

新型绿色瓦楞蜂窝复合纸板力学性能数值模拟分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.02.009

廖泽顺 马文书

国光电器股份有限公司
广东 广州 510800

摘要: 对瓦楞蜂窝复合纸板与蜂窝纸板的边压强度及抗弯强度进行比较。利用有限元仿真技术严格控制两种纸板的材质、材料用量及尺寸均相同,将结构对两种纸板边压强度及抗弯强度的影响从众多影响因素中解耦,建立两种纸板的大尺寸数值模型试样,并采用屈曲分析方法对两种纸板的边压强度进行仿真分析,同时对比分析两种纸板的抗弯强度。分析结果表明:在材质、密度、耗材及尺寸相同的前提下,瓦楞蜂窝复合纸板的边压强度比蜂窝纸板的高出约30%;瓦楞蜂窝复合纸板的纵向及横向抗弯强度比蜂窝纸板的分别高出75%,92%,蜂窝纸板纵、横两个方向的抗弯强度基本相同。

关键词: 瓦楞蜂窝复合纸板;蜂窝纸板;有限元屈曲分析;边压强度;弯曲强度

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2017)02-0056-07

1 研究背景

近年来,蜂窝复合纸板作为新型绿色环保材料广泛应用于运输包装领域,特别是作为一种代木材料普遍应用于制作物流运输器具。目前,相关专家学者对蜂窝纸板的平压性能及缓冲性能研究较多^[1-5],但大多数研究仅比较纸板在不同的尺寸、材质、环境下的力学性能,而研究结构本身对纸板力学性能影响的文献较少。温时宝等^[6]使用实验测试的方法,研究了高强度瓦楞蜂窝复合纸板的力学性能,得出了复合纸板比蜂窝纸板力学性能要好的结论。都学飞等^[7]进行了瓦楞-蜂窝复合纸板强度特性的实验研究,得出了复合纸板的平压性能主要取决于瓦楞与蜂窝夹芯的力学性能。但上述研究仅局限于对不同纸板结构的实验测试比较,而实验结果会受到试样材质、试样尺寸、环境条件及实验设备等因素的影响。

本研究旨在对一种新型绿色瓦楞蜂窝复合纸板

与蜂窝纸板的边压强度及弯曲强度进行对比研究。瓦楞蜂窝复合纸板的结构如图1所示。

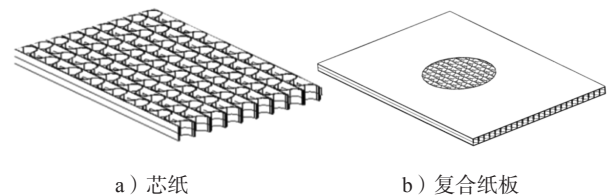


图1 瓦楞蜂窝复合纸板结构图

Fig. 1 Structure of corrugated honeycomb composite board

瓦楞蜂窝复合纸板结合了瓦楞纸板与蜂窝纸板的特性,将单面瓦楞纸板(2层),经涂胶、分切和90°翻转后粘贴在一起,形成立式瓦楞蜂窝芯(紧密排列的瓦楞纸芯),再将其上下表面粘贴面纸,最终形成瓦楞蜂窝复合纸板。通过比较瓦楞蜂窝复合纸板与蜂窝纸板的结构可知,这两种纸板的芯纸结构不同,以通过实验直接测试的方法来比较两种纸板的边

收稿日期: 2016-11-21

作者简介: 廖泽顺(1990-),男,湖南永州人,国光电器股份有限公司工程师,硕士,主要研究方向为运输包装CAD/CAE及包装结构设计, E-mail: 778496958@qq.com

压强度是不合理的。因此,本研究利用有限元分析软件 ANSYS,建立两种纸板的大尺寸数值模型试样,并基于屈曲分析方法,对两种纸板进行边压强度分析;同时,利用静力分析方法,对两种纸板进行弯曲强度测试。大尺寸试样更接近纸板的实际使用情况,而利用有限元技术,可严格控制两种纸板的材质、用量及尺寸,将结构对两种纸板边压强度的影响从众多影响因素中解耦。本研究可对瓦楞蜂窝复合纸板在绿色物流包装器具制作上的开发应用提供理论基础。

2 试样分析及求解

2.1 材料选择

选择瓦楞蜂窝复合纸板的瓦楞芯纸类型 A 楞作为分析试样。为了消除材质对实验结果的影响,将瓦楞蜂窝复合纸板与蜂窝纸板的面纸和芯纸使用相同的材料,材料的物理性能参数如表 1^[8-9]所示,其中, x, y, z 为各坐标轴方向。

表 1 纸张的物理性能参数
Table 1 Physical properties of paper

弹性模量 E/MPa			剪切模量 G/MPa			泊松比 $\nu \times 10^{-6}$		
E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
7 600	4 020	38	2 140	20	70	0.34	0.01	0.01

利用有限元分析软件 ANSYS,建立相同尺寸大小的瓦楞蜂窝复合纸板与蜂窝纸板有限元模型,其尺寸为:长 × 宽 × 厚 = 100 mm × 200 mm × 15 mm。

2.2 耗材计算

要使相同尺寸规格的两种纸板所需用纸量相同,设定瓦楞蜂窝复合纸板的芯纸尺寸保持不变,可通过计算得到蜂窝纸板蜂窝芯纸的边长,从而保证两种纸板的耗纸量相同。

2.2.1 蜂窝纸板耗材

图 2 所示为单个蜂窝状结构。由图 2 可知:标号为 2、3、5、6 的面与周围其他芯纸共用一个面;标号为 1、4 的面与旁边芯纸粘贴而连接在一起。单个蜂窝芯纸用纸量 S_1 可通过公式 (1) 计算得到,面纸消耗 S_2 可通过公式 (2) 计算得到,1 个蜂窝单元总用纸量 S_f 可通过公式 (3) 计算得到。

$$S_1 = 4ahG, \quad (1)$$

$$S_2 = 3\sqrt{3}a^2G, \quad (2)$$

$$S_f = S_1 + S_2. \quad (3)$$

式中: a 为蜂窝芯纸的边长;

h 为蜂窝纸板的厚度;

G 为蜂窝面纸与芯纸的克重。

蜂窝纸板的单位体积质量可用公式 (4) 表示。

$$P_w = \frac{6\sqrt{3}a + 8h}{3\sqrt{3}ah}. \quad (4)$$

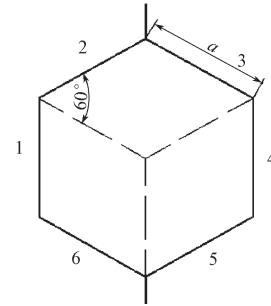


图 2 蜂窝纸板单元结构

Fig. 2 Cell structure of honeycomb paperboard

2.2.2 瓦楞蜂窝复合纸板耗材

图 3 所示为瓦楞蜂窝复合纸板单元结构。

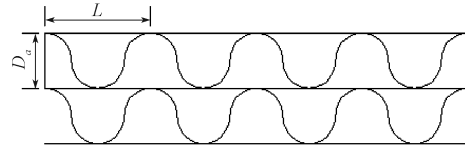


图 3 瓦楞蜂窝复合纸板单元结构

Fig. 3 Cell structure of corrugated honeycomb composite board

如图 3 所示,瓦楞蜂窝复合纸板的芯纸为瓦楞纸板叠加而成。每个单元芯纸用纸量可用公式 (5) 计算得到,每个单元面纸用纸量可用公式 (6) 计算得到,复合纸板 1 个结构单元总用纸量可用公式 (7) 计算得到。

$$S'_1 = 2LhG + D_a h \pi G, \quad (5)$$

$$S_2 = 2D_a L G, \quad (6)$$

$$S_w = S'_1 + S_2. \quad (7)$$

式中: L 为单元芯纸的长度;

D_a 为单元芯纸的宽度;

h 为瓦楞蜂窝复合纸板的厚度;

G 为瓦楞蜂窝复合纸板面纸与芯纸的克重。

瓦楞蜂窝复合纸板的单位体积质量可用公式 (8) 计算得到。

$$P_m = \frac{2h + \pi h + 4D_a}{2D_a h}. \quad (8)$$

若使两种纸板的用纸量相同,则 $P_w = P_m$, 即可得

到公式(9)。

$$D_a = 1.66a \quad (9)$$

取瓦楞蜂窝复合纸板的瓦楞芯纸类型为A楞, 则 $D_a = 5 \text{ mm}$, 代入公式(9), 则可得到蜂窝纸板芯纸边长 $a = 3 \text{ mm}$ 。

3 边压强度分析

图4所示为蜂窝纸板及瓦楞蜂窝复合纸板纵向、横向示意图。

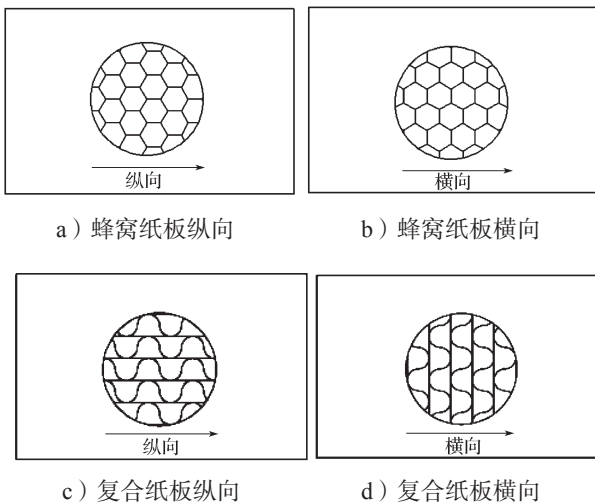


图4 蜂窝纸板及复合纸板纵向、横向示意图

Fig. 4 Longitudinal and transverse schematic diagram

如图4所示, 两种纸板按芯纸的排列方向分为纵向及横向结构。选择有限单元类型为 Shell63, 网格划分大小为 $0.8 \text{ mm} \times 30.8 \text{ mm}^{[10-12]}$ 。两种纸板的面纸、底纸及芯纸均采用相同的厚度, 其厚度为 0.269 mm 。

3.1 瓦楞蜂窝复合纸板边压强度分析

3.1.1 纵向边压强度分析

利用有限元分析软件 ANSYS, 建立瓦楞蜂窝复合纸板的有限元模型。基于屈曲分析方法, 对纸板进行边压强度分析。对试样模型的底部节点施加约束, 顶部节点在垂直纸板的方向施加 1 N 的载荷作为预加载荷, 瓦楞蜂窝复合纸板纵向的顶部共有 799 个节点, 因此总预加载荷为 799 N , 施加载荷约束的瓦楞蜂窝复合纸板纵向有限元模型如图 5a 所示。执行屈曲分析, 对屈曲分析结果提取前五阶模态, 如图 5 所示。

第一阶模态为屈曲模态, 代表纸板的边压强度; 第二~五阶模态为局部屈曲, 代表材料的局部失稳。

第一阶模态的特征值为 1.28 , 根据公式(10)^[13], 可计算得到屈曲载荷为 1023 N 。

$$P_N = kP_0 \quad (10)$$

式中: P_N 为屈曲载荷;
 k 为特征值;
 P_0 为总预加载荷。

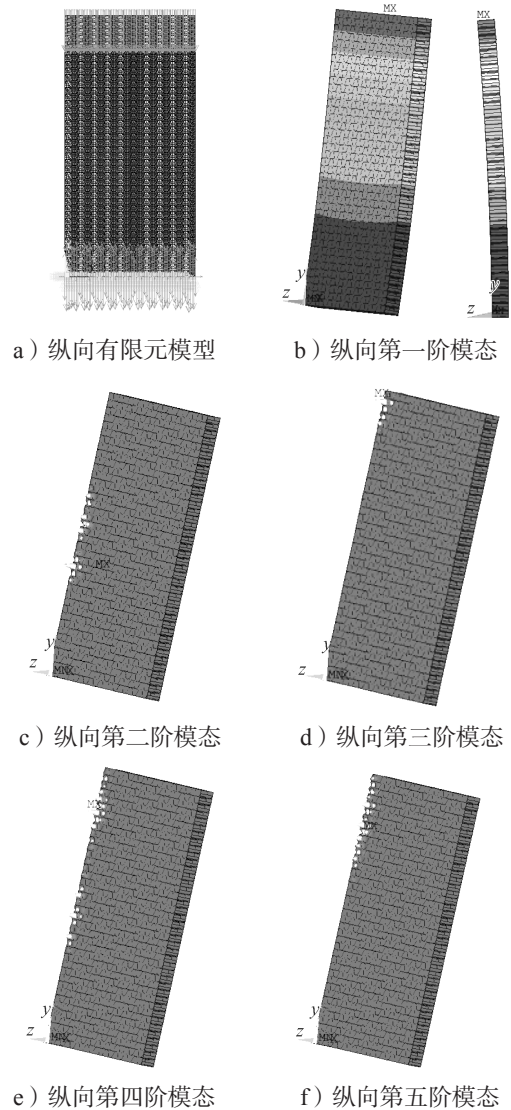


图5 复合纸板纵向有限元模型与屈曲模态

Fig. 5 Longitudinal finite element model and buckling mode of composite cardboard

3.1.2 横向边压强度分析

采用同样的方法, 对瓦楞蜂窝复合纸板横向数值模型施加载荷约束, 其有限元模型见图 6a, 对屈曲分析结果提取前五阶模态, 如图 6 所示。

复合纸板横向数值模型顶部节点总数为 532 个, 则施加的总预加载荷为 532 N 。第一阶模态为屈曲模

态, 特征值为 2, 则根据公式 (10) 可计算得到屈曲载荷为 1 064 N。

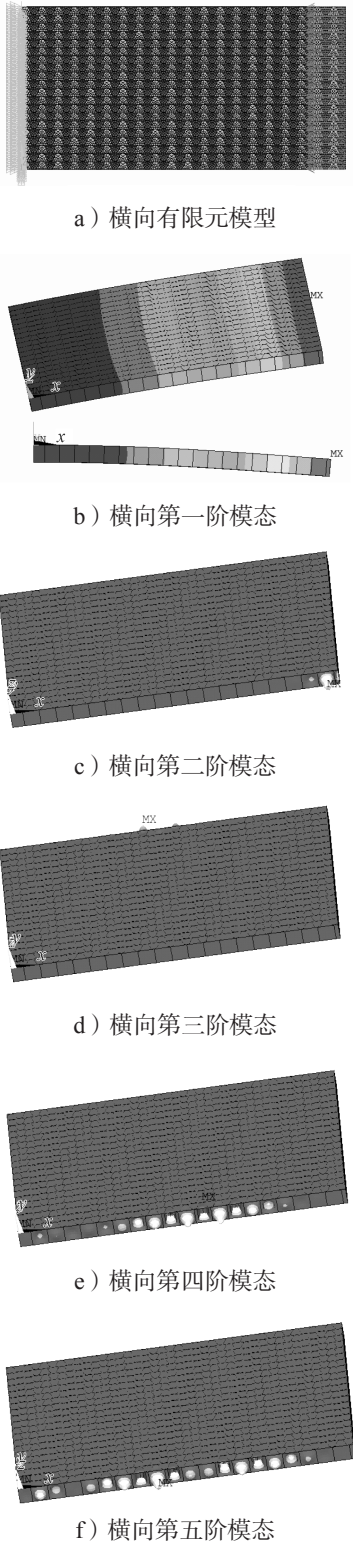


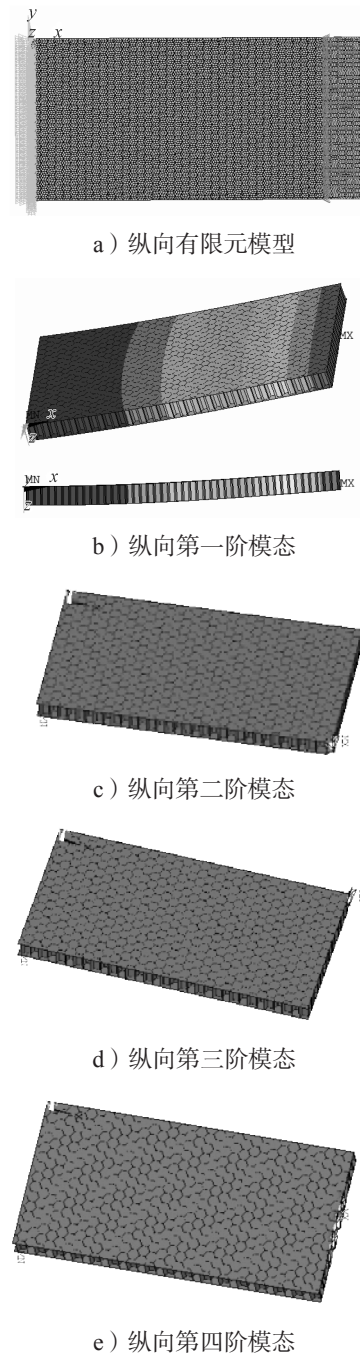
图 6 复合纸板横向有限元模型与屈曲模态

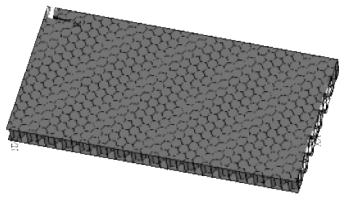
Fig. 6 Transverse Finite element model and buckling mode of composite cardboard

3.2 蜂窝纸板边压强度分析

3.2.1 纵向边压强度分析

蜂窝纸板纵向有限元模型如图 7a 所示。采用与瓦楞蜂窝复合纸板同样的方法, 对模型施加载荷约束。蜂窝纸板纵向模型顶部节点总数为 505 个, 则总预加载荷为 505 N。对模型进行屈曲分析, 提取前五阶模态 (如图 7 所示), 第一阶模态为屈曲模态, 特征值为 1.66, 则根据公式 (10) 可计算得到其屈曲载荷为 838 N。





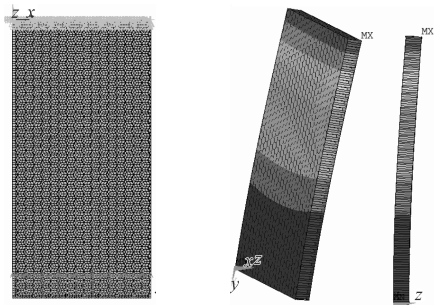
f) 纵向第五阶模态

图7 蜂窝纸板纵向有限元模型与屈曲模态

Fig. 7 Longitudinal finite element model and buckling mode of honeycomb paperboard

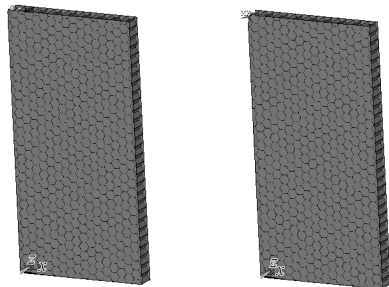
3.2.2 横向边压强度分析

蜂窝纸板的横向有限元模型与屈曲模态见图8。



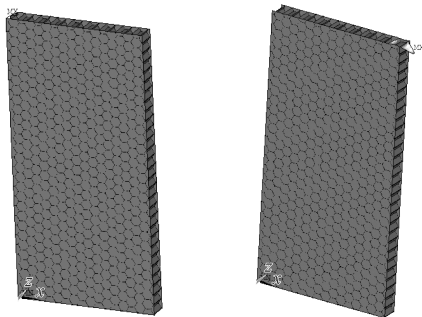
a) 横向有限元模型

b) 横向第一阶模态



c) 横向第二阶模态

d) 横向第三阶模态



e) 横向第四阶模态

f) 横向第五阶模态

图8 蜂窝纸板横向有限元模型与屈曲模态

Fig. 8 Transverse finite element model and buckling mode of honeycomb paperboard

蜂窝纸板横向有限元模型如图8a所示。采用与纵向有限元模型相同的方法对模型施加约束条件。

蜂窝纸板横向模型顶部节点总数为256个，则总预加载荷为256 N。对模型进行屈曲分析，提取前五阶模态（如图8所示），第一阶模态为屈曲模态，特征值为3.187，则根据公式（10）可以计算得到其屈曲载荷为816 N。

对瓦楞蜂窝复合纸板与蜂窝纸板的纵向、横向两个方向的边压强度分析可知：瓦楞蜂窝复合纸板在横向、纵向两个方向的边压强度非常接近，蜂窝纸板在横向、纵向两个方向的边压强度也基本相同，复合纸板的边压强度约为蜂窝纸板的1.3倍。

4 抗弯强度分析

采用三点弯曲法，对瓦楞蜂窝复合纸板与蜂窝纸板的两端进行固定约束，中间位置施加 $P=1\ 000\ N$ 的载荷，如图9所示^[14]。纸板弯曲强度计算公式可采用公式（11）计算^[15]。

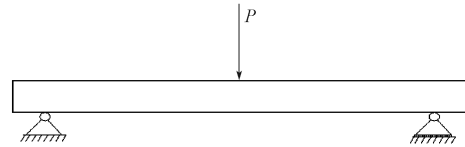


图9 纸板弯曲测试施加载荷约束示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the board bending test under load

$$S = \frac{PL^3}{48db}, \quad (11)$$

式中： S 为弯曲强度；

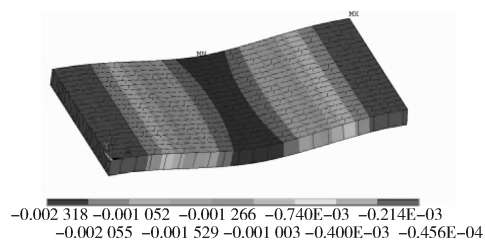
P 为弯曲力；

L 为试样长度；

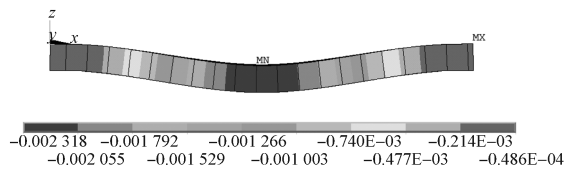
d 为挠度；

b 为试样宽度。

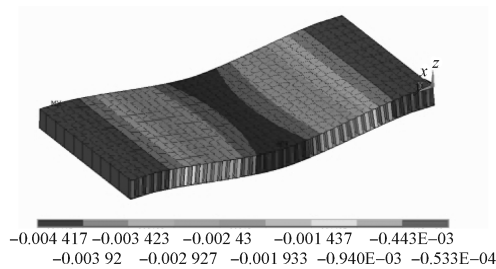
利用 ANSYS 软件进行静力求解分析，得到结果如图9~10所示。由图10~11所示结果可知，瓦楞蜂窝复合纸板纵向弯曲挠度为0.053 3 mm，横向弯曲挠度为0.048 6 mm；蜂窝纸板横向及纵向的挠度基本一致，为0.093 1 mm。



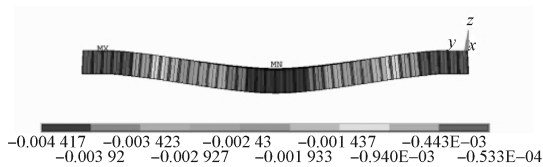
a) 纵向弯曲变形云图



b) 纵向弯曲截面变形云图



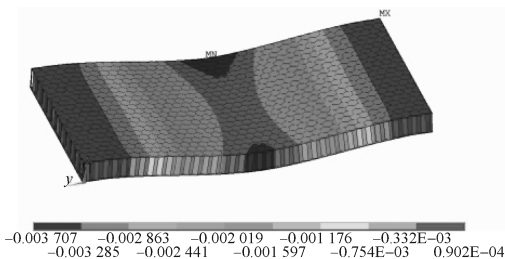
c) 横向弯曲变形云图



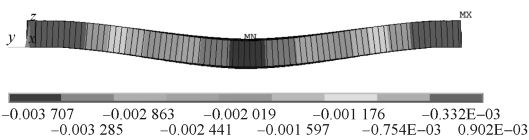
d) 纵向弯曲截面变形云图

图 10 瓦楞蜂窝复合纸板弯曲位移云图

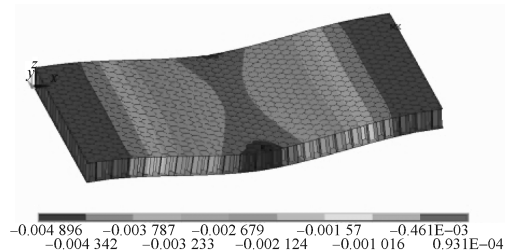
Fig. 10 The bending displacement cloud of corrugated honeycomb composite cardboard



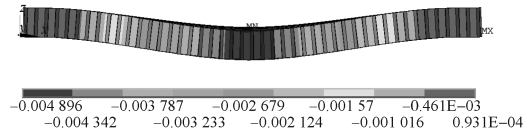
a) 纵向弯曲变形云图



b) 纵向弯曲截面变形云图



c) 横向弯曲变形云图



d) 横向弯曲截面变形云图

图 11 蜂窝纸板弯曲位移云图

Fig. 11 The bending displacement cloud of honeycomb paperboard

根据公式(11)可知,瓦楞蜂窝复合纸板的纵向抗弯强度是蜂窝纸板的1.75倍,横向抗弯强度是蜂窝纸板的1.92倍,蜂窝纸板纵、横两个方向的抗弯强度基本相同。

5 结论

本研究对瓦楞蜂窝复合纸板及蜂窝纸板的材质、材料用量、尺寸进行严格控制。基于屈曲分析方法,对两种纸板的纵向、横向两个方向进行边压强度有限元分析,同时分析对比了两种纸板的抗弯强度,得出以下结论:在材质、密度、耗材及尺寸相同的前提下,瓦楞蜂窝复合纸板的纵向边压强度与横向边压强度约是蜂窝纸板的1.3倍,两种纸板在纵向与横向两个方向的边压强度基本相同;瓦楞蜂窝复合纸板的纵向抗弯强度比蜂窝纸板的高出75%,横向抗弯强度高出蜂窝纸板的92%,蜂窝纸板纵、横两个方向的抗弯强度基本相同。

本研究采用大尺寸试样作为分析样本,更接近纸板的实际使用状态。利用有限元分析方法,将结构对纸板边压强度及弯曲强度的影响从众多影响因素(例如材质影响、环境因素、试样尺寸误差、实验仪器误差等)中解耦出来,而这些影响因素在实验测试过程是无法避免的。

瓦楞蜂窝复合纸板特别适用于制作环保要求高、承载力大的包装箱、托盘、集装箱等。在工业产品、民用商品、军工武器等诸多环保绿色包装物流运输领域具有广泛应用前景。本研究得出的结论对瓦楞蜂窝复合纸板的性能认识具有一定的参考价值,研究结果可对瓦楞蜂窝复合纸板在绿色纸质环保物流器具领域的开发应用提供理论依据。

参考文献:

[1] 刘冰,阮红斌,曹海斌,等.蜂窝-瓦楞复合纸

- 板的面外承载及静态缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2012, 33(7): 4-8.
- LIU Bing, RUAN Hongbin, CAO Haibin, et al. Research on Outside Bearing and Static Cushioning Performance of Honeycomb-Corrugated Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 4-8.
- [2] 王凌钰. 瓦楞-蜂窝复合结构纸板缓冲性能的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2012.
- WANG Lingyu. Research on Cushioning Properties of Corrugated Honeycomb Composite Structure Paperboard [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2012.
- [3] 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, 12.
- WANG Mei. The Research of the Honeycomb Fibreboard Cushioning Performance and the Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4): 5-8, 12.
- [4] 刘跃军, 江太君, 曾广胜, 等. 不同蜂窝结构对蜂窝纸板力学性能的影响[J]. 包装学报, 2010, 2(1): 21-23.
- LIU Yuejun, JIANG Taijun, ZENG Guangsheng, et al. Effect of the Honeycomb Structure on the Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2010, 2(1): 21-23.
- [5] 李厚民, 熊健民, 朱若燕, 等. 蜂窝纸板力学性能的试验研究[J]. 中国机械工程, 2006(增刊2): 147-149.
- LI Houmin, XIONG Jianmin, ZHU Ruoyan, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard[J]. China Mechanical Engineering, 2006(S2): 147-149.
- [6] 温时宝, 曹开化, 王斌, 等. 高强瓦楞蜂窝复合纸板及其力学性能研究[J]. 包装与食品机械, 2012(3): 32-35.
- WEN Shibao, CAO Kaihua, WANG Bin, et al. Study on High Strength Corrugated Honeycomb Composite Board and Mechanical Properties[J]. Packaging and Food Machinery, 2012(3): 32-35.
- [7] 都学飞, 郭彦峰, 陶良毅, 等. 瓦楞/蜂窝复合结构纸板强度性能的试验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(8): 41-43.
- DOU Xuefei, GUO Yanfeng, TAO Liangyi, et al. Test Study on Strength Properties of Corrugated/Honeycomb Composite Board[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8): 41-43.
- [8] 廖泽顺, 滑广军, 谢勇, 等. 瓦楞纸板横向边压强度有限元分析[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 56-60.
- LIAO Zeshun, HUA Guangjun, XIE Yong, et al. The Finite Element Analysis of the Lateral Compressive Strength of Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 56-60.
- [9] 王志刚, 穆建春, 龙志勤, 等. 纸质材料在静态荷载作用下力学性能的实验研究[J]. 广西轻工业, 2009(6): 25-26.
- WANG Zhigang, MU Jianchun, LONG Zhiqin, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Paper Materials Under Static Load[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2009(6): 25-26.
- [10] 滑广军, 廖泽顺, 费伟民. 重型夹芯纸板侧压强度数值仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 107-110.
- HUA Guangjun, LIAO Zeshun, FEI Weimin. Numerical Simulation Analysis of Heavy Sandwich Cardboard Edgewise Compressive Strength[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 107-110.
- [11] 刘禾禾. 基于ANSYS瓦楞辊与纸板的有限元分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013.
- LIU Hehe. The Finite Element Analysis of Corrugated Roll and Paperboard Based on ANSYS[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2013.
- [12] 戴晓莉. 瓦楞纸箱的有限元分析及实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- DAI Xiaoli. Finite Element Analysis and Experimental Study of Corrugated Box[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [13] 曾广胜, 江太君, 刘跃军, 等. 垂直载荷作用下蜂窝纸板的非线性屈曲分析[J]. 包装学报, 2010, 2(1): 24-27.
- ZENG Guangsheng, JIANG Taijun, LIU Yuejun, et al. Nonlinear Buckling Analysis of Honeycomb Paperboard Under Vertical Load[J]. Packaging Journal, 2010, 2(1): 24-27.
- [14] 徐朝阳, 李大纲. 木质蜂窝夹芯包装材料抗弯性能研究[J]. 包装工程, 2007, 28(8): 16-18.
- XU Zhaoyang, LI Dagang. Study on Bending Performance of Wood Honeycomb Sandwich Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 16-18.
- [15] 虞道良. 蜂窝纸板承载与缓冲性能的试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- YU Daoliang. Experimental Research on Bearing and Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.

(下转第84页)

学报, 2015, 7(3): 89-96.
ZHANG Xi. Preliminary Research on Tahu Chiseled

Flower Art in the Design of Xiangxi Miao Clothing[J].
Packaging Journal, 2015, 7(3): 89-96.

Research on Works of Luo Xianmei, Inheritor of Jingzhou Carved Preserved Fruit

WU Wei, ZHOU Shaozhuo

(School of Packaging Design and Art, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The technique of Jingzhou carved preserved fruit has enjoyed a long history. It is one of the non-material cultural heritages which perfectly combines delicious food with handicraft. The works of Luo Xianmei, the representative inheritor, covered extensive subjects in patterns inclusive of flowers, birds, insects, fishes, fowls, beasts, calligraphy paintings and personal characters. The main artistic characteristics of Luo Xianmei's carved preserved fruits were embodied in full composition, vivid profile, devoted color, pattern techniques with reference of fusion, rich subjects, and auspicious connotations. Carved designs indicated Miao people's pursuit of better life and worship for totems as well. With the distinctive art feature and high aesthetic value, Luo Xianmei's works of carved preserved fruit reflected the collective wisdom of women of Miao and Dong minorities.

Keywords: Luo Xianmei; Jingzhou carved preserved fruit; type of decorative pattern; artistic feature; cultural connotation

.....

(上接第 62 页)

Numerical Simulation of Mechanical Properties of Green Corrugated Honeycomb Composite Cardboard

LIAO Zeshun, MA Wenshu

(Guoguang Electric Co., Ltd., Guangzhou 510800, China)

Abstract: The edge compressive strength and bending strength of corrugated honeycomb composite board and honeycomb paperboard were compared. Using finite element method, the material, material consumption and size of the two kinds of paperboard were strictly controlled, and the structure effect on edgewise compressive strength and bending strength was decoupled from many factors. The numerical models of two paperboards with large sample size were established. The buckling analysis method was used to simulate the edge crush strength of the two kinds of cardboard. At the same time, the bending strengths of them were analyzed. The results showed that the edge compressive strength of corrugated honeycomb composite board was about 30% higher than that of honeycomb paperboard. The longitudinal and transverse bending strengths of corrugated honeycomb composite board were 75% and 92% higher than those of honeycomb paperboard. The bending strengths of the honeycomb paperboard in longitudinal, transverse direction were basically the same.

Keywords: corrugated honeycomb composite board; honeycomb paperboard; finite element buckling analysis; edge compressive strength; bending strength