

包装系统性能与设计专题

斜方形蜂窝共面冲击力学行为

孙德强, 方众望, 雷晓东, 胡昕, 罗鹏飞, 郭丹丹
(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 在不同速度的共面冲击载荷条件下, 获取不同壁厚边长比的斜方形蜂窝芯材的动态力学参数。**方法** 建立有限元分析模型以及简化的能量吸收模型, 以评估斜方形蜂窝芯材共面向上的力学性能。**结果** 在冲击速度从低到高逐渐增大的过程中, 局部坍塌、“V”字形过渡和“一”字形坍塌等变形模式先后出现, 对其进行了详细的描述和展示。**结论** 在不同壁厚边长比下, 当其余结构参数固定时, 动态峰应力与冲击速度的平方成线性关系; 在不同冲击速度下, 其余参数固定时, 动态峰应力与壁厚边长比成幂指数关系。通过对数值结果的物理分析和讨论, 提出了关于冲击速度与动态峰应力的关系的经验公式。

关键词: 斜方形蜂窝; 共面; 动力学性能; 变形模式; 动态峰应力; 有限元分析

中图分类号: TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0001-05

Mechanical Behavior of Rhombic Honeycomb Cores under In-plane Impact Loadings

SUN De-qiang, FANG Zhong-wang, LEI Xiao-dong, HU Xin, LUO Peng-fei, GUO Dan-dan
(Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the mechanical parameters about the dynamic impact performance of rhombic honeycomb cores with various cell-wall-thickness-to-edge-length (δ/l) ratios, under the in-plane impact loadings with different impact velocities. The finite element analytical model and the simplified energy absorption model were established to evaluate the in-plane mechanical performance of rhombic honeycomb cores. The local collapse mode, V-shaped transitional mode and I-shaped deformation mode were gradually observed with the increasing impact velocities. These three different deformation modes were described and presented in detail. Under various cell-wall-thickness-to-edge-length ratios, when the remaining structural parameters are fixed, the dynamic plateau stress is in linear relation with the square of the impact velocities. At different impact velocities, when the remaining parameters are fixed, the dynamic plateau stress is related to the δ/l ratios with the exponential relationship. Through the physical analysis and discussion of the numerical results, the empirical formula on the relation between the impact velocity and the dynamic plateau stress is proposed.

KEY WORDS: rhombic honeycomb cores; in-plane; dynamic property; deformation mode; dynamic plateau stress; finite element analysis

蜂窝芯材是一种常见的二维多孔材料, 由蜂窝骨架和蜂窝孔阵列相间而成。蜂窝材料具有多种优

异的物理性能, 如缓冲减震、隔声隔热、导电导热、电磁屏蔽等, 现已在建筑、军事工业和航空航天等

收稿日期: 2016-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014); 陕西省教育厅 2014 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: 孙德强(1976—), 男, 山东沂水人, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发、包装系统设计。

诸多领域得到了广泛应用。蜂窝胞元的形状除了最为常见的正六边形外,还有三角形、圆形、正方形、斜方形、瓦楞形和 Kagome 形等。在力学性能方面,当蜂窝芯材的共面方向受到一定的冲击载荷作用时,其内部应力首先快速上升到一个特定值后,会在该值附近呈现出长时间的稳定状态。在此期间,大量的能量被蜂窝芯材吸收,从而实现了缓冲减震的功能。

目前,二维多孔材料的力学行为分析多采用有限元方法。传统的实验方法虽然同样能得到可靠的数据和结果,但是各种尺寸参数的二维多孔材料试样较难收集^[1-3]以及实验设备的昂贵,因此基于有限元分析软件对其力学行为进行模拟仿真计算成为该领域研究的首选方法^[4-11]。通过建立大量不同结构参数的斜方形蜂窝铝芯有限元模型,分别进行仿真计算,所得结果真实可靠,且便于在计算机上完成数据与图形的处理和分析,使繁琐的计算高效完成。文中采用有限元法,基于有限元软件 Ansys/LS-DYNA 研究斜方形蜂窝芯材共面冲击力学行为,并探讨其物理本质,为该材料在缓冲包装领域的应用提供理论基础。

1 有限元冲击模型

斜方形蜂窝芯材的各结构参数见图 1。对于单个蜂窝胞元,设定边长为 l , 扩展角为 θ , 芯材整体厚度为 d , 壁厚为 δ , 壁厚与边长的比值 δ/l 简称壁厚边长比。图 1 中坐标系下所示的 x_1 和 x_2 方向为共面方向。

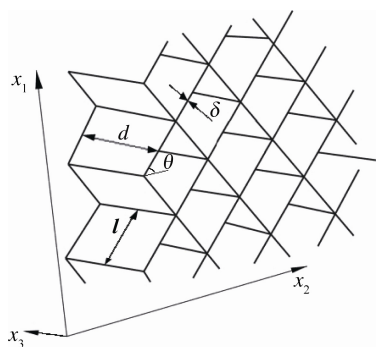


图 1 斜方形蜂窝结构及参数

Fig.1 The configuration and related parameters of rhombic honeycomb cores

参照文献[4—12]中的有限元模型,斜方形蜂窝芯材共面冲击分析模型见图 2,利用 Ansys/LS-DYNA 软件构建。该模型由 15×15 个斜方形单元阵列排布

而成,采用正方形的 Belytschko-Tsay Shell 163 单元对模型进行网格划分,有限单元边长为 0.5 mm。蜂窝样品夹在 P1 和 P2 两块刚性板之间;约束试样所有节点异面方向的位移,以确保样品共面变形状态。P1 沿 x_1 方向以恒定速率 v 向下运动,使蜂窝芯被充分压溃;P2 为支撑板,保持静止。其中 v 分别取 3, 20, 50, 70, 100, 125, 150, 175 和 200 m/s。蜂窝芯基材选用双线性应变硬化材料,该材料的各项力学参数分别为:密度 $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$, 正切模量 $E_{\tan} = 689.7 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E_s = 68.97 \text{ GPa}$, 屈服应力 $\sigma_{ys} = 292 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu_s = 0.35$ 。另外,基材力学行为视为与应变率无关。

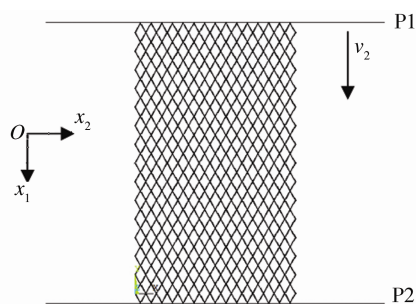


图 2 斜方形蜂窝共面冲击有限元模型

Fig.2 The finite element model of rhombic honeycomb cores under in-plane impact loadings

2 相关理论

2.1 共面变形机制

对于单个蜂窝单元,设定 $l = 3 \text{ mm}$, $d = 10 \text{ mm}$, θ 分别取 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 和 80° , δ 分别取 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.20 和 0.30 mm。斜方形蜂窝芯材的相对密度为:

$$\rho' = \frac{\delta}{l \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

典型的斜方形蜂窝芯材共面冲击应力-应变曲线见图 3a。在共面冲击载荷作用下,先后经历线弹性变形阶段、屈服平台阶段和密实化阶段的变形过程,其应力-应变曲线简化模型见图 3b。线弹性区的弹性变形较小,能量吸收少,应力首先达到一个初始峰值,称为初始峰应力,此时对应的应变为初始应变;孔壁材料超过屈服点后产生坍塌,经历长时间平台区的大变形,平台区的平均应力水平值称为动态峰应力;平台区过后,孔穴充分坍塌以致相对孔壁发生接触,且进一步的变形致应力应变曲

线最后陡然上升, 标志着密实化的产生, 此时的应变称为密实化应变。描述该过程的相关力学参数有初始应变 ε_0 、初始峰应力 σ_{IP} 、动态弹性模量 E_{sd} 、动态峰应力 σ_p 、密实化应变 ε_D 和密实化应变能 E_p 。

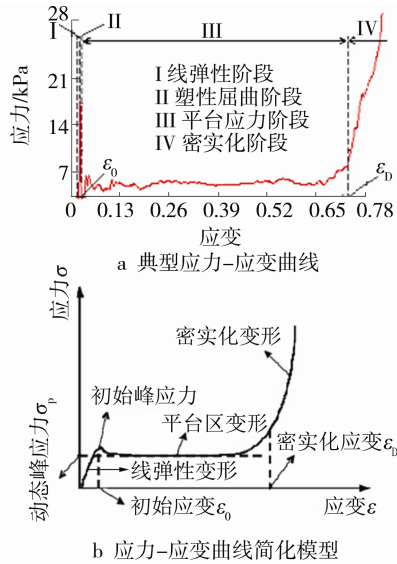


图 3 斜方形蜂窝共面冲击响应曲线

Fig.3 The response curves of rhombic honeycomb cores under in-plane impact loadings

2.2 能量吸收机制

根据参考文献[12]中给出的蜂窝芯材共面冲击的能量吸收机制, 可将图 3b 所示的 σ - ε 曲线进一步简化为一个四段式函数, 即

$$\begin{cases} \sigma = E_d \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \sigma_p \leq \sigma < \sigma_0, & \varepsilon = \varepsilon_0 \\ \sigma = \sigma_p, & \varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_D \\ \sigma = \sigma_p + E_s (\varepsilon - \varepsilon_D), & \varepsilon_D < \varepsilon < 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_d 为动态弹性模量; σ_0 为初始峰应力; ε_0 非常小, 可视为 $\varepsilon_0 \approx 0$ 。单位体积能量吸收 e_D 为:

$$e_D \approx \sigma_p \varepsilon_D \quad (3)$$

从所有模拟结果来看, $\varepsilon_D = 0.7 \sim 0.95$, 并随着冲击速度的增大而小幅增大。由式 (3) 易知, e_D 的取值主要是由 σ_p 决定的。

3 结果分析

3.1 变形模式

通过大量的有限元仿真计算, 可观察到斜方形蜂窝芯材在共面冲击载荷作用下的变形模式主要

受到冲击速度的影响。根据坍塌带的不同形状, 大致可分为以下 3 种典型情况: 低速冲击下的多重“V”字形坍塌 (图 4a); 中速冲击下的“X”字形坍塌 (图 4b); 以及高速冲击下的“一”字形坍塌 (图 4c)。

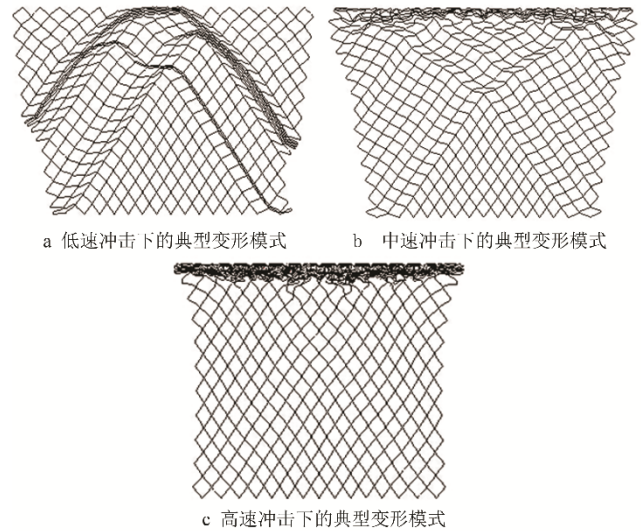


图 4 不同冲击速度下的典型变形模式

Fig.4 Typical deformation modes at different in-plane impact velocities

3.2 动态峰应力

3.2.1 与冲击速度的关系

通过进一步的模拟仿真, 采用固定其余结构仅变化一个结构参数的方法, 以一组扩展角为 60° 的斜方形蜂窝模型为研究对象, 得出了不同的壁厚和冲击速度条件下斜方形蜂窝的动态峰应力, 见表 1。

基于最小二乘法, 利用 Matlab 软件处理数据, 得到动态峰应力与冲击速度关系的拟合曲线, 见图 5, 并根据一维冲击波理论, 动态峰应力等于静态峰应力 and 因惯量引起的动态峰应力增加量之和:

$$\sigma_p = \sigma_0 + A v^2 \quad (4)$$

式中: σ_0 为静态峰应力; A 为关系系数。当壁厚分别为 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.20, 0.30 mm 时, 静态峰应力分别为 0.0066, 0.0447, 0.0969, 0.2669, 1.8776, 3.61 MPa, 关系系数分别为 47, 77, 107, 146, 332, 824 kg/m^3 。利用 Matlab 软件对各系数进行拟合, 在扩展角和壁厚边长比一定的情况下, 可得到斜方形蜂窝芯材动态峰应力与冲击速度经验公式的关系系数以及静态峰应力。其余扩展角度的斜方形蜂窝模型研究与该研究方法相同, 规律相似, 在此不全部列出。

表 1 扩展角为 60° 的斜方形蜂窝在不同冲击速度和不同壁厚条件下的动态峰应力

Tab.1 σ_p values of the rhombic honeycomb cores with deferent δ/l values and $\theta=60^\circ$ at different impact velocities MPa

冲击速度/(m·s ⁻¹)	壁厚/mm					
	0.03	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30
3	0.0141	0.0403	0.0767	0.1730	1.1410	2.4678
20	0.0238	0.0585	0.1058	0.3744	2.7455	3.1093
50	0.1025	0.2021	0.3376	0.6115	2.2847	4.4550
70	0.1837	0.3440	0.5374	0.9126	3.8348	6.5189
100	0.3383	0.6511	0.9637	1.5398	3.9964	8.6210
125	0.5953	1.0009	1.4483	2.2517	5.8325	10.8950
150	0.8197	1.4437	2.0940	3.1193	7.1620	12.7019
175	1.1192	1.9702	2.7257	4.1292	8.8926	15.1624
200	1.4637	2.4536	3.5604	5.3660	12.3533	19.6545

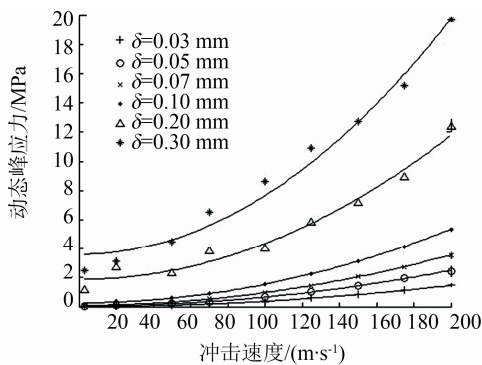


图 5 动态峰应力-冲击速度拟合曲线

Fig.5 σ_p - v fitted curve

3.2.2 与壁厚变长比的关系

由表 1 数据和上述方法,可得扩展角为 60° 的斜方形蜂窝动态峰应力和壁厚边长比关系的拟合曲线,见图 6。由 Ruan 等^[5]对六边形蜂窝芯材共面冲击力学性能的分析,可知动态峰应力和壁厚边长比的典型经验公式模型为:

$$\sigma_p = \sigma_{ys} B (\delta/l)^k \quad (5)$$

式中: σ_{ys} 为蜂窝芯材的屈服极限,文中取其

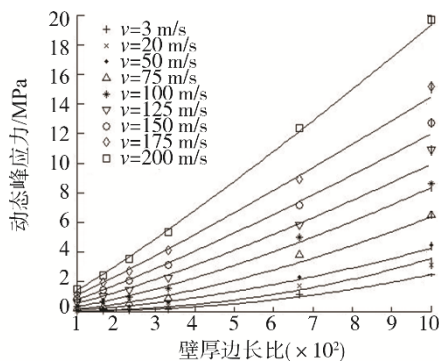


图 6 动态峰应力-壁厚边长比拟合曲线

Fig.6 σ_p - δ/l fitted curve

值为 292 MPa; B 为关系系数; k 为指数。在扩展角一定的情况下,随着冲击速度的变化,可知蜂窝芯材的动态峰应力与壁厚边长比成幂指数关系。经验公式的各项系数及指数经基于最小二乘法的拟合得到,见表 2。

表 2 不同冲击速度下动态峰应力与壁厚边长比经验公式关系系数

Tab.2 Values of the relation parameters between σ_p and δ/l at different impact velocities

冲击速度/(m·s ⁻¹)	B	k
3	229.92	6.2038
20	223.15	6.4094
50	167.45	5.3019
70	161.03	5.5586
100	142.92	5.4117
125	126.95	5.2184
150	118.17	5.2029
175	112.25	5.2568
200	114.03	5.5862

3.2.3 与扩展角的关系

固定 $\delta=0.15$ mm, θ 分别取 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70° 和 80° 的斜方形蜂窝模型为对象,研究扩展角大小与动态峰应力的关系。经过仿真计算,可得各项动态峰应力 σ_p , 见表 3。基于最小二乘法,拟合得到斜方形蜂窝动态峰应力与扩展角的关系曲线。在壁厚边长比一定的条件下,斜方形蜂窝的动态峰应力与扩展角近似成二次曲线关系。建立如下相关经验公式:

$$\sigma_p = A_1 \theta^2 + B_1 \theta + C_1 \quad (6)$$

式中: A_1 , B_1 , C_1 为关系系数。

表 3 壁厚为 0.15 mm 的斜方形蜂窝在不同冲击速度和不同扩展角条件下的动态峰应力
Tab.3 σ_p values of the rhombic honeycomb cores with $\delta=0.15$ mm and deferent θ values at different impact velocities
MPa

速度/(m·s ⁻¹)	扩展角/(°)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
3	0.0241	0.2712	0.3053	0.3327	0.4562	1.8652	1.1055	2.0498
20	0.0532	0.4204	0.4738	0.5516	0.7043	1.0601	2.1990	3.8877
50	2.1268	1.1065	0.9519	1.0425	1.3410	1.8702	4.1662	9.9503
70	3.7330	1.9548	1.5961	1.5955	1.9932	2.6590	5.6281	13.4114
100	6.9704	4.6105	2.9503	2.9019	3.5218	4.5488	8.4051	19.2065
150	12.9297	9.2637	7.2434	6.7183	6.8720	8.5701	14.2492	32.5009
200	24.0589	15.9410	13.3005	11.4566	11.9033	14.2854	22.2490	48.4111

4 结语

文中通过有限元法对斜方形蜂窝芯材在共面冲击载荷下的力学特性进行了研究。通过一系列的模拟仿真计算发现,斜方形蜂窝芯材的变形模式如下:在低速冲击下表现为多重"V"字形坍塌,中速时为"X"字形坍塌,高速时为"一"字形坍塌。经过处理和曲线拟合后,可知当壁厚边长比与扩展角一定时,动态峰应力与冲击速度的平方成线性关系;当冲击速度和扩展角一定时,动态峰应力与壁厚边长比成幂指数关系;当冲击速度和壁厚边长比一定时,动态峰应力与扩展角成二次曲线关系。基于最小二乘法的关系系数拟合,分别得到了以上 3 种关系的经验公式,并探讨了斜方形蜂窝芯材结构参数对其共面力学性能影响的物理本质。

参考文献:

[1] 唐勇,黄利强. 蜂窝结构对蜂窝纸板平压性能影响的研究[J]. 包装工程,2012, 33(5):56—58.
TANG Yong, HUANG Li-qiang. Influence of Honeycomb Structure on Flatwise Compressive Performance[J]. Packaging Engineering,2012, 33(5):56—58.

[2] 刘冰,阮红斌,曹海斌,等. 蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载及静态缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2012, 33(7): 4—8.
LIU Bing, RUAN Hong-bin, CAO Hai-bin, et al. Research on Outside Bearing and Static Cushioning Performance of Honeycomb-corrugated Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 4—8.

[3] 王虹,王文明,胡兵林. 等. 纸蜂窝材料的有效缓冲及其预压缩试验[J]. 包装工程,2012, 33(1): 20—23.
WANG Hong, WANG Wen-ming, HU Bing-lin, et al. Effective Cushioning of Paper Honeycomb Material and Precompression Test[J]. Packaging Engineering, 2012,

33(1): 20—23.

[4] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices under Uniaxial Compression, Part I: Quasi-static Strength Predicted by Limit Analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10/11): 1223—1230.

[5] RUAN D, LU G, WANG D, et al. In-plane Dynamic Crushing of Honeycombs: a Finite Element Study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(2): 161—182.

[6] 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.

[7] 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 Analysis of Hexagonal Honeycomb's Out-of-plane Impact Performance[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 60—62.

[8] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices under Uniaxial Compression, Part II: Dynamic Crushing Based on Finite Element Simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10/11): 1231—1241.

[9] SUN D, ZHANG W. Mean in-plane Plateau Stresses of Hexagonal Honeycomb Cores under Impact Loadings[J]. Composite Structures, 2009, 91(2):168—185.

[10] SUN D, ZHANG W, WEI Y. Mean Out-of-plane Dynamic Plateau Stresses of Hexagonal Honeycomb Cores under Impact Loadings[J]. Composite Structures, 2010, 92(11): 2609—2621.

[11] 黄颖为, 冯俊华, 孙德强. 正方形金属蜂窝材料共面力学性能的仿真分析[J]. 包装工程, 2009, 30(4):18—20.
HUANG Ying-wei, FENG Jun-hua, SUN De-qiang. Simulation Analysis on Coplane Mechanical Properties of Square Metal Aluminum Honeycomb[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(4): 18—20.

[12] 孙德强, 方众望. 多层 U 形 A 瓦楞结构材料的共面力学性能[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 8—12.
SUNDe-qiang, FANGZhong-wang. In-plane Dynamics of Multilayer A-type U-shaped Corrugated StructureMaterials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13):8—12.