

组合型类蜂窝夹芯结构设计及面内力学性能研究

李响^{1,2}, 段宇², 宋小俊², 王艳苗², 秦红玲², 曹祥斌²

(1. 三峡大学石墨增材制造技术与装备湖北省工程研究中心, 443002, 湖北宜昌;

2. 三峡大学机械与动力学院, 443002, 湖北宜昌)

摘要: 为提高蜂窝夹芯结构共面方向的承载性能,从仿生序构角度,提出一种组合型类蜂窝夹芯结构,并对其面内力学性能进行研究。首先,从深海鱼的骨骼结构中仿生设计出一种功能基元,并将该基元 4 个一组在空间组合成一个基本单元,再将此单元在水平和垂直方向上阵列得到一种四边形里嵌套八边形的组合型类蜂窝夹芯结构;然后,根据胞元理论将该结构进行简化,采用经典梁弯曲理论与胡克定律推导出其面内等效力学参数公式;采用压缩实验和数值模拟进行力学参数的对比验证,得到该结构面内等效弹性模量的实验值、仿真值与理论值之间的误差分别为 13.68% 和 10.60%,验证了组合型类蜂窝夹芯结构面内等效力学参数的准确性。在相同等效密度下,将所设计的组合型类蜂窝夹芯结构和该课题组以前提出的“超轻多孔”类蜂窝夹芯结构进行等效力学性能对比实验,结果表明:所设计的组合型类蜂窝夹芯结构的面内等效弹性模量是类蜂窝夹芯结构的 20 倍左右,其刚度有显著提升,该研究成果为新型蜂窝结构创新设计提供了思路。

关键词: 夹芯结构;组合型类蜂窝;面内力学性能;等效力学参数;压缩实验

中图分类号: TP333 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202207018 **文章编号:** 0253-987X(2022)07-0168-09



OSID 码

Design of Combined Quasi-Honeycomb Core Structure and Research on Its In-Plane Mechanical Properties

LI Xiang^{1,2}, DUAN Yu², SONG Xiaojun², WANG Yanmiao², QIN Hongling², CAO Xiangbin²

(1. Hubei Engineering Research Center for Graphite Additive Manufacturing Technology and Equipment, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: To improve the bearing performance of the honeycomb core structure in the coplanar direction, a new combined quasi-honeycomb core structure is proposed from the perspective of biomimetic structure, and its in-plane mechanical properties are studied. Firstly, functional elements are bionically designed from the skeletal structure of deep-sea fish and every four such elements are grouped spatially into a basic unit. These units are arrayed in the horizontal and vertical directions to obtain a combined quasi-honeycomb core structure in which the octagon is nested in the quadrilateral. The structure is then simplified according to the cell theory, and the theoretical formulas of in-plane equivalent mechanical parameters are derived by using classical beam bending theory and Hooke's law. Compression experiment and numerical simulation are used to verify the accuracy of in-plane equivalent mechanical parameters. It is obtained that the error in the experimental, simulated and theoretical values of the in-plane equivalent elastic

收稿日期: 2022-01-28。 作者简介: 李响(1979—),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975325,51305232);三峡大学石墨增材制造技术与装备湖北省工程研究中心开放基金资助项目(HRCGAM202108)。

网络出版时间: 2022-04-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220401.1636.002.html>

modulus of the structure are 13.68% and 10.60%. This combined structure is compared with the “ultra-light porous” quasi-honeycomb core structure proposed previously by the same research team in terms of equivalent mechanical properties. The results show that the in-plane equivalent elastic modulus of the former is about 20 times that of the latter under the same equivalent density, and the stiffness of the former is significantly increased. These results can provide new perspectives for innovative design of new honeycomb core structures.

Keywords: sandwich structure; combined quasi-honeycomb; in-plane mechanical properties; equivalent mechanical parameters; compression experiment

蜂窝夹层结构材料作为一种轻质、高强、稳定性好的复合型材料,广泛应用于航空航天、汽车、建筑工程、机械制造等领域^[1]。由于使用环境的特殊性,对蜂窝结构的力学性能具有较高要求,因此对其力学性能的研究显得尤为重要。

随着科技的不断进步,传统的蜂窝结构已逐渐不能满足一些特定工况的要求,因此对新型蜂窝结构力学性能的研究已成为热点。黄华等以传统六边形蜂窝胞元为对象,在外侧构建保护壁,提出一种类蜂窝胞元结构,对其力学特性进行了分析^[2]。Xie等通过实验和数值模拟,研究了Nomex蜂窝夹芯板在冲击载荷作用下的动态力学行为和力学性能,探讨了芯层密度、面板厚度、冲头直径和冲击能量对冲击载荷和破坏模式的影响^[3]。Liu等研究了Nomex蜂窝夹层结构在三点弯曲实验中的力学响应,推导了弯曲载荷作用下蜂窝夹芯板和蒙皮剪应力分布的数学关系^[4]。李振等通过变形模式、平台应力和吸能性能3个方面讨论了梯度系数对并联梯度蜂窝结构(HPD)面内力学特性的影响^[5]。文献[6-8]主要针对波纹夹芯板进行了研究,文献[6]推导了未填充和泡沫填充正弦波纹夹芯板的“有效”抗压强度,并建立了一种简化的模型,用于解析预测夹芯板在脉冲载荷作用下的大挠度和时间响应;文献[7]研究了自相似分层波纹板夹芯的动态破坏问题,并构建了分层波形夹芯结构的倒塌机理图,结果表明,速度的增加改变了坍塌机制图的主导变形模式。小支板的欧拉屈曲区域随速度的增加而增大;文献[8]研究了非对称金属波纹夹芯柱在平面内动压作用下的破坏机理,研究表明,速度对其面内动压作用下的变形模式有显著影响,上下面板厚度比对金属波纹夹芯柱的主导变形模式也有一定影响。卢子兴等研究了具有手性和反手性构型的负泊松比蜂窝在不同冲击速度下的变形模式和能量吸收等动态力学响应特性^[9]。魏路路等通过内凹六边形蜂窝与反手性蜂窝的结合得到一种内凹-反手性蜂窝结构,对不同冲击

速度和不同相对密度下内凹-反手性蜂窝的变形模式、抗冲击性能及拉胀性能进行了研究^[10]。

目前,对新型蜂窝夹芯结构的力学性能研究最有效的方法是理论分析、实验测试和数值模拟相结合以得到正确的等效力学性能参数公式^[11-17]。Wang等通过采取数值模拟和三点弯曲实验对新型的蜂窝陶瓷夹层结构的弯曲性能进行研究,结果表明弯曲性能很大程度上取决于当前夹层板的几何配置^[18]。Li等提出了一种新的理论方法来描述方形蜂窝在不同方向上的面内屈服强度^[19]。吴义韬等对复合材料宏观强度准则进行了总结和评述,对最具有代表性的5种强度准则的预测能力进行了综合评估,评估结果表明:Puck准则和LaRC03准则的预测能力相对较好,且对复合材料的损伤机理有更为合理的解释^[20]。

得益于科技的进步和计算机技术的飞速发展,人们开始把一些生物材料结构应用到复合材料结构设计中并取得了较为明显的成果。Zou等根据竹子内部微观结构设计了一种相对于传统薄壁管具有更好的能量吸收特性的仿竹薄壁管^[21]。Zhu等通过分析羊角的力学性能以及对羊角微观结构的观测,设计了具有良好耐撞性能的仿生管^[22]。王海任等通过对王莲脉络的分析,仿生得到一种分层梯度蜂窝,并进行准静态与动态压缩数值模拟,分析了其准静态压缩平台应力与相对密度,以及动态压缩强度与相对密度、冲击速度之间的关系^[23]。任毅如等结合竹子的梯度结构和椰子树的同心胞结构,提出了两种单向梯度和两种双向梯度同心内凹蜂窝(ARH)结构。发现相对传统的ARH,梯度同心ARH有更高的平台应力和比吸能^[24]。

由于蜂窝结构的孔洞特性,使其面内承载能力远小于面外承载能力。但是,当共面方向壁厚较薄时,会引起异面内蜂窝结构的坍塌,迫切需要提高其共面方向的承载性能。因此,本文从仿生序构角度出发,提出一种由四边形与八边形组合而成的组合

型类蜂窝夹芯结构,通过构建其力学模型,采用经典梁弯曲理论与胡克定律推导出该夹芯结构的面内等效力学参数公式,应用数值模拟和实验方法验证其理论推导的正确性。

1 组合型类蜂窝夹芯结构创新构型

具有高刚度的夹芯结构是夹层结构的重要组成部分,夹层结构力学等效模型的研究工作主要集中在蜂窝夹芯结构。研究表明,在设计过程中引入含功能性基元,在微观尺度和宏观尺度上对材料结构进行改造设计,将使材料在宏观物性上大为提升。单个胞元对性能的提升有限,将胞元按照相同或不同的形式在空间中进行堆垛排列,形成一种序构,该序构可有序或无序,其引发基元间的耦合,可对性能有更大提升。蜂窝胞元就是功能基元的典型结构。蜂窝胞元组成的蜂窝超材料结构展现出特殊的力学性能和应用前景。将仿生理念和功能基元序构概念相结合关联到蜂窝夹芯结构形状设计当中,组合型类蜂窝夹芯结构创新构型如图1所示,深海鱼因其优异的鱼骨结构,从而能承受海水的巨大压力,受鱼骨结构启发得到一种功能基元,并通过基元在空间中的排列组合,仿生序构出一种由四边形和八边形组合而成的新型组合型类蜂窝夹芯结构,如图2所示。在此基础上,同时受鱼骨头和青蛙骨骼结构启发,结合组合型类蜂窝夹芯结构,仿生序构出结构A,梯度层级类蜂窝夹芯结构A仿生序构过程如图3所示,结构A将为梯度层级类蜂窝结构的研究提供重要启示。本文将首先揭示组合型类蜂窝夹芯结构的面内力学性能。

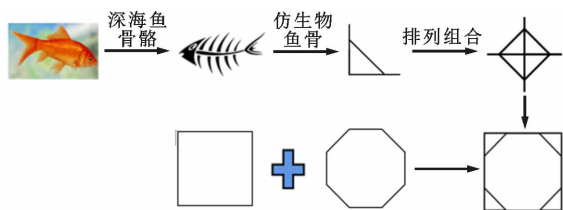


图1 组合型类蜂窝夹芯结构仿生序构过程

Fig.1 Innovative configuration of the combined quasi-honeycomb core structure

由于蜂窝结构具有孔洞特性,故单一的八边形蜂窝结构面内承载能力远小于面外承载能力,当蜂窝壁厚较薄时,其面内承载能力的不足会引发面外蜂窝结构的坍塌。本文利用仿生序构构造的组合型类蜂窝夹芯结构,相当于在八边形胞元结构的外层构建方形保护壁,使组合型类蜂窝夹芯胞元内部多

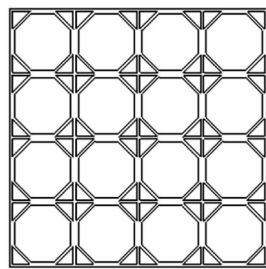


图2 新型组合型类蜂窝夹芯结构

Fig.2 Combined quasi-honeycomb core structure

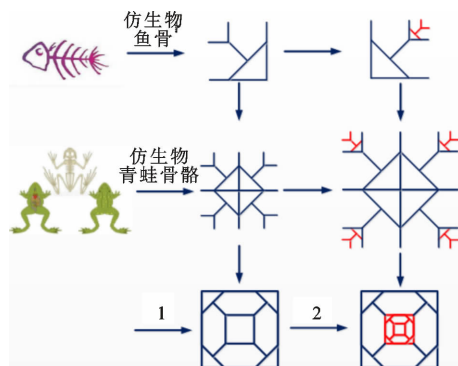


图3 梯度层级类蜂窝夹芯结构A仿生序构过程

Fig.3 The biomimetic ordering process diagram of the gradient hierarchical quasi-honeycomb sandwich structure A

出一系列稳定的三角形基元,增强其面内的承载能力,解决因为横向壁厚较薄时引起结构纵向的坍塌问题。

2 组合型类蜂窝夹芯结构面内等效力学参数

组合型类蜂窝单胞和多胞结构如图4所示。利用胡克定理和经典梁弯曲理论推导组合型类蜂窝夹芯结构等效力学参数,根据胞元理论,取图4(b)中虚线里面的单元体作为研究对象,对其进行受力分析,如图4(c)和(d)所示。其结构尺寸如图4(a)所示, a 表示八边形边长; l 表示夹芯胞元壁板高度; t 表示八边形胞元厚度; t_1 和 t_2 表示四边形不同胞元壁的厚度; H_1 表示单元体沿 x 方向的初始长度; H_2 表示单元体沿 y 方向的初始长度; θ 表示八边形边长与横向方向的夹角。

2.1 x 方向上的等效弹性模量推导

x 方向拉伸结构的受力如图4(c)所示,从正方形里面取出来的单元体结构对称,受力情况以及约束条件相同,故简化成1/2模型作为组合型类蜂窝结构推导等效弹性常数的研究对象。简化结构在 x

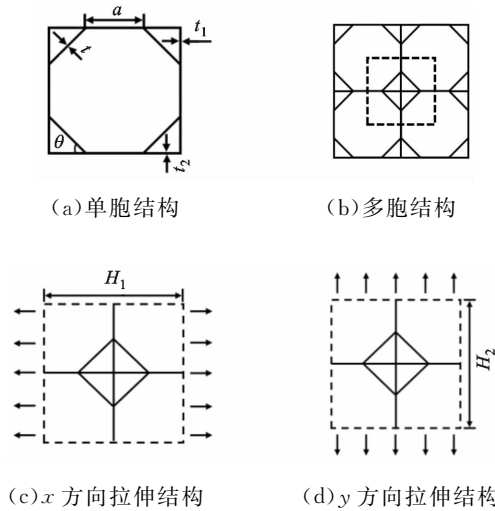
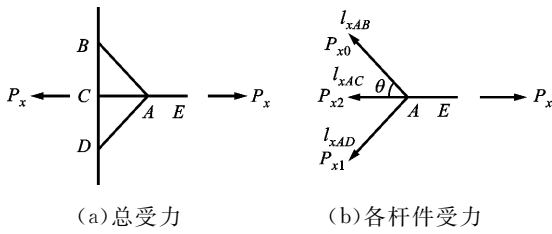


图 4 组合型类蜂窝单、多胞结构及轴向拉伸结构

Fig. 4 Combined quasi-honeycomb single/multi-cell structure and axial tensile structure

方向受力如图 5 所示,根据受力情况分别求其 l_{xAB} 杆、 l_{xAC} 杆和 l_{xAD} 杆的受力 P_{x0} 、 P_{x2} 和 P_{x1} ,根据经典梁弯曲理论求其每根杆的变形量。

图 5 简化结构在 x 方向受力Fig. 5 Force diagram of the structure in the x direction

由图 4 中几何尺寸关系可得

$$H_1 = (2\cos\theta + 1)a + t_1 \quad (1)$$

$$H_2 = (2\sin\theta + 1)a + t_2 \quad (2)$$

将 l_{xAE} 杆截面断开后,杆 l_{xAB} 的实际长度为

$$l_{xAB} = a - (2\cos\theta - 1)t \quad (3)$$

由图 5 所示,对 A 点进行受力分析可得

$$\sum F_x = P_{x2} + 2P_{x1}\cos\theta - P_x = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = P_{x1}\sin\theta - P_{x0}\cos\theta = 0 \quad (5)$$

协调方程

$$\Delta l_{xAB} = \Delta l_{xAC}\cos\theta \quad (6)$$

解得

$$\begin{cases} P_{x1} = P_{x0} = \frac{P_x \cos^2\theta}{2\cos^3\theta + A_{xAB}/A_{xAC}} \\ P_{x2} = \frac{P_x}{2\cos^3\theta A_{xAB}/A_{xAC} + 1} \end{cases} \quad (7)$$

其中 l_{xAB} 杆及 l_{xAC} 杆的截面积 A_{xAB} 和 A_{xAC} 分别为

$$A_{xAB} = tl \quad (8)$$

$$A_{xAC} = t_2 l \quad (9)$$

在外力 P_x 作用下 l_{xCE} 杆的形变量为

$$\Delta l_{xAC} = \frac{P_{x2} l_{xAC}}{E_s A_{xAC}} = \frac{P_{x2} [a - (2\cos\theta - 1)t] \cos\theta}{E_s t_2 l} \quad (10)$$

$$\Delta l_{xAE} = \frac{P_x l_{xAE}}{E_s A_{xAE}} = \frac{a P_x}{2E_s (t_2 + 2t) l} \quad (11)$$

式中 E_s 是基体材料弹性模量。

l_{xCE} 杆总的轴向形变量为

$$\Delta l_{xCE} = \Delta l_{xAC} + \Delta l_{xAE} \quad (12)$$

在外力 P_x 作用下 l_{xAB} 杆的形变量为

$$\Delta l_{xAB} = \frac{P_{x0} l_{xAB}}{E_s A_{xAB}} = \frac{P_{x0} [a - (2\cos\theta - 1)t]}{E_s tl} \quad (13)$$

x 方向的等效应变为

$$\epsilon_{cx} = \frac{2(\Delta l_{xAC} + \Delta l_{xAE} + \Delta l_{xAB} \cos\theta)}{H_1} \quad (14)$$

同理可以得到在 y 方向上的等效应变为

$$\epsilon_{cy} = -\frac{2\Delta l_{xAB} \sin\theta}{H_2} \quad (15)$$

根据泊松比的定义,由式(10)、(11)、(13)可得组合型类蜂窝夹芯结构在 x 方向上的等效泊松比为

$$\begin{aligned} \nu_{cx} &= \left| \frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_{cx}} \right| = \frac{1}{2} \frac{(2\cos\theta + 1)a + t_1}{(2\sin\theta + 1)a + t_2} [a - \\ &(2\cos\theta - 1)t] 2\cos^2\theta \sin\theta (2t\cos^3\theta + t_2)^{-1} \cdot \\ &\{[a - (2\cos\theta - 1)t](\cos\theta + \cos^3\theta) \cdot \\ &(2t\cos^3\theta + t_2)^{-1} + a(2t_2 + 4t)^{-1}\}^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

夹芯胞元节点外力为

$$P_x = \sigma_{cx} H_2 l = \sigma_{cx} [(2\sin\theta + 1)a + t_2] l \quad (17)$$

根据弹性模量的定义,可得组合型类蜂窝夹芯结构在 x 方向上的等效弹性模量为

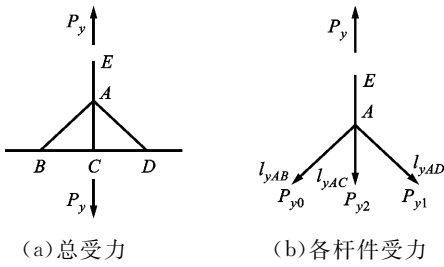
$$\begin{aligned} E_{cx} &= \frac{\sigma_{cx}}{\epsilon_{cx}} = \frac{1}{2} E_s \frac{(2\cos\theta + 1)a + t_1}{(2\sin\theta + 1)a + t_2} \cdot \\ &\left\{ \frac{[a - (2\cos\theta - 1)t](\cos\theta + \cos^3\theta)}{t_2 + 2t\cos^3\theta} + \frac{a}{2t_2 + 4t} \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (18)$$

2.2 y 方向上的等效弹性模量推导

y 方向拉伸结构的受力如图 4(d)所示,由图 4(d)可知,由于其满足结构对称,受力情况以及约束条件对称,再取其 1/2 结构模型作为 y 方向的研究对象,该简化结构在 y 方向的受力如图 6 所示。分别求取 l_{yAB} 杆、 l_{yAC} 杆和 l_{yAD} 杆所受的力,然后再求取各杆形变量,最后求取等效弹性常数 E_{cy} 。

对 B 点进行受力分析可得

$$\sum F_x = P_{y0} \cos\theta - P_{y1} \cos\theta = 0 \quad (19)$$

图6 简化结构在 y 方向受力Fig. 6 Force diagram of the structure in the y direction

$$\sum F_y = P_{y2} + 2P_{y1} \sin\theta - P_y = 0 \quad (20)$$

协调方程

$$\Delta l_{yAB} = \Delta l_{yBC} \sin\theta \quad (21)$$

解得

$$\begin{cases} P_{y0} = P_{y1} = \frac{P_y \sin^2\theta}{2\sin^3\theta + A_{CB}/A_{AB}} \\ P_{y2} = \frac{P_y}{2\sin^3\theta A_{AB}/A_{CB} + 1} \end{cases} \quad (22)$$

其中杆 l_{yAB} 和杆 l_{yBC} 的截面积为

$$A_{yAB} = th \quad (23)$$

$$A_{yCB} = t_1 h \quad (24)$$

在外力 P_y 的作用下 l_{yCE} 杆的形变量为

$$\Delta l_{CA} = \frac{P_{y2} l_{CA}}{E_s A_{CA}} = \frac{P_{y2} [a - (2\cos\theta - 1)t] \sin\theta}{E_s t_1 l} \quad (25)$$

$$\Delta l_{AE} = \frac{P_y l_{AE}}{E_s A_{AE}} = \frac{a P_y}{2E_s (t_1 + 2t) l} \quad (26)$$

l_{yCE} 杆在 y 方向上总的轴向形变量为

$$\Delta l_{yCE} = \Delta l_{yCA} + \Delta l_{yAE} \quad (27)$$

l_{yAB} 杆在外力作用下的形变量为

$$\Delta l_{yAB} = \frac{P_{y1} l_{yAB}}{E_s A_{yAB}} \quad (28)$$

y 方向上总的形变量为

$$\Delta l_y = \Delta l_{yCA} + \Delta l_{yCE} + \Delta l_{yAB} \sin\theta \quad (29)$$

同理可以得到在 x 方向上等效应变为

$$\epsilon_{cx} = -\frac{2\Delta l_{yAB} \cos\theta}{H_1} \quad (30)$$

根据胡克定理求得 y 方向上的等效应变

$$\epsilon_{cy} = \frac{2\Delta l_y}{H_2} \quad (31)$$

根据泊松比的定义,可知组合型类蜂窝夹芯在 y 方向上的等效泊松比为

$$\nu_{cy} = \left| \frac{\epsilon_{cx}}{\epsilon_{cy}} \right| = \frac{1}{2} \frac{[(2\sin\theta + 1)a + t_2]}{[(2\cos\theta + 1)a + t_1]} 2a \sin^2\theta \cos\theta \cdot (2t \sin^3\theta + t_1)^{-1} \{ (\sin\theta + \sin^3\theta) [a - (2\cos\theta - 1)t] \cdot (2t \sin^3\theta + t_1)^{-1} + a(2t_1 + 4t)^{-1} \}^{-1} \quad (32)$$

夹芯胞元节点外力 P_y 为

$$P_y = \sigma_{cy} H_1 l = \sigma_{cy} [(2\cos\theta + 1)a + t_1] l \quad (33)$$

根据弹性模量的定义,可得组合型类蜂窝夹芯结构在 y 方向上的等效弹性模量为

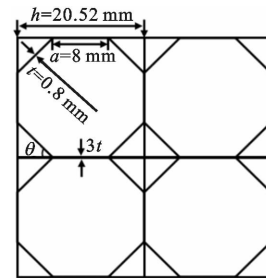
$$E_{cy} = \frac{\sigma_{cy}}{\epsilon_{cy}} = \frac{1}{2} E_s \frac{[(2\sin\theta + 1)a + t_2]}{[(2\cos\theta + 1)a + t_1]} \cdot \left\{ \frac{[a - (2\cos\theta - 1)t](\sin\theta + \sin^3\theta)}{2t \sin^3\theta + t_1} + \frac{a}{2t_1 + 4t} \right\}^{-1} \quad (34)$$

3 准静态压缩实验验证

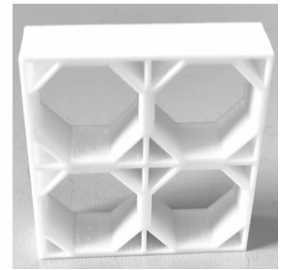
3.1 准静态压缩实验

准静态压缩实验是力学性能研究里面较为常见的一种实验测试,其下板与实验样品固定,通过上压头对实验样品进行轴向压缩,样品在压缩速率一定的情况下,从轴向方向发生变形,传感器通过将压缩过程中测定的数据传给系统,从而得到实验结果。在进行实验前,首先进行实验方案的设计。选择实验模式为:塑料压缩实验,压头对组合型类蜂窝夹芯结构进行轴向加载,设置压缩加载速率为 1 mm/min。实验过程中通过计算机对数据的采集、过程的控制进行实时记录。

本文通过采用 3D 打印技术对组合型类蜂窝夹芯多胞结构样品进行制作,3D 打印技术加工的样品模型如图 7 所示。材料采用具有良好机械性能和物理性能的 PLA 材料,其密度为 1 180 kg/m³,泊松比为 0.03,抗拉强度为 60 MPa,弹性模量为 1 833 MPa。



(a) 胞元尺寸



(b) 实验样品

图7 3D 打印技术加工的样品模型

Fig. 7 Sample model processed by 3D printing technology

组合型类蜂窝夹芯结构样品尺寸为: $t = t_1 = t_2 = 0.8$ mm, $l = 10$ mm, $a = 8$ mm。组合型类蜂窝夹芯结构面内压缩正视图如图 8 所示。对组合型类蜂窝夹芯结构进行准静态压缩实验,得到实验弹性模量。通过实验值与理论值对比分析,从而验证理论模型的正确性。

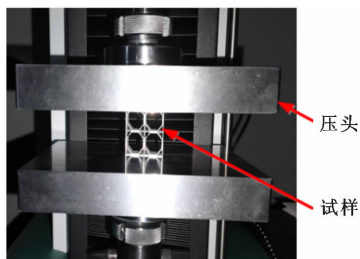


图 8 组合型类蜂窝夹芯结构面内压缩正视图

Fig. 8 In-plane compression front view of combined quasi-honeycomb core structure

对实验样品进行面内压缩时,样品的内部通过相互作用的内力以抵抗外力,试图恢复到变形前的状态。样品在单位面积所受内力称为应力,由下式可以求得单位面积上的压缩应力为

$$\sigma_c = \frac{p_c}{A} \quad (35)$$

式中: p_c 为对样品施加的压缩载荷; A 为试样初始截面积。

在压缩载荷作用下,试样的轴向形变量与样品的初始高度之比为压缩应变,如下式

$$\epsilon_c = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (36)$$

式中: Δl 是压缩形变量; l_0 是样品初始高度。

在应力-应变曲线弹性范围内,通过求直线上两点的应力差与应变差之比计算弹性模量

$$E_s = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (37)$$

3.2 实验结果分析与讨论

图 9 为组合型类蜂窝夹芯结构在压缩速率为 1 mm/min 下的变形图,四胞结构首先从结构的上端开始变形,上层压缩完毕后传递至第二层,在八边形顶点和四边形连接处断裂,准静态压缩 20 mm 结束。图 10 为在准静态压缩中测得组合型类蜂窝夹芯结构应力-应变曲线。根据图 10 可知,PLA 材质制作的组合型类蜂窝夹芯结构在准静态压缩过程经历了弹性阶段、塑性变形阶段,当试样越压越扁时,横截面积增大,故试样抗压能力随之上升,曲线应力再次上升。

由于组合型类蜂窝夹芯结构四边形保护壁和八边形厚度一样时,其为对称结构。故只对其 y 方向进行了准静态压缩实验。根据测定的实验数据,组合型类蜂窝夹芯结构的 y 方向等效弹性模量的实验值为 103.57 MPa,与通过式(34)得出的理论值 120.24 MPa 之间的误差为 13.86%,误差在允许范

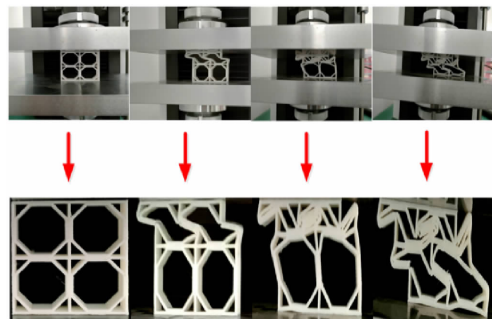


图 9 准静态压缩试样变形图

Fig. 9 Deformation diagram of quasi-static compression

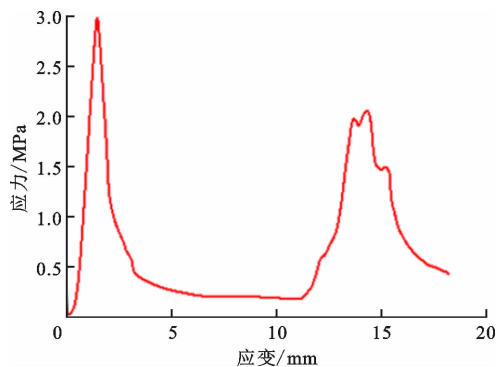


图 10 在准静态压缩中测得组合型类蜂窝夹芯结构应力-应变曲线

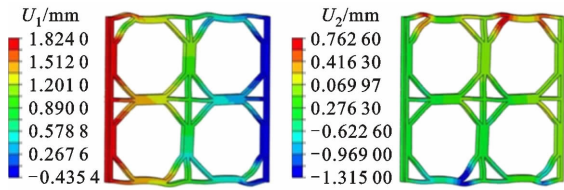
Fig. 10 Stress-strain curve with quasi-static compression

围内,验证了理论公式的正确性。准静态压缩实验中测得的实验值与理论值之间存在误差的主要原因是:①理论推导时采用的是多胞元模型中提取的简化后的等效模型;②实验时的人为因素造成的误差以及机械本身产生的误差;③由于 3D 打印机采用的是熔融堆积的方式,所以试样存在肉眼不可见的微小空隙,所加工样品并不是理想状态下均质材料,从而导致误差。

4 数值模拟分析

为了验证上述理论推导公式的正确性,应用 Abaqus 仿真软件对组合型类蜂窝夹芯结构进行数值模拟。建立组合型类蜂窝夹芯结构数值模型,其尺寸与加工的样品尺寸一致。赋予材料属性:弹性模量为 1 833 MPa,泊松比为 0.03,密度为 1 180 kg/m³。为了使模型均匀受力并减小误差,将一块刚性板与组合型类蜂窝四胞夹芯结构进行绑定约束。在刚板上施加 6 MPa 的压强,对组合型类蜂窝夹芯结构底面完全约束,其受 x 方向及 y 方向上正应力后的位移云图如图 11 和图 12 所示。图中 U_1 和 U_2 分别表示受力后模型在水平方向和垂直方向

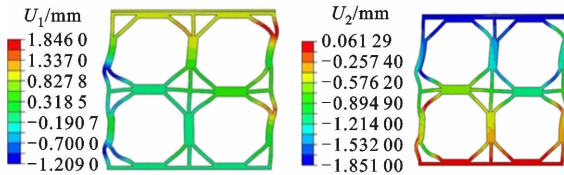
的位移。



(a)水平方向位移云图 (b)垂直方向位移云图

图 11 数值模型受 x 方向正应力的位移云图

Fig. 11 Displacement nephogram of the numerical model subjected to normal stress in the x -direction



(a)水平方向位移云图 (b)垂直方向位移云图

图 12 数值模型受 y 方向正应力的位移云图

Fig. 12 Displacement nephogram of the numerical model subjected to normal stress in the y -direction

组合型类蜂窝夹芯结构等效参数对比如表 1 所示,可得到仿真分析结论和理论计算值基本吻合,等效弹性模量误差大约为 10.60%,泊松比误差为 5.03%,进一步验证了组合型类蜂窝夹芯结构等效力学参数的正确性。

表 1 组合型类蜂窝夹芯结构等效参数对比

Table 1 Comparison of equivalent parameters of the combined quasi-honeycomb core structure

结果	E_{cx}/MPa	E_{cy}/MPa	ν_{cx}	ν_{cy}
理论值	120.24	120.24	0.260 4	0.260 4
仿真值	134.96	132.99	0.246 4	0.247 3
误差/%	12.24	10.60	5.38	5.03

5 等效力学参数分析与对比

为了进一步探究组合型类蜂窝力学性能,将相同等效密度情况下的组合型类蜂窝夹芯和文献[25]中提出的类蜂窝夹芯等效力学性能参数进行对比研究,文献[25]中提出的类蜂窝夹芯结构已与六边形蜂窝夹芯结构的等效力学公式进行了对比,证明了在相同等效密度情况下的面内力学性能优于六边形蜂窝夹芯结构。

以图 4(c)中组合型类蜂窝夹芯单元体为研究对象,令 $t=t_1=t_2$,其总质量 m_s 为

$$m_s = \rho_s V_s = \rho_s (10 + 2\sqrt{2})atl \quad (38)$$

式中: ρ_s 为单元体基体材料密度; V_s 为单元体体积。

单元体等效实体模型所围成的四边形的体积为

$$V_{ce} = (3 + 2\sqrt{2})a^2l \quad (39)$$

等效体的质量为

$$m_{ce} = \rho_{ce} (3 + 2\sqrt{2})a^2l \quad (40)$$

式中: ρ_{ce} 为单元体的等效密度,利用等效前后的质量守恒原理 $m_s = m_{ce}$,故可得

$$\rho_{ce} = \frac{(10 + 2\sqrt{2})t}{(3 + 2\sqrt{2})a} \rho_s \quad (41)$$

取 $\theta = 45^\circ$, $t = t_1 = t_2$,则组合型类蜂窝 x 、 y 方向上的等效弹性模量可简化为

$$\begin{cases} E_{cx} = \frac{1}{2}E_s \left\{ \frac{3\sqrt{2}[a - (\sqrt{2}-1)t]}{2(2+\sqrt{2})t} + \frac{a}{6t} \right\}^{-1} \\ E_{cy} = \frac{1}{2}E_s \left\{ \frac{3\sqrt{2}[a - (\sqrt{2}-1)t]}{2(2+\sqrt{2})t} + \frac{a}{6t} \right\}^{-1} \end{cases} \quad (42)$$

对于拥有相同壁厚的类蜂窝夹芯结构,根据文献[25]中的等效力学参数公式,当 $\theta' = 45^\circ$, $l' = h' = a$, $\beta' = 1$, $t' = t$ 时(θ' 为类蜂窝夹芯结构中六边形的斜边与水平方向的夹角, β' 为类蜂窝夹芯结构中六边形的长边 l' 与短边 h' 之比, t' 为类蜂窝夹芯结构胞元壁厚),给出其相应的等效力学参数为

$$\begin{cases} E'_{cx} = E_s \frac{t^3}{a^3} \frac{2}{1 + 3t^2/a^2} \\ E'_{cy} = E_s \frac{t^3}{a^3} \frac{1}{1 + 3t^2/a^2} \\ \rho'_c = \frac{8t}{(3 + 2\sqrt{2})a} \rho_s \end{cases} \quad (43)$$

式中: E'_{cx} 、 E'_{cy} 、 ρ'_c 分别为类蜂窝夹芯结构面内 x 方向、 y 方向的等效弹性模量和等效密度。

由于上述两种蜂窝结构均属于薄壁结构,为了便于比较,故取两种蜂窝薄壁的长厚比为 10,即 $a/t = 10$,令 n 为组合型类蜂窝结构与类蜂窝结构对应的等效力学参数之比,所得结果如下

$$\begin{cases} n_{E_{cx}} = n_{E_{cy}} \approx 33.75 \\ n_{\rho_c} \approx 1.60 \end{cases} \quad (44)$$

式(44)成立的条件为两蜂窝结构壁厚相等,且长厚比为 10,为了更直观地观察组合型蜂窝夹芯面内力学性能的提升,可将组合型蜂窝夹芯胞元与正六边形蜂窝夹芯胞元在等效密度相同时进行比较,令 n' 为等效密度相同时组合型类蜂窝结构与类蜂窝结构对应的等效力学参数之比,即可得到

$$\begin{cases} n'_{E_{cx}} = n'_{E_{cy}} \approx \frac{33.75}{1.60} = 21.09 \\ n'_{\rho_{ce}} = 1 \end{cases} \quad (45)$$

由式(45)可看出,两蜂窝夹芯胞元结构在等效密度相同时,组合型类蜂窝夹芯结构的面内等效弹性模量较类蜂窝夹芯结构有显著提高。

6 结 论

本文基于仿生序构原理,提出了一种新型的组合型类蜂窝夹芯结构;基于胞元理论,通过简化单元体结构对其面内 x 、 y 方向进行受力分析,利用经典梁弯曲理论与胡克定律推导出组合型类蜂窝夹芯结构的面内等效力学参数解析式。为验证本文所提出的解析式的准确性,对实验样品进行了面内压缩实验和数值模拟,所得弹性模量的实验值与理论值的误差在 13% 左右,所得仿真值与理论值的误差在 10% 左右,验证了力学模型及理论公式的正确性。最后,将相同等效密度下的组合型类蜂窝夹芯和文献[25]中的类蜂窝夹芯的等效力学性能进行对比研究发现:组合型类蜂窝夹芯结构的面内等效弹性模量是文献[25]中的“超轻多孔”类蜂窝夹芯结构的 20 倍左右,其刚度有显著提高。本文的研究为新型创新设计提供了新思路。

参考文献:

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [2] 黄华, 李源, 郭润兰. 类蜂窝复合夹层结构的力学特性及其在精密机床上的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(5): 123-131.
HUANG Hua, LI Yuan, GUO Runlan. Mechanical properties of honeycomb composite sandwich structure with applications to precision machine tools [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(5): 123-131.
- [3] XIE Suchao, JING Kunkun, ZHOU Hui, et al. Mechanical properties of Nomex honeycomb sandwich panels under dynamic impact [J]. Composite Structures, 2020, 235: 111814.
- [4] LIU Yue, LIU Wei, GAO Weicheng, et al. Mechanical responses of a composite sandwich structure with Nomex honeycomb core [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38(13): 601-615.
- [5] 李振, 丁洋, 王陶, 等. 新型并联梯度蜂窝结构的面内力学性能 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 155-163.
- [6] LI Zhen, DING Yang, WANG Tao, et al. In-plane crushing behaviors of honeycombs with a novel parallel graded design [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 155-163.
- [7] ZHANG Jianxun, QIN Qinghua, WANG T J. Compressive strengths and dynamic response of corrugated metal sandwich plates with unfilled and foam-filled sinusoidal plate cores [J]. Acta Mechanica, 2013, 224(4): 759-775.
- [8] ZHANG Jianxun, YE Yang, ZHU Yuan, et al. Dynamic collapse of metal self-similar hierarchical corrugated sandwich plates [J]. Acta Mechanica, 2019, 230(5): 1549-1563.
- [9] ZHANG Jianxun, YUAN Hui, QIN Qinghua, et al. Dynamic in-plane compression of asymmetric metal corrugated sandwich columns [J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(3): 1901159.
- [10] 卢子兴, 李康. 手性和反手性蜂窝材料的面内冲击性能研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(21): 16-22, 39.
LU Zixing, LI Kang. In-plane dynamic crushing of chiral and anti-chiral honeycombs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(21): 16-22, 39.
- [11] 魏路路, 余强, 赵轩, 等. 内凹-反手性蜂窝结构的面内动态压溃性能研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 261-269.
WEI Lulu, YU Qiang, ZHAO Xuan, et al. In-plane dynamic crushing characteristics of re-entrant anti-trichiral honeycomb [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(4): 261-269.
- [12] PANDA B, LEITE M, BISWAL B B, et al. Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures [J]. Measurement, 2018, 116: 495-506.
- [13] ZHANG Dahai, LU Guoxing, RUAN Dong, et al. Quasi-static combined compression-shear crushing of honeycombs: an experimental study [J]. Materials & Design, 2019, 167: 107632.
- [14] WU Xiaorong, YU Hongjun, GUO Licheng, et al. Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure [J]. Composite Structures, 2019, 213: 165-172.
- [15] 富明慧, 徐欧腾, 陈誉. 蜂窝芯层等效参数研究综述 [J]. 材料导报, 2015, 29(5): 127-134.
FU Minghui, XU Outeng, CHEN Yu. An overview of equivalent parameters of honeycomb cores [J]. Materials Review, 2015, 29(5): 127-134.

- [15] WANG Zhonggang, LI Zhendong, XIONG Wei. Experimental investigation on bending behavior of honeycomb sandwich panel with ceramic tile face-sheet [J]. *Composites: Part B Engineering*, 2019, 164: 280-286.
- [16] HEDAYATI R, SADIGHI M, MOHAMMADI-AGHDAM M, et al. Mechanical properties of additively manufactured octagonal honeycombs [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, 69: 1307-1317.
- [17] POTLURI R, KOTESWARA RAO U. Determination of elastic properties of reverted hexagonal honeycomb core: FEM approach [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(8): 8645-8653.
- [18] WANG Zhonggang, LI Zhendong, XIONG Wei. Numerical study on three-point bending behavior of honeycomb sandwich with ceramic tile [J]. *Composites: Part B Engineering*, 2019, 167: 63-70.
- [19] LI Xiang, LU Zixing, YANG Zhenyu, et al. Anisotropic in-plane mechanical behavior of square honeycombs under off-axis loading [J]. *Materials & Design*, 2018, 158: 88-97.
- [20] 吴义韬, 姚卫星, 沈浩杰. 复合材料宏观强度准则预测能力分析 [J]. *复合材料学报*, 2015, 32(3): 864-873.
WU Yitao, YAO Weixing, SHEN Haojie. Prediction ability analysis of macroscopic strength criteria for composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(3): 864-873.
- [21] ZOU Meng, XU Shucui, WEI Cangang, et al. A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 101: 222-230.
- [22] ZHU Bing, ZHANG Ming, ZHAO Jian. Microstructure and mechanical properties of sheep horn [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2016, 79(7): 664-674.
- [23] 王海任, 李世强, 刘志芳, 等. 王莲仿生梯度蜂窝的面外压缩行为 [J]. *高压物理学报*, 2020, 34(6): 82-90.
WANG Hairen, LI Shiqiang, LIU Zhifang, et al. Out-of-plane compression performance of gradient honeycomb inspired by royal water lily [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(6): 82-90.
- [24] 任毅如, 蒋宏勇, 金其多, 等. 仿生负泊松比拉胀内凹蜂窝结构耐撞性 [J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 308-318.
REN Yiru, JIANG Hongyong, JIN Qiduo, et al. Crashworthiness of bio-inspired auxetic reentrant honeycomb with negative Poisson's ratio [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(3): 308-318.
- [25] 李响, 周幼辉, 童冠, 等. 超轻多孔类蜂窝夹心结构创新构型及其力学性能 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(9): 88-94.
LI Xiang, ZHOU Youhui, TONG Guan, et al. Innovating configuration and mechanical properties of the core for ultralight and porous quasi-honeycomb sandwich structure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(9): 88-94.

(编辑 武红江 刘杨)