包装技术与工程

正方形蜂窝芯材共面冲击力学性能

孙德强[1]，孙玉瑾[2]，郑波波[1]，王庆庆[1]，李文娥[1]，王晨阳[1]，孙建建[1]
（1. 陕西科技大学，西安 710021；2. 西安理工大学高科学院，西安 710109）

摘要：目的 研究正方形蜂窝芯材在共面冲击载荷作用下的力学行为。**方法** 借助于有限元软件ANSYS/LSDYNA，建立了相应基于单元阵列的有限元模拟和分析方法。**结果** 随着冲击速度的增加，正方形蜂窝表现为不同的变形模式，其冲击响应的力-位移曲线包含了具有明显不同特征的4个阶段，对于给定结构参数的正方形蜂窝样品，在不同冲击速度下会呈现出不同的变形模式。计算出了不同冲击速度下不同壁厚边长比的正方形蜂窝芯材的动态峰应力。**结论** 正方形蜂窝芯材的动态峰应力，是其静态峰应力和因惯量引起的峰应力增量之和；静态峰应力与正方形蜂窝芯材的相对密度成正比，峰应力增量与冲击速度的平方成正比，而相对密度又取决于壁厚边长比。最后拟合得到了动态峰应力关于壁厚边长比和冲击速度的经验公式。

关键词： 正方形蜂窝芯材；共面冲击；变形模式；动态峰应力
中图分类号： TB484.1；TB487 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2014)03-0001-05

In-plane Dynamics of Square Honeycomb Cores

SUN De-qiang[1], *SUN Yu-jin*[2], *ZHENG Bo-bo*[1],
WANG Qing-qing[1], *LI Wen-e*[1], *WANG Chen-yang*[1], *SUN Jian-jian*[1]
(1. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;
2. Hi-tech College, Xi'an University of Technology, Xi'an 710109, China)

ABSTRACT: Objective To study the mechanical behaviors of square honeycombs cores under the in-plane dynamic impact loadings. **Methods** Corresponding finite element simulation and analysis methodology based on cell array was established using the ANSYS/LSDYNA tool. **Results** With the increasing impact velocities, different deformation modes were observed. The force-displacement curves included four regimes with distinct characteristics. Different deformation modes were observed for a specimen with given configuration parameters at different impact velocities. The dynamic plateau stresses were calculated for the square honeycombs cores with different t/l ratios at different in-plane impact velocities. **Conclusion** The dynamic plateau stress was the sum of the static plateau stress and the dynamic enhancement due to the inertia effect. The static plateau stress was proportional to the relative density of square honeycombs cores. The dynamic enhancement stress was proportional to the square of impact velocity and the relation coefficient depended on the t/l ratios. The empirical formula of dynamic plateau stress in terms of t/l ratio and impact velocity was given.

KEY WORDS: square honeycomb cores; in-plane impact; deformation mode; dynamic plateau stress

收稿日期： 2013-12-01
基金项目： 陕西省自然科学基金项目(2010JQ1011)；陕西省教育厅专项研究计划项目(11JK0534)；陕西科技大学博士启动金项目(BJ12-15)；陕西省2013年大学生创新创业训练项目
作者简介： 孙德强(1976—)，男，山东沂水人，博士，陕西科技大学副教授，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。

正方形蜂窝芯材是一种重要的二维多孔缓冲材料,在建筑、航空、包装、军事、交通运输等领域应用广泛。有很多学者对其共面力学性能进行了大量研究。Wang 和 McDowell 对其静力学性能进行了系统总结[1]。实验法[2—5]可用来研究其力学性能,但实验中很难准备具备各种尺寸条件的样品,所以有限元法得到了广泛应用[6—11]。借助于有限元法,Liu 和 Zhang[6]以及 Qiu 等人[8—9]、黄颖为等人[11],再现了正方形蜂窝芯材的共面冲击过程。这些研究工作对于正方形蜂窝芯材的缓冲设计来说是不够的,因为这些有限元模拟结果显示,结构参数和冲击速度影响着正方形蜂窝芯材的冲击力学性能,随着冲击速度的增加,应力-应变响应曲线的振荡幅度随之增加,能量吸收图也没有揭示能量吸收和冲击速度的关系,这就意味着传统缓冲设计方法不适合于高速冲击载荷作用下正方形蜂窝芯材的缓冲设计[12—13]。然而冲击波理论[14]表明,多孔材料的能量吸收与冲击度有关,因此很有必要来揭示正方形蜂窝芯材共面冲击力学性能结构参数与冲击速度的关系。

文中借助于有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 来构建正方形蜂窝芯材共面冲击分析模型,以获得描述其能量吸收性能的关键力学参数,冲击速度范围为 3 ~250 m/s。针对各种结构参数下的正方形蜂窝样品进行了大量有限元模拟,给出了变形模式、响应曲线和动态峰应力的结果。对相关物理本质进行了分析,并基于有限元计算结果,推导了动态峰应力的相关经验公式。

1 模型和分析方法

1.1 有限元模型

正方形蜂窝芯材的结构见图 1,其周期性特征单元的边长为 l,均匀的壁厚为 t。整个蜂窝的总厚度为 b,t/l 称为壁厚边长比。则正方形蜂窝芯材的相对密度 $\bar{\rho}$ 为[7]:

$$\bar{\rho}=\rho^*/\rho_s=2t/l[1-t/(2l)] \tag{1}$$

其中:ρ^* 和 ρ_s 分别为正方形蜂窝芯材的密度及其基材的密度。

参照 Liu 和 Zhang[6]以及 Qiu 等人[8—9]、黄颖为等人[11]的有限元模型,正方形蜂窝芯材共面冲击分析的有限元模型见图 2。样品单元边长 l 固定为 3 mm,样品置于上下 2 个刚性压板之间,为了保证共面应变状态,样品所有节点 x_3 方向上的自由度被约束为 0。支撑板(P_2)固定,上压板(P_1)以恒定的速度 v 向下运动直至蜂窝样品压实。利用 ANSYS/LS-DYNA 构建有限元模型,选用其中的 5 个积分点的 Belytschko-Tsay 壳单元 Shell163 划分网格,单元边长为 0.3 mm。在样品所有可能接触的表面上,定义无摩擦的自动单面接触,样品与上下压板之间定义摩擦系数为 0.02 的自动面面接触。基材选用应变率不敏感的双线性应变硬化材料,材料参数:密度 $\rho_s=2700\ \mathrm{kg/m^3}$,泊松比 $v_s=0.35$,弹性模量 $E_s=68.97$ GPa,屈服应力 $\sigma_{ys}=292$ MPa,正切刚度 $E_{tan}=689.7$ MPa。大量试探性模拟计算后发现:样品合理厚度 $b=10$ mm,x_1 和 x_2 方向上的单元数量大于等于 15×13。

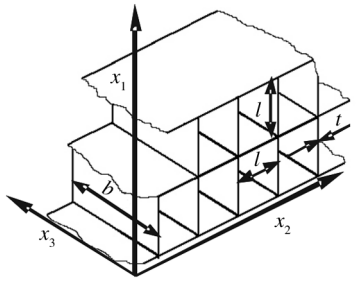


图 1 正方形蜂窝芯材的结构

Fig. 1 Configuration of square honeycomb cores

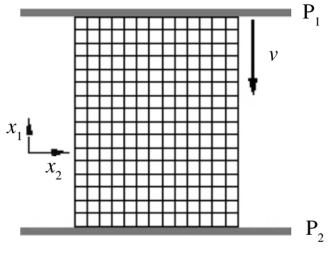


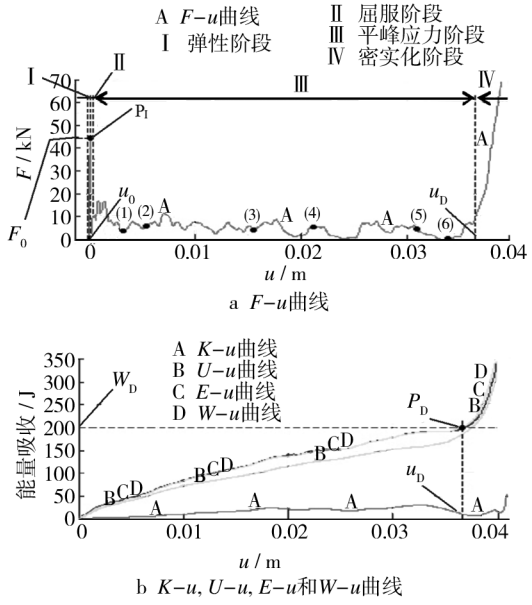
图 2 正方形蜂窝芯材共面冲击分析的有限元模型示意

Fig. 2 Schematic finite element model of square honeycomb cores for in-plane crushing loadings

1.2 分析原理

利用 LSPREPOSTD 软件处理 ANSYS/LS-DYNA 的计算结果可得所有响应曲线,典型曲线见图 3,其中 $l=3$ mm,$t=0.25$ mm,$v=100$ m/s。F 为上压板和样品间的冲击接触力,u 为上压板的位移,K,U 和 E 为样品的动能、应变内能和总能量吸收,$E=K+U$;W 为冲击力 F 的功。

由图 3a 可知,正方形蜂窝芯材在共面冲击载荷



a F-u曲线

b K-u, U-u, E-u和W-u曲线

图 3　共面冲击载荷作用下典型的冲击力和能量吸收曲线

Fig. 3 Typical impact force and energy absorption curves of square honeycomb cores under the in-plane impact loading

作用下,会先后经历明显的线弹性、屈服、平峰冲击力和密实化 4 个阶段。点 P_1 处于弹性阶段末,相应冲击力和位移分别称为初始峰冲击力 F_0 和初始位移 u_0。在屈服阶段冲击力突然降至一个较低的水平,接着经历大位移的平峰冲击力阶段。在点 P_D 相应 W 的拐点意味着密实化的开始,相应位移称为密实化位移 u_D。在密实化阶段 F 急剧增加,尽管该段能量吸收明显,但作用在产品的上冲击力会很大,所以在缓冲应用中正方形蜂窝变形不能进入该阶段,因此选定正方形蜂窝芯材共面缓冲能量吸收的关键力学参数为动态峰应力 σ_p。假设 W-u 曲线上相应 u_0 和 u_D 的功分别为 W_0 和 W_D,则:

$$\sigma_p = (W_D - W_0)/[A_0(u_D - u_0)] \tag{2}$$

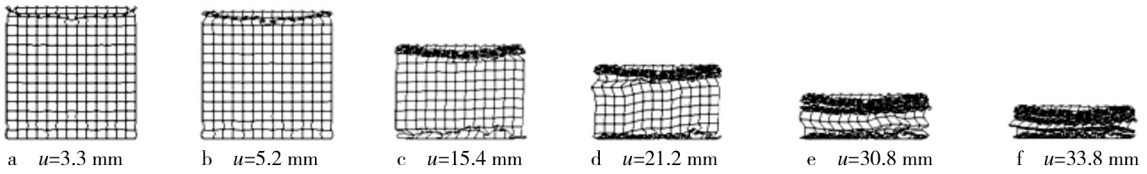
式中:A_0 为样品沿冲击方向上横截面的面积。

2　结果分析

2.1　变形模式

具有不同壁厚边长比的正方形蜂窝芯材,在不同冲击速度下呈现出相类似的变形模式。对应于图 3a 曲线上(1)—(6)点正方形蜂窝样品的变形模式见图 4。靠近上压板的首行单元首先发生塑性屈服,而后坍塌快速波及第 2 行,将形成第 1 个“一”字形坍塌带。当第 2 行单元完全坍塌的时候,第 14 和 15 行的单元开始坍塌(见图 4a)。当第 14 和 15 行的单元完全坍塌时,第 3—6 行单元坍塌相连形成第 1 个“一”字形坍塌带,第 14 和 15 行的单元的坍塌也最终形成了第 2 个“一”字形坍塌带(见图 4b,c)。随后,中间的单元行也分别加入到这 2 个坍塌带中,直至 2 个坍塌带接触在一起(见图 4d,f)。

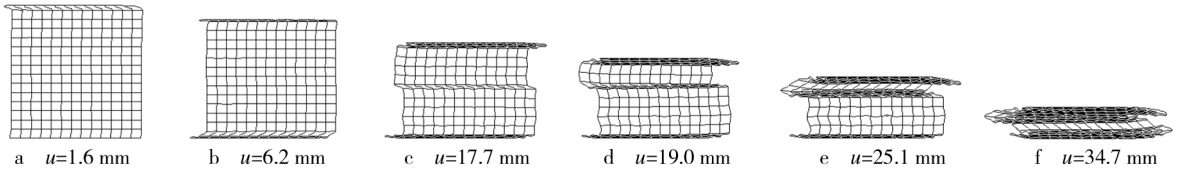
在低速(如 v=3 m/s)冲击载荷条件下,正方形蜂窝芯材表现为类静态的变形模式,见图 5。靠近上压板形成第 1 个“一”字形坍塌带后,第 2 个“一”字形坍塌带在靠近支撑板附近形成(见图 5a,b)。随着这 2 个坍塌带的不断扩展,第 3 个“一”字形坍塌带在靠近样品中间的第 8 行单元形成(见图 5c)。随着变形的不断发展,更多的单元行卷入了这 3 个“一”字形坍塌带(见图 5d)。第 1 个和第 3 个坍塌带首先接触(见



a　u=3.3 mm　b　u=5.2 mm　c　u=15.4 mm　d　u=21.2 mm　e　u=30.8 mm　f　u=33.8 mm

图 4　动态变形阶段(l=3 mm,t =0.20 mm,v =100 m/s)

Fig. 4 Dynamic deformation stages of SHCs (l=3 mm,t =0.20 mm,v =100 m/s)



a　u=1.6 mm　b　u=6.2 mm　c　u=17.7 mm　d　u=19.0 mm　e　u=25.1 mm　f　u=34.7 mm

图 5　动态变形阶段(l=3 mm,t =0.20 mm,v =3 m/s)

Fig. 5 Dynamic deformation stages of SHCs(l=3 mm, t =0.20 mm,v =3 m/s)

图 5e),当第 2 个和第 3 个坍塌带接触的时候(见图 5f),样品逐渐变得密实化。随着冲击速度的增加,更多的单元行在第 2 个坍塌带形成前会卷入第 1 个坍塌带,见图 6。当冲击速度高于某个值, 第 2 个坍塌带会消失,坍塌带将由冲击端不断向前推进至支撑板端。

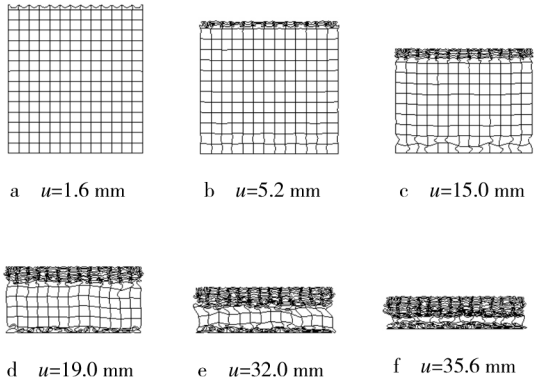


图 6 动态变形阶段

(l=3 mm, t =0.20 mm, v =200 m/s)

Fig. 6 Deformation stages of SHCs

(l=3 mm, t =0.20 mm, v =200 m/s)

2.2 动态峰应力

根据 Reid 和 Peng 所提出的一维冲击波理论[14],可得动态峰应力的公式为:

$$\sigma_p = \sigma_0 + Av^2 \tag{3}$$

式中:σ_0 为静态峰应力;Av^2 为因惯量引起的动态峰应力增加量;A 为关系系数。Qiu 等人的分析表明,$\sigma_0 \propto (\rho)^2$[8]。黄颖为等人尽管给出了正方形蜂窝芯材共面峰应力的经验公式,但没有从物理本质的角度去分析[11]。Qiu 等人[9]考虑相关物理本质,给出了动态峰应力的 3 套经验公式:$\sigma_p = A_1\sigma_{ys}\bar{\rho}^2 + (C_2\bar{\rho}^2 + C_1\bar{\rho} + C_0)\rho_s v^2$;$\sigma_p = A_1\sigma_{ys}\bar{\rho}^2 + B_1\bar{\rho}\rho_s v^2$;$\sigma_p = A_1\sigma_{ys}\bar{\rho}^2 + \bar{\rho}\rho_s v^2/(1-B_2\bar{\rho})$。其中,$A_1, C_2, C_1, C_0, B_1, B_2$ 为拟合系数。

改变样品的壁厚尺寸,获得不同壁厚边长比的样品,在不同冲击速度下进行模拟,可得到相应动态峰应力,见表 1。模拟计算发现,在 v=3 m/s 时,样品中动能在总能量吸收中的比例远低于 2%,所以此时的动态峰应力(见表 1 中第 1 行)应近似等于相应静态峰应力[15],利用最小二乘法拟合得到的相应 A 值见表 1 的最后一行。根据理论拟合曲线误差大小得出,经验公式 $\sigma_p = A_1\sigma_{ys}\bar{\rho}^2 + (C_2\bar{\rho}^2 + C_1\bar{\rho} + C_0)\rho_s v^2$ 拟合表 1 的数据效果最佳。基于该公式,利用最小二乘法得到的各拟合系数值分别为:A_1 = 0.22, C_2 = 53.103, C_1 = −1.974, C_0 = 0.490。最终得到正方形蜂窝芯材动态峰应力的经验公式为:

$$\sigma_0 = 0.22\sigma_{ys}(\bar{\rho})^2 + (53.103\bar{\rho}^2 - 1.947\bar{\rho} + 0.490)\rho_s v^2 \tag{4}$$

表 1 不同壁厚边长比(l= 3 mm)和冲击速度条件下正方形蜂窝样品的共面动态峰应力

Tab. 1 In-plane dynamic plateau stresses of square honeycomb cores with different t/l ratios (l= 3 mm) at different impact velocities MPa

v/(m·s^{-1})	t/mm							
	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
3	0.02	0.05	0.11	0.23	0.51	1.11	1.70	2.27
50	0.15	0.36	0.74	1.47	2.75	4.88	9.16	10.53
70	0.25	0.52	0.77	1.83	3.41	5.57	11.24	15.09
100	0.44	0.98	1.31	2.41	4.05	7.31	14.11	19.91
125	0.77	1.21	1.97	3.33	4.74	7.91	16.86	22.98
150	1.06	1.89	2.53	4.04	6.72	8.51	21.63	28.08
175	1.46	2.37	3.16	5.46	7.95	15.77	26.96	–
200	1.96	3.00	3.85	6.43	10.38	16.84	–	–
250	2.96	5.06	7.39	10.37	16.62	–	–	–
A/(10^2 kg·m^{-3})	0.47	0.77	1.07	1.46	2.27	3.32	6.18	8.24

3　结语

利用有限元分析工具 ANSYS/LS-DYNA,建立了基于单元阵列的正方形蜂窝芯材共面动态冲击分析的有限元模型,经过大量尝试性模拟,计算得到了最终有限元模型的合理尺寸。给出了有限元计算得到的动态变形模式、变形曲线和动态峰应力值。冲击力响应曲线具有明显的线弹性、屈服、平峰应力和密实化等 4 个阶段。对于给定壁厚边长比的正方形蜂窝样品,在不同冲击速度下呈现出不同的变形模式。壁厚边长比和冲击速度影响动态峰应力,基于有限元计算结果,利用最小二乘法拟合得到了正方形蜂窝共面动态峰应力的计算经验公式。

参考文献:

[1] WAND A J, MCDOWELL D L. In-plane Stiffness and Yield Strength of Periodic Metal Honeycombs[J]. J Eng Mater Technol, 2004, 126(2): 137—156.

[2] ZHU H X, MILLS N J. The In-plane Non-linear Compression of Regular Honeycombs[J]. Int J Solids Struct, 2000, 37(13): 1931—1949.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] SUN D, ZHANG W. Mean In-plane Plateau Stresses of Hexagonal Honeycomb Cores under Impact Loadings[J]. Comp Struct, 2009, 91(2): 168—185.

[7] LIU Y, ZHANG X C. The Influence of Cell Micro-topology on the In-plane Dynamic Crushing of Honeycombs[J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(1): 98—109.

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

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

[10] 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.

[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] 彭国勋,宋宝丰. 物流运输包装设计[M]. 第 2 版. 北京:印刷工业出版社,2012.
PENG Guo-xun, SONG Bao-feng. Design of Packages for Distribution and Transport[M]. 2nd Edition. Beijing: Printing Press, 2012.

[13] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structures and Properties[M]. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[14] REID S R, PENG C. Dynamic Uniaxial Crushing of Wood[J]. Int J Impact Eng, 1997, 19(5/6): 531—570.

[15] 王青春,范子杰. 利用 Ls-Dyna 计算结构准静态压溃的改进方法[J]. 力学与实践,2003,25(3):20—23.
WANG Qing-chun, FAN Zi-jie. Improvement in Analysis of Quasi-static Collapse with LSDYNA[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(3): 20—23.