

钛合金变形 Gyroid 单元梯度多孔结构设计与分析

石志良¹, 阮鹏成¹, 高杰¹, 祝少博²

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

(2. 武汉大学中南医院, 湖北 武汉 430071)

摘要: 研究一种具有径向和轴向孔径梯度的变形 Gyroid 单元多孔结构参数化设计方法, 采用激光选区熔化成形 (selective laser melting, SLM) 技术, 制备出孔隙率为 60% 和 75% 的钛合金变形 Gyroid 单元梯度多孔结构样件。使用有限元法 (finite element method, FEM) 对 4 组梯度多孔支架模型及 2 组均质模型进行静力学仿真分析, 对制备的钛合金梯度多孔样件进行力学性能测试, 并与已测试过的均质样件进行力学性能对比分析。有限元计算结果与力学性能试验结果共同表明: 变形 Gyroid 单元多孔结构力学性能随孔隙率的升高而降低, 孔隙率相同时, 径向梯度多孔支架力学性能优于均质多孔支架, 更适用于皮质骨的骨缺损修复, 轴向梯度多孔支架力学性能相比均质多孔支架有所减弱, 更适用于松质骨。

关键词: 变形 TPMS 多孔结构; 孔径梯度; 钛合金; 力学性能; 有限元法

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)03-1155-07

由创伤、感染、肿瘤等引起的骨缺损在骨科中较为常见, 虽然骨具有自我修复的能力, 但当缺损骨的尺寸较大时, 需要植入骨替代物进行治疗^[1]。传统的骨替代物主要包括自体骨、同种异体骨和异种骨, 但自体骨移植存在供源有限、取骨处不适以及并发症等, 同种异体或异种骨移植存在免疫排斥、传播疾病和感染等问题^[2]。为解决上述问题, 骨组织工程技术被提出, 该技术的关键在于开发出一种能够满足生物性能和力学性能等要求的多孔骨支架作为植入物, 为治疗骨缺损带来新的解决方案^[3]。在骨组织工程中, 多孔骨支架的结构设计方法、材料选择以及制造方法对其性能的影响尤为重要。

传统的多孔骨支架制造方法主要有乳液冷冻干燥法、高压气体膨胀法、相分离法、颗粒滤除法、熔融成型法等, 然而上述方法存在着支架内部孔隙不连通、孔隙形状尺寸难以控制、支架力学性能差等诸多缺陷^[4]。近年来增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术在生物医学领域深入发展, 制造性能更加优越的多孔骨支架有了新的技术支持。目前应用于骨组织工程领域的增材制造技术主要有激光选区熔化 (selective laser melting, SLM)、电子束选区熔融 (electron beam selective melting, EBSM)、立体光固化成型 (stereo lithography appearance, SLA) 等, 其中, SLM 是利用金属粉末在激光束的热作

用下完全熔化, 经冷却凝固而成型的一种技术, 具有有效降低成本、缩短成型周期、提高产品外观质量、减少残余应力和减少产品翘曲等优点^[5,6]。

利用 AM 技术制备多孔骨支架的材料主要包括金属、生物陶瓷、聚合物、复合材料等, 其中金属材料中的钛合金是目前应用较为广泛的生物打印材料^[7]。钛合金材料具有良好的生物相容性、耐腐蚀性和机械性能, 但其弹性模量高达 110 GPa, 远大于人体骨组织的弹性模量, 直接将高弹性模量的钛合金植入物植入人体将引起应力屏蔽效应^[8], 最终导致植入失败。因此应对多孔骨支架植入物的结构进行合理的设计, 使其具有良好的生物力学性能。目前常见的多孔结构设计方法主要有 CAD 法、医学图像法、拓扑优化法和隐式曲面法^[9]。TPMS 是隐式曲面的一种, TPMS 曲面上各点平均曲率为 0, 与实际的骨组织表面相似, 具有较好的仿生性能, 且 TPMS 多孔结构具有渗透率高、孔隙连通、孔隙率和孔径形状尺寸易于精准调控等优点, 在国内外已得到广泛研究。李祥等^[10-12]设计了均质和径向孔隙率梯度 Gyroid 单元多孔结构, 并制备钛和钽多孔样件, 采用有限元分析和力学试验研究其力学性能, 体外细胞培养研究其生物相容性, 研究结果表明钛合金径向梯度 Gyroid 多孔结构与天然骨组织的结构和性能较为相近, 可作为理想的植入物。秦嘉伟等^[13]构建了相同孔隙率的 D、G、

收稿日期: 2022-06-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105503); 湖北省重点研发计划 (2021BCA106)

作者简介: 石志良, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070, 电话: 027-87651793, E-mail: shizhil998@163.com

P 3 种单元杆状 TPMS 与片状 TPMS 模型, 对比模型的孔径、杆径、比表面积等孔隙特征, 利用有限元方法和试验验证分析模型的力学性能, 结果表明同种单元片状结构的比表面积和力学性能均显著高于杆状结构。Yang^[14]等设计了孔隙率在 60%~90% 之间的单轴线性孔隙率梯度和孔隙率为 75% 的均质 Gyroid 单元多孔结构, 采用激光粉末床熔融技术制备了钛合金样件, 进行有限元分析和压缩疲劳试验, 探究梯度对点阵结构疲劳性能的影响, 结果表明梯度设计增强了结构的疲劳性能。Zhang^[15]等针对具有厚度的薄片状 Gyroid 单元设计了均质和厚度梯度的多孔结构, 采用 SLM 技术制备了 316L 不锈钢样件, 通过有限元法和单轴压缩试验研究结构的压缩力学性能和变形差异, 结果表明梯度结构具有更优的力学性能, 压缩时梯度结构逐层坍塌并发生次坍塌, 而均质结构同时坍塌。

目前国内外的研究主要集中于常规 TPMS 多孔结构, 有关变形 TPMS 多孔结构的研究较少, 本研究设计了具有轴向和径向孔径梯度的变形 Gyroid 单元 TPMS 多孔结构, 采用有限元法对设计的多孔结构进行力学性能仿真分析, 并采用 SLM 技术制备钛合金多孔样件, 进行单轴压缩试验测试其力学性能。

1 实验方法

1.1 变形 Gyroid 单元定义

TPMS 曲面控制方程可通过三角函数近似表达, 其表达式如下:

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

式中, A_k 为函数的振幅, r 表示为笛卡尔坐标系中三轴的单位矢量, T_k 为三角函数的周期, P_k 为函数的相位移动量, C 为阈值, 用以控制周期曲面的偏置。

TPMS 单元中常规 Gyroid 单元表达式为:

$$\varphi(r) = \sin X \cos Y + \sin Y \cos Z + \sin Z \cos X = C \quad (2)$$

式中, $X=2\pi x$, $Y=2\pi y$, $Z=2\pi z$, x, y, z 为笛卡尔坐标系下的坐标。式 (2) 表示振幅、周期均为 1、阈值为 C 的 Gyroid 曲面, 采用立方体作为造孔单元, Gyroid 曲面将立方体空间分为两部分, $\varphi(r) \leq C$ 的部分为实体, $\varphi(r) > C$ 的部分为孔隙, 如图 1a 所示分别为常规 Gyroid 曲面和单元, 其 C 值为 0。

单元孔隙率定义如下:

$$P = (1 - V_0 / V) \times 100\% \quad (3)$$

式中, V_0 为单元实体部分体积, V 为立方体体积。对于各种不同的 TPMS 单元, 孔隙率由其数学表达式 (1) 中的阈值 C 决定, 不同的阈值对应着不同的孔隙率。

在常规 Gyroid 单元的表达式 (2) 的基础上, 设置

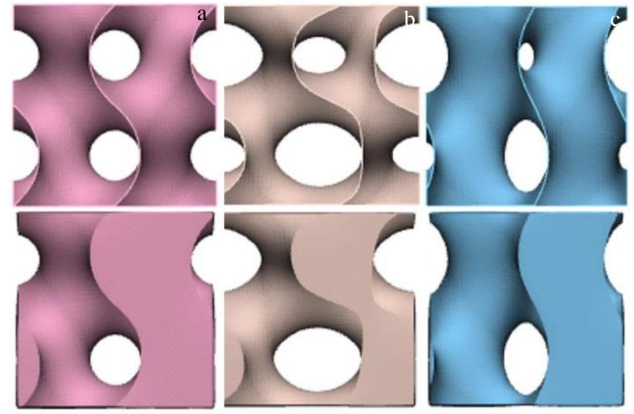


图 1 常规及变形 G 曲面与单元

Fig.1 Undeformed (a) and deformed (b, c) G surface and unit cell

变形系数, 可设计变形 Gyroid 单元, 表达式如下:

$$\varphi(r) = a \sin X \cos Y + b \sin Y \cos Z + c \sin Z \cos X = C \quad (4)$$

式中, a, b, c 为变形系数, 决定着单元孔隙形状和孔隙率, 当 $a=1, b=1, c=1$ 时, 为常规 Gyroid 单元, 孔隙形状为圆形; 当 a, b, c 不同时为 1 时, 为变形 Gyroid 单元, 孔隙形状为椭圆, a, b, c 的取值影响着椭圆长轴方向^[16], 从而影响着多孔支架的力学性能。如图 1b 和图 1c 所示, 图 1b 是 $a=0.5, b=1, c=1$ 的变形 Gyroid 曲面和 Gyroid 单元, 其 C 值为 0.3, 椭圆长轴在水平方向上; 图 1c 是 $a=2, b=1, c=1$ 的变形 Gyroid 曲面和 Gyroid 单元, 其 C 值为 0.5, 椭圆长轴在竖直方向上。

1.2 变形 Gyroid 单元梯度多孔结构设计

对于各种常规 TPMS 单元和变形 TPMS 单元, 单元孔径大小由阈值 C 和周期 T 决定, 单元孔隙率由阈值 C 决定, 将 TPMS 单元沿 X, Y, Z 3 个方向周期性排列, 可得到均质的 TPMS 多孔结构。但在自然骨的内部孔隙结构中, 孔隙一般成梯度分布, 因此具有孔隙梯度的 TPMS 多孔结构, 将具有更好的仿生性能。本研究针对变形 Gyroid 单元, 设计出孔隙率一定、具有轴向和径向孔径梯度的变形 TPMS 多孔结构, 对其进行力学性能分析。

由表达式 (4) 定义的变形 Gyroid 单元可进行孔径梯度 TPMS 多孔结构设计。为使变形 Gyroid 单元多孔结构在受压时孔隙长轴处在压缩方向上, 取 $a=2, b=1, c=1$, 此时结构的孔隙率由阈值 C 决定, 对不同 C 值与其所对应的孔隙率 P 值进行拟合, 二者近似满足线性关系^[16]:

$$P = -0.2404C + 0.5000 \quad (5)$$

变形 Gyroid 单元多孔结构孔隙率一定时, 阈值 C 一定, 此时影响孔径大小的因素为周期 T , 设置周期 T 为坐标 x, y, z 的函数便可设计出具有孔径梯度的多孔结构。本研究中所设计的多孔支架结构样件形状为直

径 10 mm、高度 20 mm 的柱状结构,其结构可进行如下定义:

$$\varphi(r) = \varphi(x, y, z) = \{2\sin X \cos Y + \sin Y \cos Z + \sin Z \cos X \leq C \mid x, y, z \in R \text{ 且} \quad (6)$$

$$0 \leq x^2 + y^2 \leq 25, 0 \leq z \leq 20\}$$

式中, $X=2\pi x/T(r)$, $Y=2\pi y/T(r)$, $Z=2\pi z/T(r)$, $T(r)=T(x, y, z)$ 表示周期 T 与坐标 x, y, z 的函数关系, $T(r)$ 不同可设计具有不同孔径梯度的多孔结构。

对于径向梯度,取 $T(r)$ 函数表达式如下:

$$T(r) = k_1 \sqrt{x^2 + y^2} + b_1 \quad (7)$$

式中, k_1 为系数, b_1 为常数,对该柱状多孔结构,取轴心处的周期 $T=2$,边界处的周期 $T=1.5$,可确定系数 $k_1=-0.1$,常数 $b_1=2$,因此该径向孔径梯度的多孔结构的 $T(r)$ 函数为:

$$T(r) = -0.1\sqrt{x^2 + y^2} + 2 \quad (8)$$

对于轴向线性梯度,取 $T(r)$ 函数表达式如下:

$$T(r) = k_2 z + b_2 \quad (9)$$

对该柱状多孔结构,取 $T_{\min}=1.5$, $T_{\max}=2$,可确定系数 $k_2=0.025$,常数 $b_2=1.5$,则该轴向孔径梯度多孔结构的 $T(r)$ 函数为:

$$T(r) = 0.025z + 1.5 \quad (10)$$

基于 Visual Studio 2015、QT5.14 开发环境和 C++ 程序设计语言,借助 Visual toolkit 可视化工具包,使用经典的移动立方体(marching cube, MC)算法进行 TPMS 等值面提取,开发出 TPMS 多孔结构参数化设计系统,输入设计参数,可输出所设计的 TPMS 多孔结构 STL 模型。本研究设计的梯度多孔结构模型如下图 2 所示,图 2a 和 2b 分别为孔隙率 60% 和 75% 的变形 Gyroid 单元径向梯度多孔模型,模型圆心处周期为 2,圆周处周期为 1.5。图 2c 和 2d 分别为孔隙率 60% 和 75% 的变形 Gyroid 单元轴向梯度多孔模型,模型一端周期为 1.5,另一端周期为 2。

1.3 变形 Gyroid 单元梯度多孔支架力学性能仿真分析

骨缺损患者在进行骨支架植入手术后,在很长一段时间内只能卧床静养或进行一些低强度的活动,基本不会对骨支架产生动载荷,因此对骨支架只需要考虑在静载荷作用下的结构力学,利用商业软件 Abaqus 对设计的梯度多孔支架结构进行有限元静力学仿真分析,为进行对照,加入一组孔隙率分别为 60% 和 75% 的均质多孔结构进行分析,均质模型如图 3 所示。设计的多孔结构为 STL 三角面片模型,不能直接用于有限元分析。由 STL 模型建立有限元模型有间接和直接 2 种途径,间接途径是将 STL 模型转化为实体模型,再划分网格,直接途径是在 STL 模型上直接生成有限元体网格。TPMS 多孔模型复杂,难以从 STL 模型转化为实体模型,故本研究使用商业软件 3-matic,由 STL 模型直接生成有限元体网格模型,并将模型输出为 Abaqus 分析所需的 Inp 网格文件。生成的网格模型为自由四面体网格,最大网格尺寸为 0.1 mm,表 1 是 6 种多孔结构有限元模型网格数量。材料选择钛合金 Ti6Al4V,弹性模量为 113.8 GPa,泊松比为 0.31,屈服强度为 830 MPa。有限元边界条件设置为:固定柱状多孔支架底部所有节点的 6 个自由度,并在顶部所有节点施加向下的 1% 高度的位移载荷。图 3a 为 75% 孔隙率的均质模型所受的边界条件,其他模型边界条件与之相同。图 3b 为 60% 孔隙率的均质模型的有限元网格模型,其他模型的有限元网格模型与之相似。

1.4 多孔钛合金样件 SLM 制备与力学性能试验

使用德国 EOS 公司生产的 M290 型号的 3D 打印机,打印材料为具有良好机械性能和生物相容性的医用 TC4 ELI 粉末,粉末颗粒平均直径为 10~53 μm。该打印机采用 SLM 工艺,将 STL 文件导入处理软件,生成支撑和切片处理后,将数据输出到打印机进行 3D 打印。打印完成后,对样件进行线切割和喷砂处理,清理样件孔隙内残余金属粉末,同时改善样件表面粗糙度,提高抗疲劳性能。打印出的具有径向和轴向孔径梯度变形 Gyroid 单元钛合金多孔样件如图 4 所示。

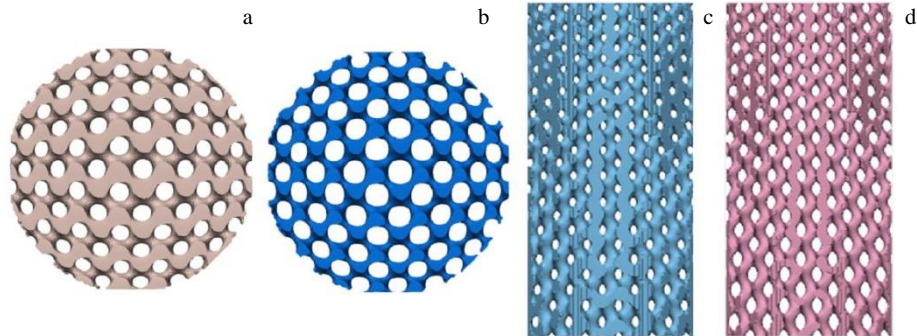


图 2 变形 Gyroid 单元径向和轴向孔径梯度多孔模型

Fig.2 Radial (a, b) and axial (c, d) aperture gradient porous models of deformed G unit cell

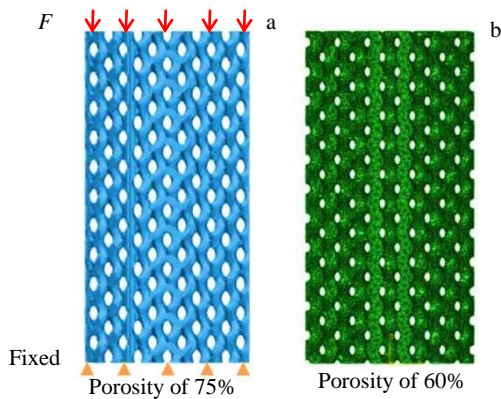


图 3 均质模型边界条件和网格模型图

Fig.3 Boundary conditions (a) and grid model (b) of uniform model

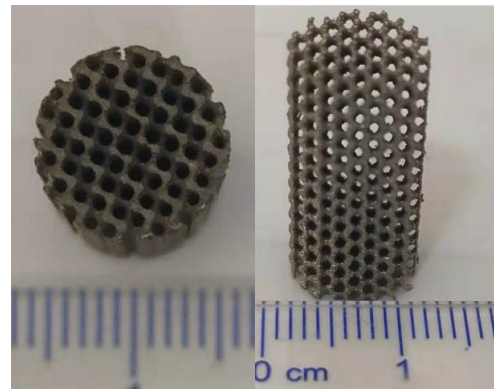


图 4 部分打印样件

Fig.4 Radial and axial porous samples fabricated by SLM

表 1 有限元模型网格数量

Table 1 Mesh number of finite element model

Type	Porosity/%	
	60	75
Radial	1243121	955747
Axial	1203189	943652
Uniform	1220560	949733

将制备的变形 Gyroid 单元钛合金多孔样件分为径向梯度组和轴向梯度组，每组样件孔隙率分别为 60%和 75%，样件尺寸为 $\Phi 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ，每种样件数量为 4 个，对其进行压缩试验，试验采用 Instron 电子万能材料试验机，加载速率为 1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 有限元仿真结果

图 5 为 6 种变形 Gyroid 单元多孔支架在应变为 0.1% 时的应力云图，图 5a 和 5d 为轴向孔径梯度支架，孔隙率分别为 60%和 75%，图 5b 和 5e 为均质支架，孔隙率分别 60%和 75%；图 5c 和 5f 为径向孔径梯度支架，孔隙率分别为 60%和 75%。

由胡克定律计算多孔支架的等效弹性模量：

$$E = \sigma / \epsilon = F / S \epsilon \quad (11)$$

式中， E 为等效弹性模量， σ 为应力， ϵ 为应变， F 为支架 0.1% 应变时顶部所受的支反力， S 为支架截面积。支

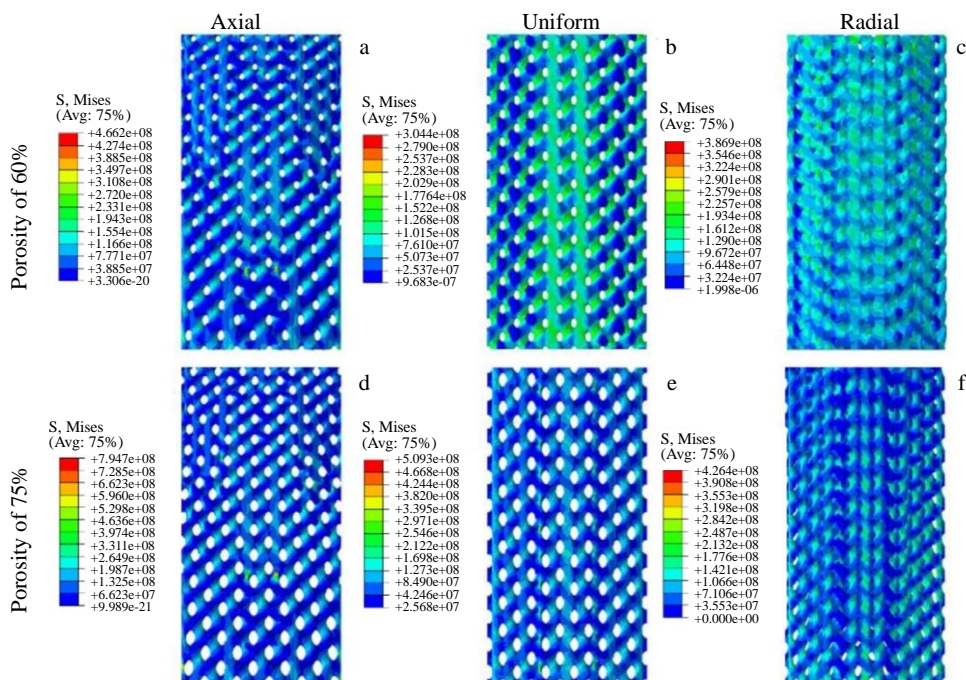


图 5 变形 Gyroid 单元多孔支架应力云图

Fig.5 Stress distributing graphs of deformed Gyroid porous scaffold

架的抗压强度可由仿真计算得到的应力-应变曲线峰值得到。

由有限元分析计算结果可得到 2 种梯度和均质结构的不同孔隙率变形 Gyroid 单元多孔支架等效弹性模量和抗压强度, 如表 2 所示。

通过对比径向和轴向孔径梯度及均质不同孔隙率变形 Gyroid 单元多孔支架有限元仿真计算结果, 可以发现随着孔隙率的上升, 多孔支架抗压强度和等效弹性模量下降。对于径向梯度, 75%孔隙率支架相比 60%孔隙率支架抗压强度和等效弹性模量分别下降 49.3%和 57.1%; 对于轴向梯度, 75%孔隙率支架相比 60%孔隙率支架抗压强度和等效弹性模量分别下降 52.2%和 77.4%, 对于均质支架, 75%孔隙率支架相比 60%孔隙率支架抗压强度和等效弹性模量分别下降 53.2%和 39.3%。孔隙率相同时, 60%和 75%孔隙率的径向梯度支架相比均质支架抗压强度分别提高 6.3%和 15.2%, 弹性模量分别提高 14.8%和 20.4%; 60%和 75%孔隙率的轴向梯度支架相比均质支架抗压强度分别下降 19.6%和 18.0%, 弹性模量分别下降 14.6%和 20.7%。径向梯度支架力学性能优于均质支架, 轴向梯度支架力学性能相比均质支架减弱。

2.2 钛合金多孔样件力学性能测试结果

单轴压缩试验可得到多孔样件的力-位移数据, 由试验数据可得样件的压缩应变及压缩应力分别为:

$$\varepsilon = \Delta L / H \tag{12}$$

$$\sigma = F / S \tag{13}$$

式(12)、(13)中, ΔL 是压缩的长度, H 为样件的高度, F 为支反力, S 为截面面积, 取决于圆柱的半径。根据胡克定律, 可得到钛合金多孔样件的等效弹性模量计算公式:

$$E = \sigma / \varepsilon = FH / S\Delta L \tag{14}$$

由此得到钛合金多孔样件的应力-应变曲线和等效弹性模量。其应力-应变曲线拟合图如图 6 所示。

据应力-应变曲线图可以看出, 具有轴向和径向梯度的变形 G 单元多孔样件的轴向压缩过程大致可分为 4 个阶段: 线弹性阶段、应力屈服阶段、屈服断裂阶段和紧

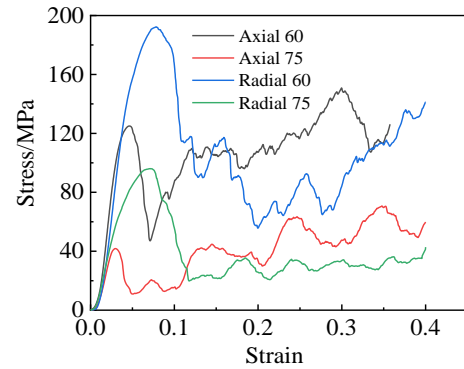


图 6 钛合金多孔样件的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of porous titanium samples

密压实阶段, 如图 7 所示, 图 7a 为 60%孔隙率径向梯度多孔样件压缩过程图, 图 7b 为 75%孔隙率轴向梯度多孔样件压缩过程图。支架受到轴向压力载荷后, 发生弹性变形, 应力随着应变的增大快速增大, 成线性变化; 随着压力载荷的增加, 支架所受应力超过弹性极限, 进入屈服阶段, 发生微量的塑性变形, 应力随应变缓慢增长, 达到屈服极限后, 应力迅速下降, 并不断上下波动, 结构开始断裂; 随着应变持续增大, 支架被层层压塌, 应力随着压实程度呈波动性上升。

由应力-应变曲线峰值可以得到, 孔隙率为 60%径向梯度支架具有最大的平均抗压强度, 为 193.982 MPa, 孔隙率为 75%轴向梯度支架平均抗压强度最低, 为 41.809 MPa, 表 3 为各组样件平均抗压强度和弹性模量。

文献[17]对同样形状和尺寸的钛合金变形 Gyroid 单元均质多孔支架做了压缩力学性能试验, 试验条件与本研究相同, 试验样件的孔隙率分别为 60%和 75%, 孔隙均匀分布, 该试验测得的样件平均抗压强度和弹性模量如表 4 所示。

通过对比径向和轴向孔径梯度及均质样件压缩试验结果, 可以看出随着孔隙率的上升, 样件的平均抗压强度和弹性模量下降。径向梯度组中, 75%孔隙率样件对比 60%孔隙率样件平均抗压强度和平均弹性模量分别下降 59.2%和 38.7%; 轴向梯度组中, 75%孔隙率样件对比 60%孔隙率样件平均抗压强度和平均弹性模量分别下降 66.6%和 47.2%; 均质样件组中^[17], 75%孔隙率的样件相比 60%孔隙率的样件平均抗压强度和平均弹性模量分别下降 53.4%和 45.3%; 孔隙率的增大导致多孔结构中实体部分减少, 结构壁厚减小, 抗压强度和弹性模量减小。相同孔隙率时, 结构上的变化也将引起多孔支架力学性能发生变化。当孔隙率为 60%时, 径向梯度支架相比于均质支架的抗压强度和等效弹性模量分别提高 7.4%和 12.1%, 轴向梯度支架相比均质支架的抗压强度和等效

表 2 钛合金多孔支架力学性能仿真结果

Table 2 Simulation results of mechanical properties of titanium alloy porous scaffold

Sample	Compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa
Radial 60	202.690	15.328
Radial 75	102.857	9.755
Axial 60	153.326	11.403
Axial 75	73.236	6.428
Uniform 60	190.653	13.356
Uniform 75	89.289	8.105

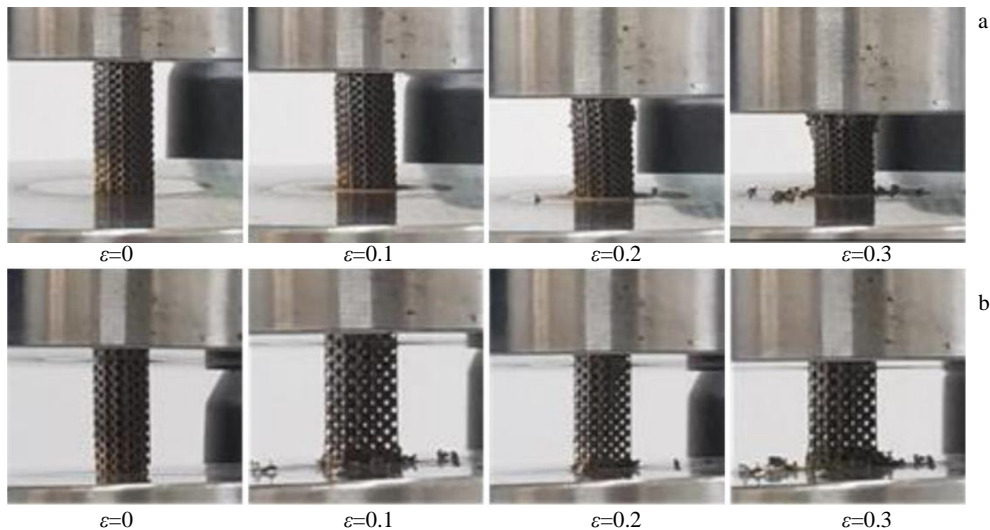


图 7 不同孔隙率的部分样件压缩变形过程图

Fig.7 Compression deformation process diagrams of part samples with porosity of 60% (a) and 75% (b)

表 3 钛合金梯度样件力学性能

Table 3 Mechanical properties of gradient titanium alloy samples

Sample	Compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa
Radial 60	193.982	6.102
Radial 75	96.073	3.723
Axial 60	125.014	4.685
Axial 75	41.809	2.472

表 4 钛合金均质样件力学性能

Table 4 Mechanical properties of uniform titanium alloy samples

Sample	Compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa
Uniform 60	180.671	5.442
Uniform 75	84.281	2.976

弹性模量分别下降 30.8%和 13.9%；当孔隙率为 75%时，径向梯度支架相比于均质支架的抗压强度和等效弹性模量分别提高 14.0%和 25.1%，轴向梯度支架相比均质支架的抗压强度和等效弹性模量分别下降 50.4%和 17.0%。在相同孔隙率下，径向梯度的变形 Gyroid 单元多孔支架相比均质支架具有更优的力学性能，更适用于皮质骨的骨缺损修复；而轴向梯度支架相比均质支架力学性能有所减弱，更适用于松质骨骨缺损的修复。

2.3 有限元仿真结果与力学性能测试结果分析

通过分析比较表 2~表 4 可以看出，有限元仿真得到

的不同梯度、不同孔隙率多孔支架的等效弹性模量和抗压强度结果均高于对应支架力学试验结果，原因是 3D 打印工艺参数和制造环境的影响导致试验样件实际孔隙率高于设计模型孔隙率，实际打印样件有微小缺陷，有限元仿真得到的结果为理想条件下的结果。但在支架力学性能整体变化趋势上，有限元计算结果与试验结果一致，即对于轴向梯度、径向梯度及均质多孔支架，孔隙率增大，力学性能均减弱；孔隙率相同时，径向梯度多孔支架力学性能均优于均质多孔支架，轴向梯度多孔支架相比均质支架力学性能减弱。

3 结 论

1) 对于不同孔隙率的变形 Gyroid 单元多孔支架，支架的等效弹性模量和抗压强度均随孔隙率的增大而下降。

2) 孔隙率相同时，径向梯度多孔支架的力学性能优于均质多孔支架，径向梯度支架适用于对力学性能要求高的皮质骨的骨缺损修复；轴向梯度多孔支架力学性能相比均质支架有所减弱，由于梯度支架具有更优的仿生性能，因此轴向梯度多孔支架可适用于对力学性能要求不高的松质骨骨缺损的修复。

参考文献 References

[1] Entezari A, Zhang Z P, Sue A *et al.* *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2019, 89: 150
 [2] Zhang L, Yang G J, Johnson B N *et al.* *Acta Biomaterialia*[J], 2019, 84: 16
 [3] Xu Jianzhong(许建中). *Chinese Journal of Reparative and*

- Reconstructive Surgery*(中国修复重建外科杂志)[J], 2010, 24(7): 769
- [4] Shao Huifeng(邵惠锋), He Yong(贺永), Fu Jianzhong(傅建中). *Journal of Zhejiang University, Engineering Science*(浙江大学学报, 工学版)[J], 2018, 52(6): 1035
- [5] Li Y, Ding S L, Wen C. *Bioactive Materials*[J], 2019, 4: 56
- [6] Top N, Sahin I, Gokce H et al. *Journal of Materials Research*[J], 2021, 36: 3725
- [7] Wu Tianqi(吴天琦), Yang Chunxi(杨春喜). *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*(中国修复重建外科杂志)[J], 2016, 30(4): 509
- [8] Shi Zhiliang(石志良), Lu Xiaolong(卢小龙), Huang Chen(黄琛) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(6): 1829
- [9] Lei Hongyuan(雷鸿源), Li Jingrong(李静蓉), Xu Zhijia(徐志佳) et al. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*(计算机辅助设计与图形学学报)[J], 2020, 32(1): 156
- [10] Li Xiang(李祥), Gao Ruining(高芮宁), Xiong Yinze(熊胤泽) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(1): 325
- [11] Gao Ruining(高芮宁), Li Xiang(李祥). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2021, 57(3): 220
- [12] Gao Ruining(高芮宁), Xiong Yinze(熊胤泽), Zhang Hang(张航) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(1): 249
- [13] Qin Jiawei(秦嘉伟), Xiong Yinze(熊胤泽), Li Xiang(李祥) et al. *Journal of Medical Biomechanics*(医用生物力学)[J], 2021, 36(4): 576
- [14] Yang L, Wu S Q, Yan C Z et al. *Additive Manufacturing*[J], 2021, 46: 102 214
- [15] Zhang C, Zheng H, Yang L et al. *Materials & Design*[J], 2022, 214: 110 407
- [16] Shi Zhiliang(石志良), Wang Wei(王伟), Gao Jie(高杰). *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*(计算机辅助设计与图形学学报)[J], 2022(6): 970
- [17] Shi Zhiliang(石志良), Gao Jie(高杰), Wang Wei(王伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(7): 2361

Design and Analysis of Gradient Porous Structures for Titanium Alloy Deformation Gyroid Units

Shi Zhiliang¹, Ruan Pengcheng¹, Gao Jie¹, Zhu Shaobo²

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2. Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China)

Abstract: A parametric design method of deformed Gyroid cell porous structure with radial and axial aperture gradients was studied. The deformed Gyroid cell porous structure samples with 60% and 75% porosity of titanium alloy were prepared by selective laser melting (SLM) technology. Static simulation analysis on four kinds of gradient porous scaffold models and two kinds of uniform models were carried out by the finite element method (FEM) and the mechanical properties of the prepared titanium alloy gradient porous samples were tested, and the mechanical properties were compared and analyzed with those of the tested uniform samples. Finite element calculation results and the mechanical performance test results show that the mechanical properties of porous structure deformation Gyroid unit decrease with the increase of porosity. While the porosity is the same, the mechanical properties of porous scaffolds of radial gradient is better than that of uniform porous scaffolds, which are more suitable for cortical bone defects of bone repair. And compared with uniform porous scaffolds, mechanical properties of porous scaffolds of axial gradient are weakened, which are more suitable for the cancellous bone.

Key words: deformed TPMS porous structure; aperture gradient; titanium alloy; mechanical properties; finite element method

Corresponding author: Zhu Shaobo, Ph. D., Chief Physician, Department of Orthopedics, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, P. R. China, Tel: 0086-27-67812888, E-mail: zhushaobo2000@163.com