

六边形蜂窝芯异面类静态压缩力学行为的仿真分析

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, 张超³

(1. 陕西科技大学, 西安 710021; 2. 西安理工大学 高科学院, 西安 710109;
3. 西安理工大学, 西安 710048)

摘要: **目的** 研究六边形蜂窝芯材异面类静态压缩载荷的数值模拟方法及相关力学行为。**方法** 基于蜂窝单元阵列的方法, 构筑了单双壁厚六边形蜂窝芯材异面类静态压缩有限元数值计算模型和分析方法。**结果** 借助于该模拟方法, 分析计算了不同结构参数条件下单双壁厚六边形蜂窝芯材的异面变形模式、变形曲线和类静态峰应力值, 并绘制了相应的图、压缩力位移曲线和数据表格。**结论** 将计算结果与现有的实验和理论计算结果作对比分析可知, 计算结果与已有结果吻合较好, 证明了所提出的有限元分析方法的可靠性。

关键词: 六边形蜂窝芯; 异面类静态压缩; 变形模式; 峰应力

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)01-0018-05

Simulation Analysis of the Out-of-plane Quasi-static Compression of Hexagonal Honeycomb Cores

SUN De-qiang¹, SUN Yu-jin², ZHENG Bo-bo¹, WANG Qing-qing¹,
LI Wen-e¹, WANG Chen-yang¹, SUN Jian-jian¹, ZHANG Chao³

(1. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

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

3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: **Objective** Objective Numerical simulation method and mechanical behaviors of hexagonal honeycombs cores are investigated under the out-of-plane quasi-static compression loadings. **Methods** A finite element (FE) model and analysis methodology of hexagonal honeycomb cores with single or double cell walls were framed based on the honeycomb cell array. **Results** The FE calculated deformation modes, deformation curves and values of quasi-static plateau stresses are presented in the forms of diagrams, compressive force-displacement curves and data tables for many hexagonal honeycomb cores with different configuration parameters, which are consistent with the existing experimental and theoretical calculated results. **Conclusion** It is shown that the proposed FE analysis methodology is reliable.

KEY WORDS: hexagonal honeycomb cores; out-of-plane quasi-static compression; deformation mode; plateau stress

六边形蜂窝芯材是一种重要的缓冲材料, 广泛应用于建筑、航空、包装、军事、交通运输等领域。六边

形蜂窝芯材的结构见图 1, 其周期性特征单元包含 4 个长为 l 、厚为 t 的倾斜孔壁, 2 个长为 h 、厚为 T_c 的竖

收稿日期: 2013-09-10

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。

向孔壁。整个蜂窝芯的厚度为 b , t/l 为壁厚边长比, h/l 为边长比, θ 为扩展角。常用蜂窝芯材是规则的, $h/l=1$, $\theta=30^\circ$ 。不同的制造工艺会使得六边形蜂窝芯存在单双壁厚, 单壁厚蜂窝芯材的 $T_c=t$, 双壁厚蜂窝芯材的 $T_c=2t$ 。关于六边形蜂窝芯材异面(见图1的 x_3 方向)的力学性能, 很多学者已经进行了广泛的

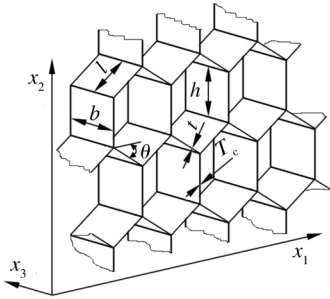


图1 六边形蜂窝芯材的结构

Fig. 1 Configuration of hexagonal honeycomb cores

理论、实验和有限元方面的研究。参考文献[1]和[2]对六边形蜂窝芯材异面力学性能进行了系统总结^[1-2]。Wang 和 Wierzbicki 提出了六边形蜂窝芯材异面峰应力的计算公式^[3-4]。Baker 等人^[5]以及 Zhou 等人^[6]也借助于实验方法研究了六边形蜂窝异面静动态力学性能。Wu 和 Jiang^[7]、刘冰等人^[8]、唐勇等人^[9]、王虹等人^[10]利用实验法研究了蜂窝材料的异面冲击力性能 and 缓冲性能。准备具有各种尺寸条件的试验样品进行试验是难以做到的, 有限元仿真模拟可以克服这一缺点, 所以有限元法在研究六边形蜂窝芯材力学性能方面得到了广泛应用。Levent 等人^[11]、Yamashita 和 Gotoh^[12]、孙玉瑾和骆光林^[13]、吕君^[14]借助于有限元法模拟了六边形蜂窝芯材的异面动态压溃过程。Levent 等人仅仅介绍了如何构建相关有限元模型, 并没有详细介绍相关分析方法。Yamashita 和 Gotoh 采用的有限元模型是基于单个蜂窝单元的, 模型构建需要施加复杂的边界条件。笔者曾介绍了蜂窝异面动态冲击的有限元数值模拟方法^[15]。

文中借助于有限元分析工具 ANSYS/LS-DYNA, 基于单元阵列构建了规则六边形蜂窝芯材异面类静态压缩的简单有限元模型。对具有不同结构参数的六边形蜂窝芯材样品的异面类静态压缩行为进行了有限元模拟, 将相应的变形模式、变形曲线和类静态峰应力分别以图、曲线和表格的形式绘出, 并与已有的理论和实验研究结果作对比, 以此来验证有限元分

析模型的可靠性。

1 异面类静态压缩理论

对于六边形蜂窝芯材来说, 异面压缩载荷会依次产生线弹性、平的峰应力和密实化的变形过程, 见图2。弹性变形末的点 I 对应初始峰应力, 相应的应变 ε_0^* 称为初始应变。平的峰应力阶段过后, 点 D 代表密实化开始点, 相应的应变 ε_D^* 称为密实化应变。显然, 弹性阶段能量吸收微小, 密实化阶段有明显的能量吸收, 但应力却急剧增加, 所以在缓冲应用中, 外部动能应在平的峰应力阶段被充分吸收。平的峰应力阶段的平均应力 $(\sigma_p^*)_3$ 决定着六边形蜂窝芯材的能量吸收能力。 $(\sigma_p^*)_3$ 是一个重要的力学参数, 在此称为类静态峰应力。

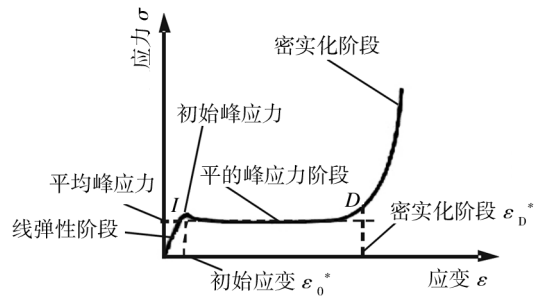


图2 异面压缩载荷作用下典型的应力应变曲线

Fig. 2 Typical stress-strain curve under out-of-plane

考虑到附加塑性铰和单元壁拉伸局限等因素, Wierzbicki 推导了单双壁厚规则六边形蜂窝芯材的异面峰应力的计算公式^[4]。假设壁材的屈服应力为 σ_{ys} , 则单双壁厚规则六边形蜂窝芯 Wierzbicki 异面峰应力计算公式分别为:

$$(\sigma_p^*)_3 \approx 5.6\sigma_{ys}(t/l)^{5/3} \quad (1)$$

$$(\sigma_p^*)_3 \approx 6.6\sigma_{ys}(t/l)^{5/3} \quad (2)$$

2 模拟方法

2.1 有限元模型

Yamashita 和 Gotoh 基于单个“Y”形横截面的柱状蜂窝单元, 来建立六边形蜂窝芯材异面冲击的有限元模型, 为了保持蜂窝单元的几何对称性, 需要施加许多复杂的边界条件^[12], 这样建立的模型过程较复杂。后来 Levent 等人提出了全比例的有限元模型, 并利用类静态的压缩试验结果进行了验证^[11]。类似于

这一有限元模型,基于单元阵列的有限元分析模型见图3。样品置于上刚性压板 P_1 之下,底部边线上节点的所有自由度约束为0,孔壁边长 l 固定为3 mm。压板以恒定的压缩速度 v 向下运动,最终使得样品被完全压溃。利用有限元分析工具 ANSYS/LS-DYNA 建立模型。所有孔壁采用具有5个积分点的 Belytschko-Tsay 壳单元 Shell163 进行网格划分。双壁厚蜂窝芯材竖向孔壁的厚度为倾斜孔壁厚度的2倍。在变形过程中,样品所有可能发生接触的表面均定义为单面接触。样品与上压板之间定义为自动面面接触。壁材采用双线性应变硬化材料模型来模拟,这类典型的材料为铝合金。选用某一铝合金材料,其力学参数: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,泊松比 $\mu_s = 0.35$,密度 $\rho_s = 2700$ kg/m³。在类静态压缩条件下,该铝合金视为应变率不敏感。经尝试性模拟后,有限元几何模型合适的芯材厚度为15 mm,相应单元数量不低于72。

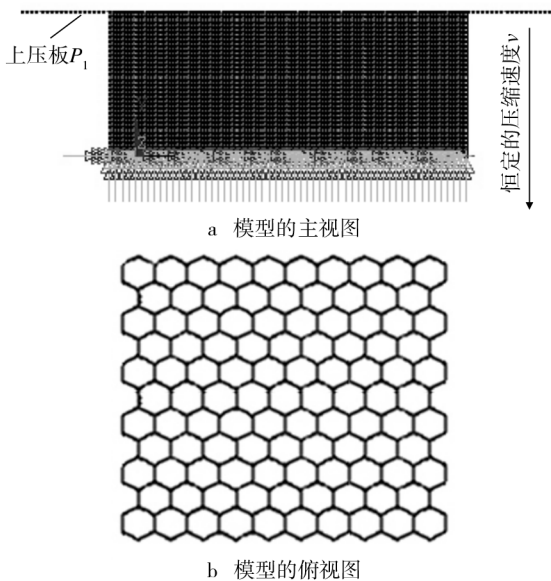


图3 基于单元阵列的有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analytic model based on cell array

2.2 分析原理

将有限元分析结果借助于 LSPREPOSTD 软件进行处理可以得到各响应曲线,见图4。 F 为上压板样品间的压力, u 为上压板的位移, K 为样品动能, U 为样品的应变能, W 为压力的功, E 为样品的总能量吸收。这些物理量之间的关系是: $E = K + U = W = \int F(u) du$,它们关于 u 的典型曲线见图4,其中 $l = 3$

mm, $t = 0.07$ mm。

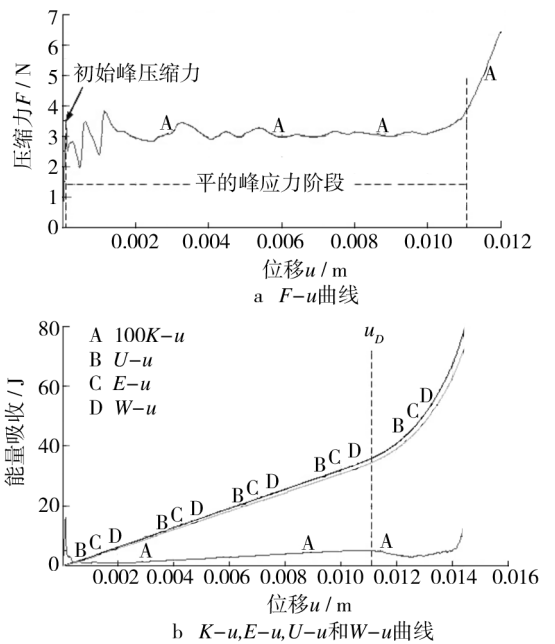


图4 上压板位移的典型曲线

Fig. 4 Typical curve of upper platen displacement

在类静态压缩载荷作用下, K 非常微小,为了方便显示, K 在图4中被扩大了100倍,因此 E 近似等于 U 。模拟结果显示,在3 m/s的压缩速度下,样品的动能在密实化之前最多不会超过相应总能量吸收的2%。此时,样品异面类静态峰应力应等于相应的理论峰应力^[16],所以模拟选用的所有压缩速度都设为3 m/s。

在如图4a的 $F-u$ 曲线上,初始峰压缩力和相应初始位移分别为 F_0 和 u_0 。 $W-u$ 曲线突然上升的拐点意味着密实化的开始,相应位移为 u_D ,称为密实化位移。在 $W-u$ 曲线上对应于 u_0 和 u_D 的功分别为 W_0 和 W_D ,则 $(W_D - W_0)/(u_D - u_0)$ 就是平均类静态峰压力,称为 F_p 。 F_p 再除以样品异面方向上的横截面积,便可以得到最终的异面类静态峰应力。

3 结果比较与分析

3.1 变形模式

六边形蜂窝芯材($l = 3$ mm, $t = 0.07$ mm)分别对应于应变为30%,60%和密实时的变形模式见图5。该蜂窝在各时刻的变形模式主视图见图6。这些结果与Levent等人^[11]、Yamashita等人^[12]的模拟结果相吻合,塑性弯曲变形首先在靠近上压板段发生,而后

不断向下扩展,下面的折曲紧跟上面的。折曲的不断向下扩展对应于压缩力位移曲线的平峰应力阶段。当折曲扩展至样品底部时,变形就进入密实化阶段。

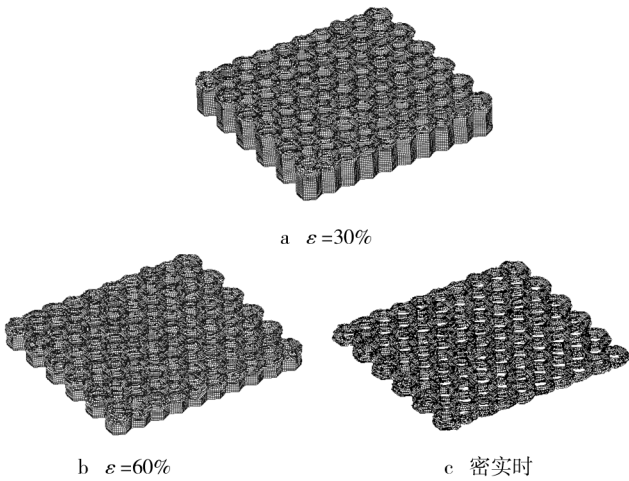


图 5 蜂窝样品典型的变形阶段

Fig. 5 Typical deformation stages of honeycomb specimens

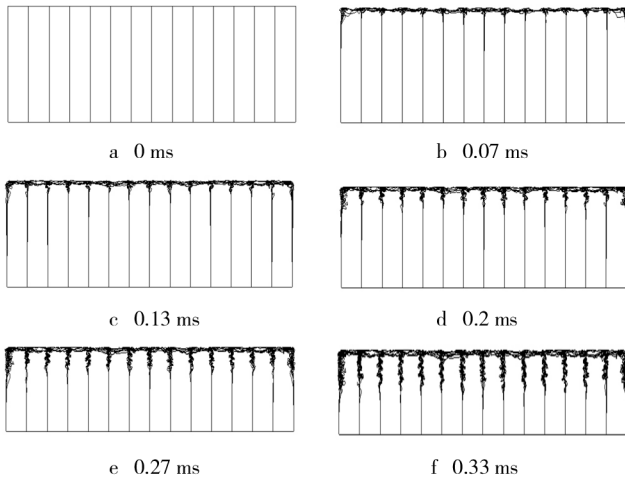


图 6 不同时刻样品典型的孔壁变形模式主视图

Fig. 6 Front view of typical cell edge deformation modes of specimen at different times

3.2 压缩力位移曲线

取 2 组单双壁厚规则六边形蜂窝芯材样品,分别选择不同的壁厚,每组 7 个样品的壁厚分别为 0.03, 0.05, 0.07, 0.08, 0.1, 0.12 和 0.15 mm。2 组样品 $F-u$ 曲线的幅度随壁厚的变化规律相一致,规则单壁厚蜂窝芯材($l=3\text{ mm}, \theta=30^\circ$)在不同壁厚下的 $F-u$ 曲线见图 7。从图 7 可明显看出,如公式(1)和(2)所预测的那样,异面类静态峰应力随着壁厚的增加而增加。这一规律也与文献[11—12]的模拟和实验结果

相一致。

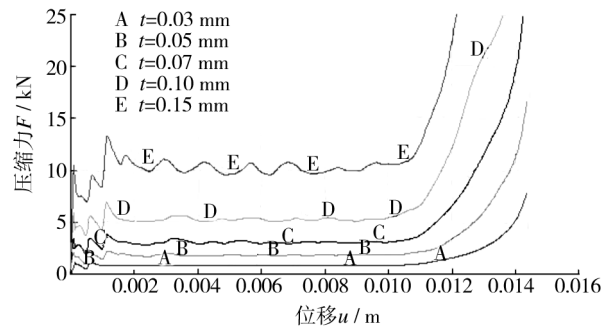


图 7 单壁厚蜂窝样品的 $F-u$ 曲线

Fig. 7 $F-u$ curves of single-walled specimen

3.3 类静态峰应力

将上述 2 组样品的异面类静态峰应力分别列于表 1 和 2 的第 3 行,同时在第 2 行列出根据式(1)和(2)计算得到的相应理论静态峰应力。在误差允许的范围,两者数据相吻合。

表 1 不同壁厚的单壁厚样品的异面类静态峰应力的理论和有限元解

Tab.1 Theoretical and finite element quasi-static plateau stresses of single-walled specimens with different cell wall thicknesses

t/mm	Wierzbicki $(\sigma_p^*)_3/\text{MPa}$	异面类静态峰应力/MPa
0.03	0.758 993	0.766 744
0.05	1.778 220	1.710 932
0.07	3.115 532	3.129 387
0.08	3.892 113	3.720 918
0.10	5.645 496	5.600 764
0.12	7.650 166	7.715 318
0.15	11.096 539	10.980 391

表 2 不同壁厚的双壁厚样品的异面类静态峰应力的理论和有限元解

Tab.2 Theoretical and finite element quasi-static plateau stresses of double-walled specimens with different cell wall thicknesses

t/mm	Wierzbicki $(\sigma_p^*)_3/\text{MPa}$	异面类静态峰应力/MPa
0.03	0.894 527	0.883 199 3
0.05	2.095 759	2.105 347
0.07	3.671 877	3.515 651
0.08	4.587 133	4.392 962
0.10	6.653 621	6.702 008
0.12	9.016 267	9.254 152
0.15	13.078 064	13.457 514

4 结语

文中利用有限元分析工具 ANSYS/LS-DYNA,建立了基于单元阵列的六边形蜂窝芯材类静态压缩分析的有限元模型,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。经有限元模拟计算得到的变形模式、变形曲线和类静态峰应力分别以图、曲线和数据表格的形式展示出。经过与已有理论、实验和有限元模拟计算的结果进行对比分析,发现两者吻合较好,证明了该数值模拟方法的正确性。

参考文献:

- [1] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids; Structures and Properties, Second Edition [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [2] ZHANG J, ASHBY M F. The Out-of-plane Properties of Honeycombs [J]. Int J Mech Sci, 1992, 34(6): 475—489.
- [3] WANG Y. Elastic Collapse of Honeycombs under Out-of-plane Pressure [J]. Int J Mech Sci, 1991, 33(8): 637—644.
- [4] WIERZBICKI T. Crushing Analysis of Metal Honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(2): 157—174.
- [5] BAKER W E, TOGAMI T C, WEYDERT J C. Static and Dynamic Properties of High-density Metal Honeycombs [J]. Int J Impact Eng, 1998, 21(3): 149—63.
- [6] ZHOU Q, MAYER R. Characterization of Aluminum Honeycomb Material Failure in Large Deformation Compression, Shear, and Tearing [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2002, 124(4): 412—20.
- [7] WU E, JIANG W S. Axial Crush of Metallic Honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5/6): 439—456.
- [8] 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.
- [9] 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, 101.
TANG Yong, HUANG Li-qiang. Influence of Honeycomb Structure on Flatwise Compressive Performance [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 56—58, 101.
- [10] 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.
- [11] LEVENT A, ALASTAIR F J, BERND H K. Numerical Modeling of Honeycomb Core Crush Behavior [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(9): 2612—2630.
- [12] YAMASHITA M, GOTOH M. Impact Behavior of Honeycomb Structures with Various Cell Specifications—numerical Simulation and Experiment [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1/4): 618—630.
- [13] 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, 73.
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, 73.
- [14] 吕君. 纸芯数量对蜂窝纸压溃强度的影响 [J]. 包装工程, 2012, 33(7): 51—53.
LYU Jun. Finite Element Analysis of Hexagonal Honeycomb's Out-of-plane Impact Performance [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 51—53.
- [15] SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong, WEI Yan-bin. Mean Out-of-plane Dynamic Plateau Stresses of Hexagonal Honeycomb Cores under Impact Loadings [J]. Composite Structures, 2010, 92(11): 2609—2621.
- [16] 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.