# 规则排列下凹五边形蜂窝阵列结构的异面缓冲性能研究

谭思可<sup>1,2,3</sup>,赵伟<sup>1,2,3</sup>,李莹欣<sup>1,2,3</sup>,刘迪<sup>1,2,3</sup>,苏亭亭<sup>1,2,3</sup>,李国志<sup>1,2,3\*</sup>,孙德强<sup>1,2,3</sup>

(1.陕西科技大学,西安 710021; 2.中国轻工业功能印刷与运输包装重点实验室,西安 710021;3.轻化工程国家级实验教学示范中心,西安 710021)

摘要:目的 研究主要结构参数对规则排列凹五边形蜂窝阵列结构异面缓冲性能的影响。方法 借助Ansys Workbench/LS-DYNA 软件建立该蜂窝结构异面缓冲性能的有限元模型进行仿真模拟,研究不同凹陷角、 壁厚边长比对其异面平台应力、变形模式和单位体积能量吸收的影响。结果 在不同的压缩速度下,凹 五边形蜂窝阵列结构表现出不同的变形模式。相对密度一定时,凹陷角度在 0<0<63.435°时,该结构 异面平台应力和单位体积吸收能量都随凹陷角的增大先增后减,且在 25°~35°时平台应力最大,20°~30° 时单位体积吸收能量最大;当达到最大凹陷角度 θ=63.435°时平台应力和单位体积吸收能量都出现再次 增大的现象。在凹陷角一定时,异面平台应力和单位体积吸收能随壁厚边长增大而增大,且呈指数函数 关系。结论 基于有限元计算结果,总结出了规则排列的凹五边形蜂窝阵列结构在不同速度下的变形模 式,以及凹陷角度、壁厚边长比对蜂窝异面平台应力、单位体积能量吸收的影响规律。 关键词:凹五边形蜂窝;异面;有限元分析;变形模式;平台应力;单位体积能量吸收 中图分类号:TB485.1 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)21-0078-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.010

# Out-of-plane Cushioning Performance of Regularly Arranged Concave Pentagonal Honeycomb Array Structures

*TAN Si-ke*<sup>1,2,3</sup>, *ZHAO Wei*<sup>1,2,3</sup>, *LI Ying-xin*<sup>1,2,3</sup>, *LIU Di*<sup>1,2,3</sup>, *SU Ting-ting*<sup>1,2,3</sup>, *LI Guo-zhi*<sup>1,2,3\*</sup>, *SUN De-qiang*<sup>1,2,3</sup>

(1. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. Key Lab of Functional Printing and Transport Packaging of China National Light Industry, Xi'an 710021, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effect of major structural parameters on the out-of-plane cushioning performance of regularly arranged concave pentagonal honeycomb array structures. A finite element model of the out-of-plane cushioning performance of the honeycomb structure was developed with the help of Ansys Workbench/ LS-DYNA software for simulation, and the effects of different depression angles, wall-thickness-side-length ratios on the stress, deformation mode, and energy absorption per unit volume of the out-of-plane plateau stress were investigated. The concave pentagonal honeycomb array structure exhibited different deformation mode at different compression velocities. When the relative density was certain and the depression angle was  $0 < \theta < 63.435^\circ$ , the out-of-plane plateau stress and energy absorption per unit volume of the structure decreased first and then increased with the increase of the depression angle, in which the plateau stress was the largest at the depression angle of  $25^\circ \sim 35^\circ$ , and the energy absorption per unit

收稿日期: 2023-08-02

**基金项目:**国家自然科学基金(515735327);陕西省教育厅重点实验室及基地项目(1616JS014) \*通信作者

volume was the largest at the depression angle of  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ , and the maximum depression angle of  $\theta$ =63.435° showed the phenomenon of increasing again in both plateau stress and energy absorption per unit volume. At a certain depression angle, the larger the wall-thickness-side-length ratio, the larger the out-of-plane plateau stress and energy absorption per unit volume of the structure, both of which showed exponential relations. Based on the finite element calculation results, the deformation mode of concave pentagonal honeycomb array structure at different velocities, as well as the effect law of the depression angle and wall-thickness-side-length ratio on the out-of-plane plateau stress of the concave pentagonal honeycomb, and the energy absorption per unit volume are summarized.

**KEY WORDS:** concave pentagonal honeycomb; out-of-plane; finite element analysis; deformation mode; plateau stress; energy absorption per unit volume

蜂窝材料因其轻量化、高强度、隔热、吸音和减 震等功能常应用于航空航天、汽车工业、建筑和包装 行业等<sup>[1-4]</sup>。实际工程中使用的夹芯孔穴形状有六边 形、三角形、方形、圆形、瓦楞形、Kagome 形以及 其他异形结构等。相关研究表明,蜂窝结构的胞元形 状、几何参数和阵列方式等对蜂窝材料的缓冲性能具 有显著影响<sup>[5-6]</sup>。

为了满足蜂窝材料在不同领域的应用需求,近年 来,国内外研究学者提出了众多新型蜂窝夹芯结构。 Deng 等<sup>[7]</sup>基于啄木鸟喙提出了一种仿生正弦蜂窝结 构,利用有限元分析了其抗冲击性。张晓楠等<sup>[8]</sup>提出 了一种变截面负泊松比内凹蜂窝结构,通过试验和有 限元仿真研究了其在不同冲击速度下的力学性能。魏 路路等<sup>[9]</sup>将内凹六边形与反手性蜂窝结合提出了一 种内凹反手性蜂窝结构,通过有限元仿真研究了不同 相对密度对其面内动态压溃性能的影响规律。Zhai 等<sup>[10]</sup>提出了一种各向同性的折叠蜂窝结构,利用仿真 和实验的方法分析了其 3 个方向上的平台应力。 Djemaoune 等<sup>[11]</sup>利用有限元仿真的方法对基材为 5052 型铝蜂窝的面内承载性能进行了模拟。孙玉瑾 等<sup>[12]</sup>利用仿真软件研究了不同冲击速度下,六边形蜂 窝壁厚边长比对其异面缓冲性能的影响。王勇等<sup>[13]</sup> 借助有限元分析的方法研究了 2 种不同排列方式的折 边式蜂窝夹套的力学强度和疲劳寿命。Naritomi 等<sup>[14]</sup> 提出了一种自折叠蜂窝结构,在没有人工干预的情况 下实现了自折叠,并研究了蜂窝设计和结构参数之间 的关系。Zhu 等<sup>[15]</sup>将 Koch 结构和传统蜂窝结构相结 合提出了一种 Koch 分层蜂窝结构,通过有限元法研 究了其在冲击载荷作用下的力学性能。这些研究表 明,利用不同构型间的相互组合提出新型蜂窝结构, 通过改变蜂窝单元形状得出性能更优的蜂窝材料,已 成为研究人员关注的热点。

凹五边形蜂窝结构是一种新型的蜂窝结构,其特 点在于通过改变结构参数和阵列方式可组合出多种 构型的蜂窝,如矩形填充菱形、正方形填充米字型蜂 窝、三角形组合蜂窝、三角形与菱形组合蜂窝等,如 图 1 所示。通过一种构型的变化拓展出其他不同构 型,可减少相关研究的工作量,具有特殊的研究意义。 本文针对规则排列下的凹五边形蜂窝阵列结构进行 缓冲性能的研究,利用 Ansys Workbench/LS-DYNA 软件建立其异面缓冲的有限元模型进行模拟。利用后 处理软件 LS-PrePost 对计算结果进行分析,以此来研 究凹陷角度、壁厚边长比对其异面方向上缓冲性能的 影响规律。



different structural parameters and array patterns

## 1 凹五边形蜂窝结构

### 1.1 几何结构

本文提出的凹五边形蜂窝结构由正方形结构的 一边从其中点位置垂直向下凹陷得到,如图 2 所示。 其中  $l_1$ 为凹五边形边长, $l_2$ 为凹陷边边长, $\theta$ 为凹陷 角度,其变化范围为  $0 < \theta \le 63.435^\circ$ 。 $l_1$ 和  $l_2$ 的关系 满足式(1),当 $\theta = 63.435^\circ$ 时,凹五边形 2 条凹陷边 与底边接触。

$$l_1 = 2l_2 \cos\theta \tag{1}$$



图 2 凹五边形结构 Fig.2 Concave pentagonal structure

相对密度是影响蜂窝阵列结构的重要参数,其定 义为蜂窝结构的密度  $\rho^*$ 与蜂窝基材的密度  $\rho_s$ 之比。 图 3 为规则排列的凹五边形蜂窝阵列示意图, t为壁 厚, h 为芯材厚度,其相对密度  $\Delta \rho$  见式(2)。

$$\Delta \rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} = 2 \left( 1 + \frac{1}{2\cos\theta} \right) \frac{t}{l_1} \tag{2}$$



图 3 规则排列的凹五边形阵列结构 Fig.3 Regularly arranged concave pentagonal array structure

## 1.2 有限元模型

参考 Sun 等<sup>[16]</sup>建立有限元模型的方法,借助 Ansys Workbench/LS-DYNA 软件建立凹五边形蜂窝 阵列异面缓冲性能的有限元模型,将蜂窝样品置于 刚性上压板 P<sub>1</sub>和支撑板 P<sub>2</sub>之间,芯材厚度为 h,如 图 4 所示。其中支撑板 P<sub>2</sub>的自由度为 0,上压板 P<sub>1</sub> 在 y 方向上释放自由度,在进行模拟时,上压板 P<sub>1</sub> 以恒定速度 v 向下压缩样品至密实化状态。蜂窝模型 各面之间定义为 Automatic-single-surface 无摩擦接 触,蜂窝样品与上下压板之间定义为 Automaticsurface-to-surface 摩擦接触,动静摩擦因数分别为 0.2 和 0.15。对蜂窝样品用高阶平面单元 Plane183 进行 网格划分。蜂窝基材选用 3003 型铝合金。



图 4 凹五边形蜂窝阵列结构异面压缩 分析的有限元模型 Fig.4 Finite element modeling for out-of-plane compression analysis of concave pentagonal honeycomb array structures

## 2 模型验证

通过拉伸试验测得蜂窝基材的力学参数,利用万 能材料试验机对样品进行静态压缩试验,与仿真数据 进行对比,来验证有限元模型的可靠性。

### 2.1 拉伸试验

本文选用的基体材料为 3003 型铝合金,基材密 度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>,按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验第一部分:室温试验方法》借助万能材料试 验机以 10 mm/min 的拉伸速度对试样进行拉伸。试验 测得 3 条试样的应力-应变曲线如图 5 所示,用 Origin 软件对 3 条曲线进行平均拟合后得到基体材料的各 项力学性能参数:弹性模量为 68 GPa,泊松比为 0.33, 屈服强度为 217 MPa, 正切模量为 490 MPa。



Fig.5 Stress-strain curve of the specimen

### 2.2 静态压缩试验

进行凹五边形蜂窝夹芯结构的制备时,首先可利 用波纹板滚压法<sup>[17]</sup>将铝材制成不同弯折程度的铝板 条,用激光切割法在铝板条上切出大小合适的开槽, 然后将带有开槽结构的铝板条组装成凹五边形蜂窝 阵列结构,最后利用钎焊技术将铝板条和开槽进行焊 接。考虑到成本问题,本文制作试验样品时用手工折 叠代替滚压成型,高强度黏合剂黏合代替钎焊工艺, 试验样品如图 6a 所示。利用万能材料试验机对样品 进行压缩试验,将试验样品置于上下压板之间,上压 板以 12 mm/min 的速度压缩试样,如图 6b 所示。



a 试验样品

b 静态压缩试验装置

图 6 凹五边形蜂窝阵列结构的静态压缩试验 Fig.6 Static compression tests of concave pentagonal honeycomb array structures

## 2.3 应力-应变曲线

用试验测得的基材力学参数建立与试验样品尺 寸一致的有限元模型,对比试验和仿真结果的应力-应变曲线,两者具有相同的变形模式和变化趋势,都 经历了弹性阶段、平台阶段、密实化阶段试验和屈服 阶段,如图7所示。低速冲击蜂窝阵列结构时,在弹性 阶段、平台阶段和密实化阶段,试验与仿真的应力-应变曲线重合度较高。在屈服阶段,仿真结果的应力 先下降后上升,是因为出现塑性坍塌后应力有所下 降,有比较完整的应力上升-塑性坍塌周期。而试验 结果的应力一直缓慢下降,造成此种现象的原因是在 弹性变形转为塑性变形时,由于黏合剂等原因导致材 料弹塑性变形区分不明显,存在滞后现象,故呈现逐 步下降的结果。



# 3 结果与分析

## 3.1 变形模式

以相对密度为 0.04、凹陷角度为 30°的凹五边形 蜂窝阵列结构为例,在异面压缩速度为 10 m/s 时, 模型在 x-y-z 方向的整体变形及 y-z 方向的局部变形如 图 8~9 所示。压缩开始时阵列结构的上端先发生线 弹性变形,此阶段变形程度较小。随着压缩进行,变 形从上端逐渐向底部进行折叠压缩,形成连续褶皱。 当载荷增大到一定值后,凹五边形蜂窝阵列结构被压 溃,进入密实化阶段。

当压缩速度为 100 m/s 时,模型在 x-y-z 方向的整体变形及 y-z 方向的局部变形如图 10~11 所示。阵列结构在平台阶段和密实化阶段的变形过程与压缩速度为 10 m/s 时的变形过程相似。不同的是,在开始阶段,阵列结构的上端和下端同时发生变形,随后变形从上端逐渐向底部进行,直至压溃。

### 3.2 异面平台应力

平台应力  $\sigma_p$  是衡量结构缓冲性能的指标,定义为应力-应变曲线平台阶段所有应力的平均值,其计算见式(3)。

$$\sigma_{\rm p} = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_{\rm d}} \sigma ds}{\varepsilon_{\rm d} - \varepsilon_0}$$
(3)



图 8 v=10 m/s 时凹五边形阵列结构在 x-y-z 方向的变形 Fig.8 Deformation of concave pentagonal array structure in x-y-z direction when v=10 m/s



图 9 v=10 m/s 时凹五边形阵列结构在 y-z 方向的变形

Fig.9 Deformation of concave pentagonal array structure in y-z direction when v=10 m/s



图 10 v=100 m/s 时凹五边形阵列结构在 x-y-z 方向的变形 Fig.10 Deformation of concave pentagonal array structure in x-y-z direction when v=100 m/s



图 11 v=100 m/s 时凹五边形阵列结构在 y-z 方向的变形 Fig.11 Deformation of concave pentagonal array structure in y-z direction when v=100 m/s

式中:  $\sigma_p$  压缩过程中的应力;  $\varepsilon_0$  为初始峰应力对 应的应变;  $\varepsilon_d$  为密实化应变。

### 3.2.1 凹陷角度的影响

保证相对密度一致,图 12 为凹五边形蜂窝阵列结构 的凹陷角度在不同异面压缩速度下与平台应力 σ<sub>p</sub>的关系 曲线。由图 12 可见,当凹陷角度取值在 0<θ<63.435° 之间时,阵列结构的平台应力随凹陷角度的增大出现 先增大后减小的趋势,最大平台应力一般出现在凹陷 角度为 25°~35°,经拟合后,发现平台应力与凹陷角 度的关系与二次函数最为接近,其表达见式(4)。当 凹陷角度达到最大的 63.435°时,平台应力值出现回 升,发生此现象的原因:凹陷角度在 0<θ<63.435° 时,凹陷两边形成 "V"形角,当凹陷角度达到最大 时,凹陷两边与凹五边形的底边接触,形成 "K"形 角,而角膜能是异面平台应力的重要影响因素,其中 "K"形角的角膜能 *M*(K)和"V"形角的角膜能 *M*(V) 表达式见式(5)和式(6)<sup>[18]</sup>。

$$\sigma_{\rm p} = A_{\rm l}\theta^2 + B_{\rm l}\theta + C_{\rm l} \tag{4}$$

$$M_{(\mathrm{K})} = \frac{8M_0 H^2}{t} \left( 1 + \frac{1}{\cos\theta} \right) \tag{5}$$

$$M_{(V)} = \frac{4M_0 H^2}{t} \sin \frac{\theta}{2}$$
 (6)

式中:  $M_0$  为全塑性弯矩; H 为一个折曲的半波 长;  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 为关系系数,由蜂窝基材的力学参数、 凹五边形蜂窝结构和异面压缩速度共同决定。其中当 速度为 1、3、10、30、50、100 m/s 时,式(4)的 关系系数  $A_1$ 的值依次为-8.326×10<sup>-4</sup>、-8.254×10<sup>-4</sup>、 -8.866×10<sup>-4</sup>、-8.649×10<sup>-4</sup>、-9.488×10<sup>-4</sup>、-5.570×10<sup>-4</sup>; 关系系数  $B_1$ 的值依次为 0.050、0.050、0.052、0.051、 0.052、0.027; 关系系数  $C_1$ 的值依次为 2.186、2.143、 2.450、0.051、3.837、5.651。





#### 3.2.2 壁厚边长比的影响

在凹陷角度为 45°时,不同压缩速度下凹五边形 蜂窝阵列结构的异面平台应力与壁厚边长比的关系 曲线如图 13 所示。由图 13 可见,异面平台应力随壁 厚边长比的增大而增大,其关系曲线趋势与指数函数 最接近,表达式见式(7)。

$$\sigma_{\rm p} = A_2 \exp(-\theta / B_2) + C_2 \tag{7}$$

式中: *A*<sub>2</sub>、*B*<sub>2</sub>、*C*<sub>2</sub>为关系系数,由蜂窝基材的力 学参数,凹五边形蜂窝结构和异面压缩速度共同决 定。其中当速度为1、3、10、30、50、100 m/s 时, 式(7)的关系系数 *A*<sub>2</sub>的值依次为10.682、11.057、 14.843、17.292、23.473、34.467;关系系数 *B*<sub>2</sub>的值依 次为-0.039 95、-0.040、-0.046、-0.046、-0.053、 -0.056; 关系系数 C<sub>2</sub>的值依次为-11.381、-11.747、-16.015、-18.395、-24.403、-35.951。



#### 3.3 单位体积能量吸收

单位体积吸收能量  $E_v$  是表示结构能量吸收性能的重要指标,由阵列结构在变形过程中吸收的总能量  $E_T$ 除以阵列结构的体积得到,计算见式(8)和(9)。

$$E_{\rm T} = \int_0^s F ds \tag{8}$$

$$E_{\rm v} = \frac{E_{\rm T}}{V} \tag{9}$$

式中: F 为压缩载荷; s 为压缩位移; V 为结构 体积。

#### 3.3.1 凹陷角度的影响

保证相对密度一致,图 14 为凹五边形蜂窝阵列 结构的凹陷角度在不同异面压缩速度下与单位体积 能量吸收 *E*<sub>v</sub>的关系曲线。由图 14 可见,当凹陷角度 0 < θ < 63.435°时,阵列结构的单位体积能量吸收随凹 陷角度的增大出现先增大后减小,在达到最大凹陷角 度 *θ*=63.435°时单位体积能量吸收能力再次提升,最 大单位体积能量吸收一般出现在凹陷角度为 20°~30°。

#### 3.3.2 壁厚边长比的影响

在凹陷角度为 45°时,不同压缩速度下凹五边形 蜂窝阵列结构的单位体积能量吸收与壁厚边长比的 关系曲线如图 15 所示。由图 15 可以看出,单位体积 能量吸收随壁厚边长比的增大而增大,其关系曲线趋 势与指数函数最接近,表达式见式(10)。

$$\sigma_{\rm p} = A_3 \exp(-\theta / B_3) + C_3 \tag{10}$$

式中: *A*<sub>3</sub>、*B*<sub>3</sub>、*C*<sub>3</sub>为关系系数,其中当速度为1、 3、10、30、50、100 m/s 时,式(10)的关系系数 *A*<sub>3</sub>的值依次为 3.265、3.105、3.065、3.1488、8.280、 11.768;关系系数 *B*<sub>3</sub>的值依次为-0.031、-0.031、 -0.030、-0.028、-0.043、-0.040;关系系数 *C*<sub>3</sub>的值 依次为-3.017、-2.809、-2.540、-2.076、-7.693、 -11.294。







图 15 不同压缩速度下壁厚边长比与 单位体积吸收能量的关系曲线 Fig.15 Curves between wall thickness to edge length ratio and energy absorption per unit volume at different compression velocities

## 4 结语

本文提出了一种新型的蜂窝结构,借助试验和有 限元分析的方法研究了凹陷角度,壁厚边长比对规则 排列的凹五边形蜂窝阵列结构在异面压缩载荷下的 缓冲性能,得到如下结论:

1)凹五边形蜂窝阵列结构具有与其他蜂窝结构相 似的变形模式。在异面压缩的初始阶段,低速(10 m/s) 压缩时上端首先发生变形,高速异面压缩(100 m/s) 时上端和下端同时发生变形。随着压缩进行,变形从 上端向底部延伸,形成连续褶皱,当载荷增大到一定 值后,蜂窝阵列结构被压溃,进入密实化阶段。

2)研究了在同一相对密度下,凹陷角度  $\theta$ 、壁 厚边长比 t/l 对异面平台应力  $\sigma_p$ 的影响规律。当  $0 < \theta < 63.435°$ 时,  $\sigma_p$ 随  $\theta$  的增大出现先升后降的趋势, 两者呈二次函数关系;当  $\theta = 63.435°$ 时,由于角膜能 的影响, $\sigma_p$ 值出现回升但仍小于  $25° < \theta < 35°$ 时的值。 当  $\theta$  一定时, $\sigma_p$ 随 t/l 的增大而增大,两者呈指数函 数关系。

3)研究了在同一相对密度下,凹陷角度 θ、壁 厚边长比 t/l 对单位体积能量吸收 E<sub>v</sub>的影响规律。E<sub>v</sub> 的值随 θ 的增大呈现先升后降,后再次增大的趋势。 当 E<sub>v</sub>出现最大值时,θ介于 20°~30°。当θ一定时, E<sub>v</sub>随 t/l 的增大而增大,呈指数函数关系。

规则排列的凹五边形蜂窝阵列结构作为其中一 种阵列形式,其缓冲性能的研究为后续探究其他阵列 所形成构型间的一般性规律做了基础,下一步将对不 同凹陷角度下其他阵列方式的凹五边形蜂窝阵列结 构进行共异面缓冲性能的研究。

#### 参考文献:

- BENEDETTI M, DU PLESSIS A, RITCHIE R O, et al. Architected Cellular Materials: A Review on Their Mechanical Properties towards Fatigue-Tolerant Design and Fabrication[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, 144: 100606.
- [2] SHIRVANI S M N, GHOLAMI M, AFRASIAB H, et al. Optimal Design of a Composite Sandwich Panel with a Hexagonal Honeycomb Core for Aerospace Applications[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2023, 47(2): 557-568.
- GANILOVA O A, LOW J J. Application of Smart Honeycomb Structures for Automotive Passive Safety[J].
   Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018, 232(6): 797-811.
- [4] FERERES E, ORGAZ F, GONZALEZ-DUGO V. Reflections on Food Security under Water Scarcity[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(12): 4079-4086.
- [5] ARAÚJO H, LEITE M, RIBEIRO A R, et al. The Effect

193-198

of Geometry on the Flexural Properties of Cellular Core Structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2019, 233(3): 338-347.

- [6] HABIB F N, IOVENITTI P, MASOOD S H, et al. Cell Geometry Effect on In-Plane Energy Absorption of Periodic Honeycomb Structures[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(5): 2369-2380.
- [7] DENG Xiao-lin, QIN Shan-gan, HUANG Jia-le. Out-of-Plane Impact Analysis for a Bioinspired Sinusoidal Honeycomb[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(28): 7259-7276.
- [8] 张晓楠, 晏石林, 欧元勋, 等. 负泊松比内凹蜂窝结构梯度设计与动态冲击响应[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 193-198
  ZHANG Xiao-nan, YAN Shi-lin, OU Yuan-xun, et al. Gradient Design and Dynamic Impact Response of Concave Honeycomb Structures with Negative Poisson's Ratio[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3):
- [9] 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 Lu-lu, 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

- [10] ZHAI Jia-yue, ZHANG Ding-guo, LI Meng, et al. An Approximately Isotropic Origami Honeycomb Structure and Its Energy Absorption Behaviors[J]. Materials, 2023, 16(4): 1571.
- [11] DJEMAOUNE Y, KRSTIC B, RASIC S, et al. Numerical Investigation into In-Plane Crushing of Tube-Reinforced Damaged 5052 Aerospace Grade Aluminum Alloy Honeycomb Panels[J]. Materials, 2021, 14(17): 4992.

- [12] 孙玉瑾, 骆光林. 六边形蜂窝芯材异面冲击性能的有限元研究[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 60-62.
  SUN Yu-jin, LUO Guang-lin. Finite Element Study on Out-of-Plane Impact Properties of Hexagonal Honey-comb Core Materials[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 60-62.
- [13] 王勇, 董金善, 史为帅. 基于 ANSYS 的不同排列方式 折边式蜂窝夹套结构强度分析[J]. 石油化工设备, 2023, 52(3): 61-66.
  WANG Yong, DONG Jin-shan, SHI Wei-shuai. Structural Strength Analysis of Folded Honeycomb Jackets with Different Arrangement Forms Based on ANSYS[J].
- [14] NARITOMI D, HOSOYA N, ANDO G, et al. Creation of Origami-Inspired Honeycomb Structure Using Self-Folding Paper[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111146.

Petro-Chemical Equipment, 2023, 52(3): 61-66.

- [15] ZHU Yu-wen, DENG Jun-jie, XIONG Wei, et al. Koch Hierarchical Honeycomb: A Fractal-Based Design for Enhanced Mechanical Performance and Energy Absorption[J]. Materials, 2023, 16(10): 3670.
- [16] SUN De-qiang, LI Guo-zhi, SUN Yu-jin. The In-Plane Crashworthiness of Multi-Layer Regularly Arranged Circular Honeycombs[J]. Science Progress, 2020, 103(1): 1-9.
- [17] 张钱城, 卢天健, 闻婷. 轻质高强点阵金属材料的制备及其力学性能强化的研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2): 157-169.
  ZHANG Qian-cheng, LU Tian-jian, WEN Ting. Research Progress in Preparation of Light and High Strength Lattice Metal Materials and Strengthening of Their Mechanical Properties[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(2): 157-169.
- [18] 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.

责任编辑:曾钰婵