacturing system 部分所示描述如下:将图 1 扫描路径数据③导入 SLM 系统后,计算机调入一层扫描路径数据,通过振镜扫描头,控制激光束经聚焦镜后,选择性地在工作平台上熔化预铺好的金属粉末,然后工作平台下降一个层厚,重新执行调入数据、铺粉及选择性熔化工作,如此逐层堆积成超轻结构化零件。为防止金属材料在成型过程氧化,成型在通有保护气的成型室中进行。

2 基于 SLM 工艺的零件超轻结构化设计方法

2.1 超轻结构形式及设计

如上所述,金属零件自动超轻结构化设计是在扫描路径规划时实现的,此外,为使超轻结构件更为实用,应当使超轻结构零件在适应 SLM 成型工艺的基础上尽量保留蒙皮层(即零件外表“皮肤”)。超轻结

构的设计可以具体到每个层片的扫描路径的设计。

对任一金属零件(图 2(a)),预期通过扫描路径规划软件,得到具有一定设计特征及孔隙率的超轻结构化金属零件,则自动超轻结构化过程中,层片可设计为以下三种类型。

(1) 蜂窝扫描层

蜂窝扫描层如图 2 标号③所示,分为平行于层片轮廓的蒙皮、在层片轮廓内部的网格两部分,蒙皮厚度取为与网格单元壁厚相同,其扫描方式为轮廓偏置式扫描。网格尺寸如下设计:孔隙率及壁厚为设定参数值,单元棱长则通过计算自动获得(计算棱长),网格类型主要设计为简单易成型的正方形蜂窝结构,因而网格单元主要为棱长为计算棱长的正方形,但在靠近蒙皮的位置,当层片尺寸不足以按计算棱长提供整数倍的正方形网格数时,存在棱长小于计算棱长的单元。

(2) 致密态扫描层

由于超轻结构化处理后的零件为带蒙皮类,因而在遇到层片面积突变的层(零件起始层及终了层也应视为层片面积突变层),该层之前或之后的多层都需要进行致密态扫描(图 2 标号①所示),这类致密态扫描层文中研究称为第一类致密态扫描层;此外,当某些层片面积小于蜂窝结构的正方形单元面积时,该层片需转为致密态扫描,这类致密态扫描层称为第二类致密态扫描层。面积突变层前后致密态扫描的层数由壁厚设定值决定。

(3) 泄粉层

在基于粉床类增材制造系统(如 SLM)成型过程中,每一层都是在粉床上进行的,当遇到有封闭空腔的结构,空腔内部的粉末无法去除。因而对蜂窝状超轻结构,如何在成型后将超轻结构腔体内粉末去除是面向该类工艺设计超轻结构要解决的主要问题之一。

为顺利清理成型件超轻结构内部粉末,将上述致密态扫描层之后的多层设计成泄粉层(图 2 标号②所示),泄粉层由带泄粉间隙的蒙皮及开孔泡沫型网格组成。带泄粉间隙的蒙皮是在上述蜂窝扫描层蒙皮的基础上,增加一段或数段不扫描的间隙形成(文中,每一泄粉层共均匀地布设 4 个泄粉间隙,各层泄粉间隙的宽度逐层递减,连续多层泄粉层的间隙堆积后形成三角形泄粉孔)。开孔泡沫型网格由上

述蜂窝型网格去除网格交点外的网格单元棱边得到(图 2(c)标号②),开孔泡沫型网格的孔隙是相互连通的,粉末在孔隙中的运动不受约束。

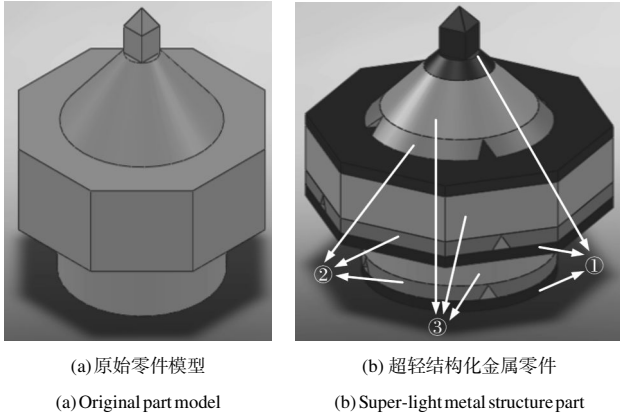


图 2 金属零件的超轻结构组成(①致密态扫描层;②泄粉层;③蜂窝扫描层)

Fig.2 Compositions of the super-light metal structure(①dense scanning layer; ②powder draining layer; ③honeycomb scanning layer)

2.2 单元棱长尺寸的自动计算

超轻结构体的网格单元尺寸可由单元壁厚及单元棱长两个参数确定,由于成型件准确达到设定孔隙率及设定壁厚是实现超轻结构相关物理性能的重要一环,文中通过设定孔隙率及单元壁厚确定单元棱长参数。

根据参考文献[10]所给的相对密度计算公式,可推导给出了正方形蜂窝状材料孔隙率与壁厚、棱长三者的关系式(假设棱长 ≥ 壁厚):

$$l = \frac{t + t\sqrt{\phi_0}}{1 - \phi_0} \quad (1)$$

式中: t 为网格单元壁厚设定值; l 为网格单元棱长;

ϕ_0 为孔隙率设定值。

但如上所述,文中所研究的超轻结构是一种带蒙皮结构及泄粉层的超轻结构,因而按公式(1)计算得到的棱长所确定的实际孔隙率与设定孔隙率有较大的差距。为了获得较准确的孔隙率设计,需要根据实际孔隙率与设定孔隙率的误差值逐步修正棱长参数,实际孔隙率可由下式给出:

$$\phi = \frac{V_0 - V_s}{V_0} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_0 - S_s) t_{th}}{\sum_{i=1}^n S_0 t_{th}} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_0 - S_s)}{\sum_{i=1}^n S_0} \quad (2)$$

对蜂窝扫描层及泄粉层:

$$S_s = S_{sk} + S_e(l) \cap S_{co} \quad (3)$$

对致密态扫描层:

$$S_s = S_0 \quad (4)$$

式中: ϕ 为实际孔隙率; V_0 为原始零件的总体积; V_s 为超轻结构化后零件的致密态部分体积; S_s 为超轻结构化后某层片层致密态部分面积; S_0 为原始零件某层片层总面积; t_{th} 为层厚; $S_e(l)$ 为以原始层片包围盒为蜂窝结构边界的网格棱边总面积,是单元棱长 l 的函数; S_{co} 为原始层片轮廓按壁厚设定值 t 偏置后的层片面积,可视为已知值; S_{sk} 为蒙皮部分面积,在原始层片面积不变情况下,由壁厚设定值 t 及扫描间距设定值决定,可视为已知值; n 为零件的层片总数。

由于零件每个层片图形轮廓可能不同,且输入层片轮廓数据为坐标点数据, $S_e(l)$ 的具体关系式难用数学公式表达,实际求解过程中, $S_e(l)$ 的值可通过对各层片轮廓数据编程计算得到。

这里先根据公式(1)计算出初始棱长,然后代入公式(2)~(4)计算实际孔隙率。设实际孔隙率与孔隙率设定值的误差为 σ ,如果 $\phi - \phi_0 < -\sigma$,则棱长增加,如果 $\phi - \phi_0 > \sigma$,则棱长减小,重新计算实际孔隙率,如此循环计算,最终当孔隙率误差值落在 $\pm\sigma$ 范围内的棱长为取用的单元棱长。

3 实验验证

3.1 实验方法

采用 400 目气雾化 316L 不锈钢粉末作为成型材料,基板材料为 304 不锈钢。采用所在单位的 Metal3DP-100 SLM 设备作为实验平台,该设备最大

成型尺寸为 100 mm×100 mm×90 mm,最小铺粉层厚为 20 μm,配备 200 W 的连续式光纤激光器,激光聚焦光斑为 30–50 μm。

按上述思路编制超轻结构化扫描路径规划程序后,以所设计的程序配合参数设定处理预先设计好的 CAD 模型,获得扫描数据,然后将该数据导入 SLM 设备,以该数据驱动激光束逐层选区熔化金属粉末成型,得到超轻结构化金属零件。

实验后通过精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺测量超轻结构化金属零件的外形尺寸精度,为减少测量误差,对两面或两边之间距离的测量采用多点测量求取平均值的方式,这样也可以使成型件悬垂面等表面粗糙度较大的地方的测量数值更具代表性。采用带挂钩的静水力学天平(测量精度为 0.01 g),以排水法获得零件实际孔隙率(先测定零件的相对密度,然后计算出孔隙率)。零件的超轻结构分析采用线切割剖分成型零件后进行。部分试样的硬度采用洛氏硬度计测定。

3.2 实验结果及讨论

3.2.1 单元棱长计算值的限制

由于成型过程是在粉床上进行的,因而自动化生成的超轻结构壁厚及孔隙率受到 SLM 成型过程特点的约束,在 SLM 成型过程中,由于网格中间充满了粉末,如果如上所述计算得到的单元棱长 l 太短,则网格成型时,网格内的粉末有可能受热影响作用,全部被烧结成团块状并粘附在棱边上(即所谓的“粉末粘附”现象^[11]),导致成型后粉末也无法从网格孔中清除,因此应对上述计算所得的棱长进行限制,所考虑的“粉末粘附”现象,既与粉末粘附量相关,也与粉末尺寸相关,根据粉末粘附量及粉末尺寸,确定棱长下限值。如计算所得的棱长太短,可通过增加壁厚重新计算棱长。经实验测试,所采用的实验平台棱长下限值应为 0.45 mm。

零件超轻化形成网格后,蒙皮内的每个网格单元棱边在增材制造领域都属于悬垂面,但由于网格位于零件内部,在成型网格时不可能像成型零件悬空壁面一样添加支撑成型,因此当计算棱长过长时,会因为底部无支撑在成型过程中发生变形从而导致成型失败(图 3),因而上述计算所得的棱边也存在上限值,如计算所得的棱长太长,可通过减小壁厚设定

值重新计算棱长。棱长上限值也通过实验确定,实验平台所采用的棱长上限值为 4 mm。

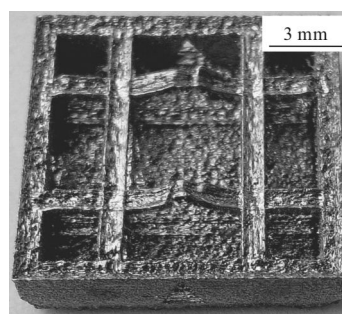


图 3 单元棱长过长所导致的网格变形(铺粉层厚:40 μm,激光功率:140 W,扫描间距:40 μm,扫描速度:350 mm/s)

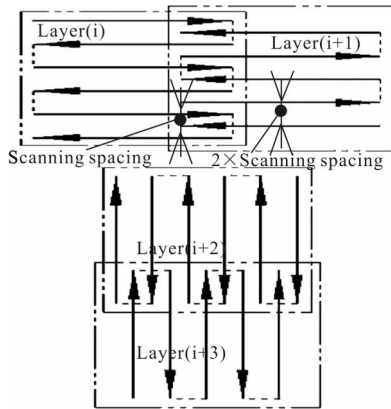
Fig.3 Mesh distortion caused by long cell edge(layer thickness: 40 μm, laser power: 140 W, scanning spacing: 40 μm, scanning speed: 350 mm/s)

上述棱长的计算是通过软件自动完成的:先设定孔隙率及壁厚参数,然后给定一个初始棱长,再通过软件自动优化计算得到孔隙的棱长。主要考虑粉末粘附及热变形的影响后,在程序里设定了一个棱长的取值范围,只要计算棱长在取值范围内,即认为是合理的棱长值。如果计算棱长大于取值范围的上限,会提醒用户通过减小壁厚值进行重新计算;如果计算棱长小于取值范围的下限,则会提醒用户通过增加壁厚值进行重新计算。如此直到计算棱长在设定取值范围内。

3.2.2 水平蒙皮层的强化处理

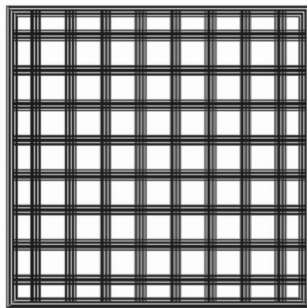
当前的金属零件超轻结构增材制造中,零件多数是无蒙皮或少蒙皮的,但对多数实际应用而言,为考虑美观、密封及表面承载功能,蒙皮层必不可少。蒙皮层可分为侧壁蒙皮层以及水平蒙皮层两类,上述图 2(c)中所给出的蒙皮正属于侧壁蒙皮层,由各层的侧壁部分勾成。对于水平蒙皮层,是由上述第一类致密态扫描层逐层堆积而成。

水平蒙皮层的扫描策略与蒙皮层的力学性能有很大的关联,图 4 所示是采用了两种扫描策略的蒙皮层,图 4(c)采用了传统的勾边+邻层互错隔层正交扫描策略^[12](图 4(a)),图 4(d)在采用图 4(a)扫描策略之前还增加了一次蜂窝网格扫描(可称为“骨架”扫描)(图 4(b))的成型。



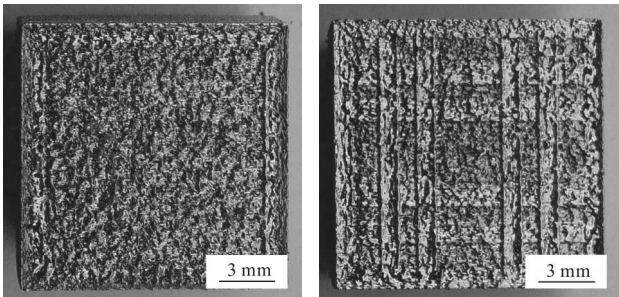
(a) 邻层互错隔层正交扫描策略示意图

(a) Scanning strategy of offsetting the scan lines in two adjacent layers and orthogonal scanning in two adjacent inter-layers



(b) 网格“骨架”扫描线

(b) “Skeleton” scanning lines



(c) 未添加“骨架”的成型实体

(c) Entity without a “skeleton”

(d) 添加“骨架”的成型实体

(d) Entity with a “skeleton”

图 4 采用两种不同扫描策略所成型的实体照片(铺粉层厚:40 μm, 激光功率:140 W, 扫描间距:40 μm, 扫描速度:350 mm/s)

Fig.4 Photos of two entities made by two different scanning strategies (layer thickness: 40 μm, laser power: 140 W, scanning spacing: 40 μm, scanning speed: 350 mm/s)

对两个试样进行硬度测量,图 4(c)所示试件的平均硬度值为 73.98 HRB,图 4(d)所示的试件其平均硬度值为 86.5 HRB(其中在“骨架”处的平均硬度为:89.22 HRB,无“骨架”处的平均硬度为:83.78 HRB)。

明显地,添加了“骨架”成型的蒙皮层力学性能更好,其原因在于在固定扫描速度、激光功率、铺粉

厚度等参数的前提下,先进行“骨架”成型后进行实体填充,是一种局部重熔扫描策略。尽管当前 SLM 技术已可直接成型出接近 100%相对密度的全致密金属零件,但通常实验中,不会刻意追求十分完美的工艺条件,扫描速度过快、或粉层平面微观不平整(即铺粉平面有些点粉层过厚或过薄)、或粉末中存在易燃烧气化的杂质等情况时有发生,因而 SLM 成型件内部常有零星的微小孔隙,通过二次激光重熔处理后,这些微小的孔隙会被二次重熔的液态金属填平,因而重熔区域相对于一次熔化区域的致密度更高^[13-14]。另一方面,根据参考文献[14-15]报道,经过激光表面重熔的 SLM 金属成型件,其微观组织会更细化及硬度会进一步提高,因而重熔区域相对于一次熔化区域的力学性能也更好。但是与图 4(c)相比,图 4(d)的非重熔区域(无“骨架”处)力学性能也显著提高,这是由于图 4(d)所用的扫描策略中,采用“邻层互错隔层正交扫描策略”的全面填充是在“骨架”成型之后进行的,全面填充后,被二次激光重熔的网格部分力学性能远高于一次熔化成形区域,先成型的“骨架”可作为支撑,为其余非“骨架”填充区提供支撑作用,从而使图 4(d)的非重熔区域的力学性能也相对于图 4(c)单纯的一次熔化区域要好。

因此,为提高零件的整体力学性能,蒙皮层的成型中都加入了网格“骨架”的成型。

3.2.3 复杂零件的超轻结构化成型实例

为验证上述设计思路,对图 2(a)所示的零件进行了自动超轻结构化设计,获得了带蒙皮超轻量化结构的扫描路径数据表达的零件模型,并导入 SLM 设备进行成型,得到了图 5 所示的成型零件(已去除支撑)。自动超轻结构化设计参数如表 1 所示。

如图 5 所示,所得零件除多了几个泄粉孔外,与 CAD 模型外观基本一致,测量表明,其外观尺寸精度±0.15 mm,该零件的设定孔隙率为 40%,零件的实际孔隙率达到 42.79%。

按图 6(a)所示将零件半剖,最后将半剖的零件再沿零件中部半剖,可以得到零件的剖面照片(图 6)。

在零件预期实现致密态成型的区域,实际成型时因某些工艺因素(例如所用粉末经多次使用,存在易气化的毛发、纸屑等杂质;铺粉刮板所铺粉层存在微观不平整等),导致该区域不能全致密成型(图6(c)),

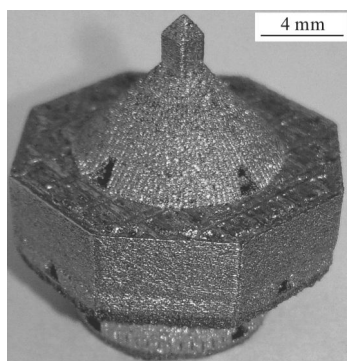


图 5 经自动超轻结构化设计及增材制造的复杂金属零件样品照片(铺粉层厚: 40 μm , 激光功率: 140 W, 扫描速度: 350 mm/s)

Fig.5 Sample photo of a complex metal part made by the method of automatic design and additive manufacturing of super-light structure (layer thickness: 40 μm , laser power: 140 W, scanning speed: 350 mm/s)

表 1 零件自动超轻结构化的设计参数

Tab.1 Design parameters of the super-light structure of the part

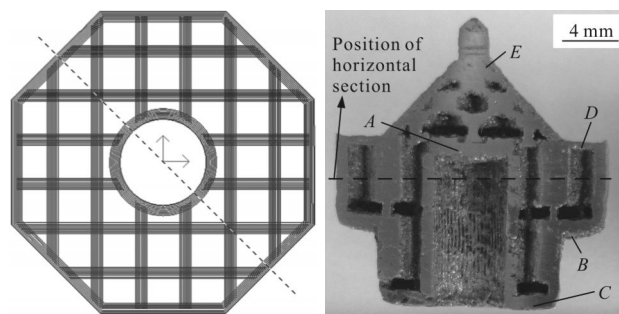
Parameter name	Value
Setting value of porosity	40%
Setting value of porosity error	$\pm 5\%$
Setting value of wall thickness/mm	0.7
Limit value of unit length/mm	Maximum 4
	Minimum 0.45
Scanning spacing/ μm	40

这也是实际孔隙率与设定孔隙率存在 2.79% 的误差的主要原因。

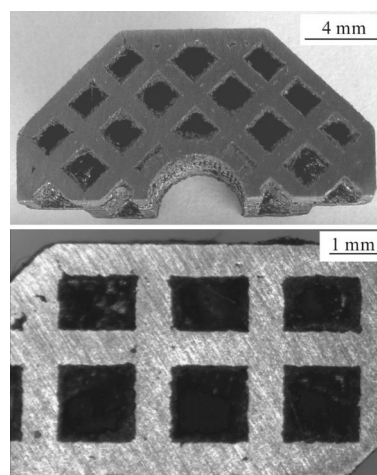
但是, 尽管如此, 实际孔隙率仍与孔隙率设定值接近, 在孔隙率误差设定值范围内(表 1), 质量仅为同材质的原始零件(没进行自动超轻结构化设计)的 57.21%, 超轻结构化后成型的零件重量明显减少, 实现了较准确自动超轻结构化设计目的。

采用零件的剖面照片(图 6)测量孔隙的成型精度。设定壁厚为 0.7 mm, 实测零件的平均壁厚为 0.69 mm。水平剖分结果显示, 零件的网格成型精度较高, 尺寸精度 ± 0.05 mm。但垂直方向, 零件的网格棱边成型精度受到铺粉、粉末粘附、热变形等因素影响, 尺寸精度稍差, 但能达到 ± 0.1 mm。

由剖面图可知, 零件内部成功地实现了蒙皮层+类蜂窝状网格的成型, 除 A、C 为获得蒙皮层采用致密态扫描方式外, 在图中 B、D、E 处也采用了致密态



(a) 垂直剖切位置 (b) 垂直剖面
(a) Position of vertical section (b) Vertical section



(c) 水平剖面
(c) Horizontal section

图 6 零件剖面照片
Fig.6 Sections of part

扫描, B、D 处的致密态扫描很好地应对了层横截面面积突变需生成蒙皮层的情况; E 处因横截面积太小, 也成功自动改用致密态式扫描。A、B、C 处的蒙皮层厚度要较设定壁厚值稍大, 这是因为这些地方是显著的悬垂面, 激光能量容易透过悬垂面, 使底部粉末产生严重烧结^[2], 导致悬垂面底部成型厚度大于实际厚度的结果。

4 结论

(1) 提出及论述了一种基于激光选区熔化增材制造工艺的金属零件自动超轻结构化设计方法, 针对成型工艺确定一种易于自动化生成的带蒙皮类蜂窝状超轻结构的构造形式, 然后编程将原始零件 CAD 模型自动转化为设定孔隙率、单元壁厚及构造形式的超轻结构零件模型, 且新模型数据可直接驱动设备实现零件增材制造。该方法可有效减轻金属超轻

结构零件的设计负担及提升该类零件的实用性。

(2) 研究了金属零件自动超轻结构化成型的工艺,认为成型过程中,为防止热变形以及粉末难以倒出,应合理设计最长及最短棱长;为提高超轻结构件的力学性能,蒙皮结构可先采用蜂窝网格扫描搭建骨架,然后再加入传统的致密态填充扫描。

(3) 采用自动超轻结构化设计技术成功将一个复杂的零件转化为带蒙皮的类蜂窝状超轻结构零件,并成功采用激光选区熔化工艺制造出来。所得零件除多个泄粉孔外,与 CAD 模型外观基本一致,其外观尺寸精度为 ± 0.15 mm,实测零件的孔隙率误差为 2.79%,质量仅为超轻结构化前同材质原始零件的 57.12%,能较准确减重。在设定孔隙率误差范围内,零件的网格成型精度较高,水平方向网格尺寸精度 ± 0.05 mm,垂直方向为 ± 0.1 mm,实现了较精确的自动超轻结构化设计目的。

参考文献:

[1] Yan Jun. Multiscale analysis and concurrent optimization for ultra-light metal structures and materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 1-5. (in Chinese)
 阎军. 超轻金属结构与材料性能多尺度分析与协同优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 1-5.

[2] Yang Yongqiang, Wu Weihui. Manufacturing changes design-3D printing direct manufacturing technology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2014: 20-21. (in Chinese)
 杨永强, 吴伟辉. 制造改变设计-3D 打印直接制造技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014: 20-108.

[3] Wehmoller M, Warnke T P H. Implant design and production a new approach by selective laser melting[J]. *International Congress Series*, 2005, 12(81): 690-695.

[4] Rehme O, Emmelmann C. Rapid manufacturing of lattice structures with selective laser melting [C]//Proceedings of SPIE, Laser-based Micropackaging, 2006: 1-12.

[5] Yadroitsev I, Shishkovsky I, Bertrand P, et al. Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5523-5527.

[6] Van Bael S, Kerckhofs G, Moesen M, et al. Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(24): 7423-7431.

[7] Sun Jianfeng. Research on fabrication and forming mechanism of controllable porous structure of ti6al4v based on selective laser melting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 70-78. (in Chinese)
 孙健峰. 激光选区熔化 Ti6Al4V 可控多孔结构制备及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 70-78.

[8] Smith M, Guan Z, Cantwell W J. Finite element modeling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 67(10): 28-41.

[9] Xiao Dongming. Modeling of porous structure of implants and direct manufacturing by selective laser melting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 30-45. (in Chinese)
 肖冬明. 面向植入体的多孔结构建模及激光选区熔化直接制造研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 30-45.

[10] Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby. Cellular solids: structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 20-47.

[11] Zhang Sheng. Research on the forming processes and properties in selective laser melting of medical alloy powders [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology: 90-100. (in Chinese)
 张升. 医用合金粉末激光选区熔化成形工艺与性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 90-100.

[12] Wu Weihui, Yang Yongqiang, He Xingrong, et al. All--digital rapid design and manufacture of metal customized surgical guide plate[J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(5): 1135-1143. (in Chinese)
 吴伟辉, 杨永强, 何兴容, 等. 金属质个性化手术模板的全数字化快速设计及制造 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(5): 1135-1143.

[13] Wang Di, Liu Ruicheng, Yang Yongqiang. Clearance design and process optimization of non-assembly mechanisms fabricated by selective laser melting [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0203004. (in Chinese)
 王迪, 刘睿诚, 杨永强. 激光选区熔化成型免组装机机构间隙设计及工艺优化[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203004.

[14] Kruth J P, Deckers J, Yasa E. Experimental investigation of laser surface remelting for the improvement of selective laser melting process [C]//14th European Forum on Rapid Prototyping, 2009: 321-332.

[15] Yasa E, Kruth J P. Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser remelting[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 19(11): 389-395.