

缓冲与隔振

矩形与 X 形组合蜂窝异面缓冲性能的研究

王森¹, 宋正美², 许亚利³, 焦思涵¹, 郭冯琳¹, 孙德强¹

(1. 陕西科技大学 a. 中国轻工业功能印刷与运输包装重点实验室

b. 轻化工程国家级实验教学示范中心 c. 3S 包装新科技研究所, 西安 710021;

2. 湖北强大包装实业有限公司, 湖北 黄冈 438000; 3. 西安国际港务区新农小学, 西安 710026)

摘要: **目的** 为了研究矩形与 X 形组合蜂窝材料在异面冲击载荷下的缓冲吸能特性, 建立矩形与 X 形组合蜂窝的有限元模型, 分析在不同冲击条件下组合蜂窝结构的能量吸收、动态平台应力及其变形模式。

方法 借助 ANSYS/LS-DYNA 软件建立可靠的基于单元阵列的异面缓冲性能有限元分析模型, 基于该模型在不同结构参数和冲击速度下进行异面动态冲击仿真分析, 将结果以图表等形式进行展示。**结果** 组合蜂窝结构的异面缓冲性能较矩形、X 形蜂窝结构更为优异。当相对密度一定时, 随着扩展角的增大, 组合蜂窝结构的缓冲性能会有一定提升。扩展角为 90° 的组合蜂窝结构与扩展角为 70°、50° 和 30° 的组合蜂窝相比, 其单位体积能量吸收值分别提高了 3.77%、4.53% 和 26.95%。异面动态平台应力与冲击速度和结构参数之间, 可用某一确定的曲线关系进行拟合。**结论** 矩形与 X 形蜂窝之间会产生较强的耦合效应, 使组合蜂窝结构的接触载荷和总能量吸收值均大于两者之和; 冲击速度对变形模式的影响较大, 在冲击载荷下存在 3 种变形模式, 但壁厚的改变对变形模式并未产生明显影响。当扩展角和冲击速度一定时, 组合蜂窝异面动态平台应力与壁厚边长比呈二次曲线关系; 给定扩展角和壁厚时, 异面动态平台应力与冲击速度呈一次曲线关系。

关键词: 矩形与 X 形组合蜂窝; 有限元分析; 异面缓冲性能; 动态平台应力

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)17-0072-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.010

Cushioning Performance of Rectangular and X-shaped Combined Honeycomb

WANG Miao¹, SONG Zheng-mei², XU Ya-li³, JIAO Si-han¹, GUO Feng-lin¹, SUN De-qiang¹

(1a. Key Lab of Functional Printing and Transport Packaging of China National Light Industry b. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education c. 3S Research Institute of Novel Packaging Science and Technology, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. Hubei Qiangda Packaging Industry Co., Ltd., Huanggang 438000, China; 3. Xinnong Primary School of Xi'an International Trade and Logistics Park, Xi'an 710026, China)

ABSTRACT: The work aims to establish a corresponding finite element model to study the ability of out-of-plane cushioning energy absorption of the rectangular and X-shaped combined honeycomb and analyze the energy absorption, dynamic plateau stress and deformation mode of combined honeycomb under different impact conditions. A reliable finite

收稿日期: 2022-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575327); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS014); 陕西省教育厅陕西本科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16号)

作者简介: 王森(1996—), 女, 硕士生, 主攻缓冲包装材料性能。

通信作者: 孙德强(1976—), 男, 博士, 教授、博导, 主要研究方向为轻质绿色智能共享循环可持续性包装系统的结构、性能与设计。

element model was established based on the array of cells with ANSYS/LS-DYNA software. Then, on basis of this model, the simulation analysis of out-of-plane dynamic impact was carried out under different structural parameters and impact velocities, and the results were displayed in the form of charts. The out-of-plane cushioning performance of combined honeycomb was better than those of the rectangular and X-shaped honeycombs. When the relative density was fixed, the cushioning performance of the combined honeycomb became better with the increase of expanding angle. For the combined honeycomb with the expanding angle of 90° , the volume energy absorption value was increased by 3.77%, 4.53% and 26.95%, in comparison with those of 70° , 50° and 30° , respectively. Some curves could be used to fit the correlations of out-of-plane dynamic plateau stress with configuration parameters and impact velocity. There is a strong coupling effect between the rectangular and X-shaped honeycomb, and the values of contact load and total energy absorption are greater than the sum of both. The impact velocity has a great effect on the deformation modes of combined honeycomb, and three deformation modes are observed. However, the cell wall thickness has no obvious effect on the deformation mode. When the expanding angle and impact velocity are constant, the relationship between the out-of-plane dynamic plateau stress and the ratio of cell wall thickness to edge length of the combined honeycomb is shown as a quadratic curve. When the expanding angle and cell wall thickness are fixed, there is a linear relationship between the out-of-plane dynamic plateau stress and impact velocity.

KEY WORDS: rectangular and X-shaped combined honeycomb; finite element analysis; out-of-plane cushioning performance; dynamic plateau stress

与其他夹层结构相比,蜂窝结构是一种薄壁多孔结构,具有较高的比强度、比刚度和较好的隔音、隔振、耐冲击等优点^[1],在航空、航天、航海、包装、建筑、交通等领域得到广泛的应用。为了更好地研究蜂窝结构的力学性能,尤其是其冲击力学性能,国内外众多学者进行了大量的研究工作,并开发理论模型来预测其各冲击力学性能参数,其中动态平台应力直接反应了其受到冲击载荷时的能量吸收能力。

蜂窝结构的研究重点主要有 2 个方面,第 1 个方面是对传统经典蜂窝结构进行研究,如圆形、方形、六边形、三角形等^[1-4];第 2 个方面是通过对经典蜂窝结构进行再优化设计,以形成新型蜂窝结构。Qi 等^[5]提出新型蜂窝结构的 3 种设计策略:即梯度策略、增强策略和混杂策略。梯度策略是通过在经典蜂窝的基础上引入梯度的概念,使其结构参数按一定规律变化从而形成功能梯度蜂窝结构^[6-7];增强策略即通过人工改变蜂窝结构接头的拓扑形状或对其添加一些加强支柱,以提高蜂窝结构的力学性能^[8-10];混杂设计即将现有不同构型的蜂窝胞元结构连接起来形成新型蜂窝结构^[11-13],这类新型蜂窝结构在保持原有蜂窝特性的基础上可能会实现更多的经典结构无法实现的新功能。Hao 等、Xiang 等和 Hu 等^[8-10]通过有限元仿真研究了多种增强蜂窝结构的异面力学行为以及能量吸收特性,并推导出了相关的平均平台力的计算公式。He 等^[14]通过数值模拟的方法研究异面冲击载荷下,3 种新型蜂窝结构相关力学性能,并基于简化后的超折叠单元理论推导出了 2 种新型蜂窝结构异面动态平台应力的本构方程。上述研究表明构型和结构参数对蜂窝缓冲性能有着重要影响,另外对蜂窝结构进行填充也可以明显提高其缓冲性能,填充材料主要有金

属泡沫^[15-16]、聚合物^[17-18]以及蜂窝结构^[11-13]等(蜂窝结构间的相互填充就是蜂窝结构混杂设计策略)。Liu 等^[17]以填充聚丙烯泡沫的蜂窝铝板为研究对象,对其进行异面静态压缩试验,以探究 EPP 泡沫填充对蜂窝板力学性能的影响;研究表明异面压缩载荷下随着泡沫填充的增加,填充型蜂窝结构的总能量吸收、平台应力以及初始峰应力值有所提高,但比吸能并未增加;共面压缩载荷下总吸能和比能量吸收有明显的改善。李志斌等、徐雅晨等、Zhang 等和 Li 等^[15-16, 19-20]采用试验和有限元结合的方法,探究了在轴向和斜向载荷下填充泡沫铝的单管蜂窝结构的坍塌模式和能量吸收特性,并分析了泡沫铝与空方管耦合作用对整体结构平均平台力的影响,同时提出了能量吸收效率因子的概念。Hussein 等^[21]对不同结构的方形铝管进行了轴向准静态压缩试验,研究了蜂窝芯、聚氨酯泡沫以及聚氨酯泡沫-蜂窝复合材料的填充对方形铝管轴向挤压性能的影响;结果表明填充聚氨酯泡沫-蜂窝复合材料的方形铝管耐撞性最优。张勇等^[12]以填充不同胞元结构蜂窝的薄壁管为研究对象,采用参数分析法探究了不同壁厚和撞击速度下填充结构的动态力学性能。安兴等^[11]通过数值模拟与理论结合的方法探究了正多边形填充圆形蜂窝在异面动态压缩情况下的力学行为,对比分析了不同压缩速度、结构参数以及填充方式对新型蜂窝结构变形模式、吸能特性等的影响规律。Peng 等^[13]以嵌入菱形蜂窝的正凹六边形为研究对象,分析了该结构在共面单轴压缩情况下的弹性行为;研究表明由于局部屈曲,新型蜂窝结构的应力-应变和横向应变-纵向应变曲线具有双线性弹性特征。

根据上述分析可知,构型和填充方式严重影响着蜂窝结构的缓冲性能。结合 Qi 等^[5]提出的新型蜂窝

结构设计策略,该课题将以常见基本构型中的矩形与X形蜂窝结构为例,将X形蜂窝填入矩形结构中形成新型蜂窝结构。通过数值模拟的方法研究此新型蜂窝在不同速度和结构参数下冲击力学性能的变化规律。

1 不同蜂窝结构的计算模型

1.1 有限元模型

基于蜂窝阵列结构的异面冲击有限元模型见图1,基于此来研究矩形、X形及其组合蜂窝结构的异面缓冲性能。其中,蜂窝样品位于两刚性板之间,支撑板P2所有自由度均被固定;上压板P1以恒定速度 v 向下冲击蜂窝样品,直到将其压至密实化状态。不同构型的蜂窝结构及其特征单元结构参数见图2,其中图2a—c分别为矩形与X形组合蜂窝、矩形蜂窝和X形蜂窝,图2d—f为其对应的特征单元结构。图2f中 l 为X形蜂窝的边长即组合蜂窝对角线长度,简称对角线长 l 。所有蜂窝单元壁厚均匀为 t , h 为蜂窝结构的孔深, α 为X形蜂窝的扩展角。模型中所有样品的基材,均选用应变率不敏感的各向同性线性硬化材料,典型材料是某铝合金,其具体参数见表1。所有蜂窝壁面均使用5个积分点的Belystchko-Tsay壳单元shell163进行网格划分,整个模型定义为自动单面接触,蜂窝样品与上下刚性板之间定义为自动面面接触。静摩擦因数定为0.2,动摩擦因数定为0.15。

1.2 可靠性验证

Chen等^[22]提出了使用超折叠单元理论,对薄壁方管结构进行轴向渐进挤压的解析分析,并提出平均平台力的理论公式为:

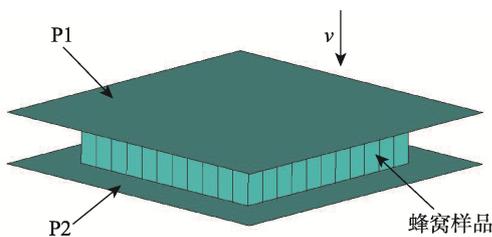


图1 蜂窝阵列结构异面冲击有限元模型
Fig.1 Finite element model of honeycomb array structure under out-of-plane impact

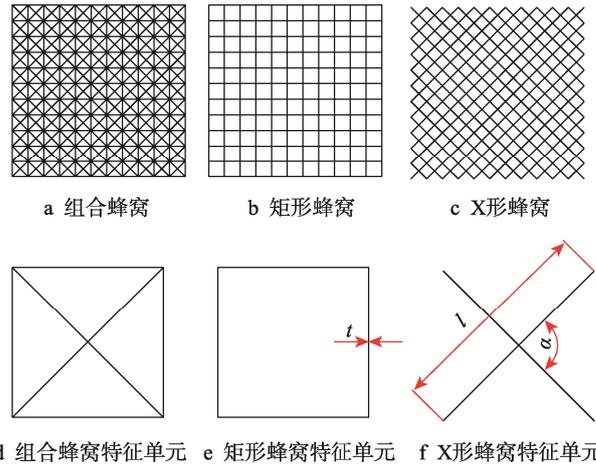


图2 矩形、X形及其组合蜂窝与它们的特征单元结构
Fig.2 Rectangular, X-shaped and combined honeycombs and their representative cell

$$P_m = 13.06\sigma_0 t^{\frac{5}{3}} c^{\frac{1}{3}} \tag{1}$$

式中: P_m 为薄壁方管结构的平均平台力; t 为薄壁方管胞元结构的壁厚; c 为胞元结构的边长; σ_0 指基材的塑性流动应力,具体计算方式为 $\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sigma_y \times \sigma_u}{1+n}}$,其中 σ_y 和 σ_u 分别为基材的屈服应力和极限应力, n 为幂律指数。

为了验证有限元模型的可靠性,方形蜂窝结构试样材料选用与He等^[14]相同的铝材做蜂窝芯层。方形蜂窝样品尺寸为44 mm×44 mm×10 mm,其屈服应力 $\sigma_y=80$ MPa,极限应力 $\sigma_u=173$ MPa,幂律指数 $n=0.23$,从而可得 $\sigma_0=106$ MPa。将基于式(1)所得的平均平台力 P_m 的理论值,与轴向准静态载荷情况下有限元仿真值进行对比,其结果绘于图3,具体数据列于表2。对这些数据进行分析可知,理论结果与仿真值之间最大相对误差为8.39%,说明两者之间具有较高的一致性,说明了文中所采用有限元模型的可靠性。

1.3 缓冲性能评价指标

常用以下几个关键指标来评价蜂窝结构的缓冲吸能特性^[8-11,23],如动态平台应力(σ_m)、总吸能(E_A)、比吸能(S_{EA})以及冲击载荷效率(C_{LE})等。

表1 蜂窝基材材料的参数
Tab.1 Parameters of honeycomb base material

材料名称	弹性模量 E /GPa	屈服应力 σ_y /MPa	正切模量 E_t /MPa	泊松比 μ	密度 ρ / (kg·m ⁻³)
铝合金	68.97	292	689.7	0.35	2 700
刚体	200	—	—	0.3	7 800

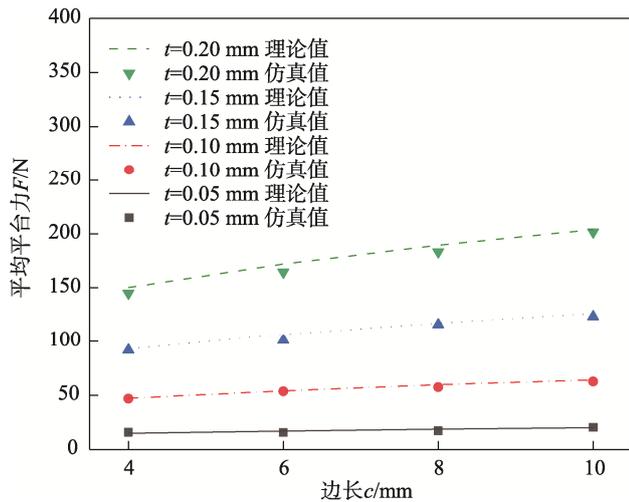


图 3 正方形蜂窝不同边长不同壁厚下平均平台力
Fig.3 Average plateau stress of square honeycomb with different edge lengths and cell wall thicknesses

表 2 正方形蜂窝不同边长不同壁厚下平均平台力
Tab.2 Average plateau stress of square honeycomb with different edge lengths and cell wall thicknesses

壁厚/mm	边长/mm	理论值	仿真值	相对误差/%
0.05	4	15.79	14.91	5.90
	6	15.64	17.04	8.39
	8	17.11	18.09	5.39
	10	20.35	20.24	0.57
0.10	4	46.89	47.35	0.97
	6	53.64	54.20	1.03
	8	57.45	59.65	3.68
	10	62.65	64.26	2.50
0.15	4	91.845	93.06	1.31
	6	100.96	106.53	5.23
	8	115.90	117.25	1.15
	10	123.27	126.30	2.40
0.20	4	145.18	150.31	3.41
	6	164.57	172.06	4.35
	8	183.35	189.38	3.18
	10	201.74	204.00	1.11

设上压板 P1 与蜂窝试样之间的冲击力为 F , 位移为 u , 试样在冲击方向的等效横截面积和初始高度分别为 A 和 h , 应力 σ 与应变 ε 计算公式分别为:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \varepsilon = \frac{u}{h} \quad (2)$$

在动态冲击条件下, 平台阶段的应力平均值被称为动态平台应力 $\sigma_m^{[11]}$, 它是衡量不同结构之间吸能特性的一个重要指标, 其计算公式为:

$$\sigma_m = \frac{1}{\varepsilon_D - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (3)$$

其中, ε_0 、 ε_D 分别为初始应变和密实化应变。 ε_D 可通过能量吸收效率法^[23]来确定, 即能量吸收效率取得最大值时所对应的应变。

蜂窝样品的 $E_A^{[8-10]}$ 表示吸收总冲击能量的能力, 可通过对力-位移曲线进行积分来确定, 定义为:

$$E_A = \int_0^{u_D} F du \quad (4)$$

式中: u_D 为密实化位移, 即密实化应变 ε_D 对应的位移值, F 为冲击过程中对应的冲击力。

比吸能^[8-10]是指材料在压缩至密实化时, 结构单位质量所吸收的能量, 是比较不同结构吸能能力的一个关键参数, 也是能量吸收元件设计中一个重要指标。所以可通过总比吸能 E_A 与蜂窝样品质量 m 的比值来确定, 定义如下:

$$S_{EA} = \frac{\int_0^{u_D} F du}{m} \quad (5)$$

冲击载荷效率^[8-10, 24]可用来表示力-位移曲线的一致性, C_{LE} 越高, 结构冲击力效率越高。可通过平均平台力 P_m 与初始峰力 P_{max} 的比值确定, 定义如下:

$$C_{LE} = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (6)$$

2 结果与讨论

2.1 耦合效应分析

如前所述, X 形蜂窝填充矩形蜂窝而成的组合蜂窝结构, 是一种复合蜂窝, 其承载能力和能量吸收能力受两种蜂窝结构之间的耦合效应的影响。将组合蜂窝结构的对角线长设为 $l = 4\sqrt{2}$ mm, 扩展角设为 $\alpha = 90^\circ$ (样品尺寸为 44 mm×44 mm×10 mm), 探究 $v = 20$ m/s 时的冲击力学性能。

矩形蜂窝、X 形蜂窝及组合蜂窝结构在单独受载时的力-位移曲线, 如图 4 所示。3 种蜂窝结构在冲击过程中均具有稳定渐进的形变过程, 在大约 0.2 mm 位移处, 3 种蜂窝结构均到达初始峰值力处, 然后迅速下降到一个较低水平处, 再进入相对比较稳定的平台阶段, 之后压至密实化状态。由图 4 可知, 组合蜂窝结构的曲线位于最上方, 平均平台力大于单独的矩形结构、X 形结构, 也大于矩形与 X 形两者所受载荷之和, 这是矩形与 X 形蜂窝结构管壁相互作用的结果, 所以矩形与 X 形蜂窝结构的组合具有较强的耦合效应。在同一冲击条件下 3 种蜂窝结构的总能量吸收-位移曲线见图 5, 从上至下依次为组合蜂窝总吸能、矩形蜂窝与 X 形蜂窝二者能量吸收值之和、X 形蜂窝总吸能以及矩形蜂窝总吸能。显然, 组合蜂窝结构吸收的能量大于矩形与 X 形蜂窝二者能量吸收之和, 上述结果进一步证明矩形蜂窝与 X 形蜂窝结构之间具有较强的耦合效应。

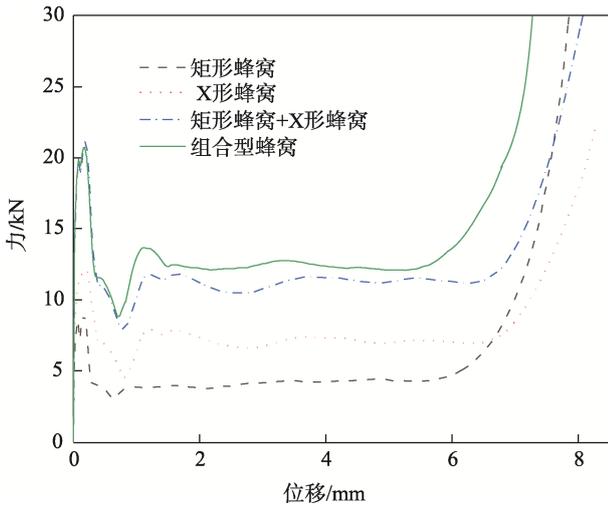


图4 不同结构的单元阵列力-位移曲线
Fig.4 Stress-displacement curves of cell arrays with different structures

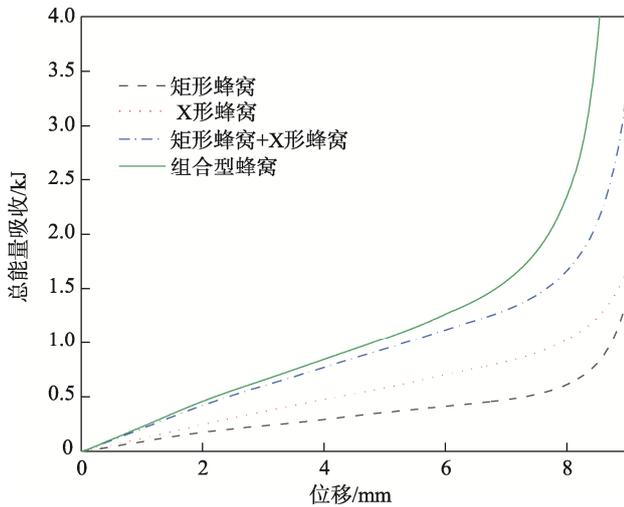


图5 不同结构的单元阵列总能量吸收-位移曲线
Fig.5 Total energy absorption-displacement curves of cell arrays with different structures

为了更好地定量比较矩形、X形及其组合蜂窝结构的能量吸收特性，仿真的数值结果见表3。根据表3可知，组合蜂窝结构的比吸能较矩形与X形蜂

窝结构分别增加了112.33%和37.34%，且三者的冲击载荷效率依次为46.44%、62.73%和67.15%。很明显，组合蜂窝结构具有更高的冲击载荷效率，其能量吸收效果优于其他2种结构。组合蜂窝结构是由X形蜂窝填充矩形蜂窝所得，冲击过程中模型会发生渐进的屈曲折叠，孔壁之间会产生相互挤压的现象，使得折叠次数变多，折叠波长变短，从而导致更多的能量吸收。

2.2 变形模式

2.2.1 不同构型蜂窝变形模式

如图6所示，从左到右分别为同一壁厚下尺寸为44 mm×44 mm×10 mm(扩展角 $\alpha=90^\circ$)的矩形、X形及其组合型蜂窝阵列结构的最终变形模式。显然，在矩形结构压至密实化状态之后，蜂窝孔壁之间并未完全接触；X形结构孔壁在坍塌之后存在更为明显的横向膨胀扩散效果；同时针对组合型蜂窝结构，根据最终变形模式图可知，外部的矩形结构与其填充的X形结构之间存在一定约束效果，冲击过程中两结构间孔壁的相互作用使得挤压更加充分，从而吸收更多能量。上述分析进一步验证了图4、图5所示结果的可靠性。

2.2.2 组合蜂窝变形模式

在冲击载荷条件下，蜂窝结构的坍塌变形模式对其承载能力和能量吸能特性具有重要影响^[17]。本节主要研究尺寸为44 mm×44 mm×10 mm(扩展角 $\alpha=90^\circ$)的组合蜂窝结构在不同壁厚和冲击速度下的变形模式。根据仿真结果可知，变形模式主要有以下3种(以 $\varepsilon=0.2$ 、 $t=0.05$ mm的组合蜂窝结构变形模式为例)，见图7。当 $v=3$ m/s时，蜂窝结构首先在靠近上压板处发生微小局部变形，之后靠近下支撑处开始产生较大的局部变形，最后自下而上逐步渐进折叠直至压实(AS)；当 $v=50$ m/s时，蜂窝体首先在靠近上压板处产生褶皱，再自上而下依次渐进折叠直到完全压实(BS)；当 $v=200$ m/s时，蜂窝体在靠近上压板与下支撑端处同时产生褶皱变形，再一起向中部渐进折叠直至蜂窝结构完全密实(DS)。

表3 不同蜂窝结构能量吸收特性数值模拟结果

Tab.3 Numerical simulation results of energy absorption characteristics of different honeycomb structures

蜂窝类型	初始峰力/kN	平均平台力/kN	总吸能/kJ	质量/g	比吸能/(kJ·kg ⁻¹)	冲击载荷效率%
矩形蜂窝	9.17	4.26	0.5	5.23	95.22	46.44
X形蜂窝	12.59	7.9	0.54	3.70	147.21	62.73
组合蜂窝	21.23	14.26	1.8	8.92	202.18	67.15

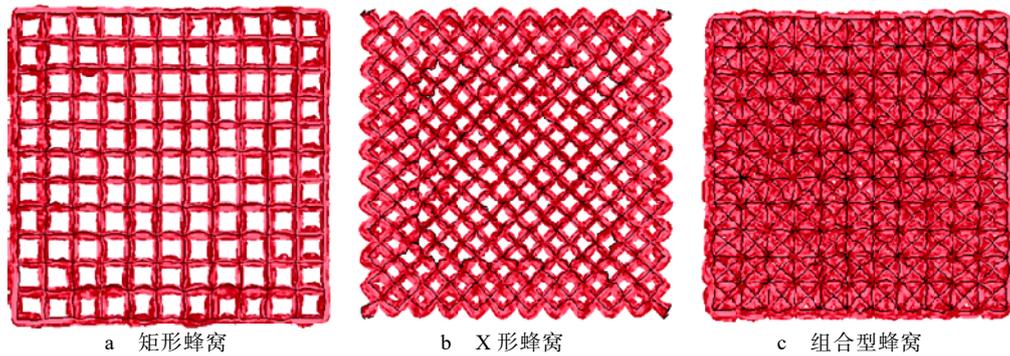


图 6 不同构型蜂窝结构最终变形模式

Fig.6 Final deformation modes of honeycomb structures with different configurations

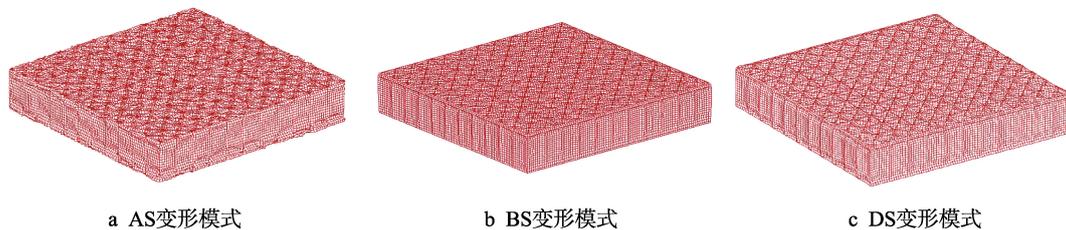


图 7 组合蜂窝结构的变形模式

Fig.7 Deformation modes of combined honeycomb structure

表 4 列出了不同冲击速度和壁厚下组合蜂窝结构的变形模式。显然, 随着冲击速度的提高, 变形模式会从 AS 到 BS 再到 DS 依次发生转变; 但在同一速度下, 壁厚的改变对变形模式几乎没有影响。上述规律也与安兴^[11]、张勇等^[12]的研究结果呈现出高度的一致性。

表 4 不同冲击速度和壁厚下组合蜂窝结构的变形模式
Tab.4 Deformation mode of combined honeycomb structures under different impact velocity and cell wall thickness

壁厚/mm	速度/(m·s ⁻¹)					
	3	20	50	125	175	200
0.05	AS	BS	BS	DS	DS	DS
0.1	AS	BS	BS	DS	DS	DS
0.3	AS	BS	BS	DS	DS	DS

3 种不同变形模式下的组合蜂窝结构 (以 t 为 0.05 mm, 冲击速度 v 为 3、50 和 200 m/s 的模型为例) 动态平台应力与密实化总能量吸收, 见表 5。当变形模式为 DS 时, 与 AS 模式相比, 动态平台应力和总吸能分别提高了 57.90% 和 75.91%; 同理 DS 模式与 BS 模式比较, 两者分别提高了 28.42% 和 58.76%。综合表 4 和 5 可知, 冲击速度的提高使得组合蜂窝结构管壁之间相互挤压更加充分, 惯性效应的增强而产生更强的屈曲折叠。所以当组合蜂窝结构的变形模式从 AS、BS 依次转变为 DS 时, 其动态平台应力和总吸能会产生一定提高。

表 5 不同变形模式下组合蜂窝结构的 σ_m 和 E_A
Tab.5 Values of σ_m and E_A for combined honeycomb structures under different deformation modes

变形模式	σ_m /MPa	E_A /J
AS	15.10	200.75
BS	18.57	222.44
DS	23.85	353.15

2.3 组合蜂窝结构参数及压缩速度对其异面动态平台应力的影响

相对密度是蜂窝结构的一个重要特征, 其定义为蜂窝结构密度 ρ^* 与基材密度 ρ_s 之间的比值。参考 Yang 等^[24] 相对密度的推导过程, 可得到不同角度组合蜂窝结构的相对密度公式为:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2 \times (a + b + l) \times t}{a \times b} \times \frac{t}{\cos \frac{\alpha}{2} \times \sin \frac{\alpha}{2}} \times \frac{1}{l} \quad (7)$$

式中: a 和 b 分别为组合蜂窝结构的长和宽, $a = l \times \cos \frac{\alpha}{2}$, $b = l \times \sin \frac{\alpha}{2}$; l 、 α 分别为 X 形蜂窝结构的对角线长度和扩展角。

2.3.1 扩展角

已有研究表明,在棱柱结构的拐角处会发生剧烈的变形,大部分能量通过沿弯曲铰链线的薄膜变形和弯曲变形消耗,因此,柱截面上“角元素”的数量在很大程度上决定了能量吸收效率^[25]。为了更详细研究扩展角变化对组合蜂窝结构缓冲性能的影响,在相对密度(ρ^*/ρ_s 为0.12)和速度(v 为3、125、200 m/s)一定的条件下,对不同扩展角的组合蜂窝结构进行仿真分析,得到如图8a、b和c所示的低速、中速和高速下的应力-应变曲线,对图8中曲线进行积分可得到蜂窝样品单位体积能量吸收,具体数值见表6。

表6 不同角度不同速度组合蜂窝结构单位体积能量吸收
Tab.6 Energy absorption per unit volume of combined honeycomb structures under different expanding angles and velocity

$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	角度 $\alpha / (^\circ)$	单位体积能量吸收/J
3	30	290
	90	397
	110	382
	130	379
125	30	494
	90	807
	130	697
200	30	703
	90	1143
	110	1071
	130	919

根据图8可知,随着冲击速度的增加,初始峰应力值几乎成倍增加。速度的增加会引起惯性效应,蜂窝结构初始峰应力值对惯性效应比较敏感从而会产生相应提高。在矩形与X形组合蜂窝结构中,X形蜂窝扩展角为110°和130°时与其扩展角为70°和50°时,蜂窝样品受力的等效截面积一致。结合图8和表6可知,当 $v=3$ m/s时,扩展角为90°的组合蜂窝结构与110°、130°、30°的组合蜂窝结构相比,其单位体积能量吸收值分别提高了3.77%、4.53%和26.95%,同理,当 v 为125、200 m/s时,其单位体积能量吸收变化规律同 $v=3$ m/s一致。综上所述,扩展角为90°的组合蜂窝结构具备更优的缓冲吸能特性(90°>70°(110°)>50°(130°)>30°)。

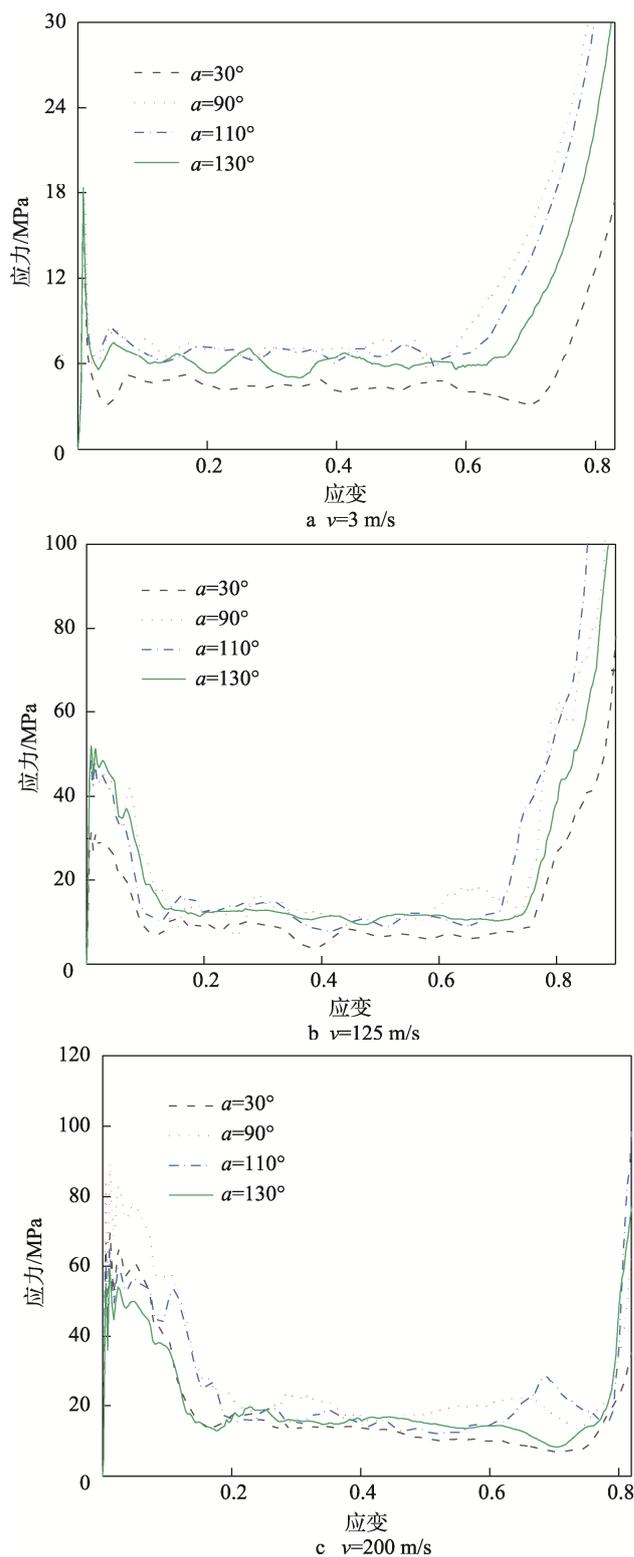


图8 一定速度下不同扩展角组合蜂窝结构应力-应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves of combined honeycomb structures with different expanding angles at a certain velocity

2.3.2 壁厚边长比

根据2.3.1节可知,随着扩展角的增大,组合型蜂窝结构缓冲吸能特性会有所提高,扩展角为90°组合型的蜂窝结构具备更为优异的缓冲吸能特性。所以

本节以 $\alpha=90^\circ$ 、 $l=4\sqrt{2}$ mm 的组合型蜂窝结构为例(当 $\alpha=90^\circ$ 时, 组合型蜂窝结构边长为 $a=b=l\sin 45^\circ$), 对其进行仿真分析, 数值模拟结果如表 7 所示。显然, 随着冲击速度和壁厚边长比的增大, 仿真所得的动态平台应力值都是递增的; 当壁厚边长比小于等于 0.04 时, 动态平台应力增长的幅度较小。基于最小二乘法对数值分析结果进行拟合, 可以得到动态平台应力与壁厚边长比关系见图 9a。在保持除 t/l 和 v 之外的其他结构参数不变时, 动态平台应力与组合型蜂窝结构的壁厚边长比呈二次函数关系, 在异面冲击载荷下, 可用如下经验公式对曲线进行拟合:

$$\sigma_m = A + Bx + Cx^2 \quad (8)$$

式中: x 指壁厚边长比; A 、 B 和 C 为关系指数, 由蜂窝的材料、结构参数等共同决定。

2.3.3 速度

图 9b 是 $\alpha=90^\circ$ 、 $l=4\sqrt{2}$ mm 的组合型蜂窝结构在不同壁厚下, 动态平台应力与冲击速度曲线关系。从图 9b 可以看出, 随着冲击速度的增加, 动态平台应力是逐渐递增的。当壁厚 $t=0.3$ mm 时, 曲线的斜率大于壁厚为 0.05 mm 时的斜率, 即壁厚越大, 动态平台应力随速度改变会发生较快增长; 相反, 在壁厚较小时, 速度的改变对动态平台应力值的影响较小。当保持除 v 之外的其他结构参数不变时, 基于最小二乘法对仿真结果进行拟合可知, 动态平台应力与速度呈一次函数关系, 可用经验公式 (9) 进行拟合。

$$\sigma_m = D + Ex \quad (9)$$

式中: x 为速度; D 和 E 为关系指数, 由蜂窝的材料、结构参数等共同决定。

表 7 不同壁厚边长比的组合型蜂窝 ($\alpha=90^\circ$) 在不同冲击速度下的动态平台应力值

Tab.7 Dynamic plateau stress values of combined honeycomb with different wall thickness and edge length ratios ($\alpha=90^\circ$) at different impact velocity

壁厚边长比	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$							
	3	20	50	100	125	150	175	200
0.012 5	6.101 83	7.892 28	8.907 00	13.676 49	15.568 10	18.596 01	21.211 89	23.845 6
0.025 0	17.767 54	21.988 06	28.422 96	36.959 88	40.701 69	48.619 84	54.999 02	60.518 18
0.375 0	31.765 15	36.118 56	42.497 97	64.891 05	72.383 56	84.184 94	97.874 53	115.549 7
0.050 0	60.093 12	61.500 12	71.703 52	99.801 75	116.194	135.648 9	153.320 4	176.870 3
0.062 5	83.124 05	112.428 1	138.433 3	162.741 6	203.18	222.808 6	243.073 8	319.630 6
0.075 0	137.294 3	142.612 9	172.826 1	280.786 5	300.053 3	339.222 1	370.118 7	—

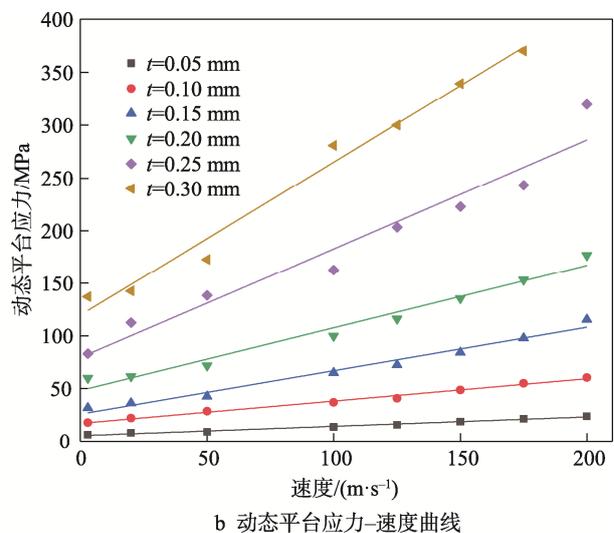
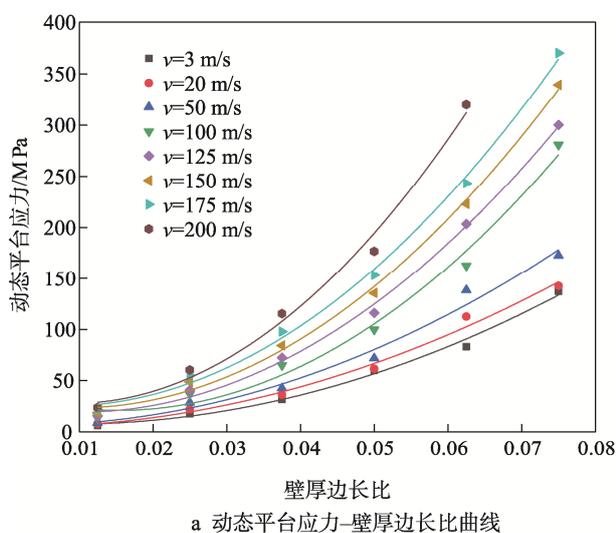


图 9 壁厚边长比和速度与动态平台应力关系

Fig.9 Relationship between the ratio of wall thickness to edge length and velocity and dynamic plateau stress

3 结语

文中研究了矩形、X形及其组合蜂窝结构的异面缓冲性能,通过分析得出结论如下。

1) 矩形与X形组合蜂窝之间存在耦合效应,这种耦合效应使得组合蜂窝结构的缓冲性能有很大提升。

2) 在同一冲击速度下,壁厚的增加对组合蜂窝变形模式影响较小,但冲击速度的提高对变形模式有明显影响。不同冲击速度下主要存在3种变形模式:低速时变形主要集中在支撑端;中速时变形最开始发生在冲击端,再自上而下渐进折叠;高速时变形从冲击端和支撑端同时开始向中间进行。

3) 组合蜂窝结构中,当相对密度($\rho^*/\rho_s=0.12$)和速度(v 为3、125和200 m/s)一定时,随着扩展角的增大,其缓冲吸能特性会有所提高。扩展角为90°的蜂窝结构与110°(70°)、130°(50°)和30°的结构相比,单位体积能量吸收值分别提高了3.77%、4.53%和26.95%,具备更优的缓冲吸能特性。

4) 依据最小二乘法拟合可得到组合蜂窝结构不同结构参数和冲击速度与动态平台应力之间的曲线关系,为该类型材料模型的研究提供了理论铺垫。

参考文献:

- [1] HU L L, HE X L, WU G P, et al. Dynamic Crushing of the Circular-Celled Honeycombs under Out-of-Plane Impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 75: 150-161.
- [2] 冯俊华. 正方形金属蜂窝共面力学性能的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009: 21-30.
FENG Jun-hua. Study on Coplanar Mechanical Properties of Square Metal Honeycomb[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009: 21-30.
- [3] 荣吉利, 朱宇博, 宋乾强, 等. 异面压缩下六边形铝蜂窝平均塑性坍塌应力研究[J]. *宇航学报*, 2018, 39(3): 257-263.
RONG Ji-li, ZHU Yu-bo, SONG Qian-qiang, et al. Research on the Mean Plastic Crushing Stress of Hexagonal Aluminum Honeycombs under Out-of-Plane Compression[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(3): 257-263.
- [4] TRAN T, HOU Shu-juan, HAN Xu, et al. Theoretical Prediction and Crashworthiness Optimization of Multi-Cell Triangular Tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 82: 183-195.
- [5] CHANG Qi, FENG Jiang, SHU Yang. Advanced Honeycomb Designs for Improving Mechanical Properties: A Review[J]. *Composites Part B*, 2021, 227: 1-20.
- [6] 乔及森, 李明, 苗红丽. 串联梯度蜂窝结构的面内力学性能[J]. *塑性工程学报*, 2021(11): 115-123.
QIAO Ji-sen, LI Ming, MIAO Hong-li. In-Plane Mechanical Property of Tandem Gradient Honeycomb Structures[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021(11): 115-123.
- [7] 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.
LI Zhen, DING Yang, WANG Tao, et al. In-Plane Crushing Behaviors of Honeycombs with a Novel Parallel Graded Design[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 155-163.
- [8] HAO Peng, DU Jian-xun. Energy Absorption Characteristics of Bio-Inspired Honeycomb Column Thin-Walled Structure under Impact Loading[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 79: 301-308.
- [9] XIANG Jin-wu, DU Jian-xun. Energy Absorption Characteristics of Bio-Inspired Honeycomb Structure under Axial Impact Loading[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 696: 283-289.
- [10] HU Da-yong, WANG Yong-zhen, SONG Bin, et al. Energy-Absorption Characteristics of a Bionic Honeycomb Tubular Nested Structure Inspired by Bamboo under Axial Crushing[J]. *Composites Part B*, 2019, 162: 21-32.
- [11] 安兴. 正多边形填充圆形组合蜂窝异面缓冲性能的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021: 25-56.
AN Xing. Study on Cushioning Performance of Irregular Polygon Filled Circular Composite Honeycomb[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021: 25-56.
- [12] 张勇, 蔡检明, 赖雄鸣. 异面撞击载荷下金属蜂窝填充薄壁结构的动态力学性能[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(1): 120-126.
ZHANG Yong, CAI Jian-ming, LAI Xiong-ming. Dynamic Mechanical Behavior of Metal Honeycomb-Filled Thin-Walled Structures Subjected to Out-of-Plane Impact Loading[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(1): 120-126.
- [13] PENG Chen-xi, TRAN P. Bioinspired Functionally Graded Gyroid Sandwich Panel Subjected to Impulsive Loadings[J]. *Composites Part B*, 2020, 188(7): 1-23.
- [14] HE Qiang, MA Da-wei, ZHANG Zhen-dong, et al. Mean Compressive Stress Constitutive Equation and Crashworthiness Optimization Design of Three Novel Honeycombs under Axial Compression[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 99: 274-287.

- [15] 李志斌, 虞吉林, 郑志军, 等. 薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(1): 77-86.
LI Zhi-bin, YU Ji-lin, ZHENG Zhi-jun, et al. An Experimental Study on the Crashworthiness of Thin-Walled Tubes and Their Metallic Foam-Filled Structures[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(1): 77-86.
- [16] 徐雅晨, 凤仪, 张春基, 等. 泡沫铝填充薄壁铝合金方管轴向压缩性能的数值模拟[J]. 功能材料, 2010, 41(S2): 214-217.
XU Ya-chen, FENG Yi, ZHANG Chun-ji, et al. The Study of Vertical Compressing Mechanical Properties of Thin-Walled Square Tubes Filled with Aluminum Foam[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(S2): 214-217.
- [17] LIU Qiang, FU Jie, WANG J S, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with Epp Foam[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 130 (12): 236-247.
- [18] 孙玉瑾, 孙德强, 谭一, 等. EPE 泡沫填充圆形纸蜂窝异面缓冲性能的试验研究[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 82-89.
SUN Yu-jin, SUN De-qiang, TAN Yi, et al. Experimental Study on the Out-of-Plane Cushioning Performance of Circular Paper Honeycomb Filled with EPE Foam[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 82-89.
- [19] ZHANG Chun-ji, FENG Yi, ZHANG Xue-bin. Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-Filled Square Tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8): 1380-1386.
- [20] LI Zhi-bin, YU Ji-lin, GUO Liu-wei. Deformation and Energy Absorption of Aluminum Foam-Filled Tubes Subjected to Oblique Loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 54(1): 48-56.
- [21] HUSSEIN R D, RUAN Dong, LU Guo-xing, et al. Crushing Response of Square Aluminium Tubes Filled with Polyurethane Foam and Aluminium Honeycomb[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 110: 140-154.
- [22] CHEN Wei-gang, WIERZBICKI T. Relative Merits of Single-Cell, Multi-Cell and Foam-Filled Thin-Walled Structures in Energy Absorption[J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39(4): 287-306.
- [23] 孙玉瑾, 孙德强, 安兴, 等. 圆形蜂窝的异面冲击性能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(5): 139-145.
SUN Yu-jin, SUN De-qiang, AN Xing, et al. Study on Out-of-Plane Impact Properties of Circular Honeycomb Cores[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2021, 39(5): 139-145.
- [24] YANG Xian-feng, XI Xu-long, PAN Qi-fan, et al. In-Plane Dynamic Crushing of a Novel Circular-Celled Honeycomb Nested with Petal-Shaped Mesostructure[J]. Composite Structures, 2019, 226: 12-19.
- [25] TANG Zhi-liang, LIU Shu-tian, ZHANG Zong-hua. Analysis of Energy Absorption Characteristics of Cylindrical Multi-Cell Columns[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 62: 75-84.

责任编辑: 曾钰婵