

高压物理学报

面内冲击荷载下半凹角蜂窝的抗冲击特性

陈鹏 侯秀慧 张凯

Impact Resistance of Semi Re-Entrant Honeycombs under in-Plane Dynamic Crushing

CHEN Peng, HOU Xiuhui, ZHANG Kai

引用本文:

陈鹏, 侯秀慧, 张凯. 面内冲击荷载下半凹角蜂窝的抗冲击特性[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6):064104. DOI: 10.11858/gywlb.20190759

CHEN Peng, HOU Xiuhui, ZHANG Kai. Impact Resistance of Semi Re-Entrant Honeycombs under in-Plane Dynamic Crushing[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6):064104. DOI: 10.11858/gywlb.20190759

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190759>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二阶层级自相似四边形蜂窝动力压缩行为数值模拟

Dynamic Crushing Response of Self-Similar Second Order Hierarchical Square Honeycombs

高压物理学报. 2017, 31(4): 358 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.002>

轴向冲击载荷作用下梯度圆管的动力学行为

Dynamic Crushing Behavior of Graded Hollow Cylindrical Shell under Axial Impact Loading

高压物理学报. 2017, 31(6): 778 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.06.013>

爆炸冲击作用下铝蜂窝板失稳研究

Instability of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel under Blast Loading

高压物理学报. 2017, 31(2): 193 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.02.013>

金属内冲击波跨晶界传播的应力分配机制初探

Preliminary Investigation on Stress Distribution Mechanism of Shock Propagating across Grain Interface in Metal

高压物理学报. 2019, 33(5): 052201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180608>

转弯结构对其前方直巷内气体爆炸冲击波的影响

Influence of Bend Structure on Air Shockwave Generated from Gas Explosion in the Straight Tunnel before the Bend

高压物理学报. 2017, 31(4): 409 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.009>

冲击载荷作用下PZT-5压电陶瓷的力电特性

Dynamic Behavior of PZT-5 Piezoelectric Ceramics under Impact Loading

高压物理学报. 2019, 33(5): 054204 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180708>

DOI: 10.11858/gywlxb.20190759

面内冲击荷载下半凹角蜂窝的抗冲击特性

陈 鹏, 侯秀慧, 张 凯

(西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 半凹角蜂窝结构因其零泊松比特征, 具有独特的变形方式。将其与传统正泊松比 (正六边形) 蜂窝以及负泊松比 (凹角) 蜂窝在面内冲击荷载作用下的抗冲击性能进行对比分析, 揭示出零泊松比效应对动力学性能的影响。在给定胞元几何参数 (长细比) 的情况下, 分析了3种蜂窝构型在不同冲击速度下的变形特征, 得出半凹角蜂窝的零泊松比特性使结构的局部变形带以“**I**”型为主。根据一维冲击波理论, 推导出半凹角蜂窝的平均抗压强度理论公式, 与有限元结果进行对比, 验证了该方法的有效性。数值结果表明, 半凹角蜂窝的抗冲击性能介于正六边形蜂窝和凹角蜂窝之间。通过在半凹角蜂窝内部增加直杆, 设计出一种新型零泊松比蜂窝, 进一步提高了蜂窝结构的抗冲击性能, 可为其他结构优化设计提供一定的理论参考。

关键词: 半凹角蜂窝; 零泊松比; 面内冲击; 抗压强度

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

智能飞行器可以根据飞行需要主动改变其外形, 使飞行器更加节能和高效。飞行器在变形过程中, 蒙皮也会产生伸缩或弯曲变形。传统的蒙皮材料以铝合金为主, 其变形能力难以满足智能飞行器的变形要求, 严重影响了飞行的安全性, 因此需要对蒙皮材料进行功能优化设计。蜂窝结构作为一种典型的多胞材料, 具有轻质、高强、吸能、隔热等优点, 被广泛应用在航空航天、建筑、汽车等领域^[1]。通过改变结构内部拓扑构型, 蜂窝结构可以呈现出不同的力学性能^[2], 如不同的热膨胀系数、刚度和泊松比特性。正泊松比蜂窝发生弯曲变形时, 在弯曲方向上受拉, 其横向收缩, 形成马鞍形结构; 与正泊松比蜂窝相反, 负泊松比蜂窝横向被拉伸延长, 呈拱形。零泊松比蜂窝在弯曲变形时, 横向尺寸不会发生改变, 从而形成圆柱形结构, 所以不存在同向或反向曲率问题^[3]。零泊松比蜂窝这种独特的变形方式使其更加适合应用于圆柱形夹板、纯圆柱弯曲或一维变形等结构设计^[3-6]。因此, 将零泊松比蜂窝结构应用到智能飞行器蒙皮结构中, 有望满足其飞行安全性要求。

作为智能飞行器的重要部件之一, 柔性蒙皮需要同时具备可变形性和抗冲击的能力。蜂窝结构在冲击或爆炸荷载作用下, 其名义应力-应变曲线会产生应力平台阶段, 该阶段的应力值会在较大的应变范围内围绕一个固定值上下波动, 从而呈现出优异的抗冲击性能^[7]。基于飞行环境的多样性, 如飞鸟和碎片碰撞, 冲击可能发生在蜂窝结构的任意方向, 因此, 在智能飞行器蒙皮中采用蜂窝结构时, 不仅需要研究其面外抗冲击性能, 其面内抗冲击性能也十分重要^[8]。正六边形蜂窝是一种典型的正泊松比蜂窝, 不少学者对其抗冲击性能进行了大量的研究^[8-12]。Ruan等^[9]利用有限元仿真提出了正六边形蜂窝在面内冲击荷载作用下的3种变形模式, 胡玲玲等^[8, 10-11]通过实验和数值模拟研究了胞元扩张角对六

* 收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(11402035); 陕西省自然科学基金(2017JM1012); 中央高校基本科研业务费(3102018ZY017); 钱学森空间技术实验室种子基金(QXS-ZZJJ-02)

作者简介: 陈 鹏(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事多孔轻质结构抗冲击性能研究。

E-mail: mutouseng123@163.com

通信作者: 侯秀慧(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事多孔金属材料多功能特性及碳纳米管基本力学行为等研究。E-mail: houxiuhui@nwpu.edu.cn

边形蜂窝面内变形模式的影响,并对低速和高速冲击荷载作用下的平台应力进行了理论推导。由于内凹或旋转机制的存在,蜂窝结构呈现出负泊松比特性^[13-14],在冲击荷载作用下,展现出与正泊松比蜂窝不同的变形模式以及更佳的吸能效果。张新春等^[15]的研究表明,凹角蜂窝的面内变形模式主要取决于胞元扩张角和冲击速度。此外,其相对密度、胞壁厚度和胞元是否规则对能量吸收影响很大^[16],并且凹角蜂窝的抗冲击性能优于正六边形蜂窝^[17]。对零泊松比蜂窝的研究主要集中在模型构建、优化以及准静态力学性能分析方面^[3-6,18],涉及冲击动力学性能的研究文献相对较少。

针对一种零泊松比蜂窝结构(半凹角蜂窝),讨论其在不同冲击速度、不同结构几何参数下的变形模式。根据一维冲击波理论^[19],给出其在冲击荷载作用下动态抗压强度的理论公式,并与传统正泊松比蜂窝结构、负泊松比蜂窝结构的抗冲击性能进行对比分析。基于以上研究,通过构型设计,在半凹角蜂窝内部增加直杆,得到一种新型的零泊松比蜂窝结构^[18],以期有效提高其抗冲击性能,为结构优化以及智能飞行器蒙皮结构设计提供一定的理论参考。

1 模型参数设计和准静态性能分析

1.1 计算模型

图1给出了正六边形蜂窝、凹角蜂窝、半凹角蜂窝分析模型及其代表性胞元。3种蜂窝模型尺寸相同,均为 $67.5\text{ mm} \times 75.3\text{ mm}$ 。胞壁长度 l 为 2.7 mm ,壁厚 h 取 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.5 mm ,胞壁倾斜角 $\theta=30^\circ$ 。假设 $s=2l$,蜂窝沿面外方向的厚度 b 均为 1 mm 。蜂窝试件的基体材料选用金属铝,假定满足理想弹塑性模型,其杨氏模量 $E_s=69\text{ GPa}$,密度 $\rho_s=2\,700\text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu=0.3$,屈服应力 $\sigma_{ys}=76\text{ MPa}$ 。借助显式动力学有限元软件ANSYS/LS-DYNA进行模拟,计算中选用Shell163单元,试件上方的钢板视为刚体,其密度 $\rho=7\,860\text{ kg/m}^3$,杨氏模量 $E=210\text{ GPa}$ 。刚性板与试件之间无摩擦,接触方式采用单面自动通用接触。为保证计算结果的收敛性,沿单元厚度方向取5个积分点。此外,当刚性板沿 y 方向以恒定的速度 v 冲击蜂窝试件时,试件底端固定,左右两端及上部自由。为使蜂窝仅发生面内变形,对试件上的所有节点施加面外约束。

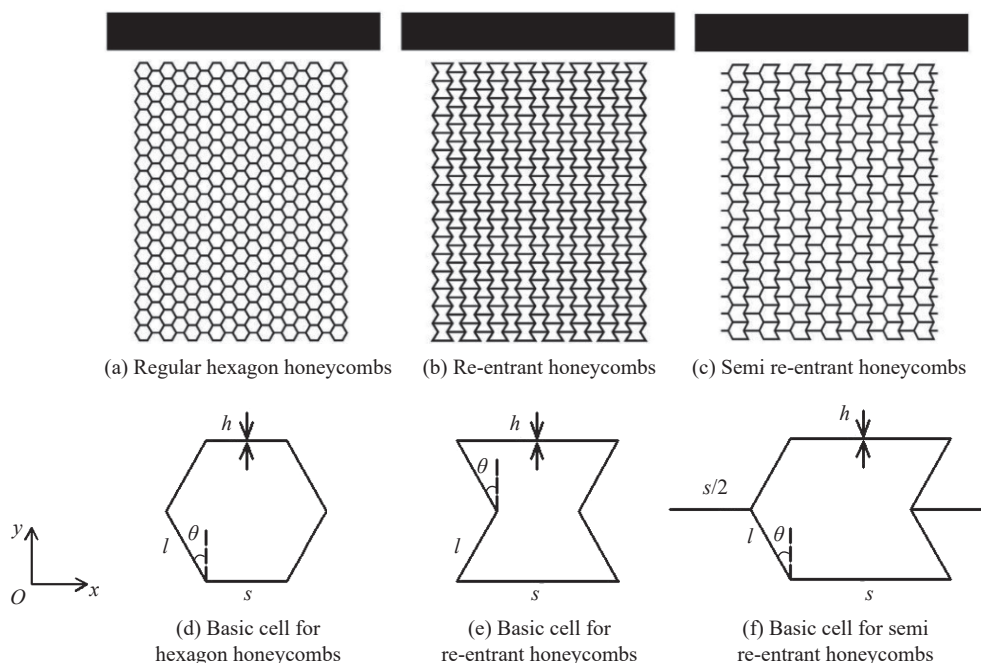


图1 正六边形蜂窝、凹角蜂窝和半凹角蜂窝结构模型及代表性胞元

Fig. 1 Structural models and representative basic cells for regular hexagon honeycombs, re-entrant honeycombs and semi re-entrant honeycombs

1.2 泊松比计算

如图 2 所示, 代表性胞元尺寸为: $L_x = 2s$, $L_y = 2l\cos\theta$ 。为了得到半凹角蜂窝结构的泊松比, 沿 y 方向施加均布力 σ 。在荷载作用下, 倾斜的胞壁会发生弯曲变形, 如图 2 所示。根据标准梁理论^[20], 对于长度为 l 、厚度为 h 的胞壁, 其挠度 δ 为

$$\delta = \frac{bh^3}{12E_s I} \quad (1)$$

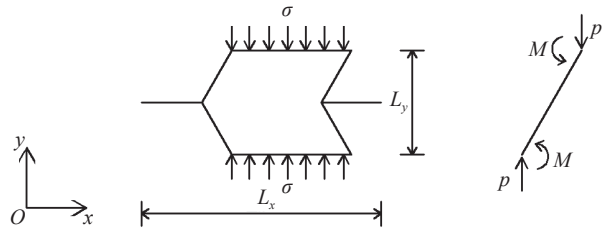


图 2 半凹角蜂窝代表性胞元受力分析

Fig. 2 Force analysis of representative cell of semi re-entrant honeycombs

式中: E_s 为基体材料的弹性模量, I 为基体材料的二次惯性矩。

根据力的平衡关系, 得出倾斜胞壁沿 x 、 y 方向的挠度大小分别为

$$\delta_x = \frac{pl^3 \sin\theta \cos\theta}{12E_s I}, \quad \delta_y = \frac{pl^3 \sin^2\theta}{12E_s I} \quad (2)$$

根据应变的计算公式, 可得 y 方向的应变为

$$\varepsilon_y = \frac{\delta_y}{L_y} = \frac{pl^2 \sin^2\theta}{24E_s I \cos\theta} \quad (3)$$

由于结构的一端内凹, 一端凸出, 因此结构两端沿 x 方向的挠度大小相等, 方向相反。通过分析可知, 倾斜胞壁由于受到压缩, 致使相邻水平直杆沿 x 轴负方向偏移, 且结构左右两端偏移长度相等, 即结构水平方向尺寸没有发生变化。综上, 结构沿 x 方向的应变为

$$\varepsilon_x = 0 \quad (4)$$

结合 (4) 式可知, 该半凹角六边形蜂窝结构的泊松比^[3] 为

$$\mu_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = 0 \quad (5)$$

由于半凹角蜂窝兼具正六边形蜂窝和凹角蜂窝的构型特征, 因此零泊松比特性也与其结构构型特征密切相关, 为了探讨泊松比变化对蜂窝动态响应模式的影响, 采用类似的方法可得正六边形蜂窝结构和凹角蜂窝结构的泊松比^[17], 以作对比分析, 即: (1) 对于正六边形蜂窝结构, $\theta = \frac{\pi}{6}$, $\mu_{yx} = 1$; (2) 对于凹角蜂窝结构: $\theta = -\frac{\pi}{6}$, $\mu_{yx} = -1$; 对于半凹角蜂窝结构, $\theta = \frac{\pi}{6}$, $\mu_{yx} = 0$ 。

2 有限元结果讨论与分析

2.1 不同泊松比蜂窝变形模式

以正六边形蜂窝结构的变形模式为参照, 验证所建立模型的有效性, 取胞壁厚度 0.5 mm, 建立与文献 [9] 完全相同的计算模型, 采取相同的边界条件, 分析正六边形蜂窝结构的动态响应特征。如图 3 所示, 当刚性板的冲击速度 $v=35$ m/s 时, 冲击端附近的胞元首先发生坍塌并向外扩张。其力学机理可归因于正六边形蜂窝的正泊松比特性, 即在单向压缩状态下, 蜂窝结构在与荷载垂直的方向会发生膨胀, 造成横向尺寸变大。随后更多的胞元进入压溃区域, 试件的不均匀变形会逐渐形成“V”型剪切变形带并传向固定端; 随着应变的持续增大, 固定端附近出现“V”型剪切变形带但位置几乎没有发生改变; 当两个“V”型剪切带重合, 试件整体均匀变形, 直至试件被完全压溃。当 $v=70$ m/s 时, 没有出现明显的“X”型或“V”型局部变形带模式, 此时蜂窝结构的正泊松比特性减弱, 惯性作用增强并处于主导地位, 变形带集中在冲击端, 呈“I”型, 并以冲击波的形式逐层传递到固定端, 直至压缩密实, 与文献 [9] 中所得结果基本一致。最后将不同壁厚、不同冲击速度下得出的蜂窝平均抗压强度数值与文献对比, 如表 1 所示, 相对偏差均小于 10%, 从而进一步证明所建模型的有效性。

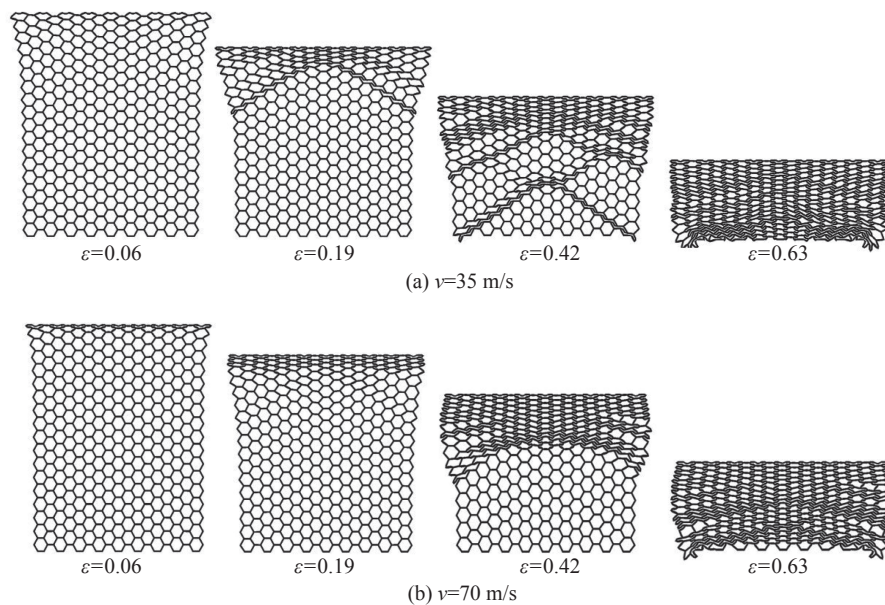


图3 不同冲击速度下正六边形蜂窝的变形模式

Fig. 3 Deformation modes of regular hexagon honeycombs under different impact velocities

表1 正六边形蜂窝的平均抗压强度

Table 1 Average crushing strength of regular hexagon honeycombs

h/mm	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Average crushing strength/MPa		Deviation/%
		Ref.[9]	Numerical	
0.3	70	2.491	2.287	8.19
0.3	100	4.677	4.893	4.62
0.4	70	3.777	3.952	4.63
0.4	100	6.802	7.384	8.56

图4给出了 $v=35\text{ m/s}$ 和 $v=70\text{ m/s}$ 、壁厚均为 0.5 mm 时凹角蜂窝结构在冲击荷载作用下的变形模式。凹角蜂窝结构在单向压缩下,与荷载垂直的方向会发生收缩,即“颈缩”现象。与正六边形蜂窝结构不同,凹角蜂窝胞元中间胞壁向内侧凹陷,基于内凹机制,呈现出负泊松比特性,从而导致了其独特的变形模式。当刚性板的冲击速度 $v=35\text{ m/s}$,冲击端附近的胞元发生明显的侧向收缩,随后固定端出现“V”型剪切变形带;当所有胞元收缩完成,“V”型剪切变形带消失,形成“I”型局部变形带并向固定端传播,直至整个结构压溃周期结束。随着冲击速度的提高,例如 $v=70\text{ m/s}$,负泊松比蜂窝特有的“颈缩”现象依旧存在但没有之前明显,其原因为此时惯性对蜂窝变形起主导作用,凹角蜂窝的负泊松比特性减弱;蜂窝结构变形带以“I”型逐层传递,且固定端出现“V”型局部变形带;随着更多的胞元进入压溃区域,局部变形带逐渐减小;最后,变形带消失,蜂窝结构整体均匀变形。

在上述研究基础上,系统研究了半凹角蜂窝结构在不同冲击速度下的动态响应特性,取胞壁厚度 $h=0.5\text{ mm}$ 。对于低速冲击($v=10\text{ m/s}$),当刚性板压缩试件,冲击端第1层胞元首先发生变形,但与正、负泊松比蜂窝不同,半凹角蜂窝胞元破坏时无明显收缩或扩张现象发生。在首层胞元上半部完全坍塌之后,底层胞元才开始发生破坏,冲击端附近呈现“I”型的局部变形带。其力学机理可归因于半凹角蜂窝的零泊松比特性,即其纵向被压缩时,横向尺寸不会增大或减小,试件整体均匀变形造成无“V”型剪切变形带出现。随着压缩应变的逐渐增大,试件变形主要集中在冲击端,并向固定端传播直至与固定端处的变形带重合,两端变形带消失,且中间伴有失稳现象发生。半凹角蜂窝胞元破坏形式是:结构两端

同时形成塑性铰, 与其零泊松比特性密切相关; 其次胞壁被压缩密实。当冲击速度较低时, 在冲击端变形带传向固定端过程中, 部分胞元内凹端较凸出端提前形成塑性铰, 试件局部不均匀变形造成试件右部收缩, 产生失稳现象。

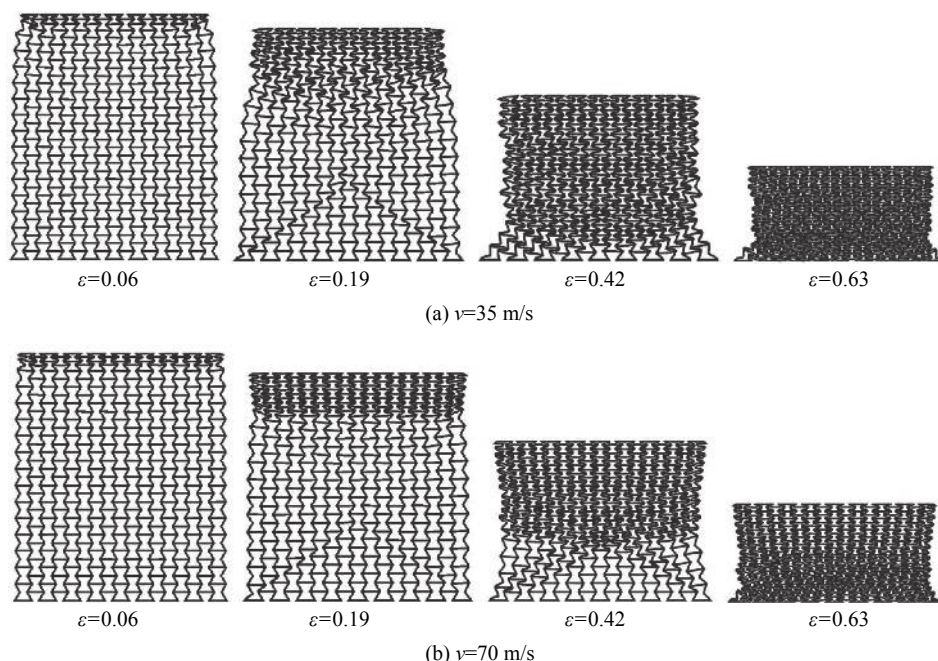


图4 不同冲击速度下凹角蜂窝的变形模式

Fig. 4 Deformation modes of re-entrant honeycombs under different impact velocities

与图5(a)中蜂窝结构几何参数相同, 图5(b)和图5(c)分别给出了半凹角蜂窝结构在中高速冲击下的变形模式。当刚性板冲击蜂窝试件速度 $v=35$ m/s, 冲击端周围的胞元首先被破坏并压缩密实, 随后更多的胞元进入密实区, 变形带呈“I”型, 逐层传递至固定端。与低速冲击下蜂窝试件的变形模式类似, 在“I”型变形带传向固定端的过程中, 底层胞元被压溃, 但无失稳现象。图中显见, 半凹角蜂窝结构并没有出现与正六边形蜂窝结构类似的“V”型剪切变形带, 结合上文可知, 出现此现象的原因是半凹角蜂窝的零泊松比效应使其纵向被压缩时, 横向尺寸不发生变化, 试件整体均匀变形。当刚性板冲击速度 $v=70$ m/s, 试件变形集中在冲击端, 而固定端附近胞元没有发生破坏, 变形带呈“I”型。与正六边形蜂窝、凹角蜂窝相同, 此时惯性对结构变形起主导作用, 试件变形带的传播表现为冲击波形式, 逐层传递至固定端, 直到整个试件被压缩密实。与正六边形蜂窝、凹角蜂窝不同的是, 其零泊松比特征使其在不同冲击速度下变形带形式均以“I”型为主, 且其横向尺寸不会发生变化。由于半凹角蜂窝的零泊松比特性与其构型特征关联密切, 而与结构几何参数关联不大, 因此半凹角蜂窝的面内变形模式与冲击速度和结构几何参数无关, 主要依赖于其零泊松比特征, 且变形更加均匀, 从而进一步为智能飞行器蒙皮设计提供了构型参考。

为了分析壁厚和冲击速度对半凹角蜂窝结构抗冲击性能的影响, 在其他条件相同的情况下, 图6和图7分别给出了不同冲击速度、不同胞壁厚度的半凹角蜂窝结构的名义应力-应变曲线。与正六边形蜂窝结构相同, 半凹角蜂窝结构的面内动态响应可分为3个部分: 弹性阶段、平台区和密实化阶段。当刚性板以恒定速度冲击蜂窝试件时, 试件应力在极短时间内达到初始峰值; 随后, 试件应力逐渐减小并围绕一固定值上下波动, 此阶段即为平台区, 为吸收能量的主要阶段, 对蜂窝结构的抗冲击性能至关重要; 最后, 试件开始密实化, 在应变变化很小的情况下蜂窝应力急剧上升。显而易见, 在胞壁厚度相同的情况下, 蜂窝结构的平台应力随着冲击速度的增加而变大(见图6), 其原因为冲击速度越大, 蜂窝结构吸收的能量越多, 相应地平台应力也会随之变大; 在相同冲击速度情况下, 蜂窝结构的平台应力

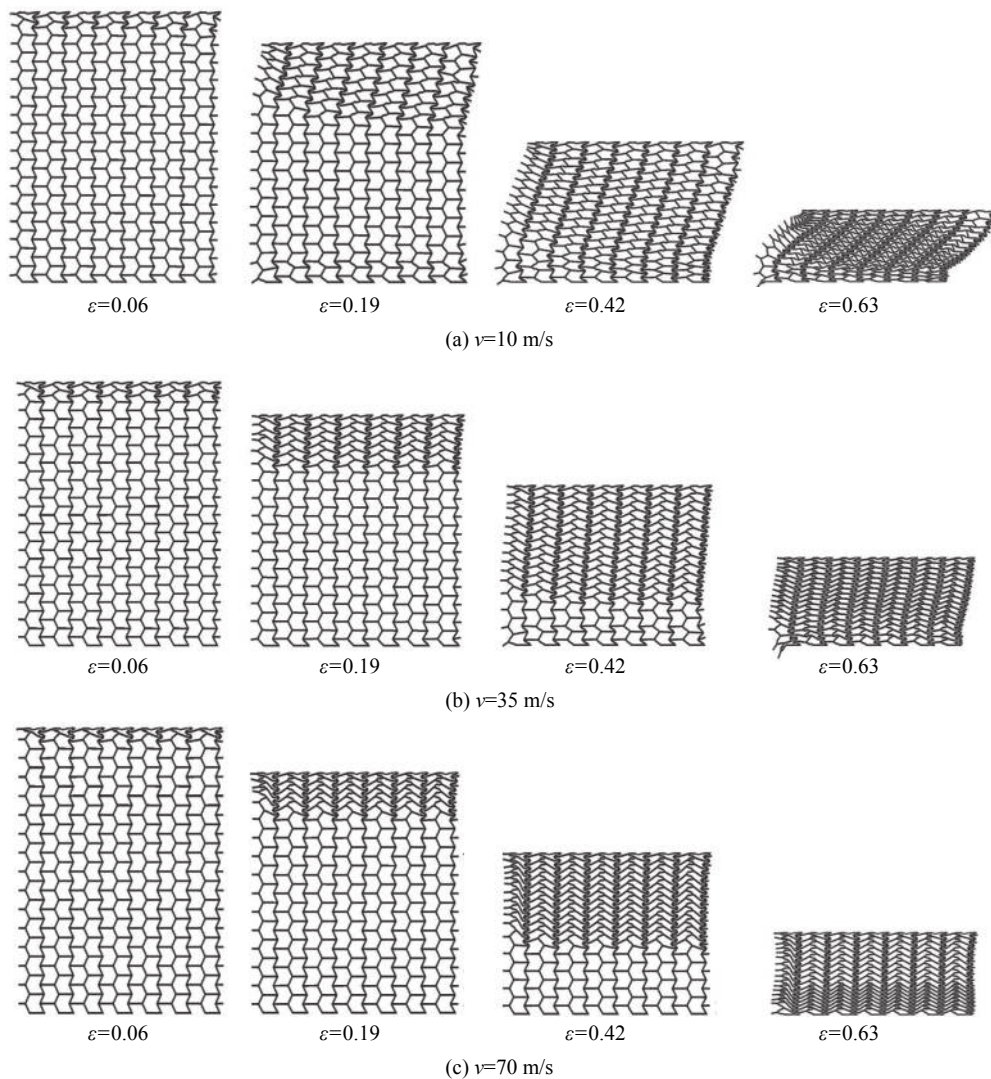
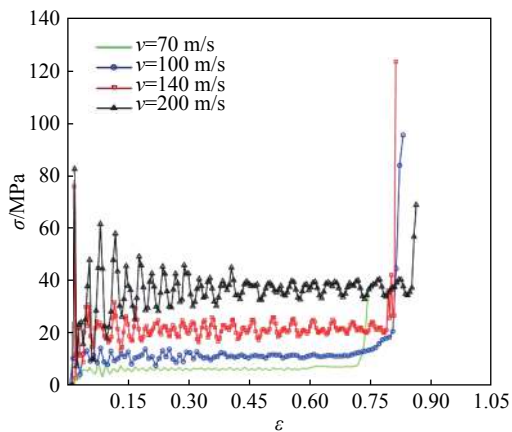
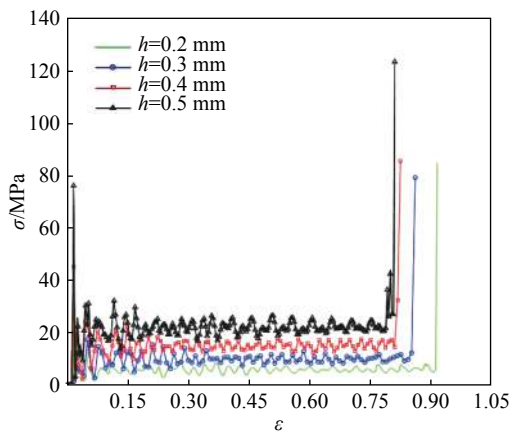


图5 不同冲击速度下半凹角蜂窝结构的变形模式

Fig. 5 Deformation modes of semi re-entrant honeycombs under different impact velocities

图6 不同冲击速度下半凹角蜂窝的名义应力-应变曲线($h=0.5$ mm)Fig. 6 Nominal stress-strain curves of semi re-entrant honeycombs under different impact velocities ($h=0.5$ mm)图7 不同胞壁厚度下半凹角蜂窝的名义应力-应变曲线($v=140$ m/s)Fig. 7 Nominal stress-strain curves of semi re-entrant honeycombs under different cell wall thicknesses ($v=140$ m/s)

随着胞壁厚度的增加而变大(见图(7)), 这可以理解为壁厚增加造成胞壁两端塑性铰在形成过程中吸收的能量变多, 最终导致平台应力变大。因此, 在不同的冲击速度下, 对半凹角蜂窝结构的胞壁厚度进行设计, 可以得到不同的抗冲击性能。

2.2 平台应力解析结果

根据半凹角蜂窝结构在高速($v \geq 70 \text{ m/s}$)冲击下的变形模式, 即局部变形带以“I”型逐层传递至固定端, 类似于冲击波在连续体内的传播。所以, 通过将蜂窝结构看作理想刚塑性模型, 利用一维冲击波理论, 可得蜂窝材料在动态荷载作用下的抗压强度公式^[19]

$$\sigma_d = \sigma_0 + \frac{\rho^*}{\varepsilon_d} v^2 = \sigma_0 + A v^2 \quad (6)$$

式中: σ_d 、 σ_0 分别为动态荷载作用下的抗压强度和准静态抗压强度, ρ^* 为蜂窝基体材料的密度, ε_d 为蜂窝材料的锁定应变, v 为冲击速度, A 为无量纲参数。

由于蜂窝结构的周期性特征, 可以取部分代表性胞元结构进行分析, 如图8所示。代表性胞元尺寸大小: $L_0 = 2s = 4l$, $H_0 = 4l \cos \theta$ 。图9(a)和图9(b)分别表示代表性胞元压溃初始时刻和结束时刻的变形模式。基于半凹角蜂窝的零泊松比特征, 可以认为代表性胞元在整个压溃过程中 L_0 大小不变。

当 $t = t_0$ 时, 胞壁 AB 已经成为致密化区域中的一部分, 点 A 、 B 处的速度等于 v , 而在整个压溃过程中, 点 Q 、 H 、 I 、 N 、 J 、 K 几乎没有发生移动, 即

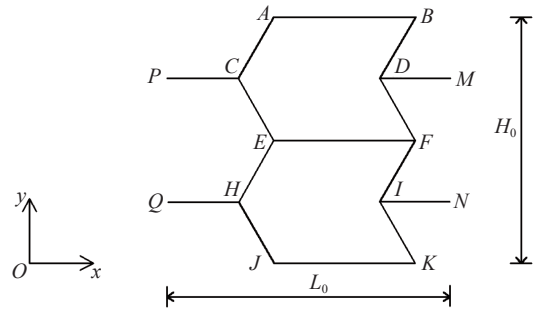


图8 代表性胞元

Fig. 8 Representative basic cell

$$\dot{P}_{EH} = \dot{P}_{FI} = \dot{P}_{QH} = \dot{P}_{HJ} = \dot{P}_{IN} = \dot{P}_{IK} = \dot{P}_{JK} = 0 \quad (7)$$

式中: $\dot{P}$ 表示胞壁的动量。

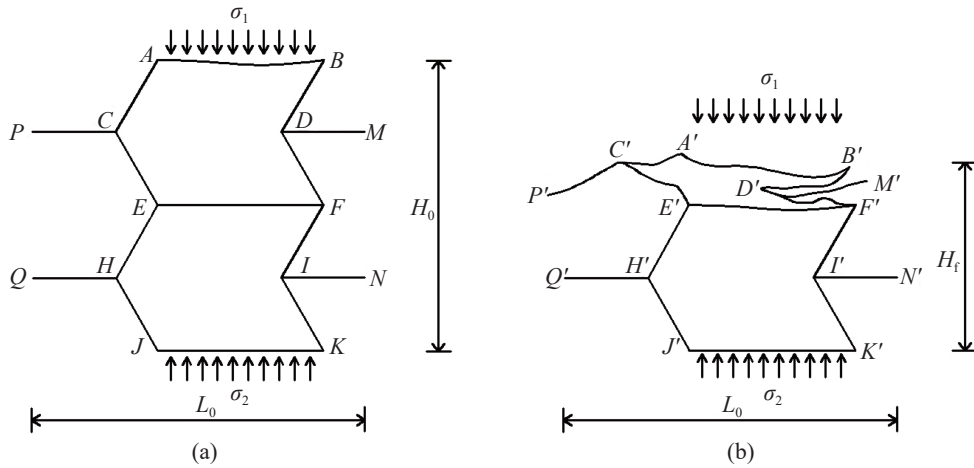


图9 压溃初始时刻(t_0)和结束时刻(t_f)蜂窝变形模式

Fig. 9 Deformation modes at the initial (t_0) and final moments (t_f) of crushing

当 $t = t_f$ 时, 胞壁 AB 、 AC 、 BD 、 CE 、 CP 、 DM 、 DF 、 EF 形成了新的致密化区域, 即胞壁 $A'B'$ 、 $A'C'$ 、 $B'D'$ 、 $C'E'$ 、 $C'P'$ 、 $D'M'$ 、 $D'F'$ 、 $E'F'$, 如图9(b)所示。这些胞壁的动量变为

$$\dot{P}_{A'C'} = \dot{P}_{B'D'} = \dot{P}_{C'E'} = \dot{P}_{C'P'} = \dot{P}_{D'M'} = \dot{P}_{D'F'} = \rho_s b h l v, \quad \dot{P}_{A'B'} = \dot{P}_{E'F'} = 2\rho_s b h l v \quad (8)$$

基于蜂窝结构的周期性, 因此代表性胞元的胞壁动量满足下列关系

$$\dot{P}_{AB} = \dot{P}_{E'F'}, \quad \dot{P}_{AC} = \dot{P}_{E'H'}, \quad \dot{P}_{BD} = \dot{P}_{F'I'}, \quad \dot{P}_{CE} = \dot{P}_{H'J'} \quad (9)$$

$$\dot{P}_{CP} = \dot{P}_{H'Q'}, \quad \dot{P}_{DF} = \dot{P}_{I'K'}, \quad \dot{P}_{DM} = \dot{P}_{I'N'}, \quad \dot{P}_{EF} = \dot{P}_{J'K'} \quad (10)$$

基于线性动量定理,在时间间隔(t_0, t_f)内,可得如下方程

$$bL_0 \int_{t_0}^{t_f} (\sigma_1 - \sigma_2) dt = (\dot{P}_{A'B'} + \dot{P}_{A'C'} + \dot{P}_{B'D'} + \dot{P}_{C'E'} + \dot{P}_{C'P'} + \dot{P}_{D'M'} + \dot{P}_{D'F'} + \dot{P}_{E'F'} + \dot{P}_{E'H'} + \dot{P}_{H'J'} + \dot{P}_{Q'H'} + \dot{P}_{F'I'} + \dot{P}_{I'K'} + \dot{P}_{I'N'} + \dot{P}_{J'K'}) - (\dot{P}_{AB} + \dot{P}_{AC} + \dot{P}_{BD} + \dot{P}_{CE} + \dot{P}_{CP} + \dot{P}_{DM} + \dot{P}_{DF} + \dot{P}_{EF} + \dot{P}_{EH} + \dot{P}_{HJ} + \dot{P}_{QH} + \dot{P}_{FI} + \dot{P}_{IK} + \dot{P}_{IN} + \dot{P}_{JK}) \quad (11)$$

(11)式进一步简化为

$$bL_0 \int_{t_0}^{t_f} (\sigma_1 - \sigma_2) dt = (\dot{P}_{A'B'} + \dot{P}_{A'C'} + \dot{P}_{B'D'} + \dot{P}_{C'E'} + \dot{P}_{C'P'} + \dot{P}_{D'M'} + \dot{P}_{D'F'}) = 2\rho_s b h s v + 4\rho_s b h l v \quad (12)$$

因为正在坍塌的变形带和固定端之间的胞壁没有发生破坏^[8],所以 $\sigma_2 \leq \sigma_0$ 。当 $s = 2l$ 时

$$\int_{t_0}^{t_f} \sigma_1 dt = \int_{t_0}^{t_f} \sigma_2 dt + \frac{8\rho_s h l v}{L_0} \quad (13)$$

式中: $t_f - t_0 = \frac{H_0 - H_f}{v} = \frac{2l \cos \theta - 4h}{v}$ 。(13)式两边同时除以 $t_f - t_0$,可得蜂窝材料在一个压溃周期内的平台应力 σ_d ,表示为

$$\sigma_d = \sigma_0 + \frac{h}{l} \frac{2\rho_s}{\sqrt{3} - 4\left(\frac{h}{l}\right)} v^2 \quad (14)$$

类似地,可以得到正六边形蜂窝与凹角蜂窝的平台应力计算公式^[8,17]

$$\sigma_{d, \text{hexagon}} = \sigma_0 + \frac{h}{l} \frac{6\rho_s}{3\sqrt{3} - 8\left(\frac{h}{l}\right)} v^2 \quad (15)$$

$$\sigma_{d, \text{re-entrant}} = \sigma_0 + \frac{h}{l} \frac{16\rho_s}{7\sqrt{3} - 28\left(\frac{h}{l}\right)} v^2 \quad (16)$$

本研究中准静态抗压强度取值为: $\sigma_0 = \frac{2}{3}\left(\frac{h}{l}\right)^2 \sigma_{ys}$ 。

与文献[8]中的正六边形蜂窝结构平台应力的理论公式类似,半凹角蜂窝结构平台应力的理论公式包括两部分:蜂窝结构在准静态情况下的抗压强度和结构本身的惯性效应导致的强度增加项。表2给出了在不同胞壁厚度、不同冲击速度情况下,半凹角蜂窝结构平台应力的理论值和有限元结果。可以发现,其相对误差均小于10%。

如前所述,正六边形蜂窝、凹角蜂窝和半凹角蜂窝分别对应正泊松比、负泊松比和零泊松比力学特征。根据3种蜂窝结构平台应力的理论公式,图10给出了在相同壁厚时,3种蜂窝结构的平台应力在不同冲击速度下的变化曲线。从图10可以看出,零泊松比蜂窝的平台应力介于正泊松比蜂窝和负泊松比蜂窝之间,而出现这种结果的主要原因是蜂窝结构的构型差异。图11显示了半凹角蜂窝结构在纵向受压时的应力云图。可见,半凹角蜂窝的应力主要集中在内凹端塑性铰,结构中其他部分应力分布均匀。随着蜂窝持续被压缩,内凹端塑性铰处应力不断增大,而其他部分应力变化很小。这主要是因为胞元内凹端处收缩,造成接触面积减小,而冲击力保持不变,因此平台应力增大,凸出端则与此相反。综上可知,半凹角蜂窝兼具正泊松比蜂窝和负泊松比蜂窝的构型特征。半凹角蜂窝的平台应力较正六边形蜂窝得到增强,且局部变形带以“T”型为主。半凹角蜂窝胞元由于凸出端受压延伸,节点塑性铰的形成与正六边形蜂窝类似,故其平台应力较凹角蜂窝又有所减小。多孔结构的抗冲击性能与平台应力密切相关。因此,在相同条件下半凹角蜂窝结构的抗冲击性能优于正六边形蜂窝,较凹角蜂窝有所弱化。

表 2 半凹角蜂窝结构的平台应力
Table 2 Plateau stress of the semi re-entrant honeycombs

h/mm	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Average crushing strength/MPa		Deviation/%
		Theoretical	Numerical	
0.2	70	1.643	1.555	5.36
	100	2.788	2.850	2.22
	140	5.738	5.967	3.99
	200	11.421	11.551	1.14
0.3	70	2.910	3.180	9.28
	100	5.287	5.340	0.99
	140	9.761	9.012	7.67
	200	19.268	20.181	4.74
0.4	70	4.553	4.810	5.64
	100	8.134	8.222	1.08
	140	14.875	13.608	8.52
	200	29.200	28.769	1.48
0.5	70	6.682	7.170	7.30
	100	11.828	12.991	9.83
	140	21.514	21.545	0.14
	200	42.097	40.774	3.14

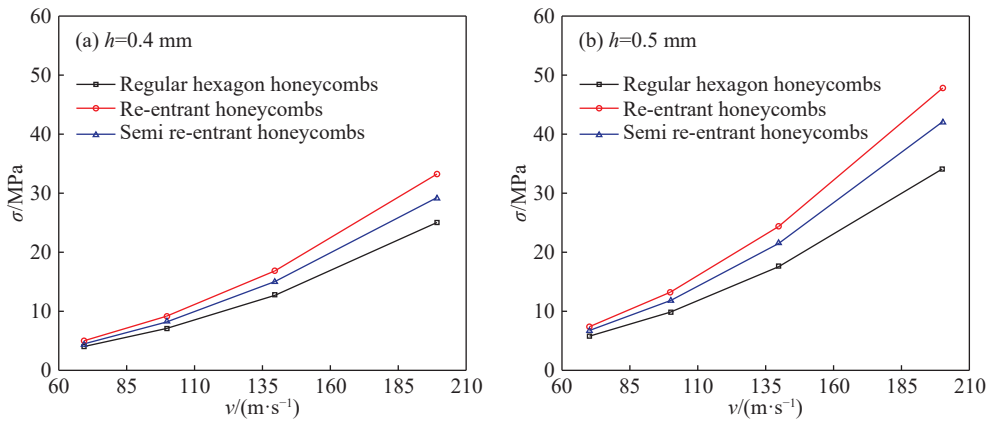


图 10 3 种蜂窝结构的冲击速度-平台应力曲线

Fig. 10 Impact velocity versus plateau stress curves of three types of honeycombs

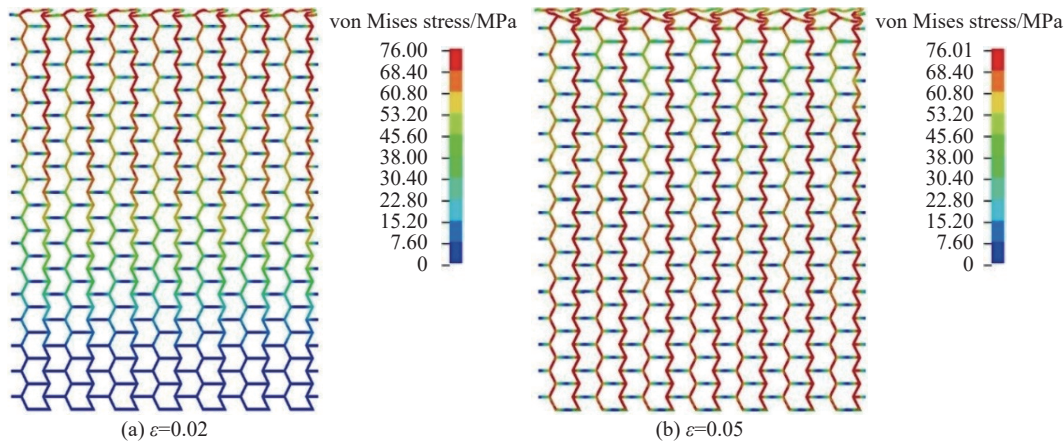


图 11 半凹角蜂窝的应力云图($h=0.5\text{ mm}$, $v=70\text{ m/s}$)

Fig. 11 Stress contours of semi re-entrant honeycombs ($h=0.5\text{ mm}$, $v=70\text{ m/s}$)

3 不同构型零泊松比蜂窝动态特性

在以上研究的基础上,采用相同的模型参数,通过在半凹角蜂窝内部增加直杆的方式,得到一种新型零泊松比蜂窝结构,以下简称为新型半凹角蜂窝,从而提高了半凹角蜂窝的抗冲击性能。其中,新型半凹角蜂窝内部直杆厚度与蜂窝其余杆件厚度相同。

图12显示了新型半凹角蜂窝在冲击速度 $v=35$ m/s 时的变形模式。可以发现,与半凹角蜂窝变形模式相同,其变形带呈“I”型,逐层传递至固定端,并且蜂窝在压缩过程中的横向尺寸没有发生变化,从而验证了新型半凹角蜂窝的零泊松比特性。观察图13和图14可知,新型半凹角蜂窝的平台应力高于半凹角蜂窝,且接近于凹角蜂窝。通过比较两种零泊松比蜂窝的构型特征,并结合一维冲击波理论,采用与第2.2节类似的方法可得新型零泊松比蜂窝的平台应力理论公式

$$\sigma_d = \sigma_0 + \frac{h}{l} \frac{2.5\rho_s}{\sqrt{3}-4\left(\frac{h}{l}\right)} v^2 \quad (17)$$

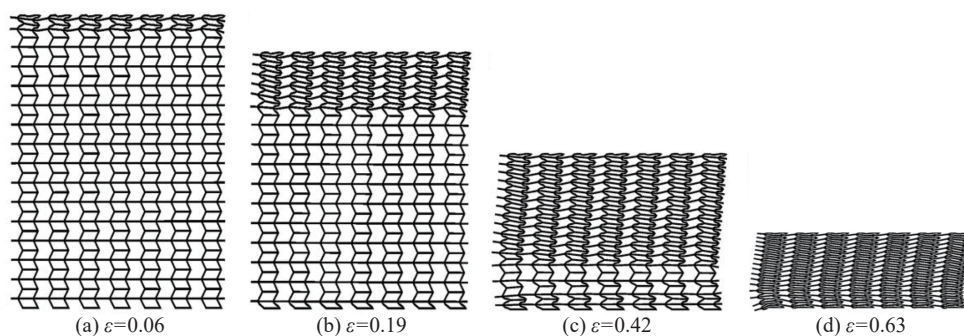


图12 新型半凹角蜂窝的变形模式($h=0.5$ mm, $v=35$ m/s)

Fig. 12 Deformation modes of novel semi re-entrant honeycombs ($h=0.5$ mm, $v=35$ m/s)

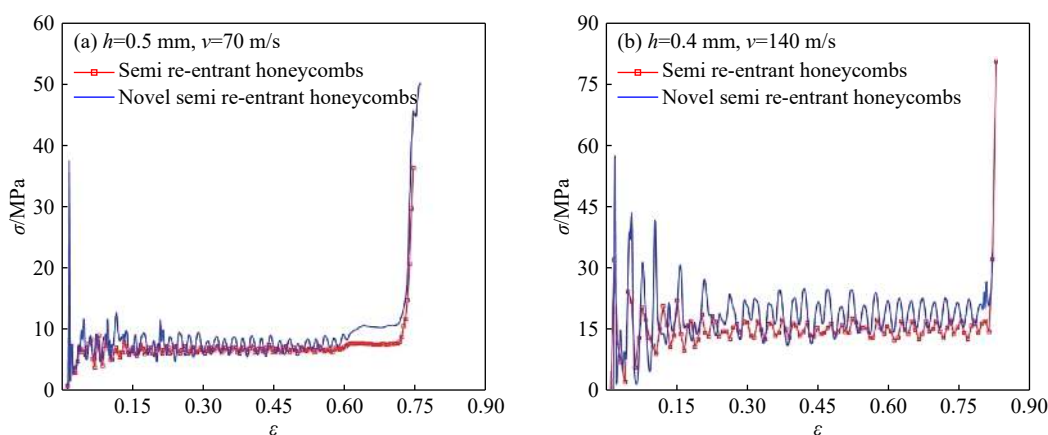


图13 半凹角蜂窝与新型半凹角蜂窝的名义应力-应变曲线

Fig. 13 Nominal stress-strain curves of semi re-entrant honeycombs and novel semi re-entrant honeycombs

图15分别给出了3种蜂窝的平台应力随冲击速度和胞壁厚度变化的曲线。可以发现,新型半凹角蜂窝的平台应力高于半凹角蜂窝和凹角蜂窝。随着冲击速度或胞壁厚度增加,新型半凹角蜂窝较半凹角蜂窝的平台应力优势也愈加明显。蜂窝结构的抗冲击能力与平台应力密切相关。相同条件下,平台应力越高,吸收的能量越多,抗冲击性能也越强。新型半凹角蜂窝纵向被压缩时,胞元内部直杆使其两端形成的塑性铰得到加强,进而造成塑性铰吸收的能量增多,且胞元整体厚度较半凹角蜂窝也有所

提高, 最终导致其平台应力增加。因此, 该结构设计可以提高半凹角蜂窝的抗冲击性能, 也为其他结构优化设计提供一定的理论参考。

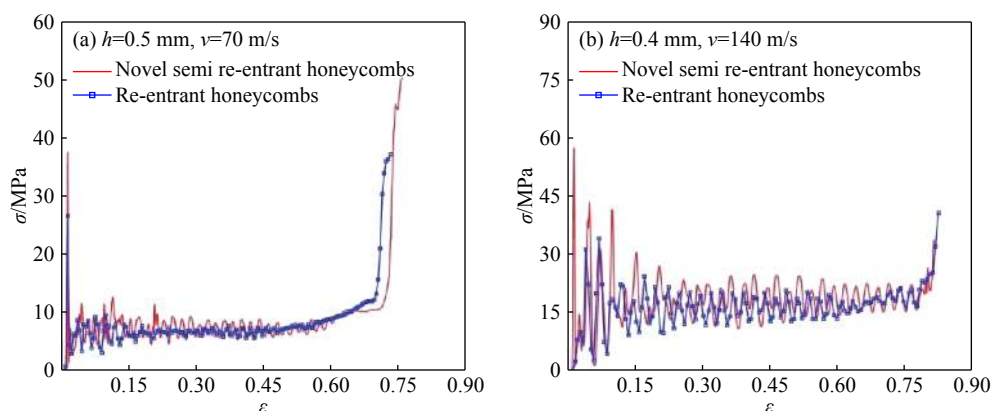


图14 新型半凹角蜂窝与凹角蜂窝的名义应力-应变曲线

Fig. 14 Nominal stress-strain curves of novel semi re-entrant honeycombs and re-entrant honeycombs

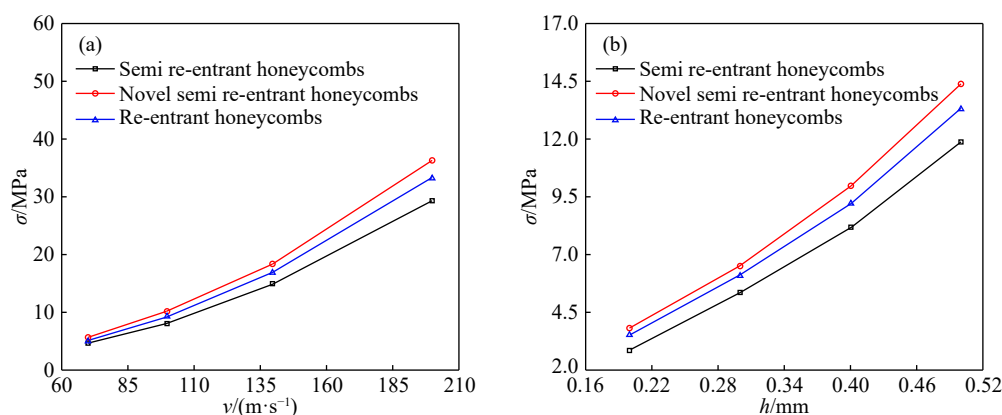


图15 3种蜂窝结构的(a)冲击速度-平台应力曲线($h=0.4$ mm)和(b)胞壁厚度-平台应力曲线($v=100$ m/s)

Fig. 15 Impact velocity (a) and cell wall thickness (b) versus plateau stress curves of three types of honeycombs ($v=100$ m/s)

4 结 论

以半凹角蜂窝为主要研究对象, 对比分析了3种蜂窝结构在动态冲击荷载作用下的变形模式和抗冲击性能。

(1) 半凹角蜂窝结构在冲击荷载作用下的变形模式主要依赖于零泊松比特性, 变形带以“I”型为主。在低速冲击下, 半凹角蜂窝结构伴有失稳现象发生。

(2) 根据一维冲击波理论, 推导了在高速冲击荷载作用下半凹角蜂窝结构的平台应力理论公式, 并与有限元结果进行对比, 分析验证了该理论公式的准确性。此外, 在相同的壁厚条件下, 通过对比3种蜂窝结构在不同冲击速度下的平台应力, 发现半凹角蜂窝的抗冲击性能介于正六边形蜂窝和凹角蜂窝之间, 其力学机理归因于蜂窝结构不同的几何构型。

(3) 通过在半凹角蜂窝内部增加直杆, 得到一种新型零泊松比蜂窝, 其抗冲击性能较半凹角蜂窝得到加强, 且接近于凹角蜂窝, 可为其他结构优化设计提供一定的理论参考。

参考文献:

- [1] ZHANG Q C, YANG X H, LI P, et al. Bioinspired engineering of honeycomb structure—using nature to inspire human innovation [J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 332–400.
- [2] BITZER T. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing [M]. New York: Springer Science & Business Media, 1997.
- [3] GRIMA J N, OLIVERI L, ATTARD D, et al. Hexagonal honeycombs with zero poisson's ratios and enhanced stiffness [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(9): 855–862.
- [4] NEVILLE R M, MONTI A, HAZRA K, et al. Transverse stiffness and strength of Kirigami zero- ν peek honeycombs [J]. *Composite Structures*, 2014, 114(1): 30–40.
- [5] 程文杰, 周丽, 张平, 等. 零泊松比十字形混合蜂窝设计分析及其在柔性蒙皮中的应用 [J]. *航空学报*, 2015, 36(2): 680–690.
- CHENG W J, ZHOU L, ZHANG P, et al. Design and analysis of a zero poisson's ratio mixed cruciform honeycomb and its application in flexible skin [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(2): 680–690.
- [6] HUANG J, GONG X B, ZHANG Q H, et al. In-plane mechanics of a novel zero poisson's ratio honeycomb core [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 89: 67–76.
- [7] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. In-plane compressive response and crushing of honeycomb [J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1994, 42(10): 1499–1532.
- [8] HU L L, YU T X. Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(5): 467–474.
- [9] RUAN D, LU G, WANG B, et al. In-plane dynamic crushing of honeycombs—a finite element study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(2): 161–182.
- [10] HU L L, YOU F F, YU T X. Effect of cell-wall angle on the in-plane crushing behaviour of hexagonal honeycombs [J]. *Materials & Design*, 2013, 46(4): 511–523.
- [11] HU L L, YU T X. Mechanical behavior of hexagonal honeycombs under low-velocity impact—theory and simulations [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(20/21): 3152–3165.
- [12] HONG S T, PAN J, TYAN T, et al. Dynamic crush behaviors of aluminum honeycomb specimens under compression dominant inclined loads [J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(1): 89–117.
- [13] 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.
- [14] 卢子兴, 王欢, 杨振宇, 等. 星型-箭头蜂窝结构的面内动态压溃行为 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1893–1900.
- LU Z X, WANG H, YANG Z Y, et al. In-plane dynamic crushing of star-arrowhead honeycomb structure [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1893–1900.
- [15] 张新春, 刘颖, 李娜. 具有负泊松比效应蜂窝材料的面内冲击动力学性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(5): 475–482.
- ZHANG X C, LIU Y, LI N. In-plane dynamic crushing of honeycombs with negative poisson's ratio effects [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(5): 475–482.
- [16] LIU W Y, WANG N L, GUO T, et al. In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure [J]. *Materials & Design*, 2016, 100: 84–91.
- [17] HOU X H, DENG Z C, ZHANG K. Dynamic crushing strength analysis of auxetic honeycombs [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2016, 29(5): 490–501.
- [18] CHEN Y, FU M H. Mechanical properties of a novel zero poisson's ratio honeycomb [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(2): 1700452.
- [19] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5/6): 531–570.
- [20] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

Impact Resistance of Semi Re-Entrant Honeycombs under in-Plane Dynamic Crushing

CHEN Peng, HOU Xiuhui, ZHANG Kai

(*School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

Abstract: The semi re-entrant honeycombs presented unique deformation modes due to its characteristic of zero Poisson's ratio. The impact resistance of the semi re-entrant honeycombs under in-plane impact load was compared with that of the traditional positive Poisson's ratio (regular hexagon) honeycombs and negative Poisson's ratio (re-entrant) honeycombs, and the effects of zero Poisson's ratio on its dynamic performance were revealed. Given cellular geometric parameters (cell wall's aspect ratio), the deformation behaviors of three honeycomb configurations under different impact velocities were analyzed. It is concluded that dominant local deformation band of the semi re-entrant honeycomb is "I" type because of the zero Poisson ratio. According to the one-dimensional shock wave theory, a theoretical formula of the average dynamic crushing strength of semi re-entrant honeycombs was derived and compared with the finite element results to verify its effectiveness. Simultaneously, it was found that the impact resistance of semi re-entrant honeycombs was between regular hexagon honeycombs and re-entrant honeycombs. Therefore, a novel zero Poisson's ratio honeycomb was designed by adding a rib into every cell of the semi re-entrant honeycomb, and its impact resistance was improved. These results provide certain theoretical references for other structural optimization designs.

Keywords: semi re-entrant honeycombs; zero Poisson's ratio; in-plane impacting; crushing strength