



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2600829

引用格式:赵鹏程,曹一明. 钻石-菱形新型蜂窝结构面内响应及振动抑制[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(26): 11226-11235.

Zhao Pengcheng, Cao Yiming. In-plane response and vibration suppression of diamond-rhombic new-type honeycomb structure[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(26): 11226-11235.

一般工业技术

钻石-菱形新型蜂窝结构面内响应及振动抑制

赵鹏程^{1,2,3}, 曹一明^{4*}

(1. 山西天地煤机装备有限公司, 太原 030006; 2. 煤矿采掘机械装备国家工程实验室, 太原 030006;
3. 煤矿综掘与短壁开采装备山西省重点实验室, 太原 030006; 4. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘 要 基于负泊松比结构在船舶、航空航天等领域的应用需求,提出了一种具有面内增强性能的钻石-菱形新型蜂窝结构(diamond-rhombus shaped honeycomb structure,DRSH)。该结构通过将钻石形与菱形组合胞元引入传统内凹蜂窝中,经平面阵列构建而成。通过准静态压缩实验与有限元模拟相结合的方法,系统研究了 DRSH 在面内加载下的变形模式、力学性能及能量吸收特性。研究表明,DRSH 在不同凹入角与壁厚条件下均表现出显著的负泊松比效应,其平台应力与比能吸收随凹入角增大而降低,随壁厚增加而提升,说明结构性能可通过几何参数进行调控。此外,通过对 DRSH-3D 结构进行扫频试验,发现其在不同激励幅值下均具有稳定的振动抑制能力,且其减振能力在较高激励幅值条件下更为显著。研究结果为负泊松比超材料的设计与应用提供了结构参考。

关键词 钻石-菱形负泊松比结构;面内力学性能;振动抑制;有限元分析

中图分类号 TB332 TB535; **文献标志码** A

In-plane Response and Vibration Suppression of Diamond-Rhombic New-type Honeycomb Structure

ZHAO Peng-cheng^{1,2,3}, CAO Yi-ming^{4*}

(1. Shanxi Tiandi Coal Machinery Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030006, China; 2. National Engineering Laboratory for Coal Mining Machinery, Taiyuan 030006, China; 3. Shanxi Key Laboratory of Comprehensive Drivage and Shortwall Mining Equipment for Coal Mine, Taiyuan 030006, China; 4. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

[Abstract] Based on the application requirements of auxetic structures in fields such as shipbuilding and aerospace, a novel DRSH (diamond-rhombus shaped honeycomb structure) with in-plane enhanced performance was proposed. The structure was constructed through planar array by introducing combined diamond-rhombus cells into the traditional re-entrant honeycomb. The deformation modes, mechanical properties, and energy absorption characteristics of the DRSH under in-plane loading were systematically investigated by means of a combined approach of quasi-static compression experiments and finite element simulations. The research results indicate that the DRSH exhibits a significant negative Poisson's ratio effect under various re-entrant angles and wall thicknesses. Its plateau stress and specific energy absorption decrease with an increasing re-entrant angle. Conversely, they improve with an increase in wall thickness. These findings demonstrate that the structural performance can be effectively regulated through geometric parameters. Furthermore, sweep frequency tests were conducted on the DRSH-3D structure. The results show that it possesses stable vibration suppression capability under different excitation amplitudes. Its vibration reduction performance is found to be more significant under conditions of higher excitation amplitudes. This study provides a structural reference for the design and application of negative Poisson's ratio metamaterials.

[Keywords] diamond-rhombus negative Poisson's ratio structure; in-plane mechanical properties; vibration suppression; finite element analysis

负泊松比结构^[1]具有可设计性和负泊松比可调节性的力学性能,因此通过拓扑单个胞元构成的

负泊松比结构表现出优异的抗冲击性、减振降噪、高比强度、轻质和吸能等特点,被广泛应用于矿业

收稿日期: 2026-02-08; 修订日期: 2026-04-07

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(YDJJSX2025B011); 中国博士后科学基金(2025M771316)

第一作者: 赵鹏程(1995—),男,汉族,山西霍州人,硕士,助理研究员。研究方向:动力学分析。E-mail:1183590618@qq.com。

* 通信作者: 曹一明(1994—),女,汉族,辽宁锦州人,博士,讲师。研究方向:振动控制。E-mail:1769004758@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

交通^[2-3]、航空航天^[4-6]和生物医药^[7-10]等领域。

诸多学者对于负泊松比结构已进行深入研究。主要集中在组合、分层和自身结构改进等方法,对单体胞元进行优化设计,以此来达到提高负泊松比结构力学性能的目的。基于传统的星形蜂窝, Li等^[11]设计了交叉星形蜂窝,通过将蜂窝的水平垂直壁演化为交叉倾斜壁,推导了蜂窝在轴向载荷下的泊松比和杨氏模量,并提出了一种方法来评估蜂窝在单侧水平应变最大偏差下的变形稳定性。这项工作有望指导设计具有更好能量吸收特性的辅助蜂窝,同时也能为蜂窝优化提供参考。Zhang等^[12]结合回入式六角形蜂窝和双箭头蜂窝,构建一种新型的回入式双箭头蜂窝,具有分阶段的变形模式,且在低速冲击下呈现双平台特征。结果显示,结构在不同撞击速度下具有3种典型的变形模式。当沿水平壁受到准静态载荷和低速冲击时,可观察到应力-应变曲线的两个应力平台区,而当垂直于水平壁受力时,仅有一个应力平台。Lin等^[13]提出了一个自相似的同心星形蜂窝。在低和中速度的面内冲击下,同心星形蜂窝结构的平台应力和能量吸收比普通的星形蜂窝结构更高,并且同心星形蜂窝在倾斜载荷下的能量吸收比普通星形蜂窝更好。张君华等^[14]研究了曲壁四手性蜂窝结构的吸能特性,基于人工神经网络设计胞元结构,为此类蜂窝结构的设计和优化提供参考。

当前工程实际应用对于负泊松比材料的应用更为广泛,探索具有更好的承载特性和能量吸收的内凹形负泊松比蜂窝结构十分必要。丛苏婷等^[15]讨论了中外关于凹六边形负泊松比蜂窝结构与金属蜂窝结构的研究成果,主要介绍了静力学和动力学方面的研究。针对目前蜂窝结构推广所面临的挑战提出一些合理性的设想,改善负泊松比蜂窝结构的不足之处并推广其应用。蒋国庆等^[16]构建了蜂窝夹芯结构凹坑缺陷模型,研究了凹坑缺陷关键参数对结构固有特性的影响。侯秀慧等^[17]在内凹六边形蜂窝结构的基础上进行改良,提出了一种具有更优异抗冲击特性的多负泊松比蜂窝结构。郑战光等^[18]基于对称性将胞元结构简化分析,利用能量法对该结构的泊松比和等效弹性模量解析式进行推导,将星形蜂窝结构与内凹结构相结合,提出了一种新型内凹角型负泊松比蜂窝结构。基于提出的双材料曲边内凹胞元,构造了双材料多胞蜂窝结构。万武举等^[19]提出一种双材料曲边内凹负泊松比胞元,通过能量法求得结构的等效泊松比和等效弹性模量,并且讨论了弧角、材料匹配和宽高比对结构等效泊松比的影响。为内凹形蜂窝结构的

改进优化设计提供了一定的参考。

因此,受上述研究启发,对内凹形蜂窝结构进行改进优化设计,现提出将钻石形和菱形胞元结构与传统内凹形蜂窝结构相结合,得到改进面内增强的钻石-菱形新型蜂窝结构。通过准静态试验和有限元数值模拟的双重验证,有限元模拟结果和试验吻合良好。系统地对比和分析钻石-菱形新型蜂窝结构在面内加载的变形模式和力学性能特性,此外对钻石内凹形蜂窝结构进行不同激励幅值下的扫频试验,揭示钻石内凹形蜂窝结构在振动抑制方面所表现出的优良特性。将钻石形与菱形胞元引入内凹蜂窝体系,形成新型复合胞元拓扑构型,相较于传统星形、双箭头等结构,具有更优的面内承载稳定性与能量吸收效率,以期丰富负泊松比蜂窝结构的设计策略,为轻质多功能抗冲击结构在航空航天与交通运输等工程领域的应用提供理论依据与数据支撑。

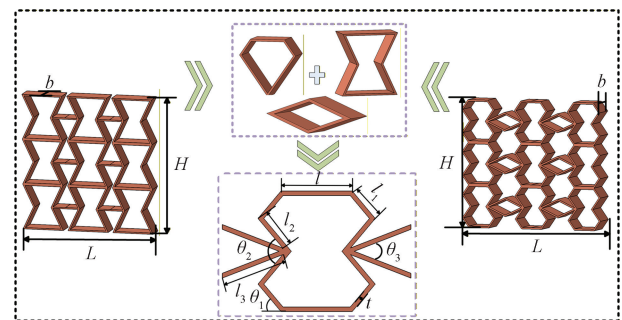
1 结构参数和机械性能

1.1 设计策略

钻石-菱形新型蜂窝结构的设计策略以及蜂窝结构几何尺寸,如图1所示。

DRSH是厚度相同的平面结构,其设计变量为 θ_1 和 t 。DRSH通过控制变量分为两种构型:DRSH- θ_1 和DRSH- t ,其中DRSH- θ_1 表示通过保持 θ_2 、 l 和 t 变量不变,仅调整 θ_1 的值而得到的单元构型。DRSH的相对密度 $\bar{\rho}_1$ ^[20]为

$$\bar{\rho}_1 = \frac{\left(\frac{l}{2} + 2l_1 + l_2\right)t}{\left(\frac{l}{2} + l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos \frac{\theta_3}{2} - l_2 \cos \theta_1\right)(l_1 + l_2) \sin \theta_1} \quad (1)$$



θ_1 和 θ_2 分别为内凹胞壁间夹角; t 为胞壁厚度; l 、 l_1 、 l_2 和 l_3 为胞元长度; b 为整体结构或者单体结构的面外厚度; $50^\circ \leq \theta_1 \leq 65^\circ$,

$\theta_2 = 2\theta_1$; H 和 L 分别为蜂窝结构的整体长度和宽度

图1 DRSH胞元设计策略及蜂窝结构几何尺寸

Fig. 1 DRSH cell design strategy and geometric dimensions of cellular structure

1.2 评价指标

名义应力 σ 和名义应变 ε 是用于评估 DRSH 胞元整体能量吸收的指标。名义应力 σ 和名义应变 ε 根据变形前的结构尺寸计算。名义应力 ε 是整体的等效应力, 名义应力 σ 和名义应变 ε 的定义^[21]为

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

式中: H 为整个结构的初始高度; ΔH 为上板的位移; A 为整个结构的初始面积, 即 $A = Lb$, 其中 L 为整个结构的初始宽度, b 为蜂窝在平面外侧的高度。

平台应力 σ_p 是指平台阶段名义应力的平均值, 是评价 DRSH 能量吸收性能的重要指标, 表示为^[22]

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_d - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

式(4)中: ε_0 为对应于初始峰值应力的应变; ε_d 为与致密化阶段开始处相对应的应变。

比能量吸收 E_{SEA} 表示 DRSH 单位质量吸收的能量^[23], 公式为

$$E_{SEA} = \frac{E_A}{m} = \frac{\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\bar{\rho} \rho_s} \quad (5)$$

式(5)中: E_A 为 DRSH 结构吸收的总能量; m 为蜂窝的质量; $\bar{\rho}$ 为相对密度; ρ_s 为基体 PLA 材料的密度。

动态泊松比 ν_{xy} 是反映试件变形过程中负泊松比效应的重要评价指标。DRSH 结构的动态泊松比通过取中心单元变形来进行测量计算, 如图 2 所示。首先对模型的中心胞元四周胞壁上标记目标点, 上下左右标记点分别记为 U 、 D 、 L_i ($i = 1, 2, 3$)、 R_i ($i = 1, 2, 3$), DRSH 模型的标记点示意图如图 2 所示。模型的横向变形通过测量点 L_i 和点 R_i 在 X 方向位移值获得, 每个样件的纵向变形通过测量点 U 和点 D 在 Y 方向位移值获得, 泊松比 ν_{xy} 通过式(6)和式(7)进行计算。

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{1}{3} \sum_{i=1,2,3} (X_{L_i} - X_{R_i}) \\ \Delta Y = X_U - X_D \end{cases} \quad (6)$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{\Delta X/A}{\Delta Y/A} \quad (7)$$

式中: ε_x 和 ε_y 分别为中心单胞的水平应变和垂直应变; A 为单胞的水平或竖直长度; ΔX 为 X 方向上的 L_i 和 R_i 之间的水平变形量; ΔY 为 Y 方向上 U 和 D 之间的竖直变形量。

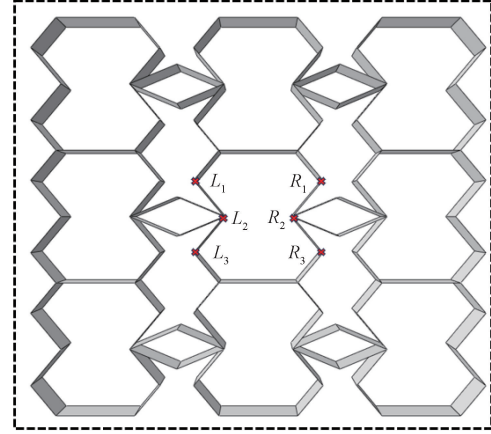


图 2 DRSH 动态泊松比计算标记点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the calculation mark points for dynamic Poisson's ratio of DRSH

2 实验方案与有限元模型

2.1 材料属性

为确定用于样品制造 PLA 的材料性能参数, 根据材料基本性能测试标准 ISO-527-1。采用与 DRSH 相同的制备工艺得到 3 个标准拉伸狗骨试样并进行基本力学测试, 使用电子万能试验机 (精度 0.5 N, 量程 0 ~ 5 kN) 以 2 mm/min 的速率对试样进行单轴拉伸试验, 试验结果如图 3 所示。采用熔融沉积成型技术制备逐层构建的完整结构, 在 3 次重复实验中测得 PLA 材料参数如表 1 所示。

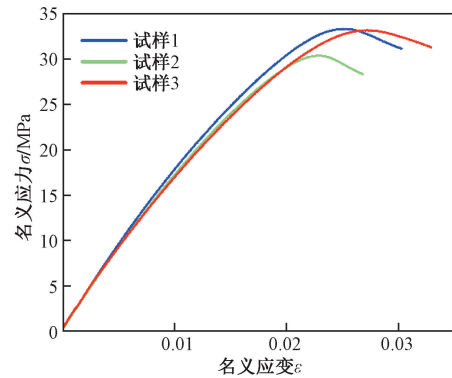


图 3 测试 PLA 材料的名义应力应变曲线

Fig. 3 Testing the nominal stress-strain curve of PLA material

表 1 试件材料 PLA 的特性参数

Table 1 The characteristic parameters of the test piece material PLA

参数	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E / MPa	σ_y / MPa	ν
取值	1.24	2 850	32	0.35

注: ρ 为密度; E 为弹性模量; σ_y 为屈服强度; ν 为泊松比。

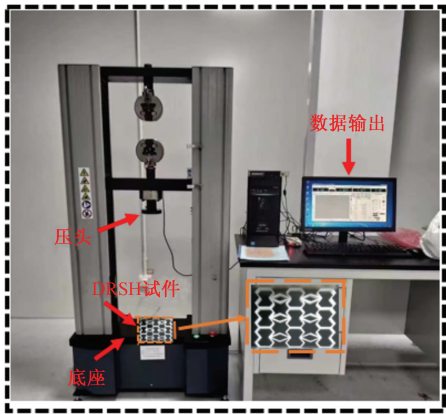
2.2 实验方案

DRSH 的试验件采用高韧性 PLA 为基材通过熔融沉积成型技术制备, 以展示试样在压缩过程中的大

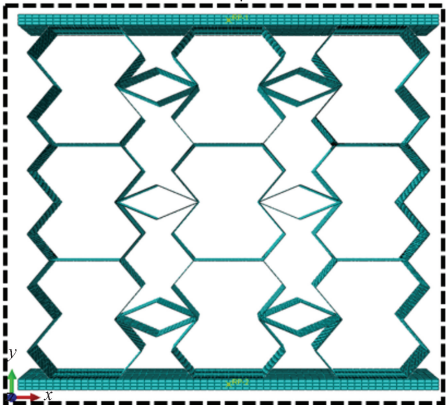
变形^[24],试样具体几何参数如表 2 所示。DRSH 试验设置如图 4 所示。通过电子万能试验机进行准静态压缩实验,实验装置如图 4(a)所示。试样按照 y 加载方向放置在固定底座中央,上压板以 2 mm/min 的恒定速度加载。为减少实验结果的随机性,每组实验均重复 3 次,实验过程由高清数码相机记录。

表 2 实验试样的几何参数
Table 2 Geometric parameters of the experimental samples

参数	DRSH-50°	DRSH-55°	DRSH-60°	DRSH-65°
l/mm	16	16	16	16
l_1/mm	8	8	8	8
l_2/mm	9.6	9.6	9.6	9.6
l_3/mm	10	10	10	10
$\theta_1/(\text{°})$	50	55	60	65
$\theta_3/(\text{°})$	50	50	50	50
B/mm	16	16	16	16
t/mm	1	1	1	1
$\bar{\rho}$	0.341	0.311	0.287	0.267



(a) 实验装置



(b) 有限元模型

图 4 DRSH 试验设置

Fig. 4 Setup of the DRSH test

2.3 有限元模型

采用 Abaqus/Explicit 进行数值模拟,有限元模型如图 4(b)所示。蜂窝模型采用 S4R 壳单元对几何模型进行网格划分,为了提高模拟结果的准确

性,在有限元模型的顶部和底部分别添加了钢板,以代替试验中的压头和底板。顶板只允许在 Y 方向移动,而底板是完全固定的。此外,在模型顶部设置一个参考点与顶部板进行耦合约束。试件设置为通用接触,切向行为选择惩罚函数,摩擦系数^[25]为 0.2,法向行为选择硬接触。文中用于分析试件的 PLA 基本力学参数参照表 1。此外,在上述有限元模拟中未考虑断裂行为。

此外,在有限元模拟中,网格的质量和密度会直接影响计算速度和结果准确性。因此选择合适的网格尺寸对于有限元计算是至关重要的。网格按最短边划分,网格尺寸分别为 1.2、1.0、0.8 mm。对不同网格尺寸的负泊松比模型进行的准静态压缩模拟得到力位移曲线,按式(2)和式(3)得到如图 5 所示的名义应力-应变曲线,可以看出网格尺寸为 0.8 mm 时曲线收敛。考虑模拟精度和时效,设定其网格尺寸为 0.8 mm。

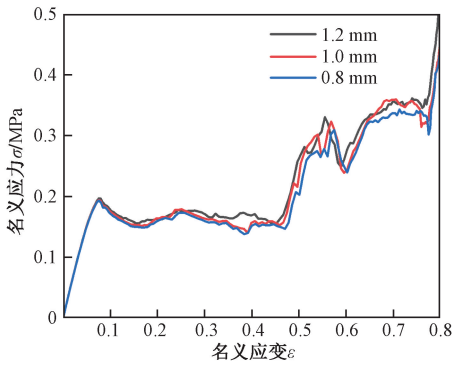


图 5 DRSH 网格收敛性验证

Fig. 5 Verification of DRSH grid convergence

3 DRSH 参数讨论

试样内凹形蜂窝结构 (concave-shaped honeycomb structure, CSH) 和钻石-菱形新型蜂窝结构 (re-entrant honeycomb structure, DRSH) ($\theta_1 = 50^\circ$) 的有限元模拟和实验的准静态压缩变形过程,如图 6 所示。CSH 在压缩过程中先是整体向内部收缩挤压,表现出负泊松比效应,随着应变的进行,试件出现胞壁弯曲收缩导致胞壁彼此接触,试样逐渐密实,左右两端的胞壁同时收缩难以保持,整体结构向一侧开始坍塌,试件发生屈曲。DRSH 相对于 CSH,在压缩变形过程中结构整体承载能力大幅提升。随着应变的增加 DRSH 的局部胞元变形更加稳定,变形出现横向 V 形状态,不易发生屈曲。并且 DRSH 传力路径相对于 CSH 结构由单路径分散为多路径分散传递,从而缓解了 CSH 结构中的应力集中部分,因此 DRSH 试件表现出稳定承载能力。即使在

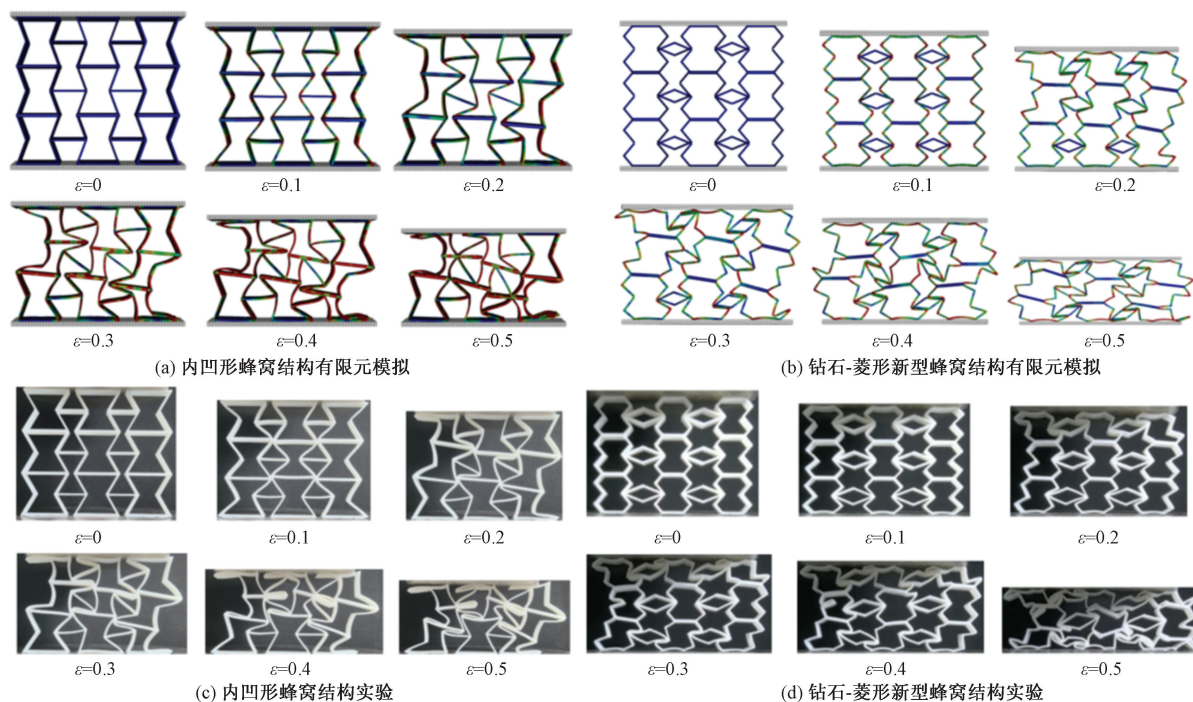


图6 DRSH的准静态力学响应与模拟结果比较

Fig. 6 Comparison of the quasi-static mechanical response with the simulation results of DRSH

较大应变状态下,DRSH 展现出良好的吸能能力,并且未表现出连续应力集中状态。

DRSH 和 CSH 有限元数值模拟和实验的名义应力应变曲线以及压缩变形过程中动态泊松比曲线,如图 7 所示。由应力应变曲线结果可知,数值模拟结果与试验结果具有良好的一致性。DRSH 在压缩试验的初始阶段,名义应力-应变呈现线性关系,且试件出现很好的负泊松比效应。在 $\varepsilon = 0.07$ 时,进入平台阶段,此时泊松比达到最小值 -1.98 。在 $\varepsilon = 0.5$ 时,进入致密化阶段,名义应力-应变曲线开始上升,试件的泊松比现象也随之减弱,直至消失。此外,DRSH 试件相比较于 CSH,在压缩变形过程中表现横向 V 形从而使得 DRSH 试件的承载稳定和吸收能量方面优于 CSH 试件。在试件压缩过程中选取了一些特征时刻,并分别计算了这些时刻的泊松比数值,如图 7(b) 所示。有限元模拟得到的动态泊松比曲线与试验特征时刻的泊松比具有良好的拟合性,最大误差为 6.3%,表明通过有限元模拟得到的动态泊松比曲线来表征试验过程中的泊松比实时变化具有可靠性。

DRSH 试件在压缩变形的整个过程一直保持良好的负泊松比效应,也表现出良好的稳定性。数值模拟曲线与试验相比会有细微差别,造成这种差异的主要原因可能是忽略了杆件之间的微小变形,而连接胞壁的压缩变形在一定程度上受到胞壁长度的影响。此外,在数值模拟中试件结构的几何形状

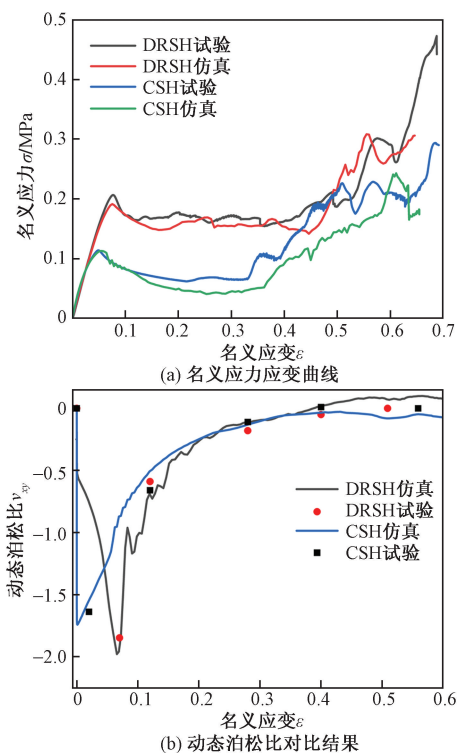


图7 DRSH 准静态响应

Fig. 7 Quasi-static response results of DRSH

被认为是理想的,而 3D 打印的精度存在偏差,这些误差很难测试或计算。通过对比试验结果和有限元结果,可以发现试验结果大致拟合,数值模拟结果可靠。

3.1 DRSH 面内压缩响应

3.1.1 凹入角 θ_1 的影响

不同凹入角 θ_1 的 DRSH 结构在 Y 方向准静态压缩条件下的名义应力-应变曲线,如图 8(a)所示。所有试样的曲线均从线性阶段开始,并呈现出相似的整体趋势。随着应变 ε 达到 0.08 时,曲线进入平台阶段,并且在平台阶段出现明显的波动。该波动现象可归因于以下微观变形机制:在初始阶段,单元壁之间主要表现为压缩变形和静摩擦作用;当应变 ε 增大至 0.3 时,不同胞壁开始相互接触,静摩擦力转变为动摩擦力,导致单元壁之间发生相对滑移,从而引起应力-应变曲线的周期性上升与回落。当应变 ε 继续增加至 0.5 时,试样逐渐进入密实化阶段,名义应力-应变曲线呈现出显著的上升趋势。这表明结构的承载能力在此阶段出现下降,而负泊松比效应则显著减弱,甚至消失。当凹入角 θ_1 为 50° 时,这一规律表现得尤为明显。在应变 ε 小于 0.2 时,DRSH 结构呈现出明显的负泊松比特性,但随着名义应变的增加,负泊松比效应逐渐减弱。

具有不同凹入角 θ_1 下 DRSH 结构的动态泊松比 ν_{xy} 随名义应变变化过程,如图 8(c)所示。可以看出,在压缩变形的不同阶段,DRSH 结构均表现出显著的负泊松比特性,且泊松比随凹入角的增大整体呈上升趋势。当凹入角为 50° 和 55° 时,结构在较大应变范围内仍能维持稳定的负泊松比响应。然而,随着凹入角进一步增大,试样在 Y 方向压缩过程中,两侧单元壁的内向收缩和旋转变形逐渐减弱,并在屈曲现象出现后趋于消失,导致负泊松比效应显著衰减。特别地,当凹入角较大时,泊松比在压缩过程中由负值向正值转变,表明 DRSH 结构的变形稳定性可通过凹入角参数进行有效调控。

此外,随着凹入角的增大,试样的相对密度由 34.1% 逐步降低至 31.1%、28.9% 和 26.7%。相应地,其比能吸收能力亦呈现明显下降趋势。杆件相对密度的降低导致有效承载构件长度缩短,结构整体承载能力和能量耗散能力随之减弱,这在宏观力学响应上表现为平台应力和比能吸收的逐渐衰减。

3.1.2 壁厚 t 的影响

不同壁厚 t 下 DRSH 结构在 Y 方向准静态压缩下的名义应力-应变响应,如图 9(a)所示。整体来看,3 条曲线均经历了线性弹性阶段、平台变形阶段以及密实化阶段,但随着壁厚的增加,结构的整体承载能力显著提升。在小应变阶段($\varepsilon < 0.08$),3 种壁厚试样的应力-应变曲线基本呈线性增长,且初始刚度随壁厚增加而增大,表明杆件弯曲与轴向变形能力增强。随后,当应变 ε 在 0.08 ~ 0.5 时,曲

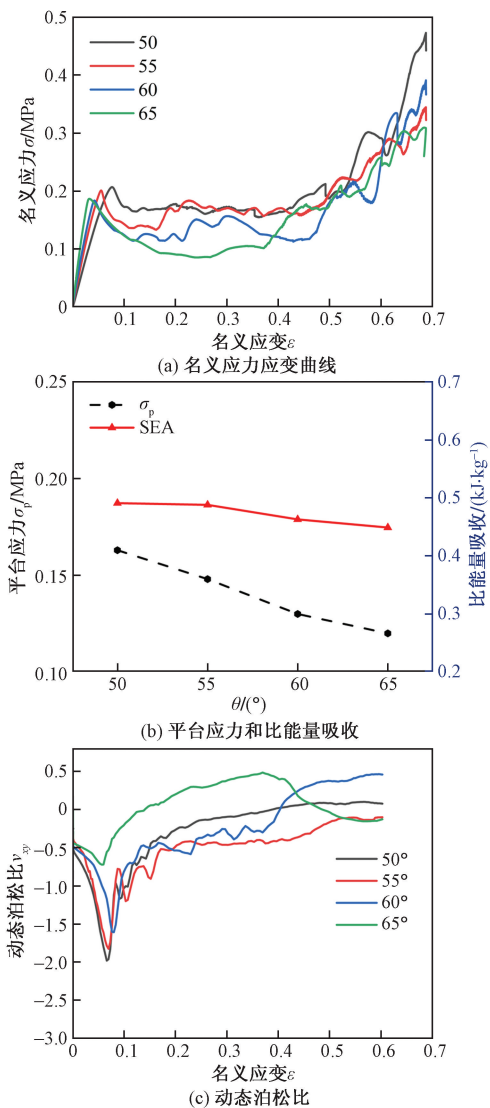


图 8 不同夹角 θ_1 下 DRSH 面内压缩响应

Fig. 8 Compressive response within the DRSH plane under the same angle θ_1

线进入平台阶段,应力水平随壁厚显著提高,其中 1.2 mm 试样表现出最高的平台应力。同时,在该阶段内应力-应变曲线呈现不同程度的锯齿形波动,这主要源于胞元壁之间的反复接触、分离与滑移行为,以及杆件在局部受压状态下产生的不稳定屈曲。当应变 ε 超过约 0.5 后,试样逐渐进入密实化阶段,应力迅速上升,且壁厚越大,上升斜率越陡。这表明随着结构内部孔隙逐步闭合,材料参与承载的有效截面积不断增加,结构整体刚度显著提高,而可用于稳定吸能的变形空间逐渐减小。

不同壁厚 t 下 DRSH 结构的平台应力 σ_p 和比能吸收 E_{SEA} 随壁厚变化的关系曲线 9(b) 所示。可以看出,随着壁厚从 0.8 mm 增大至 1.2 mm,平台应力 σ_p 和 E_{SEA} 均呈现出明显的上升趋势。具体而

言,壁厚增加显著提升了单元胞壁和杆件的弯曲刚度与抗屈曲能力,使结构在平台阶段能够维持更高、更稳定的承载水平。同时,较大的壁厚提高了结构在压缩过程中发生塑性变形与摩擦滑移时所需的能量,从而增强了外部输入能量的耗散能力,最终表现为比能吸收能力的显著提升。上述结果表明,通过合理调控 DRSB 结构的壁厚参数,可以在不改变整体拓扑构型的前提下,实现平台应力和能量吸收性能的有效协同优化。

不同壁厚 DRSB 结构在压缩过程中的动态泊松比 ν_{xy} 随名义应变变化过程,如图 9(c) 所示。可以观察到,所有试样在小应变阶段均表现出显著的负泊松比特性,泊松比迅速下降至较大的负值,表明结构在轴向压缩过程中伴随着明显的横向收缩行为。随着压缩变形的持续进行,泊松比逐渐回升并趋于稳定,但不同壁厚对负泊松比效应的维持能力存在明显差异。其中,壁厚为 0.8 mm 和 1.0 mm 的试样在较大应变范围内仍能维持负泊松比状态,而壁厚为 1.2 mm 的试样,其负泊松比幅值相对较小,且回升更为平缓。这表明较大的壁厚在增强结构刚度和稳定性的同时,会在一定程度上抑制单元壁的内向旋转与横向收缩变形,从而削弱负泊松比效应。总体而言,壁厚不仅显著影响 DRSB 结构的承载能力和能量吸收性能,同时也对负泊松比效应的稳定性产生重要影响,体现了结构承载能力的调控与变形机制之间的相互协调关系。

3.2 DRSB 振动抑制

由两层 2×2 DRSB 单胞构成的三维结构试件及其在不同基础激励幅值 ($0.5g \sim 3g$) 作用下的振动响应瀑布图 (g 为重力加速度),如图 10 所示。振动响应采用传递率作为评价指标,用以表征结构对基础振动的隔离与抑制能力。随着基础激励幅值的逐渐增大,在 $80 \sim 140$ Hz 频率范围内,第一阶共振峰的传递率峰值呈现持续下降的趋势,表明 DRSB-3D 结构在较强激励条件下仍能够有效抑制振动传递,表现出明显的幅值相关减振特性。同时,各阶共振峰对应的频率位置在不同激励幅值下基本保持一致,未出现明显的频率漂移现象。这说明在所研究的激励范围内,DRSB-3D 结构的等效刚度与质量分布未发生显著改变,其固有频率对基础激励幅值不敏感,整体动力学特性具有良好的稳定性。

此外,DRSB-3D 结构所具有的负泊松比特性使其在振动载荷作用下易产生胞元间相互作用和负泊松比收缩等变形模式。上述变形过程能够显著增强结构内部的能量耗散能力,通过材料杆件变形

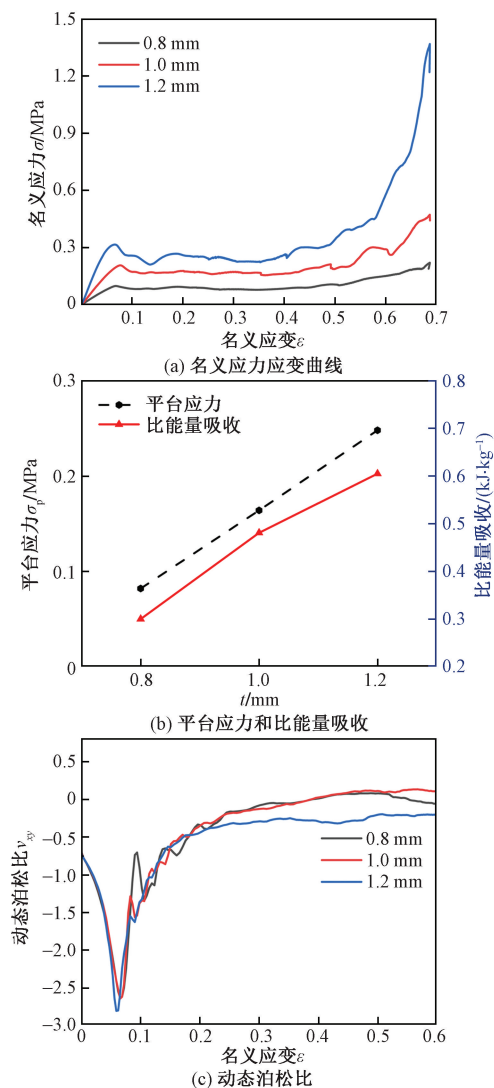


图9 不同壁厚 t 下 DRSB 面内压缩响应

Fig. 9 Compressive response within the DRSB plane under different wall thicknesses t

和胞元间相互作用,将输入的振动能量有效分散并逐步衰减。此外,三维单胞网络结构促使振动能量在空间维度上重新分配,避免了局部共振能量的集中放大,从而进一步降低整体振动响应水平。综上所述,DRSB-3D 结构通过局部耗散与整体分散协同作用,实现了振动有效抑制目的。

DRSB-3D 结构在不同基础激励幅值条件下前两阶共振响应的传递率曲线及其峰值变化情况,如图 11 所示。通过与 $0.5g$ 激励工况的对比可以看出,随着基础激励幅值的逐步增大,DRSB-3D 在第一阶共振频率处的传递率峰值呈现出显著下降趋势。当基础激励幅值由 $0.5g$ 分别增加至 $2.0g$ 和 $3.0g$ 时,第一阶共振峰传递率分别降低了 23.59% 和 25.88%,表明在较高激励水平下,DRSB-3D 结构表现出更加显著的振动抑制能力。这一结果说明

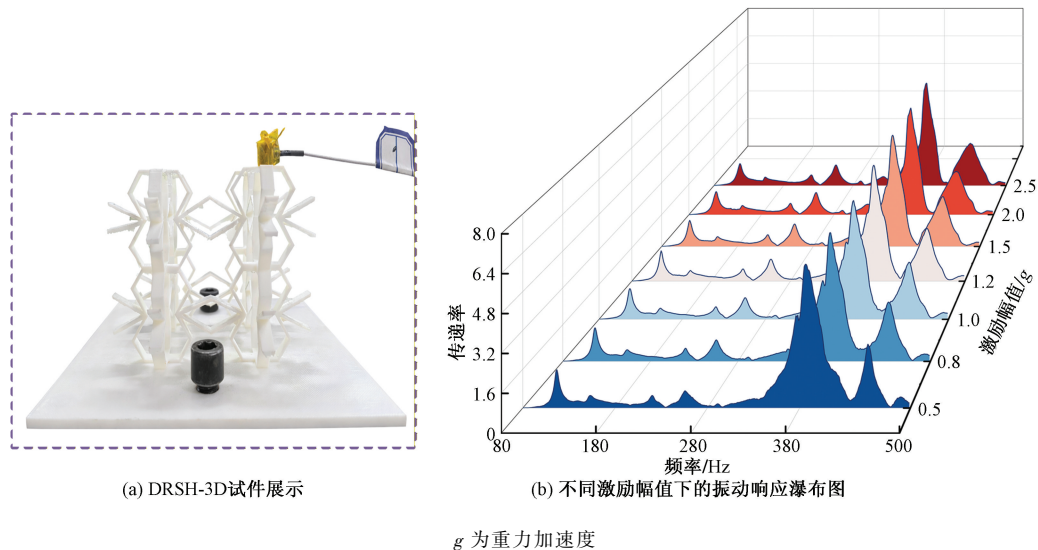


图 10 DRSH 振动响应

Fig. 10 Vibration response of DRSH

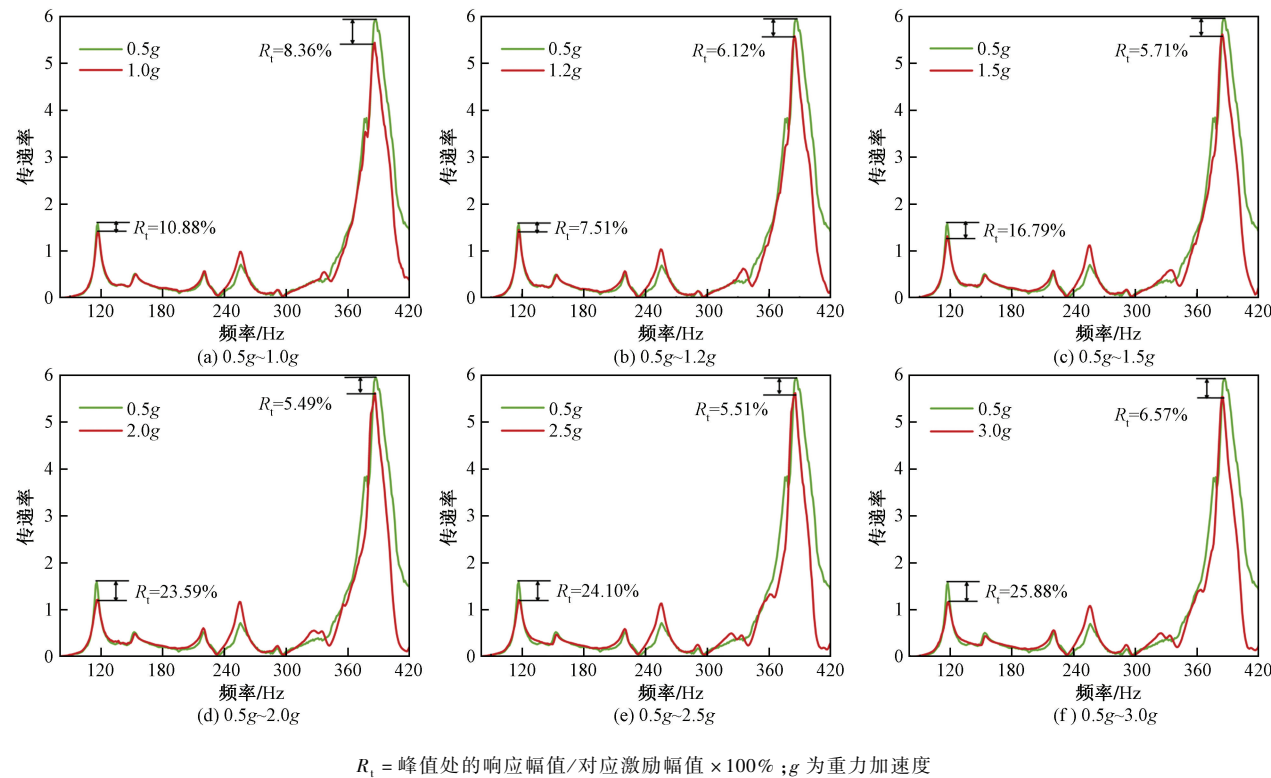


图 11 DRSH 不同激励幅值振动响应比较

Fig. 11 Comparison of vibration responses under different excitation amplitudes of DRSH

该结构具有明显的幅值相关减振特性,在强激励条件下能够更有效地削弱振动传递。相比之下,在低激励幅值条件下(如 1.0g),结构的振动响应较为平缓,第一阶共振峰传递率的降低幅度相对较小,仅为 10.88%。尽管减振效果不及高激励工况明显,但仍体现出 DRSH-3D 结构在低幅值激励下对外部振动的有效抑制能力。此外,通过对不同激励幅值下振动响应曲线的比较可以发现,DRSH-3D 在第二

阶共振频率处的传递率峰值同样呈现出一定程度的下降,表明该结构在高阶模态下依然具有一定的减振潜力,减振效果并非局限于单一模态。

在整个激励幅值变化范围内,各阶主共振峰对应的频率位置均未出现明显偏移,说明 DRSH-3D 结构的固有频率对基础激励幅值变化不敏感,其动力学特性在减振过程中保持了良好的稳定性。这一特性进一步表明,DRSH-3D 结构在实现振动抑制的

同时,兼具较高的工作稳定性与减振效率。

4 结论

提出了将钻石形和菱形胞元结构与传统内凹形蜂窝结构相结合,得到改进面内增强的钻石-菱形新型蜂窝结构。通过准静态试验和有限元数值模拟的双重验证,系统地对比和分析钻石-菱形新型蜂窝结构在面内加载的变形模式和力学特性,此外对钻石内凹形蜂窝结构进行了不同激励幅值下的扫频激振试验,揭示了钻石-菱形新型蜂窝结构在振动抑制方面所表现出的优良特性,得出如下结论。

(1)对于不同凹入角的 DRSB 都表现出明显的负泊松比特性,但随着凹入角的增加,DRSB 的负泊松比效应也有所减弱。表明 DRSB 结构的变形稳定性可通过凹入角参数进行有效调控。并且,通过调节 DRSB 结构的壁厚不仅可以影响结构的承载能力和能量吸收性能,同时也对负泊松比效应的稳定性产生重要影响,体现了结构承载能力的调控与变形机制之间的相互协调关系。此外,随着 DRSB 的相对密度有所降低,结构的承载能力以及能量吸收逐渐减弱。

(2) DRSB-3D 结构在不同基础激励幅值条件下均表现出稳定且显著的振动抑制能力,其减振效果随激励幅值增大而增强。其中具有负泊松比效应的胞元的协同变形和能量耗散有利于 DRSB-3D 实现高效振动抑制。实验结果表明,随着激励幅值提升,DRSB-3D 在第一阶主共振频率处的传递率峰值显著降低,体现出该结构在振动抑制方面的优势。

(3)结合我国在船舶、航空航天、轨道交通等高端装备领域对轻质高承载结构及宽频减振技术的迫切需求,DRSB 结构具备面内增强的力学性能与优异的振动抑制能力,且其结构参数可调控、制备工艺兼容增材制造,在舰船甲板支撑结构、航天器舱内隔振组件、高速列车底板轻量化部件等场景中具有巨大应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 王义平,李凤莲,吕梅. 波纹-负泊松比蜂窝混合芯夹层板的自由振动[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5963-5969.
Wang Yiping, Li Fenglian, Lü Mei. Free vibration of wave-resonant negative poisson's ratio honeycomb hybrid core sandwich plate[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 5963-5969.
- [2] Qu Y F, Dian W. Analyses on the roller structure of equivalent honeycombs for forest harvester under impact loading[J]. Composite Structures, 2021, 262: 113355.
- [3] 杨朝帅,洪开荣,胡杰,等. 负泊松比锚索静动力学特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(1): 301-308.
Yang Chaoshuai, Hong Kairong, Hu Jie, et al. Experimental study on static and dynamic characteristics of negative Poisson's ratio anchor rods[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 301-308.
- [4] Li D C, Zhao S W, Da Ronch A, et al. A review of modelling and analysis of morphing wings[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 10: 46-62.
- [5] Chen Y J, Scarpa F, Farrow I R, et al. Composite flexible skin with large negative Poisson's ratio range: numerical and experimental analysis [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(4): 045005.
- [6] Budarapu P R, Sudhir Sastry Y B, Natarajan R, et al. Design concepts of an aircraft wing: composite and morphing airfoil with auxetic structures[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2016, 10(4): 394-408.
- [7] Zhang L, Yan S, Liu W, et al. Mechanical metamaterials with negative Poisson's ratio: a review [J]. Engineering Structures, 2025, 329: 119838.
- [8] Ali N M, Busfield J J, Rehman I U, et al. Auxetic oesophageal stents: structure and mechanical properties[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2014, 25(2): 527-553.
- [9] Wang C Y, Li Y, Zhao W Z, et al. Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138: 489-501.
- [10] Bhullar S K, Rana D T, Lekesiz H, et al. Design and fabrication of auxetic PCL nanofiber membranes for biomedical applications [J]. Materials Science and Engineering: C, 2017, 81: 334-340.
- [11] Li X L, Li Z Z, Guo Z Y, et al. A novel star-shaped honeycomb with enhanced energy absorption [J]. Composite Structures, 2023, 309: 116716.
- [12] Zhang W, Wang H L, Lou X, et al. On in-plane crushing behavior of a combined reentrant double-arrow honeycomb [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 194: 111303.
- [13] Lin H B, Liu H T, An M R, et al. In-plane dynamic impact behaviors of a self-similar concentric star honeycomb with negative Poisson's ratio [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104474.
- [14] 张君华,何一鸣. 四手性蜂窝结构的吸能特性[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(6): 2323-2329.
Zhang Junhua, He Yiming. Energy absorption characteristics of tetra-chiral honeycomb structures[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(6): 2323-2329.
- [15] 丛苏婷,周一,陈联盟. 凹六边形负泊松比蜂窝结构及其静动力学性能研究综述[J]. 空间结构, 2024, 30(2): 21-31.
Cong Suting, Zhou Yi, Chen Lianmeng. A review on concave hexagonal negative Poisson's ratio cellular structures and their static and dynamic properties [J]. Spatial Structure, 2024, 30(2): 21-31.
- [16] 蒋国庆,陈万华,聂徐庆,等. 基于 Python 的含凹坑缺陷蜂窝夹芯结构参数化建模及应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 10059-10064.
Jiang Guoqing, Chen Wanhua, Nie Xuqing, et al. Parametric modeling and application of honeycomb sandwich structures with concave defects based on Python[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10059-10064.
- [17] 侯秀慧,尹冠生. 负泊松比蜂窝抗冲击性能分析[J]. 机械强

- 度, 2016, 38(5): 905-910.
- Hou Xiuhui, Yin Guansheng. Analysis of impact resistance performance of honeycomb structures with negative Poisson's ratio[J]. Mechanical Strength, 2016, 38(5): 905-910.
- [18] 郑战光, 陈俊翔, 孙腾, 等. 内凹角型负泊松比蜂窝结构力学性能研究[J]. 机械强度, 2025, 47(7): 135-143.
- Zheng Zhanguang, Chen Junxiang, Sun Teng, et al. Research on mechanical properties of concave-angle type negative Poisson's ratio honeycomb structures[J]. Mechanical Strength, 2025, 47(7): 135-143.
- [19] 万武举, 肖俊华, 郭之熙. 双材料曲边内凹负泊松比多胞结构的力学性能研究[J]. 工程力学, 2025, 42(12): 261-272.
- Wan Wujū, Xiao Junhua, Guo Zhixi. Research on the mechanical properties of double-material curved-inward negative Poisson's ratio multi-cell structures[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(12): 261-272.
- [20] Li H, Liu Y, Shi X J, et al. Nonlinear vibrations of all-composite sandwich plates with a hexagon honeycomb core: theoretical and experimental investigations [J]. Composite Structures, 2023, 305: 116512.
- [21] Alomarah A, Masood S H, Ruan D, et al. Out-of-plane and in-plane compression of additively manufactured auxetic structures [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106107.
- [22] Liu J Y, Liu H T. Energy absorption characteristics and stability of novel bionic negative Poisson's ratio honeycomb under oblique compression[J]. Engineering Structures, 2022, 267: 114682.
- [23] Deng X L, Qin S G. In-plane energy absorption characteristics and mechanical properties of novel re-entrant honeycombs [J]. Composite Structures, 2023, 313: 116951.
- [24] Li X, Li Z, Guo Z, et al. Mechanical response and stability of a novel crossed star honeycomb under inclined loading[J]. Materials Today Communications, 2024, 411: 10348.
- [25] Hu L L, Zhou M Z, Deng H. Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation: theoretical analysis and numerical simulation [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 373-384.