

# 六角形纸蜂窝夹层板能量吸收研究进展

王冬梅

(深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 分析了纸蜂窝夹层板动静态压缩试验方法及不同结构参数的纸蜂窝夹层板动静态缓冲吸能特性。试验结果表明, 平台应力是蜂窝胞壁厚跨比的幂指数函数。引入压缩密实化应变概念, 构建了纸蜂窝材料压缩密实化应变评估方程。将纸蜂窝夹层板压缩应力应变曲线简化为线弹性区、平台区和密实化区, 构建了纸蜂窝夹层板能量吸收曲线理论模型。基于纸蜂窝夹层板动静态压缩试验, 可构建纸蜂窝夹层板二维能量吸收图, 以便更好地表征纸蜂窝夹层板的缓冲性能, 并指出了该研究有待进一步完善之处。

**关键词:** 纸蜂窝夹层板; 缓冲; 能量吸收图

**中图分类号:** TB485.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2009)01-0023-03

## Energy Absorption Figure of Hexagonal Paper Honeycomb Sandwich Structures

Wang Dongmei

(Media and Communication School, Shenzhen Polytechnic College, Shenzhen Guangdong 518055, China)

**Abstract:** The dynamic and static compression experiment methods and the cushioning properties of paper honeycomb sandwich structures with different structure factors were analyzed. Experiments express the plateau stress is the power exponent function of the thickness to length ratio of honeycomb cell-wall. The evaluation equation of compressive densification strain of paper honeycombs is modeled by introducing the instantaneous and relative density of paper honeycombs. The compressive stress-strain curve is simplified into three sections: linear elasticity, plateau and densification. Considering the factors associated with the structure of paper honeycombs, the energy absorption model is obtained and characterized by the thickness-to-length ratio of the honeycomb cell wall. The 2D energy absorption figure of paper honeycomb sandwich structure is also constructed. The future research direction is indicated.

**Key words:** paper honeycomb sandwich structure; cushioning properties; energy absorption figure

六角形纸蜂窝夹层板以其质轻价廉、成型性好、强度高、缓冲性能优良、易于回收再利用、易自然降解等特点而被广泛应用于机电、家电产品的运输包装中。缓冲用纸蜂窝夹层板到底能够吸收多少能量, 及如何评估其缓冲性能是产品包装优化设计时要考虑的重要问题。包装材料的缓冲性能评估方法较多, 并且大部分表征方法都是基于缓冲材料受载吸能这一原理来进行评估的, 其表征方法主要有缓冲系数、缓冲曲线、能量吸收曲线和能量吸收图。这些表征方法各有利弊,

如缓冲曲线存在如下缺陷: 试验量大、耗时、成本高, 将所有的包装材料缓冲特性都一一表征非常困难。利用吸能曲线可以很方便地对比不同密度泡沫材料吸能性能的优劣, 便于进行密度优选, 广泛应用于泡沫金属、泡沫塑料吸能特性的表征。但吸能曲线存在一定的局限性, 如缺乏直观的信息以供参考, 难以实现模型化, 有时还会出现在相同的应变下, 两种材料的理想吸能效率相同, 缓冲吸能效果却相差很大的情况。因此, 若要综合了解材料在不同结构因素、不同应变

收稿日期: 2009-07-13

作者简介: 王冬梅(1976-), 女, 河北献县人, 深圳职业技术学院副教授, 博士, 主要研究方向为运输包装, 多孔材料缓冲性能表征, 包装 CAD, E-mail: sxxawdm@sina.com

率条件下的最佳吸能状态,应借助于能量吸收图<sup>[1]</sup>。能量吸收图是与物理模型化相结合的经验方法,它同时考虑了应变率和缓冲材料的密度对缓冲材料吸能特性的影响<sup>[2]</sup>。本研究以六角形纸蜂窝夹层板为例,就纸蜂窝夹层板能量吸收图的构建和应用开展了一系列的研究。

## 1 纸蜂窝夹层板静动态压缩试验

本试验中,六角形纸蜂窝夹层板试样的厚度分别为10、20、30、40和50 mm,表面密度分别为250、300和350 g/m<sup>2</sup>的牛皮面纸,表面密度分别为112、127、150和180 g/m<sup>2</sup>(相应的蜂窝胞壁厚度分别为0.20、0.22、0.25和0.29 mm)的蜂窝胞壁,以及A、B、C、D(对应的蜂窝胞壁边长分别为5.8、8.7、12.1和14.4 mm)型纸蜂窝芯。试验过程中按照GB/T2828-2003进行取样。

### 1.1 纸蜂窝夹层板静态压缩试验

纸蜂窝夹层板静态压缩试验在深圳市包装质量检测中心和深圳职业技术学院包装测试中心进行。试验仪器包括德国Binder恒温恒湿箱、深圳CMT万能材料试验机。参考的测试标准为缓冲包装材料静态压缩测试方法GB8168-87。

所有的六角形纸蜂窝夹层板试验试样都近似为200 mm × 200 mm。压缩试样按照试验标准完成,试样受到上部和底部载荷的作用,如果没有特别说明,压力是顺着轴向方向的。试验操作在温度为(27 ± 2) °C、相对湿度为(90 ± 2)%的环境条件下进行,压缩位移变化率为(12 ± 2) mm/min。

试验结果表明:贴面和非贴面纸蜂窝芯的缓冲特性曲线形状相似,贴面纸蜂窝芯的缓冲性能明显要好些;纸蜂窝芯的相对密度对纸蜂窝夹层板的缓冲特性有很大的影响,而面纸的表面密度对纸蜂窝夹层板的缓冲性能影响很小;双层叠置纸蜂窝夹层板的缓冲能力并不总是比单层纸蜂窝夹层板高;纸蜂窝夹层板的厚度对其缓冲特性呈波动性影响;纸蜂窝夹层板的平面压力要远远大于其侧面压力和端面压力<sup>[3]</sup>。

### 1.2 纸蜂窝夹层板动态压缩试验

大部分试验在深圳包装质量检测中心和深圳市一通检测技术公司完成,所用的试验设备主要有德国Binder恒温恒湿箱;美国Lansmont跌落试验机和TP3动态数据采集系统。试验参照的标准为GB8167-87包装用缓冲材料动态压缩试验方法。

所有的纸蜂窝产品测试样品均为150 mm × 150 mm方形,测试环境的温度为23 °C,相对湿度为50%,重块采用可调重量的法码,冲击高度为50 cm。因为大部分纸蜂窝夹层板样品在连续2次冲击后已经压溃或者变形,所以每个样品只用于1次冲击试验而不能连续

冲击。

试验结果表明:纸蜂窝夹层板的动态缓冲曲线呈开口向上的内凹型;纸蜂窝胞壁的厚度和边长对其夹层板的缓冲性能影响很大;随着纸蜂窝相对密度的增大,其缓冲性能增加;纸蜂窝的厚度对其动态缓冲性能呈上下波动性影响;随着纸蜂窝厚度的增大,其对缓冲性能的影响越来越小<sup>[4]</sup>。

## 2 纸蜂窝夹层板能量吸收图

### 2.1 纸蜂窝夹层板平台应力评估

将六角形纸蜂窝夹层板的压缩力学性能和经典的Gibson蜂窝材料平台应力<sup>[5]</sup>的评估方程相结合,结果表明,六角形纸蜂窝夹层板的压缩力学性能试验结果与经典的蜂窝理论模型具有良好的一致性。借助Gibson蜂窝材料平台应力理论模型求解纸蜂窝夹层板的平台应力可以表示为:

$$\sigma_{pl} = 13.2\sigma_{ys} \left( \frac{t}{l} \right)^{1.77}, \quad (1)$$

式中:

$\sigma_{pl}$  为纸蜂窝夹层板压缩平台应力;

$\sigma_{ys}$  为蜂窝原纸的屈服强度;

$t$  为蜂窝胞壁厚度;

$l$  为蜂窝胞壁边长。

### 2.2 纸蜂窝夹层板压缩密实化应变评估

分析不同结构参数对纸蜂窝压缩密实化应变的影响,结果表明,纸蜂窝胞壁厚度、边长和纸蜂窝的拉伸率等结构因素对压缩密实化应变均有一定的影响:纸蜂窝压缩密实化应变随胞壁的厚度 $t$ 的增大而减小,随蜂窝胞元边长 $l$ 的增大而增大,随蜂窝胞壁厚跨比 $t/l$ 的增大而减小,随着拉伸率 $r$ 的增大先增大后减小,在拉伸率为1时,其压缩密实化应变达最大值;纸蜂窝的密实化应变与其相对密度近似呈反比例关系,当纸蜂窝的瞬时相对密度为0.39左右时,纸蜂窝压缩趋于密实化<sup>[6]</sup>。纸蜂窝压缩密实化应变可表示为:

$$\varepsilon_D = 1 - 3.95 \frac{t}{l}, \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_D$  为压缩密实化应变。

### 2.3 静态压缩下纸蜂窝夹层板能量吸收曲线模型

基于纸蜂窝夹层板准静态压缩吸能机理,将其压缩应力应变曲线简化为线弹性区、平台区和密实化区<sup>[7]</sup>。从纸蜂窝芯的结构因素入手,用分段函数对其压缩变形三阶段的能量吸收情况分别建模。该模型采用了理论与实践相结合的方法,用纸蜂窝胞壁的厚跨比来表征,并用纸蜂窝芯的固体模量 $E_s$ 标准化。同一材质不同结构的纸蜂窝夹层板可以用同一张最佳能量吸收曲线(参见图1)表示出来,这使其具有一定的普适性<sup>[8]</sup>。

## 2.4 包含应变率信息的能量吸收图

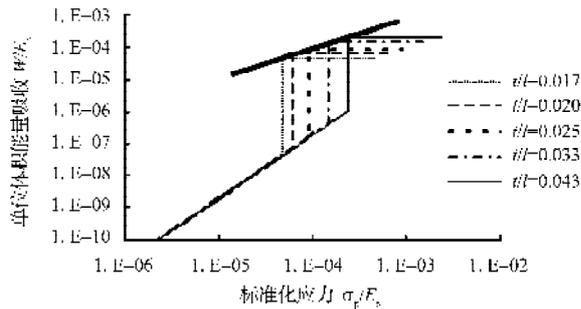


图1 对数标度的纸蜂窝夹层板理论能量吸收曲线

Fig. 1 Theory relationship curves between the standard energy absorption per unit volume and the standard stress in logarithmic coordinates

参考文献[9], 构建纸蜂窝夹层板动态压缩下能量吸收曲线, 将不同应变率下的纸蜂窝夹层板最佳吸能曲线进行比较, 结果表明, 在高应变率条件下, 纸蜂窝夹层板的承压和缓冲性能都优于低应变率条件下的承压和缓冲性能。文献[10]构建了六角形纸蜂窝夹层板的二维能量吸收图。采用纸蜂窝胞壁的固体模量对其承压和缓冲吸能性能标准化, 使不同材质、不同厚跨比、不同应变率的纸蜂窝夹层板承压缓冲吸能信息汇集于同一张图上, 形成两族分别代表应变率和厚跨比的平行线。利用插值法借助该能量吸收图可以实现不同应变率下纸蜂窝厚跨比的优选。

## 2.5 有待完善的地方

目前纸蜂窝夹层板的动态压缩试验主要借助自由落体冲击试验, 试验精度不高, 且试验需要大量的样本, 试验效率低。Hopkinson 压杆试验机已被用于泡沫塑料的动态压缩试验, 是否能用于纸蜂窝夹层板的动态压缩有待于进一步探讨。目前还没有查到定量分析加载应变率对纸蜂窝夹层板缓冲性能影响的研究。

由于纸蜂窝夹层板本身固有的吸湿性, 其对环境温湿度非常敏感, 湿度的变化会引起纸质材料含水率的变化, 从而影响其缓冲性能。温度对纸蜂窝夹层板的缓冲性能也有一定的影响, 但归根结底是由于温度的变化会引起含水率的增减。由此可知, 纸蜂窝夹层板含水率是研究环境因素对其性能影响的关键参数。

由于纸蜂窝夹层板是各向异性材料且其力学性能受环境温湿度影响非常大, 所以现有二维能量吸收图并不能很好地表征纸蜂窝夹层板的能量吸收特性。有待于构建三维能量吸收图来表征纸蜂窝夹层板的缓冲吸能特性。

## 参考文献:

- [1] 王冬梅, 罗 陈, 刘映平. 多孔材料缓冲吸能特性表征方法[J]. 功能材料, 2007, A10: 3853-3855.  
Wang Dongmei, Luo Chen, Liu Yingping. Evaluation Methods on Cushioning and Energy Absorption Properties of Cellular Material[J]. Journal of Functional Materials, 2007, A10: 3853-3855.
- [2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [3] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21: 309-316.
- [4] Wang Dongmei. Impact Behavior and Energy Absorption Properties of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36: 110-114.
- [5] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Out-of-Plane Compressive Properties of Hexagonal Paper Honeycombs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115-119.
- [6] 王冬梅, 王志伟. 纸蜂窝压缩密实化应变评估[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 285-289.  
Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Evaluation of Compressive Densification Strain of Paper Honeycombs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 285-289.
- [7] 王冬梅. 蜂窝纸板压缩破坏机理研究[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 37-39.  
Wang Dongmei. Compression Breakage Properties Research on the Honeycomb Fibreboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 37-39.
- [8] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Energy Absorption Diagrams of Paper Honeycomb Sandwich Structures[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22 (1): 63-67.
- [9] Wang Dongmei. Construction of Energy Absorption Curves for Paper Honeycomb Sandwich Panels under Dynamic Impact[DB/CD]. Long Beach: International SAMPE Symposium and Exhibition(Proceedings), 2008.
- [10] 王冬梅. 瓦楞纸板和蜂窝纸板缓冲吸能特性表征[D]. 无锡: 江南大学博士论文, 2007.  
Wang Dongmei. Characteristics on Cushioning Properties of Corrugated Paperboards and Honeycomb Paperboards[D]. Wuxi: Jiangnan University Doctoral Thesis, 2007.

(责任编辑: 廖友媛)