

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.04.007

应用于承载骨的梯度多孔支架力学性能研究

李传生,曾寿金,许明三,刘广,何伟辉

(福建工程学院 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

摘要: 基于三周期极小曲面 (TPMS) 设计 5 种不同孔隙率梯度分布的梯度多孔支架,利用选区激光熔化 (SLM) 技术制造 Ti6Al4V 梯度多孔支架。该支架具有类似于人骨梯度多孔结构的梯度孔隙率。压缩测试结果表明,5 种梯度多孔支架的弹性模量为 8.75~13.88 GPa,抗压强度为 219.48~528.21 MPa,符合承载骨的弹性模量和抗压强度要求。弹性模量和抗压强度都随着平均孔隙率 \bar{P} (或边缘孔隙率 P_B) 的增大而减小, \bar{P} 对弹性模量和抗压强度的影响大于 P_B 。采用 Gibson-Ashby 的拟合结果可以为承载骨的设计提供参考。

关键词: 选区激光熔化;梯度多孔支架;三周期极小曲面;力学性能

中图分类号: TB31;TN249

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)04-0349-07

Research on the mechanical properties of gradient porous scaffolds applied on load-bearing bones

LI Chuansheng, ZENG Shoujin, XU Mingsan, LIU Guang, HE Weihui

(School of Mechanical & Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Gradient porous scaffolds with 5 different porosities that have gradient distributions were designed based on triply periodic minimal surfaces (TPMS), and Ti6Al4V gradient scaffolds were fabricated with selective laser melting (SLM) technology. The scaffold has the gradient porosity similar to the gradient porous structure of human bones. Compression test results show that the elastic modulus and compressive strength of scaffolds with five gradient porosities are 8.75~13.88GPa and 219.48~528.21MPa, which meet the elastic modulus and compressive strength requirements of load-bearing bones. Both elastic modulus and compressive strength decrease with the increase of \bar{P} (or P_B), and the effect of \bar{P} on elastic modulus and compressive strength is greater than that of P_B . The fitting results of Gibson-Ashby can provide reference for the design of load-bearing bones.

Keywords: selective laser melting; gradient porous scaffolds; triply periodic minimal surfaces; mechanical properties

钛合金具有较高的比强度、良好的耐腐蚀性、优异的生物相容性以及适当的力学性能,在人工骨等生物医用领域得到广泛的研究与应用。但是钛合金的弹性模量(110 GPa)远高于人骨弹性模量(1~30 GPa),植入后容易出现应力屏蔽效应,最终导致种植体松动或自体骨断裂^[1]。所以需要将钛合金制作为多孔钛,以降低其等效弹性模量,改善整体的力学性能,维持支架的长期稳定性。

收稿日期: 2021-08-02
基金项目: 国家自然科学基金(51575110);福建省自然科学基金(2020J01872);福建工程学院科研启动基金(GY-Z19118)

第一作者简介: 李传生(1996—),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向:选区激光熔化技术。

通信作者: 曾寿金(1978—),男,福建永定人,副教授,博士,研究方向:激光增材制造技术。

选区激光熔化 (selective laser melting, 简称 SLM) 技术是金属增材制造最具前景的应用技术之一, 它的出现为多孔钛合金的制备提供了一种非常有效的手段。

骨植入体需要具有和天然骨相似的形貌特征和力学性能。天然骨主要由高强度、高弹性模量的皮质骨与低强度、低弹性模量的松质骨组成。皮质骨孔隙率较低, 主要起力学承载作用, 松质骨孔隙率较高, 能够进行物质传递^[2]。基于孔径、孔隙形态及孔隙率优化分布的梯度多孔支架, 因在特定区域承载不同机械性能而在承载骨方面受到越来越多的关注。三周期极小曲面 (triply periodic minimal surfaces, TPMS) 是一种在三维空间中 3 个独立方向均呈周期性的曲面, 其面上的任一点平均曲率均为 0, 具有几何形状多样, 并可构建参数化数学模型对其进行描述的优点^[3]。通过修改 TPMS 隐函数表达式参数, 可以实现梯度多孔支架的设计。此外, TPMS 多孔结构具有高渗透、高表面积与体积比的特性, 可以促进细胞生长^[4]。因此, TPMS 多孔结构在医学领域得到广泛关注。Maskery 等^[5]采用理论和有限元的方法, 对不同孔隙率梯度分布的 TPMS 梯度多孔结构的力学性能进行研究。Han 等^[6]采用 SLM 技术制造的不同孔隙率梯度分布的梯度多孔结构具有不同的弹性模量和屈服强度。

本文基于 TPMS 结构中的一种常用结构即 Diamond 结构, 设计 5 种具有不同孔隙率梯度分布的圆柱梯度多孔支架, 并应用 SLM 技术制备 Ti6Al4V 梯度多孔支架, 研究支架的力学性能, 揭示 P_B 、 \bar{P} 对梯度多孔支架力学性能的影响规律, 为承载骨的设计提供参考。

1 TPMS 梯度多孔支架设计

通过三角函数描述 Diamond 三周期极小曲面, 其三角函数如下^[7]:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) = & \sin\left(\frac{2\pi}{l}x\right) \sin\left(\frac{2\pi}{l}y\right) \sin\left(\frac{2\pi}{l}z\right) + \\ & \sin\left(\frac{2\pi}{l}x\right) \cos\left(\frac{2\pi}{l}y\right) \cos\left(\frac{2\pi}{l}z\right) + \\ & \cos\left(\frac{2\pi}{l}x\right) \sin\left(\frac{2\pi}{l}y\right) \cos\left(\frac{2\pi}{l}z\right) + \\ & \cos\left(\frac{2\pi}{l}x\right) \cos\left(\frac{2\pi}{l}y\right) \sin\left(\frac{2\pi}{l}z\right) = C \end{aligned} \quad (1)$$

式中: l 为曲面周期 (mm); x, y, z 为空间上 3 个方向; C 为偏置量。 $\varphi(x, y, z) > C$ 的部分为多孔结构实体部分, $\varphi(x, y, z) < C$ 的部分为多孔结构空隙部分, 改变 C 的大小可以改变多孔结构的孔隙率。Diamond 多孔结构孔隙率与 C 之间的关系如图 1(a) 所示, 根据图 1(a) 的线性拟合结果, Diamond 多孔结构的偏置量 C 与孔隙率 P 关系如下:

$$P = (0.5 + 0.414 6C) \times 100\% \quad (2)$$

梯度多孔支架的设计采用偏置量的设计方法, 其设计原理如下^[8]:

$$C = C(x, y) = k \cdot r^n + b = k \cdot (\sqrt{x^2 + y^2})^n + b \quad (3)$$

式中: x, y 是空间中两个方向; k, b, n 是控制孔隙率梯度分布的 3 个参数。若梯度多孔支架为圆柱, 高为 H (mm), 半径为 R (mm); 则中心 $r = 0$ 、边缘 $r = R$ 处的孔隙率分别为中心孔隙率 P_Z 、边缘孔隙率 P_B , P_Z, P_B 对应的偏置量分别为 C_Z, C_B 。将 C_Z, C_B 分别代入式 (3), 求得 k, b 。

$$k = (C_B - C_Z) \left(\frac{1}{R}\right)^n \quad (4)$$

$$b = C_Z \quad (5)$$

将式 (2)、(4) 和 (5) 代入式 (3) 得到

$$C(x, y) = \frac{(P_B - P_Z)}{0.414 6} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^n + \frac{P_Z - 0.5}{0.414 6} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (2), 得到梯度多孔支架的孔隙率分布函数

$$P(r) = (P_B - P_Z) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^n + P_Z \quad (7)$$

根据式 (7), 可知梯度多孔支架的平均孔隙率 \bar{P} 与 P_Z, P_B, n 之间的关系。

$$\bar{P} = \frac{V}{\pi R^2 H} = \frac{\int_0^R 2\pi r P(r) H dr}{\pi R^2 H} = \frac{n \cdot P_Z + 2P_B}{n + 2} \quad (8)$$

式中: V 为梯度多孔结构孔隙部分体积 (mm^3)。

梯度多孔支架以 $P_B - P_Z - \bar{P}$ 的方式命名; 例如, P_B 为 35%、 P_Z 为 85%、 \bar{P} 为 60% 的支架命名为 35-85-60; 为了方便理解梯度多孔支架的设计原理, 以支架 35-85-60 的设计为例。通过公式 (8), 可得 $n = 2$; 通过公式 (2) 得 $C_Z = 0.844 2$ 、 $C_B = -0.603 0$; 再通过公式 (4) 与 (5), 可得 $k = -0.025 728$ 、 $b = 0.844 2$ 。由此可得支架 35-85-60 表达式: $\varphi(x, y, z) = -0.025 728 \times (\sqrt{x^2 + y^2})^2 +$

0.844 2。最后通过 Mathematica 计算软件,绘制梯度多孔支架三维模型。

采用以上设计方法设计梯度多孔支架,设计的 5 种支架为 55-85-60、45-85-60、35-85-60、

35-85-70、35-85-80;其中 Diamond 多孔结构单元大小 $l = 2.5\text{ mm}$,圆柱半径 $R = 7.5\text{ mm}$,高 $H = 20\text{ mm}$;5 种支架模型如图 1(b)所示。

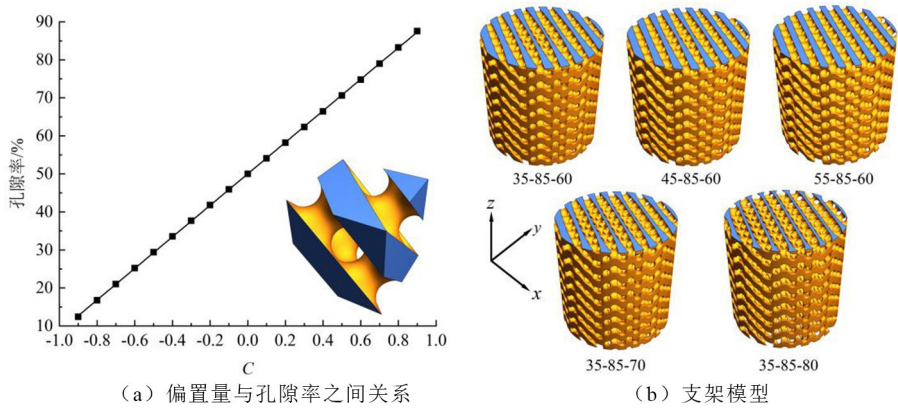


图 1 梯度多孔支架设计图
Fig.1 Gradient porous scaffold design

2 实验设备及方法

2.1 实验设备

Ti6Al4V 粉末,粒径范围为 20~53 μm ,其化学成分如表 1 所示。粉末 SEM 形貌如图 2 所示,粉末形状接近球形,周边的卫星粉很少,有利于提高打印过程中铺粉的流畅性。粉末在 80 $^{\circ}\text{C}$ 下真空烘干 8 h。使用选区激光熔化设备 (SLM 125) 制造梯度多孔支架。成型工艺如下:激光功率 275 W,扫描间距 0.12 mm,扫描速度 1 100 mm/s,铺层粉厚 30 μm 。制造完成后,通过电火花线切割机切下梯度多孔支架。

2.2 测量方法及设备

在进行性能测试之前,先用超声波清洗机将梯度多孔支架内残留粉末洗净。然后用扫描电子显微 (SEM, TM3030PLUS) 来表征其微观形貌和成形特征。采用称重法测量梯度多孔支架的孔隙率 (平均孔隙率):

$$\bar{P} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% = \frac{\pi R^2 H \rho - m_2}{\pi R^2 H \rho} \times 100\% \tag{9}$$

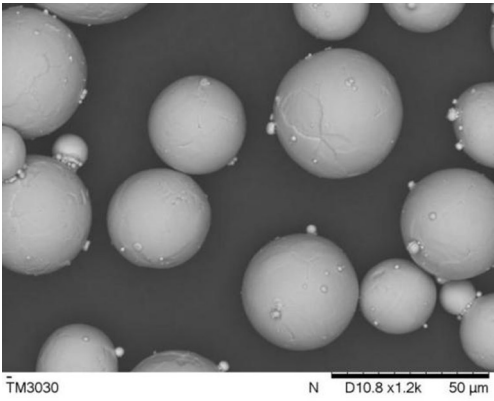


图 2 Ti6Al4V 粉末的形貌图
Fig.2 Topography of Ti6Al4V powder

式中: m_1 为与支架相同外形尺寸实体支架质量 (g); m_2 为测得的支架质量 (g); ρ 为 Ti6Al4V 密度 (4.43 g/ mm^3); R 和 H 分别为支架的半径和高度 (mm)。

使用 DNS300 电子万能试验机对梯度多孔支架进行准静态压缩力学性能实验,试验机压头进给速度为 1 mm/min,采样频率为 20 Hz。

表 1 Ti6Al4V 粉末化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ti6Al4V powder

元素	Al	V	Fe	Y	C	O	N	H	Ti	其它
质量分数/%	6.13	3.95	0.12	<0.005	0.006	0.065	0.012	0.005	Bal.	<0.12

3 结果与分析

3.1 梯度多孔支架表征

图 3 是 SLM 技术制造的 5 种梯度多孔支架。从宏观结构上看,5 种支架孔隙特征与设计一致,具有内部连通、由内向外的孔隙率梯度变化特征。利用称重法测得孔隙率如表 2 所示,所有支架的测量孔隙率都要小于设计值。这是因为采用 SLM 打印支架时,成型质量和精度受工艺参数的影响很大,本次打印的成型样件表面质量较不理想,支杆表面存在大量粉末,使得测量后的质量变大,导致计算获得的孔隙率小于设计值。文献[3]、[6]、[7]打印的 TPMS 多孔结构孔隙率也小于设计值。

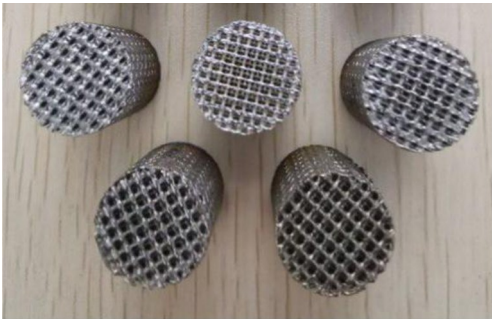


图 3 SLM 制造的梯度多孔支架

Fig.3 Gradient porous scaffolds fabricated with SLM

表 2 梯度多孔支架孔隙率

Tab.2 Porosity of gradient porous scaffolds		
支架	设计孔隙率/%	实际孔隙率/%
35-85-60	60	50.19
45-85-60	60	50.21
55-85-60	60	49.85
35-85-70	70	57.40
35-85-80	80	68.70

图 4 是梯度多孔支架的扫描电镜图,从图 4 (a)观察到支杆表面存在大量粉末。原因是:(1)在松散的粉末上构建不同倾斜角度的弯曲支杆,层下面的金属粉末部分熔融黏附在该层的底部^[9]。(2)由于温差大,未熔融和熔融粉末之间发生热扩散,导致粉末黏附在支杆表面^[10]。在疲劳载荷的作用下,粉体会脱落进入人体,造成炎症反应^[3]。因此,需要对梯度多孔支架进行喷砂处

理以除去黏附的粉末。喷砂后梯度多孔支架扫描电镜观察结果如图 4(b)所示,热扩散导致的黏粉全部消失,部分熔融粉末并未消失。

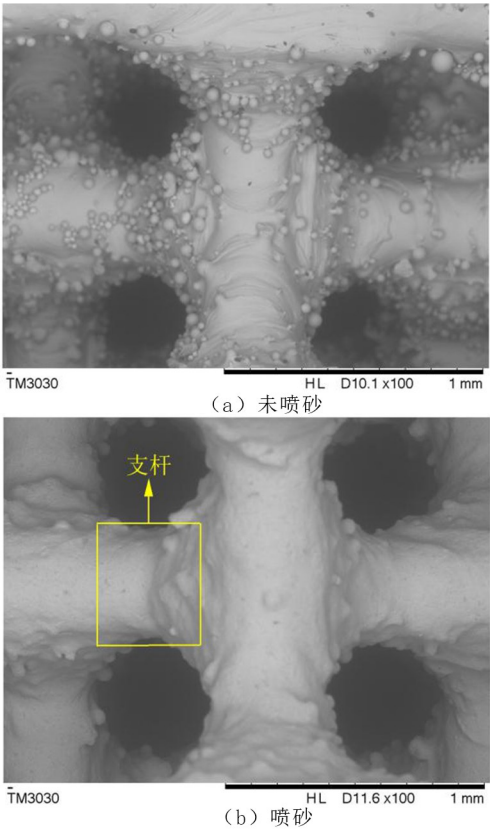


图 4 梯度多孔支架 SEM 图

Fig.4 SEM images of gradient porous scaffolds

3.2 梯度多孔支架力学性能

梯度多孔支架的应力-应变曲线和部分实验过程如图 5 所示。根据应力-应变曲线,所有梯度多孔支架开始处都存在非线性区域;这是因为梯度多孔支架的端面与水平面并非完全平行^[11]。在弹性变形阶段,压缩应力和应变基本按照线性关系快速增加,呈直线快速上升。在屈服平台阶段,主要发生塑性变形,应变增大,应力变化幅度较小,随着应变增加,梯度多孔支架逐步发生破坏。

表 3 是 5 种梯度多孔支架的力学性能,支架的弹性模量为 8.75 ~ 13.88 GPa,屈服强度为 204.81 ~ 508.38 MPa,抗压强度为 219.48 ~ 528.21 MPa。在 P_z 、 \bar{P} 相同时,支架 35-85-60 与 55-85-60 的 P_B 相差 20%,其弹性模量、屈服强度和抗压强度分别相差 0.62 GPa、95.87 MPa、92.58 MPa。在 P_B 、 P_z 相同时,支架 35-85-60 与 35-85-80 的 \bar{P} 相差 20%,其弹性模量、屈服强度和抗压强度分

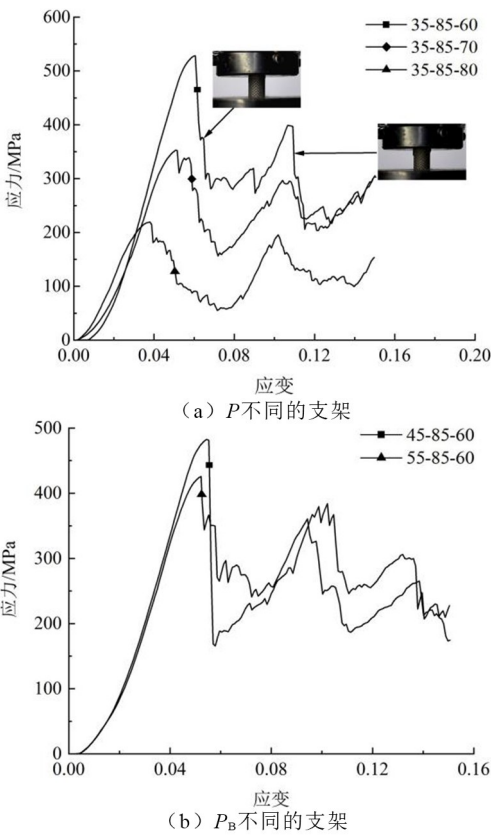


图 5 应力-应变曲线和实验过程图

Fig.5 Stress-strain curves and experimental process diagram

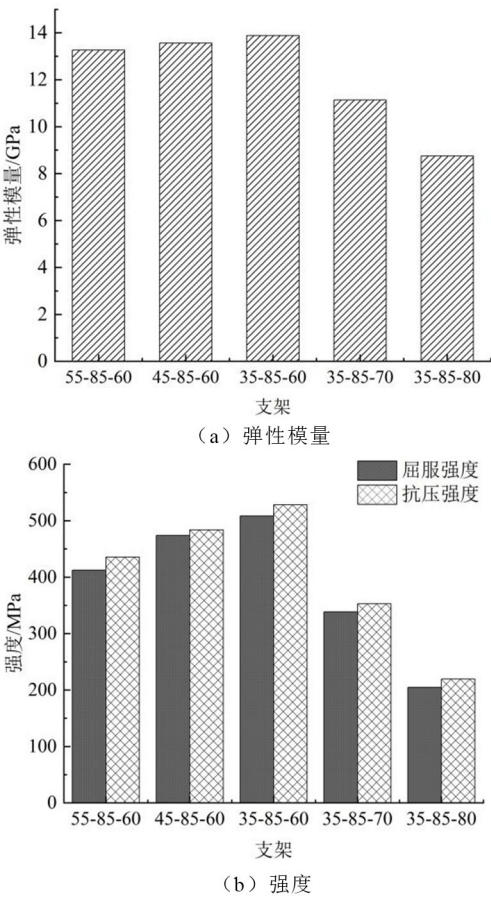


图 6 力学性能关系

Fig.6 Relationship between mechanical properties

别相差 4.51 GPa、304.01 MPa、308.48 MPa。因此, \bar{P} 对梯度多孔支架的弹性模量、屈服强度和抗压强度的影响大于 P_B 。从图 6 可看出,在 P_z 为 85%、 \bar{P} 为 60%时,弹性模量、屈服强度、抗压强度都随着 P_B 的增大而减小;在 P_B 为 35%、 P_z 为 85%时,弹性模量、屈服强度、抗压强度都随着 \bar{P} 的增大而减小。

表 3 梯度多孔支架力学性能

Tab.3 Mechanical properties of gradient porous scaffolds

支架	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	抗压强度/ MPa
55-85-60	13.26	412.51	435.63
45-85-60	13.56	473.98	483.82
35-85-60	13.88	508.38	528.21
35-85-70	11.13	338.37	352.80
35-85-80	8.75	204.81	219.48

文献[12]表明,人体承载骨胫骨的弹性模量为 5.4 ~ 15.6 GPa,抗压强度为 130 ~ 163 MPa;承载骨股骨弹性模量为 11.2 ~ 18.9 GPa,抗压强度为 155 ~ 215 MPa。这 5 种梯度多孔支架的弹性模量在胫骨弹性模量范围内,抗压强度远大于胫骨抗压强度,因此这些支架可以应用于人体胫骨支架的设计。 \bar{P} 为 60%的梯度多孔支架的弹性模量符合股骨的弹性模量,抗压强度大于股骨的抗压强度,因此这 3 种支架可应用于股骨的设计。

Gibson-Ashby 是多孔结构理论模型,该理论反映出多孔材料力学性能与相对密度成指数关系。该理论可为多孔材料力学性能的评估、预测及设计制造提供理论支撑。力学性能与相对密度相关公式如下^[13]:

$$\frac{E_c}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho_c}{\rho_s} \right)^{m_1} \tag{10}$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = C_2 \left(\frac{\rho_c}{\rho_s} \right)^{m_2} \tag{11}$$

其中, E_c, ρ_c, σ_c 是多孔结构的弹性模量 (GPa)、密度 (g/mm^3) 和屈服强度 (MPa), E_s, ρ_s, σ_s 是完全致密体材料的弹性模量 (GPa)、密度 (g/mm^3) 和屈服强度 (MPa), E_c/E_s 是相对弹性模量, σ_c/σ_s 是相对屈服强度, ρ_c/ρ_s 是相对密度。Ti6Al4V 的弹性模量是 110 GPa, 屈服强度是 869 MPa^[8]。经典的 Gibson-Ashby 模型基于立方体结构, C_1, C_2 值分别为 0.1~4.0、0.25~0.35, m_1, m_2 值分别为 2、1.5。

图 7 是相对密度与相对弹性模量 (或相对屈服强度) 的关系图。不同 \bar{P} 梯度多孔支架的相对弹性模量、相对屈服强度与相对密度呈线性关系, C_1, C_2 拟合值分别为 0.26、2.75, m_1, m_2 拟合值分别取 1.05、2.19。与经典 Gibson-Ashby 理论值不

同,原因是^[14]: (1) 由于 Gibson-Ashby 理论的建立基础是相对密度小于 0.3 的泡沫金属,而本研究的梯度多孔结构实际相对密度都大于 0.3。(2) Gibson-Ashby 理论是基于立方体多孔结构,本文采用的 Diamond 结构与其具有一定差异。(3) Gibson-Ashby 理论主要建立在均匀的多孔材料基础上,梯度多孔支架在打印程中可能会形成不确定的缺陷 (如细小的裂纹),使得零件性能偏离预估值。其他研究者的 Gibson-Ashby 拟合值与经典理论模型拟合值也存在差异,他们的拟合值如表 4 所示。采用 Gibson-Ashby 理论对本文梯度多孔支架拟合,相对弹性模量和相对屈服强度都有较好的拟合度 R^2 , R^2 分别达到 0.956、0.970,拟合结果可以为梯度多孔支架的设计提供参考。

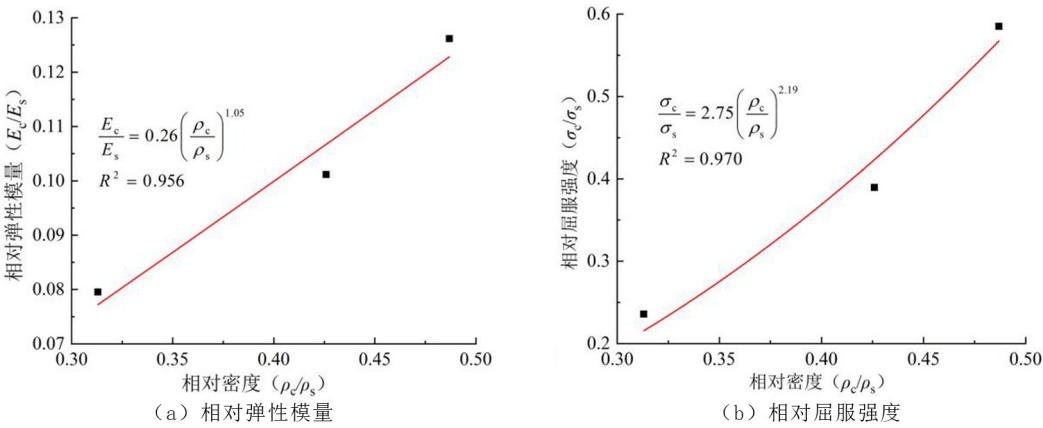


图 7 相对密度与力学性能关系

Fig.7 Relationship between relative density and mechanical properties

表 4 Gibson-Ashby 的拟合值

Tab.4 Fitting values of Gibson-Ashby

参考文献	结构	C_1	C_2	m_1	m_2
[9]	Gyroid	0.19	1.31	1.71	1.83
[9]	Diamond	0.17	1.39	1.64	1.95
[15]	Diamond	1.42~2.75	0.64~1.30	1.97~2.42	1.94~2.44
[16]	Diamond	0.19	2.00	1.18	1.50

4 结论

1) 采用 TPMS 中的 Diamond 多孔结构设计的梯度多孔支架,能够很好地模拟人骨功能梯度的多孔结构。采用 SLM 技术制造的 Ti6Al4V 梯度多孔支架具有内部连通、由内向外的孔隙率梯度

变化特征;枝干表面附着大量粉末,这是 SLM 技术固有特征。

2) 梯度多孔支架的力学性能受到孔隙率的影响,当 P_z 为 85%, \bar{P} 为 60% 时,弹性模量、屈服强度和抗压强度都随着 P_B 的增大而减小;当 P_B 为 35%、 P_z 为 85% 时,弹性模量、屈服强度和抗

压强度都随着 P 的增大而减小。 P 对梯度多孔支架的弹性模量、屈服强度和抗压强度的影响大于 P_B 。

3)采用 Gibson-Ashby 理论对本文的梯度多孔支架进行拟合,有较好的拟合度,能够为梯度多孔支架设计提供参考。

参考文献:

- [1] 吴艳琳,王勇,乔丽英,等.选区激光熔化成型正六方柱体多孔 TC4 合金结构及力学性能研究[J].功能材料,2018,49(6):6080-6087,6092.
- [2] 高芮宁,熊胤泽,张航,等.SLM 制备径向梯度多孔钛/钽的力学性能及生物相容性[J].稀有金属材料与工程,2021,50(1):249-254.
- [3] 李祥,高芮宁,熊胤泽,等.基于 TPMS 结构的多孔钛制备与表征[J].稀有金属材料与工程,2020,49(1):325-330.
- [4] KESHA VARZAN M, KADKHODAEI M, BADROSSAMAY M, et al. Investigation on the failure mechanism of triply periodic minimal surface cellular structures fabricated by Vat photopolymerization additive manufacturing under compressive loadings[J]. Mechanics of Materials, 2020, 140:103150.
- [5] MASKERY I, AREMU A O, PARRY L, et al. Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading[J]. Materials & Design, 2018, 155:220-232.
- [6] HAN C J, LI Y, WANG Q, 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.
- [7] YANG L, HAN C J, WU H Z, et al. Insights into unit cell size effect on mechanical responses and energy absorption capability of titanium graded porous structures manufactured by laser powder bed fusion[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2020, 109:103843.
- [8] 高芮宁,李祥.径向梯度多孔支架设计与力学性能分析[J].机械工程学报,2021,57(3):220-226.
- [9] YAN C Z, HAO L, HUSSEIN A, et al. Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2015, 51:61-73.
- [10] VAN BAEL S, KERCKHOFS G, MOESEN M, et al. Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti_6Al_4V porous structures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(24):7423-7431.
- [11] LIU F, MAO Z F, ZHANG P, et al. Functionally graded porous scaffolds in multiple patterns: New design method, physical and mechanical properties[J]. Materials & Design, 2018, 160:849-860.
- [12] 陈轲,云忠,周俊.TC4 钛合金仿生骨植入体单元结构力学性能分析[J].机械科学与技术,2020,39(8):1277-1282.
- [13] AL-SAEDI D S J, MASOOD S H, FAIZAN-UR-RAB M, et al. Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM[J]. Materials & Design, 2018, 144:32-44.
- [14] 吴先哲,刘红旗,王富友,等.激光选区熔化成形多孔钽金属构件力学性能研究[J].激光杂志,2019,40(11):154-160.
- [15] MA Z B, ZHANG D Z, LIU F, et al. Lattice structures of Cu-Cr-Zr copper alloy by selective laser melting: Microstructures, mechanical properties and energy absorption[J]. Materials & Design, 2020, 187:108406.
- [16] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, AREMU A O, et al. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 670:264-274.

(责任编辑:陈雯)