

材料与成形性能

平方函数曲边负泊松比蜂窝结构面内冲击性能研究

徐峰祥^{1,2}, 管一杰^{1,2}, 邹震^{1,2}, 刘艳雄^{1,2}, 吴磊³, 涂繁³

(1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉华夏精冲技术有限公司, 湖北 武汉 430415)

摘要: 在传统内凹六边形蜂窝结构的基础上, 提出了一种平方函数曲边的负泊松比蜂窝结构。研究了平方函数曲边系数与其等效泊松比之间的关系, 确定了泊松比为负值时平方函数曲边系数的范围。采用有限元方法揭示了冲击速度对平方函数曲边的蜂窝结构变形模式和动态响应的影响规律, 并分析了蜂窝结构的能量吸收情况。研究表明: 引入平方函数曲边的构型具有较为良好的负泊松比效应, 并且其等效泊松比与平方函数曲边系数呈一定的线性关系。冲击速度对结构冲击端应力的影响要大于固定端, 处于中高速冲击时, 平方函数曲边结构的平台区域的震荡幅度也显著增大。同时, 该构型还具备优于内六边形构型的吸能特性, 随着冲击速度的提高, 结构的吸能特性也明显增强。

关键词: 平方函数曲边; 负泊松比; 蜂窝结构; 面内冲击性能; 动态响应; 能量吸收

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.032

中图分类号: O347 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0212-09

Research on in-plane impact performance for negative Poisson's ratio honeycomb structure with square function curved edge

Xu Fengxiang^{1,2}, Guan Yijie^{1,2}, Zou Zhen^{1,2}, Liu Yanxiong^{1,2}, Wu Lei³, Tu Fan³

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Wuhan Huaxia Fineblanking Technology Co., Ltd., Wuhan 430415, China)

Abstract: Based on the traditional concave hexagonal honeycomb structure, a negative Poisson's ratio honeycomb structure with square function curved edge was proposed. Then, the relationship between square function curved edge coefficient and its equivalent Poisson's ratio was studied, and when the Poisson's ratio was negative, the range of square function curved edge coefficient was determined. Furthermore, the influence laws of impact velocity on the deformation mode and the dynamic response of square function curved-edge honeycomb structure were revealed by using the finite element method, and the energy absorption of honeycomb structure was analyzed. The research results show that the configuration of introducing the square function curved edge has a relatively good negative Poisson's ratio effect, and its equivalent Poisson's ratio has a certain linear relationship with the coefficient of square function curved edge. The influence of impact velocity on the stress at the impact end of structure is greater than that at the fixed end. When the impact is at medium and high speeds, the vibration amplitude of platform area for the square function curved edge structure also increases significantly. At the same time, this configuration also has better energy absorption characteristics than the inner hexagon configuration. With the increasing of impact velocity, the energy absorption characteristics of the structure are also significantly enhanced.

Key words: square function curved edge; negative Poisson's ratio; honeycomb structure; in-plane impact performance; dynamic response; energy absorption

随着科技水平的快速进步以及生活品质的显著

提高, 车辆安全以及能耗愈发成为道路使用者关心的焦点问题^[1]。因此, 相关的吸能结构和材料也越来越得到重视^[2-3]。其中, 蜂窝材料由于质量轻、稳定性好等特点, 具有非常广阔的前景^[4], 相比于传统实材料, 蜂窝材料可以从其内部拓展新的设计维度, 通过改变内部的结构和排列方式均可影响其性能^[5]。通过改变蜂窝材料的内部结构可得到具有负泊松比效应的蜂窝结构, 当在材料的弹性范围内

收稿日期: 2022-01-13; 修订日期: 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975438); 高等学校学科创新引智计划 (B17034)

作者简介: 徐峰祥 (1985-), 男, 博士, 副教授

E-mail: xufx@whut.edu.cn

通信作者: 刘艳雄 (1985-), 男, 博士, 副教授

E-mail: liuyx@whut.edu.cn

受到外界拉伸力时，其垂直于拉伸力方向变宽，而当受到外界压缩力时，其垂直于压缩力方向变窄^[6]，这种奇特的性能使其拥有了轻质、隔振、高吸能、高阻尼^[7]等特性，成为航天、汽车、军事等领域不可缺少的材料之一^[8]。

最早对负泊松比效应的描述来自 1909 年的 Love A E H^[9]，但并未引起太多关注，直到 1982 年，Gibson L J 等^[10]提出了二维内凹六边形蜂窝结构。1987 年，Lakes R^[11]通过对常规开孔泡沫材料的压缩和热处理，首次制备了具有内凹胞体的各项同性的负泊松比结构。在这之后，学者们才开始对负泊松比效应进行了大量研究，各种各样的拉胀结构不断地被设计和研究出来。Wan H 等^[12]探究了内凹蜂窝结构胞体的内凹参数对其泊松比的影响。Choi J B 等^[13]对内凹泡沫材料进行了研究，发现胞体的拓扑结构会影响负泊松比泡沫材料的力学性能。韩会龙等^[14]研究了星形蜂窝结构在不同冲击速度下的动力学响应特征，并总结分析了蜂窝结构参数对变形模式、密实和动态冲击强度的影响。Li D 等^[15]将正弦曲边引入到了负泊松比内凹六边形结构之中，使能量吸收能力得到增强。Fu M H 等^[16]设计了一种新型负泊松比材料，推导出具有较高精度的弹性模量与泊松比的关系式。Liu Z F 等^[17]研究了薄壁折纹管在轴向冲击载荷下的变形状态和吸能情况，确定了改变薄壁折纹角是提升其抗冲击性能的有效方法之一。邓小林等^[18]提出了一种正弦曲线蜂窝结构，探究了振幅、胞壁厚度对其在不同冲击速度下面内响应的影响，确定源自正弦蜂窝的轻微拉胀效应可以改善其能量吸收性能。张新春等^[14]研究了面内冲击作用下负泊松比蜂窝材料的动态冲击性能，发现胞元扩张角越大，冲击端的平台应力越高，而且冲击速度越高，蜂窝材料的吸能能力越好。马芳武等^[19]提出了一种内凹三角形负泊松比材料，研究发现内凹三角形相比于内凹六边形吸能更平稳，压缩量更大，而且随着冲击速度的提高，材料的吸能能力也越强。由此可见，目前对负泊松比结构的冲击性能的研究主要集中于内凹六边形结构上，而内凹六边形的构型目前主要以传统直边以及正弦曲边两种为主，因此，有必要尝试将更多的常见曲边引入内凹六边形进行研究。

本文在传统内凹六边形蜂窝结构的基础上，为进一步提升内凹六边形蜂窝结构的性能，将传统的直边替换为平方函数曲边，进而提出了一种平方函数曲边的负泊松比蜂窝结构。研究其在不同冲击速

度下的变形模式以及冲击速度对其面内冲击性能和吸能特性的影响，为胞元的设计提供新的思路。

1 计算模型

1.1 曲边选择

已有将正弦函数充当负泊松比结构曲边的先例，本文为验证常见函数曲边充当负泊松比结构曲边的可行性，在常见函数如幂函数、指数函数、对数函数等函数中进行选择，最后选择幂函数中的平方函数进行构型设计，选择过程如下。

本构型设计为内六边形负泊松比结构的变种，所以，应关注内六边形负泊松比结构的特性，即对称性、内凹型、连续性等性质。在备选函数中，幂函数满足对称性、内凹型、连续性等基本特性，且随着系数的变化，幂函数的振幅也会随之变化，这也有助于研究函数系数与等效泊松比、吸能特性之间的关系，所以选取幂函数进行构型设计。

1.2 几何结构

如图 1 所示，对平方函数的一段曲边进行 180° 复制翻转，然后以过原点的垂直中心线做轴对称，再沿水平线做轴对称，即可得到两条平滑曲边。

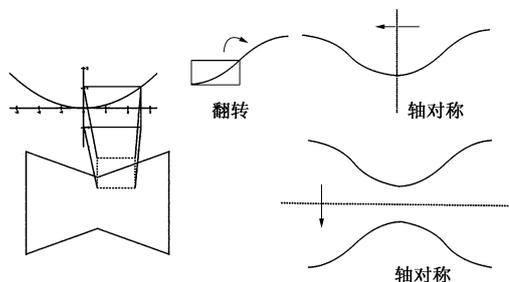


图 1 平方函数曲线的替换

Fig. 1 Replacement of square function curves

用曲边替换传统内凹六边形胞元的侧边，保持曲边与竖边夹角小于 90°，即得到图 2 所示的平方函数曲边负泊松比蜂窝结构胞元。其中， l 为曲边的长度， h 为胞元两侧直臂的长度。为使平方函数曲边系数处于一定范围内，本文的胞元尺寸取固定值^[20]，即 $l=10\text{ mm}$ 、 $h=8\text{ mm}$ 。

1.3 有限元模型

本文的研究对象为平方函数曲边的负泊松比蜂窝结构，为提升试验效率，采用 Hypermesh/Ls-Dyna 联合仿真的方法，即通过 Hypermesh 进行仿真文件的前/后处理，采用 Ls-Dyna 进行求解计算。已有研究表明，当单胞在横向 x 、纵向 y 上的排列数均大

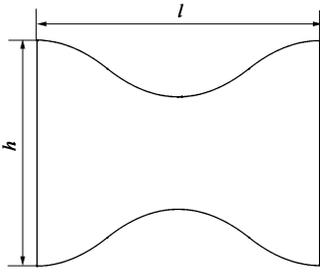


图 2 平方函数曲边负泊松比结构的胞元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cell for negative Poisson's ratio structure with square function curved edge

于 10 时, 蜂窝结构在外界冲击下可呈现有效的整体变形模式^[4]。因此, 如图 3 所示, 为获得稳定的整体变形, 本文构建的蜂窝结构在 x 、 y 方向上的胞元数量均为 12。将蜂窝结构置于两块钢板之间, 且蜂窝结构的左端与左侧钢板固定连接, 右侧钢板依据试验要求以初始速度 V 向左匀速移动, 对蜂窝结构进行冲击。

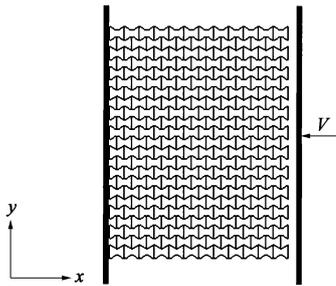


图 3 平方函数曲边负泊松比蜂窝结构的内冲击结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of in-plane impact structure for negative Poisson's ratio honeycomb structure with square function curved edge

在有限元模型中, 蜂窝材料由金属铝材料构成, 采用理想弹塑性模型, 密度为 $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、杨氏模量为 69 GPa 、泊松比为 0.33 、屈服应力为 76 GPa 。为保证收敛性, 沿厚度方向采用 5 个积分点。蜂窝结构的网格尺寸为 0.5 mm 。左右刚性板均为刚体, 密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、杨氏模量为 200 GPa 。采用与文献 [5] 和文献 [6] 一致的边界条件和接触设置, 即冲击端的刚体与蜂窝结构采用 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, 动/静摩擦因数均为 0.2 。在蜂窝结构内部添加 CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, 避免在压溃过程中蜂窝结构自身的穿透。蜂窝构型沿垂直于结构面方向 z 的面外厚度为 1 mm 。为防止蜂窝结构在冲击过程中发生面外弯曲, 约束蜂窝结构所有的面外位移。另外, 冲击端刚性板以恒定速

度负泊松比结构进行冲击, 而对固定端刚体限制其全部方向的自由度。

1.4 模型的可靠性

为验证仿真冲击模型的有效性, 本文采用沙漏来验证仿真模型^[21]。图 4 为平方函数曲边蜂窝构型在面内冲击下的能量曲线。在本模型的冲击过程中, 总能量守恒, 并且沙漏能一直保持在低于总能量 5% 的水平, 同时内能的增加等于动能的减少, 由此可验证本仿真模型的可靠性。

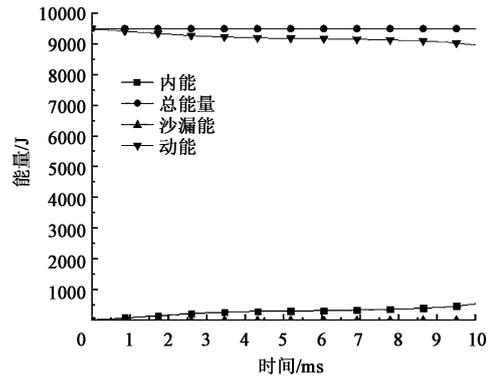


图 4 平方函数曲边蜂窝构型在面内冲击下的能量曲线

Fig. 4 Energy curves of honeycomb configuration with square function curved edge under in-plane impact

2 等效泊松比与平方函数曲边系数的选取

2.1 等效泊松比计算方法

本章对平方函数曲边负泊松比材料的等效泊松比进行研究计算。泊松比被称为横向变形系数, 它是材料的一个弹性常数, 在小变形模式下泊松比为常量, 通过横向平均应变和纵向平均应变的负比率即可得到, 如式 (1) 所示:

$$v = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (1)$$

式中: v 为泊松比; ε_x 为横向平均应变, 可通过式 (2) 计算; ε_y 为纵向平均应变, 可通过式 (3) 计算。

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{L_1} \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{L_2} \quad (3)$$

式中: Δx 为横向压缩量, m ; L_1 为结构的横向长度, m ; Δy 为结构纵向两侧边界位移的平均值, m ; L_2 为结构的纵向长度, m 。

当材料进入了塑性变形阶段, 即大变形后, 泊

松比不再是常量，而是一个基于应变的函数，此时计算泊松比需要更为复杂的非线性形式。本文参考文献 [22]，使用对数模型计算平方函数曲边负泊松比材料的等效泊松比，以曲边参数 $A = 0.20$ 时的平方函数曲边胞元组成的多胞结构为示例，如图 5 所示。

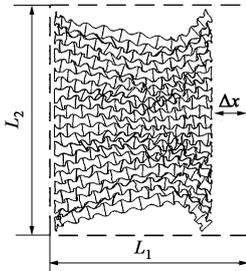


图 5 等效泊松比计算变量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of calculation variables for equivalent Poisson's ratio

等效泊松比的计算公式如式(4)所示：

$$v_e = -\frac{\lg(1 + \varepsilon_y)}{\lg(1 + \varepsilon_x)} \quad (4)$$

式中： v_e 为等效泊松比。

由于中、高速冲击时，惯性效应较大，应力分布不均匀，变形由冲击端逐层压溃，负泊松比效应不明显，此时不能准确地计算出等效泊松比，所以冲击速度取低速，即 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而且当应变过大时，胞元被压溃殆尽，用此时的横、纵向平均应变去计算等效泊松比也不精准，所以应变取较小值，即 0.3。

2.2 等效泊松比与平方函数曲边系数的关系

本文计划研究平方函数曲边系数与等效泊松比的关系，将不同曲边系数的平方函数曲边构型在相同的材料、属性设置以及相同的冲击速度、应变设置下进行冲击仿真，并计算等效泊松比，观察等效泊松比与平方函数曲边系数的关系。

由于本文单胞构型的 l 为 10 mm、 h 为 8 mm，而曲边系数的变化会影响单胞构型的内凹程度，所以，应先确定曲边系数的范围，再进行选点操作。当曲边系数为负时，构型为外凸结构，所以，系数范围的最小极限值为 0，此时单胞构型的曲边从 $y = 0$ 中提取，如图 6 所示。系数范围的最大极限值为 0.32，此时单胞构型的曲边从 $y = 0.32x^2$ 中提取，两条曲边相互贴合，如图 7 所示。

确定好曲边系数的范围为 (0.00, 0.32) 后，在此范围内以 0.04 的间隔取 9 个点：0.00、0.04、

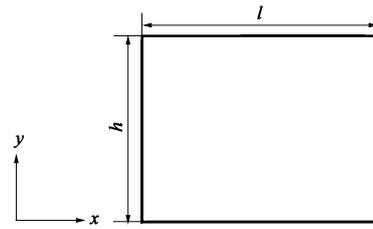


图 6 平方函数曲边系数为 0.00 的单胞结构

Fig. 6 Unit cell structure at square function curved edge coefficient of 0.00

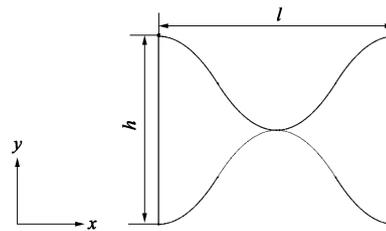


图 7 平方函数曲边系数为 0.32 的单胞结构

Fig. 7 Unit cell structure at square function curved edge coefficient of 0.32

0.08、0.12、0.16、0.20、0.24、0.28、0.32，建立对应的单胞构型和蜂窝结构，按 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冲击速度、0.3 的蜂窝结构整体应变进行面内冲击。将冲击后的 ΔY 、 ΔX 代入式 (4) 中求得等效泊松比，汇总不同曲边系数对应的等效泊松比，如图 8 所示。

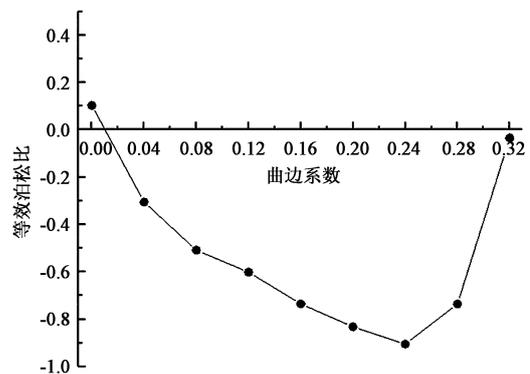


图 8 平方函数曲边系数与等效泊松比的关系

Fig. 8 Relationship between square function curved edge coefficient and equivalent Poisson's ratio

由图8可以看出：随着曲边系数的增大，等效泊松比由正值逐渐减少到负值，应变达到 0.24 左右时，等效泊松比开始逐渐增大，最后又趋近于 0。当曲边系数小于 0.01 时，等效泊松比大于 0；曲边系数在 0.01 附近时，等效泊松比接近于 0；曲边系数在 0.24 附近时，等效泊松比取最小值，为

-0.905; 曲边系数为 0.32 时, 等效泊松比再次接近于 0, 为 -0.0344。由此可知, 曲边系数范围在 0.01~0.32 之间时, 等效泊松比为负值。

2.3 平方函数曲边系数的选取与构型的设计

本文在等效泊松比为负值的曲边系数范围 (0.01, 0.32) 内选取较为居中的一点, 即 0.16 为胞元曲边系数, 对应的曲边函数为 $y = 0.16x^2$, 胞元结构如图 9 所示。多胞结构的排列方式、材料、属性、接触、边界条件与 1.3 章节相同, 压缩距离为蜂窝结构初始长度的 90%。采用不同的冲击速度以验证冲击速度对负泊松比蜂窝结构动态响应的影响。

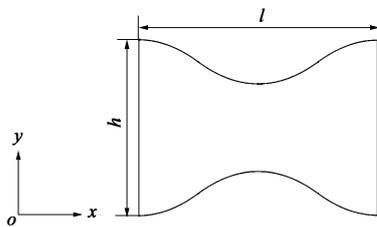


图 9 平方函数曲边系数为 0.16 的单元结构

Fig. 9 Unit cell structure at square function curved edge coefficient of 0.16

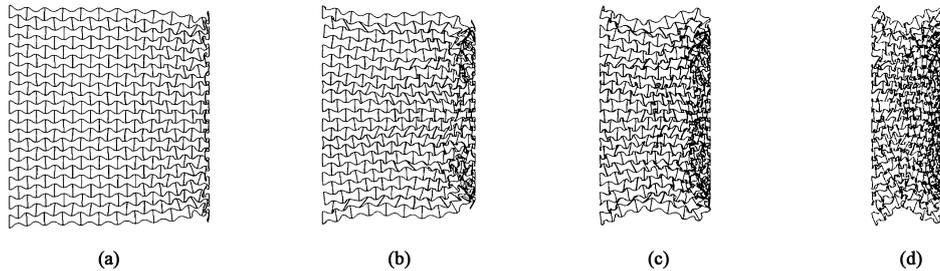


图 10 平方函数曲边负泊松比蜂窝结构在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 冲击速度下的冲击变形模式

(a) $\varepsilon = 0.1$ (b) $\varepsilon = 0.3$ (c) $\varepsilon = 0.5$ (d) $\varepsilon = 0.7$

Fig. 10 Impact deformation modes of negative Poisson's ratio honeycomb structure with square function curved edge at impact speed of $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3.2 不同冲击速度下蜂窝结构的变形模式

变形过程如图 11 所示。当 $V = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 由于冲击速度较低, 惯性效应较小, 应力均匀地分布在冲击端和固定端, 局部变形也均匀分布, 当应变为 0.1 时, 结构就已经微微显现“X”形变形带。随着冲击的进行, 结构的变形也由冲击端均匀地向固定端传递, “X”形变形带逐渐明显, 且结构有明显的内凹现象。从始至终结构的内凹程度均是冲击端大于固定端。当 $V = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 惯性效应开始显现, 应力分布开始不均匀, 固定端变形更加滞后, 应变为 0.3 时固定端开始出现变形, 冲击端开始出现“I”形变形带, 并逐层挤压中间部位的胞元。应变为 0.5 时, 结构出现“X”形变形带, 固定端

3 模拟结果及分析

3.1 蜂窝结构变形模式

图 10 给出的是平方函数曲边负泊松比蜂窝结构在较低冲击速度 ($10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 下的冲击变形模式, 由图 10 可知: 在冲击的初始阶段, 即名义应变 $\varepsilon = 0.1$ 时, 由于负泊松比效应, 蜂窝结构发生了较为明显的纵向颈缩现象; 当名义应变增加至 $\varepsilon = 0.3$ 时, 与固定端刚性板接触的蜂窝结构开始微微变形, 随之观察到纵向收缩现象, 即此时开始出现负泊松比效应, 随着冲击压缩的进行, 蜂窝结构的变形不再集中在冲击端, 而是逐渐扩展到固定端, 而蜂窝结构冲击端变成较为近似菱形形状的变形带; 名义应变 $\varepsilon = 0.5$ 时, 蜂窝结构进一步被压溃, 形成“X”形的变形带, 蜂窝结构固定端也出现了较为密实的变形带, 但自始至终固定端的压缩变形均滞后于冲击端; 当名义应变 $\varepsilon = 0.7$ 时, 冲击端部分被全部压溃, 固定端的压溃仍然落后于冲击端, 并且此时整体结构的负泊松比效应最为明显。

也出现了较为密实的变形带, 但始终滞后于冲击端。结构从始至终均有较为明显的内凹现象, 负泊松比效应依然明显。当 $V = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 负泊松比结构的面内变形带基本仅存在于冲击端, 固定端的变形进一步减弱, 变形带由冲击端逐层压溃中间胞元, 但结构还存在较为明显的内凹现象。当 $V = 90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 惯性效应增强, 蜂窝结构的变形模式与常规蜂窝结构无异, 从冲击端逐层压溃至固定端, 且几乎无内凹现象^[7]。

通过观察可知, 平方函数曲边负泊松比蜂窝结构的面内变形受冲击速度的影响较大, 冲击速度越大, 惯性效应越大, 局部应力越集中, 变形越不均匀, 相对地, 冲击速度越小, 局部应力越分散, 变形越均匀, 波动越小。

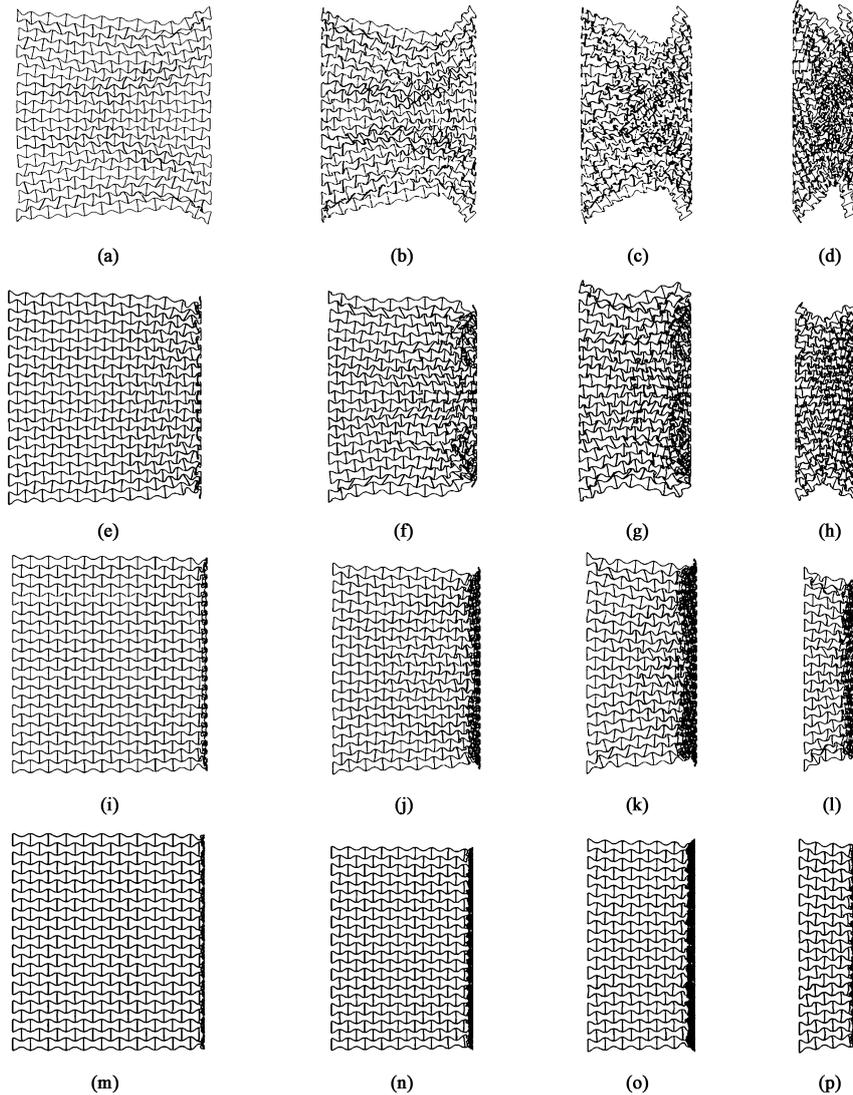


图 11 平方函数曲边负泊松比蜂窝结构在不同冲击速度和应变下的变形模式

- (a) $V=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.1$ (b) $V=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.3$ (c) $V=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.5$ (d) $V=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.7$
 (e) $V=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.1$ (f) $V=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.3$ (g) $V=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.5$ (h) $V=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.7$
 (i) $V=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.1$ (j) $V=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.3$ (k) $V=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.5$ (l) $V=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.7$
 (m) $V=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.1$ (n) $V=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.3$ (o) $V=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.5$ (p) $V=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \varepsilon=0.7$

Fig. 11 Deformation modes of negative Poisson's ratio honeycomb structures with square function curved edge under different impact speeds and strains

3.3 蜂窝结构的动态响应分析

蜂窝结构面内压缩的名义应力 σ 、名义应变 ε 的表达式分别为：

$$\sigma = \frac{F}{L_2 \times b}$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_1} \quad (5)$$

式中： F 为接触反力，N； b 为蜂窝面外厚度，m； δ 为蜂窝压缩位移，m。

基于式 (5)，图 12 和图 13 为蜂窝结构在 4 种

不同冲击速度下的面内冲击响应曲线。通过分析可知，平方函数曲边负泊松比蜂窝结构的变形规律与常规蜂窝结构基本一致，初始压缩时为线弹性阶段，随后在到达应力峰值后快速下降至稳定的平台阶段，在此阶段，蜂窝结构内部发生稳定的溃缩变形，最终蜂窝结构内部基本充分变形而进入应力激升阶段^[18]。蜂窝结构固定端的名义应力-名义应变曲线如图 12 所示，可以看出：应力峰值与平台应力均随着冲击速度的增大而增大；在高速冲击速度 ($90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 条件下，变形初始阶段的应力值接近于零，这是因为高速冲击时，冲击端的胞元被迅速压溃，应力在结构内

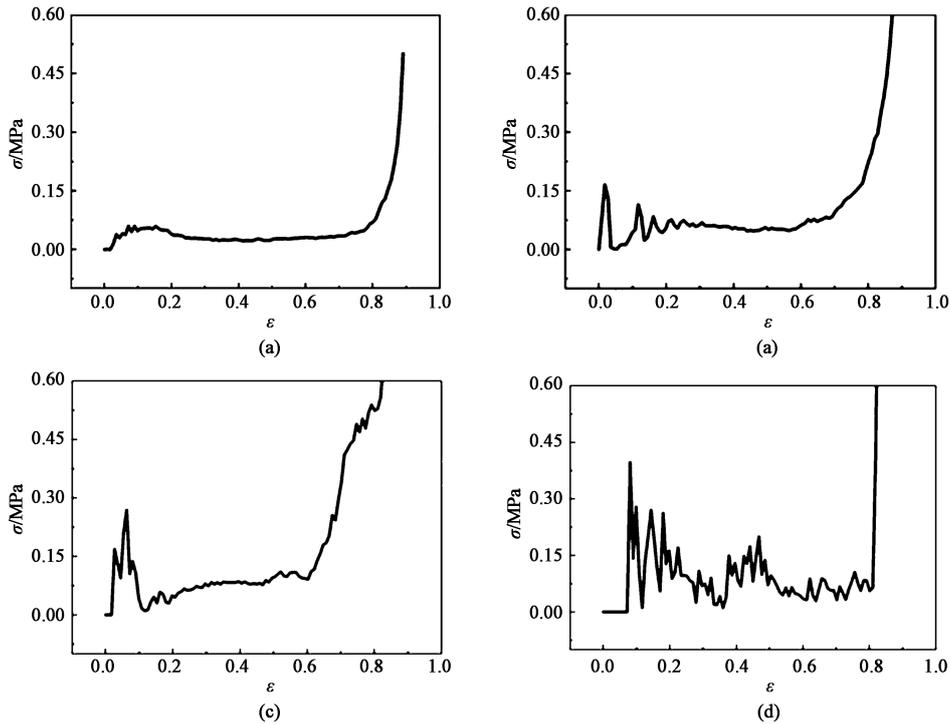


图 12 平方函数曲边负泊松比蜂窝结构在固定端的名义应力-名义应变曲线

(a) $V=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $V=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $V=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) $V=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 12 Nominal stress-nominal strain curves of fixed end for negative Poisson's ratio honeycomb structure with square function curved edge

的传递较为滞后，导致固定端受力较迟^[5]。

与固定端相比，冲击速度对冲击端的影响要大于固定端，图 13 为冲击端的名义应力-名义应变曲线。由图 13 可知，在低速冲击时，冲击端与固定端的名义应力-名义应变曲线无明显差异，而随着冲击速度的增大，在相同冲击速度下，冲击端的峰值应力和平台应力均大于固定端。随着冲击速度的提高，冲击端的初始峰值应力和平台应力有了显著的提高，同时平台阶段的震荡幅度也显著增大，这些震荡主要是因为高速冲击过程中冲击端胞元被迅速地逐行压溃，应力波在压溃区传播所导致的。

3.4 能量吸收特性

对于蜂窝材料，吸能特性指标能够反映结构的能量吸收能力，而比吸能 E_m 是评价结构吸能能力的最重要指标，其表达式为^[23]：

$$E_m = \frac{E_v}{\Delta\rho \cdot \rho_s} \quad (6)$$

式中： E_v 为单位体积结构吸收的能量，J， $E_v = \int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$ ； ε_{cr} 为名义应力到达第 1 个应力峰值时的名义应变； ε_d 为锁定应变，即蜂窝材料进入密实化阶段时所对应的应变， $\varepsilon_d = 1 - 1.4(\Delta\rho/\rho_s)$ ； $\Delta\rho$ 为蜂窝材料的相对密度， $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ； ρ_s 为基体材料

的密度， $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

通过变形模式可知，平方函数曲边蜂窝结构具有较强的负泊松比效应，所以本文将其与传统内六边形进行对比分析，研究平方函数曲边蜂窝结构的吸能特性。图 14 为平方函数曲边构型与内六边形构型在不同冲击速度下的能量吸收特性对比。

如图 14 所示，4 种冲击速度下，平方函数曲边构型与内六边形构型的比吸能关系较为一致：冲击起始阶段，平方函数曲边结构和内六边形结构的曲线近乎相似，随着压缩量的增加，在应变超过 0.1 后，平方函数曲边构型的比吸能超过内六边形构型，并在之后的压缩过程中一直领先于内六边形构型。并且对于平方函数曲边构型来说，随着冲击速度的增大，比吸能也随之增大。

4 结论

(1) 随着平方函数曲边系数的增大，等效泊松比由正值逐步减少至负值；且平方函数曲边构型在中低速冲击时有明显的负泊松比效应。

(2) 随着冲击速度的提高，平方函数曲边蜂窝结构的峰值应力以及平台应力均有所增大，且冲击

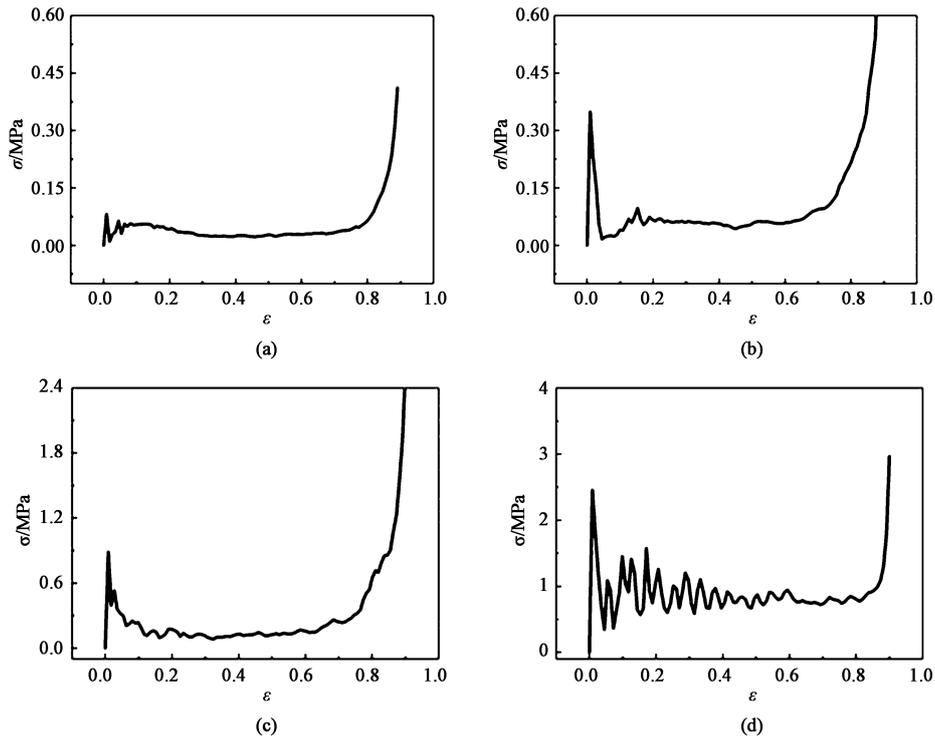


图 13 平方函数蜂窝结构在冲击端的名义应力-名义应变曲线

(a) $V=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $V=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $V=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) $V=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 13 Nominal stress-strain curves of impact end for negative Poisson's ratio honeycomb structure with square function curved edge

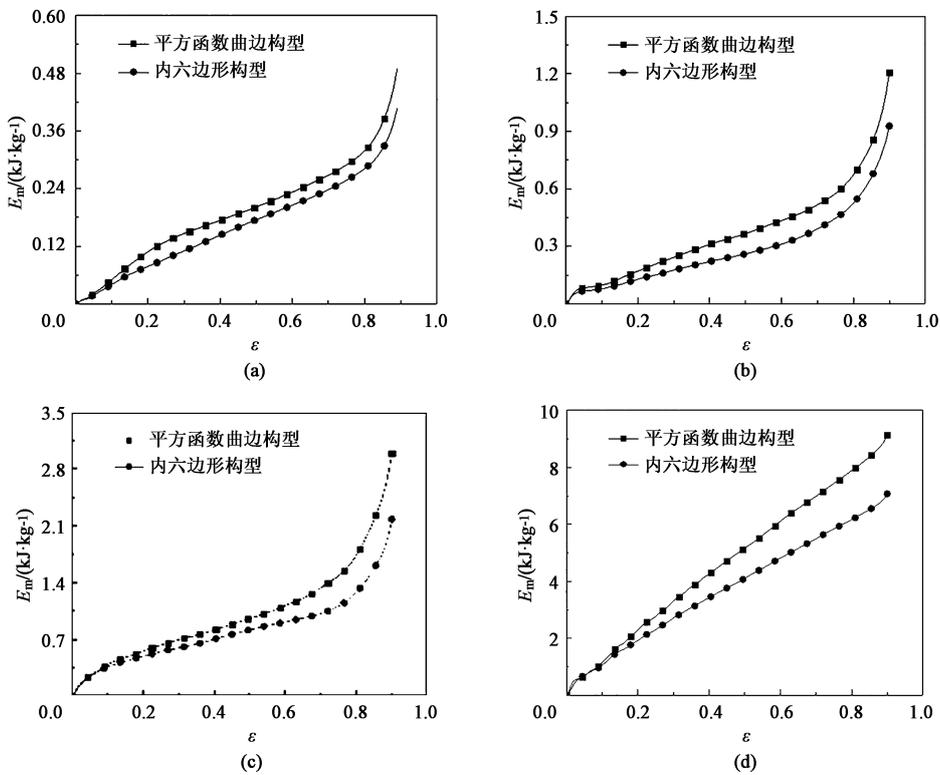


图 14 不同冲击速度下两种构型的吸能特性对比

(a) $V=3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $V=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $V=30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) $V=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 14 Comparison of energy absorption characteristics for two configurations under different impact speeds

速度对冲击端的影响要大于固定端；处于中、高速冲击时，平方函数曲边蜂窝结构的平台区域的震荡幅度也显著增大。

(3) 随着冲击速度的提高，平方函数曲边蜂窝结构的吸能特性明显增强；且在 4 种冲击速度下，平方函数曲边构型在应变超过 0.1 后均会一直优于内六边形构型。

参考文献：

- [1] 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 J J, Xie Y, Pei X. Research progress of negative Poisson's ratio metamaterials[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (13): 1-14.
- [2] 任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展 [J]. 力学学报, 2019, 51 (3): 656-687.
Ren X, Zhang X Y, Xie Y M. Research progress on materials and structures with negative Poisson's ratio [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51 (3): 656-687.
- [3] Johnson W, Reid S R. Metallic energy dissipating systems [J]. Applied Mechanics Reviews, 1978, 31 (3): 277-288.
- [4] 张新春, 刘颖, 张建辉. 金属蜂窝材料的面内冲击响应和能量吸收特性 [J]. 功能材料, 2013, 44 (15): 2143-2147.
Zhang X C, Liu Y, Zhang J H. In-plane crushing response and energy absorption characteristics of metal honeycombs [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44 (15): 2143-2147.
- [5] 崔世堂, 王波, 张科. 负泊松比蜂窝面内动态压缩行为与吸能特性研究 [J]. 应用力学学报, 2017, 34 (5): 919-924.
Cui S T, Wang B, Zhang K. Study on dynamic compression behavior and energy absorption characteristics of honeycomb with negative Poisson's ratio [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34 (5): 919-924.
- [6] 卢子兴, 李康. 负泊松比蜂窝动态压溃行为的有限元模拟 [J]. 机械强度, 2016, (6): 1237-1242.
Lu Z X, Li K. Finite element simulation of dynamic collapse behavior of honeycomb with negative Poisson's ratio [J]. Mechanical Strength, 2016, (6): 1237-1242.
- [7] 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, (5): 905-910.
Hou X H, Yin G S. Analysis of impact resistance of honeycomb with negative Poisson's ratio [J]. Mechanical Strength, 2016, (5): 905-910.
- [8] 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.
- [9] Love A E H. A treatise on the mathematical theory of elasticity [J]. Bulletin of the American Mathematical Society, 1909, 34 (2): 242-243.
- [10] Gibson L J, Ashby M F, Schajer G S, et al. The mechanics of two-dimensional cellular materials [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1982, 382 (1782): 25-42.
- [11] Lakes R. Advances in negative Poisson's ratio materials [J]. Advanced Materials, 2010, 5 (4): 293-296.
- [12] Wan H, Ohtaki H, Kotoska S, et al. A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model [J]. European Journal of Mechanics/A Solids, 2003, 23 (1): 95-106.
- [13] Choi J B, Lakes R S. Analysis of elastic modulus of conventional foams and of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1995, 37 (1): 51-59.
- [14] 韩会龙, 张新春. 星形节点周期性蜂窝结构的面内动力学响应特性研究 [J]. 振动与冲击, 2017, (23): 223-231.
Han H L, Zhang X C. Research on in-plane dynamic response characteristics of star-shaped node periodic honeycomb structure [J]. Vibration and Shock, 2017, (23): 223-231.
- [15] Li D, Ma J, Dong L, et al. Stiff square structure with a negative Poisson's ratio [J]. Materials Letters, 2017, 188 (1): 149-151.
- [16] Fu M H, Liu F M, Hu L L. A novel category of 3D chiral material with negative Poisson's ratio [J]. Composites Science and Technology, 2018, 160 (26): 111-118.
- [17] Liu Z F, Hao W Q, Qin Q H. Buckling and energy absorption of novel pre-folded tubes under axial impacts [J]. Applied Physics A Materials Science & Processing, 2017, 123 (5).
- [18] 邓小林, 刘旺玉. 一种负泊松比正弦曲线蜂窝结构的面内冲击动力学分析 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (13): 103-109, 154.
Deng X L, Liu W Y. A brief analysis of in-plane shock dynamics of a negative Poisson's ratio sinusoidal honeycomb structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36 (13): 103-109, 154.
- [19] 马芳武, 梁鸿宇, 赵颖, 等. 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, 2019, (17): 81-87.
Ma F W, Liang H Y, Zhao Y, et al. In-plane shock dynamics performance of concave triangular negative Poisson's ratio materials [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, (17): 81-87.
- [20] Carta G, Brun M, Baldi A. Design of a porous material with isotropic negative Poisson's ratio [J]. Mechanics of Materials, 2016, 97: 67-75.
- [21] 马芳武, 梁鸿宇, 赵颖, 等. 内凹三角形负泊松比结构耐撞性多目标优化设计 [J]. 吉林大学学报, 2020, 50 (1): 29-35.
Ma F W, Liang H Y, Zhao Y, et al. Multi-objective optimization design for crashworthiness of concave triangular structures with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Jilin University, 2020, 50 (1): 29-35.
- [22] 吕亦乐. 负泊松比超材料的减振性能研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
Lyu Y L. Research on the Vibration Damping Performance of Negative Poisson's Ratio Metamaterials [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [23] 任晨辉, 杨德庆. 二维负刚度负泊松比超材料及其力学性能 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41 (8): 1129-1135.
Ren C H, Yang D Q. Two-dimensional negative stiffness and negative Poisson's ratio metamaterial and its mechanical properties [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41 (8): 1129-1135.