

## 基于芯纸环压强度的蜂窝纸板临界应力模型研究

张丽, 王保升, 武华

(南京工程学院, 南京 211167)

**摘要:** 对蜂窝纸芯的环压强度进行了理论分析和试验测试, 得到了基准临界应力。通过对多种规格的试样进行静态压缩试验, 得出了蜂窝纸板压缩性能曲线。进一步分析了临界应力随厚度、面纸、蜂窝边长变化而变化的规律, 构建了以芯纸环压强度为基础的临界应力模型, 利用该模型可以预测蜂窝纸板的临界应力。

**关键词:** 蜂窝纸板; 环压强度; 临界应力模型

**中图分类号:** TB484.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)07-0054-04

### Research on Critical Stress Model of Honeycomb Paperboard Based on Ring Crush Strength

ZHANG Li, WANG Bao-sheng, WU Hua

(Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** The ring crush strength of honeycomb paperboard was tested and analyzed theoretically, and then the base critical stress was obtained. By experiments on different samples, the static compression performance curves of honeycomb paperboard were obtained. Critical stress model was set up, which reveals the relationship of critical stress with thickness, panel, and side length. The critical stress of honeycomb paperboard can be predicted by using the model.

**Key words:** honeycomb paperboard; ring crush strength; critical stress model

蜂窝纸板是一种纸质蜂窝夹层板, 由两层面纸和面纸之间的蜂窝芯组成。蜂窝纸板的结构和材质使之具有质量轻、强度高、可回收利用等优点, 广泛应用于包装、家具、建筑等领域, 所以蜂窝纸板的承压性能对其合理选用至关重要。目前, 郭彦峰<sup>[1]</sup>、王冬梅<sup>[2]</sup>、卢立新<sup>[3]</sup>、孙亚平<sup>[4]</sup>、张改梅<sup>[5]</sup>等对蜂窝纸板进行了大量的试验研究; 王冬梅<sup>[6]</sup>建立了纸蜂窝压缩临界应力经验评估公式, 得到了压缩临界应力与蜂窝纸板密度之间的关系; 骆光林<sup>[7]</sup>分析了蜂窝纸板的缓冲机理, 并指出了蜂窝纸板中气体的重要作用以及对力学性能的影响。笔者在试验基础上, 通过数值拟合, 建立了以芯纸环压强度为基础的压缩临界应力与厚度、面纸数量、蜂窝边长之间的模型, 利用该模型可估算蜂窝纸板的临界应力, 从而为其合理选用和设计提供依据。

### 1 蜂窝芯纸环压强度计算

环压强度是指将一定尺寸的试样插在试样座内形成圆环形, 在上下板之间施压, 试样被压溃前所能承受的最大压力。环压强度表征纸张边缘承受压力的性能, 是蜂窝纸板芯纸重要的强度指标。

蜂窝芯纸的环压强度通过蜂窝纸板的芯纸环压试验测得, 试验按照 GB/T 2679.8<sup>[8]</sup>进行, 设备为 ZYD-3 电子式压缩试验仪(环压仪)。按照标准, 试样长度是 152 mm、宽度是 12.7 mm, 试验时取 10 片进行检测, 其中 5 片正面朝外, 另外 5 片反面朝外装入环形托盘中分别检测, 然后将 10 片检测的结果求出平均值。

试验测得芯纸压溃力  $F=91.828$  N。根据:

$$R=F/0.152 \quad (1)$$

收稿日期: 2011-08-23; 修订日期: 2012-02-22

作者简介: 张丽(1970—), 女, 山西汾阳人, 南京工程学院讲师, 主要研究方向为机械设计、运输包装等。

式中: $R$  为环压强度(N/m); $F$  为压溃力值(N)。带入试验数据得: $R=604.13$  N/m。

## 2 蜂窝芯理论抗压强度的计算

### 2.1 芯纸总长度计算

试验中蜂窝纸芯试样的规格是  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,所以蜂窝纸芯试样的面积是  $A=100\text{ cm}^2$ 。蜂窝芯元的边长是  $10\text{ mm}$ ,根据参考文献[9]可得:

单条芯纸质量 = 纸芯长度  $\times$  纸芯宽度(纸板厚度)  $\times G=4WTG/3$  (2)

式中: $W$  为纸板长度(mm); $T$  为纸板厚度(mm); $G$  为芯纸定量( $\text{g}/\text{m}^3$ )。

芯条数量 =  $H/a = H/(\text{蜂窝内径} \times \text{孔径比}) = H/(\sqrt{3}Li)$  (3)

式中: $H$  为蜂窝纸板的长度(mm); $L$  为蜂窝边长(mm); $a$  为蜂窝孔距(mm)。

蜂窝内径  $d=\sqrt{3}L$ ,孔径比  $i=a/d=1$ ,带入试样数据得:芯条数量 =  $5.7735$ 。

蜂窝纸芯总长度 = 芯条数量  $\times$  纸芯长度 =  $5.7735 \times 40/3=0.7698\text{ m}$ 。

### 2.2 蜂窝芯理论压溃值计算

蜂窝芯的理论压溃值 = 蜂窝芯纸的环压强度  $\times$  蜂窝芯纸的总长度。

蜂窝芯纸的环压强度为  $604.13\text{ N}/\text{m}$ ,蜂窝芯纸的总长度为  $0.7698\text{ m}$ 。所以蜂窝芯的理论压溃值为  $0.7698 \times 604.13=465.06\text{ N}$ 。蜂窝芯的理论压溃值是  $465.06\text{ N}$ ,而蜂窝芯的实际压溃值却远远大于其理论压溃值,见图 1。这说明由原纸变为蜂窝芯的过

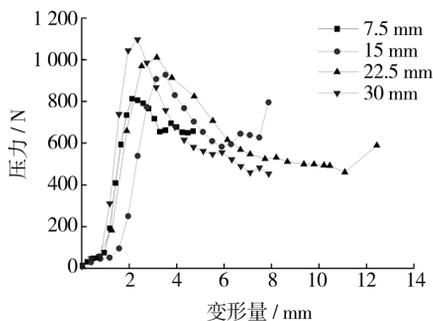


图 1 不同厚度蜂窝芯的压力-变形图  
Fig. 1 Force and distortion relationship of honeycomb core in different thickness

程中,有其他因素影响蜂窝芯的强度。据目前研究来看,主要影响因素有原纸的定量、涂胶量、环境湿度、面纸、蜂窝芯的边长大小、蜂窝芯的厚度等,文中主要研究的是厚度、蜂窝边长大小和面纸数量对蜂窝纸板抗压强度的影响关系。

## 3 蜂窝芯抗压强度的影响因素

### 3.1 试样规格

1) 第 1 组:蜂窝边长均为  $10\text{ mm}$ ,面积为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,无面纸,厚度分别为  $7.5, 15, 22.5, 30\text{ mm}$ 。

2) 第 2 组:蜂窝边长均为  $10\text{ mm}$ ,面积为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,厚度均为  $30\text{ mm}$ ,分无面纸、单层面纸、双层面纸 3 种。

3) 第 3 组:面积为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,厚度均为  $30\text{ mm}$ ,无面纸,蜂窝边长分别为  $6, 8, 10, 14\text{ mm}$ 。

试验设备为 WDW3020 微控电子万能试验机,试验严格按照 GB 8168<sup>[10]</sup>进行,采用 A 法。

### 3.2 蜂窝芯抗压强度的厚度因子

采用第 1 组试样,通过试验得到不同厚度蜂窝芯的压力-变形图,见图 1。通过计算得到临界应力,再以环压强度中厚度为  $12.7\text{ mm}$  蜂窝芯的临界应力为基准得到厚度因子。采用最小二乘法对厚度因子拟合,得到拟合方程,见图 2。其中, $R^2$  是衡量变量与自

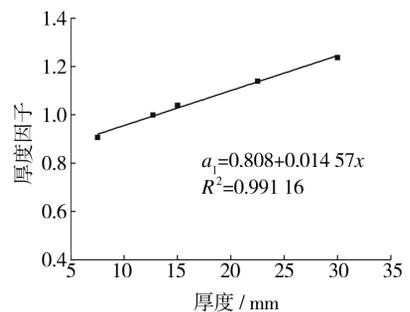


图 2 蜂窝纸板的厚度因子

Fig. 2 Thickness factor of honeycomb paperboard

变量间的回归或拟合关系优劣的主要特征指标,越接近 1,表示拟合效果越好。

1) 由图 1 得知,试验得出的 4 种规格厚度的蜂窝芯压力-变形曲线在线弹性区、坍塌平台区、密实化区总体趋势基本相同,但是其承载能力跟试样的厚度有一定关系:在  $7.5 \sim 30\text{ mm}$  范围内,厚度越大,压缩临

界应力越大,但厚度对其影响不大。

2) 由图 2 可以看出,蜂窝纸板的厚度因子变化规律在区间内是呈现出逐步上升到趋势,不同厚度的蜂窝纸板的压缩临界应力是随着厚度的增大而增大,而且变化规律呈现出线性的情况,究其原因,是蜂窝纸板的弹塑性决定了这样的变化规律。因为蜂窝芯纸的环压强度是用宽度为 12.7 mm 的原纸测得的,在此,用厚度为 12.7 mm 时抗压强度作为厚度因子的基准,可得不同厚度时的厚度因子见表 1,通过拟合得到厚度因子方程。

表 1 不同厚度下的临界应力与厚度因子

Tab.1 Critical stress and thickness factor in different thickness

厚度/mm	临界应力/ kPa	厚度因子
7.5	81.838	0.907 6
12.7	90.168	1
15.0	93.819	1.040 5
22.5	102.751	1.139 6
30.0	111.633	1.238 1

3) 临界应力公式:

$$\sigma = a_1 \sigma_{cr0} \quad (4)$$

式中: $a_1$  为厚度因子, $a_1 = 0.808 + 0.014 57x$ , $x$  为蜂窝纸芯的厚度(mm); $\sigma_{cr0}$  为基准临界应力。

### 3.3 蜂窝纸板抗压强度的面纸因子

采用第 2 组试样,试验得到不同面纸数量蜂窝芯的压力-变形图,见图 3。通过计算得到临界应力,再

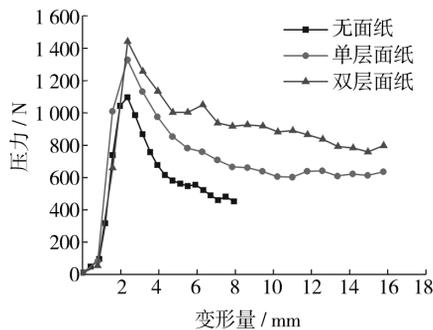


图 3 不同数量面纸蜂窝板的压力-变形图

Fig. 3 Force and distortion of honeycomb paperboard of different panel number

以无面纸的蜂窝芯临界应力为基准得到面纸因子,见图 4 和表 2。

1) 蜂窝纸板的面纸有固定蜂窝芯作用,当蜂窝纸板加上面纸的时候,蜂窝纸板的强度明显增大,当

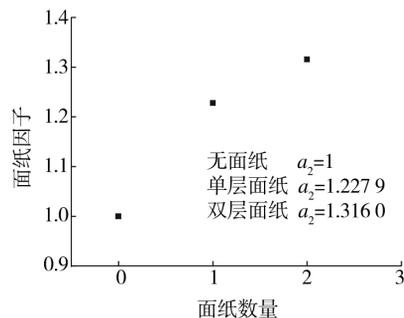


图 4 蜂窝纸板的面纸因子

Fig. 4 Panel factor of honeycomb paperboard

表 2 不同面纸数量下的临界应力与面纸因子

Tab.2 Critical stress and panel factor under different panel number

面纸数量	临界应力/kPa	面纸因子
0	111.633	1
1	137.078	1.2279
2	146.908	1.3160

增加第 2 层面纸的时候,蜂窝纸板的强度增加量变小。

2) 临界应力公式为:

$$\sigma = a_2 \sigma_{cr0} \quad (5)$$

式中: $a_2$  为面纸因子,无面纸时为 1,单层面纸为 1.227 9,双层面纸为 1.316 0。

### 3.4 蜂窝纸板抗压强度的边长因子分析

采用第 3 组试样,试验得到不同边长蜂窝芯的压力-变形量图,见图 5。通过计算得到临界应力,再以无

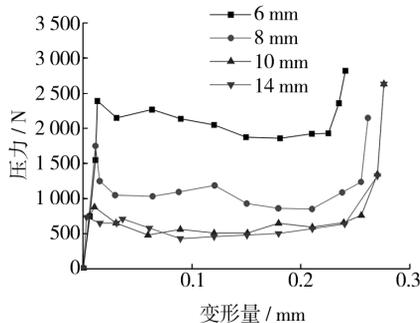


图 5 不同边长蜂窝芯的压力-变形图

Fig. 5 Force and distortion of different side length honeycomb core

面纸的蜂窝芯临界应力为基准得到边长因子,见图 6 和表 3。

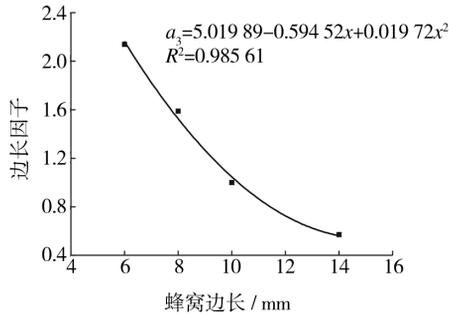


图6 蜂窝纸板的边长因子

Fig. 6 Side length factor of honeycomb paperboard

表3 蜂窝边长与临界应力的关系

Tab. 3 The relationship between side length and critical stress

蜂窝边长/mm	临界应力/kPa	边长因子
6	238.822	2.139 3
8	177.351	1.588 7
10	111.633	1
14	63.652	0.570 2

1) 由图5可知,试验得出的4种规格蜂窝边长大小的试样其压力-变形曲线在线弹性区、坍塌平台区、密实化区总体变化较大,跟试样的蜂窝边长大小有密切联系:6~10 mm 区间内呈现下降趋势,10~14 mm 区间内曲线趋势较为平稳。

2) 由图6可知,边长因子在试样边长大小的6~14 mm 区间分别呈下降状态,边长大小与 $\sigma$ 成反比关系。

3) 可以得到临界应力公式:

$$\sigma = a_3 \sigma_{cr0} \quad (6)$$

式中: $a_3$ 为边长因子, $a_3 = 5.019 89 - 0.594 52x + 0.019 72x^2$ , $x$ 为蜂窝边长尺寸(mm)。

### 3.5 蜂窝纸板临界应力模型总结

综合蜂窝纸板的厚度因子、面纸因子和边长因子,可以得出:

$$\sigma = a_1 a_2 a_3 \sigma_{cr0} \quad (7)$$

式中: $a_1$ , $a_2$ , $a_3$ 分别为厚度因子、面纸因子和边长因子; $\sigma_{cr0}$ 为基准临界应力,是厚度为12.7 mm、无面纸、边长为10 mm的蜂窝芯纸静态压缩试验得到的临界应力值。

## 4 结论

通过试验,将蜂窝纸板的压缩特性和试验结果分

析总结如下:蜂窝边长一定时,在0~30 mm 范围内,厚度增大,其承载能力增强,但强度增加有限;厚度一定时,蜂窝边长越大,其承载能力越差,承载能力随着边长的增大而减小;蜂窝纸板的面纸有固定蜂窝芯作用,当蜂窝芯纸加上面纸后,蜂窝纸板的强度明显增大,当增加第2层面纸的时候,蜂窝纸板的强度增加量变小。

蜂窝纸板的临界应力模型为 $\sigma = a_1 a_2 a_3 \sigma_{cr0}$ ,模型的3个影响因子中边长因子和面纸对压缩强度影响较大,厚度因子的影响较小,即蜂窝纸板的厚度对压缩强度影响不大,而蜂窝边长尺寸和面纸对压缩强度影响较大,这与其他学者的试验结果一致<sup>[11]</sup>。利用该公式可以估算临界应力,从而进一步对产品进行包装设计计算。需要注意的是,文中的蜂窝纸板临界应力模型中的基准临界应力采取的是厚度为12.7 mm(取环压强度测试试样的标准尺寸)、无面纸、蜂窝边长为10 mm的试样测得的。由于试验所限,该临界应力模型只考虑了厚度、面纸和边长大小,而影响临界应力的因素很多,如涂胶量、环境湿度、孔径比等,后期有待于进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 郭彦峰,张景绘. 蜂窝纸板及其缓冲衬垫缓冲特性研究[J]. 包装工程,2002,23(5):110-112.  
GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui. Research on the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard and Its Cushion[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 110-112.
- [2] 王冬梅. 蜂窝纸板压缩破坏机理研究[J]. 包装工程, 2005,26(5):115-117.  
WANG Dong-mei. Compression Breakage Properties Research on the Honeycomb Fibreboard[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5): 115-117.
- [3] 虞道良,卢立新. 准静态压缩下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. Loading Strength of Honeycomb Paperboard under Quasi-Static Compression [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 35-37.
- [4] 孙亚平,卢立新. 纸蜂窝结构平压性能的实验研究[J]. 包装工程,2003,24(1):14-15.  
SUN Ya-ping, LU Li-xin. A Study to the Strength to the Paper Honeycomb Core under Axial Compression [J]. Packaging Engineering, 2003, 24(1): 14-15.

(下转第70页)

- [12] TOHRU Morioka, KIYOTAKA Tsunemi, YUGO Yamamoto, et al. Eco-efficiency of Advanced Loop-closing Systems for Vehicles and Household Appliances In Hyogo Eco-town: A case Study of Solid Waste Management[J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4): 205-221.
- [13] 孙源远, 武春友. 工业生态效率及评价研究综述[J]. 科学与科学技术管理, 2008(11): 192-194.  
SUN Yuan-yuan, WU Chun-you. Industrial Ecological Efficiency and Evaluation Research and Reviewed Summarize[J]. Scientology and Science Technology Management, 2008(11): 192-194.
- [14] 任宪姝, 霍李江. 生命周期评价在印刷与包装领域中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 217-219.  
REN Xian-shu, HUO Li-jiang. Progress of Application Research of Life Cycle Assessment in Printing and Packaging Field [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 217-219.
- [15] 姜峰, 李青海, 李剑锋, 等. 基于 LCA 法的包装材料环境友好性的评价[J]. 山东大学学报, 2006, 36(6): 10-13.  
JIANG Feng, LI Qing-hai, LI Jian-feng, et al. The Assessment of the Packaging Materials' Environmental Friendly Character Based on the LCA Methodology[J]. Journal of Shandong University, 2006, 36(6): 10-13.
- [16] HUO Li-jiang, SAITO K. Sustainability Assessment for Optimizing Logistics-oriented Protective Packaging Design[J]. 日本包装学会誌, 2010, 19(3): 203-214.
- [17] 任宪姝, 霍李江. 瓦楞纸箱生产工艺生命周期评价案例研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 54-57.  
REN Xian-shu, HUO Li-jiang. Case Study of Life Cycle Assessment for Corrugated Board Box Production Technology[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 54-57.
- [18] 王飞儿, 史铁锤. 基于物质代谢的中国纺织业生态效率评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 116-120.  
WANG Fei-er, SHI Tie-chui. Assessment for Eco-efficiency of China's Textile Industry Based on Material Metabolism[J]. China's Population·Resources and Environment, 2008, 18(6): 116-120.
- [19] HUO Li-jiang, SAITO K. Multidimensional Life Cycle Assessment on Various Molded Pulp Production Systems[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(5): 261-273.
- [20] HUO Li-jiang, SAITO K. An Evaluation Method for Quantifying Sustainability of Protective Cushioning[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2010, 4(1): 1-14.
- [21] 2011 年上半年中国瓦楞纸箱产量统计分析[EB/OL]. [2011-07-20]. <http://www.askci.com/news/2011-07/20/40209732.shtml>.  
China Corrugated Board Box Output Statistical Analysis In the First Half of 2011 [EB/OL]. [2011-07-20]. <http://www.askci.com/news/2011-07/20/40209732.shtml>.
- [22] 戴宏民, 戴佩燕. 中国绿色包装的成就、问题及对策(下)[J]. 包装学报, 2011, 3(2): 7-13.
- [23] 杨瑞丰. 瓦楞纸箱生产实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
YANG Rui-feng. Production Practical Technology of Corrugated Board Box [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [24] JEMAI-LCA Profunctions and Features[EB/OL]. [2008-12]. [http://www.jemai.or.jp/CACHE/lca\\_details\\_lcaobj6.cfm](http://www.jemai.or.jp/CACHE/lca_details_lcaobj6.cfm).

(上接第 57 页)

- [5] 张改梅, 胡玉玲. 不同规格蜂窝纸板缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 77-79.  
ZHANG Gai-mei, HU Yu-ling. Study on the Performance of Honeycomb Paperboard with the Different Size [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 77-79.
- [6] 王冬梅. 纸蜂窝压缩临界应力经验评估[J]. 包装工程, 2007, 28(8): 14-15.  
WANG Dong-mei. Critical Compression Stress Evaluation for Paper Honeycomb [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 14-15.
- [7] 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 Guang-lin, ZHU Da-peng. The Cushion Mechanism of The Fibreboard [J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 118-120.
- [8] GB/T 2679, 纸和纸板环压强度的测定[S].
- [9] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2008.
- [10] GB 8168, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
- [11] 辛成龙, 郭彦峰. 蜂窝纸板静态缓冲特性的实验研究与分析[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 56-58.  
XIN Cheng-long, GUO Yan-feng. Experimental Research and Analysis on Static Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 56-58.