文章编号：1001-1455(2014)01-0041-06

胞孔构型对金属蜂窝动态力学性能的影响机理*

胡玲玲，蒋 玲
（中山大学工学院应用力学与工程系，广东 广州 510275）

摘要：采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元研究了具有不同胞孔构型和排列方式的金属蜂窝材料在面内冲击荷载下的力学性能。在蜂窝的相对密度和冲击速度保持恒定的情况下，比较了它们的变形模式、动态承载力和能量吸收性能。结果表明，不同的胞孔构型导致在蜂窝压垮过程中胞壁的受力状态不同，从而影响蜂窝的宏观力学性能。根据胞壁的应力状态，可将蜂窝分为膜力主导蜂窝和弯曲主导蜂窝 2 大类。研究结果显示，蜂窝吸收的能量绝大部分转化为变形所需的内能，并且膜力主导蜂窝的内能占总能量的百分比更大。胞壁的屈曲导致膜力主导蜂窝的应力应变曲线呈现较大的波动。膜力主导蜂窝在变形过程中其胞壁会耗散更多的内能，从而比弯曲主导蜂窝具有更高的动态承载力和能量吸收能力。

关键词：固体力学；能量吸收；冲击；蜂窝；胞孔构型；承载力
中图分类号：O347 **国标学科代码**：1301565 **文献标志码**：A

蜂窝作为一种多胞材料，具有良好的能量吸收能力、较高的比强度和比刚度等性能，因此，将其做成轻质结构和能量吸收构件在航空航天、汽车工业、交通运输等领域有广阔的应用前景。作为吸能材料，蜂窝往往受到冲击荷载的作用，因此对蜂窝动态力学性能的研究已成为近年来的一个研究热点。很多研究已表明，蜂窝的相对密度对其力学性能有重要的影响[1]，除此之外，胞孔的几何构型[2-3]、加载方式[4]和加载速度[5-6]等也会影响多胞材料的力学性能。研究胞孔构型与蜂窝宏观力学性能之间的关系对蜂窝材料的设计有重要意义。L. L. Hu 等[6]和 D. Ruan 等[7]给出了正六角形蜂窝动态承载力的表达式，并进一步研究了胞壁夹角对六角形蜂窝动态力学性能的影响[8-9]。X. M. Qiu 等[3]给出了具有不同胞孔构型的蜂窝的平台应力经验公式。Y. Liu 等[10]保持胞壁厚度与长度之比不变，研究了三角形和四边形胞孔蜂窝的承载力。另外，胡玲玲等[2]、张新春等[11]讨论了胞孔构型对蜂窝能量吸收性能的影响。这些研究重点分析了胞孔构型在特定加载方式下对蜂窝力学性能的影响，对于具有同一种胞元的蜂窝，在不同加载方式下其表现出的力学性能也会不同[4]。以上这些研究是在控制胞壁长度和厚度不变的情况下，对比具有不同胞孔构型的蜂窝的力学性能。然而，对于不同胞孔构型的蜂窝，其相对密度与胞孔尺寸间的关系是不同的，这将引入相对密度的影响。本文中，在控制相对密度和冲击速度不变的情况下，通过研究 7 种金属蜂窝的力学行为，剖析胞孔构型对金属蜂窝动态力学性能影响的内在机理，以期研究结果对蜂窝胞孔构型的设计有一定的指导意义。

1 有限元模型

基于 ANSYS-LSDYNA 建立金属蜂窝的有限元模型，将蜂窝材料放置在一个固定的刚性板上，在其上方受到另一刚性板以恒定速度 $v=120$ m/s 沿竖直方向的冲击，如图 1 所示。蜂窝的基体材料采用金属铝，假设为理想弹塑性材料，服从 Mises 屈服准则，杨氏模量 $E=69$ GPa，屈服应力 $\sigma_{ys}=76$ MPa，密度 $\rho_s=2\ 700$ kg/m^3，泊松比 $\upsilon=0.3$。刚性板选用钢材，其杨氏模量为 210 GPa，密度为 7 800 kg/m^3。胞壁选用 Shell163 壳单元，参照文献[6,8,10]，每个胞壁在长度方向划分为 16 个单元，足以描述胞壁的变形和胞孔的坍塌过程。限制各节点的面外位移，以防止试件发生面外屈曲。

* **收稿日期**：2012-08-20；**修回日期**：2012-11-17
基金项目：国家自然科学基金项目(11172335,10802100)
作者简介：胡玲玲(1980—)，女，博士，副教授。

本文中涉及了 7 种胞孔构型，分别为：规则排布三角形胞孔(T-R)、交错排布三角形胞孔(T-S)、规则排布正方形胞孔(S-R)、交错排布正方形胞孔(S-S)、x 方向受压的正六角形胞孔(H-X)、y 方向受压的正六角形胞孔(H-Y)和 Kagome(K)排布胞孔，如图 2 所示。这些蜂窝材料的相对密度均为 0.1，模型尺寸均为 58.5 mm×70.2 mm。

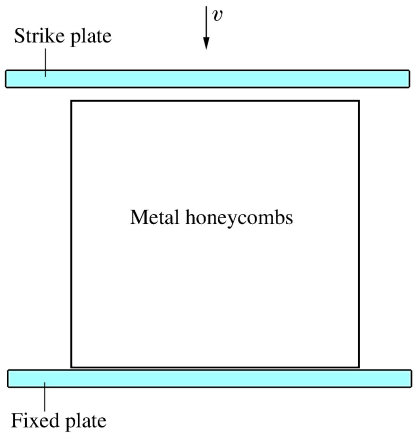


图 1 数值计算的有限元模型

Fig. 1 FEM model for simulations

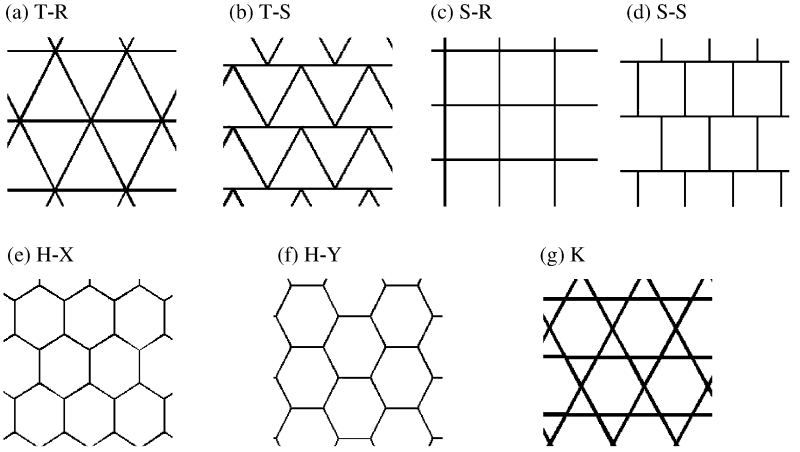


图 2 蜂窝的胞孔构型

Fig. 2 Various cell configurations of honeycombs

2 变形模式及蜂窝分类

各种蜂窝试件在宏观应变(即试件的压缩变形量除以试件的原始高度)分别为 0.52 和 0.78 时的变形如图 3 所示。由图 3(a)和(c)可知，对于具有规则排布三角形或四边形胞孔的蜂窝材料(T-R 和 S-R 蜂窝)，胞孔从蜂窝的上下两端向中间逐层压垮密实，形成明确的局部化变形带；而具有交错排布胞孔的蜂窝(T-S 和 S-S 蜂窝)，虽然在冲击端形成密实带，与此同时密实带之外的胞孔也发生了较大变形，如图 3(b)和(d)所示。从图 2 所示的胞孔构型可以发现，对于具有交错排布胞孔的蜂窝，如图 2(b)和(d)所示，胞孔的某些端点正好位于相邻一行胞的水平胞壁的中点，这将导致水平胞壁在上一行胞孔的坍塌过程中发生折弯，如图 3(b)和(d)所示，从而发生连锁反应，使变形遍及整个试件。而具有规则排布胞孔的蜂窝(T-R 和 S-R 蜂窝)其胞孔排列是点对点、边对边的形式，如图 2(a)和(c)所示，胞孔坍塌以胞壁的受压屈曲变形为主，对相邻一行胞的影响较小，因而它们的变形会集中在有限的区域。

对于正六边形蜂窝，无论是沿 x 方向加载还是沿 y 方向加载，蜂窝在变形过程中都沿冲击端形成局部变形带。沿 x 方向加载的蜂窝(H-X)，其倾斜胞壁首先被上方的竖直胞壁压为水平，进而向下转动，如图 3(e)所示。沿 y 方向加载的蜂窝(H-Y)，在变形过程中，胞壁绕在其端点所形成的塑性铰转动，最终以波浪形方式紧密排列在一起，形成密实带，如图 3(f)所示。

Kagome 蜂窝作为一种特殊的组合模型，是由正三角形和正六边形共同构成。Kagome 蜂窝的变形也是集中在上下两端，如图 3(g)所示。

将蜂窝的坍塌胞孔放大后观察(见图 3)，可以发现胞孔的坍塌机制大致分为 2 种：一种主要由胞壁绕端点转动(胞壁基本保持直线)，从而引起胞孔坍塌，如 H-X 和 H-Y 蜂窝；另一种主要由胞壁中间发生折弯，导致胞孔坍塌。对于前一种情况，胞壁在胞孔坍塌过程中仅绕端点转动，说明该胞壁的受力以弯矩(应力状态为弯曲应力)为主。对于后一种情况，如果折弯点处连接其他胞壁，该胞壁的折弯主要由其他胞壁施加的横向荷载所致，此时该胞壁的受力也以弯矩为主，如 T-S 和 S-S 蜂窝；如折弯点处没有连接其他胞壁，该胞壁的折弯是由其发生轴向受压屈曲所致，说明胞壁的受力以膜力(应力状态为膜应力)为主，如 T-R、S-R 和 K 蜂窝。

因此，根据胞壁所受的应力状态，将这些蜂窝分为弯曲主导蜂窝和膜力主导蜂窝 2 大类。弯曲主导

蜂窝包括分别沿 x 方向和 y 方向加载的正六边形蜂窝(H-X 和 H-Y)以及交错排布的三角形(T-S)和四边形(S-S)蜂窝。规则排布的三角形(T-R)和四边形(S-R)蜂窝以及 Kagome 蜂窝属于膜力主导蜂窝。

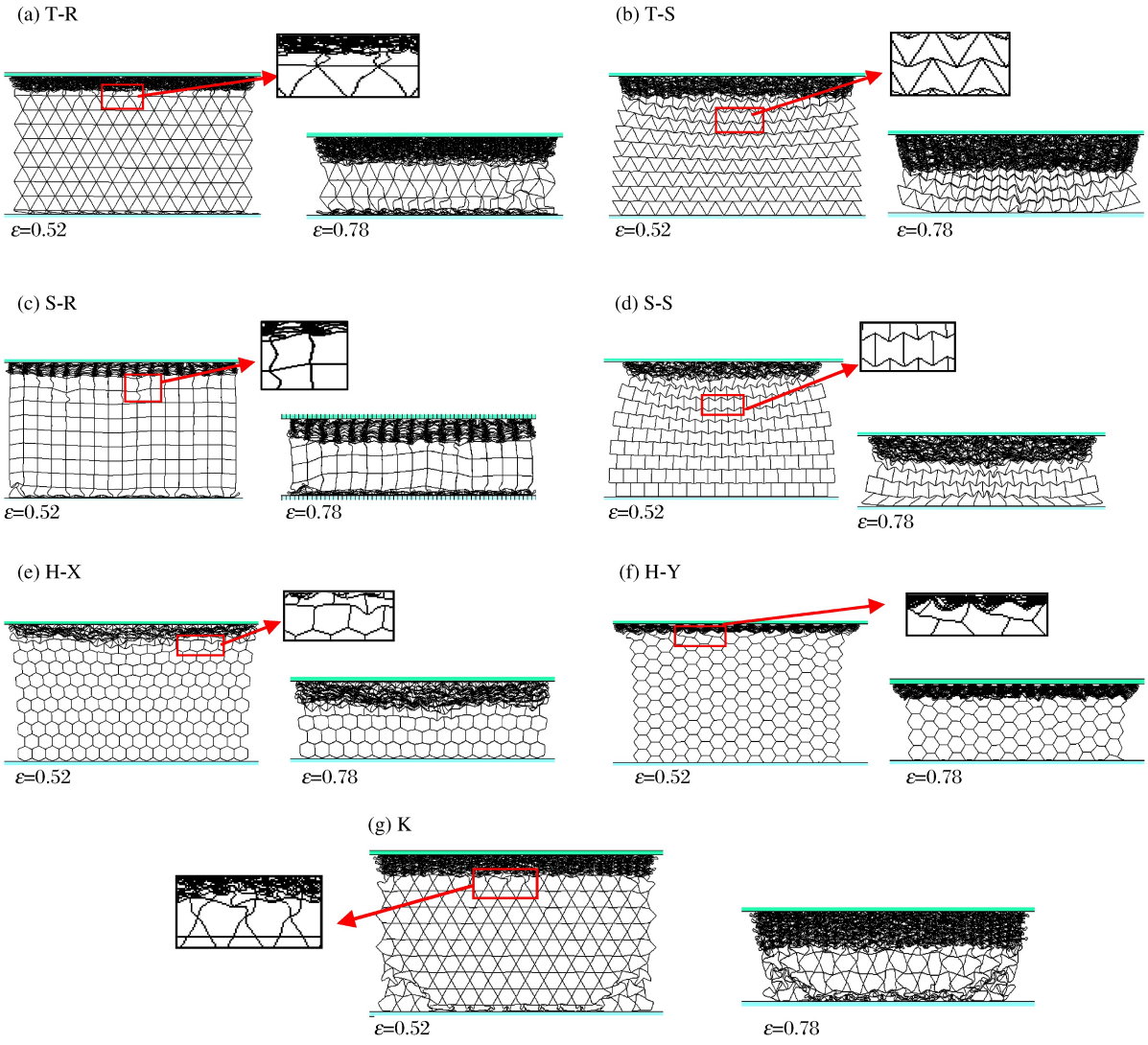


图 3　蜂窝的变形模式

Fig. 3　Deformation modes of honeycombs

3　动态承载力

图 4 中给出了蜂窝在冲击荷载下的应力应变(σ-ε)曲线。从图 4 可以看出，相对于弯曲主导蜂窝，膜力主导蜂窝的平台应力波动幅度较大。主要原因在于，膜力主导蜂窝的胞壁往往承受压应力，进而发生屈曲，导致胞壁在屈曲瞬间承载力突然下降，从而在蜂窝的应力应变曲线上表现为较大幅度的波动；而弯曲主导蜂窝的胞壁以受弯曲荷载为主，其应力应变曲线波动幅度较小。

从图 4 也可以看出，膜力主导蜂窝的平台应力高于弯曲主导蜂窝的平台应力。为了进一步明确该结论，图 5 中比较了这些蜂窝的动态承载力 σ_c，其中动态承载力定义为蜂窝应力应变曲线在平台阶段应力的平均值。一般来说，高速冲击下，惯性效应对蜂窝的动态承载力起重要作用，其影响与蜂窝的密度 ρ 和冲击速度的平方 v^2 成正比[6,12]。本文中所研究的这些蜂窝具有相同的密度和冲击速度，因此图 5 所示的各种蜂窝承载力之间的差别主要由胞孔的不同构型引起，可见胞孔构型确实对蜂窝的动态承载力有明显影响。Kagome 蜂窝表现出最高的承载力，y 方向加载的六角形蜂窝的承载力最低。胞孔规

则排列的蜂窝(T-R 和 S-R)的承载力高于胞孔交错排列的蜂窝(T-S 和 S-S)。总的来说,图 5 表明胞孔的坍塌机制决定了膜力主导蜂窝比弯曲主导蜂窝具有更高的承载力。

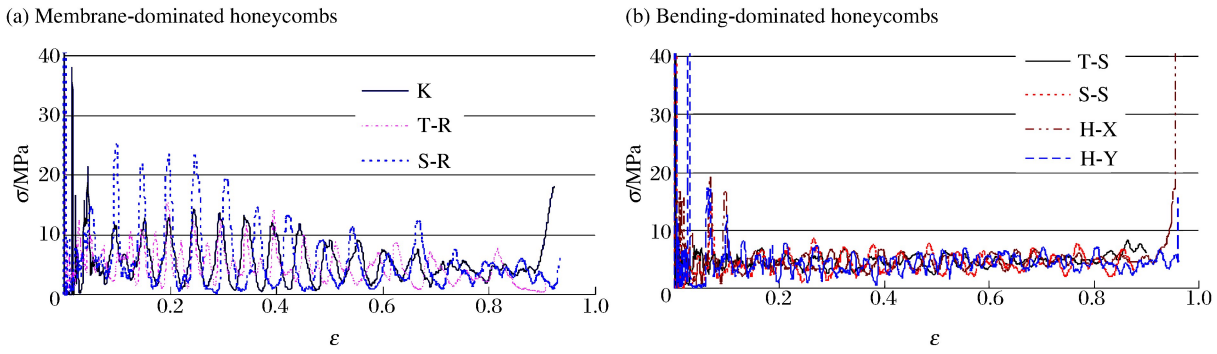


图 4 蜂窝的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of honeycombs

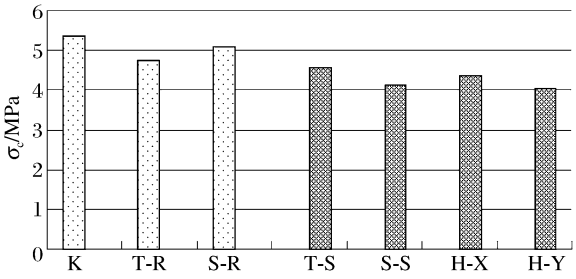


图 5 蜂窝的动态承载力

Fig. 5 Crushing strength of honeycombs

4 能量吸收性能

多孔材料常常被作为能量吸收构件,图 6 中给出了各种蜂窝所吸收的能量 E_a 随应变的变化曲线。从图 6 可以看出,这些曲线明显分成了 2 束,胞孔规则排布的三角形(T-R)和四边形(S-R)蜂窝以及 Kagome(K)蜂窝的曲线聚集为一束,表现出较高的能量吸收能力,其他几种蜂窝的能量曲线较低。对照胞壁的应力状态,可以发现能量曲线的分束正好与蜂窝根据胞壁应力状态的分组相对应,即膜力主导蜂窝比弯曲主导蜂窝具有更高的能量吸收能力。

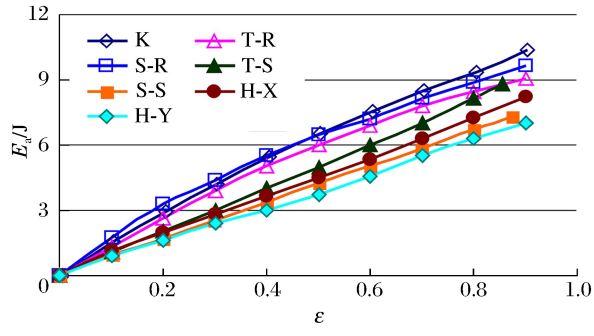


图 6 蜂窝吸收的能量随应变的变化关系

Fig. 6 Energy absorbed by honeycombs varied with strain

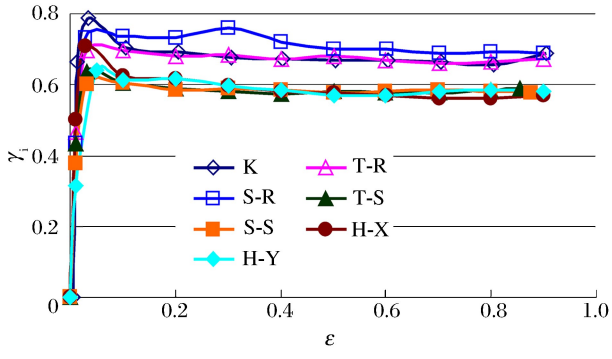


图 7 蜂窝内能的分数随应变的变化关系

Fig. 7 Internal-energy fraction of honeycombs varied with strain

在冲击过程中,蜂窝吸收的能量主要转化为 2 大部分,即蜂窝的内能和动能,将两者之和定义为总能。图 7 中给出了各种蜂窝在变形过程中内能占总能量的分数 γ_i。从图 7 可以看出,内能占总能量的分数在受压初期迅速增加,进入平台区后稳定在某一值:弯曲主导蜂窝(T-S、S-S、H-X 和 H-Y)的内能占总能量的分数稳定在 0.6 左右,而膜力主导蜂窝(T-R、S-R 和 Kagome)的保持在 0.7 左右。这说明,蜂窝吸收的能量绝大多数转化成了内能,并且膜力主导蜂窝的内能在其总能量中占的分数更高。

为了进一步剖析 2 组蜂窝在能量吸收能力方面的差别,图 8 和图 9 中分别给出了蜂窝的动能 E_k 和内能 E_i 随应变的变化过程。所有蜂窝在变形过程中动能的变化较接近(见图 8),而它们的内能曲线

(见图 9)却类似总能量曲线(见图 6)分成了上下 2 束，较高的一束为膜力主导蜂窝，较低的一束为弯曲主导蜂窝。这说明，2 组蜂窝吸收能量间的差别主要来自于不同的内能，膜力主导蜂窝在变形过程中能耗散更多的内能，这也是其具有较高承载力和能量吸收能力的原因。

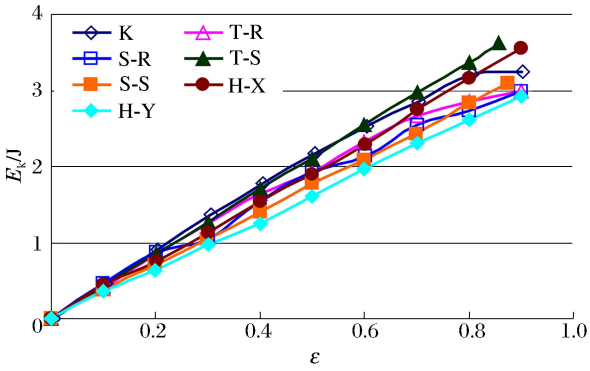


图 8　蜂窝动能随应变的变化关系

Fig. 8　Kinetic energy of honeycombs varied with strain

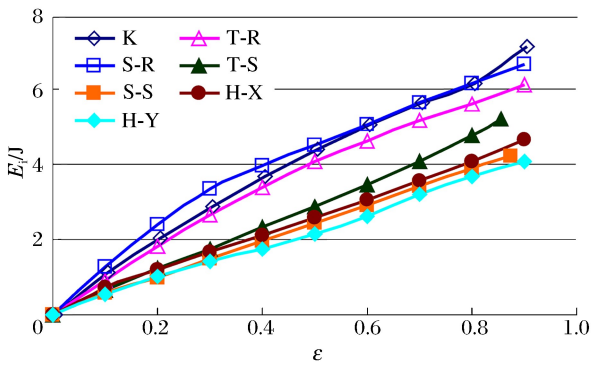


图 9　蜂窝内能随应变的变化关系

Fig. 9　Internal energy of honeycombs varied with strain

5　结　论

金属蜂窝的胞孔构型确实会对其动态承载力和能量吸收能力产生影响，其主要原因在于不同的胞孔构型决定了胞壁的受力状态和坍塌机制不同。根据胞壁的应力状态可将蜂窝分为膜力主导蜂窝和弯曲主导蜂窝 2 大类。膜力主导蜂窝在压溃过程中以胞壁的受压屈曲为主，会出现荷载的突然下降，因而其应力应变曲线表现出较大幅度的波动；弯曲主导蜂窝的胞壁以受弯曲荷载为主，其应力应变曲线波动幅度较小。蜂窝吸收的能量大部分转化为胞壁的内能，并且膜力主导蜂窝的内能在其总能量中占的分数更高。2 类蜂窝在变形过程中动能的变化接近，膜力主导蜂窝比弯曲主导蜂窝具有更高的承载力和能量吸收能力，其主要原因在于膜力主导蜂窝在变形过程中能耗散更多的内能。

对照胞孔构型图(图 2)可以发现，膜力主导蜂窝的胞孔构型同时满足以下 2 个条件：(1)每个胞孔顶点所连接的胞壁均成对出现，并且每对胞壁都位于同一条直线上；(2)这些胞壁在胞孔顶点上关于加载方向对称。这 2 个条件保证了蜂窝胞壁在变形初期以受压缩膜力为主，表现出较优越的力学性能。这对蜂窝的工业应用及其胞孔构型设计有一定的指导意义。

参考文献：

[1]　Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties[M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997:99-158.

[2]　胡玲玲，陈依骊. 三角形蜂窝在面内冲击荷载下的力学性能[J]. 振动与冲击，2011，30(5)：226-229.
Hu Ling-ling, Chen Yi-li. Mechanical properties of triangular honeycombs under in-plane impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(5):226-229.

[3]　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.

[4]　Hu L L, Yu T X, Gao Z Y, et al. The inhomogeneous deformation of polycarbonate circular honeycombs under in-plane compression[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008,50(7):1224-1236.

[5]　Zou Z, Reid S R, Tan P J, et al. Dynamic crushing of honeycombs and features of shock fronts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(1):165-176.

[6]　Hu L L, Yu T X. Dynamic crushing strength of hexagonal honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010,37(5):467-474.

[7] 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.

[8] 胡玲玲,尤帆帆.铝蜂窝的动态力学性能及影响因素[J].爆炸与冲击,2012,32(1):23-28.
Hu Ling-ling, You Fan-fan. Dynamic mechanical properties of aluminum honeycomb and its effect factors[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(1):23-28.

[9] Hu L L, You F F, Yu T X. Crushing strength of honeycombs with various cell wall angles[J]. Materials Research Innovations, 2010,15(s1):155-157.

[10] 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.

[11] 张新春,刘颖,章梓茂.组合蜂窝材料面内冲击性能的研究[J].工程力学,2009,26(6):220-225.
Zhang Xin-chun, Liu Ying, Zhang Zi-mao. Research on dynamic properties of suppercell honeycomb structures under in-plane impact loading[J]. Engineering Mechanics, 2009,26(6):220-225.

[12] 胡玲玲,余同希.惯性效应对蜂窝能量吸收性能的影响[J].兵工学报,2009,30(增刊 2):144-147.
Hu Ling-ling, Yu Tong-xi. Influence of inertia effect on the energy absorption of hexagonal honeycombs[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(suppl 2):144-147.

Mechanism of cell configuration affecting dynamic mechanical properties of metal honeycombs*

Hu Ling-ling, Jiang Ling

(*Department of Applied Mechanics and Engineering, School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510275, *Guangdong, China*)

Abstract: The in-plane dynamic behaviors of metal honeycombs filled by cells with various configurations and arrangements are studied by the finite element method using ANSYS/LS-DYNA. The deformation modes, crushing strength and energy-absorption ability are compared among these honeycombs while controlling their relative density and the impact velocity as uniform. It is shown that different cell configurations result in different stress states within the cell walls during the cells' collapse process, which thus influence the macroscopic mechanical properties of the honeycombs. According to the cell-walls' stress state, the involved honeycombs are divided into tow groups: membrane-dominated honeycombs and bending-dominated honeycombs. The results show that most of the absorbed energy of the honeycomb is transferred into the internal energy needed by the deformation. The percentage of the internal energy to the total absorbed energy is much more for the membrane-dominated honeycombs. The buckling of the cell-walls results in obvious oscillation in the stress-strain curves of the membrane-dominated honeycombs. The cell-walls in the membrane-dominated honeycombs will dissipate more internal energy during deformation, resulting in higher crushing strength and higher energy absorption ability than those of the bending-dominated ones.

Key words: solid mechanics; energy absorption; impact; honeycomb; cell configuration; crushing strength

* Received 20 August 2012; Revised 17 November 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11172335,10802100)
Corresponding author: Hu Ling-ling, hulingl@mail.sysu.edu.cn

(责任编辑 张凌云)