

变F-RD型点阵结构的参数分析与验证

郝博^{1,2,3}, 张鹏^{1,2}, 朱积名^{1,2}

(1. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对常规F-RD型点阵结构进行变形设计, 提出一种基于隐式表达式的TPMS(three-period minimal surface)参数设计方法, 通过改变输入隐式表达式的变形参数来设计点阵结构; 研究了F-RD型点阵结构变形参数和阈值对孔隙率的影响规律, 提出了针对孔隙率分析的单参数和混合参数方法, 建立了变形参数和阈值对变F-RD型点阵结构的映射关系, 可以生成特定形状和孔隙率的F-RD型点阵结构; 通过金属激光烧结成型原理制备AlSi10Mg样件, 验证了变形参数和阈值对实际孔隙率的影响关系, 为F-RD型点阵结构的工程设计和应用提供参考。

关键词: 变F-RD型点阵结构; 参数分析; TPMS; 孔隙率; 点阵结构设计

中图分类号: TH 122 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)09-1294-08

Parameter Analysis and Verification of Variable F-RD-Type Lattice Structure

HAO Bo^{1,2,3}, ZHANG Peng^{1,2}, ZHU Zhi-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Vibration and Control of Aerodynamic Equipment, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: ZHANG Peng, E-mail: zpeng4566@163.com)

Abstract: Aiming at the conventional F-RD-type lattice structure for deformation design, a TPMS parameter design method based on implicit expression is proposed to design the lattice structure by changing the deformation parameter inputted into the implicit expression; the influence law of the deformation parameter and the threshold value on the porosity of the F-RD-type lattice structure is investigated, the single parameter and mixed parameter methods for porosity analysis are proposed, the mapping relationship between the deformation parameter and the threshold value on the variable F-RD-type lattice structure is established, and the F-RD-type lattice structure with specific shapes and porosity can be generated; through the AlSi10Mg samples prepared by the metal laser sintering molding principle, the influence relationship of the deformation parameter and the threshold value on the actual porosity is verified, which provides a reference for the engineering design and application of TPMS lattice structures.

Key words: variable F-RD-type lattice structure; parametric analysis; TPMS; porosity; lattice structure design

三周期极小曲面(TPMS)是一类拥有三个周期性方向的曲面, TPMS的特殊结构使其在许多领域中具有广泛的应用, 如航空航天、光电材料、生物医学材料等, 具有周期孔隙形态的TPMS型点

阵结构拥有轻质高强的特性, 是应用于轻量化设计的理想结构^[1]. 此外, 通过对TPMS型点阵结构和性质的深入研究, 还可以为新结构材料的设计提供有价值的指导. 自1984年Schwarz首次发现

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 装备预研领域基金快速扶持项目(80923020104).

作者简介: 郝博(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

Schwarz P面以来, TPMS的研究已经取得了许多重要进展. 研究者们发现了多种不同类型的TPMS, 并深入探讨了它们的结构、性质等方面的问题.

Alkebsi等^[2]利用点阵结构拓扑优化技术对三维框架中的点阵进行微观结构设计, 通过使用派生的隐式曲面建模优化了点阵结构的机械性能. Yang等^[3]讨论了环状细胞结构(gyroid cellular structures, GCS)的旋转对称性, 提出了一种采用结构简化和解析解的方法, 得出了体积分数解析解的合理性. Al-Ketan等^[4]证明了TPMS的力学性能优于相同相对密度的八角桁架晶格. Lu等^[5]利用数值均质化方法分析了TPMS中支架的各向异性弹性行为. 李祥等^[6]研究了G单元模型隐函数参数对孔隙率、孔径、杆径等孔隙结构特征的影响规律, 设计出了孔隙率约为77%, 孔径分别为300, 500 μm 的均质孔隙结构. 石志良等^[7]研究Gyroid单元多孔结构的参数化设计方法, 采用激光选区熔化技术制备出孔隙率为60%和75%的常规和变形Gyroid单元多孔钛合金样件, 研究表明, 在相同孔隙率的情况下, 长轴在压缩方向上的变形Gyroid单元结构具有更优的力学性能. 杜义贤等^[8]采用布尔运算设计了I-WP型空心多孔结构, 发现I-WP型空心多孔结构较其基础结构具有更高的等效体积模量和更强的静态承载能力. Yoo^[9]提出了一种利用三周期极小表面内孔结构进行人体组织三维非均相多孔支架设计的有效方法, 在保持基于TPMS的单元库优势的同时, 具有精确控制任意形状支架内空间孔隙率分布的潜在优势. Li等^[10]研究了TPMS中支柱基和片材陀螺均匀分级结构的结构力学行为和吸能能力, 证明了在压缩试验下, 不同类型和梯度的陀螺细胞结构可以实现不同的变形行为和力学响应.

本文基于隐式表达式对F-RD型点阵结构进行设计建模, 针对变F-RD型点阵结构进行参数化设计, 提出单参数分析方法和混合参数分析方法, 建立多参数与TPMS点阵结构表征参数之间的映射关系模型, 揭示隐式表达式中的多参数对变F-RD型点阵结构的影响规律, 通过实验进行分析验证.

1 原理及方法

1.1 TPMS的数学表征

TPMS是极小曲面(平均曲率为0的曲面)的

特殊形式之一, TPMS有很多方式可以进行表达, 目前常用的近似TPMS公式($\varphi(\mathbf{r})$)如式(1)所示:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^K A_k \cos\left[\frac{2\pi(h_k \mathbf{r})}{\lambda_k} + P_k\right] = C. \quad (1)$$

其中: A_k 是函数的振幅因子; λ_k 是三角函数的周期; \mathbf{r} 为笛卡尔坐标系中3个坐标轴的单位矢量; P_k 是函数表达式的相对移动量; C 是阈值; h_k 为 k 个格矢量.

F-RD型TPMS可以在薄壁上形成稳定的几何结构, 具有低能量状态、高稳定性和可控性等优点, 常规F-RD型点阵结构隐式表达式如式(2)所示:

$$\varphi(\mathbf{r}) = 4\cos(x)\cos(y)\cos(z) - [\cos(2x)\cos(2y) + \cos(2y)\cos(2z) + \cos(2z)\cos(2x)] < C. \quad (2)$$

变形的F-RD型点阵结构是在常规F-RD型点阵结构的基础上, 设置变形参数 a, b , 变形的F-RD型点阵结构的隐式表达式如式(3)所示:

$$\varphi(\mathbf{r}) = 4a\cos(x)\cos(y)\cos(z) - b[\cos(2x)\cos(2y) + \cos(2y)\cos(2z) + \cos(2z)\cos(2x)] < C. \quad (3)$$

本文采用体积为20 mm×20 mm×20 mm的立方体作为F-RD型点阵结构的建模单元, TPMS将三维空间分为实体部分与孔隙部分, 定义 $\varphi(\mathbf{r}) < C$ 为实体部分, $\varphi(\mathbf{r}) > C$ 为孔隙部分, 常规F-RD型曲面和单元如图1所示.

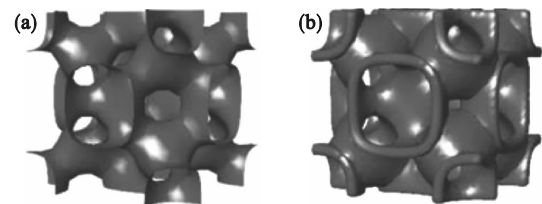


图1 常规F-RD型曲面和单元

Fig. 1 Conventional F-RD surfaces and elements
(a)—F-RD型曲面; (b)—F-RD型单元.

点阵结构常用的表征参数有孔隙率、比表面积等, 其中孔隙率是指模型空间内部的孔隙体积占模型总体积的百分比, TPMS型点阵结构孔隙率 P 计算公式如式(4)所示:

$$P = \left(\frac{V - V_0}{V}\right) \times 100\%. \quad (4)$$

其中: V 为点阵结构单元的整体空间体积; V_0 为点阵结构单元中实体的体积. 由于本文采用立方体结构作为点阵结构的建模单元, V 为8 000 mm^3 , 式(4)可以简化为

$$P = \left(1 - \frac{V_0}{8\,000}\right) \times 100\%. \quad (5)$$

1.2 TPMS的参数化设计

基于Rhinceros的Grasshopper(GH)开发设

计 TPMS 型点阵结构的参数设计系统,图 2 为 TPMS 型点阵结构的参数化设计运算器插件,该插件是通过封装运算器实现的,运算器插件输入端口为 9 个,输出端口为 1 个,该插件主要作用是输入隐式表达式生成对应的 TPMS 型点阵结构.其中, model 为 TPMS 型点阵结构的单元空间; Implicit expressions 是需要输入的 TPMS 的隐式表达式; iterate 是迭代次数,迭代次数越大生成的 TPMS 型点阵结构曲面越光滑平顺; threshold 是式(1)中的阈值 C ; boolean 是布尔值,通常为 True; n_x, n_y, n_z 是直角坐标系下 3 个坐标轴方向上的胞元个数; thickness 是生成 TPMS 型点阵结构的厚度.

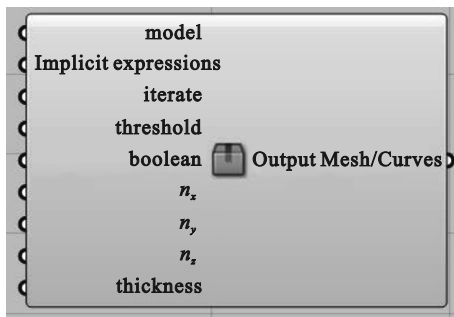


图 2 TPMS 型点阵结构参数化设计运算器
Fig. 2 TPMS lattice structure parametric design calculator

2 多参数对 F-RD 型点阵结构的影响

TPMS 由多个参数进行控制,不同的参数设

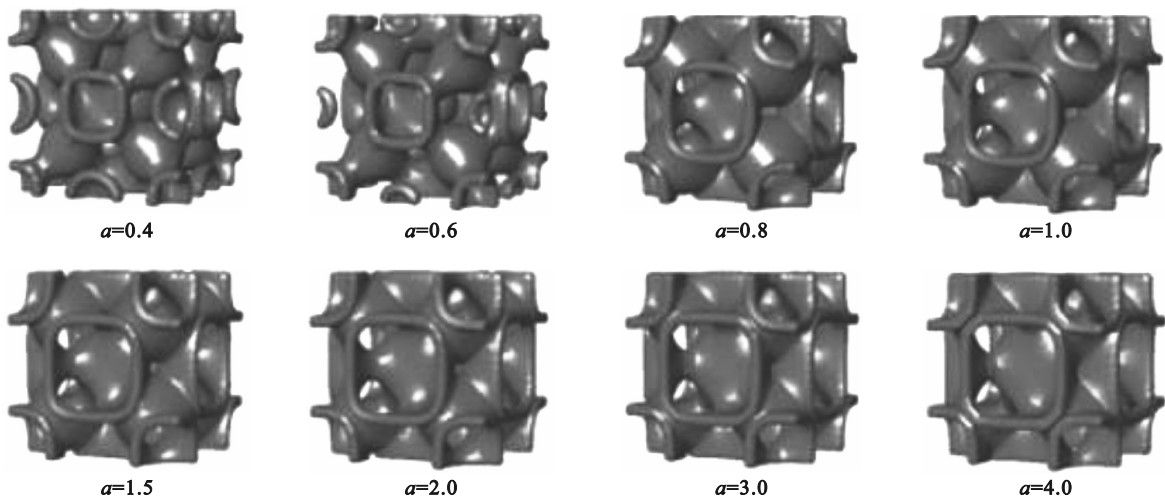


图 3 a 值对 F-RD 型点阵结构形状的影响

Fig. 3 Influence of a value on the shape of the F-RD lattice structure

置能够生成不同形状、不同特性的 TPMS 型点阵结构,通过调整这些参数,可以简单且直接地控制点阵结构的形状和性能,其中孔隙率和比表面积是 TPMS 型点阵结构中较为重要的参数.针对 F-RD 型点阵结构来说,若变形参数 a, b , 阈值 C 等参数和 F-RD 型点阵结构的孔隙率及比表面积之间的关系不明确的话,那么不利于构建和优化 F-RD 型点阵结构.本节将研究 F-RD 型点阵结构隐式表达式中多个参数与孔隙率的关系,并分析其影响规律.

2.1 变形参数 a, b , 阈值 C 与曲面形状的关系

在式(3)中,变形参数 a, b 可以控制 F-RD 型点阵结构的形状,分析变形参数 a 与点阵形状的关系时,设置阈值 C 为常数 0, 变形参数 b 为常数 1.0, 避免因为阈值 C 和变形参数 b 产生误差,影响 a 和 P 之间的变化规律;同理,分析变形参数 b 的影响关系时,控制变形参数 a 为常数 1.0. 图 3 所示为变形参数 a 取不同值时 F-RD 型点阵结构的形状表现,可以看出,当 a 值过小时, F-RD 型点阵结构存在曲面断裂或不连续的状态,此时 a 不可取;当 a 大于 0.8 时,曲面形状连续且无自相交现象发生;当 a 大于 1.0 且越大时, F-RD 型点阵结构四面中心圆形弧度部分逐渐趋近于直角状,包括点阵结构的 8 个顶点处的孔隙形状也趋近于直角状,故设计变形参数 a 时不宜过大.因此,在设计 F-RD 型点阵结构时,变形参数 a 的取值以大于 0.8 且小于 4.0 为宜.

在分析变形参数 b 与点阵结构的关系时,同分析变形参数 a 时一样,设置 $C=0, a=1.0$ 保持恒定不变.由图 4 不难看出,变形参数 b 取不同值时 F-RD 型点阵结构的形态和 a 正好相反,当 b 越小时, F-RD 型点阵结构中间弧度部分逐渐趋近于直角

状;当 b 大于 1.4 时, F-RD 型点阵结构存在曲面断裂、不连续的情况,此时不可取.与变形参数 a 相比,变形参数 b 对 F-RD 型点阵结构形状的影响呈现出负相关性.在设计此种点阵结构时,变形参数 b 的取值范围为 $[0, 1.3]$.

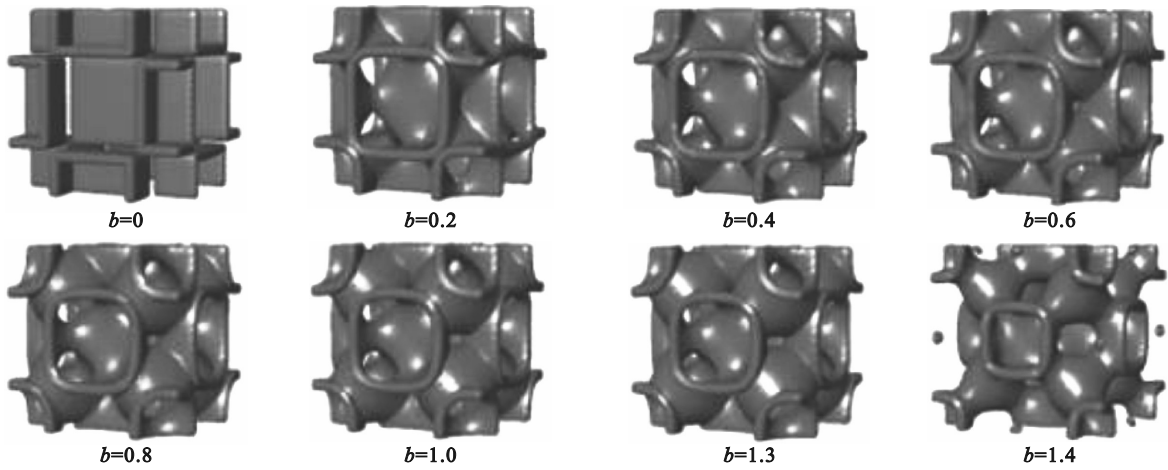


图 4 b 值对 F-RD 型点阵结构形状的影响

Fig. 4 Influence of b value on the shape of the F-RD lattice structure

阈值 C 决定 F-RD 型点阵结构曲面的偏置情况,通过改变 C 的取值,可得到一系列具有与 TPMS 型点阵结构相同对称性和拓扑结构的曲面,研究阈值 C 对 F-RD 型点阵结构形状的影响时,令 $a=b=1.0$ 恒定不变.如图 5 所示,当 C 增大时, F-RD

型点阵结构中间孔隙部分越趋近于长方形,影响规律类似于变形参数 a 对点阵结构的影响;当 C 小于 -1.0 或大于 1.0 时,会使 TPMS 型点阵结构的曲面发生断开、不连续的现象.因此,在设计 F-RD 型点阵结构时,设定阈值 C 的范围为 $[-0.9, 0.9]$.

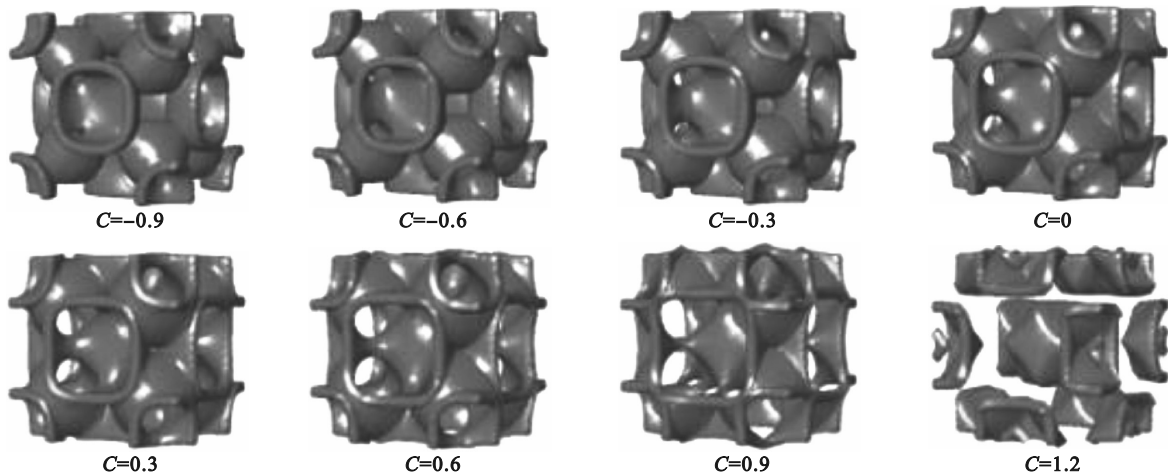


图 5 C 值对 F-RD 型点阵结构形状的影响

Fig. 5 Influence of C value on the shape of the F-RD lattice structure

2.2 变形参数 a, b , 阈值 C 与孔隙率 P 的关系

2.2.1 单参数对孔隙率 P 的影响

在研究变形参数 a 与孔隙率 P 之间的关系时,设置 $b=1.0$, 曲面厚度为 0.6 mm, 建模单元为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的立方体.当 a 过小时存在曲面断裂的情况,如图 3 所示.分析设定变形参数 a 的取值从 1.0 开始,步长为 0.4,取 11 个数值;同时分别计

算当 $C=-0.4$ 到 $C=0.4$ 之间的 5 大组数据.表 1 为变形参数 a 取不同数值时通过计算得到的孔隙率 P .

将表 1 中的 55 组数据进行曲线公式拟合,每组拟合 R^2 均大于 0.95 (此值越趋近于 1 表示拟合效果越好),模拟真实情况.根据表 1 可以得到 F-RD 型点阵结构孔隙率 P 和变形参数 a 的函数关系如式 (6) 所示:

$$\left. \begin{aligned} C=-0.4, P &= -0.001 5a^4 + 0.026 5a^3 - 0.219 7a^2 + 0.766 2a + 85.274, \\ C=-0.2, P &= -0.005 7a^4 + 0.080 5a^3 - 0.462 8a^2 + 1.247 7a + 84.986, \\ C=0, P &= -0.012a^4 + 0.176a^3 - 0.967 3a^2 + 2.349 8a + 84.328, \\ C=0.2, P &= -0.011 3a^4 + 0.171 4a^3 - 0.966a^2 + 2.382a + 84.513, \\ C=0.4, P &= -0.009 8a^4 + 0.151 9a^3 - 0.875 7a^2 + 2.174 7a + 85.016. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

表 1 变形参数 a 与孔隙率 P 的关系
Table 1 Relationship between deformation parameter a and porosity P

C=-0.4		C=-0.2		C=0		C=0.2		C=0.4	
a	$P/\%$	a	$P/\%$	a	$P/\%$	a	$P/\%$	a	$P/\%$
1.0	85.84	1.0	85.85	1.0	85.87	1.0	86.08	1.0	86.46
1.4	86.00	1.4	86.01	1.4	86.17	1.4	86.40	1.4	86.71
1.8	86.07	1.8	86.15	1.8	86.32	1.8	86.55	1.8	86.90
2.2	86.13	2.2	86.22	2.2	86.40	2.2	86.63	2.2	86.93
2.6	86.19	2.6	86.26	2.6	86.45	2.6	86.67	2.6	86.98
3.0	86.20	3.0	86.26	3.0	86.46	3.0	86.66	3.0	86.97
3.4	86.18	3.4	86.28	3.4	86.46	3.4	86.70	3.4	86.95
3.8	86.16	3.8	86.28	3.8	86.45	3.8	86.68	3.8	86.93
4.2	86.11	4.2	86.26	4.2	86.46	4.2	86.66	4.2	86.91
4.6	86.08	4.6	86.21	4.6	86.45	4.6	86.65	4.6	86.90
5.0	86.00	5.0	86.16	5.0	86.43	5.0	86.66	5.0	86.87

不难看出,当变形参数 a 大于 1.0 时 F-RD 型点阵结构的孔隙率随 a 的增大而增大,当变形参数 a 到达一定值后,点阵结构的孔隙率 P 的变化浮动相对较小, C 大于等于 0 时逐渐趋于稳定, C 小于 0 时有下降趋势;研究变形参数 b 对孔隙率 P 的影响时,控制变形参数 a 恒为 1.0,根据 2.1 节中变形参数 b 对点阵结构的形状影响呈线性负相关可知,变形参数 b 对孔隙率 P 的影响关系也与变

形参数 a 的呈现的规律相反.研究阈值 C 对 F-RD 型点阵结构孔隙率的影响关系时,设定 C 取值范围为 $[-0.8, 0.8]$,步长设定 0.2,得到 4 组不同变形参数 a, b 下的阈值 C 与孔隙率 P 的 36 组数据,表 2 所示为阈值 C 与孔隙率 P 的影响关系.

根据表 2 中的数据进行曲线公式拟合, $R^2 \geq 0.95$ 来保证拟合公式的准确性,得到阈值 C 与孔隙率 P 的关系如式(7)所示:

$$\left. \begin{aligned} a=1.5, b=0.4, P &= -1.367 8C^3 + 3.502 2C^2 + 3.112 3C + 86.542, \\ a=2.0, b=0.4, P &= -1.034 3C^3 + 2.660 2C^2 + 2.856 5C + 86.505, \\ a=2.0, b=0.6, P &= 0.246 2C^3 + 2.274 4C^2 + 1.814 5C + 86.440, \\ a=2.5, b=0.6, P &= 0.450 3C^3 + 1.872 8C^2 + 1.652 4C + 84.408. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可以看出,无论变形参数 a, b 取何值,随着阈值 C 变大, F-RD 型点阵结构的孔隙率都会先降低后增加,一般最低值都处于 $[-0.4, -0.2]$ 这个区间内,在此区间前孔隙率 P 变化缓慢,但当大于此区间时,随着阈值 C 的增加,孔隙率的增长速率也变得更快.

2.2.2 混合参数对孔隙率 P 的影响

研究变形参数 a, b 同时变化对孔隙率的影响关系时,研究方法类似于单参数分析方法,即取阈值 C 为不同数值时,分析 2 个变形参数对孔隙率 P 的影响.首先设定 C 的取值范围为 $[-0.8, 0.8]$, $1.5 \leq a \leq 4.5, 0.1 \leq b \leq 1.4$, 变形参数 a, b 设定

的步长分别为 0.5 和 0.2.通过不同 a, b 的值计算 F-RD 型点阵结构的 98 组孔隙率 P 的值,将数据进行拟合得到曲面拟合关系,当 $C=0.4$ 时如图 6 所示,当 $C=-0.4$ 时如图 7 所示.

从图 6 中可以看出,当阈值 $C=0.4$ 时,随着变形参数 a 的变大和变形参数 b 的减小,孔隙率 P 也是逐渐变大的;当 b 越接近于 0 时, F-RD 型点阵结构的孔隙率 P 相对越大;在变形参数 b 大于 1.0 时,随着变形参数 a 的变大, F-RD 型点阵结构的孔隙率随之变小;在变形参数 b 小于 1.0 时,随着变形参数 a 的变大, F-RD 型点阵结构的孔隙率随之变大.

表 2 阈值 C 与孔隙率 P 的关系
Table 2 Relationship between threshold C and porosity P

$a=1.5, b=0.4$		$a=2.0, b=0.4$		$a=2.0, b=0.6$		$a=2.5, b=0.6$	
C	$P/\%$	C	$P/\%$	C	$P/\%$	C	$P/\%$
-0.8	86.95	-0.8	86.39	-0.8	86.24	-0.8	86.04
-0.6	86.24	-0.6	86.04	-0.6	86.11	-0.6	86.01
-0.4	86.06	-0.4	85.94	-0.4	86.07	-0.4	86.04
-0.2	86.11	-0.2	86.03	-0.2	86.17	-0.2	86.13
0	86.44	0	86.43	0	86.46	0	86.41
0.2	87.10	0.2	87.04	0.2	86.86	0.2	86.81
0.4	88.34	0.4	88.07	0.4	87.52	0.4	87.34
0.6	89.59	0.6	89.13	0.6	88.46	0.6	88.27
0.8	90.45	0.8	89.86	0.8	89.45	0.8	89.12

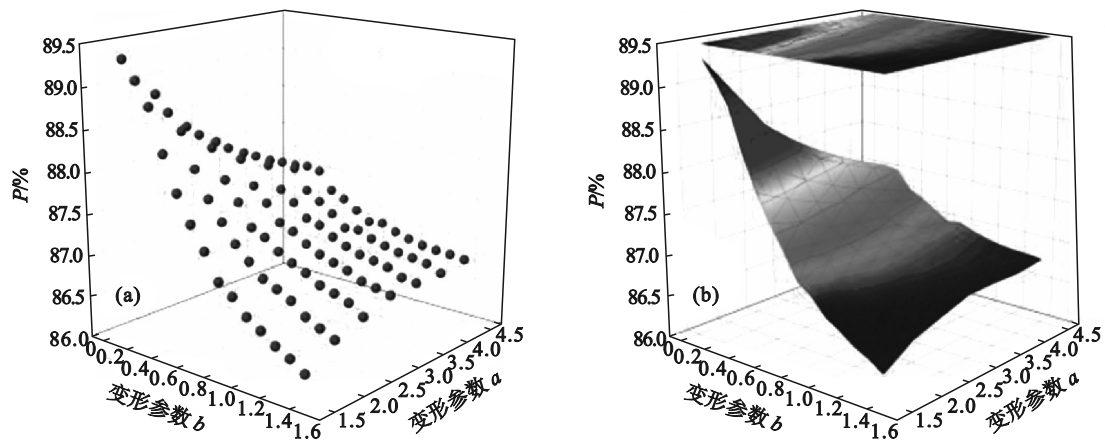


图 6 当 $C=0.4$ 时的混合参数对孔隙率 P 的影响

Fig. 6 Effect of mixing parameters on porosity P when $C=0.4$

(a)—3D 散点图; (b)—3D 映射图.

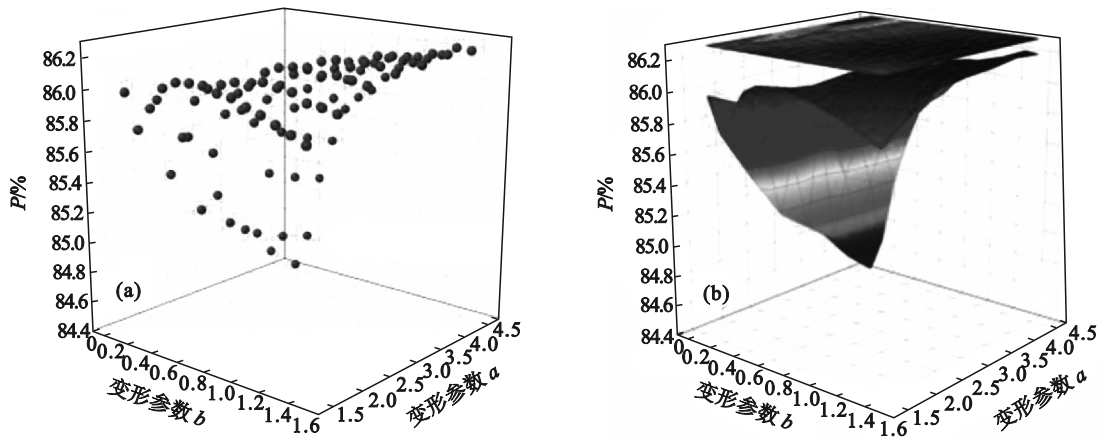


图 7 当 $C=-0.4$ 时的混合参数对孔隙率 P 的影响

Fig. 7 Effect of mixing parameters on porosity P when $C=-0.4$

(a)—3D 散点图; (b)—3D 映射图.

从图 7 中可以看出,当阈值 $C=-0.4$ 时,在给定的 a, b 范围内,随着变形参数 a 的变小和变形参数 b 的增大,孔隙率 P 也是逐渐变大的;当 a 越大时, F-RD 型点阵结构的孔隙率 P 相对越大;在变形参数 b 在 1.0 附近且小于 1.0 时,随着变形参

数 a 的变大, F-RD 型点阵结构的孔隙率随之变小;当变形参数 b 在 2.5 附近且大于 2.5 时,随着变形参数 a 的变大, F-RD 型点阵结构的孔隙率随之变大.

3 实验与讨论

采用铝合金 AlSi10Mg 粉末作为打印材料,该材料密度低、抗腐蚀性好,同时具有良好工艺性. 3D 成型设备采用中瑞科技生产的 SLM150 打印机,应用金属激光烧结(铺粉烧结)成型原理,打印精度为 ± 0.2 mm.采用的工艺参数如下:激光功率 200 W,扫描间距 0.12 mm,扫描速度 2000 mm/s,铺粉厚度 0.04 mm.为减小残留粉末对 3D 成型件的影响,采用超声波清洗机对其进行清洗.

将样品模型文件导入数据处理软件,待生成支撑和切片处理后导入打印机,铺粉装置先在基板上铺平一层金属粉末,激光束按照预定路线融化金属粉末,如此层层反复直到样品打印完成.打印出的变 F-RD 型点阵结构 AlSi10Mg 样品如图 8 所示.

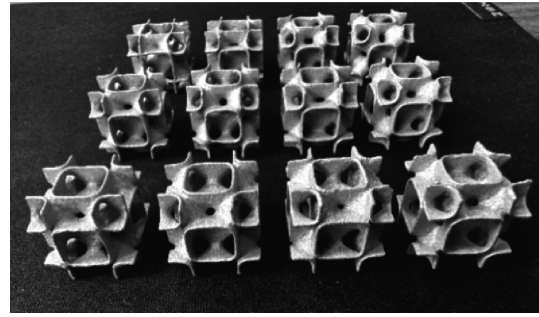


图 8 变 F-RD 型点阵结构 AlSi10Mg 样品
Fig. 8 AlSi10Mg sample of the variable F-RD lattice structure

图 9 为不同参数的理论孔隙率和实际孔隙率的关系,由于制造精度和工艺的影响,实际样品表面较为粗糙,导致样品的尺寸和孔隙率与理论模型存在一定的误差,孔隙率误差均小于 5%,对整体结构孔隙率影响较小,验证了理论分析的正确性.

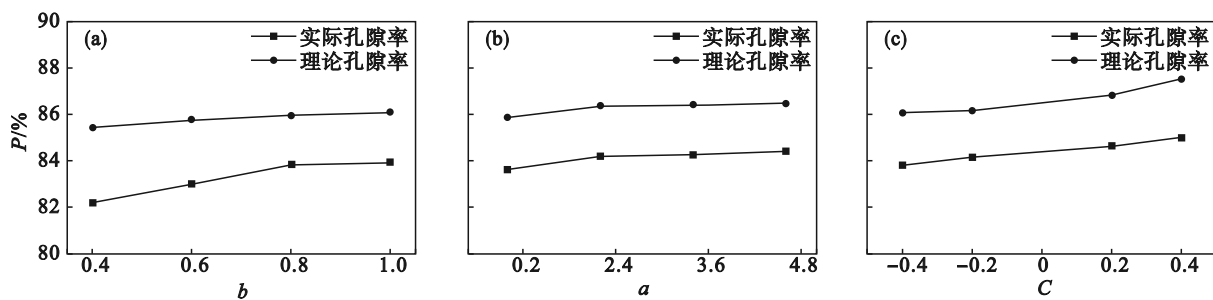


图 9 不同参数的理论孔隙率和实际孔隙率关系

Fig. 9 Relationship of theoretical porosity and actual porosity for different parameters

(a)— $a=4.5, C=-0.4$ 时变形参数 b 对孔隙率 P 的影响; (b)— $b=1.0, C=0$ 时变形参数 a 对孔隙率 P 的影响;
(c)— $a=2.0, b=0.3$ 时变形参数 C 对孔隙率 P 的影响.

4 结 论

1) 针对三周期极小曲面点阵结构,提出了一种基于隐式表达式的三周期极小曲面参数设计方法,可以根据运算器所需输入端口参数生成所需类型和大小的三周期极小曲面.

2) 研究了 F-RD 型点阵结构变形参数 a, b 和阈值 C 对孔隙率 P 的影响规律,提出了针对孔隙率分析的单参数和混合参数方法,建立了变形参数和阈值对变 F-RD 型点阵结构的映射关系,可以生成特定形状和孔隙率的 F-RD 型点阵结构,为三周期极小曲面点阵结构的工程设计和应用提供参考.

3) 采用金属激光烧结成型原理制备 AlSi10Mg 点阵结构样品,发现导致样品的尺寸和孔隙率与理论模型存在一定的误差,且理论与实

际孔隙率误差小于 5%,对整体结构孔隙率影响较小,验证了理论分析的正确性,具备一定的理论参考价值.

参考文献:

- [1] Jin X, Li G X, Liu E C, et al. Lightweight design for servo frame based on lattice material [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 207: 012035.
- [2] Alkebsi E A A, Ameddah H, Outtas T, et al. Design of graded lattice structures in turbine blades using topology optimization [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, 34(4): 370-384.
- [3] Yang L, Yan C Z, Fan H Y, et al. Investigation on the orientation dependence of elastic response in Gyroid cellular structures [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2019, 90: 73-85.
- [4] Al-Ketan O, Rowshan R, Al-Rub R K A. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 167-183.

(下转第 1351 页)