

蜂窝纸板缓冲机理探讨

毕中臣, 曹小龙, 谢 勇

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 从蜂窝胞元密闭气囊的作用和开槽工艺的作用两个方面, 对蜂窝纸板缓冲机理进行了理论预测与分析。采用3种开槽方式对30 mm厚蜂窝纸板进行静态压缩试验, 考察蜂窝胞元中的密闭气体以及开槽工艺对蜂窝纸板缓冲性能的影响。试验结果表明: 对蜂窝纸板进行开槽处理可以降低其起始屈服应力, 提高其塑性平台区的缓冲性能, 与理论预测相符。

关键词: 蜂窝纸板; 缓冲机理; 静态压缩试验; 开槽工艺; 缓冲性能

中图分类号: TB484.1; TB 487 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2011)06-0038-04

Research on the Cushioning Mechanism of Honeycomb Paperboard

Bi Zhongchen, Cao Xiaolong, Xie Yong

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: From the effects of the air in the cellular hole and the slotting craft, theoretically forecasts and analyzes the cushioning mechanism of honeycomb paperboard. To investigate their influences on the cushioning performance, makes static compress experiments on honeycomb paperboard (about 30mm) with three slotting crafts. The results show that: using the slotting process can reduce initial yield stress of the honeycomb paperboard and improve cushioning property in plastic platform area, which are consistent with the theoretical prediction.

Keywords: honeycomb paperboard; cushioning mechanism ; static compress experiment ; slotting craft; cushioning properties

0 引言

蜂窝纸板是一种新型的环保缓冲包装材料, 具有较广泛的应用前景^[1]。然而国内学者对于蜂窝纸板缓冲性能的研究主要集中在试验研究和力学建模方面, 阻碍了蜂窝纸板在缓冲包装中的应用。已有试验研究主要为应用万能材料试验机测试蜂窝纸板静态压缩下的应力-应变曲线、利用冲击试验机测试蜂窝纸板动态冲击下的峰值加速度-静应力曲线、利用振动台测定蜂窝纸板的振动传递率及其峰值频率等^[2-3]。在力学建模方面, 已有文献主要是研究蜂

窝纸板在受压过程中单蜂窝受力压缩变形情况, 并对压缩过程的4个阶段进行简化, 从而找到影响蜂窝纸板缓冲性能的因素, 为蜂窝纸板的结构设计提供依据^[4]。国外学者对于纸蜂窝性能的研究较少, 他们主要研究金属蜂窝材料的性能^[5-6]。

目前, 针对蜂窝纸板起始屈服应力较大, 不能很好地发挥其塑性平台区的缓冲性能这一问题, 国内学者主要采用预压处理和开槽工艺2种方法, 以降低蜂窝纸板起始屈服应力, 提高其缓冲性能^[7-8]。因此, 本文借鉴已有文献的研究成果, 拟对蜂窝芯纸进行开槽处理, 破坏蜂窝纸板中部分蜂窝胞元的

收稿日期: 2011-06-10

作者简介: 毕中臣(1986-), 男, 河南商丘人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为防振缓冲材料,

E-mail: bizhongchen0417@163.com

密闭气囊, 进而从蜂窝纸板密闭气囊和开槽工艺 2 个方面, 探讨蜂窝纸板的缓冲机理。

1 缓冲机理理论分析

1.1 蜂窝胞元密闭气囊的作用

在未开槽的蜂窝纸板中, 其蜂窝胞元中存在大量气体, 而这些气体将会对蜂窝纸板的缓冲性能产生较大影响。

蜂窝纸板中, 气体被封闭在蜂窝腔内, 当蜂窝纸板受压时, 随着压力 P 的增大, 纸板蜂窝壁开始弯曲, 纸板抵抗变形的应力明显减弱, 但由于腔内气体的体积减小, 气体对于腔壁的压力增大。气体压力增加的过程与腔壁弯曲使得蜂窝纸板抗压能力降低的过程是同时存在的。假设蜂窝纸板中蜂窝腔内的气体完全封闭, 且考虑到一般的冲击过程时间较短, 蜂窝腔中的气体来不及与外界交换热量, 故可近似认为纸板受压过程为绝热压缩过程。空气中的主要成分是氮和氧, 且其比例为 4:1, 因此, 由热力学第一定律和理想气体内能公式可得 $PV^{1.4}$ 为恒量。

蜂窝纸板中存在密闭气囊时, 蜂窝壁板的压强-体积特征曲线如图 1 所示, 胞元中密闭气体对应力-应变曲线的影响如图 2 所示^[9]。

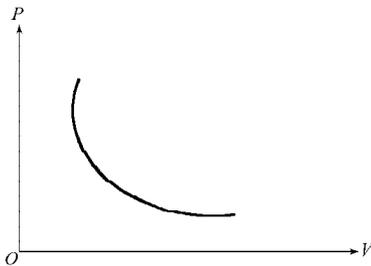


图 1 蜂窝壁板 P - V 特征曲线

Fig. 1 P - V curve of honeycomb wall board

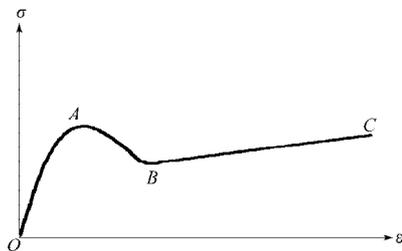


图 2 胞元中密闭气体对 σ - ϵ 曲线的影响

Fig. 2 Air effects on the σ - ϵ curve of paperboard

由图 1 的曲线趋向和图 2 可知, 理想条件下, 随着蜂窝纸板表面应力的增加, 蜂窝纸板的应力-应变曲线会经历 4 个阶段, 即弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段和密实化阶段。而蜂窝胞元中的气囊对蜂窝纸板的缓冲性能的影响发生在弹塑性阶段, 即图

2 中的 AC 段。图 2 中的 OA 段为蜂窝纸板的弹性阶段, 此时蜂窝胞元没有变形, 该阶段中, 影响蜂窝纸板缓冲性能的主要因素是纸蜂窝芯结构和蜂窝纸板的原材料。图 2 中的 AB 段为当应力达到蜂窝纸板的弹性极限后, 蜂窝胞元壁开始受压弯曲, 导致胞元体积减小, 气体的内压力增加, 应力迅速下降, 压力值在 B 处达到平衡。处于 BC 段时, 蜂窝胞元壁应力依然很弱, 而气体的压力随着应变的增加一直上升, 故此时蜂窝纸板的应力呈现出逐渐增加的趋势。但蜂窝纸板的应力不会一直增加, 因为当蜂窝胞元壁达到一定形变后, 胞元中的气体就会泄漏。

1.2 开槽工艺的作用

通过对蜂窝纸板静态压缩特性研究得知, 蜂窝纸板起始屈服应力较大, 而吸收能量的区域主要在蜂窝纸板的塑性平台区。因此, 发挥蜂窝纸板良好的缓冲性能的前提, 是外界应力达到蜂窝纸板的弹性极限。如果想发挥蜂窝纸板优良的缓冲性能, 就需要降低其起始屈服应力, 而开槽工艺可降低蜂窝纸板的起始屈服应力, 且可以提高其缓冲性能。开槽工艺的影响因素包括槽宽、槽深和槽间距。蜂窝芯开槽后做成的蜂窝纸板试样如图 3 所示。

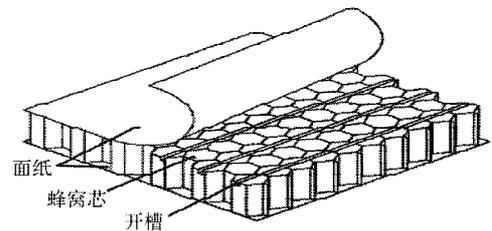


图 3 开槽蜂窝纸板试样

Fig. 3 The slotted honeycomb specimen

由图 3 可知, 开槽工艺会导致部分蜂窝胞元结构的完整性遭到破坏, 进而影响蜂窝纸板的起始屈服应力和塑性平台区的应力大小。王冬梅等人通过对蜂窝面外压缩性能的研究, 得到如下 B 型和 D 型纸蜂窝的起始屈服应力评估公式^[10] :

$$\sigma_s^* = \frac{5kE_s}{(1-\lambda^2)\cos\alpha(1+\sin\alpha)} \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (1)$$

式中: k 为结构参数 (对于 B 型蜂窝, $k=1.54$; 对于 D 型蜂窝, $k=3.32$); E_s 为蜂窝原纸的弹性模量; α 为蜂窝的拉伸角; λ 为蜂窝原纸的泊松比; t 为蜂窝原纸的厚度; l 为纸蜂窝胞壁边长。

纸蜂窝塑性平台的应力公式为:

$$\sigma_{pl} = 13.2\sigma_{ys} \left(\frac{t}{l}\right)^{1.77} \quad (2)$$

式中 σ_{ys} 为原纸的压缩屈服应力。

借鉴公式 (1) 和 (2), 可知芯子开槽处理会降

低纸蜂窝胞壁边长和破坏蜂窝纸板的部分封闭气囊,而其它的参数只与原材料自身有关,此时,其起始屈服应力公式为:

$$\sigma_3^* = \frac{5kE_s}{(1-\lambda^2)\cos\alpha(1+\sin\alpha)}\left(\frac{t}{l}\right)^3 - nPA。$$

式中: n 为遭破坏的蜂窝气囊总个数; A 为气囊面积。

纸蜂窝胞壁边长 l 减小,但是由于开槽工艺的槽宽一般比较小,所以假设 l 不变,只考虑封闭气囊对其缓冲性能的影响,故该式表明开槽工艺可降低蜂窝纸板的起始屈服应力。

开槽后蜂窝纸板的塑性平台区应力公式为:

$$\sigma_{pl} = D\sigma_{ys}(t/l)^m,$$

式中 D , m 为平台应力的约束常数。

由于 l 的等效长度变小,故经开槽处理后的蜂窝纸板的塑性平台区应力将变大。

2 开槽工艺试验

2.1 试样制备

在开槽试验台上,采用相同厚度的旋转锯齿刀片对蜂窝纸芯条进行开槽处理,得到如表1所示3种不同开槽工艺的蜂窝纸芯条,再对这些纸芯条进行拉伸和覆面以及裁切后,即可得到如图4所示的试样。试验样品尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$,蜂窝纸芯孔径为 15 mm ,厚度为 30 mm ,纸芯原纸定量为 120 g/m^2 ,面纸定量为 300 g/m^2 。

表1 开槽工艺参数

Table 1	The parameters of slotted craft			mm
开槽工艺	槽宽	槽深	槽间距	
1	2.5	3	24	
2	2.5	3	28	
3	2.5	3	32	

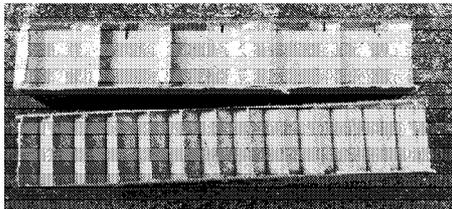


图4 试验试样

Fig. 4 Test specimen

2.2 试验方法

试验过程中,依据 GB 8168—2008《缓冲材料静态压缩试验方法》^[1],及 ISO 3386/1《泡沫柔性聚合物材料,压缩应力应变特性的测定·低密度材料》^[2]、ISO 2233—1986《包装、运输包装件、温湿度调节处理》^[3]、ISO 187—1990《纸、纸板和纸浆——温湿

度处理和试验的标准大气条件》^[4]等中的要求进行取样和试样的处理。

试验过程中,首先将试验样品在温度为 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(50 \pm 2)\%$ 的环境中处理 24 h ;再在 SANS 万能电子试验机上,以 12 mm/min 的恒定压缩速度进行静态压缩试验。每组测试保证有 5 个有效结果,并取其算术平均值为最终测试结果,且以未开槽的蜂窝纸板作为对照组。

2.3 试验结果与分析

按照上述的试验方法进行试验,得到相应的试验数据,对这些数据进行处理后,可得到如图5所示的蜂窝纸板的应力-应变曲线。

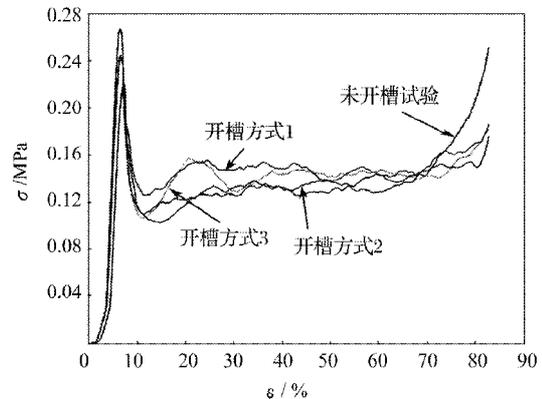


图5 蜂窝纸板的应力-应变图

Fig. 5 The stress-strain curve of honeycomb paperboard

从图5中可看出,3种开槽处理方式下,曲线的起始屈服应力同未开槽蜂窝纸板的起始屈服应力相比,3组开槽试验的起始屈服应力均减小,这表明:相对于未开槽的试验样品,3种开槽方式均降低了蜂窝纸板的起始屈服应力。对蜂窝纸板进行开槽处理会降低其起始屈服应力这一试验结论与理论预测相符,因此,可得出开槽后的蜂窝纸板更容易起到缓冲作用的结论。

从图5中还可看出:在塑性坍塌阶段,经3种开槽方式处理后,试样应力-应变曲线的面积比未开槽试样的大。从能量吸收角度分析,这一现象表明:经开槽处理后的试样能吸收更多的能量,所以开槽后蜂窝纸板的缓冲性能更好。

3 结论

开槽处理后的蜂窝纸板和无开槽处理蜂窝纸板的静态压缩试验结果表明,测定的结果与理论预测相符,蜂窝纸板缓冲机理体现在如下3个方面:

1) 蜂窝胞元中存在的气体对蜂窝纸板的缓冲性能有较大影响。

2) 对蜂窝纸板采用开槽工艺处理,可降低蜂窝

纸板的起始屈服应力,使其更容易起到缓冲作用。

3)对蜂窝纸板采用较优的开槽工艺,能使其吸收更多的能量,因而能提高纸板的缓冲性能;

纸芯开槽工艺受槽宽、槽深和槽间距3个因素的影响,本文只研究了槽间距对于蜂窝纸板缓冲性能的影响,对于其他2个因素有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王冬梅,王志伟. 纸质结构型包装材料缓冲性能研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(6): 43-46.
Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Research Advance in Paper Structure Cushioning Packaging Material[J]. Materials Review, 2007, 21(6): 43-46.
- [2] 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 Fibreboard Cushioning Performance and the Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4): 5-8.
- [3] 郭彦峰,张景绘. 蜂窝纸板动态缓冲特性及振动传递率的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(5): 539-541.
Guo Yanfeng, Zhang Jinghui. Experimental Study of Dynamic Cushioning Property and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(5): 539-541.
- [4] 王冬梅,廖强华. 蜂窝纸板静态压缩力学性能建模研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 129-132.
Wang Dongmei, Liao Qianghua. Research on the Mechanical Performance Modeling of Honeycomb Paperboard under Quasi-Static Compression[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 129-132.
- [5] Zhang J, Ashby M F. The Out-of-Plane Properties of Honeycombs[J]. International Journal of Mechanical Science, 1992, 34(6): 475-489.
- [6] Shafizadeh J E, Seferis J C. Scaling of Honeycomb Compressive Yield Stresses[J]. Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(Part A): 618-688.
- [7] 张安宁,童小燕,刘效云,等. 预压缩处理蜂窝纸板静态压缩特性试验研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 94-115.
Zhang Anning, Tong Xiaoyan, Liu Xiaoyun, et al. Research on Static Compression Properties of Pre-Compressed Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 94-115.
- [8] 付应海,王海伦,张星,等. 芯子开槽对蜂窝纸板平压强度的影响[J]. 包装学报, 2010, 2(4): 61-63.
Fu Yinghai, Wang Hailun, Zhang Xing, et al. Influence of Slotted Core on the Flatwise Compressive Strength of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2010, 2(4): 61-63.
- [9] 骆光林,朱大鹏. 蜂窝纸板缓冲机理[J]. 包装工程, 2002, 23(5): 118-120.
Luo Guanglin, Zhu Dapeng. The Cushion Mechanism of the Honeycomb Fibreboard[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 118-120.
- [10] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Out-of-Plane Compressive Properties of Hexagonal Paper Honeycombs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115-119.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8168—2008 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 8168—2008 Testing Methods of Static Compression for Package Cushioning Materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [12] The International Organization for Standardization. ISO 3386/1—1986. Polymeric Materials, Cellular Flexible-Determination of Stress-Strain Characteristics in Compression-Part 1: Low-Density Materials[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1986.
- [13] The International Organization for Standardization. ISO 2233—1986. Packaging-Transport Packages-Temperature and Humidity Conditioning[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1986.
- [14] The International Organization for Standardization. ISO 187—1990 Paper, Board and Pulps-Standard Atmosphere for Conditioning and Testing[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1990.

(责任编辑:廖友媛)