

几类曲壁蜂窝结构的关联机制及力学特性

何一鸣, 张君华

北京信息科技大学机电工程学院, 北京

收稿日期: 2024年10月12日; 录用日期: 2024年10月29日; 发布日期: 2024年12月10日

摘要

近年来蜂窝结构因其独特的力学性能引起了众多研究者的兴趣, 蜂窝结构在航空航天、车辆和工程防护等领域具有非常广阔的应用前景。蜂窝胞元为直壁时, 受力容易出现应力集中, 而曲壁蜂窝可以有效地缓解应力集中问题。文章研究了四种曲壁蜂窝结构, 即圆形孔蜂窝、椭圆形孔蜂窝、花生形孔蜂窝以及四手性蜂窝的内在关联。揭示了此类蜂窝结构的能量吸收机制, 部分能量是通过蜂窝胞元旋转吸收的, 而且胞元旋转产生了负泊松比。得出椭圆形孔蜂窝、花生形孔蜂窝以及四手性蜂窝这三类结构可以通过调节蜂窝胞元的几何参数实现相互转化。通过理论推导计算出四手性蜂窝的等效力学参数并与有限元进行对比以验证其正确性。3D打印试验模型、有限元模型的计算结果和文献进行了对比, 在此基础上研究了这几类蜂窝结构的力学特性, 包括力-位移曲线、泊松比和杨氏模量等。比较了三种曲壁蜂窝结构分别在相同孔隙率下和蜂窝壁厚最小处相同时的力学特性。文章所获得结果将为曲壁蜂窝结构的轻量化设计和在工程领域的广泛应用提供理论依据。

关键词

曲壁蜂窝, 负泊松比, 四手性蜂窝, 轻量化, 能量吸收

The Correlation Mechanism and Mechanical Properties of Several Curved Honeycombs

Yiming He, Junhua Zhang

Mechanical and Electrical Engineering School, Beijing Information Science and Technology University, Beijing

Received: Oct. 12th, 2024; accepted: Oct. 29th, 2024; published: Dec. 10th, 2024

Abstract

In recent years, honeycomb structures have attracted the interest of many researchers due to their unique mechanical properties and have very broad application prospects in aerospace, vehicle, and engineering protection fields. The straight-walled honeycomb is prone to stress concentration after

being stressed, while curved walled honeycomb can effectively alleviate the problem of stress concentration. In this paper, the intrinsic correlation mechanism of four curved wall honeycomb structures, namely circular hole honeycomb, oval hole honeycomb, peanut-shaped hole honeycomb, and four-chiral honeycomb, is studied. The energy absorption mechanism of these honeycomb structures is revealed. Namely, part of the energy is absorbed by the rotation of the honeycomb cell, and the rotation of the cell produces a negative Poisson's ratio simultaneously. It is concluded that three types of structures, namely elliptical pore honeycomb, peanut-shaped pore honeycomb, and tetra-chiral honeycomb, can be transformed into each other by adjusting the geometric parameters of cellular cells. The equivalent mechanical parameters of the four-chiral honeycomb are proposed and compared with the finite element to verify their accuracy. The calculation results of the 3D printing test model and the finite element model are compared with the literature. The mechanical properties of these honeycombs, including force-displacement curves, Poisson's ratio and Young's modulus, are studied. The mechanical properties of the three curved-walled honeycomb structures are compared under the same porosity and at the same minimum honeycomb wall thickness, respectively. The results obtained in this paper will provide a theoretical basis for the lightweight design and wide application of curved honeycomb structures in the engineering field.

Keywords

Curved Wall Honeycomb, Negative Poisson's Ratio, Four-Chiral Honeycomb, Lightweight, Energy Absorption

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

众所周知, 蜂窝结构在航空航天、轨道交通、机械工业、生物医学工程等领域具有广泛的应用前景。蜂窝结构的力学性能主要取决于其几何构型参数, 如蜂窝单胞的形状、大小和分布。不同构型的蜂窝在机械性能上表现出显著的差异, 特殊构型的蜂窝可以产生超材料特性[1], 比如负泊松比、负刚度等。因此众多研究者着重研究蜂窝结构的构型对蜂窝结构力学性能、抗冲击性能和吸能能力的影响[2]-[4]。张等人[5][6]研究了集中缺陷和肋板对材料面内力学性能的影响, 得出随着肋板角度增大, 多胞元薄壁结构的动态承载特性和比能量吸收能力明显提高, 冲击载荷效率也相应增加。Qu 等人[7]提出了将箭头蜂窝和重入蜂窝相结合的滚轴箭头翼蜂窝, 并将其应用于填充船舶壁板起到抗冲击和防护作用。Wang 等人[8]对星形蜂窝和内凹六角形蜂窝结构进行了面内落锤冲击试验。Lv 等人[9]提出了带切口的弯曲网格-蜂窝夹层结构, 建立了有限元模型。Liu 等人[10]提出了一种新的零泊松比蜂窝结构, 蜂窝结构的等效模量有更大的调制范围。闫等人[11]试验研究了正、负、零泊松比蜂窝夹层结构的振动特性。

上述几种胞元为直壁的蜂窝, 易出现尖角, 尖角部分在面内压缩时易出现应力集中的现象。为解决这一问题, 人们提出了曲壁胞元的蜂窝结构。孟等人[12]在圆形蜂窝结构的基础上, 通过引入树叶形增强结构, 构建了增强圆形蜂窝。周等人[13]对碳纤维增强聚合物基复合材料的圆形胞元蜂窝芯层面外剪切模量做了分析, 得出面外剪切模量与圆管半径成反比, 与圆管厚度和材料的剪切模量成正比。Sun 等人[14]研究了多层规则排列的圆形蜂窝的面内耐撞性, 经有限元与理论对比表明, 单位体积最优吸能与动态平台应力和动态致密应变有关。Wu 等人[15]建立了基于圆形细胞和折叠板的新的交叉圆形蜂窝, 并通过改变胞元的几何尺寸来控制材料的密度梯度排列, 有效提高了圆形蜂窝的能量吸收能力。Zhu 等人[16]设计

了新型椭圆形环形折返辅助蜂窝, 提高了蜂窝的刚度和吸能能力。Guo 等人[17]通过用椭圆形胞元壁代替交叉反手性蜂窝的直壁胞元, 提出了一种新的椭圆形反手性蜂窝, 该蜂窝显示出显著的负泊松比特性。冯等人[18]设计了新型节圆正弦蜂窝并研究了其面内压缩特性。吴等人[19]将泡沫填充吸能盒中, 降低了峰值力, 提高了比吸能, 提高了吸能盒的吸能能力。

蜂窝胞元对蜂窝结构的力学性能有显著的影响, 改进胞元孔的形状能够改善、提高蜂窝结构的力学性能。Wang 等人[20][21]通过在固体基材中引入正交排列的花生形孔, 设计了一种新型的应力水平更低的蜂窝结构。Zhang 等人[22]设计了一种新型增塑型管状结构, 采用花生形孔图案, 与正交椭圆孔结构相比, 具有显著的减振性能, 应力水平也显著降低。Yu 等人[23]构建了机器学习模型对蜂窝结构进行优化设计, 优化的曲梁蜂窝结构的能量吸收增加了 57%。Harkati 等人[24]提出的曲壁蜂窝构型具有较高的面内剪切顺应性、量身定制的各向异性。Liu 等人[25]对曲壁负刚度蜂窝结构进行优化设计, 得到了最优的结构几何参数。

手性蜂窝是胞元以“手性”为特征的具有超材料特性的蜂窝结构, 引起了研究者广泛关注。Wu 等人[26]综述了近年来手性超材料蜂窝的设计及应用。Jin 等人[27]在三手性蜂窝中观察到低阶和高阶屈曲模式, 得到了几种典型弹性支撑梁屈曲模态的刚度表达式。Mizzi 等人[28]设计了四种基于二维欧几里得多边形镶嵌的新型手性超材料结构。Chen 等人[29]提出了一种新型的四手性蜂窝结构, 分析了蜂窝结构的压缩性能和变形特性。以上研究表明, 手性蜂窝具有负泊松比特性以及通过手性胞元旋转变形从而吸收更多的能量。

本文以这几类曲壁蜂窝构型为研究对象, 通过对方形图片挖去不同面积将它们关联起来, 研究了这几类蜂窝的能量吸收机制。推导了四手性蜂窝的等效弹性参数公式, 并与有限元模型的计算结果进行比较, 以验证其正确性。对比了 3D 打印模型试验和有限元模型的压缩变形模式和力-位移曲线。对比研究了三种蜂窝结构分别具有相同孔隙率和蜂窝壁最小处相同时的力-位移曲线和泊松比。

2. 几种蜂窝结构的关联机制

2.1. 圆形孔蜂窝结构

圆形孔蜂窝是比较常见的结构, 如图 1(a)所示, 将圆形孔蜂窝结构进行压缩可得到其变形模式, 如图 1(b)所示。通过观察图 1(b)可以看出圆形孔蜂窝结构的孔壁最细处为主要应力集中处, 所以此类结构不能充分发挥蜂窝结构的优势。圆形孔蜂窝结构的胞元如图 1(c)所示, 可以将其视为在正方形的四角上挖去相同的四个扇形孔得到的, 可以通过改变挖孔的形状、大小以及位置从而改变蜂窝胞元的构型, 进而对圆形蜂窝结构改进得到椭圆形孔蜂窝结构。

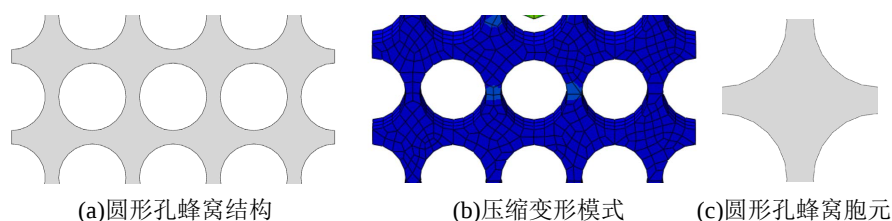


Figure 1. Deformation mode and cell of circular pore honeycomb

图 1. 圆形孔蜂窝结构变形模式及其胞元

2.2. 椭圆形孔蜂窝结构

将圆形孔蜂窝胞元挖掉四个扇形孔改为挖掉四分之一椭圆形, 即可得到椭圆形孔蜂窝胞元, 如图 2(c)

所示。每个四分之一椭圆的长轴进行顺时针排列, 将椭圆形孔蜂窝胞元进行“镜像”从而得到椭圆形孔蜂窝结构, 如图 2(a)所示。将椭圆形孔蜂窝结构进行压缩可得到其变形模式, 如图 2(b)所示。由图 2(b)可以看出, 椭圆形孔蜂窝结构在受压时的变形机制是胞元变形的同时还绕其中心旋转, 蜂窝胞元在旋转过程中吸收能量, 因此相比于圆形孔蜂窝的胞元, 椭圆形孔蜂窝结构应力集中现象得到一定程度的缓解。

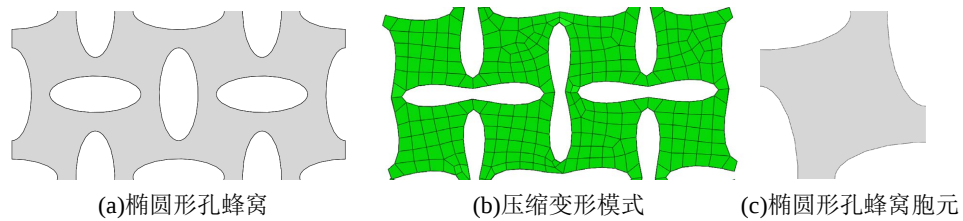


Figure 2. Deformation mode and cell of elliptical pore honeycomb structure

图 2. 椭圆形孔蜂窝结构变形模式及其胞元

2.3. 花生形孔蜂窝结构

通过椭圆形孔蜂窝压缩变形过程可以看出, 在蜂窝结构被压实前可以观察到椭圆形孔蜂窝胞元的变形类似于四根触手进行变形, 并带动胞元进行旋转, 从而将椭圆形孔的短轴进行压缩, 得到的结构类似于花生形孔蜂窝结构[20], 如图 2(b)所示。基于此变形模式可以将椭圆形孔蜂窝结构进行改进得到花生形孔蜂窝结构。

花生形孔蜂窝结构如图 3(a)所示, 其胞元可以视为由正方形在四角分别挖去由两个反向且相切的圆组成的图形, 如图 3(c)所示。将这种胞元进行“镜像”处理即可获得花生形孔蜂窝结构, 其变形模式如图 3(b)所示。

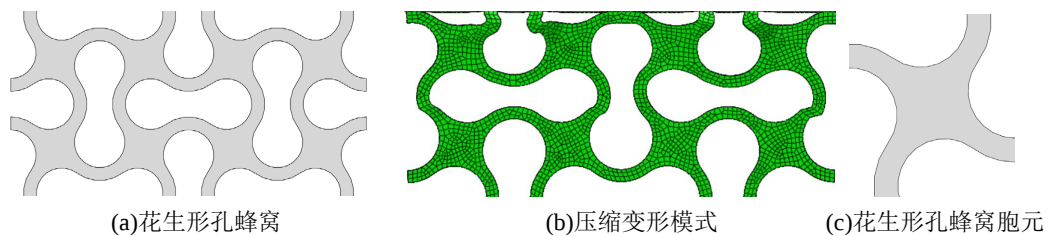


Figure 3. Deformation mode and its cell of peanut-shaped pores

图 3. 花生形孔蜂窝变形模式及其胞元

2.4. 四手性蜂窝结构

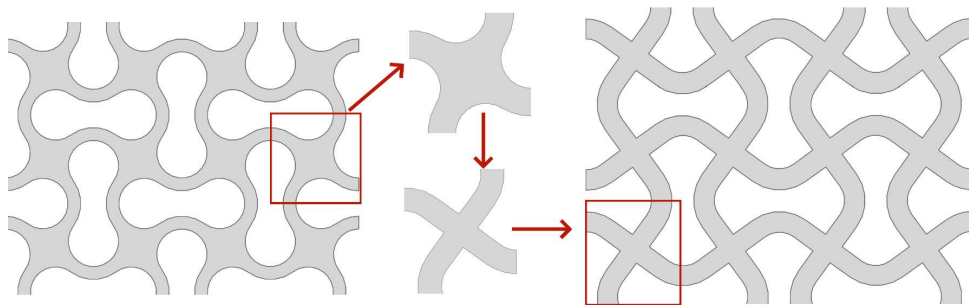


Figure 4. The lightweight design of the peanut-shaped pores obtains the four-chiral honeycomb

图 4. 花生形孔蜂窝轻量化设计得到四手性蜂窝

由图 3(b)花生形孔蜂窝的变形模式可以看出, 其变形以胞元为基本单位, 四个手性的触手通过变形同时带动胞元绕中心进行旋转。由此得出花生形孔蜂窝的主要变形来自于四手性胞元触手的最细处, 而胞元中心的部分则变形较小。因此可以将花生形孔蜂窝结构进行轻量化设计, 去除花生形孔蜂窝结构中间的冗余部分, 将触手设计为等壁厚, 进而得到四手性蜂窝结构[30]。四手性蜂窝胞元如图 4 右图所示, 其可视为由一个正方形在四个角挖去由两个反向相交的圆弧所构成的, 这四个由两反向相交圆弧组成的图形呈顺时针分布在正方形的四角。值得一提的是, 由此方法对椭圆形孔蜂窝结构进行轻量化设计也可以得到与花生形孔蜂窝结构轻量化后相同的四手性蜂窝结构, 如图 5 所示。

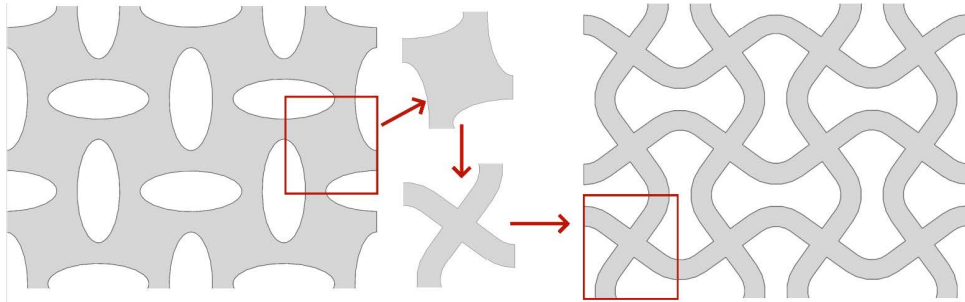


Figure 5. The lightweight design of the elliptical hole honeycomb obtains the four-chiral honeycomb
图 5. 椭圆形孔蜂窝轻量化设计得到四手性蜂窝

本节给出了圆形孔蜂窝、椭圆形孔蜂窝、花生形孔蜂窝以及四手性蜂窝这四种结构的内在关联机制。从圆形孔蜂窝到椭圆形孔蜂窝, 蜂窝结构的变形模式除了胞元压缩变形外还绕胞元中心旋转吸收了部分能量, 进而缓解应力集中问题。受椭圆形孔蜂窝的压缩变形模式启发得到花生形孔蜂窝; 从花生形孔蜂窝到四手性蜂窝, 是考虑将蜂窝进一步轻量化设计, 削减手性胞元的中间部位, 从而可以提高蜂窝材料的比强度。另外, 前三类蜂窝结构的胞元壁厚是变化的, 在计算蜂窝胞元的等效力学参数时带来困难, 轻量化设计后的四手性蜂窝胞元壁是等截面的, 可以通过理论计算其等效弹性参数。

3. 四手性蜂窝的等效力学参数

本节将计算四手性蜂窝的等效力学参数。将四手性蜂窝结构的一端固定, 在另一端均匀地施加力 F , 如图 6(a)所示。

$$P = F \cos \frac{\theta_y}{2} \quad (1)$$

胞元弧上任意一点处的力在 y 轴上的投影为:

$$F_y(\varphi) = \sin \left(\frac{\theta_y}{2} - \varphi \right) \cos \frac{\theta_y}{2} P \quad (2)$$

胞元弧在 y 轴上任意点处的弯矩可得为:

$$M_y(\varphi) = Pr_y (1 - \cos \varphi) \cos \frac{\theta_y}{2} = \frac{1}{2} PL (1 - \cos \varphi) \cot \frac{\theta_y}{2} \quad (3)$$

胞元弧在 x 轴上任意点处的弯矩可计算为:

$$M_x(\varphi) = Pr_x \sin \varphi \sin \frac{\theta_x}{2} = \frac{PL \sin \varphi}{2} \quad (4)$$

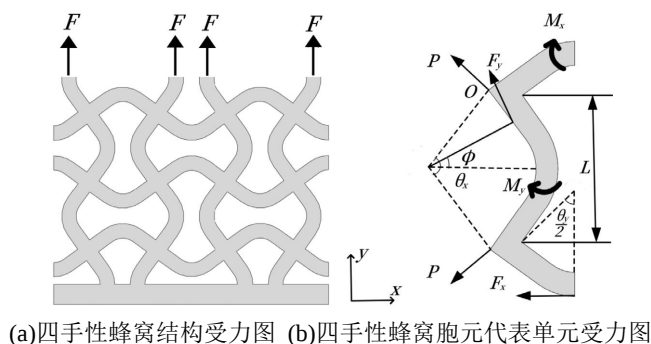


Figure 6. Force diagram of four-chiral honeycomb and its cell
图 6. 四手性蜂窝及其胞元的受力图

在弯矩和轴力作用下, 总变形能 U 为:

$$U = \sum U_F + \sum U_M = \int_0^{\frac{\theta_y}{2}} \frac{M_y^2(\varphi)}{2E_S I_M} d\varphi + \int_0^{\frac{\theta_x}{2}} \frac{M_x^2(\varphi)}{2E_S I_M} d\varphi$$

$$= \frac{F^2 L^2 \cos^2 \frac{\theta_y}{2}}{32E_S I_M} \left[\frac{\left(3\theta_y - 4\sin \frac{\theta_y}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_y}{2}} + \frac{I_M}{2AL^2} \left(\sin \frac{\theta_y}{2} - \theta_y\right) + \frac{\left(3\theta_x - 4\sin \frac{\theta_x}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_x}{2}} \right] \quad (5)$$

上式中, E_S 为材料的弹性模量, I_M 为截面的转动惯量, 以矩形截面为例, $I_M = \frac{bh^3}{12}$, A 为截面面积 ($A = bh$)。根据 Dummy-load 法, 可以得出 x 轴方向的位移:

$$\delta_x = \frac{\int_0^{\frac{\theta_y}{2}} \frac{M_x(\varphi) \overline{M}_x(\varphi)}{2E_S I_M} d\varphi - \frac{FL^2}{32E_S I_M} \left(3\theta_x - 4\sin \frac{\theta_x}{2}\right)}{\sin \frac{\theta_x}{2}} \quad (6)$$

应用 Castigliano 第二定理, y 轴方向的位移为:

$$\delta_y = \frac{FL^2 \cos^2 \frac{\theta_y}{2}}{16E_S I_M} \left[\frac{\left(3\theta_y - 4\sin \frac{\theta_y}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_y}{2}} + \frac{I_M}{2AL^2} \left(\sin \frac{\theta_y}{2} - \theta_y\right) + \frac{\left(3\theta_x - 4\sin \frac{\theta_x}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_x}{2}} \right] \quad (7)$$

两个方向应变分别为:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta_x}{L}, \quad \varepsilon_y = \frac{\delta_y}{L} \quad (8)$$

计算得出泊松比为如下表达式[31]:

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{4\sin \frac{\theta_x}{2} - 3\theta_x}{2 \cos^2 \frac{\theta_y}{2} \sin \frac{\theta_y}{2} \left[\frac{\left(3\theta_y - 4\sin \frac{\theta_y}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_y}{2}} + \frac{I_M}{2AL^2} \left(\sin \frac{\theta_y}{2} - \theta_y\right) + \frac{\left(3\theta_x - 4\sin \frac{\theta_x}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_x}{2}} \right]} \quad (9)$$

单元胞在 y 方向的应力可表示为:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A} = \frac{\int_0^{\frac{\theta_y}{2}} \sin\left(\frac{\theta_y}{2} - \varphi\right) \cos \frac{\theta_y}{2} P d\varphi}{bh} \quad (10)$$

求出四手性蜂窝在 y 方向上的应力与应变之比, 得到其杨氏模量为:

$$E = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} = \frac{16E_s I_M \sin \frac{\theta_y}{2}}{L \cos \frac{\theta_y}{2} \left[\frac{\left(3\theta_y - 4 \sin \frac{\theta_y}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_y}{2}} + \frac{I_M}{2AL^2} \left(\sin \frac{\theta_y}{2} - \theta_y\right) + \frac{\left(3\theta_x - 4 \sin \frac{\theta_x}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\theta_x}{2}} \right]} \quad (11)$$

胞元在 y 方向加载时, 最大剪切应力发生在结构的中心点, 剪应力和剪应变分别为:

$$\tau_{xy} = \frac{3F}{2A}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\delta_x}{h} \quad (12)$$

可得到 x 方向的剪切模量为如下形式:

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{3 \sin\left(\frac{\theta_y}{2} - \varphi\right) \cos \frac{\theta_y}{2} \sin \frac{\theta_x}{2}}{2b \int_0^{\frac{\theta_y}{2}} \frac{M_x(\varphi) \overline{M}_x(\varphi)}{2E_s I_M} d\varphi - \frac{FL^2}{32E_s I_M} \left(3\theta_x - 4 \sin \frac{\theta_x}{2}\right)} \quad (13)$$

公式(9)、(11)和(13)分别是四手性蜂窝胞元的泊松比、杨氏模量和剪切模量。下一节将通过有限元模型计算, 并与上面公式的计算结果进行对比, 验证理论公式的正确性, 3D 打印模型试验与有限元模型的计算进行比较以验证模型的有效性。

4. 试验模型及有限元模型

4.1. 3D 打印试验模型

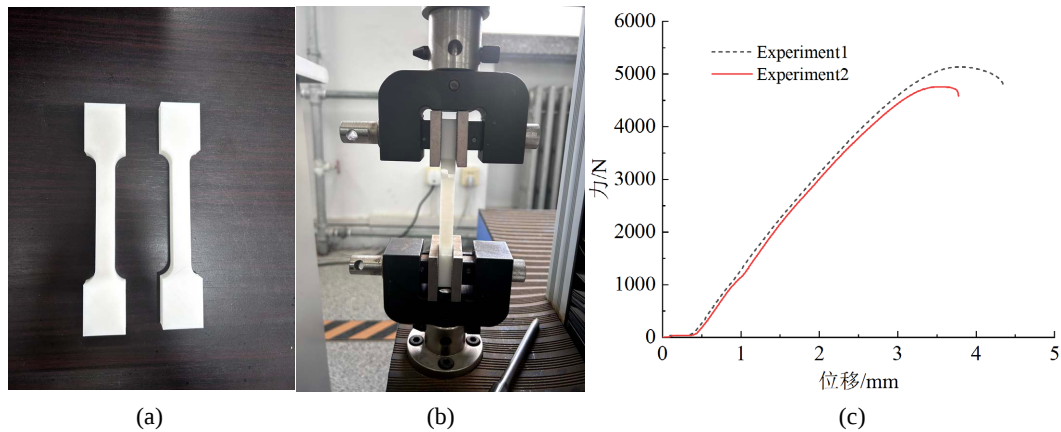


Figure 7. Tensile test and results of PLA

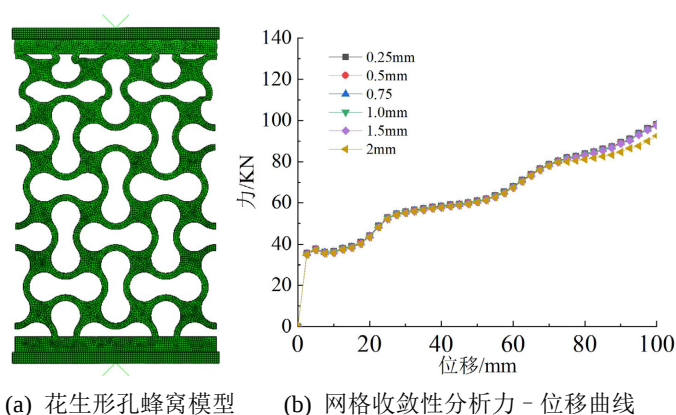
图 7. PLA 基体材料拉伸试验及结果

切片层厚度为 0.2 mm, 壳的壁厚为 1.2 mm, 顶部/底部厚度为 1.2 mm, 填充物密度设置为 100%, 喷

嘴温度设置为 210°C , 建筑板温度为 50°C , 物料直径为 1.75 mm , 打印速度为 40 mm/s , 使用材料为 PLA。如图 7 所示, 通过拉伸实验测得杨氏模量为 0.75 GPa , 后面试验与有限元计算对比时材料杨氏模量采用此值。

4.2. 有限元模型

有限元模型基于 ABAQUS 软件建立, 为获得模型最佳的网格大小, 进行网格收敛性分析。如图 8(a) 所示, 将花生形孔蜂窝模型由不同尺寸的网格进行划分, 即 0.25 mm 、 0.5 mm 、 0.75 mm 、 1 mm 、 1.5 mm 和 2 mm 。具有各种网格细化的模型的力 - 位移曲线结果如图 8(b) 所示。从图 8(b) 可以看出, 具有 1.5 mm 网格细化模型的精度很接近网格取 1 mm 时的值, 而且计算效率比较高, 因此网格尺寸取为 1.5 mm 。



(a) 花生形孔蜂窝模型 (b) 网格收敛性分析力 - 位移曲线

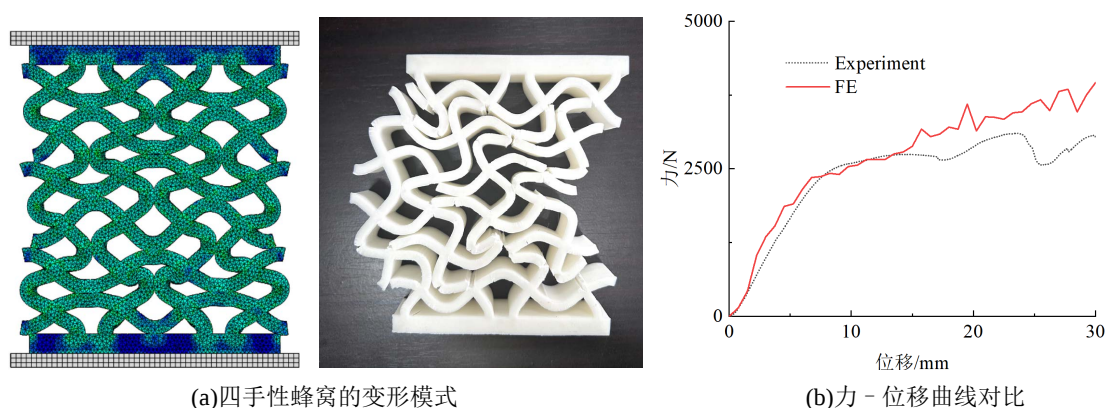
Figure 8. Grid convergence analysis

图 8. 网格收敛性分析

将蜂窝结构的有限元模型的上下盖板设置为刚体, 分别在上盖板和下盖板的中点处进行完全固定约束, 蜂窝结构有限元模型的网格划分为四面体网格, 上下盖板为长方体网格, 如图 8(a) 所示。

5. 结果对比与分析

5.1. 有限元模型与试验对比



(a) 四手性蜂窝的变形模式

(b) 力 - 位移曲线对比

Figure 9. Experimental and finite element comparison of four-chiral honeycombs

图 9. 四手性蜂窝的试验与有限元对比

将 3D 打印模型压缩试验和有限元模型的力 - 位移曲线和变形模式进行对比, 如图 9 所示。由图 9(a)

的变形模式可以看出, 压缩试验过程中蜂窝试件出现了断裂, 这也是导致试验和有限元二者在蜂窝变形较大时误差较大的原因, 如图 9(b)所示。由图 9(b)可以看出, 试验模型和有限元模型得出的力 - 位移曲线吻合较好, 当蜂窝变形过大时二者误差变大。

5.2. 四手性蜂窝的有限元与理论计算对比

图 10 给出了当有限元模型中取 $\theta_x = 90^\circ$, $\theta_y = 60^\circ$, $\theta_y = 70^\circ$, $\theta_y = 80^\circ$, $\theta_y = 90^\circ$, $\theta_y = 100^\circ$, 以及 $\theta_y = 110^\circ$ 时, 四手性蜂窝结构的杨氏模量有限元计算与理论计算的对比, 通过观察可以得出理论计算与有限元模拟是一致的。随着角度的增加, 结构的杨氏模量先增大后降低, 90° 时最大, 角度如图 6(b)所示。

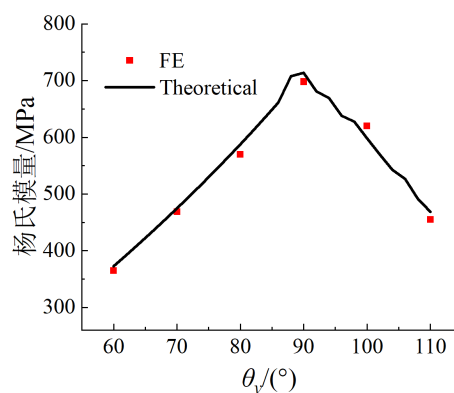


Figure 10. Comparison of Young's modulus from finite element and theoretical calculations for four-chiral honeycombs

图 10. 四手性蜂窝的杨氏模量有限元与理论计算对比

图 11 给出了泊松比的对比结果, 当四手性蜂窝胞元的角度分别为 $\theta_y = \theta_x = 75^\circ$ 、 $\theta_y = \theta_x = 90^\circ$ 和 $\theta_y = \theta_x = 115^\circ$ 时, 本节的理论公式计算结果和有限元模型计算结果以及文献[31]的结果进行对比。从图中可以看出四手性蜂窝结构有限元模型的负泊松比一直为负, 并且本文的有限元模型计算结果与理论计算二者更接近, 与文献给出的值误差都不大, 三者基本吻合。

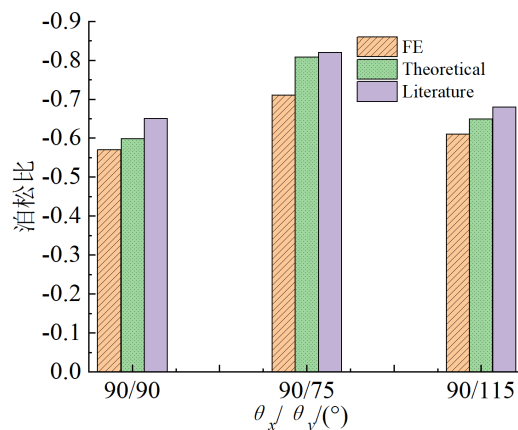


Figure 11. Comparison of the Poisson's ratios by finite elements with the literature and theoretical values

图 11. 有限元和理论计算泊松比及文献结果对比

6. 几类蜂窝结构的力学性能对比

本节将比较椭圆形孔、花生形孔及四手性蜂窝结构分别在蜂窝壁厚最小处相同时以及在相同孔隙率下的力学性能。

6.1. 蜂窝壁厚最小处相同时各结构的力学特性

如图 12(a)所示, 在保证蜂窝壁最细处相同的情况下, 通过有限元计算得出椭圆形孔蜂窝、花生形孔蜂窝和四手性蜂窝的力 - 位移曲线。从图中可以看出, 椭圆形孔蜂窝的峰值力较高, 平台应力也较高, 但是平台区域较短。花生形孔蜂窝的峰值力次之, 平台应力也比椭圆形孔蜂窝的平台应力稍低。四手性蜂窝的峰值力和平台应力都是三种蜂窝中最低的。花生形孔蜂窝和四手性蜂窝的峰值力、平台应力较为接近。另外, 四手性蜂窝的平台应力区域最长, 并且平台应力与峰值力差别不大, 平台区域更平缓, 说明四手性蜂窝更适合做缓冲吸能材料。图 12(b)为蜂窝壁最细处相同的花生形孔、椭圆形孔和四手性三种蜂窝结构的泊松比曲线。可以看出在蜂窝壁最细处相同时, 四手性蜂窝的泊松比变化较大, 花生形孔蜂窝和椭圆形孔蜂窝的泊松比的值比较接近, 曲线起伏不大。

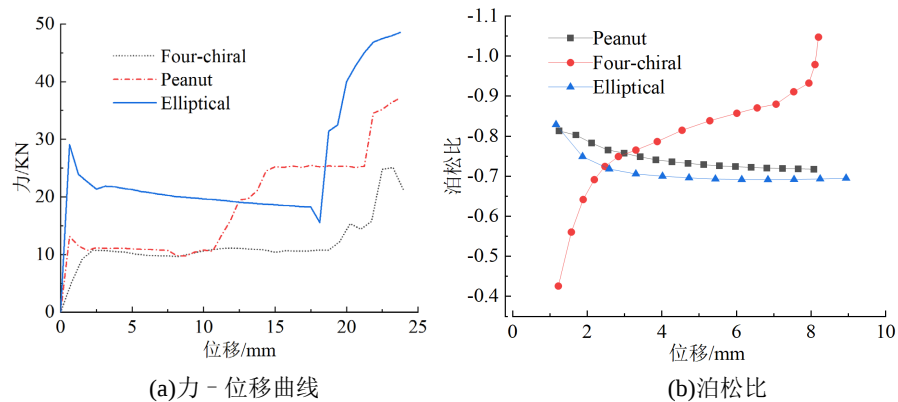


Figure 12. Comparison of force-displacement curves and Poisson's ratios for three honeycombs with the same cell thinnest

图 12. 最细处相同时三种蜂窝的力 - 位移曲线与泊松比对比

6.2. 孔隙率相同时各结构的力学特性

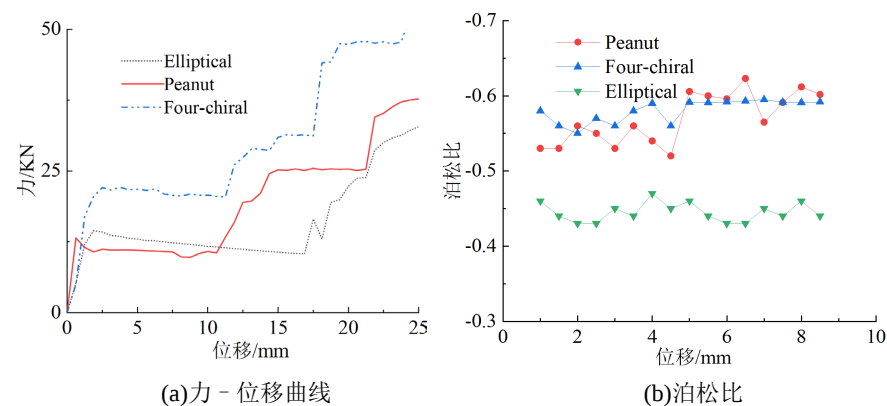


Figure 13. Comparison of the force-displacement curves and Poisson's ratio of three honeycombs with the same porosity

图 13. 孔隙率相同时三种蜂窝的力 - 位移曲线和泊松比对比

图 13(a)为相同孔隙率下, 椭圆形孔、花生形孔和四手性三种蜂窝结构的力 - 位移曲线。可以看出在孔隙率相同的情况下, 四手性蜂窝的力 - 位移曲线最高, 说明它的吸能性更好。由此得出, 将花生形孔蜂窝进行轻量化设计对其力学性能的影响利大于弊。

图 13(b)给出了蜂窝结构在孔隙率相同时, 椭圆形孔蜂窝、花生形孔蜂窝和四手性蜂窝的泊松比。从图中可以看出, 三种蜂窝都存在负泊松比效应。其中椭圆形孔蜂窝的负泊松比较小, 在-0.45 左右, 而花生形孔蜂窝和四手性蜂窝的负泊松比较接近, 在-0.55 左右。因此, 保证孔隙率不变, 对花生形孔蜂窝结构的进一步轻量化设计使其成为四手性蜂窝这一变化对结构的泊松比影响不大, 但是吸能性更优。

7. 结论

本文研究了四种曲壁蜂窝结构的内在关联及其力学特性, 推导出了四手性蜂窝结构的等效弹性参数公式, 并用 3D 打印模型试验、有限元模型数值计算及理论计算进行对比, 验证了理论公式和有限元模型的有效性。主要有以下结论:

1) 通过对平面图形的不同挖孔实现四类蜂窝结构的相互转换, 得到了它们的关联机制。表明花生形孔蜂窝和四手性蜂窝胞元在受力时更容易旋转, 从而更好地缓解应力集中问题, 四手性蜂窝有更大的可调负泊松比。

2) 推导了四手性蜂窝的等效力学参数公式, 理论计算结果与有限元模型的计算结果以及文献进行对比, 结果一致, 从而证明理论公式的正确性和有限元模型的有效性。

3) 蜂窝壁最薄处相同时三种蜂窝的峰值力、平台应力较为接近, 四手性蜂窝的较低, 但四手性蜂窝的力 - 位移曲线平台更长, 即在平台期吸收的能量更多。在孔隙率相同的情况下, 四手性蜂窝的力 - 位移曲线要高于花生形孔蜂窝。因此四手性蜂窝结构具有更好的力学特性。

基金项目

国家自然科学基金(12272057)和河北省自然科学基金(A2023202041)资助。

参考文献

- [1] 吴文旺, 肖登宝, 孟嘉旭, 等. 负泊松比结构力学设计、抗冲击性能及在车辆工程应用与展望[J]. 力学学报, 2021, 53(3): 611-638.
- [2] Guo, H., Yuan, H., Zhang, J. and Ruan, D. (2024) Review of Sandwich Structures under Impact Loadings: Experimental, Numerical and Theoretical Analysis. *Thin-Walled Structures*, **196**, Article ID: 111541. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111541>
- [3] Zhang, J., Zhu, X., Yang, X. and Zhang, W. (2019) Transient Nonlinear Responses of an Auxetic Honeycomb Sandwich Plate under Impact Loads. *International Journal of Impact Engineering*, **134**, Article ID: 103383. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103383>
- [4] Zhu, X., Zhang, J., Zhang, W. and Chen, J. (2018) Vibration Frequencies and Energies of an Auxetic Honeycomb Sandwich Plate. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **26**, 1951-1957. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1455933>
- [5] 白江畔, 张新春, 沈振峰, 等. 冲击载荷下多胞元薄壁结构的动态压溃行为研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 145-152.
- [6] 张新春, 刘颖, 章梓茂. 集中缺陷对蜂窝材料面内动力学性能的影响[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 239-244.
- [7] Qu, Y., Chen, J., Jiao, L., Ye, T. and Hu, X. (2024) Experiment and Finite Element Analysis of Protective Honeycombs Based on Equivalent Method for Ocean Engineering under Impact Loading. *Composite Structures*, **331**, Article ID: 117858. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117858>
- [8] Wang, W., Zhang, W., Guo, M., Yang, J. and Ma, L. (2023) Energy Absorption Characteristics of a Lightweight Auxetic Honeycomb under Low-Velocity Impact Loading. *Thin-Walled Structures*, **185**, Article ID: 110577. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110577>

- [9] Lv, H., Chen, B., Shi, S. and Wen, Z. (2024) Minimum Mass Optimization of Curved Grid-Honeycomb Sandwich Panels with Cutouts under Buckling Constraints. *Structures*, **63**, Article ID: 106359. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106359>
- [10] Liu, W., Zhang, Y., Guo, Z., Li, D., Zhao, S. and Xie, W. (2023) Analyzing In-Plane Mechanics of a Novel Honeycomb Structure with Zero Poisson's Ratio. *Thin-Walled Structures*, **192**, Article ID: 111134. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111134>
- [11] 闫昭臣, 张君华, 刘彦琦, 不同泊松比蜂窝夹层板的振动实验分析[J], 应用力学学报, 2021, 38(6), 2256-2261.
- [12] 孟云聪, 周光明, 蔡登安. 连续碳纤维 3D 打印圆形增强蜂窝的面内压缩性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1776-1787.
- [13] 周星驰, 唐振刚, 周徐斌, 等. CFRP 圆形胞元蜂窝芯层面外剪切模量[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2777-2785.
- [14] Sun, D., Li, G. and Sun, Y. (2019) The In-Plane Crashworthiness of Multi-Layer Regularly Arranged Circular Honeycombs. *Science Progress*, **103**, 1-28. <https://doi.org/10.1177/0036850419879028>
- [15] Wu, H., Zhang, X. and Liu, Y. (2020) In-Plane Crushing Behavior of Density Graded Cross-Circular Honeycombs with Zero Poisson's Ratio. *Thin-Walled Structures*, **151**, Article ID: 106767. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106767>
- [16] Zhu, D., Wei, Y., Shen, X., Yan, K., Yuan, M. and Qi, S. (2024) A Novel Elliptical Annular Re-Entrant Auxetic Honeycomb with Enhanced Stiffness. *International Journal of Mechanical Sciences*, **262**, Article ID: 108732. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108732>
- [17] Guo, Z., Li, Z., Lin, J., Mo, Z. and Li, J. (2023) Multi-Scale Characterization and In-Plane Crushing Behavior of the Elliptical Anti-Chiral Honeycomb. *Composite Structures*, **303**, Article ID: 116345. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116345>
- [18] 冯学凯, 王宝珍, 巫绪涛, 等. 新型节圆正弦蜂窝面内压缩力学性能研究[J]. 力学学报, 2023, 55(9): 1910-1920.
- [19] 吴熙蔚, 张建勋. 填充梯度泡沫锥形吸能盒轴向压缩行为与设计[J/OL]. 应用力学学报: 1-14. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1112.O3.20230619.1009.002.html>, 2024-11-25.
- [20] Wang, H., Xiao, S. and Zhang, C. (2021) Novel Planar Auxetic Metamaterial Perforated with Orthogonally Aligned Oval-Shaped Holes and Machine Learning Solutions. *Advanced Engineering Materials*, **23**, Article ID: 2100102. <https://doi.org/10.1002/adem.202100102>
- [21] Wang, H., Zhang, C., Qin, Q. and Bai, Y. (2022) Tunable Compression-Torsion Coupling Effect in Novel Cylindrical Tubular Metamaterial Architected with Boomerang-Shaped Tetrachiral Elements. *Materials Today Communications*, **31**, Article ID: 103483. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103483>
- [22] Zhang, C., Xiao, S., Qin, Q. and Wang, H. (2021) Tunable Compressive Properties of a Novel Auxetic Tubular Material with Low Stress Level. *Thin-Walled Structures*, **164**, Article ID: 107882. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107882>
- [23] Yu, J., Shi, X., Feng, Y., Chang, J., Liu, J., Xi, H., et al. (2023) Machine Learning-Based Design and Optimization of Double Curved Beams for Multi-Stable Honeycomb Structures. *Extreme Mechanics Letters*, **65**, Article ID: 102109. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2023.102109>
- [24] Harkati, A., Boutagoug, D., Harkati, E., Bezazi, A., Scarpa, F. and Ouisse, M. (2020) In-plane Elastic Constants of a New Curved Cell Walls Honeycomb Concept. *Thin-Walled Structures*, **149**, Article ID: 106613. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106613>
- [25] Liu, N., Mehreganian, N. and Sareh, P. (2024) Never Better than 5/6: The Fundamental Limit of Energy Absorption Efficiency for Negative-Stiffness Curved-Beam Honeycombs. *Materials & Design*, **243**, Article ID: 113024. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113024>
- [26] Wu, W., Hu, W., Qian, G., Liao, H., Xu, X. and Berto, F. (2019) Mechanical Design and Multifunctional Applications of Chiral Mechanical Metamaterials: A Review. *Materials & Design*, **180**, Article ID: 107950. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>
- [27] Jin, M., Hou, X., Zhao, W. and Deng, Z. (2024) Symplectic Stiffness Method for the Buckling Analysis of Hierarchical and Chiral Cellular Honeycomb Structures. *European Journal of Mechanics—A/Solids*, **103**, Article ID: 105164. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105164>
- [28] Mizzi, L., Simonetti, A. and Spaggiari, A. (2024) Mechanical Properties and Failure Modes of Additively-Manufactured Chiral Metamaterials Based on Euclidean Tessellations: An Experimental and Finite Element Study. *Rapid Prototyping Journal*, **30**, 59-71. <https://doi.org/10.1108/rpj-06-2023-0190>
- [29] Chen, L., Cui, C.Y., Cui, X.G. and Lu, J.Z. (2024) Cuttlebone-inspired Honeycomb Structure Realizing Good Out-of-Plane Compressive Performances Validated by DLP Additive Manufacturing. *Thin-Walled Structures*, **198**, Article ID: 111768. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111768>
- [30] Li, A., Lei, Y., Bai, Y. and Wang, H. (2023) Improved Lightweight Corrugated Network Design to Auxetic Perforated

Metamaterial. *International Journal of Mechanical Sciences*, **243**, Article ID: 108040.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.108040>

- [31] Wang, M., Wu, H., Yang, L., Chen, A., Chen, P., Wang, H., *et al.* (2022) Structure Design of Arc-Shaped Auxetic Metamaterials with Tunable Poisson's Ratio. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **30**, 1426-1436.
<https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2033890>