

文章编号: 1004-7220(2023)05-0976-06

手性蜂窝夹层结构椎体植入物结构参数优化设计

刘帅媛^{1,2}, 郭媛¹

(1. 太原理工大学 生物医学工程学院, 太原 030024; 2. 重庆大学 生物工程学院, 重庆 404100)

摘要: **目的** 运用有限元方法分析手性蜂窝夹层结构椎体植入物的应力分布规律, 为指导椎体压缩性骨折的临床治疗提供理论依据。 **方法** 建立三韧带手性蜂窝夹层结构椎体植入物三维有限元模型, 结合正交实验法和面内外尺寸效应分析进行结构参数优化设计, 并分析5种不同工况下的应力和应力分布。 **结果** 应力峰值最小的结构参数组合为: 胞元壁厚 0.28 mm, 面板厚度 0.8 mm, 胞元高度 0.2 mm, 韧带长度 0.6 mm, 应力峰值出现在蜂窝层边缘靠近上下面板的部分, 最大应变位于上面板边缘未受蜂窝芯子支撑的部分。 **结论** 优化设计后的手性蜂窝夹层结构满足人体生理载荷, 植入椎体后应力峰值比正六边形蜂窝夹层结构更小, 应力分布更均匀, 适合作为椎体植入物基本结构。

关键词: 蜂窝夹层结构; 结构参数; 优化设计; 椎体植入物

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.05.019

Optimization and Design for Structural Parameters of Vertebral Implant with Chiral Honeycomb Sandwich Structure

LIU Shuaiyuan^{1,2}, GUO Yuan¹

(1. School of Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Bioengineering, Chongqing University, Chongqing 404100, China)

Abstract: **Objective** To analyze stress distributions of vertebral implants with chiral honeycomb sandwich structure by finite element method, so as to provide a theoretical basis for the clinical treatment of vertebral compression fractures. **Methods** The three-dimensional (3D) finite element model of the vertebral implant with trichiral honeycomb sandwich structure was constructed. The structural parameters were optimized by combining orthogonal experiment with the in-plane and out-of plane size effects, and the stress and stress distributions under five different working conditions were analyzed. **Results** The combination of structural parameters with the minimum peak stress was as follows: cell wall thickness 0.28 mm, panel thickness 0.8 mm, cell height 0.2 mm, ligament length 0.6 mm. The peak stress occurred at the edge of the honeycomb core near the upper and lower panels, and the maximum strain was located at the edge of the upper panel which was not supported by the honeycomb core. **Conclusions** After optimized design, the chiral honeycomb sandwich structure could meet the physiological load of human body, and the peak stress after vertebral implantation was smaller than that of the regular hexagonal honeycomb sandwich structure, and the stress distribution was more uniform, which was suitable for the basic structure of vertebral implants

Key words: honeycomb sandwich structure; structural parameter; optimization design; vertebral implant

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11472185)

通信作者: 郭媛, 副教授, E-mail: guoyuan@tyut.edu.cn

脊柱作为人体的中轴骨,在日常生产生活中发挥着承受载荷和进行运动等作用。近年来,胸腰椎的椎体压缩性骨折在临床治疗上占据越来越高的比例^[1]。临床手术治疗中,以恢复胸腰椎正常结构和稳定性为主要目的,各种椎体植入物应运而生^[2-3]。其中,自体骨移植存在对患者二次伤害的问题,异体骨移植存在免疫排斥反应的可能^[4-5];相比之下,人造骨作为骨植入物来源的新思路,引起众多研究者的兴趣。

蜂窝结构最早出现于自然界中的天然蜂房,具有良好的抗压抗弯性能,在航空航天等领域得到广泛的应用^[6]。典型的蜂窝夹层结构由上下两层面板和中间的蜂窝芯子组成^[7]。近年来,越来越多的新型蜂窝结构陆续出现,例如填充式蜂窝^[8]、嵌入式蜂窝^[9]、分级蜂窝^[10]以及负泊松比蜂窝^[11]等。其中,手性蜂窝在压缩载荷作用下具有特殊的力学行为,极具研究价值^[12]。为了解决不同的工程问题,研究者们对各种蜂窝夹层结构的结构参数进行优化设计。Guo 等^[13]采用正交试验法对正六边形蜂窝夹层结构的尺寸效应进行有限元分析,通过局部优化,使优化后的峰值应力降至 1.041 MPa,轴向变形为 0.111 0%,前后变形为 0.014 5%。Oclarina 等^[14]对蜂窝结构的相对密度与几何参数比进行优化,有限元分析结果表明,相对密度与几何参数之比最低(约 22.70%)的结构具有较高的等效弹性应变和等效应力。Tian 等^[15]提出一种通过改变结构布局来优化海上风力机导管架支撑结构、使重量最小的有效方法,优化后的结构总体质量比原结构降低了 38.24%。

本文采用正交实验法和面内外尺寸效应分析,对三韧带手性蜂窝夹层结构进行优化设计,得到在人体多种运动工况时应力峰值最小的结构参数组合。将优化设计后的结构作为椎体植入物植入椎体,并将其与以正六边形蜂窝夹层结构作为椎体植入物植入椎体^[16]的情况进行对比。本研究结果可从生物力学角度提供术前植入物尺寸设计,预测术后植入物受力情况,为蜂窝夹层结构作为椎体植入物基本结构应用于临床做出贡献。

1 材料和方法

1.1 三韧带手性结构基础参数选择

采用有限元分析软件 ANSYS 19.0 的参数化设计语言 (APDL) 模块建立 5×3 的蜂窝夹层力学模型。根据腰椎椎体的解剖学尺寸,结合临床手术的切口尺寸以及正六边形蜂窝夹层结构的研究结果^[16],即各个结构参数满足高与边长之比为 $\sqrt{2}$,边长与壁厚之比为 $24/\pi$ ^[17],确定正六边形蜂窝夹层结构的各个基础参数:蜂格边长为 1 mm,蜂窝高度为 1.414 mm,蜂壁厚度为 0.131 mm,面板厚度为 1 mm。

三韧带手性蜂窝是由相互连接的圆柱筒及韧带作为胞元所组成的特殊手性结构,每个圆柱有 3 根韧带,每个韧带连接两个圆柱,并以 120° 的间隔切线连接到圆柱上[见图 1(a)]。建立完整结构需要的全部参数包括面板厚度、胞元壁厚、胞元高度、韧带长度以及圆形节点环半径,为保证正交试验中各因素相互独立、互不相关的要求,选择除圆形节点环半径以外的 4 个参数作为优化设计的基本参数。参考正六边形蜂窝夹层结构的参数值,在其附近选取适当的范围,设计 4 因素 4 水平正交试验。4 个因素如下:胞元壁厚 t (因素 A),取值 0.10、0.12、0.14、0.16 mm;面板厚度 b (因素 B),取值 0.8、0.9、1.0、1.1 mm;胞元高度 h (因素 C),取值 1.0、1.2、1.4、1.6 mm;韧带长度 l (因素 D),取值 0.6、0.8、1.0、1.2 mm。

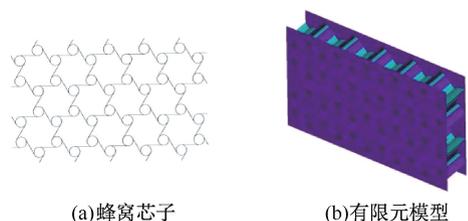


图 1 三韧带手性蜂窝夹层结构

Fig. 1 Trichal honeycomb sandwich structure

(a) Honeycomb core, (b) Finite element model

1.2 三韧带手性蜂窝夹层结构参数优化分析

建立三韧带手性蜂窝夹层结构的三维有限元模型,单元类型均为壳单元 shell 181,网格尺寸通过将胞元高度和韧带长度 10 等分以及圆形节点环半

径5等分来控制[见图1(b)]。设定植入物材料为各向同性线弹性材料;同时,为了满足该结构作为椎体植入物的材料要求,为其赋予松质骨属性,弹性模量291 MPa,泊松比0.25,密度 0.17 g/mm^3 [18]。

对蜂窝夹层结构下面板施加固定约束,上面板分别施加0.4、0.7、1.0、1.3、1.6 kN压缩载荷,以模拟人体静止、行走、跑步、蹦跳以及高空跌落5种工况时L4腰椎上表面受到的载荷。选择等效应力峰值(equivalent stress peak, σ_{\max})、变形峰值(maximum deformation, D_{\max})和质量(M)作为主要的考查指标。

1.3 面内外尺寸效应分析

蜂窝结构的尺寸效应包括面内和面外尺寸效应。面内尺寸效应指的是蜂窝芯子面内尺寸(如胞元壁厚、韧带长度等)改变对整体结构力学性能的影响;面外尺寸效应指的是蜂窝芯子高度方向尺寸(即胞元高度、面板厚度)的改变对夹层结构力学性能的影响。在对各种蜂窝夹层结构进行优化设计的过程中发现,结构参数组合可以反映结构力学性

表1 正交试验设计结果

Tab. 1 Results of the orthogonal experiment

试验号	因素				结果			试验号	因素				结果		
	A	B	C	D	σ_{\max}/MPa	$D_{\max}/\mu\text{m}$	M/mg		A	B	C	D	σ_{\max}/MPa	$D_{\max}/\mu\text{m}$	M/mg
1	1	1	1	1	4.122	12	7.36	8	2	4	3	2	4.940	22	19.40
2	1	2	2	2	6.497	27	16.20	9	3	1	3	4	6.700	29	36.40
3	1	3	3	3	9.593	55	30.00	10	3	2	4	3	5.483	29	27.50
4	1	4	4	4	13.228	97	49.60	11	3	3	1	2	3.372	8	16.70
5	2	1	2	3	6.384	24	24.00	12	3	4	2	1	2.737	8	9.60
6	2	2	1	4	6.407	17	39.00	13	4	1	4	2	3.208	14	15.10
7	2	3	4	1	3.441	16	9.50	14	4	2	3	1	2.470	7	8.33
8	2	4	3	2	4.940	22	19.40	15	4	3	2	4	4.686	14	40.30
9	3	1	3	4	6.700	29	36.40	16	4	4	1	3	3.352	7	29.90

注:A、B、C、D分别表示胞元壁厚 t ,面板厚度 b ,胞元高度 h ,韧带长度 l ; σ_{\max} 为等效应力峰值, D_{\max} 为变形峰值, M 为质量。

2.1.2 指标分析 根据正交试验计算结果可以发现,每组参数组合的变形峰值和质量均较小,故以等效应力峰值(σ_{\max})作为评价指标。根据正交试验得到的数据结果,将每个因素第 i 水平的应力峰值相加,求平均值得到 K_i ; K_i 最大值减去最小值得到各因素的极差 R ,极差表征各因素对评价指标的影响程度。正交试验结果分析的极差计算结果见表2。

综合表1、2可知, $R(A) > R(D) > R(C) > R(B)$,表明各结构参数对三韧带手性蜂窝夹层结构应力

能[19]。本文通过控制变量法,改变单一参数以及参数组合的大小,分析参数的面内外尺寸效应,确定较优的结构参数值。

1.4 植入后椎体受力情况分析

采用3-matic 11.0软件,通过布尔减运算在椎体内部挖出与优化设计后三韧带手性蜂窝夹层结构尺寸一致的空腔,对该空腔椎体以Tet4单元类型划分体网格并进行网格质量检查,控制网格最大边长为2 mm,得到18 484个网格。把空腔椎体与手性蜂窝结构同时导入ANSYS 19.0中,进行接触设置,模拟植入物植入椎体后的情况。为椎体赋予松质骨的材料属性,下表面固定约束,上表面同样施加5种工况的压缩载荷,计算植入后椎体的应力峰值,并与其他结构的结果进行对比。

2 结果及分析

2.1 正交试验结果

2.1.1 4因素4水平正交试验结果 16种不同结构参数组合的正交试验模拟结果见表1。

表2 各因素应力峰值的极差计算结果

Tab. 2 Results of the range of stress peaks for each factor

指标	A	B	C	D
K_1	8.360	5.104	4.313	3.193
K_2	5.293	5.214	5.076	4.504
K_3	4.573	5.273	5.926	6.203
K_4	3.429	6.064	6.340	7.756
R	4.931	0.961	1.264	4.563

峰值的影响程度依次为:胞元壁厚 $t >$ 韧带长度 $l >$ 胞元高度 $h >$ 面板厚度 b 。因此,在优化设计中应尤其注意 t 和 l 这两个参数的取值。

根据表 2 K_i 值可知:对于因素 A(胞元壁厚 t), K_i 随着 t 取值的逐渐增大而减小,故 t 取第 4 水平(0.16 mm)时应力峰值最小;同理,对于因素 B(面板厚度 b)、C(胞元高度 h)和 D(韧带长度 l),均取第 1 水平(分别为 0.8、1.0、0.6 mm)时应力峰值最小,得到结构参数组合为 A4B1C1D1。

2.1.3 各工况结果 对上述结构参数组合分别加载 5 种工况,并与正六边形蜂窝夹层结构结果^[16]进行对比,模拟静止状态时植入物应力分布。结果表明,三韧带手性蜂窝夹层结构整体应力分布均匀,面板上应力较小,峰值位于蜂窝层韧带与上面板的连接处。本文认为,此参数组合下三韧带手性蜂窝夹层结构的承压能力不如正六边形蜂窝夹层结构。正六边形蜂窝夹层结构在受压状态下的应力沿上面板到下面板逐渐增大,峰值出现在蜂窝层靠近下面板的部分(见图 2、表 3)。

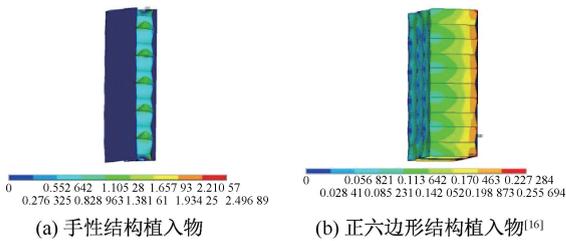


图 2 应力分布云图

Fig. 2 Von Mises stress distributions (a) Implant with chiral honeycomb structure, (b) Implant with hexagonal honeycomb structure^[16]

表 3 两种蜂窝夹层结构的应力峰值对比

Tab. 3 Comparison of peak stress for two honeycomb sandwich structures 单位: MPa

工况	三韧带手性蜂窝	正六边形蜂窝
静止	2.24	0.256
行走	3.923	0.447
跑步	5.596	0.639
蹦跳	7.279	0.831
高空跌落	8.962	1.023

2.2 面内外尺寸效应分析结果

根据极差计算得到的规律,前 3 种结构参数对结构承压能力影响程度较大,因此,对单一参数及组合参数的尺寸效应进行讨论分析,进一步优化参数组合。

2.2.1 单一结构参数面内外尺寸效应分析

先,在保持 l 、 h 和 b 不变的情况下,在区间 [0.08, 0.28] 内以步长 0.04 改变 t 值,进行 6 组尺寸组合的实验,选出较优的 t 值。实验过程中,应满足构成三韧带手性蜂窝结构的几何要求以及确保圆形节点环半径(r)的非负性,故需要两个约束条件:

$$l > 2 \times (t + r), \quad r > 0$$

综合考虑植入物制备要求,本文设定 $r_{\min} = 0.01$ mm。当 $l = 0.6$ mm 时, $t_{\max} = 0.28$ mm。结果表明,应力峰值随着 t 增大而减小,应力峰值最小的一组实验中胞元壁厚 $t = 0.28$ mm。

$t = 0.28$ mm,保持 h 、 b 不变,在区间 [0.6, 1.0] 内以步长 0.1 改变 l 进行实验。根据需满足的约束条件可知, l 只能增大,不能继续减小,进行 5 组尺寸组合的实验,选出较优的 l 值。结果表明,应力峰值随着 l 增大而增大,应力峰值最小的一组实验中韧带长度 $l = 0.6$ mm。

t 、 l 取较优值,保持 b 不变,在区间 [0.2, 1.8] 内以步长 0.4 改变 h ,进行 5 组尺寸组合的实验,选出较优的 h 值。结果表明,应力峰值随着 h 增大逐渐增大,应力峰值最小的一组实验中胞元高度 $h = 0.2$ mm(见图 3)。

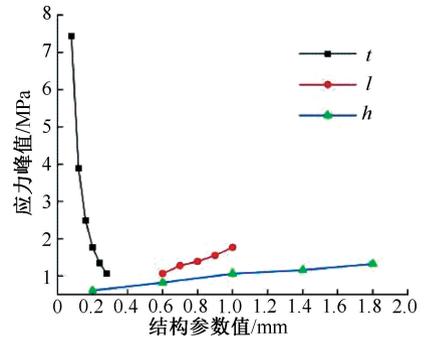


图 3 单一结构参数面内外尺寸效应

Fig. 3 In-plane and out-of plane size effects of single structural parameters

综合以上各结构参数对植入物力学性能的影响分析,即可得到较优组合:胞元壁厚 0.28 mm,面板厚度 0.8 mm,胞元高度 0.2 mm,韧带长度 0.6 mm。

2.2.2 结构参数组合面内外尺寸效应分析 基于单一结构参数分析后得到的较优结构参数尺寸,改变胞元高度与韧带长之比(h/l),分析其对三韧带手性蜂窝夹层结构植入物力学性能的影响。结果

表明,随着 h/l 逐渐增大,应力峰值呈现先减小后增大的趋势,提示三韧带手性蜂窝夹层结构具有明显的面外尺寸效应。应力峰值最小的一组 $h = 0.2 \text{ mm}$ 、 $l = 0.6 \text{ mm}$,与上述对单一结构参数得到的较优组合一致。

根据以上得到的最优结构参数尺寸,当 $b = 0.8 \text{ mm}$ 、 $h = 0.2 \text{ mm}$ 时,改变胞元壁厚与韧带长度之比(t/l),分析其对三韧带手性蜂窝夹层结构力学性能的影响。改变胞元壁厚 t 和韧带长度 l ,使 t/l 逐渐增大。结果发现,随着 t/l 逐渐增大,应力峰值呈现先减小后增大的趋势,表明三韧带手性蜂窝夹层结构具有明显的面内尺寸效应。应力峰值最小的一组 $t = 0.28 \text{ mm}$ 、 $l = 0.6 \text{ mm}$,与上述对单一结构参数得到的较优组合一致(见图4)。最终,确定较优的各结构参数组合为: $t = 0.28 \text{ mm}$ 、 $l = 0.6 \text{ mm}$ 、 $h = 0.2 \text{ mm}$ 、 $b = 0.8 \text{ mm}$ 。

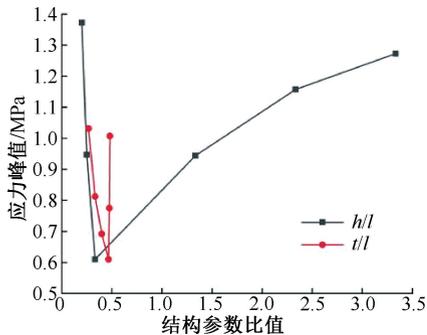


图4 结构参数组合面内外尺寸效应

Fig. 4 In-plane and out-of-plane size effects of structural parameter combinations

2.3 植入椎体后各工况结果

将本文研究的三韧带手性蜂窝夹层结构植入椎体内部,与正六边形蜂窝夹层结构^[16]植入后椎体情况进行对比。结果表明,5种工况下,两种植入后椎体的应力分布规律相似,均为越靠近椎体中间的部分应力值越大,同时最大应力均位于椎体靠近椎孔的一侧;手性结构植入椎体后的椎体应力峰值小于正六边形结构(见图5、表4)。

3 讨论

本文通过数值模拟方法,建立三韧带手性蜂窝夹层结构及植入后椎体的有限元模型。作为仿真模型,验证尤为重要。本文主要通过对比正六边形

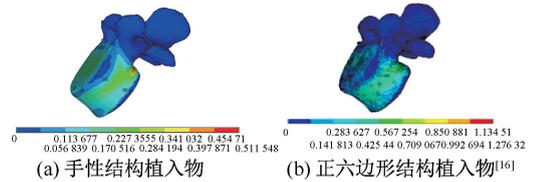


图5 不同结构植入后椎体应力分布

Fig. 5 Stress distributions of vertebral body after implantation
(a) Implant with chiral honeycomb structure, (b) Implant with hexagonal honeycomb structure^[16]

表4 不同结构植入体及对应植入后椎体等效应力峰值

Tab. 4 Peak stress of implants with different structures and corresponding vertebral bodies after implantation

单位:MPa

部位	静止	行走	跑步	蹦跳	高空 跌落
优化后手性蜂窝夹层结构	0.610	1.068	1.524	1.982	2.440
正六边形蜂窝夹层结构	0.256	0.447	0.639	0.831	1.023
手性结构植入后椎体	0.521	0.976	1.377	1.791	2.582
正六边形结构植入后椎体	1.276	1.687	2.579	3.578	3.918

蜂窝夹层结构的研究结果^[16]来验证所建模型。在其他条件(如结构参数范围、材料属性及载荷等)均相同,只有椎体植入物结构不同的条件下,两种结构得到的应力相近(见表4)。手性蜂窝结构在静止载荷下的应力峰值为0.610 MPa,正六边形蜂窝在相同载荷下为0.256 MPa;两种植入后椎体应力分布规律相同,均为越靠近椎体中间的部分应力越大,同时最大应力位于椎体靠近椎孔的一侧,表明本文有限元模型的有效性(见图5)。

本文基于对三韧带手性蜂窝夹层结构优化设计的目的,通过极差大小判断各结构参数对结构应力的影响程度。极差分析法作为正交设计常用的方法之一,其局限性在于无法区分某因素各水平所对应的评价指标平均值间的差异来源,即这种差异是由因素水平不同引起还是由实验误差引起。本文研究目的在于找到1组满足评价指标的较优参数组合,故忽略了极差分析法的不足。后续研究中可针对优化设计中的各种误差来源继续分析,以得到精度更高的实验结果。

由正交试验初步得到一组具有较优结构参数组合的三韧带手性蜂窝夹层结构,对其施加与正六边形蜂窝夹层结构相同的压缩载荷时,发现前者应

力远大于后者,推测原因是正六边形的最佳尺寸范围并不适用于三韧带手性结构。对参数组合进一步优化结果表明,虽然优化设计后的手性蜂窝应力峰值比正六边形蜂窝略大,但其应力分布更为均匀,更符合椎体植入物的生物力学要求。同时,优化设计后的手性蜂窝结构应力峰值出现在蜂窝层边缘靠近上下面板的部分,最大应变位于上面板边缘未受蜂窝芯子支撑的部分,即较大应力和应变出现在蜂窝层的边缘位置。同时,手性结构植入后椎体应力峰值明显降低,小于正六边形结构植入后椎体。本文推测,植入椎体后,植入物边缘部分有其他骨骼组织支撑,降低了应力峰值和应变,即对于椎体植入物来说,优化后的三韧带手性蜂窝夹层结构的力学性能更优。

在今后的工作中,可以进一步探究多层蜂窝夹层结构或其他结构作为椎体植入物的可能性,为椎体植入物的结构设计提供生物力学依据。

4 结论

本文基于人造椎体植入物的生物力学要求,探讨结构参数的尺寸效应,并对三韧带手性蜂窝夹层结构进行优化设计。主要研究结论如下:

(1) 三韧带手性蜂窝夹层结构各结构参数对整体结构应力峰值的影响程度为胞元壁厚 $t >$ 韧带长度 $l >$ 胞元高度 $h >$ 面板厚度 b ;

(2) 通过正交试验以及单一结构参数和结构参数组合的面内外尺寸效应研究,最终得到的较优参数组合为:胞元壁厚 0.28 mm,面板厚度 0.8 mm,胞元高度 0.2 mm,韧带长度 0.6 mm;

(3) 将手性蜂窝结构植入后椎体与正六边形蜂窝植入后椎体进行对比,分析其在 5 种工况下的受力情况发现:三韧带手性蜂窝夹层结构植入椎体后,应力峰值更小,应力分布更均匀,适合作为椎体的植入物结构。

参考文献:

[1] PNEUMATICOS SG, TRIANTAFYLLOPOULOS GK, GIANNOUDIS PV. Advances made in the treatment of thoracolumbar fractures: Current trends and future directions [J]. *Injury*, 2013, 44(6): 703-712.

[2] 李裕强. 经伤椎置钉内固定治疗胸腰椎骨折临床疗效观察 [J]. *亚太传统医药*, 2014, 10(4): 102-103.

[3] MORENO MADRID AP, MARIEL VRECH S, ALEJANDRA

SANCHEZ M, et al. Advances in additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds [J]. *Mater Sci Eng C Biomimetic Supramol Syst*, 2019, 100: 631-644.

[4] YASZEMSKI MJ, PAYNE RG, HAYES WC, et al. Evolution of bone transplantation: Molecular, cellular and tissue strategies to engineer human bone [J]. *Biomaterials*, 1996, 17(2): 175-185.

[5] CAO Y, SHI T, JIAO C, et al. Fabrication and properties of zirconia/hydroxyapatite composite scaffold based on digital light processing [J]. *Ceram Int*, 2020, 46(2): 2300-2308.

[6] 王燕,程文礼,王绍凯. 复合材料蜂窝夹层结构在民用飞机上的应用综述 [J]. *纤维复合材料*, 2021, 38(2): 73-77.

[7] 张剑军,刘建军,韩笑. 蜂窝夹层结构复合材料及其研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2021, 49(12): 253-258.

[8] 李响,曹祥斌,杨蔚华,等. 泡沫填充类蜂窝夹层结构的耐撞性 [J]. *武汉科技大学学报*, 2021, 44(1): 20-26.

[9] XU Y, WANG HH, SHENG XW. Multilayered equivalent finite element method for embedded honeycomb plates [J]. *Shock Vibrat*, 2018. DOI:10.1155/2018/5914137.

[10] JIN X, WANG Z, NING J, et al. Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading [J]. *Compos B Eng*, 2016, 106: 206-217.

[11] 黄伟锋,苏继龙,梅志伟. 负泊松比六韧带手性蜂窝材料的血管支架力学特性分析 [J]. *机电工程技术*, 2022, 51(3): 83-86.

[12] ALDERSON A, ALDERSON KL, ATTARD D, et al. Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading [J]. *Composites Sci Technol*, 2010, 70(7): 1042-1048.

[13] GUO Y, LIU J, ZHANG XS, et al. Structural geometries and mechanical properties of vertebral implant with honeycomb sandwich structure for vertebral compression fractures: A finite element analysis [J]. *Biomed Eng Online*, 2021, 20(1): 96.

[14] OCTARINA AJ, SAPTAJI K, KURNIAWAN T. Optimization of relative density to geometric parameter ratio for honeycomb structure using finite element analysis [J]. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2021, 1098(6): 062102.

[15] TIAN X, SUN X, LIU G, et al. Optimization design of the jacket support structure for offshore wind turbine using topology optimization method [J]. *Ocean Eng*, 2022, 243: 110084.

[16] 吕卓颖. 蜂窝夹芯结构椎体植入物设计与分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2020.

[17] 徐华明. 基于多层蜂窝结构的材料制作及其力学性能的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.

[18] 朱振安. 骨的结构、成份和力学特性 [J]. *医用生物力学*, 1994, 9(3): 177-185.

ZHU ZA. Structure, composition and mechanical properties of bone [J]. *J Med Biomech*, 1994, 9(3): 177-185.

[19] FU MH, ZHENG BB, LI WH. A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson's ratio and the equivalent elastic parameters [J]. *Compos Struct*, 2017, 176: 442-448.