

多层U形A瓦楞结构材料的共面力学性能

孙德强, 方众望, 罗显洲, 李文娥, 王晨阳, 郑波波, 王庆庆, 孙建建
(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 在不同冲击速度的共面载荷条件下, 获取多层U形A瓦楞结构材料动态力学性能参数。**方法** 建立有限元分析模型, 并简化能量吸收模型, 来评估其能量吸收性能。**结果** 随着冲击速度的不断增大, 均匀变形、过渡变形和动态变形等模式随之呈现。**结论** 最佳单位体积的能量吸收主要由动态峰应力决定。在结构参数一定的条件下, 共面动态峰应力取决于多层U形A瓦楞结构材料所受到的冲击速度。通过对数值结果的物理分析和讨论, 提出了动态峰应力关于冲击速度的经验关系式。

关键词: 多层U形A瓦楞结构材料; 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: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)13-0008-05

In-plane Dynamics of Multilayer A-type U-shaped Corrugated Structure Materials

SUN De-qiang, FANG Zhong-wang, LUO Xian-zhou, LI Wen-e, WANG Chen-yang,
ZHENG Bo-bo, WANG Qing-qing, SUN Jian-jian
(Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: Objective The finite element methodology was conceived to obtain the mechanical parameters about dynamic performance of multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials under the in-plane crushing loadings with various impact velocities. **Methods** A simplified energy absorption model was proposed to evaluate the energy-absorption performance. **Results** The homogeneous deformation mode, transition deformation mode and dynamic deformation mode were gradually observed with the increasing impact velocities. **Conclusion** The evaluation model showed that the optimal energy absorption per unit volume was mainly determined by the dynamic plateau stress. The in-plane dynamic plateau stress depended on the impact velocity for the multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials with given fixed configuration parameters. From the physical analysis and discussion of the numerical results, the empirical formula of dynamic plateau stress was suggested in terms of impact velocity.

KEY WORDS: multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials; in-plane; dynamic performance; deformation mode; dynamic plateau stress; finite element analysis

多层U形A瓦楞结构材料是一种二维多孔材料, 吸收性能, 在诸多领域中都有着广泛的应用。前人已经系统性地总结了二维多孔材料的静态力学理论^[1]。由于其共面方向(图1中的 x_1 方向)上具有良好的能量

收稿日期: 2014-03-22

基金项目: 陕西省自然科学基金(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; 2014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, 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。

多层U形A瓦楞常常受到动态载荷的作用,由此研究其动力学性能是非常必要的。尽管可以采用试验方法进行研究,但实验设备通常较为昂贵,且各种尺寸的实验试样也难以制备^[2-4],所以有限元仿真模拟已经成为一种较为流行的研究方法^[5-12]。现有的有限元仿真计算结果表明,二维多孔材料的动力学性能与其结构参数和冲击速度有关。随着冲击速度的增加,应力-应变曲线的波动幅度逐渐增大,说明传统缓冲曲线^[13]并不适于表征二维多孔材料在共面冲击载荷下的缓冲性能。由能量吸收图表看出,能量吸收性能与低速准静态载荷下的应变率相关^[14],然而冲击波模型^[15]指出,能量吸收性能与高速动态载荷下的冲击速度大小有关。为了实现缓冲性能的最优化,明确结构参数和冲击速度对多层U形A瓦楞冲击动力学性能的影响是非常重要的。

文中采用有限元法,在共面冲击速度为3~250 m/s的载荷下,获取关于多层U形A瓦楞动力学性能的力学参数。建立一个简化的能量吸收模型,以评价动态缓冲性能。从有限元分析结果中可以得到关于多层U形A瓦楞的动态峰应力的经验公式。

1 有限元方法

多层U形A瓦楞的特征单元的主视图见图1。由图1可知,该单元由2个四分之一圆和1个半圆组成,其中2个四分之一圆分别在相接处与半圆相切,所有圆弧的半径均为 R 。2个水平方向的胞壁与弧相切,长度为 $4R$,壁厚为 t 。垂直于 x_1-O-x_2 平面方向上的深度为 b ,那么多层U形A瓦楞的相关密度为:

$$\bar{\rho} = \rho^* / \rho_s = (1 + \pi/4)t/l \quad (1)$$

式中, ρ^* 、 ρ_s 分别为多层U形A瓦楞的整体密度和壁材的密度。

多层U形A瓦楞的有限元模型见图2,用于获取关于其共面动力学性能的相关参数。对于整个模型,设 $b=10$ mm,单元数目为128;对于单个单元,设 $R=2.3$ mm, $t=0.3$ mm。多层U形A瓦楞的试样加载于2个刚性平板中间,试样的所有节点都受到垂直于 x_1-O-x_2 平面方向的约束,保证变形模式为共面应变状态。支撑板(P_2)保持静止,刚性冲击板(P_1)沿 x_1 方向以一个恒定的冲击速度 v 向下移动,直到试样被完全压溃。

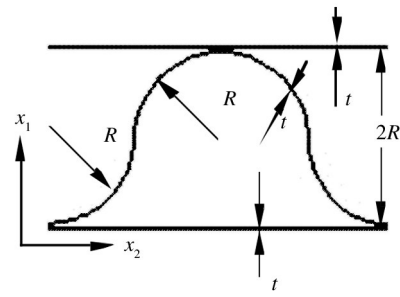


图1 具有一定厚度的多层U形A瓦楞特征单元主视图

Fig.1 Front view of representative cell in multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials with a certain depth

利用Ansys/LS-DYNA,采用正方形的Belytschko-Tsay Shell163单元对模型进行网格划分,每个单元壁上均有5个节点,且单元边长为0.3 mm。试样外表面的接触均定义为自动无摩擦单面接触,试样与上下2个刚性板之间的摩擦因数为0.02。选用线弹性应变硬化材料(也称为双线性)来代表胞壁基本材料的应力-应变关系,该材料的力学参数:密度 $\rho_s=2700$ kg/m³,泊松比 $\nu_s=0.35$,弹性模量 $E_s=68.97$ GPa,屈服应力 $\sigma_{ys}=292$ MPa,正切模量 $E_{tan}=689.7$ MPa。另外,胞壁材料的力学行为按照率无关问题进行处理。

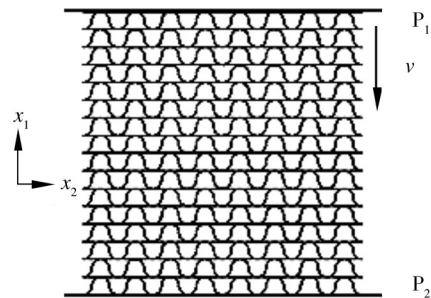


图2 承受共面压缩载荷的有限元模型

Fig.2 FE model of multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials subject to the in-plane crushing loading

2 能量吸收模型

设冲击板与试样间的接触力为 F ,冲击板的位移为 u 。应力 σ 、应变 ε 以及每单位体积吸收能量 e 分别定义为:

$$\sigma = F/A_0, \varepsilon = u/H, e = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

式中: H 和 A_0 分别为试样在 x_1 方向的初始长度和横截面积。

典型的应力-应变曲线见图3a。线弹性变形阶段末端相应的应力和应变分别为 σ_{IP} 和 ε_0 。而后冲击力迅速减小,直至平稳波动之前,被称为塑性屈曲阶段。随后冲击力经历较长时间的平稳波动,其应力大致保持为一个常量,即平台区阶段。密实化开始于密实化应变 ε_D 的出现,此时 F 迅速增加,若此时动力学弹性模量为 E_d ,则有:

$$E_d = \sigma_{IP} / \varepsilon_0, \varepsilon_0 = u_0 / H, \varepsilon_D = u_D / H \quad (3)$$

通过密实化阶段迅速增加的 F 可以看出,在密实化阶段之前,外部的动能应该在平台区阶段被充分吸收。与 ε_D 相对应的单位体积能量吸收被称为最佳单位体积能量吸收,即:

$$e_D = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

动态峰应力 σ_p 在平台区阶段被定义为:

$$\sigma_p = \frac{1}{\varepsilon_D - \varepsilon_0} \int_0^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (5)$$

σ - ε 曲线可以简化为一个分为四部分的分段函数(见图3b),即:

$$\begin{cases} \sigma = E_d \varepsilon & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \sigma_p \leq \sigma < \sigma_0 & \varepsilon = \varepsilon_0 \\ \sigma = \sigma_p & \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_D \\ \sigma = \sigma_p + E_s (\varepsilon - \varepsilon_D) & \varepsilon_D \leq \varepsilon < 1 \end{cases} \quad (6)$$

由于 u_0 非常小,可认为 $\varepsilon_0 \approx 0$,所以根据式(2)—(6), e_D 为:

$$e_D \approx \sigma_p \varepsilon_D \quad (7)$$

在仿真计算中, ε_D 为0.7~0.95,并随着冲击速度

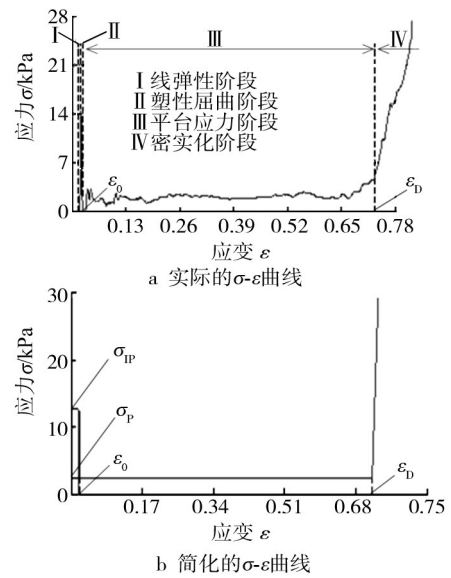


图3 共面压缩载荷($v=60$ m/s)下多层U形A瓦楞的典型应力-应变曲线

Fig. 3 Typical stress-strain curves of multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials under the in-plane crushing loading ($v=60$ m/s)

的增大而在小范围内逐渐增大。可以看出, e_D 的取值主要由 σ_p 决定。

3 结果分析

3.1 变形模式

随着多层U形A瓦楞共面方向上动态冲击速度载荷的增大,可以观察到3种变形模式,分别为均匀模式、过渡模式和动态模式,见图4—6。

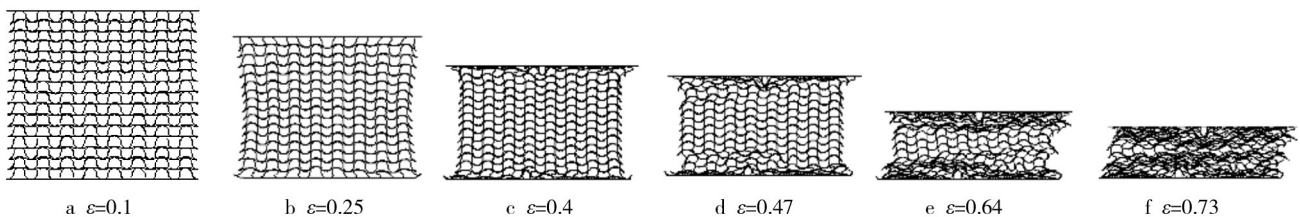


图4 多层U形A瓦楞在均匀模式下的典型变形阶段($v=20$ m/s)

Fig. 4 Typical deformation stages of multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials under homogeneous mode

在低速状态下(见图4),均匀变形表现为2条模糊的“一”字形坍塌带,分别同时出现在靠近上下板的位置,2条变形带逐渐扩张,并随着变形的增大而最终汇合。在中速状态下(见图5),坍塌带的形状较为清晰,

并主要集中在冲击板一端;试样中坍塌带的两侧内折,局部首先被压实,成为一种中间刚硬的材料,上下两端的局部变形带变为“<”和“>”形。随着冲击速度的增大,变形带越来越接近冲击板。当冲击速度高于

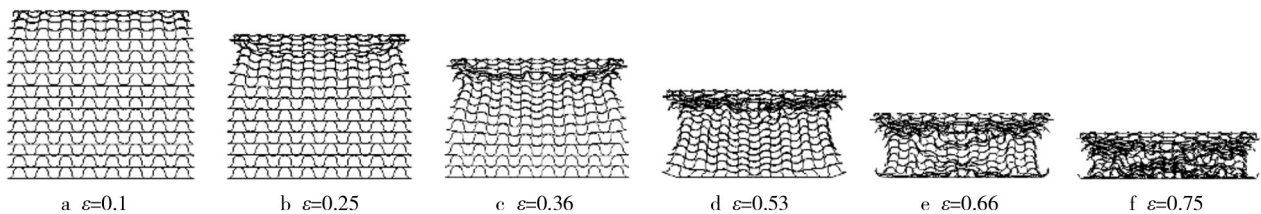


图5 多层U形A瓦楞在过渡模式下的典型变形阶段($v=100\text{ m/s}$)

Fig.5 Typical deformation stages of multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials under transition mode ($v=100\text{ m/s}$)

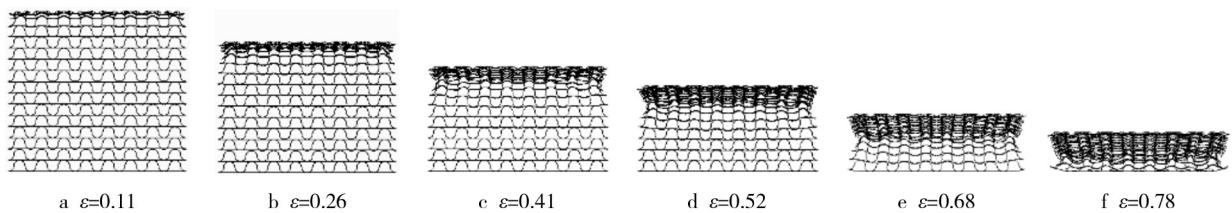


图6 多层U形A瓦楞在动态模式下的典型变形阶段($v=100\text{ m/s}$)

Fig.6 Typical deformation stages of multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials under dynamic mode ($v=160\text{ m/s}$)

某一特定值时,坍塌带呈现出“一”字形的动态变形模式(见图6)。变形带逐层向支撑板传播,只有一层与速度方向垂直的蜂窝单元在其他所有蜂窝都被压至密实化后才开始发生坍塌。

3.2 动态峰应力

根据一维冲击波模型^[15]有:

$$\sigma_p = \sigma_0 + A v^2 \quad (8)$$

式(8)对许多二维多孔材料同样适用^[8-9]。 σ_0 为静态峰应力, $A v^2$ 是由于惯性而产生的动力学增量。在单元壁厚为 0.3 mm 的条件下,对不同冲击速度下的多层U形A瓦楞的动态峰应力进行有限元仿真计算,其结果见表1。从表1可以看出,式(8)同样对图7所示的多层U形A瓦楞适用。利用最小二乘法进行曲线拟合,可得多层U形A瓦楞的动态峰应力的经验公式为:

$$\sigma_p = 2.94 \times 10^6 + 476.82 v^2 \quad (9)$$

表1 多层U形A瓦楞不同冲击速度下的 σ_p 值

Tab.1 Values of σ_p of multilayer A-type U-shaped corrugated structure materials at different impact velocities

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3	20	40	60	80	100	120	140	160	180
σ_p/MPa	2.74	3.27	3.95	4.53	6.01	7.51	10.09	11.99	15.14	18.49

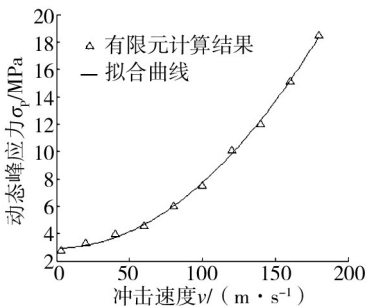


图7 基于表1的有限元计算结果拟合得到的 σ_p - v 关系曲线
Fig.7 The fitted σ_p - v curve of MAUCSMs based on the FE results in table 1

4 结语

通过使用Ansys/LS-DYNA的源代码,在冲击速度为 $3\sim 250\text{ m/s}$ 的共面压缩载荷下,应用有限元方法获取关于多层U形A瓦楞动力学性能的各项力学参数。文中建立了一个简化的能量吸收模型来评估能量吸收性能,表明能量吸收性能主要与动态峰应力有关。随着冲击速度的增加,可以逐步观察到均匀变形模式、过渡变形模式和动态变形模式等。基于有限元计算结果,给出了多层U形A瓦楞的动态峰应力与冲击

速度之间关系的经验公式。

参考文献:

- [1] WANG A J, MCDOWELL D L. In-plane Stiffness and Yield Strength of Periodic Metal Honeycombs[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(2): 137—156.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [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]. Comp Struct, 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] 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.
- [12] 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.
- [13] 彭国勋, 宋宝丰. 物流运输包装设计(第2版)[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun, SONG Bao-feng. Design of Packages for Distribution and Transport (Second Edition) [M]. Beijing: Printing Press, 2012.
- [14] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structures and Properties, Second Edition[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [15] REID S R, PENG C. Dynamic Uniaxial Crushing of Wood[J]. Int J Impact Eng, 1997, 19(5/6): 531—570.
- [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 Ls-Dyna[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(3): 20—23.

欢迎订阅
欢迎投稿