

# 六边形蜂窝芯材异面冲击性能的有限元研究

孙玉瑾<sup>1</sup>, 骆光林<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 高科学院, 西安 710109; 2. 西安理工大学, 西安 710048)

**摘要:** 建立了六边形蜂窝单元阵列的有限元模型, 利用有限元分析软件分析研究了六边形金属蜂窝的异面冲击性能。当六边形蜂窝铝芯的各结构参数固定时, 在不同的冲击速度下, 研究了壁厚边长比对其异面冲击动态峰应力的影响规律。根据有限元模拟计算结果, 给出了所用六边形蜂窝铝芯样品异面动态峰应力的计算公式。

**关键词:** 六边形金属蜂窝芯材; 异面冲击性能; 有限元模型; 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(2012)17-0060-03

## Finite Element Analysis of Hexagonal Honeycomb's Out-of-plane Impact Performance

SUN Yu-jin<sup>1</sup>, LUO Guang-lin<sup>2</sup>

(1. Hi-tech College, Xi'an University of Technology, Xi'an 710109, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Finite element model of hexagonal honeycombs cell arrays was established. The out-of-plane impact performance of hexagonal metal honeycombs was studied by using finite element method. When all configuration parameters of hexagonal metal honeycombs were kept constant, under different impact velocities, dynamic compression test was simulated to study the influences of wall thickness on out-of-plane impact performance of hexagonal honeycombs. The formula to calculate the out-of-plane plateau stresses of hexagonal aluminum honeycombs was been given based on the finite element analysis results.

**Key words:** hexagonal metal honeycombs; out-of-plane impact performance; finite element model; dynamic plateau stress

六边形蜂窝芯材是一种多孔材料, 具有很好的缓冲性能, 在包装、航空等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。国内外对于其性能的研究主要集中在它的静态性能<sup>[7-9]</sup>, 而其高速冲击下动态性能的研究比较少<sup>[2-3]</sup>。研究其在一定冲击速度下的缓冲性能与结构参数和冲击速度的关系, 具有十分重要的科学实用价值。利用计算机仿真模拟实验可以大大缩短研究周期, 降低研究成本<sup>[4-5]</sup>。文中利用 ANSYS/LS\_DYNA 软件建立六边形蜂窝结构的有限元模型, 研究其异面冲击性能。

## 1 有限元模型

常见的六边形蜂窝芯材结构有单壁厚和双壁厚之分, 文中主要研究均匀壁厚即单壁厚结构芯材的异

面冲击性能。单壁厚六边形蜂窝芯材结构见图 1, 每

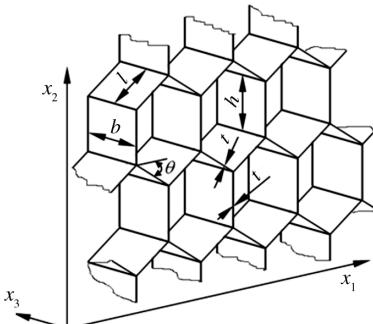


图 1 六边形蜂窝芯结构

Fig. 1 Configuration of hexagonal honeycombs

个蜂窝单元有 4 个长  $l$  和 2 个长  $h$ 、壁厚为  $t$  的孔壁, 蜂窝深度为  $b$ 。称  $t/l$  为壁厚边长比,  $h/l$  为边长比,  $\theta$

收稿日期: 2012-06-08

作者简介: 孙玉瑾(1982—), 女, 山东人, 硕士, 西安理工大学高科学院助教, 主要从事包装工程专业的教学与研究。

为扩展角。六边形金属蜂窝芯材的异面冲击性能不仅与这些结构参数有关,也与冲击速度有关。

选取铝合金为基材,其力学参数为:弹性模量  $E_s$  为 68.97 GPa,屈服应力  $\sigma_{y,s}$  为 292 MPa,正切模量  $E_{tan}$  为 689.7 MPa,泊松比  $\nu_s$  为 0.35,密度  $\rho$  为 2700 kg/m<sup>3</sup>。取边长  $l$  为 3 mm,边长比  $h/l$  为 1,扩展角固定为 30°,蜂窝深度  $b$  为 15 mm,来建立  $x_1$  和  $x_2$  方向上 10×11 的蜂窝单元阵列(见图 2a)作为六边形蜂窝铝芯材异面冲击分析的有限元几何模型。在该模

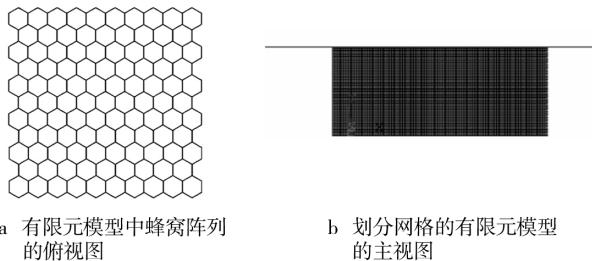


图 2 六边形金属蜂窝芯材的有限元模型

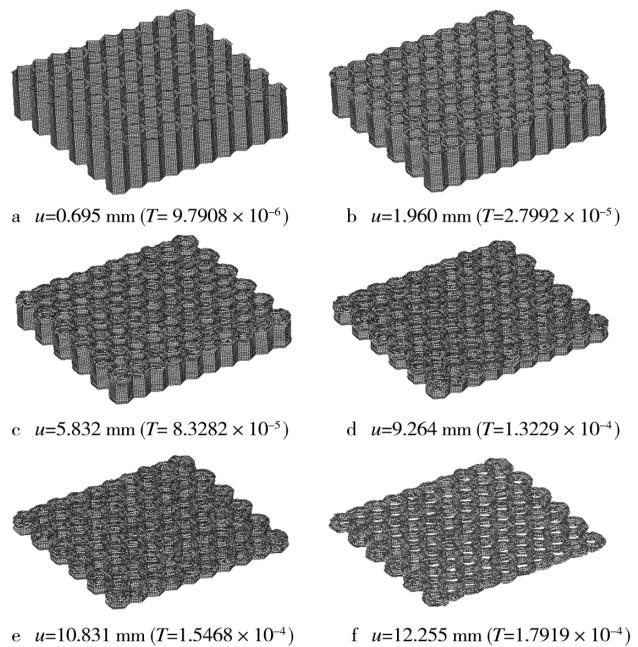
Fig. 2 Finite element model of hexagonal metal honeycombs

型中进行了以下参数设置,蜂窝体底线的自由度被约束为 0,蜂窝阵列被置于刚性压板之下;此外,为了保证蜂窝芯材被充分压溃,刚性压板具有一定质量,并以一定的初始速度  $v$  匀速沿异面方向下压。利用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行模拟计算,采用 5 个积分点 Shell163 划分网格,孔壁沿边缘被划分为 10 个单元(见图 2b)。整个模型设为自动单面接触,蜂窝体与刚性压板之间设为自动面面接触。

文中研究当六边形蜂窝铝芯结构其他参数固定时,壁厚边长比与冲出速度对六边形铝蜂窝芯材动态峰应力的影响规律。在此将冲击速度  $v$  分别设为 3, 10, 20, 35, 45, 55, 70, 80 m/s, 边长  $l$  为 3 mm, 壁厚  $t$  取 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.12, 0.15 mm 进行有限元模型的异面冲击分析。采用图 2 的模型进行有限元分析后,得到在  $b=15$  mm,  $l=3$  mm,  $t=0.07$  mm,  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $v=70$  m/s 下六边形金属蜂窝铝芯的异面冲击变形图,见图 3。

## 2 数据分析方法

有限元模型进行异面冲击分析后,将所得数据用后处理软件 LSPERPOSTD 直接得出  $F-t$  曲线、 $u-t$  曲线、 $K-t$  曲线、 $EU-t$  曲线和  $KU-t$  曲线,处理后可以得到



( $b=15$  mm,  $l=3$  mm,  $t=0.07$  mm,  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $v=70$  m/s)

图 3 异面冲击载荷下六边形蜂窝铝芯材的变形过程

Fig. 3 Deformation course of aluminum hexagonal aluminum honeycombs under out-of-plane impact loadings

$F-u$ ,  $K-u$ ,  $EU-u$ ,  $KU-u$  等曲线。其中,  $F$  为刚性上压板的冲击力;  $K$  为蜂窝体的动能;  $EU$  为应变能;  $KU$  为总能量的吸收;  $t$  为冲击时间;  $u$  为冲击产生的位移。

$l=3$  mm,  $t=0.10$  mm,  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$  的六边形蜂窝铝芯在冲击速度为 70 m/s 时的  $F-u$  曲线见图 4a, 其对应的  $K-u$ ,  $EU-u$  和  $KU-u$  曲线见图 4b。

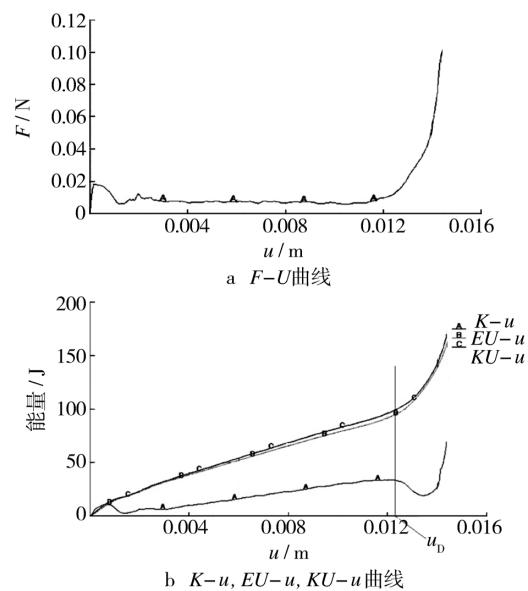


图 4 异面冲击时的响应曲线

Fig. 4 All response curves of impact under out-of-plane

从图 4a 中可以看出,  $F-u$  曲线明显的分为 3 个阶段, 初始阶段是线弹性变形, 然后是平台区, 平台区过后是密实化变形<sup>[7]</sup>。在线弹性变形阶段, 出现初始峰冲击力  $F_0$ , 对应的蜂窝变形位移为  $u_0$ ; 在随后的平台区直到密实化变形阶段, 蜂窝体的总能量吸收和应变能急剧增加, 如图 4b 中的竖实线处, 对应的是密实化位移  $u_D$ 。从  $EU-u$  曲线上可以得到  $u_0$  和  $u_D$  处对应的冲击力功  $E_0$  和  $E_D$ , 而平均动态峰冲击力  $F_{pd}$  为  $(E_D - E_0) / (u_D - u_0)$  的值。冲击动态峰应力的值就是平均动态峰冲击力  $F_{pd}$  与蜂窝体冲击方向上的横截面积的比值。

表 1 不同壁厚和冲击速度下六边形蜂窝铝芯动态峰应力的理论值和计算值 ( $l=3 \text{ mm}, h/l=1, \theta=30^\circ$ )

Tab. 1 Theoretical and finite element plateau stresses of aluminum hexagonal honeycombs with different wall thicknesses at different impact velocities ( $l=3 \text{ mm}, h/l=1, \theta=30^\circ$ )

$t$ /mm	Wierzbicki 的 $(\sigma_{p0}^*)_3$ / MPa	不同冲击速度下动态峰应力 $\sigma_p^*$ / MPa							
		3	10	20	35	45	55	70	80
0.03	0.758 993	0.766 744	0.799 829	0.866 403	0.991 324	1.077 807	1.165 321	1.304 112	1.378 026
0.05	1.778 220	1.610 932	1.678 395	1.790 116	2.009 531	2.155 437	2.308 775	2.591 130	2.706 433
0.07	3.115 532	2.679 387	2.747 424	2.881 136	3.199 821	3.415 388	3.594 065	3.984 251	4.216 819
0.10	5.645 496	4.600 764	4.638 381	4.845 100	5.330 630	5.597 467	6.028 191	6.576 647	7.000 209
0.12	8.741 938	6.995 318	6.928 633	7.198 275	7.878 342	8.391 944	8.795 526	9.711 969	10.079 532
0.15	11.096 539	8.698 039	8.744 042	8.949 678	9.824 316	10.495 627	10.786 595	—	12.510 971

冲击速度下, 蜂窝体的动态峰应力接近于 Wierzbicki<sup>[6]</sup> 静态理论值, 从而说明了有限元分析模型的可靠性。在边长比和扩展角固定的情况下, 随着六边形蜂窝壁厚的增加其动态峰应力的值也逐渐增大, 同时也可以看出相应结构参数固定时, 动态峰应力的值也会随着冲击速度的增大而增大。

将动态峰应力在不同壁厚下与冲击速度的关系利用最小二乘法绘制曲线见图 5a, 其在不同冲击速度下与壁厚边长比的关系曲线见图 5b。

分析得出, 当六边形金属铝蜂窝芯材结构的边长、边长比、扩展角等参数固定时, 在不同冲击速度下其异面动态峰应力与壁厚边长比的关系可表示为:

$$(\sigma_{pd}^*)_3 = \sigma_{ys} B(t/l)^k \quad (1)$$

式中:  $B, k$  为固定系数。

根据有限元计算结果, 利用最小二乘法拟合得到, 对于  $l=3 \text{ mm}, h/l=1, \theta=30^\circ$  的六边形金属蜂窝

### 3 结果与分析

文中主要研究边长比  $h/l$  为 1, 扩展角为  $30^\circ$  时, 在不同的冲击速度下, 壁厚边长比对六边形蜂窝铝芯材异面冲击动态峰应力的影响规律。

计算机对六边形蜂窝铝芯的有限元模型进行仿真冲击模拟后, 得出  $l=3 \text{ mm}, h/l=1, \theta=30^\circ$  的蜂窝样品, 在不同壁厚和冲击速度下  $x_3$  方向上的动态峰应力与静态理论计算值, 见表 1。

由表 1 可以看出, 在冲击速度为  $3 \text{ m/s}$  的类静态

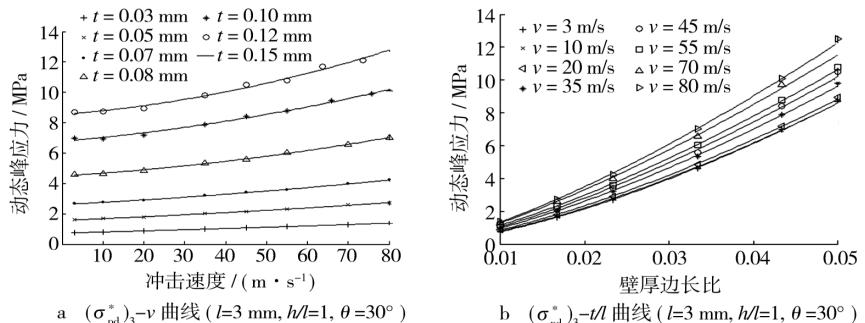


图 5 六边形蜂窝铝芯异面动态峰应力与冲击速度(或壁厚边长比)之间的关系曲线  
Fig. 5 Relation curves between out-of-plane dynamic plateau stress of aluminum hexagonal metal honeycombs with different wall thicknesses and impact velocities

样品来说, 当冲击速度分别为  $3, 10, 20, 35, 45, 55, 70, 80 \text{ m/s}$  时, 其动态峰应力和壁厚边长比的关系式系数  $B$  和  $k$  分别为:  $6.7, 1.5; 6.6, 1.5; 6.5, 1.4; 6.5, 1.4; 6.5, 1.4; 6.5, 1.4; 6.5, 1.4; 6.6, 1.4$ 。

### 4 结语

利用有限元分析方法对六边形金属蜂窝进行了

(下转第 73 页)

**参考文献：**

- [1] 李新芳. 纸浆模塑材料性能的研究现状和开发利用[J]. 包装工程, 2009, 30(1):124.  
LI Xin-fang. Research Progress and Application of Pulp Molded Material [J]. Packaging Engineering, 2009, 30 (1):124.
- [2] 鄂玉萍, 王志伟. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究进展 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(5):40—44.  
E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Advance in Study on Energy-absorbing Property of Paper-based Cushion Packing Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29 (5):40—44.
- [3] GURZVSP, BEREZNITSKIA, HEIDWE ILLER A, et al. Mechanical Properties of Paper-pulp Packing[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63:1325—1334.
- [4] LANNIELLO Carmine, MAFFEI Luigi. A Lumped Parameter Model for the Iterative Analysis s of Cylinder like Ant Vibration Mounts[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(2):482—487.
- [5] ZUO Kong-tian, CHEN Li-ping, ZHANG Yun-qing, et al. Study of Key Algorithms in Topology Optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32:7—8.
- [6] H SUEH W J. Analysis of Vibration Isolation Systems Using a Graph Model[J]. Journal of Sound And Vibration, 1998, 216(3):399—412.
- [7] HOFFMANN J. Compression and Characteristics of Molded Pulp Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2000 (13):211—220.
- [8] 庄宿涛, 孟晓军. 基于 UG 的液体黏性调速离合器被动轴有限元分析[J]. 机电产品开发与创新, 2011(6):101—102.  
ZHUANG Su-tao, MENG Xiao-jun. UG-based Finite Element Analysis of Driven Shaft in Hydro-viscous Drive [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2011(6):101—102.

(上接第 62 页)

异面力学性能研究。得出了蜂窝壁厚边长比和冲击速度对蜂窝材料的动态峰应力的影响规律, 并给出了相应峰应力的计算公式, 为高速冲击研究提供依据, 同时为蜂窝缓冲优化设计提供理论参考。

**参考文献：**

- [1] 王冬梅. 纸蜂窝压缩临界应力经验评估[J]. 包装工程, 2007, 28(8):14—15.  
WANG Dong-mei. Critical Compression Stress Evaluation for Paper Honeycombs[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8):14—15.
- [2] YAMASHITA M, GOTOH M. Impact Behaviour of Honeycomb Structures with Various Cell Specifications-numerical Simulation and Experiment[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1—4):618—630.
- [3] WU E, JIANG W S. Axial Crush of Metallic Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5—6):439—456.
- [4] FAN Xin-yu, VERPOEST Ignaas, VANDEPITTE Dirk. Finite Element Analysis on Out-of-plane Compression Properties of Thermoplastic Honeycomb[C]. Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials. Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, 2005:875—884.

- [5] LEVENT A, ALASTAIR F Johnson, BERND H K. Numerical Modelling of Honeycomb Core Crush Behaviour [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007.
- [6] WIERzbicki T. Crushing Analysis of Metal Honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1 (2):157—174.
- [7] 张安宁, 童小燕, 刘效云, 等. 不同速率下蜂窝纸板静态压缩特性的试验研究[J]. 包装工程, 2004, 25(3):19—20.  
ZHANG An-ning, TONG Xiao-yan, LIU Xiao-yun, et al. The Research on Static Compression Properties of Honeycomb Paperboard at Different Compression Rates[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(3):19—20.
- [8] 郭彦峰, 张景绘, 许文才, 等. 蜂窝纸板及其衬垫缓冲特性研究[J]. 包装工程, 2002, 23(5):110—112.  
GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui, XU Wen-cai, et al. Research on the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard and Its Cushion[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5):110—112.
- [9] 王梅. 蜂窝纸板缓冲性能的研究及应用[J]. 包装工程, 2000, 21(4):5—8.  
WANG Mei. The Research of The Honeycomb Fiberboard Cushioning Performance and The Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4):5—8.