

# 新型蜂窝结构的耐撞性能研究<sup>\*</sup>

李成兵<sup>1,2\*\*</sup> 肖可<sup>1</sup> 李锐<sup>3</sup> 冯旭鹏<sup>1</sup> 彭俊恒<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西南石油大学机电工程学院, 成都, 610500)(<sup>2</sup> 石油天然气装备技术四川省科技资源共享服务平台, 成都, 610500)

(<sup>3</sup> 成都航天通信设备有限责任公司, 成都, 610051)

**摘要** 为提升金属蜂窝结构抗冲击能力, 提出了封闭弯折型蜂窝、内凹填充型蜂窝、星形曲边型蜂窝三种新型抗冲击防护结构. 采用 ANSYS/LS-DYNA 的有限元仿真进行分析, 分析各冲击速度下三种蜂窝的变形特征和能量吸收能力. 研究表明: 三种蜂窝结构的变形模式与胞元结构和冲击速度有关. 封闭弯折型蜂窝名义应力和能量吸收效率优于其他结构; 蜂窝胞元的几何参数不影响名义应力-应变曲线的变化趋势. 封闭弯折型蜂窝弯折角度越大、平台应力值越高, 密实应变值降低. 在中速冲击时, 60°封闭弯折型蜂窝结构的平台应力相较于 45°结构提升了 19.5%; 提高相对密度能有效的提高蜂窝结构的吸能效率, 高密度 60°封闭弯折型蜂窝结构的比吸能相较于低密度提升了 207.6%.

**关键词** 蜂窝结构, 变形模式, 平台应力, 能量吸收效率

**DOI:** 10.19636/j.cnki.cjsm42-1250/o3.2025.031

## 0 引言

蜂窝作为一种常见的多孔材料, 具有高强度、轻质量, 良好的能量效率和优异的耐撞性能等特征. 在面外冲击和面内冲击时, 能够减少材料的损坏, 延长使用寿命, 在航空航天、船舶、建筑、汽车、包装、电子设备保护等领域广泛应用<sup>[1-2]</sup>.

由于蜂窝结构吸能能力优越, 目前关于蜂窝已展开大量的调查. Lee 等<sup>[3]</sup>提出了一种新的抗爆炸自适应夹层 BRAS 结构 (blast resistant adaptive sandwich), 发现塑性铰折弯堆叠结构抗冲击性能较为优秀. 亓昌等<sup>[4]</sup>利用多孔结构对车用动力电池箱底部冲击防护, 对比了三种不同芯层结构, 对比分析显示, BRAS 夹芯板的耐撞性能最佳, 是动力电池箱底部防护的理想材料选择. Liu 等<sup>[5]</sup>对内凹六边形蜂窝结构的耐撞性能进行了研究, 发现在同等应变下内凹六边形蜂窝结构相较于传统蜂窝结构有更好的吸能效果. 邓小林等<sup>[6]</sup>提出了一种全参数化正弦曲线蜂窝结构, 发现正弦曲线蜂窝结构的轻微拉胀

效应可增强其平面内能量吸收能力. 韩会龙等<sup>[7]</sup>研究了冲击载荷下星形节点周期性蜂窝结构的动力学响应特性, 基于能量效率法和一维冲击波理论, 给出了星形蜂窝结构密实应变和动态平台应力的经验公式. 张宝庆等<sup>[8]</sup>研究了旋转负泊松比星形蜂窝结构能量吸收特性, 研究表明旋转形结构的胞元在被冲击时具有更强的负泊松比效应. 王腾博等<sup>[9]</sup>提出了一种具有负泊松比效应的内凹工字形蜂窝结构, 发现该结构相比于内凹六边形蜂窝结构, 峰值应力更低, 平台应力阶段时间更长, 并且随着冲击速度的提高, 表现出更好的冲击载荷一致性和能量吸收特性. Zhu 等<sup>[10]</sup>结果发现不规则度的引入, 可以延长应力-应变曲线的平台阶段且提出和优化了一种幂函数内凹负泊松比结构, 结果显示改良后的结构能够有效提高比吸能. 如何结合各结构的优点, 提高蜂窝结构的耐撞性能是本文研究的重点.

综上所述, 本文将理论与实际相结合, 提出了三种抗冲击蜂窝结构, 并以此为研究对象. 研究其不同速度下的面内耐撞性能和变形特征, 并与传统蜂窝结构进行比较. 讨论各结构的面内冲击性能和能

\* 2025-09-29 收到修改稿, 2025-10-11 网络首发.

\*\* 通讯作者. E-mail: lichbing@mail.ustc.edu.cn.

量吸收效率,得出耐撞性能较为优异的新型蜂窝结构,研究分析各结构参数对该蜂窝冲击动态响应的影

## 1 计算模型

### 1.1 胞元几何结构

本文根据 BRAS 芯层胞元结构<sup>[5]</sup>,如图 1(a)所示,提出了一种封闭式蜂窝胞元结构.该结构为了满足蜂窝阵列,将蜂窝单元的尖角部分优化为平面设

计,上下由两个弯折的伞状结构组成,填充肋板可以起支撑作用,命名为封闭弯折型蜂窝(Closed bent honeycomb),如图 1(b)所示.其中:主要吸能的三个弯折角度分别为  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ;  $l$ 、 $l_1$ 、 $l_2$  分别为单胞竖边长度、弯折薄壁长度、上下底长度,  $t_1$  为胞壁厚度.

封闭弯折型蜂窝胞元体积

$$V_1 = \left[ l + 8l_1 + 8 \left( \frac{l}{2} - 2l_1 \sin \alpha_1 \right) + 3l_2 \right] t_1 H \quad (1)$$

式中,  $H$  为蜂窝沿  $Z$  轴方向的长度,本研究中  $H = 20 \text{ mm}$ .

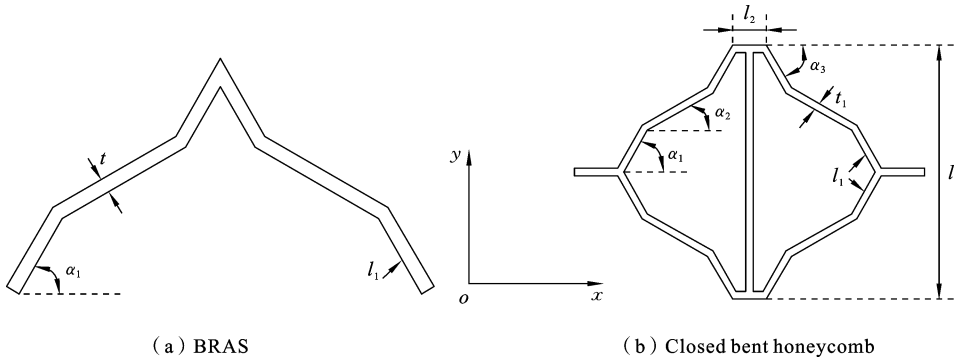


图 1 BRAS 及封闭弯折型蜂窝胞元结构

Fig.1 BRAS and closed bent honeycomb cell structure

本文在内凹六边形蜂窝结构的基础上<sup>[5]</sup>,如图 2(a)所示,提出了四周胞壁均为弧形结构的内凹蜂窝结构.该结构由内凹六边形蜂窝和曲线负泊松比蜂窝复合而成,其曲线设计可以使蜂窝结构不易发生应力集中,填充肋板可以减弱其所受载荷发生的

波动,命名为内凹填充型蜂窝(Concave filled honeycomb),如图 2(b)所示.其中:  $l$  为胞元高度,侧边内凹角度为  $\alpha_1$ ,上下边圆弧角  $\alpha_2$ ,圆弧半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$ ,  $t_2$  为胞壁厚度.

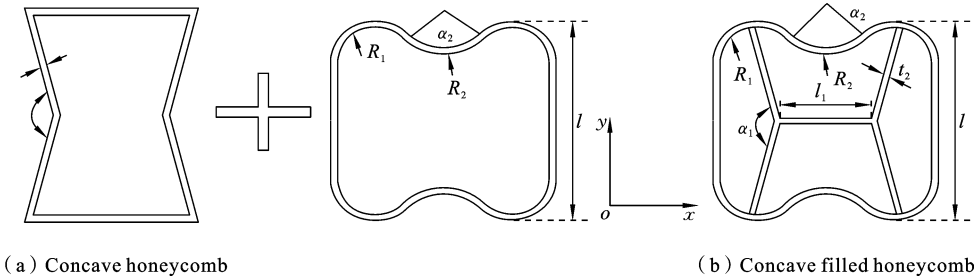


图 2 内凹及内凹填充型蜂窝胞元结构

Fig.2 Concave and concave filled honeycomb cell structures

内凹填充型蜂窝结构胞元体积

$$V_2 = \left[ \frac{2l}{\sin \frac{\alpha_1}{2}} + \frac{l}{2} + 1.3l + 2\pi R_1 \times \frac{7}{6} + \pi R_2 \right] t_2 H \quad (2)$$

本文在传统星形蜂窝结构的基础上<sup>[6]</sup>,如图 3(a)所示,提出了一种正弦曲边蜂窝结构.该结构的四条直线边由正弦曲线替代,命名为星形曲边型蜂窝(Star-shaped curved honeycomb),如图 3(b)所示.其中:  $l_1$  为四周对称分布的正弦曲边,  $l$  为连接杆

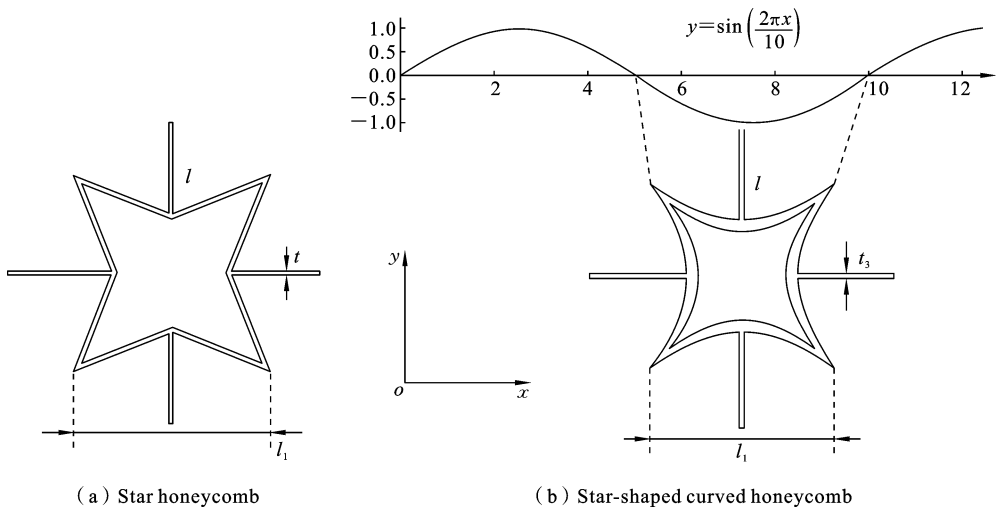


图 3 星形及星形曲边型蜂窝胞元结构

Fig. 3 Star-shaped and star-shaped curved cellular cell structures

长度,正弦曲线的基本函数方程为: $y = \sin\left(\frac{2\pi x}{10}\right)$ ,  $t_3$  为胞壁厚度.

星形曲边型蜂窝结构的胞元体积为

$$V_3 = \left[ 4 \int_5^{10} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{5}\right)^2 \left(1 - \sin^2\left(\frac{\pi x}{5}\right)\right)} dx + 2d \right] t_3 H \quad (3)$$

### 1.2 相对密度

相对密度是决定蜂窝结构耐撞性能的关键因素<sup>[11]</sup>. 蜂窝结构的相对密度越大,蜂窝结构的胞元变得更加紧密,增加了对外力的抵抗能力. 根据多胞材料理论<sup>[12]</sup>,相对密度  $\Delta\rho$  由蜂窝材料实体部分面积与蜂窝材料所围区域面积.

$$\Delta\rho = \frac{V_s}{V_{total}} \quad (4)$$

式中: $V_s$  是蜂窝材料实体部分体积, $V_{total}$  是蜂窝材料所围区域体积.

封闭弯折型蜂窝结构相对密度

$$\rho_1 = \frac{l + 8l_1 + 8\left(\frac{l}{2} - 2l_1 \sin\alpha_1\right) + 3l_2}{l[4l_1 \cos\alpha_1 + (l - 4l_1 \sin\alpha_1) \cos\alpha_2 + 2l_2]} t_1 \quad (5)$$

内凹填充型蜂窝结构相对密度

$$\rho_2 = \frac{\frac{2l}{\sin\frac{\alpha_1}{2}} + \frac{l}{2} + 1.3l + \frac{7}{3}\pi R_1 + \pi R_2}{l \left[ l_1 + \frac{l}{\tan\frac{\alpha_1}{2}} + 2R_1 \right]} t_2 \quad (6)$$

星形曲边型蜂窝结构相对密度

$$\rho_3 = \frac{4 \int_5^{10} \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{5}\right)^2 \left(1 - \sin^2\left(\frac{\pi x}{5}\right)\right)} dx + 2d}{\left(l_1 + \frac{l}{2} - 1\right)^2} t_3 \quad (7)$$

蜂窝的胞元几何结构不同,导致其相对密度不同,影响其力学性能. 本文通过控制胞壁的厚度控制各类蜂窝的相对密度. 为了探究这几种蜂窝结构的实用性,本文还讨论了传统蜂窝的数值结果与之比较. 表 1 给出了各试件在相对密度相等下各胞壁的厚度以及试件参数.

表 1 各试件模型参数

Table 1 Model parameters of each specimen

蜂窝类型	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$t$ (mm)
封闭弯折型蜂窝	116.4	101.8	0.300
内凹填充型蜂窝	115.8	102.0	0.280
星形曲边型蜂窝	116.6	99.2	0.362
六边形蜂窝	114.0	104.4	0.575

### 1.3 有限元设置

该研究蜂窝结构的有限元计算模型如图 4 所示,试件长度为  $L_1$ ,高度为  $L_2$ ,中间由各蜂窝结构填充. 加载模型的过程中,上端刚性板沿  $y$  轴方向以恒定的速度冲击试件,底部刚性板固定,蜂窝两侧为自由端.

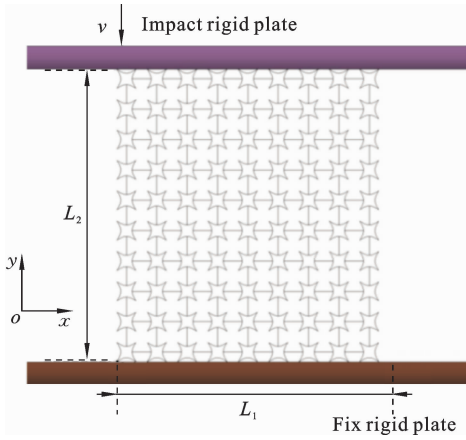


图 4 蜂窝试件有限元计算模型

Fig. 4 Finite element calculation model of honeycomb specimen

本研究采用显式动力学有限元方法,使用 Hypermesh 和 LS-DYNA 平台建立蜂窝试件动态压缩模型.蜂窝结构自身设置为自接触(AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE)来定义自身之间的接触且假定为无摩擦.其他各部分之间都设置为面接触(AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE)摩擦系数均为 0.1.两刚性板用(MAT\_RIGID)定义,蜂窝材

料采用多段线性弹性模型进行模拟.采用四节点四边形壳单元进行离散,通过网格收敛性分析和实验数据相比较,设置网格大小为 0.5 mm<sup>[13]</sup>.在整个模拟过程中,材料参数如表 2 所示.

表 2 材料参数<sup>[14]</sup>

Table 2 Material parameter<sup>[14]</sup>

材料	$\rho$ (kg · m <sup>-3</sup> )	$E$ (GPa)	$\mu$	$\sigma_y$ (MPa)
铝合金	2700	69	0.33	76
刚性板	7845	207	0.27	207

### 1.4 有限元模型验证

为验证有限元模型的有效性,本文使用试件材料 ABS,该材料和铝合金都具有显著的塑性变形能力,该材料选择参考文献[15].建立试验模型为 5 × 5 封闭弯折型蜂窝模型,进行面内动态力学性能模拟.利用 3D 打印技术,将实验模型完整打印.实验采用万能试验机进行轴向压缩测试,设置应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup>(压缩速率 4 mm/min).图 5 对比展示了实验与仿真的力-位移曲线及变形模式,结果显示,两者基本吻合,证明了该有限元方法的可靠性.

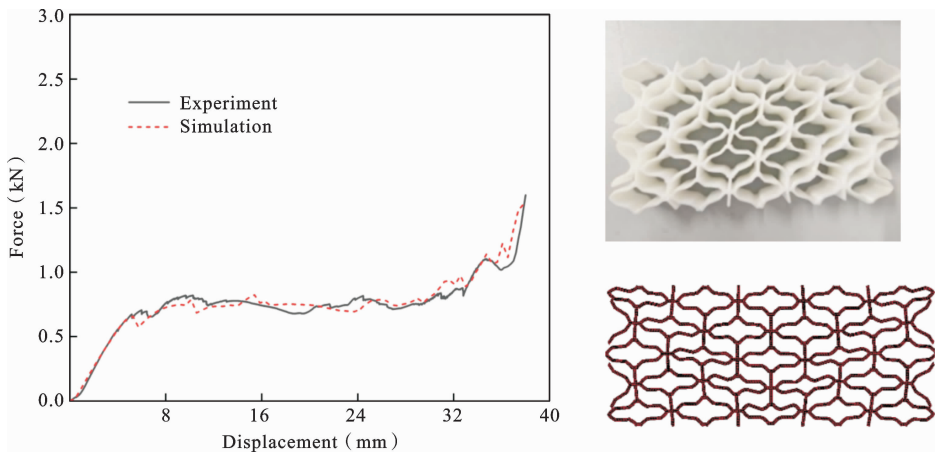


图 5 准静态压缩下有限元模型可靠性验证

Fig. 5 Reliability verification of finite element model under quasi-static compression

## 2 计算结果与讨论

### 2.1 变形模式

图 6 给出了各蜂窝结构在不同冲击速度下宏观

变形情况,观察蜂窝结构在各类应变条件下的变形行为.其本文中名义应变  $\epsilon$  的计算方法为:冲击刚性板位移与试件原始高度的比值.结果显示,在低速冲击时( $v=10$  m/s),随着刚性板往下压缩,封闭弯折型蜂窝各层胞元先后发生弯折变形,呈现出 X 形变

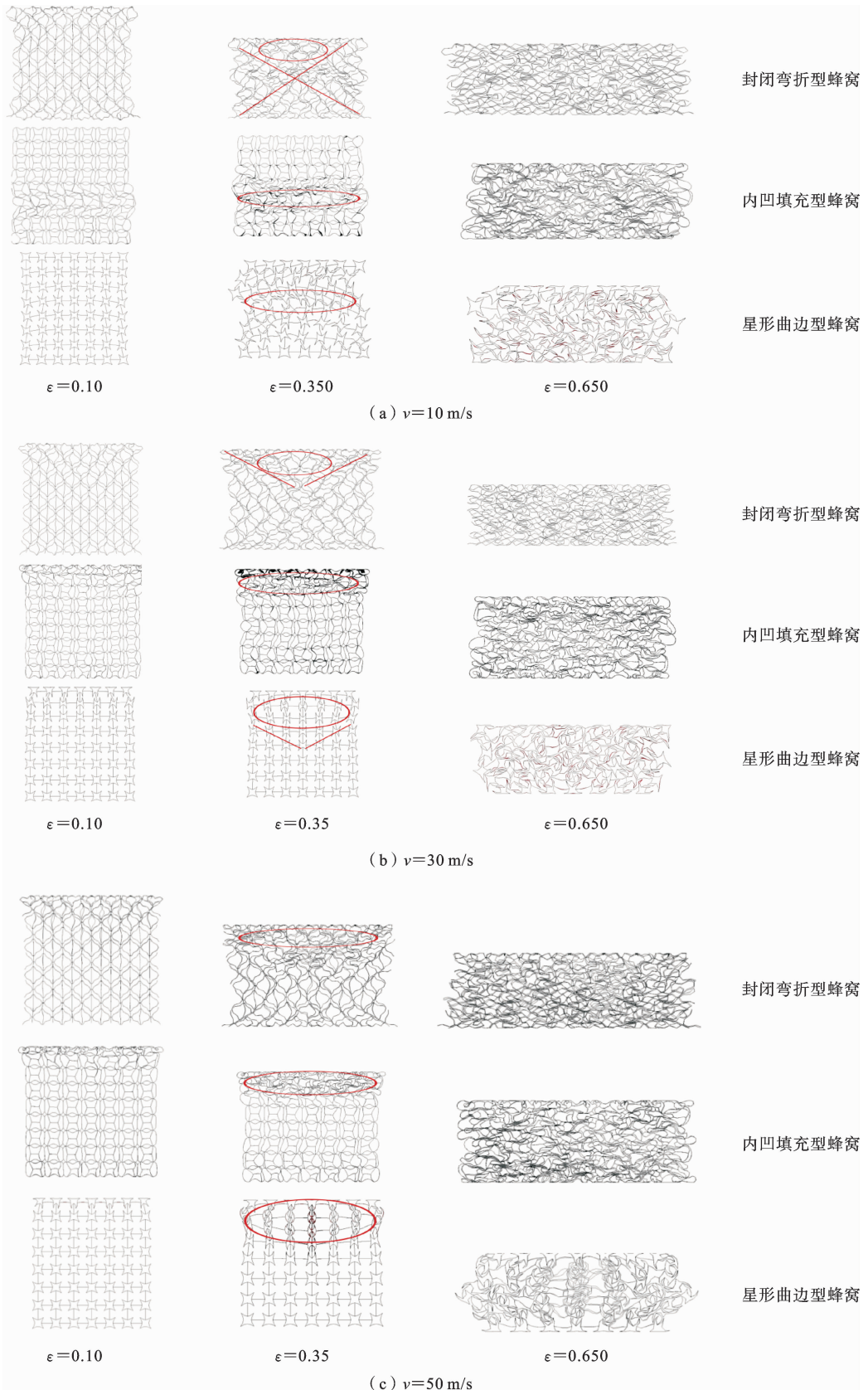


图 6 各蜂窝结构的变形模式

Fig. 6 Deformation modes for each honeycomb structure

形带。在压缩过程中,冲击端和固定端胞元弯折角被压平后向中层胞元坍塌。这是由于封闭弯折型蜂窝被压平使得结构冲击端和固定端的接触面积大于中间部分,导致其胞元相对比较稳定。星形曲边型蜂窝的胞元发生卷曲旋转变形且向胞元中心蜷缩,呈负泊松比效应,两侧的变形区域带动中间的胞元发生形变。这是由于结构边是曲边,在胞元被迅速压溃时,四角方向发生了较大变化,影响后续胞元压溃。在整个过程中,封闭弯折型蜂窝是冲击端先发生坍塌,而星形曲边型蜂窝和内凹填充型蜂窝是中间部分先发生坍塌。在中低速冲击时( $v=30\text{ m/s}$ ),开始出现惯性效应,三种蜂窝结构在冲击端变形明显。内凹填充型蜂窝的变形模式转变为冲击端先发生变形,封闭弯折型蜂窝和星形曲边型蜂窝整体结构都在变形,封闭弯折型蜂窝呈现“V”形的变形模式;星形曲边型蜂窝是冲击端的胞元四个角被拉直变形,随后带动下方胞元变形,变形方式与低速有差异。这是因为内凹填充型蜂窝由于其结构特征,刚度比较大,后续胞元不易发生坍塌,使变形部分集中在冲击端;封闭弯折型蜂窝则是两侧弯折角被拉直后指向中间方向,使变形向中间靠拢。星形曲边型蜂窝由于其曲边的结构特征,其四周角度容易被压塌,各胞元的四周角被压塌后垂直向下变形。在中速冲击时( $v=50\text{ m/s}$ ),此时变形模式主要受到惯性效应的影响。三种结构在冲击端都出现了“O”形带。封闭弯折型蜂窝和星形曲边型蜂窝则是蜂窝试件整体同时变形,直至密实,内凹填充型蜂窝则是冲击端完全被压溃,下方胞元才开始变形。三种结构在各速度冲击下,封闭弯折型蜂窝的变形模式是胞元向两边扩散,水平尺寸增大呈正泊松比;内凹填充型蜂窝则是横向尺寸基本保持不变,应力波竖直向下传递呈零泊松比;星形曲边型蜂窝是沿着四角向内部收缩,横向尺寸在达到密实应变前减小呈负泊松比。

## 2.2 动态响应曲线

名义应力-应变曲线能够反应在冲击过程中吸收能量的过程。其中名义应力 $\sigma$ 定义为冲击力和试件接触面积之比。为模拟各工况下不同速度的冲击,本研究讨论低、中低、中、高( $v=100\text{ m/s}$ )四种速度。图7给出了各蜂窝结构在不同速度下的名义应力-应变曲线。在低速和中低速冲击时,四种结构的

动态响应曲线都有明显的缓冲吸能区,应力值比较稳定。三种蜂窝结构名义应力值相差无几且均略强于普通六边形蜂窝。随着变形进一步进行,胞元孔壁相互挤压,名义应变逐渐增大,各个胞元结构孔隙被压缩,名义应力也随之增大,直至密实。在中速和超高速冲击时,名义应力值提高,随着应变率效应的增强<sup>[16]</sup>,名义应力值显著提升,同时应力-应变曲线呈现明显波动特征。随着高速冲击产生的应力波在坍塌方向上快速传播,蜂窝试件被压溃在极短试件内坍塌至密实,使封闭弯折型蜂窝结构的名义应力呈周期性变化。图中每一个凸起的峰值都是一层胞元被压密实的周期。根据图7(c)(d),封闭弯折型蜂窝和星形曲边型蜂窝的名义应力值高于另外两种结构,说明这两种结构拥有更优越的耐撞性能。

## 2.3 比吸能

在动态冲击过程中,评估结构的能量吸收能力通常采用比吸能吸收( $E_{\text{sea}}$ )<sup>[17]</sup>这一参数来评估,它反应了结构单位质量所吸收的能量。即

$$E_{\text{sea}} = \frac{E_a}{M} \quad (8)$$

式中 $M$ 为蜂窝结构的总质量, $E_a$ 为结构的总吸收能量由下式给出

$$E_a = \int_0^d F(x) dx \quad (9)$$

式中: $d$ 为蜂窝结构变形的位移, $F(x)$ 为在冲击过程中产生的载荷。

比吸能能够直接反应各结构吸收能量的能力。图8为不同速度下各结构能量吸收比。在低速冲击时,封闭弯折型蜂窝的 $E_{\text{sea}}$ 略高于其他结构,这是因为其各层结构都发生折叠,具有更强的抵抗坍塌失稳的能力。在应变 $\epsilon=0.28$ 时内凹填充型蜂窝的 $E_{\text{sea}}$ 超过了封闭弯折型蜂窝,是因为其结构稳定,抗冲击能力强。在中低速和中速冲击时,封闭弯折型蜂窝的 $E_{\text{sea}}$ 在变形初始阶段领先于其他结构,分别在 $\epsilon=0.65$ 和 $\epsilon=0.76$ 时被星形曲边型蜂窝超过以及在接近 $\epsilon=0.80$ 时被内凹填充型蜂窝超过。多孔结构的吸能阶段主要是在平台段,在高应变时,各种结构已经被压密实,没有讨论价值。在高速时,封闭弯折型蜂窝的比吸能领先星形曲边型蜂窝结构43.5%,而其他两种结构的比吸能则远不如封闭弯

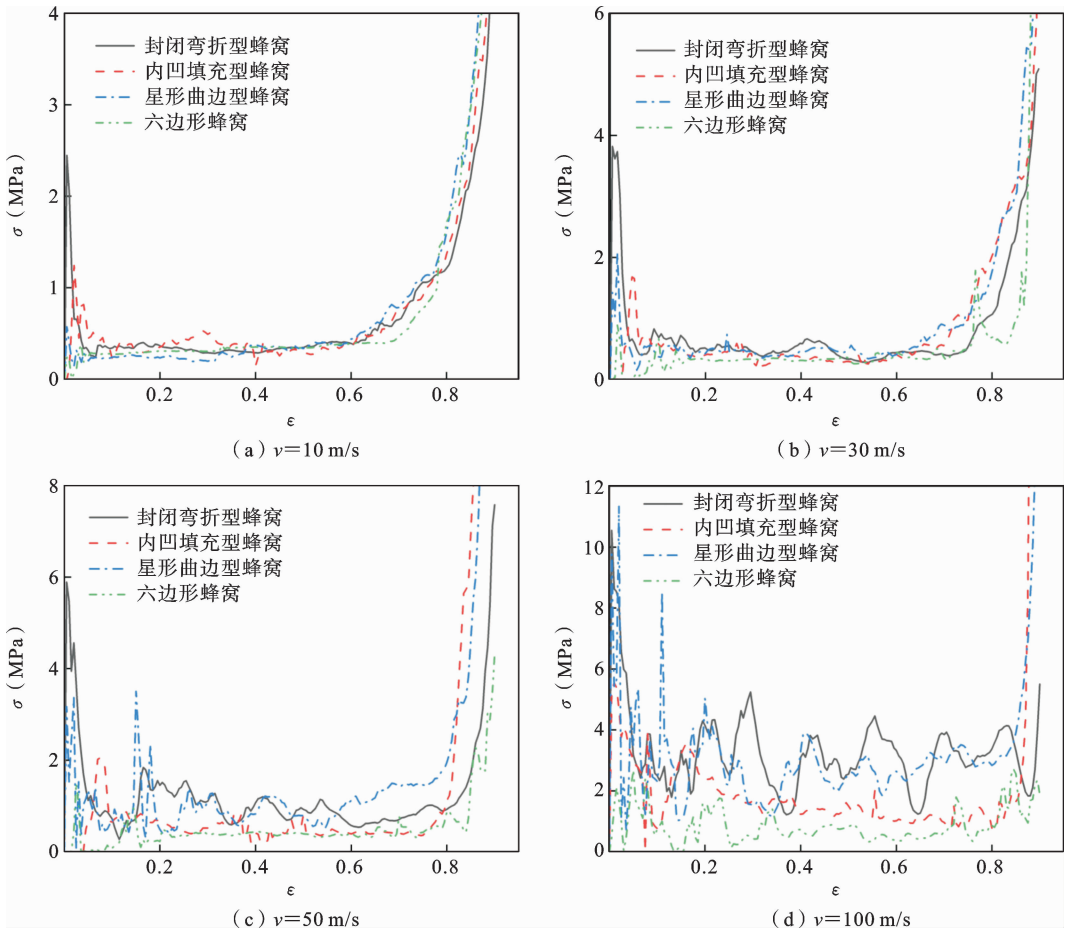


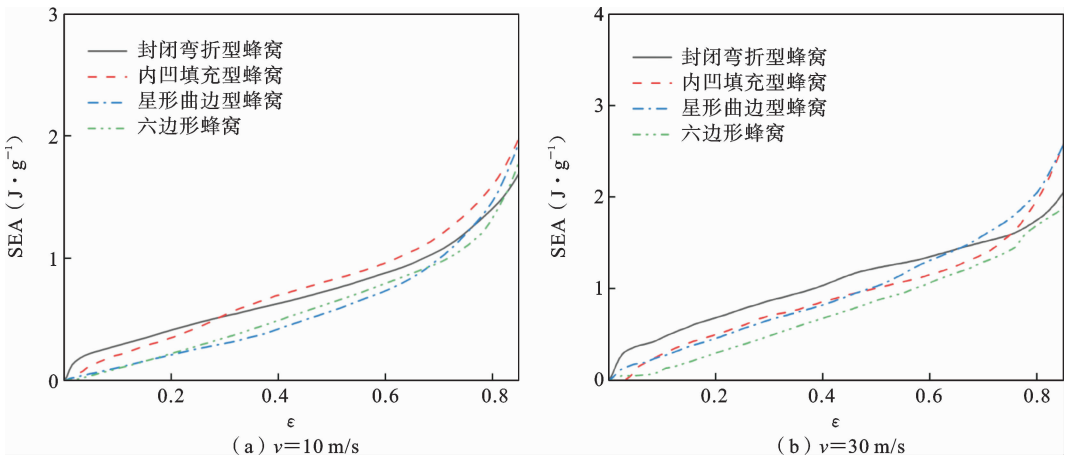
图 7 四种蜂窝结构在不同速度下名义应力-应变曲线

Fig. 7 Nominal stress-strain curves of four honeycomb structures at different velocities

折型蜂窝. 综上所述, 封闭弯折型蜂窝具有最优的缓冲吸能特性.

随着冲击速度增加, 所有蜂窝结构的比吸能都会增加. 这是因为随着冲击速度的提升, 惯性效应显

著增强, 促使蜂窝结构的变形模式发生改变, 单胞折叠次数增加, 从而导致单位质量下吸收能量的能力随速度增加而增加这与文献[18]结论一致.



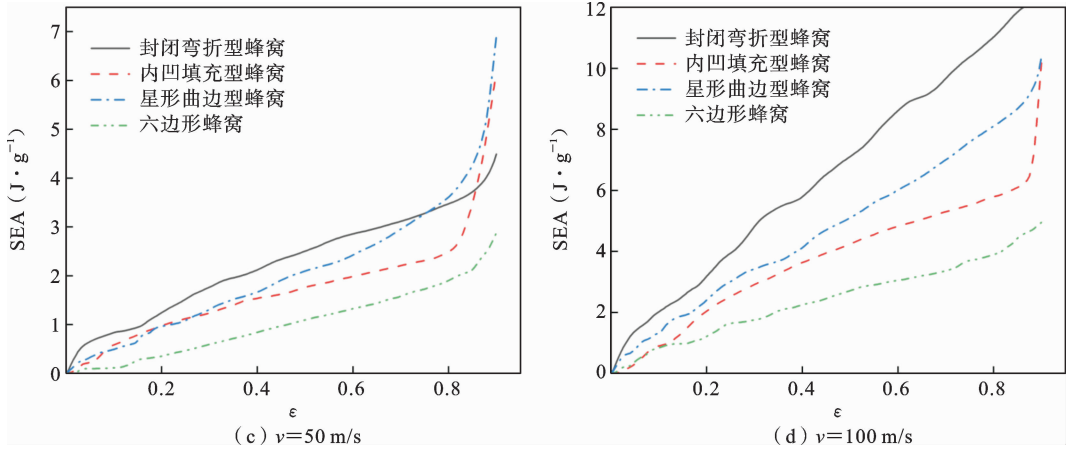


图 8 冲击速度对蜂窝结构  $E_{sea}$  的影响

Fig. 8 Effect of impact velocity on honeycomb  $E_{sea}$

### 3 封闭弯折型蜂窝的耐撞性能

#### 3.1 结构参数化设计

为研究封闭弯折型蜂窝的耐撞性能,对该结构进行参数化设计. 改变胞元的几何参数,得到不同的

胞元结构,评估其耐撞性能. 本文将研究弯折角度和相对密度对封闭弯折型蜂窝结构抗冲击性能的影响. 图 9 给出了各单胞结构示意图,其中,弯折角为  $\alpha$ ;胞元高度为  $L$ ,底板宽度为  $d$ ,弯折边长度为  $l$ ,厚度为  $b$ . 封闭弯折型蜂窝的结构参数如表 3 所示.

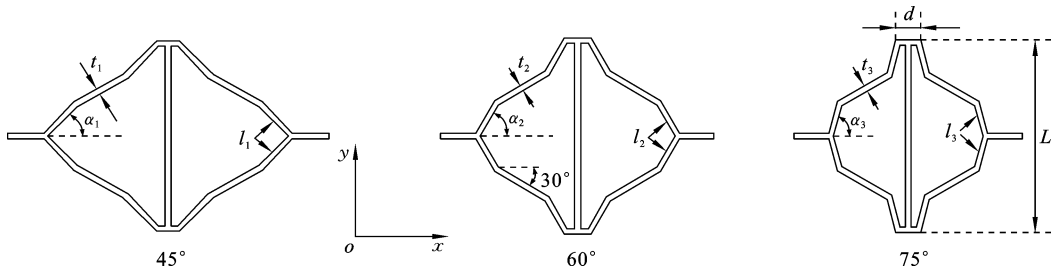


图 9 封闭弯折型蜂窝单胞结构

Fig. 9 Closed bent honeycomb cell structure

表 3 封闭弯折型蜂窝胞元参数

Table 3 Closed bent cellular cell parameters

蜂窝结构	$L$ (mm)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$l$ (mm)	$t$ (mm)	$d$ (mm)
45°封闭弯折型蜂窝	8.5	45	2.07	0.352	1.5
60°封闭弯折型蜂窝	8.5	60	1.69	0.3	1.5
75°封闭弯折型蜂窝	8.5	75	1.52	0.258	1.5

#### 3.2 结果与讨论

图 10 给出了 45°、60°、75°封闭弯折型蜂窝结构的名义应力-应变曲线随冲击速度变化规律. 在低速

和中低速冲击时,由于三种结构胞元几何相似性,其应力-应变曲线展现出相近的变化趋势,平台应力波动范围控制在 10% 以内. 60°、75°封闭弯折型蜂窝的

名义应力相近且大于 45° 结构, 名义应力急剧上升的时间也早于 45° 封闭弯折型蜂窝, 说明这两种结构的缓冲吸能的时间短于后者. 这是因为 45° 封闭弯折型蜂窝结构的孔隙率较大, 被压密实的时间较长. 在中速和高速冲击时, 由于应变率效应的影响,

名义应力有较大的波动, 且三种封闭弯折型结构的波动周期一致, 且每个周期的长度与胞元的高度一致. 这是因为在高速冲击时, 其结构的变形特征是逐层依次被压溃.

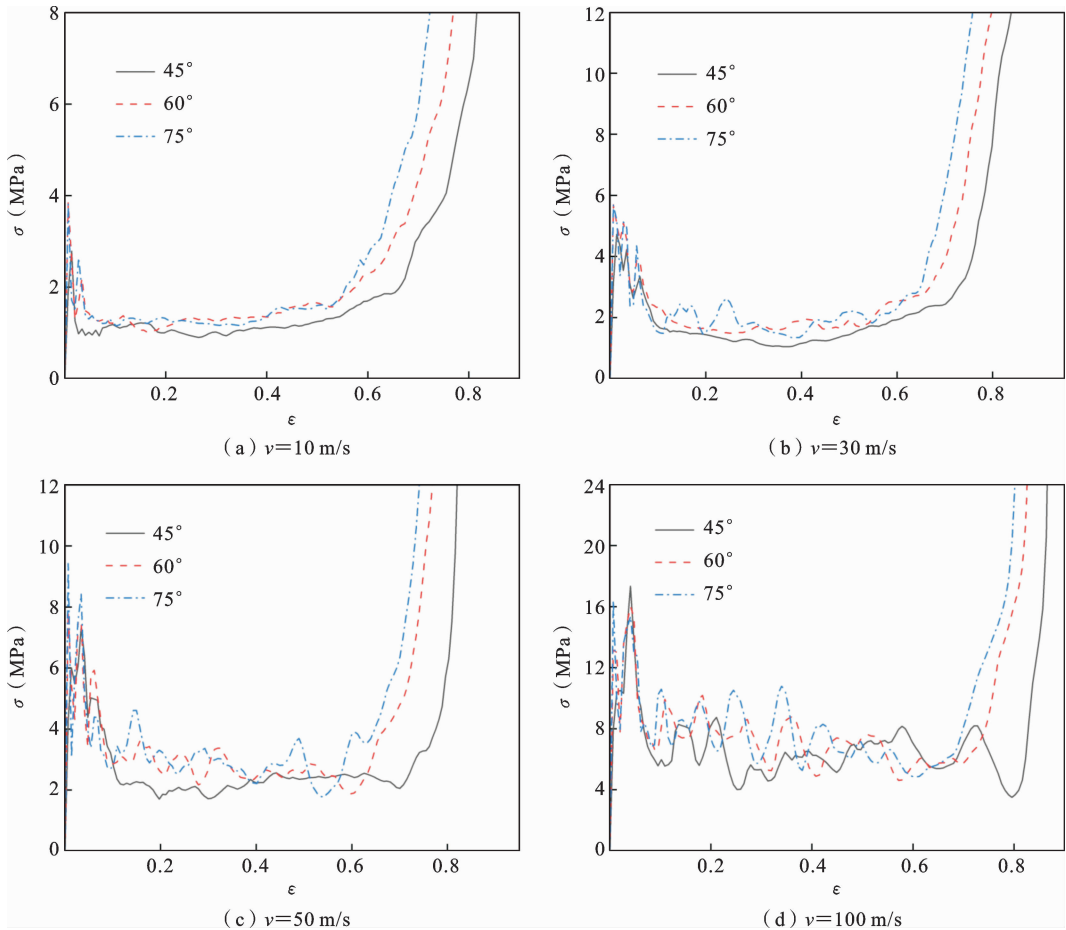


图 10 封闭弯折型蜂窝结构在不同速度下名义应力-应变曲线

Fig. 10 Closed stress-strain curve at the impact end of a bending honeycomb structure

蜂窝结构在压缩过程中, 主要通过蜂窝胞壁发生变形坍塌从而吸收能量. 本文将初始峰值应力至密实时的平均应力称为平台应力  $\sigma_p$ <sup>[19]</sup>, 平台应力的大小决定结构的吸能能力.

蜂窝平台应力定义为

$$\sigma_p = \frac{1}{\epsilon_e - \epsilon_s} \int_{\epsilon_s}^{\epsilon_e} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (10)$$

$\epsilon_s$  为初始应力达到峰值所对应的名义应变, 密实应变  $\epsilon_e$  由能量吸收效率方法确定.

基于能量吸收效率方法, 密实应变<sup>[20]</sup>可表示为

$$\left. \frac{d\eta(\epsilon)}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_e} = 0 \quad (11)$$

式中,  $\eta$  为多胞试件在冲击过程中吸收的总能量与相应名义应变的比值, 即:

$$\eta = \frac{\int_0^{\epsilon_e} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon_e)} \quad (12)$$

如图 11 所示, 为封闭弯折型蜂窝结构的能量吸收效率曲线. 能量吸收效率曲线上最后达到极大值点时刻所对应的应变值定义为蜂窝结构密实应变点.

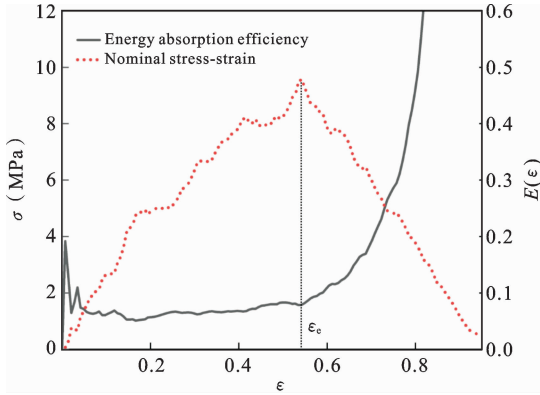


图 11 轴向冲击下封闭弯折型蜂窝的能量吸收效率曲线和名义应力-应变曲线

Fig. 11 Energy absorption efficiency curve and nominal stress-strain curve of a closed bent honeycomb under axial impact

图 12 给出了不同冲击速度下三种封闭弯折型蜂窝结构被压溃时所对应的密实应变. 由图 12 可知, 随着冲击速度的提升, 密实应变值也随之上升. 这是由于在高速加载中, 应力波在传播过程中, 会导致局部变形和致密化延迟. 在各种速度下 45° 封闭弯折型蜂窝的密实应变大于其他两种, 这也验证了前文名义应力-应变曲线得到的结论, 另外两种结构在各速度下互有高低.

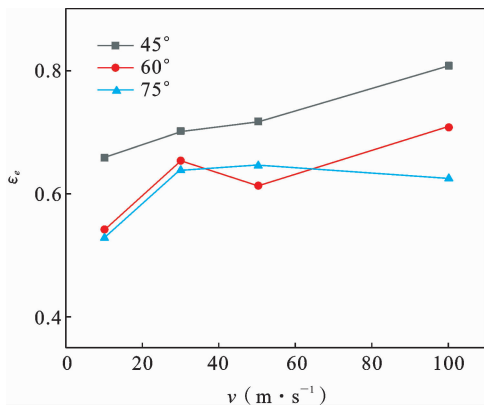


图 12 冲击速度对封闭弯折型蜂窝结构的密实应变的影响

Fig. 12 Effect of impact velocity on the dense strain of a closed bending honeycomb structure

速度下的能量吸收情况. 从低速到高速冲击, 封闭弯折型蜂窝结构的能量吸收曲线展现出相似的变化特征, 这种特征与其平台应力的变化行为吻合. 60° 和 75° 封闭弯折型蜂窝的比吸能曲线基本一致, 高于 45° 封闭弯折型蜂窝约 20% 到 28%. 这是因为这两种结构相对于后者结构更加紧凑, 胞元相对更多, 导致抗冲击能力更强, 但也意味着会更早进入致密化阶段. 这也导致这两种结构比吸能  $E_{sea}$  急剧上升要快于 45° 封闭弯折型蜂窝.

相对密度是影响蜂窝结构平台应力的关键因素. 为深入研究不同封闭弯折型蜂窝结构的平台应力与相对密度之间的关系, 通过调整结构壁厚, 构建了低、中、高三种相对密度水平的模型, 其具体结构参数详见表 4. 在同一密度下, 45° 弯折封闭时蜂窝胞元的厚度要高于另外两种.

表 4 各相对密度下封闭弯折型蜂窝结构参数

Table 4 Parameters of closed bent honeycomb structure at each relative density

Identifier	$\alpha$ (°)	$b$ (mm)	$\rho$
RD1	45	0.117	0.04518
	60	0.100	
	75	0.086	
RD2	45	0.350	0.13554
	60	0.300	
	75	0.258	
RD3	45	0.525	0.20331
	60	0.450	
	75	0.388	

图 14 给出了在各相对密度下三种封闭弯折型蜂窝结构在不同速度下的平台应力. 结果显示, 在同一密度下, 冲击速度提高, 平台应力也随之提高, 这与文献[21]结论一致. 相对密度的增加会显著增加各结构的平台应力. 在低阶密度时三种结构的应力水平相近, 随着密度的增加, 弯折角较大的两种结构平台应力值也明显高于 45° 弯折型蜂窝.

图 15 给出了在三种相对密度不同结构在 ( $v = 30$  m/s) 下的比吸能  $E_{sea}$ . 比吸能随相对密度的增加

图 13 给出了封闭弯折型蜂窝结构在不同冲击

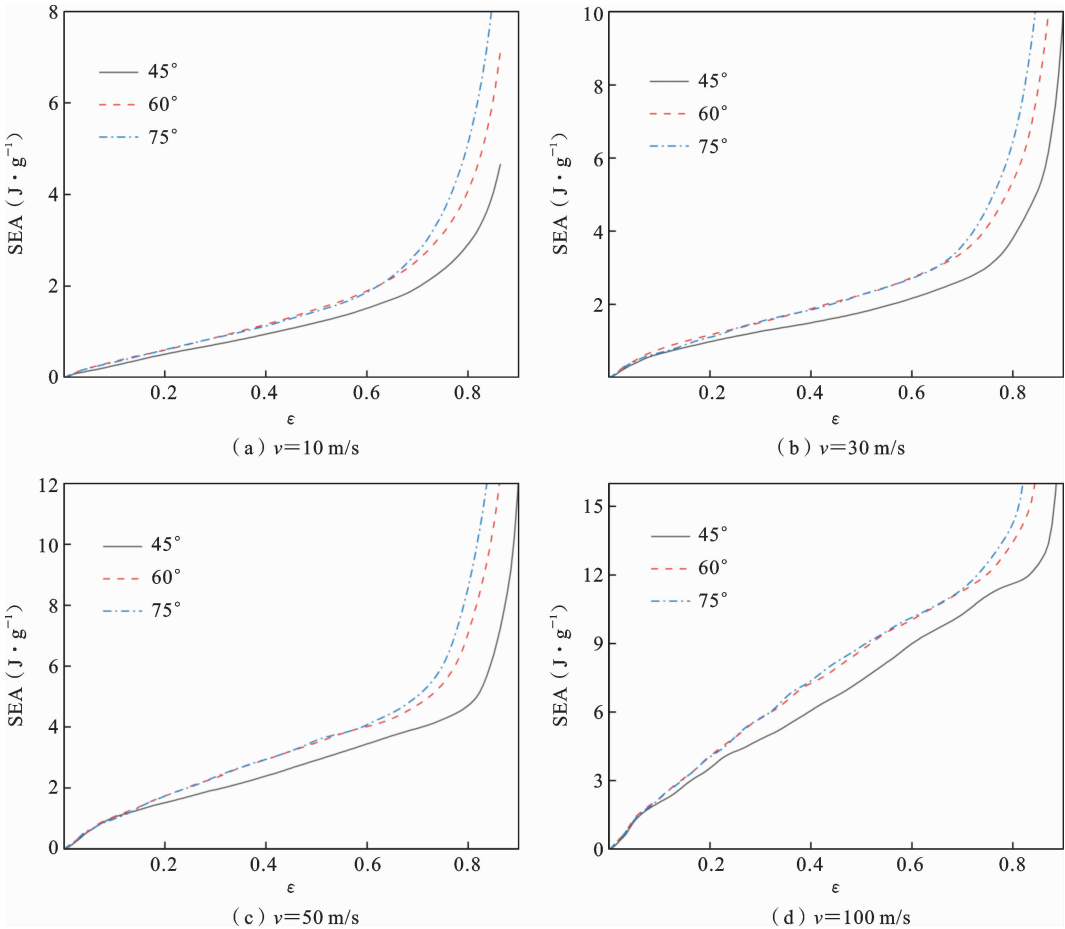


图 13 冲击速度对不同角度封闭弯折型蜂窝结构比吸能的影响

Fig. 13 Effect of impact velocity on specific energy absorption of closed and bent honeycomb structure at different angles

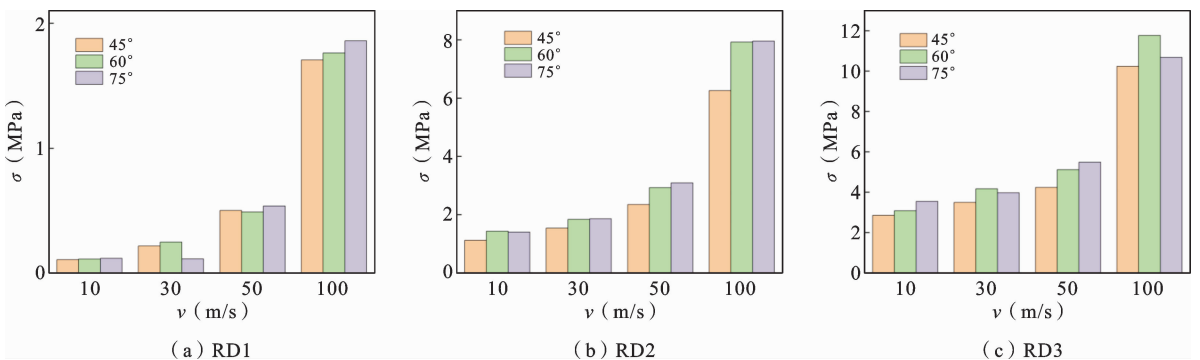


图 14 各相对密度封闭弯折型蜂窝结构的平台应力

Fig. 14 Platform stresses of closed bending honeycomb structures of each relative density

显著增加. 60° 封闭弯折型蜂窝在中阶密度 ( $\rho = 0.13554$ ) 和高阶密度 ( $\rho = 0.20331$ ) 下的比吸能相对于低阶密度 ( $\rho = 0.04518$ ) 提高了大约 122.5% 和 207.6%. 在低阶密度时, 60° 封闭弯折型蜂窝的比吸

能效果优于另外两种. 随着相对密度的增加, 高弯折角的封闭弯折型蜂窝比吸能的提升速度要快于低弯折角. 说明高弯折角的封闭弯折型蜂窝对相对密度的影响更为敏感.

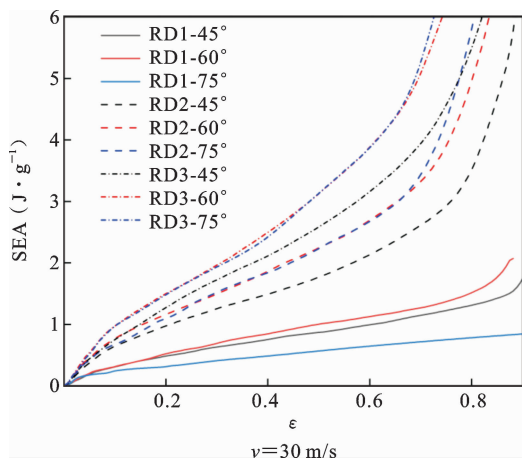


图 15 中速冲击时各相对密度封闭弯折型蜂窝结构的比吸能

Fig. 15 Specific energy absorption of closed bending honeycomb structures with relative density under medium-velocity impact

## 4 结论

通过显式动力学有限元方法,对本文提出的三种蜂窝结构的耐撞性能进行了研究得到以下主要结论:

(1) 三种蜂窝结构在不同冲击速度的作用下,变形模式与各自的胞元结构有关.封闭弯折型蜂窝依靠弯曲变形抵抗冲击,变形模式是多层胞元整体发生变形.内凹填充型蜂窝由于刚度较高,蜂窝胞元则是逐层发生变形.星形曲边型蜂窝由于负泊松比效应,蜂窝试件向内发生坍塌变形,且变形发生在试件中部.

(2) 在相对密度相同的情况下,随着冲击速度的增加,平台应力和比吸能均有增加,封闭弯折型蜂窝的平台应力以及比吸能在各冲击速度下优于其他结构.

(3) 弯折角这一参数对封闭弯折型蜂窝的耐撞性有着较大的影响,增大弯折角可以使封闭弯折型蜂窝的平台应力增大,但密实应变会减小,说明平台段吸收能量更多,但是吸能时间较短.

(4) 相对密度对封闭弯折型蜂窝的力学性能有着较大的影响.随着相对密度的增加,高弯折角的封闭弯折型蜂窝比吸能的提升速度要快于低弯折角,

相对密度对弯折角较大的封闭弯折型蜂窝影响更为明显.

## 参考文献

- [1] Wang Z G, Liu J F. Numerical and theoretical analysis of honeycomb structure filled with circular aluminum tubes subjected to axial compression[J]. Composites Part B, 2019, 165: 626-635.
- [2] Balci O, Coban O, Bora M O, et al. Experimental investigation of single and repeated impacts for repaired honeycomb sandwich structures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 682(12): 23-30.
- [3] Lee W. Fracture Prediction in Metal Sheets[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [4] 亓昌, 崔丽萍, 王吉旭, 等. 车用动力电池箱夹芯防护结构抗冲击性能仿真[J]. 振动与冲击, 2023, 42(10): 194-202. (Qi C, Cui L, Wang J X, Pei L Z, Yu C, Yang S. Simulation of impact resistance of sandwich protective structure for vehicle power battery pack[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(10): 194-202. (in Chinese))
- [5] Liu W, Wang N, Luo T, et al. In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure[J]. Materials & Design, 2016: 10084-10091.
- [6] 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. (Deng X L, Liu W Y. In-plane impact dynamics analysis of sinusoidal honeycomb structure with negative poisson's ratio[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 103-109. (in Chinese))
- [7] 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, 36(23): 223-231. (Han H L, Zhang X C. In-plane dynamic impact response characteristics of periodic 4-point star-shaped honeycomb structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(23): 223-231. (in Chinese))
- [8] 张宝庆, 蒋森. 旋转型负泊松比星形蜂窝结构能量吸收特性研究[J]. 固体力学学报, 2025, 46(1): 129-148. (Zhang B Q, Jiang S. Study on energy absorption characteristics of new negative Poisson's ratio

- star-shaped honeycomb structure[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2025, 46(1): 129-148. (in Chinese))
- [9] 王腾博, 秦东晨, 王婷婷, 等. 内凹工字形蜂窝结构的内面冲击性能[J]. *塑性工程学报*, 2022, 29(8): 183-192. (Wang T B, Qin D C, Wang T T, et al. In-plane impact performance of concave I-shaped honeycomb structure [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2022, 29(8): 183-192. (in Chinese))
- [10] Zhu Y F, Xu F X. et al. In-plane dynamics characteristics and multi-objective optimization of negative Poisson's ratio honeycomb structure with power function curve[J]. *Int. J. Automot. Technol*, 2023, 24: 1285-1303.
- [11] Wu H X, Liu Y, Zhang X C. In-plane crushing behavior and energy absorption design of composite honeycombs[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2018, 34(6): 1108-1123.
- [12] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [13] 孔志成, 胡俊, 郝英奇. 内旋层级类蜂窝结构的面外力学性能[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(1): 014202. (Kong Z C, Hu J, Hao Y Q. Out-of-plane mechanical behaviors of intorsion hierarchical honeycomb-like structures [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(1): 014202. doi: 10.11858/gy-wlxb.20220632. (in Chinese))
- [14] 万武举, 肖俊华, 郭之熙. 梯度双材料负泊松比蜂窝结构的面内倾斜冲击失效与吸能研究[J]. *固体力学学报*, 2025, 46(1): 93-104. (Wan J W, Xiao J H, Guo Z X. In-plane oblique loading impact failure and energy absorption of gradient bimaterial honeycomb structure with negative Poisson's ratio [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2025, 46(1): 93-104. (in Chinese))
- [15] Li Chengbing, Feng Xupeng, Li Rui, et al. Analysis of impact response characteristics of honeycomb filled with ribbed plate structure[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2025, 47: 226.
- [16] Tao Y, Chen M J, Chen H S, et al. Strain rate effect on the out-of-plane dynamic compressive behavior of metallic honeycombs: experiment and theory [J]. *Composite Structures*, 2015, 132: 644651.
- [17] 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, 28(11): 115-123. (Qiao J, Li M, Miao H L. In-plane mechanical property of tandem gradient honeycomb structures [J]. *Chinese Journal of Plastic Engineering*, 2021, 28(11): 115-123. (in Chinese))
- [18] 李成兵, 李锐, 张吉涛, 叶强, 李仁富. 多阶式层级梯度蜂窝结构的共面冲击响应[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(3): 034203. (Li C B, Li R, Zhang J T, Ye Q, Li R F. In-plane impact response of multi-order hierarchical gradient honeycomb structure [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(3): 034203. (in Chinese))
- [19] 李成兵, 张吉涛, 叶强, 等. 复合蜂窝结构的冲击响应特性[J]. *塑性工程学报*, 2023, 30(9): 195-203. (Li C B, Zhang J T, Ye Q, et al. Impact response characteristics of composite honeycomb structures [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30(9): 195-203. (in Chinese))
- [20] 韩会龙, 张新春, 王鹏. 负泊松比蜂窝材料的动力学响应及能量吸收特性[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(1): 013103. (Han H L, Zhang X C, Wang P. Dynamic responses and energy absorption properties of honeycombs with negative Poisson's ratio [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(1): 013103. (in Chinese))
- [21] 白江畔, 张新春, 沈振峰, 吴鹤翔. 冲击载荷下多胞元薄壁结构的动态压溃行为研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(18): 145-152. (Bai J P, Zhang X C, Shen Z F, Wu H X. Dynamic crushing behaviors of multi-cell thin-walled structures under out-of-plane impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(18): 145-152. (in Chinese))

## Research on the Crashworthiness of New Honeycomb Structures

Chengbing Li<sup>1,2</sup>   Ke Xiao<sup>1</sup>   Rui Li<sup>3</sup>   Xupeng Feng<sup>1</sup>   Junheng Peng<sup>1</sup>

*(<sup>1</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500)*

*(<sup>2</sup>Oil and Gas Equipment Technology, Sharing and Service Platform of Sichuan Province, Chengdu, 610500)*

*(<sup>3</sup>Chengdu Aerospace Communication Equipment Co., Ltd., Chengdu, 610051)*

**Abstract** To improve the impact resistance of metal honeycomb structures, three new types of impact protection structures, namely, closed bent honeycomb, concave filled honeycomb, and star-shaped curved honeycomb, were proposed and analyzed via finite element simulations using ANSYS/LS-DYNA. The deformation patterns and energy absorption capacities were evaluated at different impact velocities. Results showed that deformation patterns were related to the cell element structure and impact velocity. The closed bent honeycomb exhibited superior nominal stress and energy absorption efficiency compared to the other structures. Geometric parameters of honeycomb cell elements do not affect the trend of the nominal stress-strain curves. Increasing the bending angle of the closed bent honeycomb increased platform stress and decreased dense strain. Under medium-velocity impact, the platform stress of the 60° closed bent honeycomb structure increased by 19.5% compared to the 45° structure. Increasing relative density significantly improved energy absorption efficiency; the specific energy absorption of the high-density 60° closed bent honeycomb structure increased by 207.6% compared to the low-density structure.

**Key words** honeycomb structure, deformation pattern, platform stress, energy absorption efficiency