

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2012.01.001

# 湿度对瓦楞纸箱抗压强度的影响

王志伟<sup>1,2</sup>, 方艳平<sup>1,2</sup>

(1. 暨南大学 包装工程研究所, 广东 珠海 519070;

2. 暨南大学 产品包装与物流广东普通高校重点实验室, 广东 珠海 519070)

**摘要:** 将瓦楞纸板等效为正交各向异性板结构, 采用实验法和有限元法对瓦楞纸箱在4种环境湿度下的抗压强度进行了研究, 获得了其在各环境湿度下的载荷-变形曲线和抗压强度值。瓦楞纸箱抗压强度随相对湿度的增高呈指数规律下降, 这表明环境湿度对纸箱抗压强度的影响极为显著。有限元分析结果与实验结果一致, 表明采用正交各向异性板结构有限元模型可有效分析瓦楞纸箱的变形和抗压强度。

**关键词:** 瓦楞纸箱; 抗压强度; 湿度; 有限元法

中图分类号: TB302.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2012)01-0001-04

## Effect of Humidity on Compression Strength of Corrugated Box

Wang Zhiwei<sup>1,2</sup>, Fang Yanping<sup>1,2</sup>

(1. Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai Guangdong 519070, China; 2. Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Zhuhai Guangdong 519070, China)

**Abstract:** The compression strength of corrugated box under different humidity is investigated by experiments and finite element method with an orthotropic plate theory, and the load-deformation curve and compression strength of corrugated box are obtained. The compression strength of corrugated box is exponentially decreased with the increasing of the relative humidity. The results from finite element method are consistent with the experiments, and the finite element method with orthotropic plate theory can be effectively used to analyze the deformation and compression strength of corrugated box.

**Key words:** corrugated box; compression strength; humidity; finite element method

## 0 引言

瓦楞纸板和瓦楞纸箱是应用最广的运输包装产品, 它们具有良好的强度、刚度和缓冲性能, 可对产品提供有效的包装保护。

国内外相关学者对瓦楞纸板和瓦楞纸箱的研究较多。在瓦楞纸板研究方面, 如王鹤腾等对 AB

型瓦楞纸板的静态压缩性能进行了非线性有限元仿真分析<sup>[1]</sup>; A. C. Gilchrist 等在综合考虑了几何大变形和材料非线性因素的基础上, 建立了瓦楞纸板的有限元模型, 并且预测了由水分引起的瓦楞纸板的翘曲、失稳和蠕变特性<sup>[2]</sup>; M. H. Lee 等对瓦楞纸板的抗弯刚度进行了试验研究和理论分析, 得到了一种比较有效的测定瓦楞纸板抗弯刚度的

收稿日期: 2011-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775100)

作者简介: 王志伟(1963-), 男, 江苏无锡人, 暨南大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事运输包装, 食品与药品包装方面的研究, E-mail: wangzw@jnu.edu.cn

方法<sup>[3]</sup>; H. A. Rami等建立了瓦楞纸板非线性模型,提出了一种精确的瓦楞纸板非线性有限元建模方法<sup>[4]</sup>;有关学者基于实验研究方法,较为系统地研究了环境湿度对瓦楞纸板和蜂窝纸板的静态和动态力学性能、缓冲特性和能量吸收的影响<sup>[5-15]</sup>。在瓦楞纸箱研究方面, T. J. Urbanik总结了基于瓦楞纸板线性材料和非线性材料的瓦楞纸箱抗压强度公式,并进行了比较<sup>[6]</sup>; J. Han等利用有限元分析了开孔位置、面积、形状对瓦楞纸箱抗压强度的影响<sup>[7]</sup>;滑广军等应用有限元技术对瓦楞纸箱进行了屈曲分析,证明了通过屈曲分析计算瓦楞纸箱的抗压强度是一种可行的方法<sup>[8]</sup>。

已有研究表明,影响瓦楞纸箱抗压强度的因素比较多,其中,环境湿度对纸质结构材料的力学性能具有重要影响。为此,本研究拟采用实验和有限元方法,研究环境湿度对瓦楞纸板弹性模量和瓦楞纸箱抗压强度的影响,以期对瓦楞纸箱包装结构设计提供参考依据。

## 1 瓦楞纸板物理性能实验

实验用瓦楞纸板由广州富荣纸箱厂定制,是由定量为 105 g/m<sup>2</sup>的芯纸和 160 g/m<sup>2</sup>的面纸制成的 B 型瓦楞纸板。并且参照 GB/T 4857.2—2005《包装运输包装件基本试验 第二部分 温湿度调节处理》要求,实验前将瓦楞纸板试样放置在温度为 23 ℃、相对湿度分别为 50%、70%、80%、90%的恒温恒湿箱内进行调温调湿处理,并且处理时间大于 24 h。

瓦楞纸板的厚度按照 GB/T 6547—1998《瓦楞纸板厚度的测定法》要求进行取样和测定,取样数为 10 个,每个样品取 5 个数据点,测得实验用瓦楞纸板的平均厚度为 3.013 mm,并且纸板厚度受环境湿度的影响不大。

瓦楞纸板的定量按照 GB/T 451.2—2002《纸和纸板定量的测定》要求进行取样和测定,取样数为 10 个。实验中测定了不同湿度下瓦楞纸板的定量,得到如表 1 所示的不同湿度下瓦楞纸板的密度。

表 1 不同湿度下瓦楞纸板的密度  
Table 1 The density of corrugated board in different humidity

相对湿度 / %	50	70	80	90
密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	149.078	154.171	155.228	156.979

表 1 中的结果表明:瓦楞纸板的定量受环境湿度影响较大。

本研究中,瓦楞纸板的结构与坐标选取见图 1。

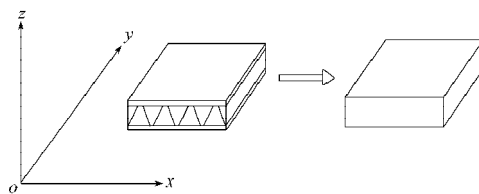


图 1 瓦楞纸板结构与坐标示意图

Fig. 1 The diagram of the coordinate of corrugated board

瓦楞纸板的  $x$  方向和  $y$  方向弹性模量参考 GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》和 JB/T 6544—1993《塑料拉伸和弯曲弹性模量试验方法》进行测试。测试过程中,将瓦楞纸板试样等效为正交各向异性的实心梁,并采取外伸梁三点弯曲法进行测定,每组测试样板的取样数为 10 个。瓦楞纸板的剪切模量和  $z$  方向的弹性模量,可根据经验公式,由  $x$  方向和  $y$  方向的弹性模量经计算获得,瓦楞纸板的泊松比  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{xz}$ ,  $\nu_{yz}$  分别取 0.34, 0.01, 0.01。

本实验中所测得的不同湿度下瓦楞纸板的材料参数如表 2 所示。

表 2 瓦楞纸板的材料参数

Table 2 The material constants of corrugated board

相对湿度 / %	材料参数 / MPa					
	$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{xz}$	$G_{yz}$
50	456.753	738.103	3.691	224.704	8.305	13.420
70	416.840	637.719	3.189	199.531	7.579	11.595
80	354.557	537.270	2.676	168.593	6.446	9.732
90	287.445	358.884	1.794	124.298	5.226	6.525

## 2 瓦楞纸箱抗压实验和有限元分析

### 2.1 瓦楞纸箱抗压实验

实验用瓦楞纸箱是由广州富荣纸箱厂定制的 0201 型压痕模切箱。瓦楞纸箱所用纸板及对试样的预处理方法与 1 中同。

纸箱的抗压强度按照 GB/T 4857.4—1992《包装运输包装件压力试验方法》测定,所用实验设备为 RS-8401 型纸箱抗压试验机。实验时先将纸箱试样置于试验机下压板中心部位,使上压板刚好和纸箱试样上表面某处接触。然后以 12 mm/min 的速度移动上压板压缩试样,直到试样压溃。同时记录试样载荷-变形曲线,其载荷峰值即为纸箱的抗压强度。

实验纸箱试样有多种尺寸规格,每种尺寸规格试样的取样数均为 5 个。

### 2.2 瓦楞纸箱有限元分析

采用 ANSYS/LS-DYNA 建立瓦楞纸箱压缩有限元模型,压板采用刚性体模拟。将瓦楞纸板等效为正交各向异性板,选用 SHELL163 单元类型来模拟这

种结构。ANSYS/LS-DYNA中提供了自定义材料模型的功能,环境湿度对材料性能的影响,可通过输入实验测得的各湿度环境下的材料属性得以体现。由于实验模型十分规整,故瓦楞纸箱采用四边形单元进行网格划分。

在LS-DYNA专用后处理器LS-PREPOST上输出求解结果,可以获得瓦楞纸箱各时刻的变形和应力云图。本文主要研究瓦楞纸箱的抗压强度,为此,在LS-PROPOST后处理器中输出接触反力,处理后即可得到瓦楞纸箱受压过程的载荷-变形曲线。

### 3 结果比较

通过实验和有限元分析可得到瓦楞纸箱在各环境湿度下的载荷-变形曲线和抗压强度。

图2所示为标准温湿度条件下(23℃, 50% RH),尺寸为30 cm × 30 cm × 32.5 cm的瓦楞纸箱载荷-变形曲线的实验结果与有限元分析结果比较,图中实验曲线为5个试样的平均值。

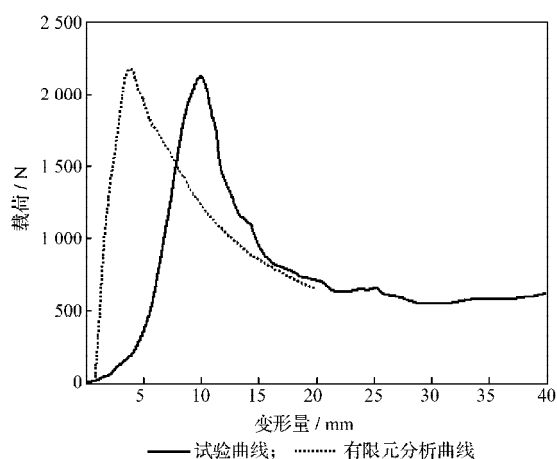


图2 瓦楞纸箱载荷-变形曲线的实验结果与有限元分析结果比较

Fig. 2 The comparison of the load-deformation curve of corrugated box between experiments and finite element analysis

从图2中可以看出,通过有限元分析得到的曲线峰值(抗压强度值)与实验值很接近,但是峰值出现时的变形量不一致。这是由于实际实验的纸箱试样上表面不可能完全平整,实验时,当试验机上压板与纸箱试样上表面某处一接触就开始记录载荷和变形了。若将纸箱试样预压3~5 mm,上压板与纸箱试样上表面即可以完全接触并压紧,此时才开始记录载荷和变形,则实验曲线与有限元结果就会很好地吻合。图2所示实验曲线起始段确实出现了这个预压过程。

表3给出了标准温湿度条件下(23℃, 50% RH),

各种尺寸瓦楞纸箱的抗压强度实验值与有限元分析结果,表中实验值为5个试样的平均值。

表3 瓦楞纸箱抗压强度结果比较

Table 3 The comparison of the compression strength of corrugated box

瓦楞纸箱尺寸	抗压强度/N		有限元值与 试验值误差/%
	实验值	有限元值	
30 cm × 30 cm × 30 cm	1 528	1 696	11.0
30 cm × 30 cm × 40 cm	1 965	2 069	5.3
30 cm × 30 cm × 50 cm	1 421	1 464	3.0
36 cm × 24 cm × 30 cm	1 635	1 849	13.1
36 cm × 24 cm × 40 cm	1 985	2 172	9.4
36 cm × 24 cm × 50 cm	1 528	1 728	13.1
40 cm × 20 cm × 30 cm	1 565	1 613	3.1
40 cm × 20 cm × 40 cm	1 389	1 685	21.3
37.5 cm × 37.5 cm × 30 cm	2 056	2 110	2.6
45 cm × 45 cm × 30 cm	1 593	1 767	10.9

从表3中可以看出,除个别值以外,各类瓦楞纸箱的抗压强度有限元分析结果与实验值较为吻合,但均有所高估。

图3给出了相对湿度对瓦楞纸箱抗压强度的影响,图中实验曲线为5个试样的平均值。

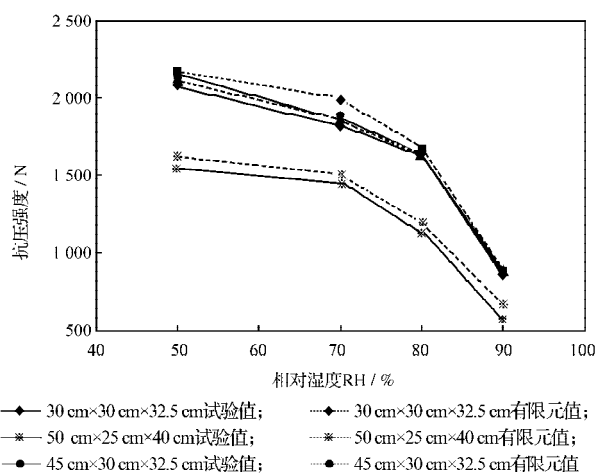


图3 相对湿度对瓦楞纸箱抗压强度的影响

Fig. 3 The effect of relative humidity on the compression strength of corrugated box

从图3中可以看出,有限元分析所得相对湿度对瓦楞纸箱抗压强度的影响结果与实验值较为吻合,但也有所高估。但是,实验结果和有限元分析结果均显示瓦楞纸箱抗压强度随环境湿度的增高按指数规律下降,这表明环境湿度对瓦楞纸箱的影响极为显著。所以,在设计瓦楞纸箱时,需充分考虑其流通环境的湿度因素。

### 4 结语

采用实验方法和有限元分析方法,对瓦楞纸箱

在4种环境湿度条件下的抗压强度进行了研究。将瓦楞纸板等效为正交各向异性板结构,测得了不同湿度下的瓦楞纸板的材料参数。采用正交各向异性板壳单元对瓦楞纸箱进行有限元分析,获得了其在各环境湿度下的载荷-变形曲线和抗压强度值。对所得结果进行比较,发现有限元结果与实验结果一致,这表明采用正交各向异性板结构有限元模型可有效分析瓦楞纸箱的变形和抗压强度。同时,实验和有限元分析结果均表明瓦楞纸箱抗压强度随环境湿度的增高呈指数规律下降,环境湿度对瓦楞纸箱的影响十分显著,故在设计瓦楞纸箱时需充分考虑流通环境的湿度因素。

#### 参考文献:

- [1] 王鹤腾,高德,常江. 基于非线性有限元的瓦楞纸板静态压缩性能仿真研究[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 1-3.  
Wang Heteng, Gao De, Chang Jiang. Research on Simulation of Static Compression Performance of Corrugated Board with Nonlinear Finite Element[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 1-3.
- [2] Gilchrist A C, Suhling J C, Urbanik T J. Nonlinear Finite Element Modeling of Corrugated Board[J]. Mechanics of Cellulosic Materials, 1999, 85: 101-106.
- [3] Lee M H, Park J M. Flexural Stiffness of Selected Corrugated Structures[J]. Packaging Technology and Science, 2004 (17): 275-286.
- [4] Rami H A, Joonho C, Wei B S, et al. Refined Nonlinear Finite Element Models for Corrugated Fiberboards[J]. Composite Structures, 2009, 87: 321-333.
- [5] Wang Zhiwei, E Yuping. Energy Absorption Properties of Multi-Layered Corrugated Paperboard in Various Ambient Humidities[J]. Materials & Design, 2011, 32 (6): 3476-3485.
- [6] Wang Dongmei, Wang Zhiwei, Liao Qianghua. Energy Absorption Diagrams of Paper Honeycomb Sandwich Structures[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(2): 63-67.
- [7] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(6): 309-316.
- [8] 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(5): 285-289.  
Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Evaluation of Compressive Densification Strain of Paper Honeycombs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 285-289.
- [9] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Out-of-Plane Compressive Properties of Hexagonal Paper Honeycombs[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115-119.
- [10] E Yuping, Wang Zhiwei. Effect of Relative Humidity on Energy Absorption Properties of Honeycomb Paperboards [J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(8): 471-483.
- [11] Wang Zhiwei, E Yuping. Mathematical Modelling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials & Design, 2010, 31 (9): 4321-4328.
- [12] E Yuping, Wang Zhiwei. Plateau Stress of Paper Honeycomb as Response to Various Relative Humidities [J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(4): 203-216.
- [13] E Yuping, Wang Zhiwei. Stress Plateau of Multilayered Corrugated Paperboard in Various Ambient Humidities[J]. Packaging Technology and Science, 2011, DOI: 10.1002/pts.971, in press.
- [14] Wang Zhiwei, E Yuping. Energy-Absorbing Properties of Paper Honeycombs under Low and Intermediate Strain Rates [J]. Packaging Technology and Science, 2011, DOI: 10.1002/pts.973, in press.
- [15] 张宇,王志伟. 蜂窝纸板动态缓冲特性的实验研究[J]. 包装学报, 2012, 4(1): 9-12.  
Zhang Yu, Wang Zhiwei. Experimental Research on Dynamic Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Journal, 2012, 4(1): 9-12.
- [16] Urbanik T J. Linear and Nonlinear Material Effects on Postbuckling Strength of Corrugated Container[J]. Mechanics of Cellulosic Materials, 1997, 77: 93-99.
- [17] Han J, Park J M. Finite Element Analysis of Vent/Hand Hole Designs for Corrugated Fibreboard Boxes[J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20(1): 39-47.
- [18] 滑广军,向红,冯伟. 瓦楞纸箱的有限元建模及屈曲分析[J]. 包装工程, 2009, 30(3): 34-35.  
Hua Guangjun, Xiang Hong, Feng Wei. Finite Element Modeling and Buckling Analysis of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 34-35.

(责任编辑:廖友媛)