

# 纸蜂窝材料的有效缓冲及其预压缩试验

王虹<sup>1</sup>, 王文明<sup>2</sup>, 胡兵林<sup>2</sup>, 张新昌<sup>1</sup>

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 无锡荷力泰低碳环保材料技术开发有限公司, 无锡 214122)

**摘要:** 通过对纸蜂窝材料(蜂窝纸板)进行预压缩试验的方法,研究了预压前后纸蜂窝材料缓冲性能的变化,提出了纸蜂窝材料有效缓冲的概念。进一步研究了不同预压缩率下纸蜂窝材料缓冲性能的变化,得到了一组缓冲系数  $C$ -最大静应力  $\sigma_m$  曲线,此曲线可以方便缓冲包装设计材料选择。

**关键词:** 蜂窝纸板; 预压缩; 应力峰值; 能量吸收; 缓冲系数; 有效缓冲

**中图分类号:** TB484.1; TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)01-0020-04

## Effective Cushioning of Paper Honeycomb Material and Precompression Test

WANG Hong<sup>1</sup>, WANG Wen-ming<sup>2</sup>, HU Bing-lin<sup>2</sup>, ZHANG Xin-chang<sup>1</sup>

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi Honitek Low Carbon and Eco Material Technological Development Co., Ltd., Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The change of cushioning performance of honeycomb paperboard after precompression was studied through precompression test. The concept of effective cushioning of honeycomb paperboard was put forward. The cushioning performance of honeycomb paperboard under different precompression ratio was studied further.  $C$ - $\sigma_m$  curves were obtained, which can be reference for material selection of cushion packaging design.

**Key words:** honeycomb paperboard; precompression; stress peak; energy absorption; cushioning coefficient; effective cushioning

蜂窝结构最早应用在航空航天和军事上<sup>[1]</sup>,随后开始应用于民用建筑、家具和交通行业<sup>[2]</sup>。使用瓦楞原纸和箱板纸制造的蜂窝纸板,具有质量小、强度高、成本低、可回收且可部分代替木材及出口免检等优势,已成为一种新型的绿色包装材料,在产品包装领域的应用越来越广泛。近年来,部分汽车配件、电动车以及家电产品等都在尝试使用纸蜂窝材料代替发泡聚苯乙烯(EPS)缓冲包装<sup>[3-4]</sup>。然而,已有的应用研究表明,蜂窝纸板直接应用于产品的缓冲保护尚存在一些不足。例如,由于对蜂窝纸板的承压和能量吸收特性把握不准确,不恰当的应用方式会造成产品或包装破损;纸蜂窝材料无法像传统的缓冲材料那样根据缓冲曲线进行方便的选材等。本文的研究表明,在纸蜂窝材料的应力峰值点前,其缓冲能力比较有限,而采取对蜂窝纸板进行预压缩的方式可以改变这一不足,从而获得一种处于有效缓冲状态的纸蜂窝材料;对不同预压缩率下蜂窝纸板的  $C$ - $\sigma_m$  曲线进行分

析可知,随着预压缩率的增大,纸蜂窝材料的缓冲系数最小值减小,即缓冲效率增加,其对应的静应力也随之减小。

## 1 缓冲包装设计中蜂窝纸板的应用误区

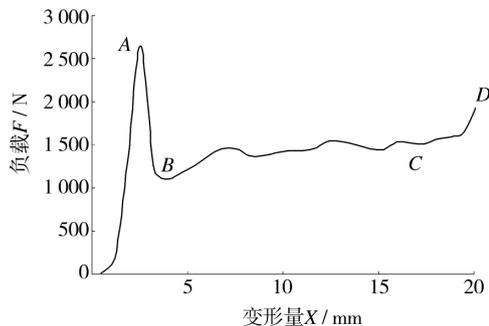
通常认为原始状态的蜂窝纸板具有良好的缓冲性能,然而通过力学性能分析可知,这是值得商榷的。

蜂窝纸板的静态压缩曲线见图1,可以看出蜂窝纸板的压缩过程主要有  $OA$ ,  $AB$ ,  $BC$  和  $CD$  4 个阶段。

传统意义上的缓冲阶段在  $OA$  段,其曲线较陡峭,虽然变形可以恢复,但范围很窄(变形量很小),说明材料吸收能量较少。 $OA$  段曲线的顶点  $A$  即是应力峰值点。若产品跌落时产生的冲击力超过该峰值应力,则蜂窝纸板将被压溃,包装保护状态被破坏;若未超过该峰值应力,则会出现 2 种情况:冲击力超过产品的破损极限,导致产品损坏;反之,蜂窝纸板和产

收稿日期: 2011-09-07

作者简介: 王虹(1988-),女,蒙古族,内蒙古赤峰人,江南大学硕士生,主攻现代包装材料与结构。



OA—弹性阶段, AB—过渡阶段, BC—塑性坍塌阶段, CD—密实化阶段<sup>[5-6]</sup>; A 为峰值点, C 为极限点

图1 蜂窝纸板的静态压缩曲线

Fig. 1 Static compression curve of honeycomb paperboard

品都完好,此时呈现出虚假的良好包装状态,其实质则是过度包装。

当静压力越过应力峰值时,蜂窝胞壁由弹性形变转化为以塑性较为特征的塑性屈服。继续受压,蜂窝纸板就进入持续稳定的塑性坍塌阶段(BC),此时曲线较平缓,说明材料吸收能量较多,但其变形很大,且回弹性差,将导致缓冲包装结构的定位作用丧失,保护功能下降。正常使用时往往不考虑这2种工况。

上述分析表明,蜂窝纸板本身并不是良好的缓冲包装材料。若对蜂窝纸板加以预先处理,使其处于变形可控、有良好吸能效果的有效缓冲状态,则可以运用纸蜂窝材料较好地实现产品的缓冲保护。

蜂窝纸板的结构和荷力胜蜂窝材料集团的某品牌洗衣机的包装设计方案见图2。

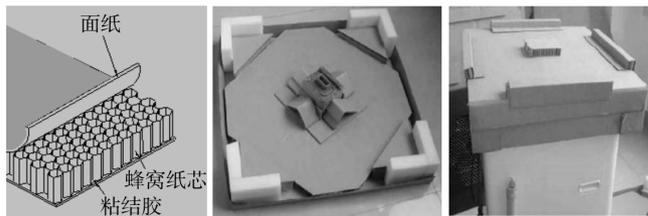


图2 蜂窝纸板的结构及在包装上的应用

Fig. 2 Structure of honeycomb paperboard and its application on packaging

## 2 蜂窝纸板的预压缩试验

为解决上述问题,针对一种常用的包装用蜂窝纸板进行研究。通过对蜂窝纸板进行预压缩处理的方法来消除其峰值应力<sup>[8-9]</sup>,进而分析预压缩后纸蜂窝材料的缓冲特性。

### 2.1 材料

选用的蜂窝纸板型号为“150B/250-25”。这是一种芯纸定量为150 g/m<sup>2</sup>,芯层孔径为B孔,面纸定量为250 g/m<sup>2</sup>,纸板厚度为25 mm的包装用蜂窝纸板。材料来自苏州荷力胜蜂窝材料有限公司。

### 2.2 主要设备

设备:LRXPlus 电子材料试验机,由英国LLOYD INSTRUMENTS 公司生产;THS-AOC-100AS 恒温恒湿试验机,由庆生科技有限公司生产。

### 2.3 方法

1) 根据GB/T 1453-2005 夹层结构或芯子平压性能试验方法<sup>[10]</sup>,将试样在温度为(23±2)°C,相对湿度为50%环境下预处理24 h,然后在材料试验机上进行第1次静态压缩试验直至完全压溃,每个试样从恒温恒湿箱取出后5 min内完成测试,对蜂窝纸板施加恒定轴向加载,速度为12 mm/min。试样尺寸为100 mm×100 mm,进行5次重复试验,取平均值。

2) 在峰值点和极限点之间划分预压缩点,拟定试样的预压缩率,预压缩率为预压厚度与原厚度的百分比。

3) 根据拟定的预压缩率,使用材料试验机对蜂窝纸板试样进行预压缩处理,将预压缩后的试样作为进一步试验的试样。

4) 将预压后的试样在仓储环境中放置5 d后,在温度为(23±2)°C,相对湿度为50%条件下预处理24 h,用材料试验机进行第2次静态压缩试验,每个试样从恒温恒湿箱取出后5 min内完成测试,每组选5个试样进行重复试验,绘制 $\sigma-\epsilon$ 曲线和 $C-\sigma_m$ 曲线。

### 2.4 结果与分析

#### 2.4.1 拟定预压缩率

试样第1次静态压缩后的曲线见图3。

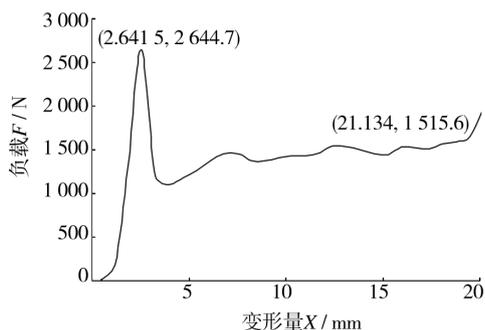


图3 150B/250-25 蜂窝纸板的静态压缩曲线

Fig. 3 Static compression curve of 150B/250-25 honeycomb paperboard

由图 3 可知,试样的峰值点负载约为 2 644.7 N,峰值点形变量约为 2.641 5 mm,密实点负载约为 1 515.6 N,密实点形变量约为 21.134 mm,以上均为平均值。为避免某些试样的预压缩处理未过峰值,预压缩第一点的选择应稍大于峰值点,然后在峰值点和极限点之间选取预压缩点。为方便统计,试样的预压缩率拟定结果见表 1。

表 1 试样的预压缩率

Tab. 1 Precompression ratio of  
150B/250-25 honeycomb paperboard

预压厚度/mm	3	5	7.5	10	12.5	20
预压缩率/%	12	20	30	40	50	80

12%, 20%, 30%, 40%, 50% 和 80% 预压缩率下的试样见图 4。其中,预压缩 80% 时,试样已呈密实

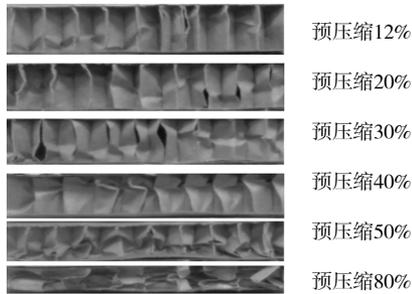


图 4 不同预压缩率下的蜂窝纸板  
Fig. 4 Honeycomb paperboard with  
different precompression ratio

状态。预压缩后的试样具有一定弹性,表面基本平整,但蜂窝结构已有不同程度的溃损,初步考虑,设计缓冲包装结构时应按预压缩后蜂窝纸板的尺寸计算。

#### 2.4.2 预压缩蜂窝纸板的缓冲特性

由第 1 次静态压缩得到预压缩率分别为 12%, 20%, 30%, 40% 和 50% 的蜂窝纸板试样,在仓储环境放置 5 d,以充分释放压缩应力后,再次进行静态压缩试验,得到应力-应变曲线见图 5。

由图 5 可以看出,预压缩以后的蜂窝纸板再次进行静态压缩试验时,已经没有了首次压缩时的应力峰值,并且基本保持着原有的平台应力。将图 5 曲线做近似处理得到应力应变曲线的简化模型,见图 6。

由图 6 可以看出,预压缩后的蜂窝纸板再次受压的过程主要包括弹性缓冲吸能阶段和塑性缓冲吸能阶段,并且弹性缓冲范围随预压缩率的增大而增大,塑性缓冲范围随预压缩率的增大而减小。

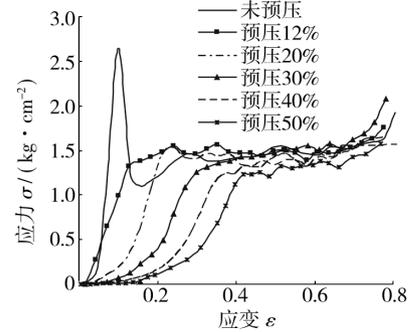


图 5 蜂窝纸板应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of honeycomb paperboard

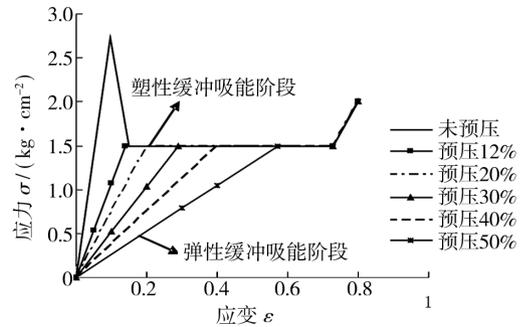


图 6 蜂窝纸板应力-应变曲线的简化模型

Fig. 6 Simple model of stress-strain curve  
of honeycomb paperboard

在弹性缓冲吸能阶段,蜂窝纸板通过可恢复的弹性形变有效地吸收能量;在塑性缓冲吸能阶段,由于变形不可逆,材料最终将失去对产品的保护能力。因此,蜂窝纸板的有效缓冲状态就是指变形可控且有良好能量吸收效果的弹性状态。研究的重点就是这一阶段,即纸蜂窝材料的有效缓冲状态。

将不同预压缩率下纸蜂窝材料的弹性缓冲吸能阶段  $\sigma-\epsilon$  曲线转化为  $C-\sigma_m$  曲线,见图 7。

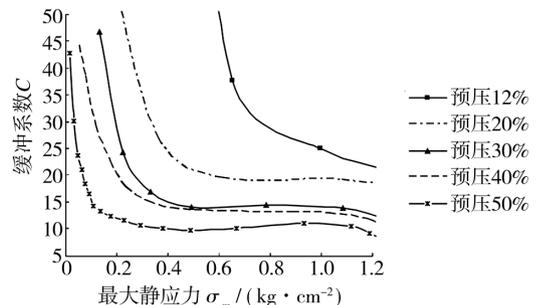
图 7 不同预压缩率下蜂窝纸板的  $C-\sigma_m$  曲线

Fig. 7  $C-\sigma_m$  curves of honeycomb paperboard  
with different precompression ratio

由图7可以看出,预压缩后纸蜂窝材料的  $C-\sigma_m$  曲线呈“L”型,且该曲线随预压缩率的增大而向左下方移动。这说明材料的缓冲系数随着预压缩率的增大而减小,即缓冲效率增加,而对应的最大静应力则随着预压缩率的增大而减小。

### 3 结语

通过对蜂窝纸板进行预压缩试验的方法,研究了预压前后纸蜂窝材料缓冲性能的变化。研究表明:

1) 在纸蜂窝材料的应力峰值点前,其缓冲能力是有限的,而超过应力峰值点以后,材料将失去对产品的定位作用,因此原始状态纸蜂窝材料的缓冲性能并不理想。

2) 以应力峰值点作为预压缩的起点,可将预压缩后纸蜂窝材料的缓冲过程分为弹性缓冲吸能阶段(即有效缓冲阶段)和塑性缓冲吸能阶段。只有在有效缓冲阶段才可以避免使用蜂窝纸板进行缓冲包装时的保护不足或过度包装。

3) 随预压缩率的增大,纸蜂窝材料的有效缓冲范围增加,缓冲系数  $C$  减小,即(缓冲效率( $\eta=1/C$ )增加),对应的最大静应力也将减小。

4) 预压缩后的蜂窝纸板厚度变小,具有一定弹性且表面基本平整。设计缓冲包装结构时需按预压缩后的尺寸计算。不同预压缩率下的  $C-\sigma_m$  曲线,可以方便缓冲包装设计时的材料选择。

#### 参考文献:

- [1] PFLUG J, VANGRIMDE B, VERPOEST I, et al. Continuously Produced Honeycomb Cores[J]. Society for the Advancement of Material and Produces Engineering, 2003, 48(1): 602-611.
- [2] 王文明. 新型环保的家具用材——蜂窝复合材料[J]. 广西节能, 2006(2): 39.  
WANG Wen-ming. The New Environmental Protection Material of Furniture-honeycomb Composite Materials [J]. Guangxi Energy Saving, 2006(2): 39.
- [3] 王冬梅, 王志伟. 纸质结构包装材料缓冲性能研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(6): 43-45.  
WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Research Progress on Buffering Performance of Paper Structure Packing Material[J]. Materials Review, 2007, 21(6): 43-45.
- [4] 王文明. 蜂窝纸板在空调包装上的应用[C]. 蜂窝纸板发展战略研讨会, 2001.  
WANG Wen-ming. Applications on Packaging Air Conditioning of Honeycomb Paperboard[C]. Seminar on Development Strategies of Honeycomb Paperboard, 2001.
- [5] 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 Dong-mei. Research on Damage Mechanism of Honeycomb Paperboard Compressed[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 37-39.
- [6] 虞道良, 卢立新. 准静态压缩下的蜂窝纸板承载性能实验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 35-37.  
YU Dao-liang, LU Li-xin. Experimental Study on Bearing Properties of Honeycomb Paperboard under Static Compressed[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 37-39.
- [7] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Second Edition. Oxford: Pergamon, 1997.
- [8] 李厚民, 卢寰华, 谢一魁. 预压对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 44-46.  
LI Hou-ming, LU Huan-hua, XIE Yi-kui. Influence of Pre-compress on the Buffer Performance of Honeycomb Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 44-46.
- [9] 张安宁, 童小燕, 刘效云, 等. 预压缩处理蜂窝纸板静压特性试验研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 94-115.  
ZHANG An-ning, TONG Xiao-yan, LIU Xiao-yun, et al. Experimental Study on Static Compression Properties of Honeycomb Paperboard under Compressed[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 94-115.
- [10] GB 1453-2005, 夹层结构或芯子平压性能试验方法[S].  
GB 1453-2005, Test Method for Flatwise Compression Properties of Sandwich Constructions or Cores[S].