DOI: 10.3901/JME.2021.03.220

径向梯度多孔支架设计与力学性能分析*

高芮宁 李 祥

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要: 提出一种基于 Gyroid 曲面的径向梯度多孔支架的设计方法。通过调节中心孔隙率 P_{in} , 边缘孔隙率 P_{out} , 和梯度变化率 n 设计具有相同平均孔隙率, 不同孔隙变化率的径向梯度多孔支架。采用有限元法(Finite element method, FEM)分析和力学试验方法分别对径向梯度多孔支架和均质多孔支架的力学性能进行研究, 并对比其性能的差异。有限元分析结果显示, 在平均孔隙率相同的条件下, 所设计的径向梯度多孔支架力学性能优于均质多孔支架。平均孔隙率越高, 径向梯度多孔支架相对均质多孔支架的力学性能越好; 力学试验结果显示, 当平均孔隙率为 70% 时, 径向梯度多孔均质多孔支架弹性模量与抗压强度分别为 $(2.34 \pm 0.05)\text{GPa}$ 和 $(67.63 \pm 1.33)\text{MPa}$, 径向梯度多孔支架弹性模量与抗压强度分别为 $(3.96 \pm 0.19)\text{GPa}$ 和 $(90.83 \pm 3.35)\text{MPa}$ 。有限元分析与力学试验共同说明了径向梯度多孔支架比均质多孔支架性能优异。

关键词: 三周期极小曲面; 径向梯度多孔支架; 有限元法; 力学性能

中图分类号: R318

Design and Mechanical Properties Analysis of Radially Graded Porous Scaffolds

GAO Ruining LI Xiang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: A design method based on Gyroid surface is proposed to build radially graded porous scaffolds. Radially graded porous scaffolds with the same average porosity and different porosity change rate are designed by adjusting central porosity P_{in} , marginal porosity P_{out} and gradient change rate n . The mechanical properties of radially graded porous scaffolds and homogeneous porous scaffolds are studied by finite element method (FEM) analysis and mechanical experiment, and their differences are compared. The results of FEM analysis show that the mechanical properties of the radially graded porous scaffolds are better than those of the homogeneous porous scaffolds with the same average porosity. The higher the average porosity is, the better the mechanical properties of radially graded porous scaffolds are. The results of mechanical experiments show that when the average porosity is 70%, the elastic modulus and compressive strength of radially graded porous scaffolds are $(2.34 \pm 0.05)\text{GPa}$ and $(67.63 \pm 1.33)\text{MPa}$, respectively. The elastic modulus and compressive strength of radially graded porous scaffolds are $(3.96 \pm 0.19)\text{GPa}$ and $(90.83 \pm 3.35)\text{MPa}$, respectively. The FEM analysis and mechanical experiment show that the radially graded porous scaffolds have better performances than the homogeneous porous scaffolds.

Key words: triply periodic minimal surfaces; radially graded porous scaffold; finite element method; mechanical properties

0 前言

多孔结构由于其轻量化, 低刚度, 高通透性以及促成骨性在骨科植入物中得到了广泛的研究。目前的研究主要集中在通过单一造孔单元构建的均质多孔支架上, 并对其生物力学性能与生物相容性进行分析^[1-3]。由于天然骨为非均质结构, 其孔隙率从

边缘到中心逐渐增大。骨支架需要在特定的位置满足特定的生物力学与生物相容性要求, 均质多孔支架结构性能单一, 始终难以成为理想的骨支架。梯度多孔支架通过对天然骨结构进行模拟, 不同的位置具有不同的孔隙率, 能够较好的满足骨支架的需求。ZHANG 等^[4]的研究表明梯度多孔支架的综合性能优于均质多孔支架。HAN 等^[5]的研究表明梯度多孔支架由于具有变化的孔径与孔隙率, 可以通过个性化设计优化骨组织的生长空间。

近年来, 为了克服传统多孔支架建模方法中几何造型局限, 建模过程繁琐等问题, 三周期极小曲面

* 国家自然科学基金(51475293)和校医工交叉(YG2017MS60)资助项目。
20200219 收到初稿, 20200523 收到修改稿

(Three-period minimal surface, TPMS)建模法逐步赢得研究人员的青睐。将数学方程定义的周期曲面作为多孔支架的内表面, 在保持多孔支架完整性的同时保证了内部孔道的光滑连续。YAN 等^[6]对不同 TPMS 造孔单元尺寸对支架力学性能的影响进行了研究。YANEZ 等^[7]利用 TPMS 单元中的 Gyroid 单元构建多孔支架, 并分析该类型支架在压缩和扭转载荷下的力学性能。MONTAZERIAN 等^[8]结合试验和有限元法, 对不同类型的 TPMS 单元力学性能和渗透性能进行了研究。

尽管目前对梯度多孔支架以及 TPMS 模型的研究取得了一定的进展, 但对模拟天然骨的径向梯度多孔支架的设计方法与力学性能的研究仍较少。本文基于 TPMS 模型中一种常见模型——Gyroid 模型, 利用 Gyroid 模型构建 G 单元。首先对 G 单元孔隙率的调控方法进行研究, 并提出了一种模拟天然骨结构的径向梯度多孔支架设计方法; 通过有限元法, 对不同孔隙率 G 单元的力学性能进行分析, 从而得到 G 单元均质支架的力学性能; 设计平均孔隙率为 50% 的具有不同梯度变化率的 16 种径向梯度多孔支架, 并研究其性能差异; 研究在不同平均孔隙率下, 具有最大力学性能的径向梯度支架的力学性能。最后利用 SLM 工艺制造了多孔钛支架, 包括径向梯度多孔支架与均质多孔支架, 通过试验分析了其力学性能差异。

1 材料与方法

1.1 G 单元建模及孔隙率调控

G 单元结构数学模型为

$$S(x, y, z) = \cos\left(\frac{2\pi}{l}x\right)\sin\left(\frac{2\pi}{l}y\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{l}y\right)\sin\left(\frac{2\pi}{l}z\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{l}z\right)\sin\left(\frac{2\pi}{l}x\right) = C \quad (1)$$

式中, l 为曲面周期, x, y, z 为空间上三个方向, C 为偏置量^[9]。将式(1)所代表的曲面作为孔隙区域与实体区域的交界面, 并定义 $S(x, y, z) > C$ 为实体部分, $S(x, y, z) < C$ 为孔隙部分。改变 C 的大小可以使曲面向内或向外偏置, 从而同时改变孔隙和实体区域的体积, 即改变单元孔隙率^[10]。单元孔隙率计算为

$$P_U = \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, P_U 为造孔单元孔隙率; V 为一个三维周期内 TPMS 结构实体部分的体积; V_0 为该三维周期正方体的体积。G 单元偏置量 C 与单元孔隙率如图 1 所示。

图 1 G 单元偏置量 C 与孔隙率之间关系

对于上述的 G 单元, C 与 P_U 近似满足线性关系

$$P_U = (0.329\ 9C + 0.500\ 2) \times 100\% \quad (3)$$

1.2 径向梯度多孔支架设计方法

径向梯度多孔支架模拟天然骨结构, 在中心区域具有较高的孔隙率, 在边缘区域具有较低的孔隙率^[11]。将偏置量设计为关于坐标的函数, 不同位置具有不同的偏置量, 从而实现孔隙率的连续梯度分布^[12]。本文提出一种径向梯度多孔结构偏置量设计方法

$$C = C(x, y) = k \cdot r^n + b \quad (4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

式中, x, y 是空间中两个方向, k, b, n 三个参数控制着孔隙率的梯度分布。根据该偏置函数可知, 曲面在不同的 r 处具有不同的偏置量, 在构建多孔支架时表现为孔隙率的连续过渡。若径向梯度多孔支架半径为 R , 高为 H , 其中内部($r=0$)孔隙率为 P_{in} , 外部($r=R$)孔隙率为 P_{out} 。 P_{in}, P_{out} 对应的偏置量分别为 C_{in}, C_{out} 。在给定 n 的前提下, 将 C_{in}, C_{out} 分别代入式(4)可以求得 k, b

$$k = (C_{out} - C_{in}) \left(\frac{1}{R}\right)^n \quad (6)$$

$$b = C_{in} \quad (7)$$

将式(3)、(6)和(7)代入式(4)得到

$$C(x, y) = \frac{(P_{out} - P_{in})}{0.329\ 9} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^n + \frac{P_{in} - 0.500\ 2}{0.329\ 9} \quad (8)$$

将式(8)再代入式(3)则得到该径向梯度多孔支架的孔隙率分布函数

$$P(r) = (P_{out} - P_{in}) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^n + P_{in} \quad (9)$$

基于上述径向梯度多孔支架设计方法, 其平均孔隙率计算为

$$\bar{P} = \frac{V}{\pi R^2 H} = \frac{\int_0^R 2\pi P(r) H dr}{\pi R^2 H} = \frac{n \cdot P_{in} + 2P_{out}}{n + 2} \quad (10)$$

式中, V 为多孔支架孔隙部分体积, 通过孔隙率函数 $P(r)$ 在 r 上进行积分得到。当给定 P_{in} , P_{out} , n 三个参数中任意两个与平均孔隙率 $\bar{P}$ 时, 另外一个参数通过式(10)计算。

以平均孔隙率为 50% 的径向梯度多孔支架为例, 当 $P_{in}=90\%$, $P_{out}=10\%$ 时, 根据式(10)计算出 $n=2$ 。将 P_{in} , P_{out} , n 代入式(8)得到该结构的偏置函数。若选择周期 1 mm 的造孔单元, 多孔支架为直径 15 mm, 高 20 mm 的圆柱, 化简后有

$$\cos(2\pi x)\sin(2\pi y) + \cos(2\pi y)\sin(2\pi z) + \cos(2\pi z)\sin(2\pi x) = -0.0431(x^2 + y^2) + 1.21 \quad (11)$$

利用科学计算软件 Mathematica, 基于其内置 RegionPlot3D 函数和 Export 函数, 并根据输出参数将曲面封闭, 从而将由数学方程表示的曲面形成可供 3D 打印的 STL 文件。如图 2a 所示。改变设计参数 P_{in} 与 P_{out} 可以设计出平均孔隙率为 50%, $P_{in}=90\%$, $P_{out}=40\%$ 的径向梯度多孔支架, 如图 2b 所示。如图 2c 则为平均孔隙率为 50% 的均质多孔支架。上述两种径向梯度多孔支架与均质多孔支架的孔隙率分布如图 3 所示, 三种支架的孔隙率具有不同的梯度变化率, 即不同的梯度过渡方式。

图 2 三种平均孔隙率为 50% 的多孔支架

图 3 三种支架孔隙率分布

1.3 G 单元均质力学性能分析

利用商业软件 ABAQUS6.14 对孔隙率为 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 的 G 单元结构进行有限元分析。首先进行有限元网格划分, 与传统多孔支架模型不同, 所设计的多孔支架为 STL 模型, 即为面网格模型。所设计的 STL 模型常常包括几十万个三角

面片, 现有商业软件转化为有限元分析的体网格十分困难。正六面体网格结构简单, 易于编程实现, 被证明是分析 TPMS 多孔结构的有效网格^[13-14]。如图 4 所示, 对 $1 \times 1 \times 1$, $2 \times 2 \times 2$, $3 \times 3 \times 3$, $4 \times 4 \times 4$ 个 G 单元 70% 孔隙率的多孔支架进行划分, 以模拟单元数对有限元分析结果的影响。合理的有限元网格的建立不会影响结构的整体性能, 造孔单元大小为 2 mm, 有限单元尺寸为 0.1 mm, 支架有限单元总数分别为 2 789, 20 662, 67 923, 158 876。有限元模型的孔隙率分别为 69.88%, 70.02%, 70.08%, 70.10%, 与设计孔隙率 70% 相比差异不大。材料模型选择 Ti6Al4V, 弹性模量为 110 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 869 MPa。边界条件设置为: 固定单元结构底部所有节点的六个自由度, 并在顶部所有节点的高度方向上向下逐步施加 5% 高度的位移。在应变为 0.1% 时, 通过胡克定律计算多孔支架等效弹性模量

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{A\varepsilon} \quad (12)$$

式中, σ 为应力; ε 为应变; F 为顶面的反作用力; A 为截面积。屈服强度计算为

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A} \quad (13)$$

式中, F_s 为多孔支架产生 0.2% 塑性形变时的顶面反力; A 为截面积。

图 4 有限元模型

Gibson-Ashby 公式是描述多孔结构密度和力学性能之间关系的重要数学模型^[15]。该公式利用幂函数预测多孔结构的有效力学性能, 包括有效弹性模量和屈服强度, 如式(14)、(15)所示。

$$E^* = \frac{E}{E_0} = A_E \rho^{*n_E} \quad (14)$$

$$\sigma_s^* = \frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}} = A_s \rho^{*n_s} \quad (15)$$

式中, E, σ_s 分别是多孔结构的等效弹性模量与屈服极限, E_0, σ_{s0} 是相应材料实体的等效弹性模量与屈服极限, 对于 Ti6Al4V, $E_0=110$ MPa, $\sigma_{s0}=869$ MPa。 E^*, σ_s^* 为相对弹性模量与相对屈服极限。 ρ^* 为相对密度, 同一多孔支架相对密度(ρ^*)与孔隙率(ρ_p)满足关系式: $\rho^* + \rho_p = 1$ 。 A_E, n_E, A_s, n_s 为确定弹性模量与屈服极限的系数, 通过有限元分析不同孔隙率下造孔单元的力学性能得以求出。

1.4 径向梯度多孔支架力学性能分析

将造孔单元视作材料, 并将其性质赋予植入物进行有限元计算被证明是合理的分析方法^[16-17]。根据式(10), 设计平均孔隙率为 50% 不同梯度分布的多孔支架, P_{in} 设计为 60%, 70%, 80%, 90%; P_{out} 设计为 10%, 20%, 30%, 40%, 共 16 种支架, 圆柱半径 $R=15$ mm, 高为 $H=20$ mm。有限元分析原理在于将连续结构问题用有限单元离散, 设计连续材料分布同样需要作离散处理。选择其中一种支架, 将圆柱体依次划分为 5, 10, 15, 20 个同心圆环柱, 作预分析以确定离散数对有限元分析结果的影响, 如图 5 所示。同心圆环柱数目越多, 则离散后的材料分布越接近连续材料分布, 但增加了计算成本。

图 5 圆柱划分方法

采用式(16)计算每个圆环柱内的平均孔隙率, 赋予相应的材料属性并计算相应的力学性能。

$$P_i = \frac{\int_{R_1}^{R_2} 2\pi r P(r) dr}{\pi R^2 H} \quad (16)$$

式中, R_1, R_2 分别为第 i 个圆环内径与外径。根据孔隙率赋予相应 G 单元的力学属性。网格大小为 0.5 mm, 边界条件设置为: 固定底面六自由度, 并在顶面逐步施加高度方向 5% 的位移。分析计算顶面反力, 从而得到相应径向梯度多孔支架的力学性能。预分析结果表明将圆柱体划分为 15 个圆环柱与 20 个圆环柱分析结果差异小于 1%, 故余下梯度支架的

分析圆环柱划分数均设定为 15。

改变支架平均孔隙率为 20%, 30%, 40%, 60%, 70%, 80%。 P_{in} 与 P_{out} 在 10%, 20%, 30%, ..., 90% 之间选择, 且 $P_{in} > P_{out}$ 。重复平均孔隙率为 50% 时梯度多孔支架的分析方法。

1.5 SLM 多孔钛支架制造与力学性能测试

设计 $P_{in}=90\%$, $P_{out}=10\%$, 平均孔隙率为 70% 的 G 单元径向梯度多孔支架与平均孔隙率为 70% 的 G 单元均质多孔支架。采用 SLM 工艺进行制造, 粉末为 Ti6Al4V, 粉末颗粒直径为 15~45 μm 。利用称重法对制备的多孔支架实际孔隙率进行测试

$$P_{act} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (17)$$

式中, W_1 为与多孔支架外型尺寸相对应实体支架质量, W_2 为多孔支架质量。

利用 MTS-810 万能材料试验机(MTS 公司, 美国)对支架力学性能进行测试, 压缩进给速度为 0.5 mm/min, 采样频率为 20 Hz。径向梯度多孔支架与均质多孔支架分别测试 3 个样品。

2 结果与分析

2.1 均质多孔支架力学性能

当孔隙率为 70% 时, G 单元结构四种不同有限元网格划分方式的应力分布云图如图 6 所示。

图 6 不同单元数的结构应力分布

图 7 显示了上述结构相应等效弹性模量与屈服强度的计算结果。结果显示, 27 个单元数构成的多孔支架与 64 个单元数构成的多孔支架的弹性模量与屈服强度计算差异均小于 5%。为了提高计算效率, 认为对由 27 个 G 单元组成的支架进行分析可

以代表 G 单元均质多孔支架的力学性能。

图 7 不同单元数结构的等效弹性模量与屈服强度

经有限元分析计算得到的 G 单元均质多孔支架在不同孔隙率下的等效弹性模量与屈服强度如表 1 所示。

表 1 不同孔隙率 G 单元结构力学性能

孔隙率(%)	相对密度 ρ^*	弹性模量 $E_{\text{effective}}/\text{GPa}$	屈服强度 σ_s/MPa
90	0.1	0.69	11.58
70	0.3	8.55	62.47
50	0.5	24.03	151.44
30	0.7	49.44	316.06
10	0.9	91.10	588.93

利用 Gibson-Ashby 公式对表 2 数据进行拟合，相关系数分别为 0.998 9, 0.997 1。

$$E^* = \frac{E}{E_0} = 1.05 \rho^{*2.29} \quad (18)$$

$$\sigma_s^* = \frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}} = 0.86 \rho^{*2.30} \quad (19)$$

2.2 梯度变化率对梯度支架力学性能的影响

平均孔隙率为 50%，具有不同梯度变化率的 16 种径向梯度多孔支架的等效弹性模量与抗压强度如图 8 所示。所设计的径向梯度多孔支架力学性能均优于均质多孔支架。在平均孔隙率相同时，梯度变化率对多孔支架力学性能有影响。其中当 $P_{\text{in}}=90\%$ ， $P_{\text{out}}=10\%$ 时，径向梯度多孔支架兼具最大弹性模量与抗压强度，分别为 31.89 GPa 和 202.23 MPa。随着 P_{in} 的减小，或 P_{out} 的增加，径向梯度多孔支架的弹性模量与抗压强度均会减小，当 $P_{\text{in}}=60\%$ ， $P_{\text{out}}=40\%$ 时的径向梯度多孔支架弹性模量与抗压强度最低，分别为 24.99 GPa 与 157.04 MPa。随着 P_{in} 与 P_{out} 均逐渐趋于平均孔隙率，梯度多孔支架的力学性能也逐渐趋于均质多孔结构。

2.3 平均孔隙率对梯度支架力学性能的影响

由第 2.2 节分析可知，给定平均孔隙率，当径

向梯度多孔支架的 $P_{\text{in}}=90\%$ ， $P_{\text{out}}=10\%$ 时具有最佳弹性模量与抗压强度。故对平均孔隙率为 20%，30%，40%，50%，60%，70%，80%， $P_{\text{in}}=90\%$ ， $P_{\text{out}}=10\%$ 时的 7 种径向梯度多孔支架进行有限元分析。

(a) 弹性模量

(b) 抗压强度

图 8 平均孔隙率为 50% 的径向梯度多孔支架力学性能

如图 9 所示，在平均孔隙率相同时，所设计的径向梯度多孔支架弹性模量与抗压强度优于均质结构。在平均孔隙率较高时，如平均孔隙率为 80% 时，相对均质支架，梯度支架的弹性模量与抗压强度分别提高了 125.53% 和 122.58%；但在平均孔隙率较低时，如平均孔隙率为 20%，梯度支架弹性模量于抗压强度仅能提高 5.68% 和 1.94%。

2.4 径向梯度多孔支架力学性能试验验证

通过 SLM 工艺制造的多孔支架如图 10 所示。打印得到的梯度多孔支架与均质多孔支架孔隙率通过测试分别为 75.43% 与 74.76%。两种支架平均孔隙率差异不大，但相比于设计平均孔隙率 70% 产生了增大。孔隙率增大的原因在于工艺参数与制造环境的影响使得多孔钛的杆径变细。以往的文献中同样存在该现象。YANEZ 等^[7]的研究发现 SLM 工艺

制造 G 单元 75% 时孔隙率产生了增大, 而在孔隙率为 90% 时实际孔隙率减小。

图 9 不同平均孔隙率下径向梯度多孔支架力学性能

图 10 SLM 制造的多孔钛支架

图 11 为均质多孔支架与梯度多孔支架力学加载图。随着轴向载荷的不断增大, 两种支架均发生破坏破坏。

图 12 为径向梯度多孔支架与均质多孔支架压缩试验应力应变曲线。均质结构与梯度结构的弹性模量分别为 $(2.34 \pm 0.05) \text{GPa}$, $(3.96 \pm 0.19) \text{GPa}$; 抗压强度分别为 $(67.63 \pm 1.33) \text{MPa}$, $(90.83 \pm 3.35) \text{MPa}$ 。在孔隙率差异不大的情况下, 所设计的径向梯度多孔支架力学性能优于均质多孔支架。

图 11 多孔支架的变形破坏方式

图 12 均质结构与梯度结构应力应变曲线

3 结论

(1) TPMS 模型中的 G 单元模型, 讨论了 G 单元孔隙率调控方法, 基于该调控方法提出了一种径向梯度多孔支架设计方法。

(2) 通过有限元法测试了 G 单元不同孔隙率下的力学性能, 包括等效弹性模量与屈服强度进行了分析, 并用 Gibson-Ashby 模型进行数据拟合, 结果表明随着孔隙率的增加, 造孔单元弹性模量与屈服强度均下降。

(3) 对平均孔隙率为 50% 的不同梯度分布率的径向梯度多孔支架进行有限元分析。结果表明, 在所设计孔隙率区间内, 当 $P_{in}=90\%$, $P_{out}=10\%$ 时, 支架具有最佳力学性能。梯度变化率对不同平均孔隙率的支架影响不同, 其中对高孔隙率支架力学性能的提升尤为明显。利用 SLM 工艺制造了径向梯度多孔支架与均质多孔支架, 通过压缩试验验证了径向梯度多孔支架的性能优于均质多孔支架。

(4) 将骨科植入物设计为径向梯度多孔结构, 能在

满足所需生物力学性能的同时,增大植入物的孔隙率。从而即减轻了植入物自身的重量,又为细胞增殖分化提供了更大的空间,进而有利于修复缺损骨骼。

(5) 本文所讨论的压缩力学性能是多孔植入物的一种具有代表性的力学性能。而实际中,植入物常常面临多种类型的载荷,当考虑复杂载荷时,需要对设计参数进行优化,或者采用拓扑优化的方式来设计多孔结构孔隙率分布。梯度多孔支架的优化设计也是本文之后的研究方向。

参 考 文 献

- [1] WANG Xiaojian, XU Shanqing, ZHOU Shiwei, et al. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review[J]. *Biomaterials*, 2016, 83: 127-141.
- [2] WEISSBMAN V, BADER R, HANSMANN H, et al. Influence of the structural orientation on the mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V open-porous scaffolds[J]. *Materials and Design*, 2016, 95: 188-197.
- [3] GUO Miao, LI Xiang. Development of porous Ti6Al4V/chitosan sponge composite scaffold for orthopedic applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, 58: 1177-1181.
- [4] ZHANG Xiangyu, FANG Gang, LEEFLANG S, et al. Topological design, permeability and mechanical behavior of additively manufactured functionally graded porous metallic biomaterials[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 84: 437-452.
- [5] HAN Changjun, LI Yan, WANG Qian, et al. Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 80: 119-127.
- [6] YAN Chunze, HAO Liang, HUSSEIN A, et al. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 856-864.
- [7] YANEZ A, CUADRADO A, MARTEL O, et al. Gyroid porous titanium structures: A versatile solution to be used as scaffolds in bone defect reconstruction[J]. *Materials and Design*, 2018, 140: 21-29.
- [8] MONTAZERIAN H, DAVOODI E, ASADI M, et al. Porous scaffold internal architecture design based on minimal surfaces: A compromise between permeability and elastic properties[J]. *Materials and Design*, 2017, 126: 98-114.
- [9] MELCHELS F, BERTOLDI K, GABBRIELLI R, et al. Mathematically defined tissue engineering scaffold architectures prepared by stereolithography[J]. *Biomaterials*, 2010, 31: 6909-6916.
- [10] 杨辉. 多孔结构的建模方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
YANG Hui. Research on modeling method of porous structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [11] AFSHAR M, ANARAKI A, MONTAZERIAN H. Compressive characteristics of radially graded porosity scaffolds architected with minimal surfaces[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2018, 92, 254-267.
- [12] MELCHELS F, TONNARELLI B, OLIVARES A, et al. The influence of the scaffold design on the distribution of adhering cells after perfusion cell seeding[J]. *Biomaterials*, 2011, 32: 2878-2884.
- [13] MASKERY I, AREMU A, PARRY L, et al. Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading[J]. *Materials and Design*, 2018, 155: 220-232.
- [14] AFSHAR M, POURKAMALI A, MONTAZERIAN H, et al. Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 62: 481-494.
- [15] ASHBY M. The properties of foams and lattices[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2006, 364: 15-30.
- [16] JETTE B, BRAILOVSKI V, SIMONEAU C, et al. Development and in vitro validation of a simplified numerical model for the design of a biomimetic femoral stem[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 77: 539-550.
- [17] MEHBOOB H, TARLOCHAN F, MEHBOOB A, et al. Finite element modelling and characterization of 3D cellular microstructures for the design of a cementless biomimetic porous hip stem[J]. *Materials and Design*, 2018, 149: 101-112.

作者简介: 高芮宁, 男, 1995 年出生。主要研究方向为多孔结构设计与优化。

E-mail: gaoruining@sjtu.edu.cn

李祥(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为增材制造(3D 打印)技术及应用, 医疗器械(骨科植入物), 生机电一体化系统。

E-mail: xiangliwj@sjtu.edu.cn