

文章编号 1004-924X(2017)06-1547-10

激光选区熔化成型可控超轻结构化 零件的孔隙生成效果

吴伟辉^{1*}, 杨永强², 肖冬明³, 陈昌永¹, 毛桂生¹

(1. 韶关学院物理与机电工程学院, 广东 韶关 512005;

(2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;

(3. 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:本文主要研究了孔隙率等参数可控的自动超轻结构化金属零件的增材制造。以方块零件及一个具有复杂外形的零件为研究对象,分析了面向激光选区熔化工艺的可控超轻结构化零件的孔隙生成效果,重点探讨了成型工艺对超轻结构化零件孔隙率的影响。结果显示:通过计算机数值计算,可将方块 CAD 模型快速自动转化为可控超轻结构化模型,计算孔隙率误差可控制在 $\pm 2\%$ 以内;激光深穿透现象会导致带悬垂面内壁的壁厚增加,所引起的孔隙率误差值为负值,且计算孔隙率越大,负值倾向越严重;而成型工艺性不致密导致的孔隙率误差为正值,且在相同工艺条件下,计算孔隙率越大,该误差值越小。故为使总孔隙率误差能较好地反映超轻结构网格孔隙的控制精度,应提高成型时实体部分的致密性。按 45% 设定孔隙率成功地具有复杂结构的零件转化为计算孔隙率为 44.62% 的超轻结构化模型,采用高致密性激光选区熔化工艺成型后,实测孔隙率为 42.94%,无悬垂面的内壁壁厚误差 ≤ 0.06 mm,达到了较好的超轻结构控制效果。

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 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172506.1547

Pore forming results of controllable ultra-light structured parts by selective laser melting

WU Wei-hui^{1*}, YANG Yong-qiang², XIAO Dong-ming³,
CHEN Chang-yong¹, MAO Gui-sheng¹

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

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of
Technology, Guangzhou 510640, China;

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

* Corresponding author, E-mail: wuweihui_068@163.com

Abstract: In this paper, the additive manufacturing of automatic ultra-light structural metal parts

收稿日期:2016-11-02;修订日期:2017-03-09.

基金项目:国家自然科学基金(No. 51405156);广东省高等学校优秀青年教师培养计划资助项目(No. Yq2013149);
广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(No. 2013LYM_0083)

with controllable parameters, such as porosity, was researched. Through block shaped parts and a part with complicated structure, the pore forming results of controllable ultra-light structural parts manufactured by selective laser melting was analyzed. Influences of forming technology on porosity of ultra-light structural parts were mainly discussed. The result is showed; through numerical calculation of computer, block shaped CAD model can be rapidly and automatically transformed into a controllable ultra-light structural model. Moreover, the calculation porosity error is controlled within $\pm 2\%$. The experiment also shows that laser deep penetration phenomena may lead to the increase of inner wall thickness for the dangling surface, causing the negative value for the porosity error. Furthermore, the larger the calculation porosity is, the worse the negative value is. On the other hand, non-compactness of forming process may induce positive porosity error. Under the same technological condition, the larger the calculation porosity is, the smaller the error value of porosity is. In order to make the total error value of porosity can better reflect the control accuracy of the ultra-light structured pore, the density of material part of the object should be improved at the time of forming. Parts with complex structure have been successfully transformed into ultra-light structured model with 44.62% of calculation porosity according to 45% set porosity. High-density selective laser melting technology is used in this paper with 42.94% of the actual measurement porosity and ≤ 0.06 mm of inner wall thickness error for the surface without dangling surface, which realizes a better ultra-light structured control effect.

Key words: Additive manufacturing; selective laser melting; ultra-light structure; metal parts

1 引言

由于具有重量轻、比强度高、散热性好等优点,超轻结构(亦称为超轻多孔结构)在航天航空、汽车、生物医学等领域应用潜力巨大^[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,采用增材制造技术直接制造超轻结构零件也是当前该技术的典型应用之一^[2-3]。

已有不少研究者提出了各种基于激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)增材制造技术^[3]的超轻结构金属零件设计方法及制造工艺: Van B S^[4] 等人采用激光选区熔化制备了 Ti6Al4V 多孔结构,并从孔洞尺寸、孔隙形貌、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; MARKUS L^[5] 等人成功采用激光选区熔化方法较好地制备了超轻多孔结构的生物植入体; YAN CH Z 等^[6] 评估了采用 SLM 技术制造超轻结构零件的可行性及性能,针对 SLM 技术构建了一种有自支撑功能的孔隙单元,结果表明 SLM 技术可以在不需要支撑的前

提下,较好地制造出多孔结构零件。王迪^[7]结合理论分析和工艺试验从孔的结构形式、最小尺寸特征、临界倾斜角和制造分辨率等方面研究了孔隙结构设计应该遵循的规则。

对所有超轻结构而言,孔隙率是超轻多孔金属零件最重要的设计参数,该参数决定了这类零件的许多功能特征,如弹性模量、弯曲强度、疲劳强度等力学性能^[8-11],压电系数及介电常数等压电性能^[12],导热系数及换热系数等热学性能^[13]等。当前越来越多的增材制造软件支持零件自动按设定孔隙率生成超轻结构模型,但这些软件多数是针对成型后内腔无废料的熔融沉积成型工艺,例如著名增材制造设备供应商 STRATASYS 公司的熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling, FDM)设备数据处理软件,可以对导入的 STL 格式零件模型进行自动生成蜂窝网格状超轻结构^[14]。

由于金属零件 SLM 增材制造过程中,需考虑的设计与制造工艺匹配问题更多(例如在成型内腔结构时,内腔结构零件必须有排出多余粉末材料的孔隙),而有增材制造软件还较少涉及将实体金属零件模型自动转化为 SLM 工艺可处理的可控超轻结构,但有少量研究已在展开中,例如肖

冬明^[15]基于有限元思想,提出了一种基于形函数控制的多孔结构自动建模方法。该方法以形函数控制多孔单元的构型,然后将多孔单元映射到零件的三维 CAD,得到超轻结构化的零件。但总体而言,超轻结构模型自动化构建方法仍十分单一、超轻结构可控性差(例如无法快速自由更改孔隙率等参数)、模型构建方法过于复杂,因此仍需进一步发展更适合 SLM 工艺的金属零件自动超轻结构化方法。

与 FDM 喷丝成型不同,由于 SLM 采用熔化选区内粉末,而选区外粉末材料仍保留在原地的成型原理,并且成型过程中存在激光深穿透粉末层^[16]、成型工艺性不致密(实体部分存在残余孔隙)等现象^[17-18],激光选区熔化成型的超轻结构化金属零件的孔隙控制更为困难,目前还很少有人对这些问题展开研究。为此,本文采用面向 SLM 工艺的可控超轻结构化零件模型,结合 SLM 成型实验,研究了可控超轻结构化零件的孔隙控制效果。

2 零件可控超轻结构自动生成方法

为使 SLM 成型的超轻结构中的粉末容易去除,零件超轻结构化处理时,须保证超轻结构的孔隙与外界相连通,同时,为使生成的金属超轻结构更具实用性,超轻结构零件最好具有蒙皮结构。因此,本文所述的超轻结构零件是一种类蜂窝超轻结构,在沿 Z 轴的成型方向上,有 3 种超轻结构层片类型^[19]:

(1) 蜂窝层

蜂窝层如图 1、图 2 标号③所示,分为平行于切片轮廓的蒙皮和在切片轮廓内部的网格两部分,蒙皮厚度等于设定壁厚值。网格孔隙单元主要设计为简单易成型的正方形蜂窝结构,因而网格主要为正方形网格,但在靠近蒙皮的位置,由于层片尺寸不足以按同一棱长值提供整数倍的正方形网格数,可能存在棱长小于正方形网格棱长的网格单元。

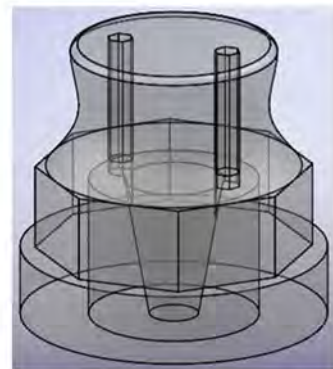
(2) 泄粉层

为使上述蜂窝层段的蜂窝孔与外界连通,在上述致密层下设计了泄粉层(图 1、图 2 标号②),泄粉层由带泄粉孔的蒙皮及开孔泡沫型孔隙组成。孔隙尺寸与上述正方形元胞尺寸相同。在沿

轮廓包围盒设置的 1 个三角形的泄粉孔,以便成型后让粉末流出超轻网格。

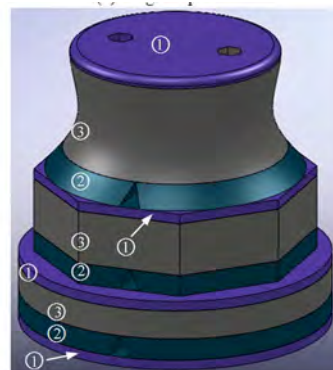
(3) 致密态层

在遇到层片面积突变的层(零件首层及末层也应视为层面积突变层),该层之前或之后的很多层都是致密态层(图 1、图 2 标号①);此外,当某些层片面积小于正方形蜂窝网格单元面积时,该处也是致密态层。致密态层的厚度等于设定壁厚值。



(a) 原始零件模型(透明显示)

(a) Original part model



(b) 超轻结构化零件模型

(b) Ultra-light structured part model

图 1 金属零件的超轻结构组成(①蜂窝层;②泄粉层;③致密态层)

Fig. 1 Constructions of ultra-light structured metal part model (①Cellular layer; ②Powder draining layer; ③Dense layer)

增材制造必须对 3D 模型进行切片处理,上述每个层片都来源于 Cli(Common Layer Interface)切片数据格式表达的原始零件 CAD 模型,可控地自动生成上述超轻结构化零件的过程如下:

(1)用软件(例如 Magics 软件)将 STL 格式

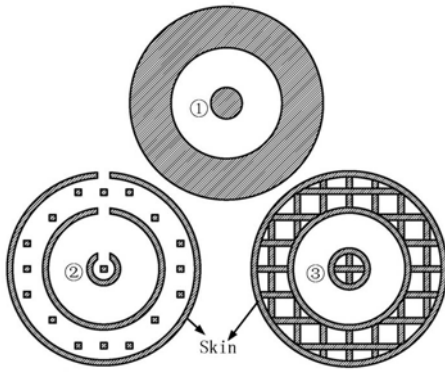


图 2 层片类型(①蜂窝层;②泄粉层;③致密态层)

Fig. 2 Layer types (① Cellular layer; ② Powder draining layer; ③ Dense layer)

表达的原始 CAD 模型进行切片处理,生成 Cli 格式数据;

(2)根据设定孔隙率、设定壁厚、初始棱长等参数对 Cli 格式数据中的每个层片进行迭代运算,获得指定误差范围的孔隙特征数据;

(3)根据孔隙特征数据,生成类蜂窝超轻结构的切片数据;

(4)对类蜂窝超轻结构的切片数据进行扫描路径规划,获得驱动激光选区熔化设备的扫描路径数据。

第(2)步的计算方法可描述如下:

给出网格壁厚设定值及单元棱长初值后,可计算超轻结构化金属零件的计算孔隙率:

$$\phi_c = \frac{V_p}{V_0} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i t)}{V_0}, \quad (1)$$

式中, ϕ_c —计算孔隙率; V_0 —原始零件的总体积; V_p —超轻结构化后零件的孔隙部分体积; t —层厚; n —零件的层片总数; S_i —超轻结构化后某层片孔隙部分面积,由设定壁厚、棱长决定。

式(1)中,根据设定孔隙率、设定壁厚、棱长(第一次计算取棱长初值)等参数,通过编程对输入的 Cli 切片轮廓数据进行处理,逐层计算各层按这些参数生成的孔隙部分面积 S_i ,与层厚 t 相乘后得到一层内的孔隙体积,各层孔隙体积累加,然后与零件总体积相除,可得零件超轻结构部分的计算孔隙率。

通过数值分析方法,逐次改变网格单元棱长值,迭代计算新的计算孔隙率,可使计算孔隙率逐步逼近设定孔隙率,这样即可确定最终的超轻结

构孔隙特征。

如此,只要改变设定孔隙率或设定壁厚,即可通过程序快速调整零件的超轻结构特征,即实现了零件的可控超轻结构化处理。

3 实验及讨论

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。采用自主研发的 Metal3DP-100 SLM 设备作为实验平台,该设备最大成型尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$,最小铺粉层厚为 $20 \mu\text{m}$,配备最大功率为 200W 的连续式光纤激光器,激光聚焦光斑为 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

实验采用 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的方块 CAD 模型及图 1(a)所示的复杂结构零件作为自动超轻结构化孔隙生成效果检验对象。对方块 CAD 模型进行自动超轻结构化处理后,所得的类蜂窝自动超轻结构化零件模型如图 3 所示。

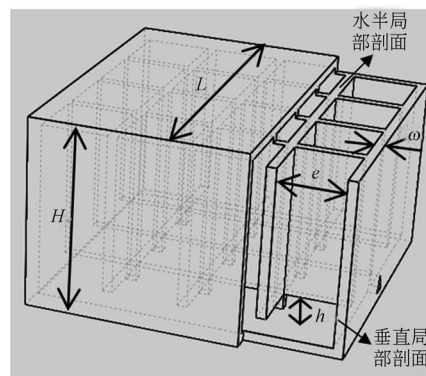


图 3 超轻结构化方块剖面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ultra-light structured block

按上述思路,根据设定孔隙率、设定壁厚、网格单元棱长初值等参数对零件进行超轻结构化处理,将所得数据导入 SLM 设备,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。

成型后通过人工振动及超声波清洗从泄粉孔处清理出超轻结构化零件内部的粉末,超声波清洗以 20 kHz 及 40 kHz 频率各清洗 10 min。清洗后将零件烘干,并用白蜡密封住零件泄粉孔,最后采用基于排水法的 MH-300A 电子密度计测定零件孔隙率。为观察超轻结构的内部孔隙,对测

量孔隙率后的零件采用线切割剖分,并打磨抛光,再采用体视显微镜或高分辨率数码相机观察分析。

3.2 实验结果及分析

3.2.1 设定孔隙率与计算孔隙率

由于所述超轻结构模型是通过算法在 CAD 三维原始图形基础上通过迭代计算得到的,因此,存在孔隙率计算误差,为此,对方块零件模型进行自动超轻结构化处理,所得的方块设定孔隙率与计算孔隙率及两者的误差如表 1 所示。

表 1 超轻结构化方块的设定孔隙率与计算孔隙率及两者误差
Tab. 1 Setting values and calculating values of porosity and errors for ultra-light structured block

设定孔隙率(%)	计算孔隙率 误差(%)		计算孔隙率 误差(%)	
	(%) $(30\mu\text{m}$ 层厚)	$(30\mu\text{m}$ 层厚)	(%) $(40\mu\text{m}$ 层厚)	$(40\mu\text{m}$ 层厚)
20	20.86	0.86	20.64	0.64
30	30.45	0.45	30.02	0.02
40	41.15	1.15	40.93	0.93
45	46.55	1.55	46.29	1.29
50	51.92	1.92	51.99	1.99
60	59.12	-0.88	59.07	-0.93
70	70.67	0.67	71.35	1.35
80	78.03	-1.97	78.89	-1.11

由表 1 可知,计算孔隙率与设定孔隙率的误差可控制在 $\pm 2\%$ 以内,计算精度较高。对于图 1(a)所示的复杂零件的 CAD 模型,设定孔隙率为 45%,设定壁厚为 0.70 mm,经自动超轻结构化后,计算孔隙率为 44.62%,孔隙率误差为 -0.38% 。

由于设定孔隙率与计算孔隙率的差值是由数值计算产生的,因此,在 SLM 成型过程中,实测孔隙率的对比参照对象应设定为计算孔隙率,这样才能如实地反映成型工艺因素对实测孔隙率的影响。

3.2.2 超轻结构化方块成型件的孔隙分析

图 4(彩图见期刊电子版)所示是成型超轻结构化方块的实测孔隙率及孔隙率误差曲线。由该图可知,随计算孔隙率的增加,孔隙率误差值的负向趋势越来越明显,例如,采用高致密成型工艺时,在计算孔隙率值为 41.15%时,孔隙率误差值为 -4.51% ,而计算孔隙率为 78.03%时,孔隙

率误差值增加到 -11.33% 。另外,由图 4 也可知,采用高致密成型工艺以及采用低致密成型工艺对孔隙率误差会造成很大的不同。

孔隙率误差可认为是由于成型后零件的质量、体积与超结构化零件计算模型间存在的误差导致的。

对于体积误差,可在切片时对切片轮廓进行光斑补偿,以及在成型后进行喷砂、抛光等后处理操作,来有效防止熔池宽度溢出零件理想切片边界,以及防止外部壁面粘附的粉末颗粒对成型精度的影响^[20]。本实验中,切片轮廓采用 0.085 mm 的补偿量,即激光扫描时,激光光斑沿原始图形轮廓内缩 0.085 mm 所得的轮廓行走。对实验获得的方块状超轻结构零件经过喷砂处理后,发现其 X、Y 方向的外形成型精度可达 ± 0.04 mm, Z 方向的精度可达 ± 0.06 mm,都较高。因此,可忽略超轻结构化零件体积对孔隙率误差的影响。

因此,成型后零件超轻结构孔隙率主要是由于质量误差造成的,产生质量误差的原因包括成型壁厚精度以及成型工艺性不致密。

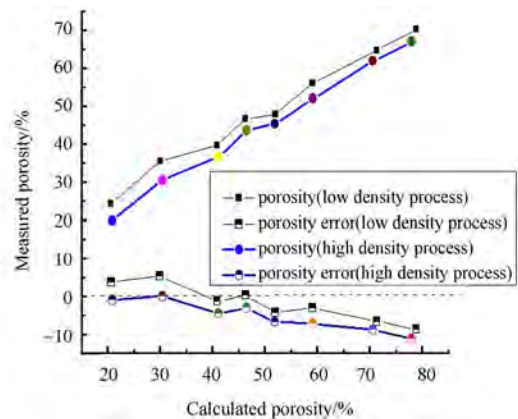


图 4 超轻结构化方块试样的实测孔隙率及孔隙率误差曲线(高致密工艺:扫描速度 -320 mm/s,激光功率 -140 W,铺粉层厚 $-30\mu\text{m}$;低致密工艺:扫描速度 -380 mm/s,激光功率 -140 W,铺粉层厚 $-40\mu\text{m}$)

Fig. 4 Measured porosity and porosity error curves of ultra-light structured block samples (high density process: scanning speed -320 mm/s, laser power -140 W, powder layer thickness $-30\mu\text{m}$; low density process: scanning speed -380 mm/s, laser power -140 W, powder layer thickness $-40\mu\text{m}$)

3.2.2.1 成型壁厚精度所导致的孔隙率误差

由于本超轻结构内壁的壁厚精度无法通过喷砂、打磨等后处理工艺来提高。因而成型壁厚误差会导致孔隙率误差。

图 5 为超轻结构化方块试样的剖面照片,其可显示水平以及垂直两个方向的内壁成型情况。由该图可知,水平悬垂内壁(标号 a 处)底部呈锯齿状,与垂直内壁平直的形貌有很大的不同,并且,两种内壁的壁厚值也很不相同:水平悬垂内壁厚度平均值经测量为 0.55 mm(标号 a 处),相对预设壁厚要大 37.5%左右;而垂直内壁厚度平均值为 0.41 mm(标号 b 处),与设定壁厚值相差不大。

造成这种现象的原因是激光深穿透了水平悬垂内壁底面粉层,在 SLM 的成型过程中,激光束穿透当前成型层,熔化上一已成型层的部分体积,从而使两层之间产生冶金结合实现零件层与层间的搭接^[3]。由于超轻结构的水平悬垂内壁底面下部就是粉床,这意味着将有部分多余粉末被熔化或烧结粘附到当前层上,从而使得水平悬垂内壁的厚度比设定壁厚要厚,并且以粉末作为零件悬垂结构的支撑,熔池因重力和毛细管力的作用会部分沉陷到粉末中^[3],造成了悬垂底部出现锯齿状不平整表面。由于内壁厚度占据了理想超轻结构孔隙的一部分空间,因此,增加的内壁厚度使孔隙率产生负向误差,设水平悬垂内壁厚度增加量为 l ,悬垂底面的面积为 S_l ,增加的内壁密度为 ρ_l ,忽略垂直内壁的壁厚误差,则内壁厚度增加导致的孔隙率误差可表达为:

$$\Delta\phi_1 = -\frac{lS_l\rho_l}{V}. \quad (2)$$

对于相同的成型参数,上式中 l 、 ρ_l 保持恒定,但随计算孔隙率的增加,棱边数减少,垂直侧壁的数量减少,悬垂内壁底面面积被作为实体部分的垂直侧壁占用的面积也相应减少,这将导致作为悬垂面的面积 S_l 将增加,因而负向误差值也越来越大,这就很好地解释了图 4 所示的孔隙率误差曲线为何随计算孔隙率的增加而负值趋向越来越大的现象。

3.2.2.2 SLM 增材制造工艺的成型致密性对零件孔隙率的影响

尽管 SLM 工艺可直接实现近乎完全致密的金属零件成型,但实际上,要达到完全致密的工艺

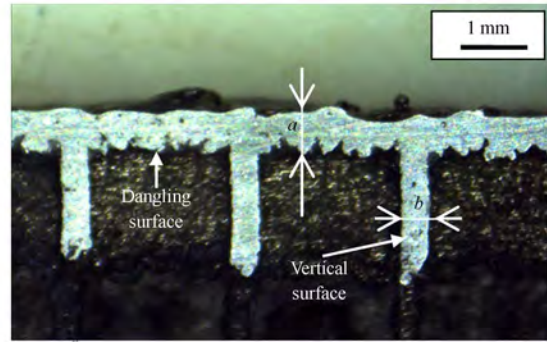


图 5 蒙皮底部悬垂面与垂直侧壁的剖面照片(扫描速度:320 mm/s,激光功率:140 W,铺粉层厚:30 μm ,设定壁厚:0.40 mm,设定孔隙率:70%)

Fig. 5 Section photo of dangling surface under skin and vertical side wall (scanning speed: 320 mm/s, laser power: 140 W, powder layer thickness: 30 μm , setting wall thickness: 0.40 mm, setting porosity: 70%)

要求相当苛刻。一般情况下,SLM 成型件总或多或少存在一些微细孔隙,这给超轻结构的孔隙率控制也带来不良影响。一个 SLM 成型的超轻结构化零件的计算孔隙率可表达为:

$$\phi_c = \frac{V_{hl}}{V}, \quad (3)$$

实测孔隙率可表达为:

$$\phi = \frac{V_{h0} + V_{hl}}{V}, \quad (4)$$

式中:

$$V_{h0} = (V - V_{hl})\phi_{\text{solid}}, \quad (5)$$

ϕ_{solid} —相同体积零件采用致密成型方式时的孔隙率; ϕ_c —超轻结构零件的理论孔隙率, $0 < \phi_c < 1$; ϕ —实测孔隙率; V_{h0} —超轻结构中预期致密成型部分(如棱边、蒙皮)的微细孔隙体积; V —超轻结构化之前的零件总体积; V_{hl} —超轻结构的网格孔体积。

由式(3)–(5)可推导出实测孔隙率与理论孔隙率之间的误差值:

$$\Delta\phi_2 = \phi - \phi_c = (1 - \phi_c)\phi_{\text{solid}}, \quad (6)$$

因此,成型工艺性不致密($\phi_{\text{solid}} > 0$)现象引起的超轻结构化零件的孔隙率误差为正值。减小成型工艺性不致密的方法有多种,例如通过增加成型激光功率、减小扫描速度或采用薄的铺粉厚度等^[13]。本研究中,在成型无超轻结构的原始方块零件时,采用高致密成型工艺时测得的相对密度

为 98.57%,采用低致密成型工艺时测得的相对密度为 89.14%。在采用高致密性成型工艺后,图 4 所示的孔隙率误差值负向偏离 0 的程度更明显。这是因为不致密工艺所导致的孔隙率误差是正向的,部分抵消了由上述内壁壁厚增加所导致的孔隙率负向误差值,明显地,采用低致密性成型工艺会使抵消力度加大,从而引发了孔隙率误差曲线的偏移。另外,由式(6)也可知,当成型的工艺参数(扫描速度等)一定时,计算孔隙率 ϕ_c 越大,零件成型工艺性不致密因素引起的孔隙率误差值就越小,因而抵消内壁壁厚增加造成的孔隙率误差的力度也有所减弱,这也进一步使实测孔隙率误差的负向趋势随计算孔隙率 ϕ_c 的增加而增大(图 4)。

由于成型工艺不致密性所产生的孔隙是在超轻结构化零件的棱边、蒙皮等实体内部,这部分孔隙不能代表超轻结构网格孔隙的控制情况。但是,上述内壁壁厚增加的位置却在超轻结构网格孔隙内,其可反映超轻结构网格孔隙的控制误差,上述的两种误差中,一种误差会被另一种误差抵消。因此,为使总孔隙率误差能较好地反映超轻结构网格孔隙的控制效果,应尽可能采用高致密工艺成型技术。

综上所述,高致密工艺成型的孔隙率误差曲线可较为真实地反映超轻结构的孔隙成型精度,在 20%~45% 的计算孔隙率内,实测超轻结构化方块零件孔隙率与设定孔隙率的误差绝对值可控制在 5% 以内,能较好地达到控制孔隙率目的。但随着设定孔隙率增加,实测孔隙率误差值较大,当计算孔隙率为 78.03% 时,孔隙率误差已达 -11.14%。

3.2.3 一个复杂零件的超轻结构化成型效果分析

对上述设定孔隙率为 45% 的已超轻结构化复杂零件进行激光选区熔化成型,成型过程中不添加支撑,直接在基板上成型,成型后通过线切割将零件与基板分离,得到了图 6 所示零件。

该图显示,所得零件除多了几个泄粉孔外,与图 1 的 CAD 模型外观一致。按图 7 标号 o 所示的剖切位置将零件垂直剖分,并对剖面打磨抛光后,得到图 8(a) 所示的零件垂直剖面。再将垂直剖分后的零件在图 8(a) 所示的高度位置进行水平半剖,可以得到零件的 1/2 水平剖面照片(图 8(c))。

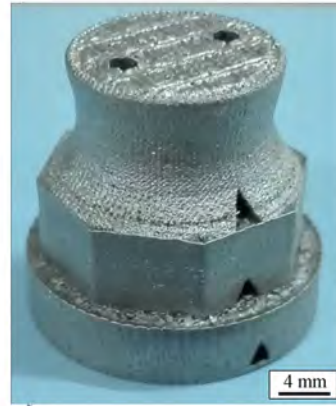
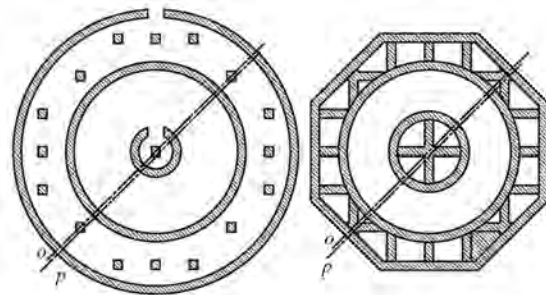


图 6 一个复杂的超轻结构零件照片(扫描速度:320 mm/s,激光功率:140 W,铺粉层厚:30 μ m,设定壁厚:0.70 mm,设定孔隙率:45%)

Fig. 6 The photo of a complex ultra-light structured metal part (scanning speed: 320mm/s, laser power: 140W, layer thickness: 30 μ m, setting wall thickness: 0.70mm, setting porosity: 45%)



(a)泄粉层层片

(b)蜂窝层片

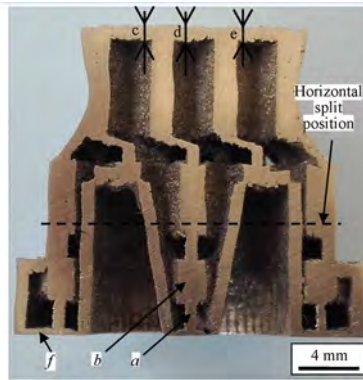
(a) Draining layer

(b) Cellular layer

图 7 垂直剖面位置(a 剖切位置, p 打磨后剖面位置)

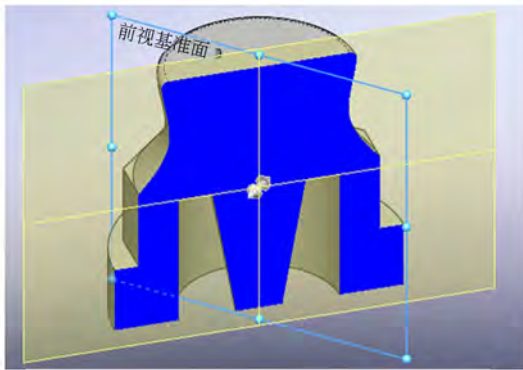
Fig. 7 Vertical section position (a . cutting position, p . section position after polishing)

图 8(a) 显示,零件内部的确形成了复杂的中空网格孔道,与原始零件模型剖面(图 8(b))存在明显差异,形成了预期的超轻结构。但由图 8(a) 可知,泄粉层对应标号 a 处与蜂窝网格层对应的标号 b 处的厚度不一致。这是由于实际剖面位置(图 7 标号 p 处)与理想剖面位置(图 7 中标号 o 处)存在误差导致的:采用线切割剖开零件后,剖面较为粗糙,需经打磨抛光磨去剖面的一薄层,导致实际剖面位置变为图 7 标号 p 处。这时,在泄粉层片处的壁厚就显得比理想剖面位置处的小,在蜂窝层片棱边相交处的壁厚就显得比理想剖面



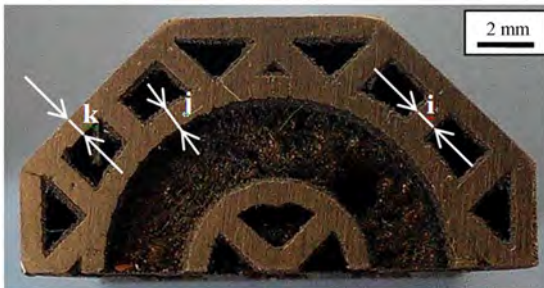
(a) 垂直剖面照片

(a) Vertical section photo



(b) 原始零件模型剖面

(b) Section of original part model



(c) 1/2 水平剖面照片

(c) 1/2 horizontal section photo

图 8 零件剖面照片

Fig. 8 Sections photos of part

位置时大。

正确的垂直内壁壁厚可通过测量图 8(c) 得到: 标号 *i*、*j*、*k* 3 处的壁厚测量值分别为 0.74、0.76、0.74 mm, 与设定值 0.7 mm 的误差小于等于 0.06 mm, 达到了较高控制精度; 图 8(a) 标号 *c*、*d*、*e* 处的内壁壁厚测量值分别为 0.84、0.92、

0.93 mm, 如上所述, 因激光深穿透悬垂面下部粉层的缘故, 误差值较大, 但因悬垂面的面积很小, 故对超轻结构化零件的孔隙率误差影响不大; 图 8(a) 标号 *f* 处的内壁壁厚测量均值为 0.40 mm, 要比设定的壁厚值小很多。这是因为需要将零件从基板上采用线切割方法切下, 但也会将底部一小部分实体 (0.30 mm 厚) 切除掉的缘故, 因而底部处的实际内壁壁厚为 0.70 mm。

如上所述, 本零件选用高致密成型工艺参数, 由图 8(a) 及图 8(c) 可知, 两剖面的表面孔隙的确很少, 因而所测量的孔隙率能较好地反映超轻结构孔隙的控制情况。一般地, 实测孔隙率是由电子密度计直接测量零件密度, 并经下式得到:

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{316L}}, \quad (7)$$

式中 ρ 为实际成型零件 (未从基板切下, 高度自基板平面算起) 的密度; ρ_{316L} 是 316L 不锈钢密度, 取为 7.98 g/cm^3 。

但是, 图 8(a) 标号 *f* 处被切去的部分也会对实测孔隙率造成影响, 为真实地反映实际成型的超轻结构零件的孔隙率情况, 不能通过电子密度计直接测量密度值得到实测孔隙率, 而应采用间接测量法。根据排水法有:

$$\rho = \frac{\rho_w}{1 - \frac{m_{1w} + \Delta m_w}{m_1 + \Delta m}}. \quad (8)$$

根据浮力定律可知:

$$\Delta m_w = \Delta m - \rho_w \Delta V, \quad (9)$$

式中, ρ_w —水的密度, 取 1.00 g/cm^3 ; m_1 —底面切后零件的质量; m_{1w} —底面切后零件在水中的质量; Δm —切去的实体质量; Δm_w —切去的实体在水中的质量; ΔV —切去的实体体积。

式(7)~(9)的 m_1 、 m_{1w} 经电子密度计测量分别为: 16.95 g、13.17 g, 切去的实体体积 ΔV 经测量为 0.79 cm^3 , 质量 Δm 经计算为 0.62g。由此得到该超轻结构零件的实测孔隙率 ϕ 为 42.94%。孔隙率误差仅为 -2.06%。应当指出, 尽管采用了高致密成型工艺, 但成型件仍存在极微量的工艺性不致密孔隙 (1.43%), 超轻结构网格孔隙的实际孔隙率应为 41.51%。即便如此, 也达到了较好的超轻结构孔隙率控制效果。其质量仅为同材质原始零件的 57.06%, 超轻结构化后成型的零件重量明显减少, 实现了可控超轻结构化设计的目的。

为进一步验证复杂可控超轻结构化零件的孔隙率控制效果,采用图1(a)的原始零件模型,分别设定孔隙率为35%、50%、55%进行零件可控超轻结构化处理,并进行了成型验证。所得超轻结构化模型的孔隙率分别是35.94%、47.51%、52.52%,模型在成型时采用了与上述45%孔隙率模型相同的成型参数,获得成型件的实测孔隙率(5次测量取平均值)分别为34.46%、49.18%、51.83%,孔隙率误差都控制在±5%以内,孔隙控制效果良好。

4 结 论

本文分析了面向激光选区熔化工艺的可控超轻结构化零件的孔隙生成效果,研究表明:通过数值计算,按预设孔隙率等参数可将方块CAD模型快速转化为可控超轻结构模型,孔隙率计算误差可控制在±2%以内。激光深穿透现象增加了超轻结构化方块内壁壁厚,也使孔隙率误差为负值,且计算孔隙率越大,负值倾向越严重;而成型工艺性不致密导致的孔隙率误差为正值,并且在

相同的工艺条件下,计算孔隙率越大,该误差值越小。成型工艺不致密性所产生的孔隙不能代表超轻结构网格孔隙的控制情况;但内壁壁厚增加却会导致超轻结构网格孔隙产生实际误差,为使总孔隙率误差能较好地反映超轻结构网格孔隙的控制效果,应尽可能采用高致密工艺成型。按45%设定孔隙率将具有复杂结构的零件转化为计算孔隙率为44.62%的超轻结构化模型,采用高致密激光选区熔化工艺成型后,实测孔隙率为42.94%,无悬垂面的内壁壁厚误差≤0.06 mm,达到了较好的超轻结构控制效果。该复杂结构零件在不同孔隙率下的可控超轻结构化模型成型结果也表明,所成型的超轻结构化零件孔隙率误差控制在±5%以内。

在SLM增材制造中,无论采用那一种金属粉末,在工艺上,都普遍存在成型工艺性不致密、粉末粘附、激光深穿透等工艺现象。本研究以316L不锈钢粉末为例展开研究,对其它粉末材料制成的其它类型超轻结构孔隙控制,也具有较好的指导意义。

参考文献:

- [1] 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.
YAN J. *Multiscale analysis and concurrent optimization for ultra-light metal structures and materials*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007:1-5. (in Chinese)
- [2] 李涤尘,贺健康,田小永,等. 增材制造:实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报,2013,49(6):129-135.
LI D CH, HE J K, TIAN X Y, *et al.*. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013,49(6):129-135. (in Chinese)
- [3] 杨永强,吴伟辉. 制造改变设计-增材制造直接制造技术[M]. 北京:中国科学技术出版社,2014:20-21.
YANG Y Q, WU W H. *Manufacturing Changes Design-3D Printing Direct Manufacturing Technology*[M]. Beijing: China Science and Technology Press,2014:20-21. (in Chinese)
- [4] VAN B 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.
- [5] MARKUS L, SIMON H, WILHELM M. Manufacturing of individual biodegradable bone substitute implants using selective laser melting technique[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2011,97A(4):466-471.
- [6] YAN CH Z, LIANG H, AHMED H, *et al.*. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2012, 62: 32-38.
- [7] WANG D, YANG Y Q, RUICHENG L, *et al.*. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM)[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2013,213(10):1734-1742.
- [8] 叶琦,石新莹,曹姗姗,等. 多孔钛孔隙率和孔隙尺寸对其力学性能及细胞相容性的影响[J]. 口腔材料器械杂志. 2013,22(1):7-21.
YE Q, SHI X Y, CAO SH SH, *et al.*. Influence of porosity and pore size on mechanical properties and

- cytocompatibility of porous titanium [J]. *Chinese Journal of Dental Materials and Devices*, 2013, 22(1):7-21. (in Chinese)
- [9] YAVARI S A, AHMADI SM, WAUTHLE R, *et al.*. Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2015, 43:91-100.
- [10] ALSALLA H, HAO L, SMITH C. Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 669:1-6.
- [11] MAHSHID R, HANSEN H N, HØJBJERRE K L. Strength analysis and modeling of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting for tooling applications[J]. *Materials & Design*, 2016, 104:276-283.
- [12] 曾涛,董显林,毛朝梁,等. 孔隙率及晶粒尺寸对多孔 PZT 陶瓷介电和压电性能的影响及机理研究 [J]. *物理学报*, 2006, 55(6):3073-3079.
- ZENG T, DONG X L, MAO CH L, *et al.*. Effects of porosity and grain sizes on the dielectric and piezoelectric properties of porous PZT ceramics and their mechanism [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(6):3073-3079. (in Chinese)
- [13] 刘汉强,赵鹏,浦玉萍. 孔密度和孔隙率对泡沫铜换热性能的影响[J]. *粉末冶金工业*, 2015, 25(2):46-51.
- LIU H Q, ZHAO P, PU Y P, *et al.*. Influence of pore density and porosity on heat transfer performance of copper foam[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2015, 25(2):46-51. (in Chinese)
- [14] STRATASYS. FDM for end-use parts: tips and techniques for optimization [EB]. <http://www.techforever.com/userfiles/image/anli/PDF/SYSS-TAG-EndUseParts-04-11.pdf>[2013-8-25].
- [15] 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.
- XIAO D M. *Moldeling of porous structure of implants and direct manufacturing by selective laser melting*[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 刘睿诚. 激光选区熔化成型零件表面粗糙度研究及在免组装机机构中的应用 [D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- LIU R CH. *The study on surface roughness of metal parts fabricated by selective laser melting and the application on Non-assembly Mechanisms* [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 许瑞华,黎向锋,左敦稳,等. 扫描速度对钛合金 NiCoCrAlY 熔覆涂层显微组织及硬度的影响 [J]. *稀有金属*, 2014, 38(5):807.
- XU R H, LI X F, ZUO D W, *et al.*. Microstructure and hardness of NiCoCrAlY coatings on titanium alloy by laser cladding with different scanning speeds [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2014, 38(5):807. (in Chinese)
- [18] 李瑞迪. 金属粉末选择性激光熔化成形的关键基础问题研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2010.
- LI R D. *Research on the key basic issues in selective laser melting of metallic powder* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [19] 吴伟辉,肖冬明,毛星. 金属零件自动超轻结构化设计及激光增材制造 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11):124-131.
- WU W H, XIAO D M, MAO X. Automatic design and laser additive manufacturing of super-light structure of metal part[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11):124-131. (in Chinese)

作者简介:



吴伟辉(1979—),男,广东化州人,博士,副教授,博士后(已出站)。2001年、2004年于中南大学分别获得学士、硕士学位,2007年于华南理工大学获得博士学位,现为韶关学院物理与机电工程学院教师,主要从事激光材料合成及成型方面的研究。E-mail: wuweihui_068@163.com



杨永强(1961—),男,河北定州人,教授,博士生导师,1982年、1987年、1993年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光加工、快速原型以及金属材料等方面的研究。E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn