

变截面负泊松比结构力学性能及吸能特性研究

王洁^{1,2} 林立省² 庞晴晴³ 曹正³ 张建卓²

(1. 重庆城市职业学院 航空学院, 重庆 402160)

(2. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 阜新 123000)

(3. 山东兖矿智能制造有限公司, 济宁 273500)

摘要:【目的】设计一种变截面双箭型负泊松比蜂窝结构(简称变截面结构),揭示截面变化率对结构力学性能及吸能特性的影响规律,为其在缓冲吸能领域的工程应用提供理论依据。【方法】首先,基于胞元几何参数推导截面变化率与相对密度的关系;其次,利用变截面梁与等截面梁弯曲应变等效原理,建立变截面结构的等效本构模型;然后,采用Ansys/Ls-Dyna建立有限元模型进行准静态压缩分析,并通过3D打印样件的准静态加载试验验证模型准确性;最后,进一步通过Ls-Dyna研究不同冲击速度(20、35、70、120 m/s)和截面变化率($\alpha=0、0.2、0.4、0.6、0.8$)下面内冲击响应、平台应力及能量吸收特性。【结果】结果表明,解析解、数值模拟与试验结果吻合良好,验证了本构模型及有限元模型的准确性。冲击速度对结构冲击特性影响显著,速度增加使弹性模量提高、平台应力阶段延长。截面变化率增大可增强结构整体刚度并延缓负泊松比效应,使局部变形更难发生。截面变化率与能量吸收率呈正相关,变截面结构比等截面结构在20 m/s和70 m/s冲击下的比吸能分别提高42.1%和13.8%;当 α 为0.4~0.6时吸能特性最优。变截面结构在减轻整体质量的同时未削弱力学性能,能量吸收能力显著提升。

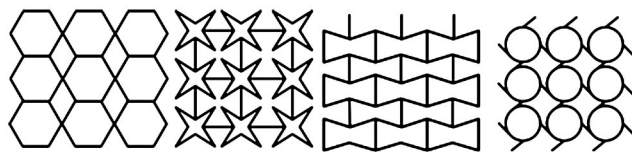
关键词: 变截面; 负泊松比结构; 等效力学模型; 面内冲击响应; 平台应力; 能量吸收特性

中图分类号: TH114 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.015

0 引言

负泊松比多胞材料作为力学超材料^[1],因其在蜂窝和泡沫形式中的独特结构,展现出优异的力学性能,具有广阔的应用前景^[2]。与实心材料相比,多胞材料通过内部结构和排列方式的创新设计,对其性能特征产生重要影响,负泊松比效应是其特殊结构变形机制引起的一种独特力学行为。负泊松比效应使结构得到更好的剪切刚度、抗冲击性和能量吸收性能^[3],因此,在冲击载荷工况下,如何建立胞元几何参数与负泊松比多胞材料力学响应的关系,从而更有效地吸收冲击能量,减少冲击事故对人员和财产的损失,成为众多学者的研究热点^[4-7]。

如图1所示,负泊松比结构包括六边形蜂窝、星形蜂窝、内凹蜂窝和手性结构等。在力学行为上,负泊松比效应表现为单轴压力作用下材料垂直于载荷方向收缩,单轴拉力作用下则膨胀。1987年,Lakes^[8]通过处理聚合物泡沫,成功得到具有负泊松比效应的内凹蜂窝材料。之后,学者对负泊松比材料的力学特性



(a) 六边形蜂窝 (b) 星形蜂窝 (c) 内凹蜂窝 (d) 手性结构

图1 典型的负泊松比材料

Fig. 1 Typical negative Poisson ratio materials

进行了深入的探索和研究。Gibson等^[9]通过Bernoulli梁理论,研究了负泊松比特性内凹蜂窝胞元的力学表现与变形机制。Larsen等^[10]设计了一种新型的双箭型结构并采用数值拓扑优化方法,实现了机构和材料结构的自动优化设计。1989年,Wojcieszowski等^[11]提出了手性结构,并基于该结构制备出了新型负泊松比多胞材料,其泊松比达到了-0.9。Zhao等^[12]设计了2种带连接梁的单胞结构(凹六边形结构和星形结构)和3种九宫格组合结构(X型、H型、Sd型),基于Euler梁理论,得到了该结构的理论计算式。通过比较单胞结构在不同载荷下的临界力,探讨了弯曲变形和拉伸、压缩变形的先后顺序。该方法具有较强的理论性和可

收稿日期: 2024-11-14 修回日期: 2025-01-05

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(52427805); 重庆市教育厅2025科技项目(KJQN202503906)

作者简介: 王洁,女,1981年生,山东无棣人,博士,副教授; 主要研究方向为工矿装备自动化与智能化; E-mail:sunny_jiewang@163.com。

林立省(通信作者),男,1998年生,山东费县人,硕士研究生; 主要研究方向为机械设计; E-mail:1547456980@qq.com。

引用格式: 王洁,林立省,庞晴晴,等. 变截面负泊松比结构力学性能及吸能特性研究[J]. 机械强度,2026,48(7):127-136.

Wang Jie, Lin Lisheng, Pang Qingqing, et al. Study on the mechanical performance and energy absorption characteristics of structures with varying cross-sections and negative Poisson ratio[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 127-136.



免费获取

操作性,能够为设计与优化负泊松比组合结构提供理论指导。以上研究介绍了不同代表结构的负泊松超材料,揭示了负泊松比材料在不同结构下的变形特性,并为后续的相关研究提供了理论支持。

负泊松比结构常用于冲击工况的缓冲吸能,为此,很多学者围绕其抗冲击性能开展研究。魏路路等^[13]通过一维冲击波理论,研究并得出了内凹-反手性蜂窝材料的临界冲击速度和平台应力的经验公式,增强了理论分析的实用性,提供了理论指导,便于结构设计和优化。Qiao等^[14]研究了双箭型结构的均匀和功能梯度的准静态和冲击行为,并通过面内弹性模量的解析表达式,推导出均匀双箭型结构的泊松比和准静态屈服应力,讨论了均匀双箭型结构的冲击阻力变形机制,为该类材料在抗冲击设计中的应用提供了理论依据。马芳武等^[15]研究了内凹三角形负泊松比结构在冲击载荷下的力学表现,并揭示了其与平台应力的关系。为汽车吸能构件的设计提供了新的思路。闫鹏等^[16]分析了不同相对密度的双箭头蜂窝结构性能特性,提出了碰撞时不同相对密度双箭头蜂窝缓冲材料防护结构临界速度的方法,研究结果显示,随着相对密度增加,双箭头蜂窝结构的比吸能逐渐下降。周宏元等^[17]设计了一种泡沫混凝土填充的双箭头结构,研究表明,双箭头结构有效约束泡沫混凝土,两者填充强度增高时,平均压缩强度的增量也随之增加。

近年来,一些学者提出了可变截面结构的概念,它可以提高结构的吸能特性。为了提高汽车前纵梁的耐撞性,徐成龙等^[18]设计了变截面S形薄壁梁,数值仿真结果验证了设计参数对耐撞性能的显著影响,并为未来汽车碰撞安全部件的设计提供了理论依据。Cao等^[19]研发了一种可变截面菱形十二角晶格结构,该结构比原来的结构具有更好的力学性能和能量吸收性能。为菱形十二角晶格结构的设计提供了新的思路,并通过试验和有限元分析,验证了其在提高力学性能和能量吸收方面的有效性。Hu等^[20]构建了一种新的结构算法,研究了由外部力矩激励、具有阶梯变截面的柔性中心梁的动态响应。提出的方法能够有效解决复杂的动力学问题,并为空间操作系统(Space Manipulator Systems, SMS)的设计和控制策略提供了有价值的理论依据。上述研究通过设计变截面结构来优化结构性能,改善结构的动态特性,因此,研究变截面结构有着广泛的应用前景和重要意义。

分析以上的文献可知,国内外学者围绕负泊松比行为的形成机制、静/动态力学性能开展了大量的研究,分析了典型结构的吸能特性。在Gao等^[21]工作的基础上,本文提出了一种变截面双箭头负泊松比蜂窝

结构,分析了其变形模式、等效弹性力学特性、平台应力等本构关系,并对不同冲击速度下的变截面结构的吸能特性开展了研究,得出了宏观动力学响应与截面变化率以及冲击速度的内在关系。研究成果将为变截面结构在矿用吸能盒等特殊部件的工程应用提供借鉴。

1 模型的建立

1.1 变截面结构的几何参数

双箭头结构因其独特的几何设计,在压缩时会产生显著的负泊松比效应,表现出优异的横向收缩能力。该结构在变形时高效吸收能量,能量吸收能力优异,适用于冲击防护和振动吸收。同时,双箭头结构在轻质的基础上保持高强度和刚度,通过调整几何参数可调节其力学性能,满足不同工程需求^[22]。本研究提出的变截面结构及等截面结构的几何结构参数如图2所示,其中, A 为水平长胞壁长度; H 为胞元等效高度; L 为斜长胞壁长度; L_T 为水平短胞壁厚度; t_2 为斜胞壁两端最大厚度; t_1 为中心最小厚度; t 为斜长胞壁厚度; M 为斜短胞壁长度; L_M 为斜短胞壁厚度; θ 为底边内凹角度; φ 为斜长胞壁与轴线之间的角度; δ 为侧边内凹角度; d_1 为胞元宽度; d_2 为胞元宏观总高度。

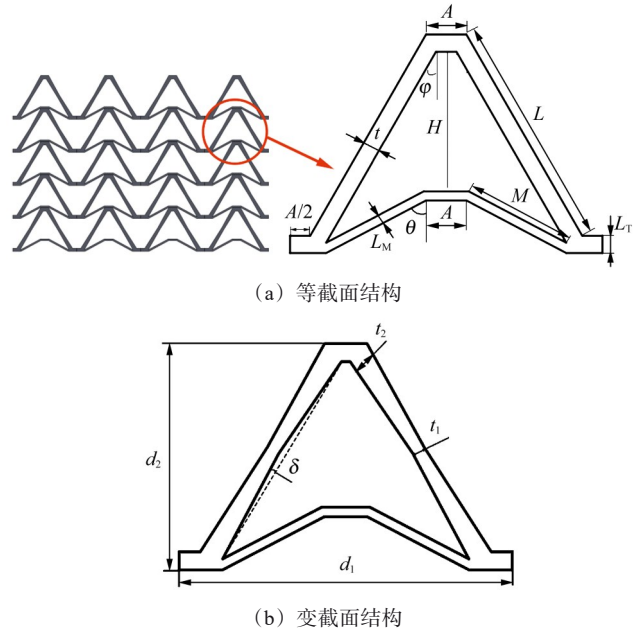


图2 双箭头负泊松比结构

Fig. 2 Double-arrow negative Poisson ratio structure

1.2 相对密度

对于二维蜂窝结构,将其投影到一个平面上,其相对密度 $\bar{\rho}$ 可以用投影的面积表示为

$$\bar{\rho} = \frac{S_s}{S_u} \quad (1)$$

式中, S_s 为胞元的实际投影面积; S_u 为包含孔隙的总投影面积。

其相对密度为

$$\bar{\rho} = \frac{L_T(2A + t_2) + L(2t_2 - L \tan \delta) + L_M(2M + A + t_2)}{d_1 d_2} \quad (2)$$

为了量化变截面结构中斜长胞壁的横截面变化,定义截面变化率为

$$\alpha = \frac{t_2 - t_1}{t_1} = \frac{t_2}{t_1} - 1$$

当截面变化率 $\alpha = 0$ 时,变截面结构退化为等截面结构。表1所示为不同模型的几何参数,由表1可知,随着截面变化率的增加,相对密度呈减小趋势。

表1 不同模型的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of different models

α	A/mm	t_2/mm	t_1/mm	$\bar{\rho}$
0	3.5	1.5	1.5	0.217
0.2	3.5	1.5	1.25	0.205
0.4	3.5	1.5	1.07	0.197
0.6	3.5	1.5	0.94	0.191
0.8	3.5	1.5	0.83	0.186

1.3 等效弹性力学分析

为了准确预测变截面结构在外力作用下的力学行为,从而确保结构设计的可靠性与安全性,根据均匀化理论^[23],可以通过建立半个胞元结构的本构模型,表征宏观变截面结构的等效弹性力学特性。本文通过将变截面梁转化为等效刚度相同的等截面梁^[24],基于梁弯曲应变能相同的原理,建立了计算公式,用于求得变截面梁的等效刚度 EI_e ,即

$$\frac{1}{2} \int_0^L EI_x (y'')^2 dx = \frac{1}{2} \int_0^L EI_e (y'')^2 dx \quad (3)$$

式中, I_x 为变截面梁的惯性矩; I_e 为等截面梁的惯性矩。

图3所示为变截面悬臂梁,矩形截面梁的宽度自中间 t_1 向两端 t_2 呈线性变化, $t_2 = t_1(1 + \alpha)$ 。

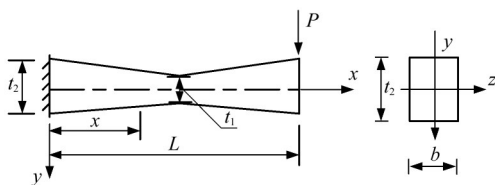


图3 变截面梁计算简图

Fig. 3 Calculation diagram of the variation cross-section beam

变截面梁任意截面的高度表达式为

$$h_x = \begin{cases} t_1(1 + \alpha) - \frac{2\alpha t_1 x}{L}, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \\ t_1 + \frac{2\alpha t_1}{L} \left(x - \frac{L}{2}\right), & \frac{L}{2} < x \leq L \end{cases} \quad (4)$$

截面轴惯性矩为

$$I_x = \frac{1}{12} b h_x^3 = \left(\left[t_1(1 + \alpha) - \frac{\alpha t_1 x}{L} \right] / t_1 \right)^3 + \left\{ \left[t_1 + \frac{t_1 \alpha}{L} \left(x - \frac{L}{2}\right) \right] / t_1 \right\}^3 \frac{1}{12} b h_{t_1}^3 = \left(\left[t_1(1 + \alpha) - \frac{\alpha t_1 x}{L} \right] / t_1 \right)^3 + \left\{ \left[t_1 + \frac{t_1 \alpha}{L} \left(x - \frac{L}{2}\right) \right] / t_1 \right\}^3 I_{t_1} \quad (5)$$

根据梁两端的支撑条件,选取近似挠度曲线函数为

$$y = a_1 \left(x^2 - \frac{x^3}{3L}\right) \quad (6)$$

式中, a_1 为位移参数,可根据精度要求选取,一般选取1个或2个位移参数,可满足计算精度的要求。

则

$$y' = 2a_1 x - \frac{a_1}{L} x^2 \quad (7)$$

$$y'' = 2a_1 \frac{L - x}{L} \quad (8)$$

将式(5)、式(8)代入式(3)中,得到等效刚度 EI_e 为

$$\begin{aligned} \int_0^L EI_x (y'')^2 dx &= \int_0^{\frac{L}{2}} E \left\{ \left[t_1(1 + \alpha) - \frac{\alpha t_1 x}{L} \right] / t_1 \right\}^3 I_{t_1} \left(2a_1 \frac{L - x}{L} \right)^2 dx + \int_{\frac{L}{2}}^L E \left\{ \left[t_1 + \frac{t_1 \alpha}{L} \left(x - \frac{L}{2}\right) \right] / t_1 \right\}^3 I_{t_1} \left(2a_1 \frac{L - x}{L} \right)^2 dx \\ &= \int_0^L EI_e \left(2a_1 \frac{L - x}{L} \right)^2 dx = \int_0^L EI_e (y'')^2 dx \end{aligned} \quad (9)$$

积分后求得

$$I_e = 3I_{t_1} (1.541 + 0.0154\alpha - 0.0309\alpha^2) \quad (10)$$

当变截面结构的尺寸趋于无穷时,结构的边界效应可以忽略不计^[25]。在这种情况下,结构的整体力学行为可以简化为均匀的应力分布。以二维负泊松比结构为例,当施加无穷远均匀应力沿 y 轴方向作用时,由于负泊松比效应,结构在 x 轴方向发生收缩。

如图4所示,半个胞元结构由1根长梁 B_1B_2 和1根短梁 B_2B_3 组成,且结构在面外方向的厚度为 b 。当这个宏观变截面的结构在 y 轴方向受到压缩时,可以将其等效为1个集中力作用在胞元结构的 B_3 点。这种等效方法简化了复杂的力学行为分析,将整个结构的受力状态转化为局部的集中力作用,从而便于分析和计算,其值为

$$P_{B_3} = \sigma_\infty lb \quad (11)$$

变截面结构具有轴对称属性和邻胞结构的约束作用。在力学分析中, B_3 点的 y 轴位移不受限制, B_2 点的 y 轴和 x 轴位移均不受限制, B_3 点与 B_2 点的转角位移受到限制。 B_1 点则是全约束,所有位移和转角位移都受到限制。

等截面结构在垂直方向的应变为

$$\varepsilon_y = \frac{\mu_y^{B_3} \sin \theta \sin \varphi}{l \sin(\theta - \varphi)} \quad (12)$$

式中, $\mu_y^{B_3}$ 为 B_3 点在 y 轴方向上的位移, $\mu_y^{B_3} = \frac{P_{B_3} l^3 \csc^3 \theta \csc^3 \varphi \sin^2(\theta - \varphi)}{12EI(\cot^2 \theta \csc \theta + \cot^2 \varphi \csc \varphi)}$

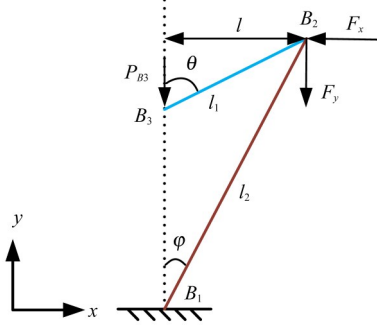


图4 胞元结构受力示意图

Fig. 4 Force diagram of a single-cell structure

根据梁弯曲应变能相同的原理,得到变截面结构在垂直方向的应变为

$$\varepsilon_y = \frac{\mu_y^{B_3} \sin \theta \sin^2 \varphi}{3(1.541 + 0.0154\alpha - 0.0309\alpha^2)l_2 \sin(\theta - \varphi)} \quad (13)$$

式中, $l_2 = \frac{l}{\sin \theta}$ 。

根据式(13)可知,变截面结构相较于等截面结构在垂直方向上应变更小。

1.4 准静态压缩性能分析

通过有限元软件 Ansys/Ls-Dyna 对变截面结构进行模拟分析。变截面结构的准静态计算模型如图 5 所示。在有限元分析中,采用了弹性-塑性本构模型来描述热塑性聚氨酯弹性体 (Thermoplastic Polyurethane, TPU) 的力学行为,模型材料参数根据 TPU 材料进行定义,网格初始尺寸定为 0.5 mm,模型的面外(沿 z 方向)厚度 $b_z = 20$ mm。另外,刚性板与试件外表面接触时无摩擦。边界条件设置为刚性板在 y 方向上施加负载,试件底端固定,这样可以模拟实际加载和受力情形。为了确保变形处于平面应变状态,试件所有节点的面外位移被限制,这避免了试件在 z 方向上的变形,保持变形仅在平面内发生。同时,试件在 x 方向和 y 方向分别采用了 4 个胞元和 5 个胞元进行填充,确保准静态响应趋于稳定,保证模拟结果的合理性与稳定性。

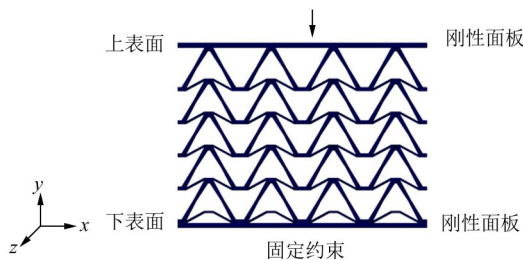
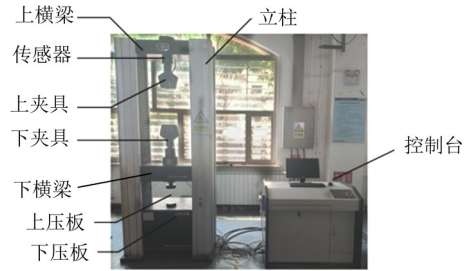


图5 有限元计算模型

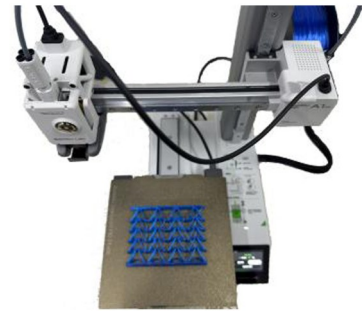
Fig. 5 Computational model of the finite element

为了验证本文有限元模型的准确性,加工制作了

变截面结构($\alpha=0.6$)样件,进行准静态加载试验。试验设备如图 6 所示,加工的变截面结构如图 7 所示,试件规格:长度 108 mm,高度 80 mm,厚度 20 mm,材料为 TPU。TPU 材料具有优异的弹性和耐冲击性能,适合本文研究的力学性能模拟。其密度为 1.2 g/cm³;弹性模量为 30 MPa;泊松比为 0.45;屈服应力 40 MPa。图 8 所示为变截面结构仿真模型与试验模型在变形过程中的对比。在相同压缩应变下,有限元模型的变形模式与试验结果基本一致,二者均表现出向内收缩的变形特征。根据以上试验、数值模拟及解析解得到的应力-应变曲线对比如图 9 所示。由图 9 可知,在应变为 0~0.32 时,3 种方法的结果表现出良好的一致性,说明该负泊松比结构在变形区间内发生的是弹性变形;当应变超过 0.32,即胞元结构在力的作用下继续变形直至出现屈曲及塑性变形,此时的解析解不能有效描述变截面结构的力学特性,但是仿真模型结果仍然能够与试验结果较好地吻合,故进一步的研究可以通过仿真手段进行。



(a) WDW-100J 微机控制电子万能试验机



(b) 拓竹 A1 mini 自动调平 3D 打印机

图6 试验设备

Fig. 6 Test equipment

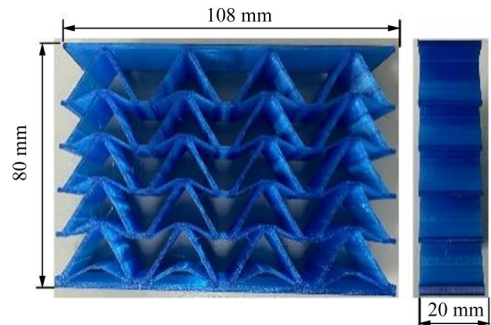


图7 加工的变截面结构($\alpha=0.6$)

Fig. 7 Processed variable cross-section structure ($\alpha=0.6$)

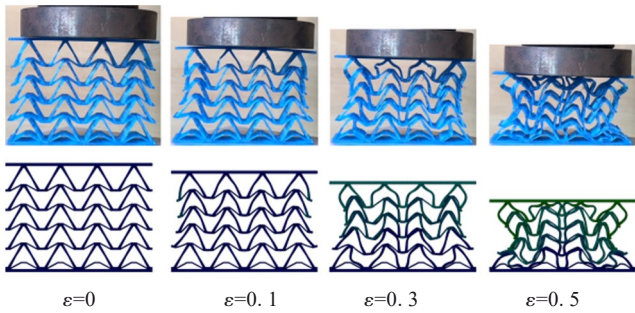


图 8 仿真模型与试验结果的变形对比

Fig. 8 Comparison of deformation between the finite element model and the test model

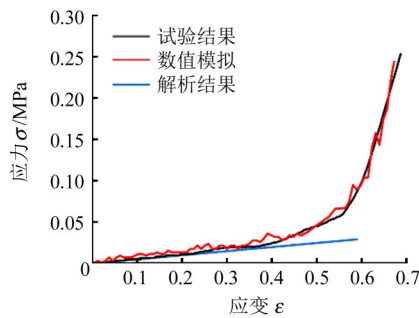


图 9 变截面结构试验结果、数值模拟及解析解对比

Fig. 9 Comparison of test results, numerical simulation, and analytical solutions for variable section structures

2 冲击特性研究与讨论

2.1 变截面结构的面内冲击响应

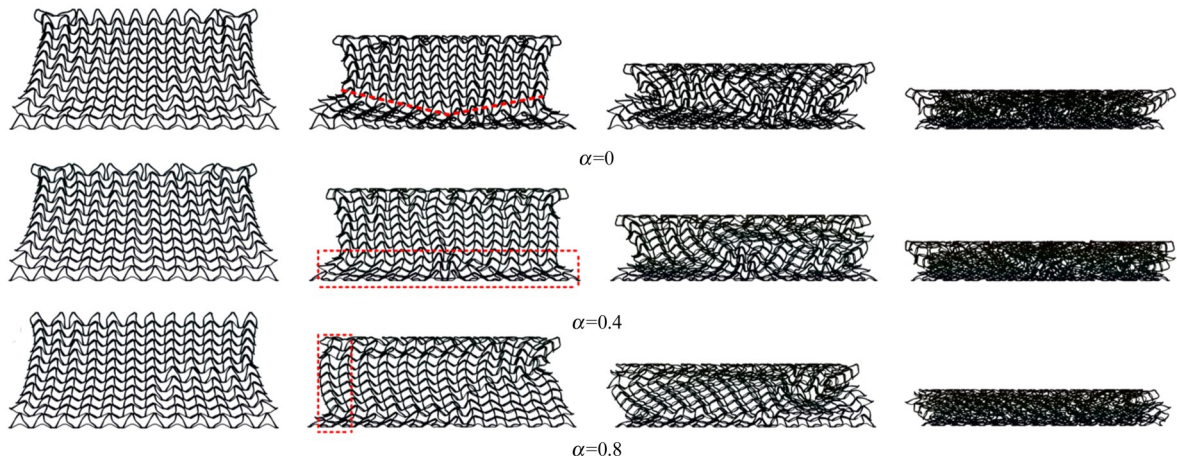
负泊松比蜂窝结构在吸能装置方面具有重要应用潜力^[26-29],因此研究其在冲击载荷下的力学性能十分必要。由于试验条件限制,本文采用 Ansys/Ls-Dyna 对变截面结构在冲击载荷下的动力学响应进行模拟。考虑到 TPU 材料不适用于吸能装置,因此模拟时基体材料采用 45 号钢,其密度为 7.85 g/cm^3 ;弹性模量为 210 GPa ;泊松比为 0.3 ;屈服应力为 350 MPa 。冲击模型的约束条件与第 1.4 节中类似,试件在 x 方向和 y 方向采用 12 个胞元进行填充,确保冲击响应趋于稳定,避免尺寸效应^[30],保证模拟结果的合理性与稳定性。

动态冲击载荷下,冲击速度的不同会导致变截面

结构的变形模式发生变化。图 10 所示为不同冲击速度下的变截面结构的面内冲击变形模式。由图 10 可知,在低速冲击($v=20 \text{ m/s}$)下,变截面结构的变形行为受到截面变化率 α 的显著影响。当 $\alpha=0$ 时,从动态冲击过程中观察到,由于结构受到均匀加载而产生明显的“颈缩”现象,首先在冲击端形成第 1 变形带,随后在固定端形成向冲击端开口的“V”形第 2 变形带;当 $\alpha=0.4$ 时,变截面结构表现出不同的响应特征,随着变截面结构逐渐被压缩,左右胞壁向结构中心收缩形成塑性铰,从而促使相邻胞元发生变形,局部变形带并未明显形成;当 $\alpha=0.8$ 时,右侧区域呈现出刚化现象,导致结构整体刚度增强,并减缓“颈缩”现象的出现,使得变截面结构更难发生局部的压缩和变形。

在中低速冲击($v=35 \text{ m/s}$)时,当 $\alpha=0$ 时,变截面结构的侧边变形相对困难,在 x 方向整体向内收缩,表现出典型的“()”形现象,随着变形程度的增大,在固定端呈现出更明显的“v”形局部变形带,且“颈缩”现象更加明显,直至结构完全压缩密实,导致结构失效。当 $\alpha=0.4$ 时,在初始阶段,与低速冲击时的变形特性基本相似,随着变形程度的增加,蜂窝整体结构呈现“1”形,在冲击端中央区域产生钢化现象。当 $\alpha=0.8$ 时,随着结构的压缩,变截面结构的固定端右侧区域出现刚化现象,无明显“颈缩”现象产生。

在中速冲击($v=70 \text{ m/s}$)时,变截面结构均未出现明显变形带,受惯性效应影响逐渐增强;当 $\alpha=0$ 时,靠近冲击端中部的胞元首先向中央收缩,随着变形程度的增大,首先冲击端的第 1 层胞元被压溃,随后两端胞元继续向中间收缩,进而导致固定端胞元被压溃,接下来交替进行相同的变形,直至变截面结构完全密实。当 $\alpha=0.4$ 时,靠近冲击端的胞元左右胞壁向结构中央收缩,逐层进行相同的收缩变形,直至固定端开始压溃。当 $\alpha=0.8$ 时,变形特征与 $\alpha=0.4$ 时相似,变截面结构整体变形呈现为上窄下宽的“梯形”。

(a) 冲击速度 $v=20 \text{ m/s}$

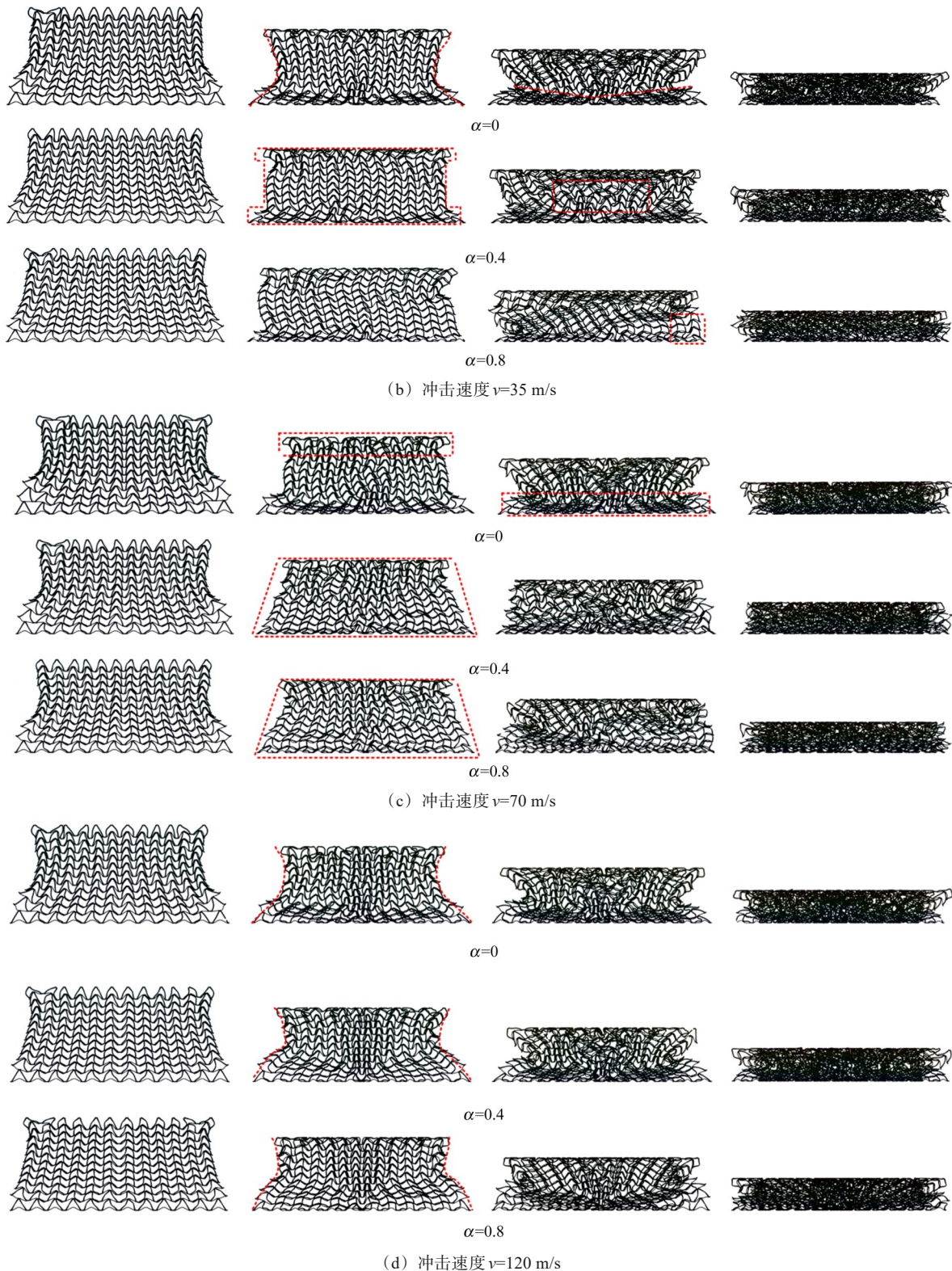


图 10 变截面结构在不同冲击速度下的变形模式

Fig. 10 Deformation modes of the variable cross-section structure under different impact velocities

在高速冲击 ($v=120$ m/s) 时, 冲击端胞元先被压溃, 蜂窝整体结构均呈现“()”形, 两端胞元向中间收缩, 变形随刚性板下压而逐层向固定端递进。随着截面变化率的增加, 减缓“颈缩”现象出现, 并且随着冲击速度的增加, 冲击端附近的胞元更容易被压溃, 同时变形带的产生变得不明显。

图 11 所示为不同截面变化率下变截面结构应力-应变曲线。由图 11 可知, 结构的应力-应变曲线存在线弹性阶段、平台阶段及压实阶段。随着冲击速度的增加, 曲线的线弹性阶段变化明显; 在同一冲击速度下, 不同的截面变化率的应力-应变曲线大致相同, 即截面的尺寸收缩对结构的力学性能没有明显降低; 各

截面变化率对应的平台应力大致相同,即截面变化率

对平台应力影响较小。

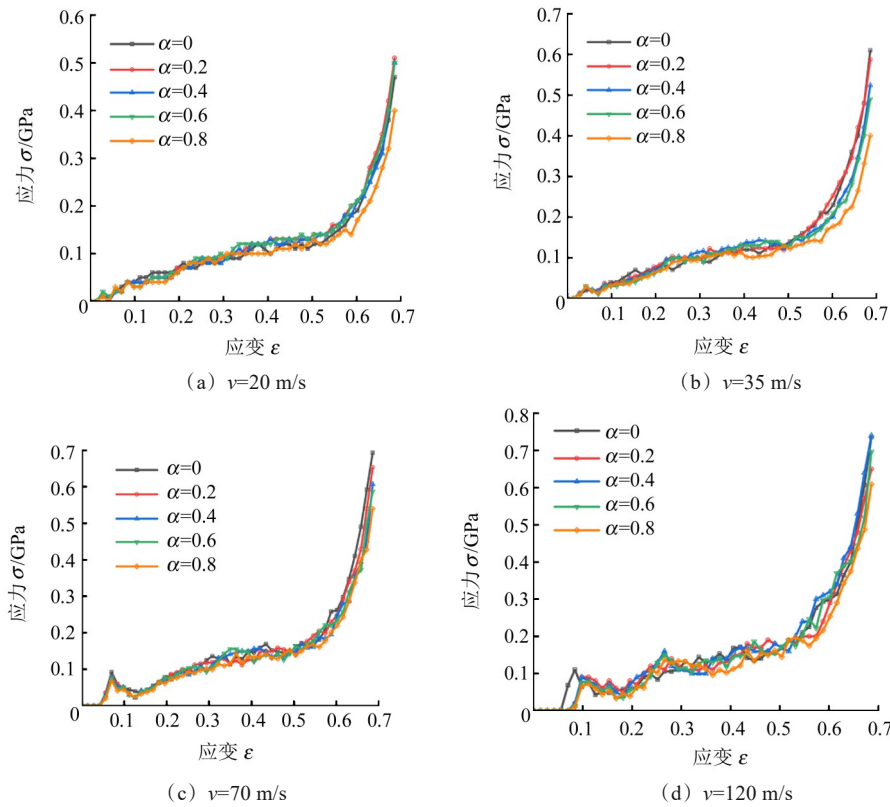


图 11 变截面结构的应力-应变曲线
Fig. 11 Stress-strain curve of the variable cross-section structure

2.2 平台应力解析结果

平台应力阶段是变截面结构应力变化过程中的 1 个阶段,其平台应力为

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_p - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (14)$$

式中, ε_p 为变截面结构的平台应变(平台应力阶段第 1 个应力峰值时的应变),为与密实化应变 ε_d 相同的对速度敏感性变量; ε_0 为初始峰值应力对应的应变值。因此,密实应变可定义为

$$\left. \frac{dE(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (15)$$

式中, $E(\varepsilon)$ 为变截面结构吸收的能量与名义应力的比值,即

$$E(\varepsilon) = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (16)$$

在给定初始速度的前提下,变截面结构的平台应力还可以表示为

$$\sigma_p = \sigma_{cr} + \frac{\bar{\rho} v^2}{\varepsilon_p} \quad (17)$$

式中, v 为给定的初始冲击速度。

基于式(14),表 2 所示为不同冲击速度下变截面结构在冲击端的平台应力值。由表 2 可知,平台应力主要受冲击速度影响,冲击速度的增加会导致平台应力的增加。

表 2 不同冲击速度下的平台应力

Tab. 2 Plateau stress under different impact velocities

α	平台应力/GPa			
	20 m/s	35 m/s	70 m/s	120 m/s
0	0.010 40	0.031 87	0.127 56	0.374 62
0.2	0.010 40	0.031 85	0.127 42	0.374 41
0.4	0.010 39	0.031 82	0.127 35	0.374 15
0.6	0.010 38	0.031 80	0.127 28	0.373 82
0.8	0.010 37	0.031 77	0.127 12	0.373 55

2.3 能量吸收特性

吸能特性在变截面结构的冲击动力学性能中占据重要地位。变截面结构的比吸能 E_{SEA} 被定义为

$$E_{SEA} = \frac{U}{m} = \frac{\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\bar{\rho} \rho_s} \quad (18)$$

式中, U 为变截面结构的总吸收能量; $\sigma(\varepsilon)$ 为变截面结构的名义应力; $\bar{\rho}$ 为变截面结构的相对密度; ρ_s 为变截面结构的基体材料密度; m 为蜂窝结构总质量。

图 12 所示为变截面结构吸能量与应变的关系。由图 12 可知,在低速冲击($v=20$ m/s)下,应变为 0~0.2 时,不同的变截面结构吸能量基本一致,随着应变的增大,变截面结构的吸能量明显高于等截面结构,且 $\alpha=0.6$ 时吸能特性最好。在中低速冲击($v=35$ m/s)时,吸能特性与截面变化率呈正相关,在 $\alpha=0\sim0.6$ 时,

吸能量随着截面变化率的增加而增加。在中速冲击($v=70\text{ m/s}$)和高速冲击($v=120\text{ m/s}$)时,变截面结构在 $\alpha=0.4$ 时吸能量更好。表3所示为在各个截面变化率下不同冲击速度的吸能量。由表3可知, α 对吸能量有显著影响,当冲击速度小于等于 70 m/s ,截面变化率从

0增加到0.6的区间,结构的吸能量随着截面变化率的增加而增加,且冲击速度越快能量吸收越大;但在 $\alpha=0.8$ 时,结构的吸能量均开始下降;当冲击速度为 120 m/s 时,吸能量随着截面变化率的增加而增加,当 α 大于0.4之后能量吸收率呈现减小趋势。

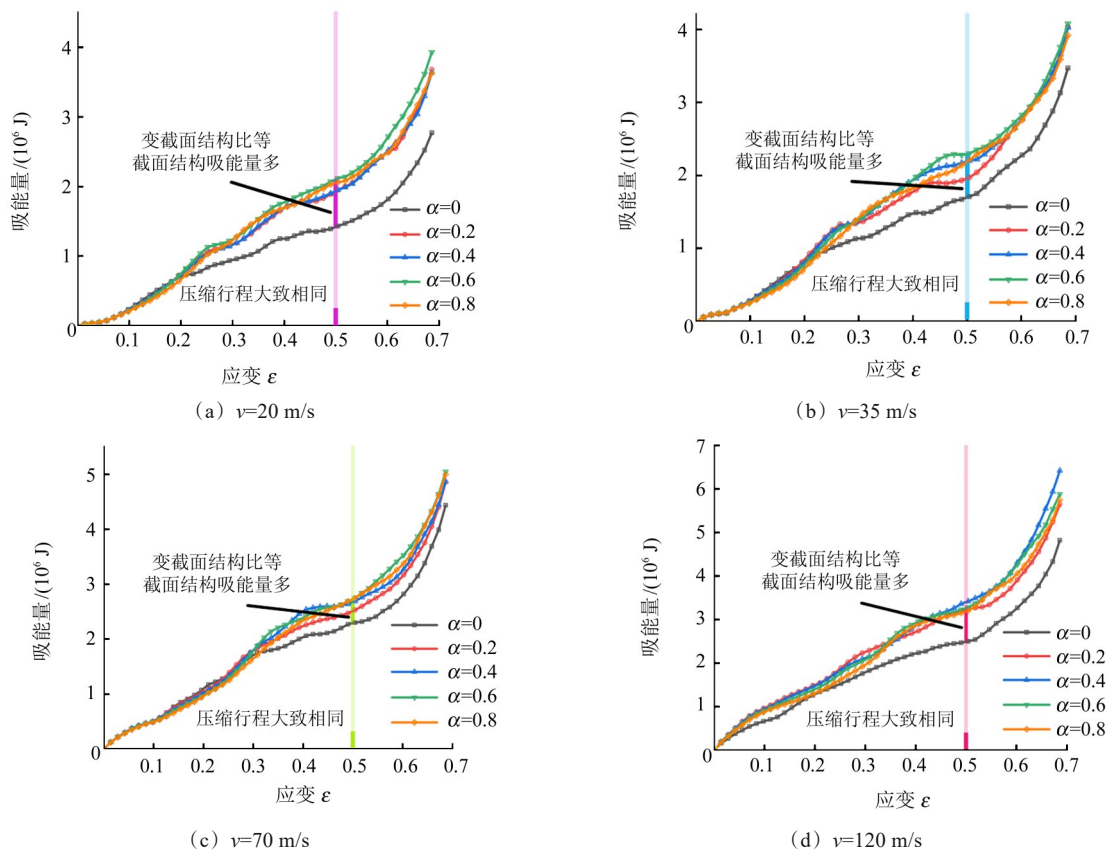


图12 变截面结构的能量吸收特性

Fig. 12 Energy absorption characteristics of the variable cross-section structure

表3 不同冲击速度下变截面结构的吸能量

Tab. 3 Energy absorption of the variable cross-section structure at different impact velocities

α	吸能量/J			
	20 m/s	35 m/s	70 m/s	120 m/s
0	2.77×10^6	3.47×10^6	4.44×10^6	4.82×10^6
0.2	3.68×10^6	4.04×10^6	4.86×10^6	5.64×10^6
0.4	3.64×10^6	4.03×10^6	4.87×10^6	6.42×10^6
0.6	3.93×10^6	4.08×10^6	5.05×10^6	5.88×10^6
0.8	3.63×10^6	3.92×10^6	5.00×10^6	5.75×10^6

在冲击行程相同的情况下,针对截面变化率为0.6的模型,分别对冲击速度为20、70 m/s时,变截面结构与等截面结构的吸能性进行对比。表4所示为在不同冲击速度下,变截面结构和等截面结构的比吸能数据,变截面结构相较于等截面结构在20 m/s冲击时,比吸能提高42.1%,在70 m/s冲击时,比吸能提高13.8%,因此,在冲击速度及冲击行程相同的条件下,变截面结构能够吸收更多的能量。

表4 不同冲击速度下变截面结构比吸能

Tab. 4 Energy absorption capacity of the variable cross-section structure under different impact velocities

冲击速度/(m/s)	$E_{SEA}/(\text{kJ/kg})$		提升率/%
	变截面结构($\alpha = 0.6$)	等截面结构($\alpha = 0$)	
20	2.224	1.565	42.1
70	2.857	2.509	13.8

3 结论

设计了一种变截面结构,分析了截面变化率对结构力学性能的影响及不同动态冲击载荷作用下的面内冲击特性。研究表明,截面变化率与动态冲击速度对变截面结构的面内变形机制有较明显的影响,得出主要结论如下:

1)根据变截面结构的几何参数,推导了结构的相对密度公式。根据典型参数得到了截面变化率对相对密度的规律:随着截面变化率的增加,相对密度呈减小趋势。

2)根据变截面梁与等截面梁弯曲应变能等效的

原则,推导出变截面结构垂直方向的本构模型;建立了Ansys/Ls-Dyna仿真模型,解析解、数值模拟及试验结果基本一致,证明了模型的有效性。

3)面内冲击研究表明,随着冲击速度的增加,变截面结构的线弹性阶段变化明显,在同种冲击速度下,不同截面变化率模型的应力-应变曲线相似,即可以在不影响结构强度的前提下减轻结构质量。

4)能量吸收曲线表明,变截面结构吸能量大于等截面结构,有较好的能量吸收性能;在冲击速度为20 m/s和70 m/s时,变截面结构相较于等截面结构,比吸能分别提高42.1%和13.8%; α 为0.4~0.6时吸能特性最好。

参考文献(References)

- [1] Prawoto Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative Poisson's ratio[J]. Computational Materials Science, 2012, 58: 140-153.
- [2] Lee W, Jeong Y, Yoo J, et al. Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube[J]. Composite Structures, 2019, 208: 836-846.
- [3] 鞠金龙,杨娜娜,余雷,等. 负泊松比结构缓冲装置入水冲击特性数值仿真[J]. 兵工学报, 2025, 46(5): 248-257.
Ju Jinlong, Yang Nana, Yu Lei, et al. Simulation of water-impact characteristics of auxetic structure buffer device[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(5): 248-257. (In Chinese)
- [4] 于靖军,谢岩,裴旭. 负泊松比超材料研究进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 1-14.
Yu Jingjun, Xie Yan, Pei Xu. State-of-art of metamaterials with negative Poisson's ratio[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 1-14. (In Chinese)
- [5] Zhao C F, Zhong J L, Wang H X, et al. Impact behaviour and protection performance of a CFRP NPR skeleton filled with aluminum foam[J]. Materials & Design, 2024, 246: 113295.
- [6] Sun M H, Hu X, Tian L L, et al. Auxetic biomedical metamaterials for orthopedic surgery applications: a comprehensive review[J]. Orthopaedic Surgery, 2024, 16(8): 1801-1815.
- [7] 刘洋佐,马大为,任杰,等. 双箭头负泊松比结构抗侵略性能[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(2): 197-207.
Liu Yangzuo, Ma Dawei, Ren Jie, et al. Ballistic performance of double-arrow negative Poisson's ratio structure[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(2): 197-207. (In Chinese)
- [8] Lakes R. Foam structures with a negative Poisson's ratio[J]. Science, 1987, 235(4792): 1038-1040.
- [9] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997: 175-231.
- [10] Larsen U D, Signund O, Bouwsta S. Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(2): 99-106.
- [11] Wojciechowski K W. Two-dimensional isotropic system with a negative Poisson ratio[J]. Physics Letters A, 1989, 137(1/2): 60-64.
- [12] Zhao C F, Zhou Z T, Liu X X, et al. The in-plane stretching and compression mechanics of negative Poisson's ratio structures: concave hexagon, star shape, and their combination [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 859: 157840.
- [13] 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. (In Chinese)
- [14] Qiao J X, Chen C Q. Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 83: 47-58.
- [15] 马芳武,梁鸿宇,赵颖,等. 倾斜荷载下内凹三角形负泊松比材料的面内冲击动力学性能[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 81-87.
Ma Fangwu, Liang Hongyu, Zhao Ying, et al. In-plane dynamic crushing of concave triangles materials with negative Poisson's ratio under inclined load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 81-87. (In Chinese)
- [16] 闫鹏,赵桂平. 双箭头负泊松比材料与结构抗冲击防护性能及应用[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 241-247.
Yan Peng, Zhao Guiping. Protection properties and application of the materials with double arrowhead negative Poisson's ratio and structures under impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(22): 241-247. (In Chinese)
- [17] 周宏元,郭春燕,王小娟,等. 泡沫混凝土填充双箭头结构的准静态压缩性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(1): 403-414.
Zhou Hongyuan, Guo Chunyan, Wang Xiaojuan, et al. Quasi-static compression performance of double arrowhead honeycomb filled with foam concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(1): 403-414. (In Chinese)
- [18] 徐成龙,庞通,康贺贺. 变截面S形薄壁梁的设计与耐撞性研究[J]. 机械设计与制造, 2019(2): 100-103.
Xu Chenglong, Pang Tong, Kang Hehe. Crashworthiness research and design of thin-walled S-shaped beams with variable cross-section [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(2): 100-103. (In Chinese)
- [19] Cao X F, Duan S Y, Liang J, et al. Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 145: 53-63.
- [20] Hu W P, Xu M B, Zhang F, et al. Dynamic analysis on flexible hub-beam with step-variable cross-section [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 180: 109423.
- [21] Gao Q, Zhao X, Wang C Z, et al. Multi-objective crashworthiness optimization for an auxetic cylindrical structure under axial impact loading [J]. Materials & Design, 2018, 143: 120-130.
- [22] Ou Y X, Yan S L, Wen P. In-plane impact dynamics analysis of re-entrant honeycomb with variable cross-section [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2021, 127(1): 209-222.
- [23] Hassani B, Hinton E. A review of homogenization and topology optimization I—homogenization theory for media with periodic structure [J]. Computers & Structures, 1998, 69(6): 707-717.
- [24] 邹家兴. 用等效刚度法计算变截面梁的变形[J]. 农田水利与小水电, 1995(9): 36-38.
Zou Jiaxing. Calculating the deformation of a variable cross-

- section beam using the equivalent stiffness method [J]. China Rural Water and Hydropower, 1995(9):36-38. (In Chinese)
- [25] Gao Q, Wang L M, Zhou Z, et al. Theoretical, numerical and experimental analysis of three-dimensional double-V honeycomb [J]. Materials & Design, 2018, 139:380-391.
- [26] 许鹏, 夏东伟, 王成强, 等. 加强型蜂窝准静态压缩应力的理论、数值模拟及试验研究[J]. 机械强度, 2024, 46(1):87-95.
Xu Peng, Xia Dongwei, Wang Chengqiang, et al. Study on quasi-static compressive stress of reinforced honeycomb with theoretics, numerical simulation and experiment [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(1):87-95. (In Chinese)
- [27] 陈碧敏, 黄小娣. 梯度蜂窝力学行为及其多目标优化设计[J]. 机械强度, 2024, 46(1):107-114.
Chen Bimin, Huang Xiaodi. Mechanical behavior of graded honeycomb and its multi-objective optimal design [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(1):107-114. (In Chinese)
- [28] 张超锋, 韩超超, 朱佳佳, 等. 混杂复合三明治结构低速冲击特性及剩余压缩强度研究[J]. 机械强度, 2023, 45(3):646-652.
Zhang Chaofeng, Han Chaochao, Zhu Jiajia, et al. Study on the low-velocity impact and residual compressive strength of hybrid composite sandwich structures [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(3):646-652. (In Chinese)
- [29] 马南芳, 邓庆田, 李新波, 等. 多层内凹蜂窝圆柱壳冲击动力学行为分析[J]. 机械强度, 2023, 45(2):423-429.
Ma Nanfang, Deng Qingtian, Li Xinbo, et al. Impact dynamic behavior analysis of multiple layers re-entrant honeycomb cylindrical shells [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2):423-429. (In Chinese)
- [30] Dong Z C, Li Y, Zhao T, et al. Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb [J]. Materials & Design, 2019, 182:108036.

Study on the mechanical performance and energy absorption characteristics of structures with varying cross-sections and negative Poisson ratio

WANG Jie^{1,2} LIN Lisheng² PANG Qingqing³ CAO Zheng³ ZHANG Jianzhuo²

(1. School of Aeronautics, Chongqing City Vocational College, Chongqing 402160, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

(3. Shandong Yankuang Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Jining 273500, China)

Abstract: [Objective] To design a variable cross-section double-arrow negative Poisson ratio honeycomb structure (referred to as variable cross-section structure), and to reveal the influence of cross-sectional variation rate on its mechanical properties and energy absorption characteristics, providing theoretical support for its engineering application in buffering and energy absorption. [Methods] The relationship between cross-sectional variation rate and relative density was derived based on the geometric parameters of the unit cell. An equivalent constitutive model of the variable cross-section structure was established using the bending strain energy equivalence theory of variable and uniform cross-section beams. A finite element model was developed in Ansys/Ls-Dyna for quasi-static compression analysis, and the model accuracy was validated through quasi-static loading tests on 3D-printed specimens. Furthermore, the in-plane impact response, plateau stress, and energy absorption characteristics were investigated under different impact velocities (20, 35, 70, 120 m/s) and cross-sectional variation rates ($\alpha=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$). [Results] The analytical solutions, numerical simulations, and experimental results showed good agreement, validating the accuracy of the constitutive model and FEA model. Impact velocity significantly affects the impact characteristics: increasing velocity enhances the elastic modulus and prolongs the plateau stress stage. A higher cross-sectional variation rate increases the overall structural stiffness and delays the negative Poisson ratio effect, making local deformation more difficult. The cross-sectional variation rate is positively correlated with energy absorption rate. Compared with the uniform cross-section structure, the variable cross-section structure exhibits 42.1% and 13.8% higher specific energy absorption under impact velocities of 20 m/s and 70 m/s, respectively. The optimal energy absorption performance occurs when α is between 0.4 and 0.6. The variable cross-section structure reduces overall weight without compromising mechanical properties and significantly enhances energy absorption capacity.

Key words: Varying cross-section; Negative Poisson ratio structure; Equivalent mechanical model; In-plane impact response; Platform stress; Energy absorption characteristic

Corresponding author: LIN Lisheng, E-mail: 1547456980@qq.com

Fund: National Key Scientific Instrument Development Project (52427805); 2025 Science and Technology Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN202503906)

Received: 2024-11-14 Revised: 2025-01-05

(编辑:刘欢欢)