

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0262

## 高共面/异面抗冲击承载能力的 新型蜂窝设计及吸能评估\*

廖 就<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 梁方正<sup>1</sup>, 王佳铭<sup>1</sup>, 刘婉婷<sup>1</sup>, 李 萌<sup>2</sup>, 冯建文<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室, 北京 100094;

3. 中国民用航空适航审定中心, 北京 100102)

**摘要:** 针对传统蜂窝共面和异面承载能力差距太大的问题, 提出了胞壁弓字形弯折蜂窝、层间组合蜂窝和折叠蜂窝等 3 种新型蜂窝, 建立了新型蜂窝的有限元模型并分析了其变形模式和承载能力。结果表明, 在相对密度一致的前提下, 与传统正六边形蜂窝相比, 这 3 种新构型蜂窝均缩小了共面和异面方向承载能力的差距。其中胞壁弓字形弯折蜂窝的共面/异面承载比提高了 21.3 倍; 层间组合蜂窝两个共面方向承载能力悬殊, 承载能力更强的共面方向与异面的承载比值提高了 42 倍; 折叠蜂窝则提高了 21.3 倍。研究结果可以为抗多向冲击载荷作用下的蜂窝结构设计提供新思路 and 参考。

**关键词:** 蜂窝; 胞元构型; 吸能; 共面; 异面

中图分类号: O347

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## Design and evaluation of new honeycomb configurations with high in-plane /out-of-plane loading-carrying capacity under impact

LIAO Jiu<sup>1</sup>, LI Zhigang<sup>1</sup>, LIANG Fangzheng<sup>1</sup>, WANG Jiaming<sup>1</sup>, LIU Wanting<sup>1</sup>, LI Meng<sup>2</sup>, FENG Jianwen<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

3. Airworthiness Certification Center, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100102, China)

**Abstract:** An aluminum honeycomb is widely used in the field of impact cushioning because of its excellent performance. In order to solve the problem of large difference between the in-plane and out-of-plane load-carrying capacities of traditional honeycombs, three new configurations of honeycombs were proposed as follows: bow-shaped, staggered and folded configurations. The finite element models for these new honeycombs were established, and their deformation modes and load-carrying capacities were analyzed. The results show that under the same relative density, compared with the traditional hexagonal honeycombs, the three new configurations can reduce the difference of load-carrying capacity in in-plane and out-of-plane directions. The average in-plane/out-of-plane (I/O) ratio of loading-carrying capacity of the bow-shaped honeycombs in two coplanar directions increased by 21.3 times. For the staggered honeycomb, the load-carrying capacity of each in-plane direction is of great difference, in which the I/O ratio of the excellent direction is increased by 42 times due to its special structure. For the folded honeycomb, the I/O ratio is increased by 21.3 times on average. The research results can provide a new idea and reference for the design of honeycomb structure under multi-directional impact load.

**Keywords:** honeycomb; cell configuration; energy absorption; in-plane; out-of-plane

\* 收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-11-30

基金项目: 装备预研教育部联合基金(青年人才)(6141A02033121); 中央高校基本科研业务费资助项目(2019JBM048); 载人航天预研项目(040202)

第一作者: 廖 就(1997—), 男, 硕士, 19126051@bjtu.edu.cn

通信作者: 李志刚(1983—), 男, 博士, 副教授, zgli@bjtu.edu.cn

蜂窝结构由于其密度低、压缩变形能力强且变形可控等优点,被广泛应用于碰撞缓冲吸能领域。但蜂窝是一种各向异性结构,研究表明,常规铝蜂窝通常只在异面方向具有很好的承载能力,在共面方向承载很弱,异面承载性能远高于共面<sup>[1]</sup>。但在作为缓冲结构的实际应用过程中,承受的冲击载荷方向往往具有一定的不确定性,例如汽车的不同角度碰撞、直升机方向不确定的坠毁、城市安全岛防护等场景。在这些实际应用环境下,蜂窝除了要提供必要的异面承载能力之外,共面方向也要具备一定的强度,因此传统蜂窝共面异面承载能力差距大的问题就限制了蜂窝的实际应用。跟与蜂窝替代使用的泡沫结构相比,泡沫结构(如泡沫铝)虽具有近似各向同性的特征,能够多向承载,但是相比于蜂窝结构,泡沫铝是逐渐压实的过程,承载力曲线是逐渐上升,不能保持稳定的平台段;另外泡沫铝的有效压缩比与蜂窝相比更小,比吸能也相对要小。因此,本文的目标是设计高共面/异面抗冲击能力的新型蜂窝构型并对其吸能效果进行评估,提高共面/异面的蜂窝承载吸能比例。

目前在对蜂窝结构的研究中,主要集中在共面或异面某一个特定压缩方向下的分析。在异面方向的研究中,部分学者<sup>[2-4]</sup>通过理论研究的方式为蜂窝结构的缓冲设计提供思路,其中荣吉利等<sup>[2]</sup>基于超简化折叠单元理论,给出了六边形蜂窝异面压缩时的平台应力计算的理论公式。还有部分学者的研究聚焦在异面承载性能优良的新型蜂窝结构的设计上,何彬等<sup>[5]</sup>提出了一种基于菱形和圆形的新型蜂窝,通过在中高速冲击工况下与传统蜂窝进行对比,发现新型蜂窝异面承载能力和能量吸收能力较好。杜义贤等<sup>[6]</sup>提出了一种内部嵌套菱形结构的新型 Y 形周期性点阵结构,仿真结果表明该构型承载性能更加优越。Yang 等<sup>[7]</sup>在传统六边形蜂窝结构基础上引入马蹄形结构可以提升结构的异面承载能力和比吸能。王中钢等<sup>[8]</sup>、Wang 等<sup>[9]</sup>通过在六边形蜂窝内部合理布置加强筋,通过有限元仿真的方式研究了不等厚加强筋对于正六边形蜂窝的异面承载能力影响,并且提出了两种新的加强蜂窝构型,分别是双六边形蜂窝以及内部圆加筋蜂窝,并建立了其平均压缩力和比吸能的理论模型,并通过仿真的方式加以验证,研究结果表明,新型加强蜂窝的平均压缩力和比吸能均优于传统六边形蜂窝和三角形蜂窝。

在蜂窝共面方向的研究中,胡玲玲等<sup>[10-11]</sup>研究了不同胞元构型和排列方式对蜂窝面内冲击力学性能的影响,发现不同的胞孔构型导致胞壁的受力状态不同,影响蜂窝的宏观力学性能。Liu 等<sup>[12]</sup>研究了冲击载荷作用对不同胞元微拓扑结构的动态冲击性能影响。何强等<sup>[13]</sup>建立了具有固定相对密度的分层屈服强度梯度圆形蜂窝模型,研究表明屈服强度梯度的变化使得蜂窝材料的局部变形模式发生变化,合理调节屈服强度梯度的变化可以减小初始峰值应力。为改善传统蜂窝共面方向承载能力较弱的缺点,不少学者提出了共面承载能力优良的新型蜂窝。Hedayati 等<sup>[14]</sup>提出了一种新型的八角形蜂窝,并与传统构型蜂窝进行了比较,发现八角形蜂窝的屈服应力和弹性模量值与正六边形蜂窝相接近,且优于其他蜂窝;Thomas 等<sup>[15]</sup>在铝合金蜂窝胞元内增加水平加强筋以提高其刚度,采用试验和仿真的手段研究了这种加强型六边形蜂窝的共面刚度和耗能性能。也有学者采用具有负泊松比的胞元构建新型蜂窝,卢子兴等<sup>[16]</sup>采用数值方法,研究了负泊松比蜂窝在不同冲击速度下的变形模式和能量吸收等动力学响应特性。Hu 等<sup>[17]</sup>对比了负泊松比的内凹六边形蜂窝与传统六边形蜂窝的面内刚度,发现等壁厚的内凹六边形蜂窝的刚度高于六边形蜂窝,但在等相对密度的前提下,内凹六边形蜂窝的泊松比绝对值必须大于特定值时,才有更高的面内刚度。马瑞君等<sup>[18]</sup>提出了一种新型改进内凹六边形蜂窝,通过数值仿真研究发现该构型具有三维负泊松比特性,该性能使蜂窝在共面压缩时具有更高的平台应力。

上述关于蜂窝的研究基本上都集中在蜂窝单一方向的承载能力,尚缺少同时兼顾共面和异面两个方向承载能力的研究。因此本文提出了 3 种新的高共面/异面抗冲击承载能力的新构型蜂窝,并对它们共面及异面的承载能力进行了仿真评估,研究成果可为多方向载荷冲击下蜂窝结构设计提供参考依据。

## 1 新构型蜂窝设计

本节提出了 3 种高共面/异面抗冲击承载能力的新构型蜂窝。

### 1.1 胞壁弓字形弯折蜂窝

传统六边形蜂窝承受共面压缩时仅依靠胞壁从折痕处折叠弯曲来吸能,内部孔隙无支撑导致共面

方向承载能力很弱, 直接导致蜂窝结构的共面异面承载能力差距很大。因此, 本构型以传统六边形蜂窝为出发点, 将初始竖直胞壁每隔一段距离  $a$  向内部进行一次弯折, 弯折长度为  $x$ , 弯折的深度确保三部分弯折胞壁可以相互接触, 从而能够在共面方向上相互支撑而承载吸能, 模型的胞元边长为  $l$ , 壁厚为  $t$ , 高度为  $h$ , 设计思路如图 1 所示。该蜂窝一方面以诱导变形思路规范了蜂窝异面压缩时的变形次序, 另一方面内部折叠胞壁形成共面支撑肋板, 承受共面压缩时, 可以提供有效支撑, 以提升共面方向的承载能力, 最后达到缩小共面和异面承载能力差距的设计目的。

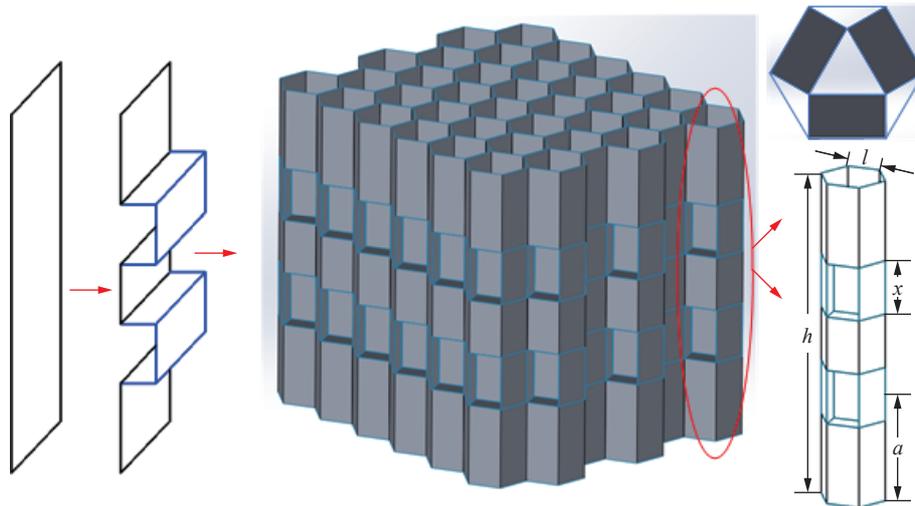


图 1 胞壁弓字形弯折蜂窝设计思路

Fig. 1 Design of the bow-shaped honeycomb

## 1.2 层间组合蜂窝

传统蜂窝构型的胞壁均沿异面一个方向进行扩展延伸, 这样的结构具有单一方向性的特点, 导致蜂窝共面方向和异面方向承载能力具有较大的差距。因此本构型拟通过对蜂窝结构进行分层组合, 使隔层蜂窝在空间中具备一定的交错角度来打破传统蜂窝结构的承载方向单一性, 进而达到缩小共面异面承载能力差距的目的。考虑到六边形蜂窝的胞元边界之间相互有交叉, 不容易实现层间组合的设计思路, 因此本构型在设计时以传统的三角形蜂窝为出发点, 隔层蜂窝在空间中交错  $90^\circ$ , 进而组合为一整体。本构型胞元边长为  $l$ , 壁厚为  $t$ , 模型高度为  $h$ , 设计思路如图 2 所示, 该层间组合蜂窝突破传统蜂窝胞壁结构方向的单一性, 力求共面和异面方向上的承载结构趋同, 最后达到缩小共面、异面方向上的承载和吸能差距的设计目的。

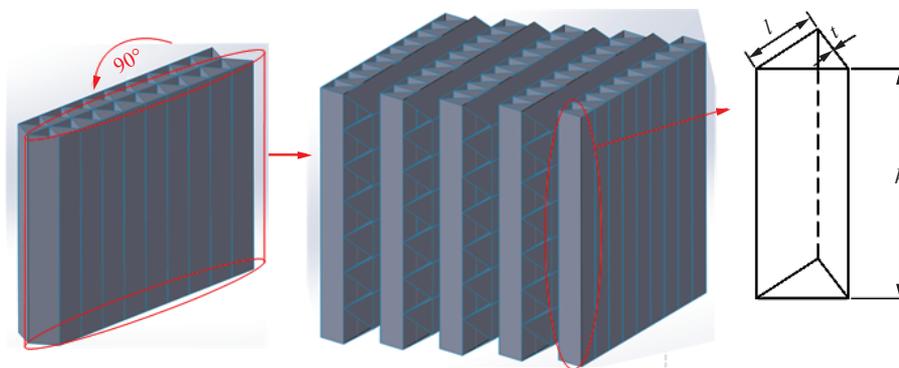


图 2 层间组合蜂窝设计思路

Fig. 2 Design of the staggered honeycomb

### 1.3 折叠蜂窝

由于传统蜂窝结构的特殊性, 导致共面异面承载能力相差甚远。基于此, Zhai 等<sup>[19]</sup> 依据 Miura 折纸原理提出了一种共面承载能力优良的折叠蜂窝, 通过引入初始折痕对蜂窝进行折叠设计以改变传统蜂窝结构的缓冲特性, 控制蜂窝结构的变形模式, 但前期并未进行共面和异面承载能力的对比。根据折纸原理, 将蜂窝结构沿面内假设为展开后的平面, 沿脊线向内、谷线向外折叠, 折叠后有两个折叠角  $\alpha$  和  $\gamma$  ( $\alpha$  为蜂窝侧面中两条棱之间的夹角,  $\gamma$  为蜂窝棱边与水平线的夹角)。六边形胞元边长为  $l$ , 壁厚为  $t$ , 模型的整体高度为  $h$ , 设计过程如图 3 所示。

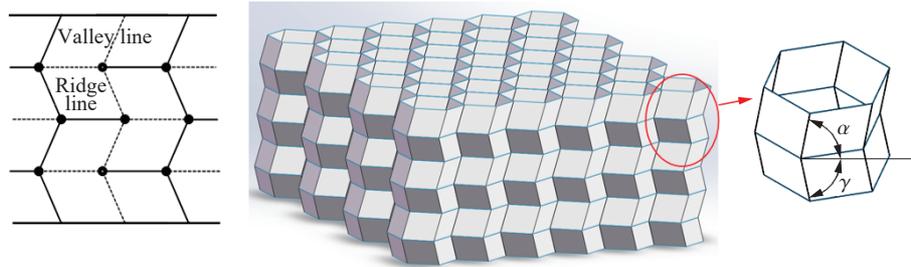


图 3 折叠蜂窝设计思路

Fig. 3 Design of the folded honeycomb

## 2 不同构型蜂窝动态压缩有限元模型建立及仿真分析

为了验证建立的高共面/异面新型蜂窝有限元模型的有效性, 本文将首先通过对常规的六边形蜂窝进行仿真分析和压缩试验, 通过仿真与试验的对比以验证建模和仿真方法的正确性, 然后在此基础上, 利用相同的建模方法, 建立了新构型蜂窝的共面及异面动态压缩的仿真模型以进行后续的抗冲击性能评估。

### 2.1 铝蜂窝建模及仿真方法验证

本次试验用 3003 铝蜂窝采用波纹法制作, 胞元短边长  $c=6$  mm, 长边长  $l=10.4$  mm, 扩展角  $\alpha=120^\circ$ , 壁厚  $t=0.045$  mm, 相对密度为 0.006, 试验所用蜂窝试样为长宽为 77 mm, 高为 36 mm 的长方体试件, 如图 4 所示。本次试验在 TA ElectroForce 3 300 试验机上进行, 试验过程中分别用力传感器和线性位移传感器测量压力和试件位移。在  $10\text{ s}^{-1}$  应变率下进行了蜂窝异面及共面压缩试验, 如图 4(c) 所示。根据试验机压头的力和位移传感器采集得到的载荷位移曲线, 根据  $\sigma = F/A$ ,  $\varepsilon = d/H$ , (其中  $F$  为压力,  $A$  为蜂窝试件垂直压缩方向的横截面积,  $d$  是压头位移,  $H$  为蜂窝试件高度) 转化得到应力应变曲线。

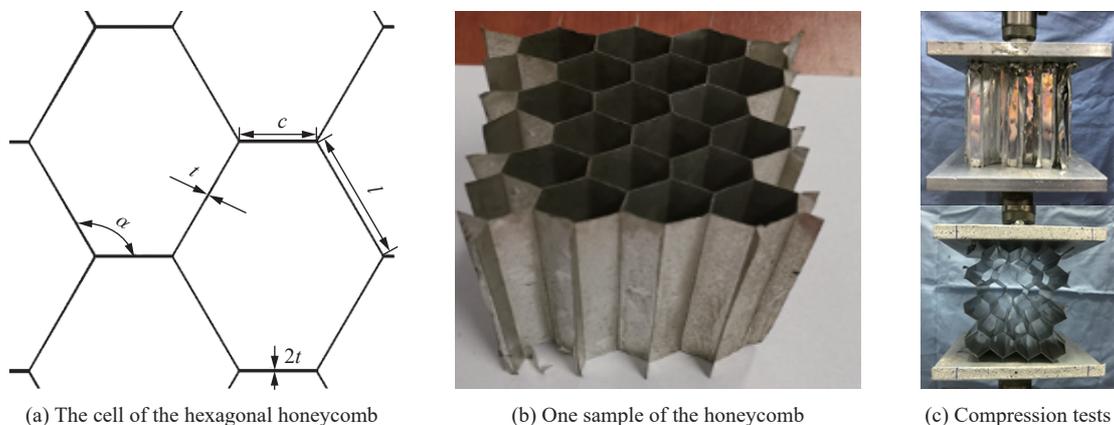


图 4 蜂窝压缩试验

Fig. 4 Compression tests on honeycombs

基于 HyperMesh 和 LS-DYNA 平台建立铝蜂窝异面及共面的动态压缩模型。其中铝蜂窝介于上下两块刚性平板中间, 下刚性板施加全固定约束, 上刚性板只有压缩方向 1 个移动自由度。对上刚性板施加强制位移使其匀速冲击蜂窝。另外, 两端刚性板与蜂窝之间设置为自动面-面接触, 蜂窝自身设置为自接触以模拟铝蜂窝自身之间的接触, 设置铝蜂窝自接触摩擦系数为 0.1, 铝蜂窝与刚性板间的摩擦系数为 0.3。

两端刚性墙采用刚性材料(MAT\_20)模拟。蜂窝采用多段线性弹塑性模型(MAT\_24)进行模拟, 材料参数由 3003 铝蜂窝的基体材料试验得出, 弹性模量为 70 GPa, 密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为 0.35, 屈服应力为 200 MPa。模型采用四节点四边形壳单元进行网格划分, 经过网格收敛性分析, 网格大小选择为 0.3 mm, 厚度方向设置 5 个积分点。

为了确定蜂窝有限元模型的有效性, 利用上述仿真建模方法, 建立了与试验对应的有限元模型, 进行仿真模型的验证。由于试验过程中未采用高速摄像机, 缺少试验过程照片。对于该模型, 仅进行了应力应变曲线的对比。其中 10 s<sup>-1</sup> 应变率冲击工况下的异面及共面的仿真与试验所得到的应力-应变曲线对比分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。可以看出, 异面和共面压缩时试验和仿真的应力应变曲线基本保持一致, 平台应力与试验数值接近, 表明该模型具有较好的精度。

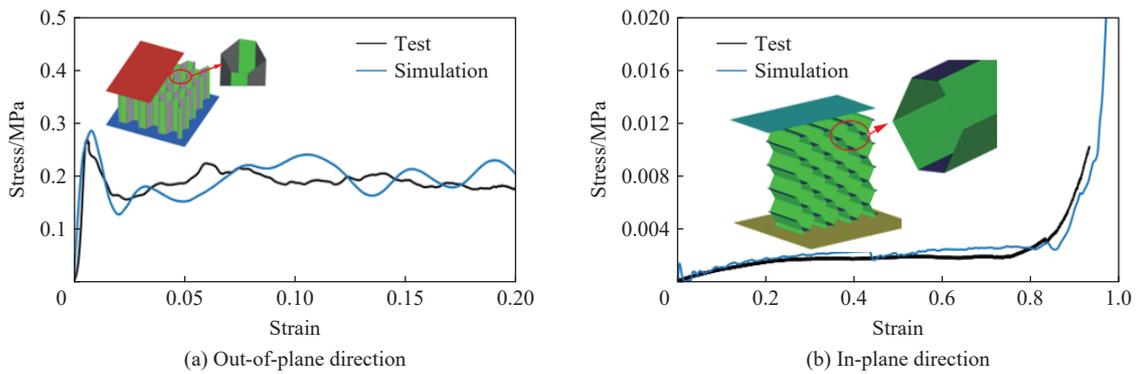


图 5 仿真结果试验验证

Fig. 5 Comparison of the compressive stress-strain curves between test and simulation

为了进一步验证变形模式, 参考文献 [20] 中 10 m/s 压缩速度的蜂窝异面压缩工况, 按照文献中给出的蜂窝尺寸和材料参数进行了仿真分析, 应力应变曲线及仿真过程对比分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 仿真与试验过程均表现出蜂窝从冲击端对侧发生规则的褶皱变形致使模型逐步压溃, 而且平台应力吻合结果较好, 进一步验证了该模型的精度。

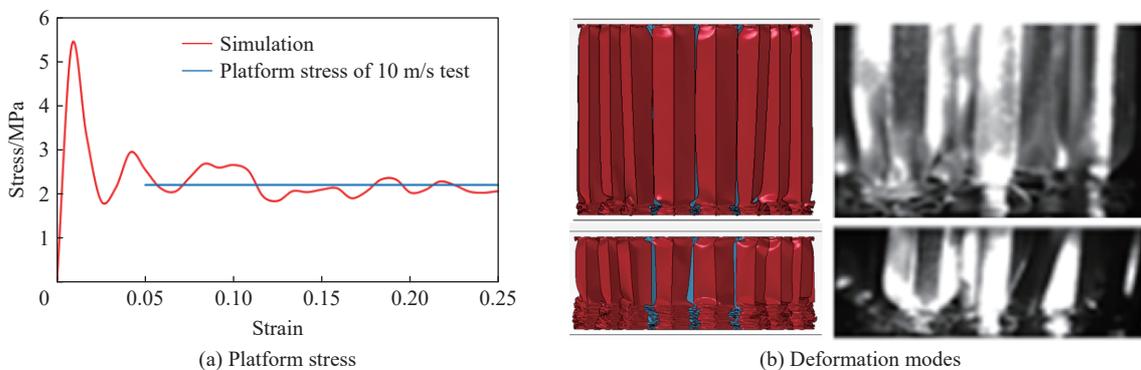


图 6 在 10 m/s 速度下试验和仿真的对比

Fig. 6 Comparison of the platform stress and deformation model between test and simulation at 10 m/s

## 2.2 新构型蜂窝仿真模型建立

按照 2.1 节所示的仿真建模方法, 统一在 100/s 的应变率冲击工况下进行新构型蜂窝异面及共面的动态压缩仿真分析。考虑到对于不同胞元构型的蜂窝结构, 相对密度不同会导致其力学性能相差较大<sup>[10]</sup>, 因此为研究不同构型对蜂窝承载能力的影响, 本文首先保证以下 3 种新构型蜂窝的相对密度均为 0.02, 且壁厚为 0.03 mm, 蜂窝高度为 30 mm, 胞元数目均保持一致。蜂窝结构的相对密度即蜂窝块的密度与其基体材料的密度之比。对于胞壁弓字形弯折蜂窝, 取其基本单元进行计算, 其相对密度的表达式为  $\rho^* = \frac{8\sqrt{3}+4t}{9} \frac{t}{l} + \frac{4}{45}t$ , 层间组合蜂窝相对密度与三角形蜂窝一致, 相对密度  $\rho^* = 2\sqrt{3} \frac{t}{l}$ <sup>[21]</sup>; 折叠蜂窝相对密度  $\rho^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l}$ 。3 种新构型蜂窝的模型尺寸如表 1 所示。

表 1 不同构型蜂窝的尺寸

Table 1 The sizes of different honeycombs

蜂窝类型	$h/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$a/\text{mm}$	$x/\text{mm}$	$\alpha/(\text{°})$	$\gamma/(\text{°})$	相对密度	质量/g	体积/ $\text{mm}^3$
胞壁弓字形弯折蜂窝	30	3.43	0.03	10	5			0.02	2.607	50 434
层间组合蜂窝	30	5.2	0.03					0.02	1.112	19 670
折叠蜂窝篇	30	1.73	0.03			75	75	0.02	0.745	13 733

### 2.2.1 胞壁弓字形弯折蜂窝仿真模型建立

按照 2.1 节经过验证的仿真建模方法, 建立了胞壁弓字形弯折蜂窝的有限元模型如图 7 所示。

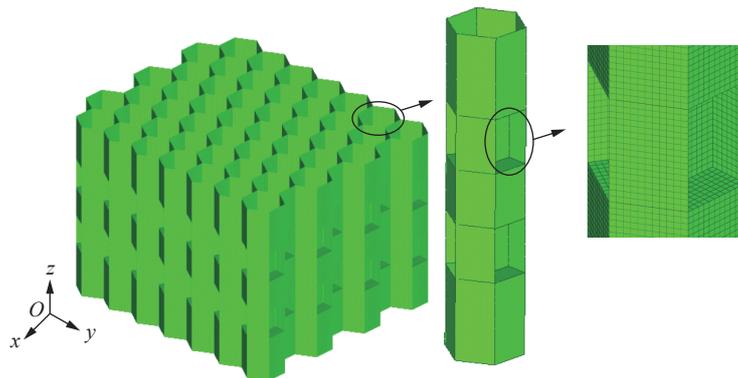


图 7 胞壁弓字形折叠蜂窝仿真模型

Fig. 7 The finite element model of the bow-shaped honeycomb

胞壁弓字形弯折蜂窝异面动态压缩的变形过程如图 8 所示。从图 8 可以看出, 异面沿  $z$  轴方向压缩时, 压缩过程明显两段化, 类似于具有交叉分层梯度特性的串联式组合蜂窝, 模型由折叠胞壁相互接触形成的三角形蜂窝和初始六边形蜂窝两部分交叉分布构成, 而不是单纯按照梯度进行排列的。从变形过程来看, 两部分中六边形蜂窝的承载能力较低, 因此首先发生六边形胞壁部分(如图 8(a) 中红色椭圆区内所示)承受较高应力, 从下至上依次发生周期性的折叠变形, 表现在图 9 应力应变曲线中的第 1 个平台段。当前序蜂窝也就是六边形蜂窝部分压缩密实之后, 内部三角形蜂窝才会发生周期性折叠变形使模型进一步坍塌, 如图 8(b) 中黄色矩形区内所示, 此时结构的承载能力迅速提高, 表现在图 9 中异面压缩应力应变曲线的第 2 个平台段。在异面压缩下, 每一部分均出现弹性、塑性坍塌以及密实化 3 个阶段。

胞壁弓字形弯折蜂窝承受  $x$  和  $y$  两个方向的共面动态压缩时, 上下刚性板附近的胞壁承受局部高应力, 表现为从冲击段对侧产生局部变形带, 依次变形压溃, 如图 10 所示。与传统六边形蜂窝相比, 由于内部弓字形弯折胞壁相互接触起到重要的支撑作用, 改变了初始六边形蜂窝的共面变形模式, 胞壁不能直接绕其端点转动而引起胞孔坍塌, 此时的主要承载结构由外部胞壁变成内部相接触的折叠胞壁部分,

承载方式转化为内部三角形蜂窝承受共面压缩以及折叠胞壁部分的相互接触压溃的耦合承载, 大大增加了共面方向的承载能力, 由于相邻层的折叠胞壁压溃时间不一致, 压溃过程中表现出明显的平台段, 最后伴随整个模型压溃进入密实段, 承载力急剧上升。由图 9 可以看出, 胞壁弓字形弯折蜂窝在  $x$  和  $y$  两个共面方向上的承载能力基本一致, 且跟异面方向上的承载能力在前期已经比较接近。

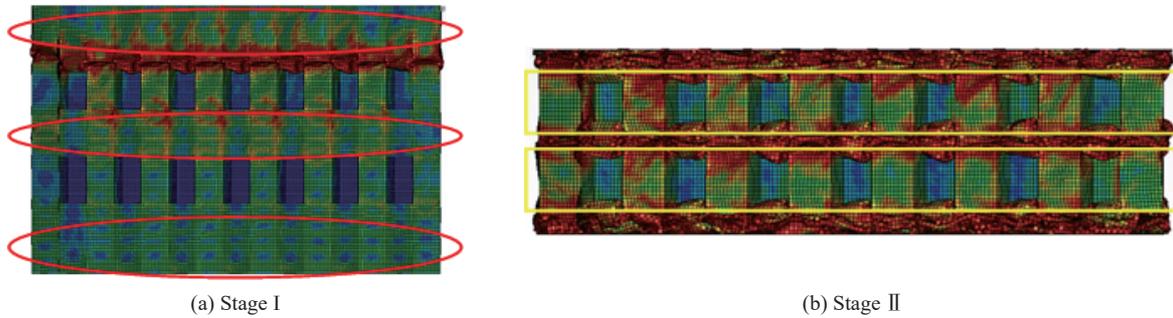


图 8 胞壁弓字形弯折蜂窝异面变形过程

Fig. 8 The deformation mode of the bow-shaped honeycomb under crush in out-of-plane direction

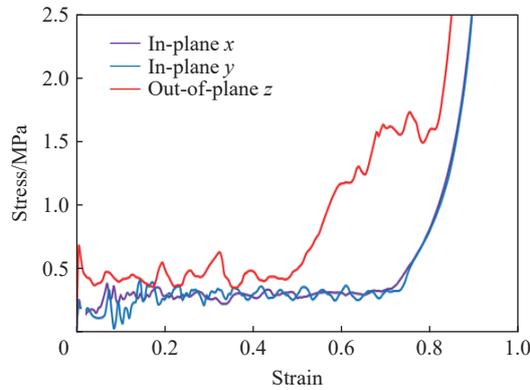


图 9 胞壁弓字形弯折蜂窝应力应变曲线

Fig. 9 The stress-strain curves of the bow-shaped honeycomb in in-plane and out-of-plane directions

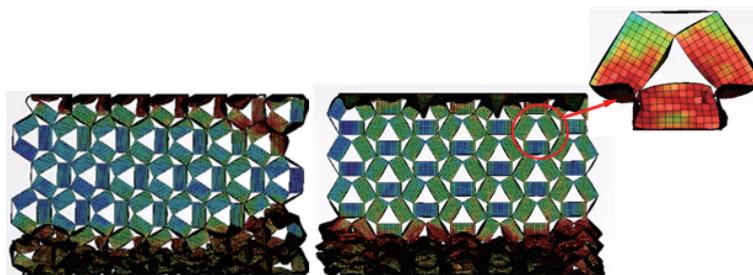


图 10 胞壁弓字形弯折蜂窝共面变形过程

Fig. 10 The deformation mode of the bow-shaped honeycomb under crush in in-plane direction

### 2.2.2 层间组合蜂窝仿真模型建立

按照 2.1 节中的建模方法, 建立了层间组合蜂窝的有限元模型, 如图 11 所示。

由于层间组合蜂窝的设计特点, 异面  $z$  方向和共面  $x$  方向的承载结构一致, 因此两个方向上的变形模式趋同, 如图 12 所示。从图 12 可以看出, 此时层间组合蜂窝变形分为两大部分: 一部分为平行压缩方向的胞壁, 另外一部分为垂直压缩方向的胞壁。其中与压缩方向平行的胞壁等同于传统三角形蜂窝进行异面压缩, 变形模式相同, 均形成规则的褶皱变形以吸收能量, 如图 12 中蓝色椭圆部分所示, 该部分

承载能力稳定,是层间组合蜂窝承受异面压缩时的主要吸能部分,形成如图 13 中应力应变曲线异面承载时的平台段;垂直压缩方向的胞壁在承受压缩时,变形模式类似于传统三角形蜂窝的面内压缩变形,受载后胞壁绕端点转动进而发生弯曲导致模型迅速压溃,如图 12 中绿色椭圆部分所示,与第一部分相比,该部分吸能能力较弱,对应力贡献很小。由图 13 可以看出,由于承载结构的一致性,层间组合蜂窝承受异面压缩和共面  $x$  方向压缩时的承载差距很小。

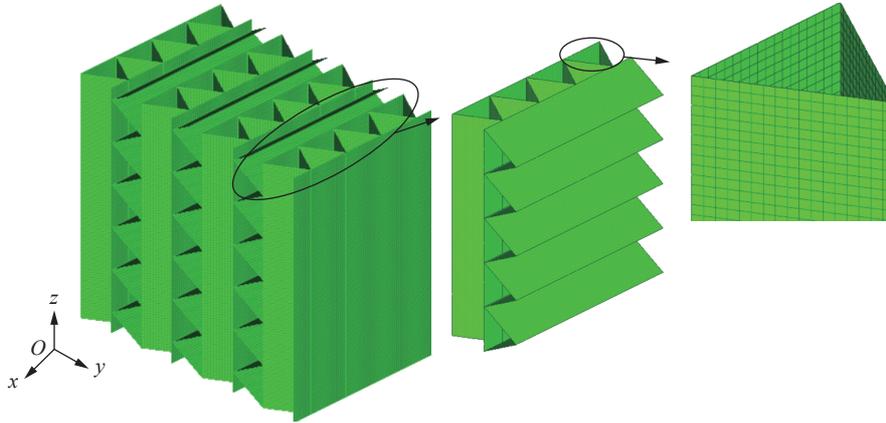


图 11 层间组合蜂窝仿真模型

Fig. 11 The finite element model of the staggered honeycomb

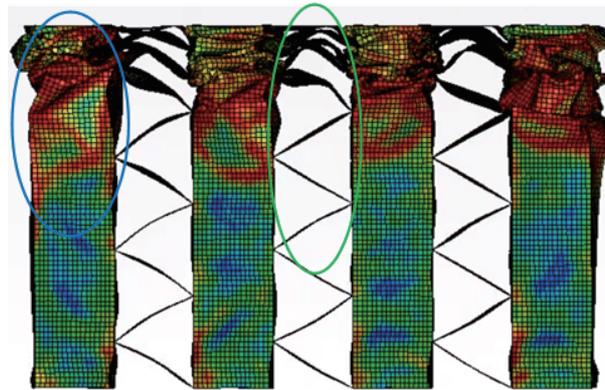


图 12 层间组合蜂窝异面和共面  $x$  方向变形模式

Fig. 12 The deformation mode of the staggered honeycomb in in-plane direction ( $x$  axis direction) and out-of-plane direction

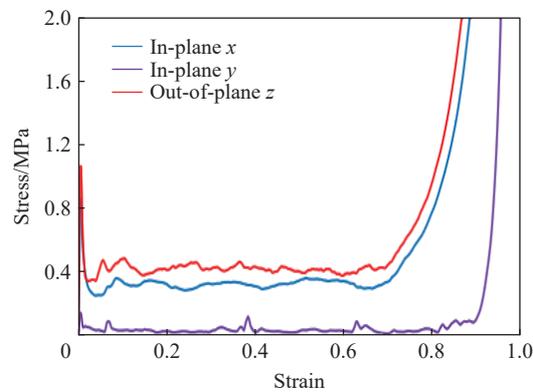


图 13 层间组合蜂窝应力应变曲线

Fig. 13 The stress-strain curves of the staggered honeycomb in in-plane and out-of-plane directions

层间组合蜂窝在承受共面  $y$  方向的加载时, 此时该构型蜂窝类似于两层传统三角形蜂窝的空间上的交叉组合, 每层的变形模式与传统三角形蜂窝共面压缩保持一致, 层间组合蜂窝从加载段对立侧开始依次变形, 三角形蜂窝的倾斜胞壁发生弯曲导致模型快速压溃, 胞孔从上下两端向中间逐渐压垮密实, 形成明确的局部化变形带, 如图 14 所示。由于每层变形时间不一致, 应力维持稳定上下波动, 在该方向上承载能力较差, 如图 13 所示。

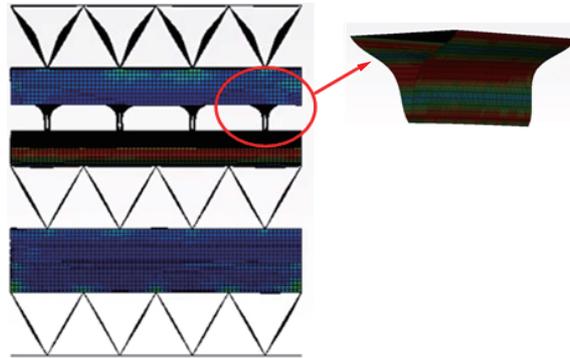


图 14 层间组合蜂窝共面  $y$  方向变形模式

Fig. 14 The deformation mode of the staggered honeycomb in in-plane ( $y$ -axis) direction

### 2.2.3 折叠蜂窝仿真模型建立

按照 2.1 节中的建模方法, 建立了压缩下折叠蜂窝的有限元模型, 如图 15 所示。

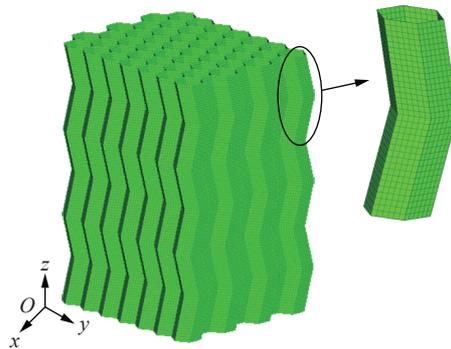


图 15 折叠蜂窝有限元模型

Fig. 15 The finite element model of the folded honeycomb

折叠蜂窝受异面  $z$  方向的动态压缩变形模式如图 16 所示。从图 16 可以看出, 由于初始折痕变形的引入, 折叠蜂窝的变形模式与传统六边形蜂窝相比发生了变化, 异面压缩时, 不再形成规则的褶皱变形使模型逐步的稳定压溃, 而是变成谷线折叠处向外弯曲变形, 脊线折叠处向内弯曲变形, 模型主要依赖 Miura 机制进行折叠。因为初始折痕的引入, 导致耗能水平下降, 该构型的异面承载能力得到一定的削弱, 相较传统六边形蜂窝有所下降。

共面压缩时,  $x$  方向加载时, 出现分层变形模式, 塑性区域主要出现在胞壁交接线上。开始承载时刻胞壁绕其端点转动形成塑性铰而使模型初步压溃, 在该过程中模型在中部形成局部变形带, 从两侧向中间逐层压溃, 如图 17(a) 所示。胞壁并未发生大面积的塑性变形即进入初始压密状态, 载荷保持稳定的同时稍有提升。随着初始密实段的完成, 从另一角度来看, 由于折叠蜂窝具有初始折叠角, 因此在  $x$  方向承载时需克服折叠角而使模型逐渐压平, 此时承载力提升速度加快, 模型承载能力进一步提高, 伴随着胞壁的相互接触, 模型进入最终密实化阶段, 变形过程如图 17(b) 所示。在达到初始峰值应力后, 常规蜂窝上的应力一般迅速减小, 随后出现一些波峰和波谷维持在平台段。但是, 折叠蜂窝在初始峰值应力点

后的应力值仍然较高, 结构的平台应力随之增大, 吸能能力也随之增大, 如图 18 所示。当进行  $y$  方向加载时, 初始折痕的引入并未明显改变变形模式, 倾斜胞壁形成塑性铰, 于模型中部形成明显的局部变形带, 整体表现为 V 形变形, 如图 19 所示。折叠蜂窝结构的应力变化比传统蜂窝结构的应力变化更平滑, 吸能能力明显增强, 如图 18 所示。

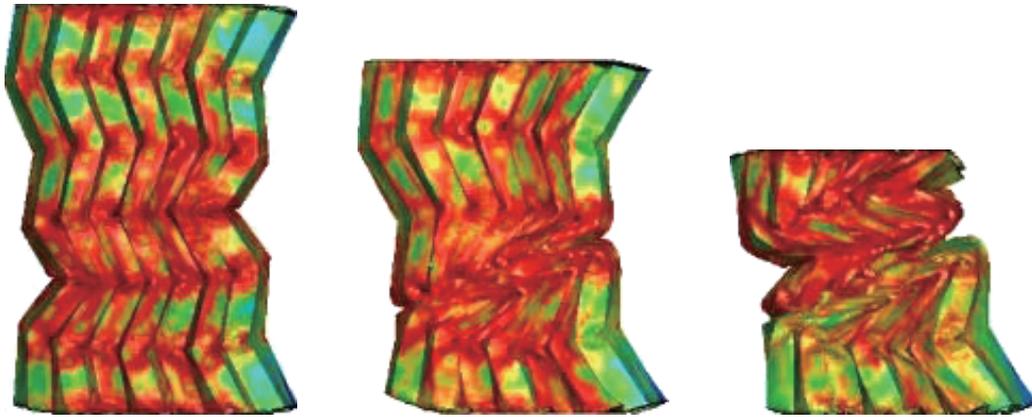


图 16 折叠蜂窝异面压缩变形模式

Fig. 16 The deformation mode of the folded honeycomb under crush in out-of-plane direction

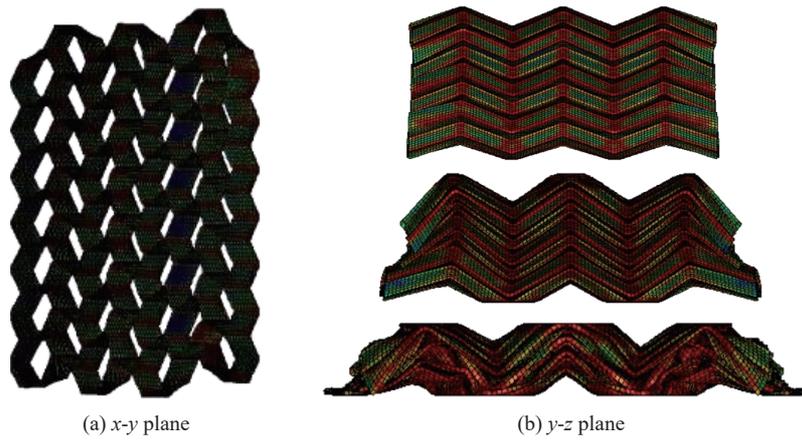


图 17 折叠蜂窝共面  $x$  压缩变形模式

Fig. 17 The deformation mode of the folded honeycomb under crush in in-plane ( $x$ -axis) direction

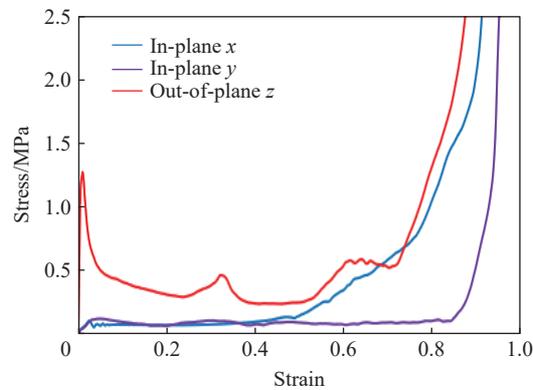


图 18 折叠蜂窝应力应变曲线

Fig. 18 The stress-strain curves of the folded honeycomb in in-plane and out-of-plane directions

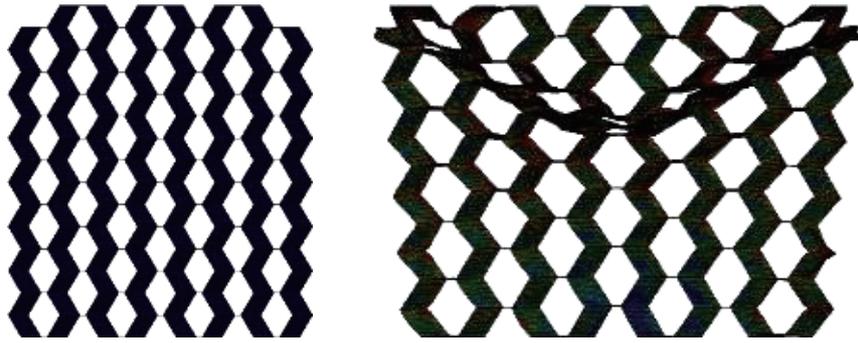


图 19 折叠蜂窝共面 y 压缩变形模式

Fig. 19 The deformation mode of the folded honeycomb under crush in-plane (y-axis) direction

### 3 新构型蜂窝抗冲击承载吸能评价

蜂窝结构的承载能力与变形模式、屈曲变形区平台应力以及能量吸收率密切相关。在相对密度及冲击工况保持一致的前提下, 利用不同评价指标进行胞壁弓字形弯折蜂窝、层间组合蜂窝和折叠蜂窝 3 种新构型蜂窝的抗冲击承载能力分析。此外, 为了与传统六边形蜂窝的抗冲击承载能力进行对比, 本文同时也进行了相同冲击工况下的相对密度一致的六边形蜂窝的动态压缩仿真, 此时六边形蜂窝模型的质量和体积分别为 1.291 g 和 22 869 mm<sup>3</sup>。

#### 3.1 蜂窝吸能评价指标

蜂窝由于结构的特殊性, 压溃过程中, 主要通过平台段(对应于图 20 中  $\delta_s$  到  $\delta_e$  段)蜂窝胞壁变形坍塌吸收能量, 平台应力通常用来表征蜂窝的吸能能力。首先计算出平台力  $F_p$ , 然后将平台力转化为平台应力  $\sigma_p$ :

$$F_p = \frac{1}{\delta_e - \delta_s} \int_{\delta_s}^{\delta_e} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

$$\sigma_p = F_p / A \quad (2)$$

式中:  $\sigma_p$  为平台应力,  $\delta_s$  和  $\delta_e$  分别为平台段开始时和结束时的位移。

定义  $K$  为蜂窝在共面/异面平台应力的比值:

$$K = \frac{\sigma_i}{\sigma_o} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_i$  为共面压缩平台应力,  $\sigma_o$  为异面压缩平台应力。  $K$  值越大, 说明蜂窝的共面、异面平台应力越接近。

质量比吸能 ( $E_{a,s}$ ) 是评价蜂窝材料在受压缩过程中能量吸收能力的重要指标, 是缓冲吸能装置设计的重要参数。质量比吸能的计算公式为:

$$E_{a,s} = \frac{E_a}{m} \quad (4)$$

式中:  $E_a$  指蜂窝从初始压缩时刻至蜂窝密实化阶段开始时刻为止, 蜂窝结构所吸收的能量, 对应于图 20 中弹性屈服段和平台段下载荷位移曲线与位移轴所围成的面积;  $m$  表示结构的质量, 显然比吸能越大, 代表结构吸能能力更好。

本文中定义  $R$  为蜂窝共面/异面质量比吸能的比值, 来评价共面和异面方向的吸能差异的大小:

$$R = \frac{E_{a,s,i}}{E_{a,s,o}} \quad (5)$$

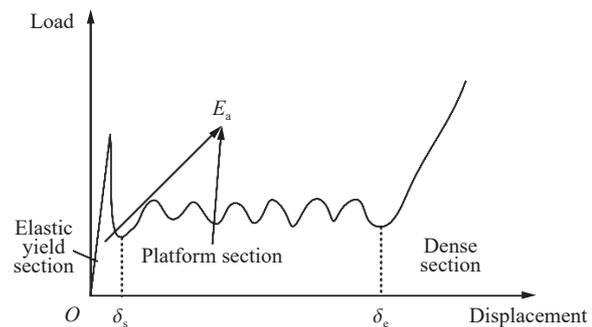


图 20 铝蜂窝压缩特性曲线

Fig. 20 The compression curve of an aluminum honeycomb

式中:  $E_{a,s,i}$  为共面比吸能,  $E_{a,s,o}$  为异面比吸能。显然质量比吸能  $E_{a,s}$  越大, 单位质量的蜂窝结构吸能越多, 吸能效率越高。  $R$  值越大, 说明蜂窝共面、异面吸能的效率越接近。

### 3.2 不同构型蜂窝吸能特性对比

3 种新蜂窝构型与传统六边形蜂窝的平台应力对比如图 21 和表 2 所示。从对比的结果可看出, 3 种新型蜂窝均通过削弱异面承载能力的同时提高共面承载能力的方式来缩小异面与共面抗冲击承载能力的差距,  $K$  值均高于传统六边形蜂窝。传统六边形蜂窝共面及异面承载的平台应力差距近 50 多倍。胞壁弓字形弯折蜂窝共面方向承载能力均匀, 较传统六边形蜂窝  $K$  值, 弓字形弯折蜂窝共面方向平均提升 21.3 倍。折叠蜂窝共面  $x$  方向强于  $y$  方向,  $K$  值平均提升 21.3 倍。层间组合蜂窝由于结构的特殊性, 两个共面方向承载能力差距大, 共面  $x$  方向承载结构与异面方向趋同, 承载能力提升尤为明显, 该方向的  $K$  值提升了 42 倍, 平台应力基本与异面方向持平,  $y$  方向承载能力偏低, 但  $K$  值也提升了 3.8 倍。

3 种新构型蜂窝与传统六边形蜂窝的共面及异面的质量比吸能对比如图 22 和表 3 所示。可以看出, 传统六边形蜂窝在共面方向的质量比吸能远小于异面方向, 差距 50 多倍。从对比的结果可看出, 类似于平台应力的比较结果, 3 种新构型蜂窝较传统六边形蜂窝异面方向上的比吸能得到削弱, 共面方向上的比吸能得到加强, 共面和异面的承载能力差距也在不断缩小。

表现在  $R$  值上, 弓字形弯折蜂窝两个共面承载能力相近, 较传统六边形蜂窝平均提升 17.2 倍, 折叠蜂窝共面  $x$  方向强于  $y$  方向, 平均提升 20.8 倍。层间组合蜂窝的两个共面方向的质量比吸能差距较大,  $x$  方向表现突出,  $R$  值提升 43.3 倍,  $y$  方向表现欠佳,  $R$  值提升 4.9 倍。

需要说明的是: 新构型蜂窝的设计在不同程度提高了共面和异面的承载吸能比, 为各向同性蜂窝的设计提供了思路。如果单从异面方向来看, 设计的新构型蜂窝与传统蜂窝相比, 异面承载能力有所削弱。考虑到目前蜂窝结构的一些实际应用场景, 例如汽车的成不同角度的低速碰撞、直升机方向不确定的低空坠毁、城市安全

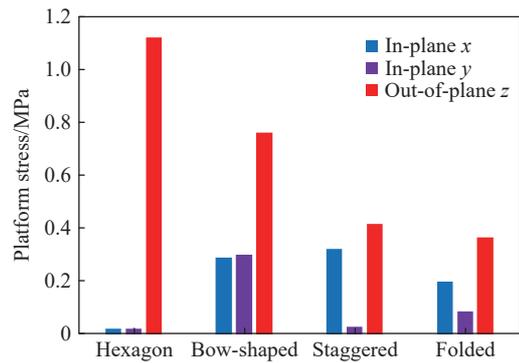


图 21 平台应力比较

Fig. 21 Comparison of the platform stress among different honeycombs

表 2 不同构型蜂窝结构的平台应力

Table 2 Platform stresses for different honeycombs

蜂窝类型	平台应力/MPa			$K_x$	$K_y$
	异面	共面x	共面y		
六边形蜂窝	1.120	0.020	0.0205	0.018	0.018
弓字形弯折蜂窝	0.760	0.290	0.300	0.381	0.395
层间组合蜂窝	0.419	0.322	0.029	0.768	0.069
折叠蜂窝	0.366	0.200	0.087	0.540	0.240

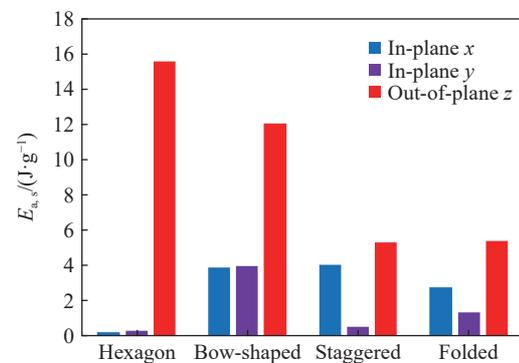


图 22 共面与异面质量比吸能对比

Fig. 22 Comparison of the mass-specific energy absorption of different honeycombs in out-of-plane and in-plane directions

表 3 不同构型蜂窝结构的质量比吸能

Table 3 Specific mass energy absorption for different honeycombs

蜂窝类型	质量比吸能/(J·g⁻¹)			$R_x$	$R_y$
	异面	共面x	共面y		
六边形蜂窝	15.546	0.273	0.324	0.018	0.021
弓字形弯折蜂窝	12.000	3.920	3.951	0.327	0.329
层间组合蜂窝	5.337	4.071	0.544	0.763	0.102
折叠蜂窝	5.391	2.800	1.371	0.520	0.254

岛防护等场景。往往是碰撞速度低、碰撞方向不确定, 此时无需异面方向的高强度, 但需要蜂窝抗全向缓冲的特性。此外, 异面承载能力的削弱, 也可以通过调整蜂窝孔隙比率或者壁厚等参数来弥补, 而且目前该种具有小孔隙比的异面高强度蜂窝制作工艺方法已经非常成熟, 因此上述设计的 3 种高共面/异面承载吸能比的新型蜂窝结构, 有望能更好地满足工程实际对多向承载的需求。

## 4 结 论

提出了 3 种高共面/异面抗冲击承载能力的新构型蜂窝, 分别是胞壁弓字形弯折蜂窝、层间组合蜂窝和折叠蜂窝。通过传统六边形蜂窝共面及异面的压缩试验验证了仿真方法的正确性, 然后根据该仿真方法建立了新构型蜂窝的共面及异面动态压缩的有限元模型, 分析了其变形模式和承载能力。相较相同相对密度下的传统六边形蜂窝, 研究发现 3 种新型蜂窝均提高了共面方向的承载能力, 且缩小了共面和异面方向的承载能力差距, 提高了共面/异面承载比值。从平台应力指标来看, 胞壁弓字形弯折蜂窝两个共面方向承载能力相当, 共面/异面承载比相较六边形蜂窝提高 21.3 倍; 层间组合蜂窝由于结构特殊, 两个共面方向承载能力悬殊, 其中一个共面方向的共面/异面承载比提高 42 倍, 但另一方向仅提高 3.8 倍; 折叠蜂窝共面  $x$  方向的承载能力大于  $y$  方向, 共面/异面承载比提高了 21 倍。从质量比吸能结果来看, 胞壁弓字型弯折蜂窝、层间组合蜂窝、折叠蜂窝的共面/异面承载比分别提高了 17.2 倍、20.8 倍和 43.3 倍。今后可以进一步研究上述新型蜂窝的制作工艺, 以逐步实现在汽车航空等需要多向承载吸能的场景中的应用, 为多向载荷冲击下的蜂窝结构设计提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] KHAN M K, BAIG T, MIRZA S. Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 539: 135–142. DOI: 10.1016/j.msea.2012.01.070.
- [2] 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. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2018.03.003.  
RONG J L, ZHU Y B, SONG Q Q, 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. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2018.03.003.
- [3] 罗昌杰, 周安亮, 刘荣强, 等. 金属蜂窝异面压缩下平均压缩应力的理论模型 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(18): 52–59. DOI: 10.3901/JME.2010.18.052.  
LUO C J, ZHOU A L, LIU R Q, et al. Average compressive stress constitutive equation of honeycomb metal under out-of-plane compression [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 52–59. DOI: 10.3901/JME.2010.18.052.
- [4] 赵国伟, 白俊青, 祁玉峰, 等. 异面冲击下金属蜂窝结构平均塑性坍塌应力模型 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(12): 50–54. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.008.  
ZHAO G W, BAI J Q, QI Y F, et al. Average plastic collapse stress model of metallic honeycomb structure under out-of-plane impact load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(12): 50–54. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.008.
- [5] 何彬, 李响. 一种新型组合蜂窝的抗冲击性能研究 [J]. *机械设计与制造*, 2015(6): 49–51, 54. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2015.06.013.  
HE B, LI X. Research on the impact resistance of a new type of honeycomb structure [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2015(6): 49–51, 54. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2015.06.013.
- [6] 杜义贤, 李涵钊, 谢黄海, 等. 具有创新拓扑构型的周期性点阵结构抗剪切性能分析 [J]. *机械设计与研究*, 2016, 32(5): 83–87. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmdr.2016.0192.  
DU Y X, LI H Z, XIE H H, et al. Shear resistance of periodic lattice structure with innovative topology configuration [J]. *Machine Design and Research*, 2016, 32(5): 83–87. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmdr.2016.0192.
- [7] YANG X F, SUN Y X, YANG J L, et al. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 125: 1–11. DOI: 10.1016/j.tws.2018.01.014.
- [8] 王中钢, 姚松. 加筋正六角铝蜂窝异面力学特性与筋胞厚度匹配优化 [J]. *航空材料学报*, 2013, 33(3): 86–91. DOI:

- 10.3969/j.issn.1005-5053.2013.3.016.
- WANG Z G, YAO S. Out-of-plane mechanical properties and thickness matching optimization between rib and cell thin-wall of reinforced regular hexagon aluminum honeycomb [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2013, 33(3): 86–91. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2013.3.016.
- [9] WANG Z G, SHI C, DING S S, et al. Crashworthiness of innovative hexagonal honeycomb-like structures subjected to out-of-plane compression [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(2): 621–628. DOI: 10.1007/s11771-020-4321-2.
- [10] 胡玲玲, 蒋玲. 胞孔构型对金属蜂窝动态力学性能的影响机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(1): 41–46. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)01-0041-06.
- HU L L, JIANG L. Mechanism of cell configuration affecting dynamic mechanical properties of metal honeycombs [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(1): 41–46. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)01-0041-06.
- [11] 胡玲玲, 陈依骊. 三角形蜂窝在面内冲击荷载下的力学性能 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(5): 226–229, 235. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.05.047.
- HU L L, CHEN Y L. Mechanical properties of triangular honeycombs under in-plane impact loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(5): 226–229, 235. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.05.047.
- [12] LIU Y, ZHANG X C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 98–109. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.03.001.
- [13] 何强, 马大为, 张震东. 分层屈服强度梯度蜂窝材料的动力学性能研究 [J]. *工程力学*, 2015, 32(4): 191–196. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0986.
- HE Q, MA D W, ZHANG Z D. Research on dynamic crushing of layered yielding stress-gradient circular honeycombs [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(4): 191–196. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.10.0986.
- [14] HEDAYATI R, SADIGHI M, MOHAMMADI-AGHDAM M, et al. Mechanical properties of additively manufactured octagonal honeycombs [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, 69: 1307–1317. DOI: 10.1016/j.msec.2016.08.020.
- [15] THOMAS T, TIWARI G. Energy absorption and in-plane crushing behavior of aluminium reinforced honeycomb [J]. *Vacuum*, 2019, 166: 364–369. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.10.057.
- [16] 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, 38(6): 1237–1242. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2016.06.018.
- LU Z X, LI K. Dynamic crushing of honeycombs with a negative Poisson's ratio—a finite element study [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2016, 38(6): 1237–1242. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2016.06.018.
- [17] HU L L, ZHOU M Z, DENG H. Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation [J]. *Composite Structures*, 2019, 207: 323–330. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.066.
- [18] 马瑞君, 王玉涛, 李萌, 等. 基于 Miura 折纸的蜂窝材料共面缓冲性能研究 [J]. *载人航天*, 2020, 26(1): 48–55. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2020.01.007.
- MA R J, WANG Y T, LI M, et al. Research on in-plane buffer performance of honeycomb material based on Miura pattern [J]. *Manned Spaceflight*, 2020, 26(1): 48–55. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2020.01.007.
- [19] ZHAI J Y, LIU Y F, GENG X Y, et al. Energy absorption of pre-folded honeycomb under in-plane dynamic loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 145: 106356. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106356.
- [20] 谭思博, 侯兵, 李玉龙, 等. 基体材料对铝蜂窝动态强化特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(1): 16–21. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0016-06.
- TAN S B, HOU B, LI Y L, et al. Effect of base materials on the dynamic enhancement of aluminium honeycombs [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(1): 16–21. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0016-06.
- [21] 李萌, 刘荣强, 郭宏伟, 等. 腿式着陆器用不同拓扑结构金属蜂窝吸能特性优化设计 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(21): 7–14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.21.002.
- LI M, LIU R Q, GUO H W, et al. Crashworthiness optimization of different topological structures of metal honeycomb used in a legged-typed lander [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(21): 7–14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.21.002.

(责任编辑 张凌云)