

包装技术与工艺

重型夹芯纸板侧压强度数值仿真分析

滑广军, 廖泽顺, 费伟民
(湖南工业大学, 株洲 412008)

摘要: **目的** 对典型重型夹芯纸板结构的侧向抗压强度进行精确的对比分析, 为合理应用夹芯纸板提供依据。**方法** 利用有限元软件 Ansys 分别建立蜂窝纸板及 AAB 型重型瓦楞纸板大尺寸规格试样的数值模型, 并基于屈曲分析准则对重型瓦楞纸板纵向及蜂窝纸板 2 个侧向抗压强度进行研究。**结果** 在选材、用纸量及试样尺寸规格大小相同的情况下, 蜂窝纸板 2 个方向的侧压强度均高于 AAB 型重型瓦楞纸板的边压强度。**结论** 仿真分析对蜂窝纸板和 AAB 型重型瓦楞纸板的选材、材料用量及尺寸规格进行了严格控制, 消除了重型瓦楞纸板和蜂窝纸板的材质、耗纸量、试样尺寸规格、试样加工工艺及环境条件等因素的变化对分析结果产生的影响。

关键词: 型瓦楞纸板; 蜂窝纸板; 侧压强度; 屈曲分析

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)15-0107-04

Numerical Simulation on Edgewise Compressive Strength of Heavy Sandwich Fiberboard

HUA Guang-jun, LIAO Ze-shun, FEI Wei-min
(Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct contrastive analysis of the edgewise compressive strength of the typical heavy sandwich fiberboard and provide a basis for its reasonable application. Numerical models with big size specification for honeycomb fiberboard and AAB heavy corrugated fiberboard were respectively established by finite element software Ansys. Compressive strength of heavy corrugated fiberboard in longitudinal direction and that of honeycomb fiberboard in two side directions were studied based on buckling criteria. The compressive strength of honeycomb fiberboard in two side directions was higher than that of the AAB heavy corrugated fiberboard on the condition that material, consumption and sample size and shape were all the same. In conclusion, simulated analysis has strict control on material selection, material consumption and size specification of the both two fiberboards and has eliminated the effect of variation at material, consumption, sample size specification, processing technic and environmental conditions on the results of the analysis.

KEY WORDS: heavy duty corrugated fiberboard; honeycomb fiberboard; edgewise compressive strength; buckling analysis

以重型瓦楞纸板和蜂窝纸板为代表的重型纸质包装在机电产品、汽车零配件等运输包装已得到

广泛应用。目前业内对蜂窝纸板与重型瓦楞纸板的某些性能已达成了共识, 如蜂窝纸板具有优异的平

收稿日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (61170101)

作者简介: 滑广军 (1975—), 男, 河南长垣人, 工学博士, 湖南工业大学副教授, 主要研究方向为运输包装技术、振动测试与故障诊断、结构动力学、CAD\CAE。

压强度及抗弯强度,但生产效率及后续加工性能较差;重型瓦楞纸板生产效率高,加工性能好,但其平压强度及抗弯强度比蜂窝纸板差^[1-3]。对这2种重型夹芯纸板侧向抗压强度的认识还存在争议,有些观点认为蜂窝纸板侧向抗压强度较弱,不如重型瓦楞纸板,有的观点正好相反^[4-5]。蜂窝纸板与瓦楞纸板属于结构类纸质型材,其性能不仅与基材性能有关,也与结构特征有关,同时还受环境条件、加工工艺、试样边缘效应等多种条件的影响。一些企业和研究机构对蜂窝纸板及重型瓦楞纸板的性能进行了实验分析,由于实验过程缺乏对材质、纸板结构、测试环境条件、加工工艺等的精确控制,这些实验结果并不能让人信服。文中采用有限元分析软件 Ansys 分别建立大尺寸规格的蜂窝纸板与 AAB 重型瓦楞纸板的有限元模型。将结构对夹芯纸板侧向抗压强度的影响从众多因素(材质、耗纸量、试样尺寸规格、试样加工工艺及环境条件)中解耦,并进行了特征值屈曲分析(线弹性失稳分析),研究了结构本身对重型夹芯纸板侧向抗压强度的影响。

1 仿真建模及评价准则

1.1 材料的控制

对蜂窝纸板与重型瓦楞纸板的侧向抗压能力进行客观准确的评价,需要对选材进行精确的控制。将蜂窝纸板与 AAB 重型瓦楞纸板的面纸与芯纸选择同一种材料,为:弹性模量 E_x, E_y, E_z 分别为 7600, 4020, 38 MPa; 剪切模量 G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} 分别为 2140, 20, 70 MPa; 泊松比 $\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$ 分别为 0.34, 0.01, 0.01; 厚度为 0.269; 纸板定量为 200 g/m²。

1.2 试样的规格控制

仿真分析时,可以突破传统瓦楞纸板边压强度测试试样的尺寸限制,因为大尺寸规格的试样更接近纸板的实际使用情况。重型瓦楞纸板与蜂窝纸板取相同的厚度,试样长、宽分别为 200, 100 mm。

1.3 耗纸量的控制

为了精确控制蜂窝纸板和重型瓦楞纸板耗纸

量相同,以 AAB 型重型瓦楞纸板相对密度为目标,控制蜂窝纸板的芯纸和面纸定量以及芯纸边长。

1.3.1 蜂窝纸板耗纸量

分析采用正六边形蜂窝结构,单个蜂窝芯的截面见图 1。图 1 中 2, 3, 5, 6 号边是该蜂窝与其它蜂窝芯共用的边,1, 4 号边是通过粘贴的方式与其他蜂窝边连接起来的边^[9-10]。若蜂窝纸板厚为 h , 芯纸边长为 a , 原纸定量为 G , 则单个蜂窝芯的耗纸量按式(1)计算, 单个蜂窝芯上下面纸用量按式(2)计算, 单个蜂窝的总耗纸量按式(3)计算, 蜂窝纸板的相对密度, 见式(4)。

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

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

$$S_f = 3\sqrt{3}a^2G + 4ahG \quad (3)$$

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

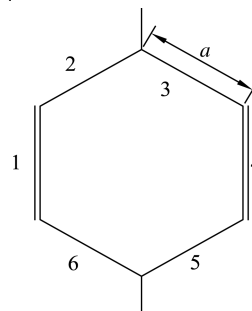


图 1 蜂窝结构

Fig.1 Structure of honeycomb fiberboard

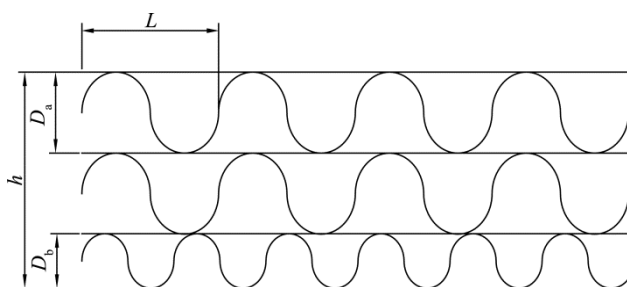


图 2 重型瓦楞 AAB 结构

Fig.2 Structure of heavy corrugated fiberboard AAB

1.3.2 重型瓦楞纸板耗纸量

对于 AAB 重型瓦楞纸板, 结构见图 2, 其楞形为 U 形, A 与 B 楞高度分别为 5, 2.5 mm, 纸板总厚度为 12.5 mm。一个 A 楞正弦周期的耗纸量为:

$$S_w = 4wLG + 2\pi(D_a + D_b)wG \quad (5)$$

式中: w 为瓦楞纸板试样宽度方向的尺寸; L

为 A 楞的周期长度; D_a 为 A 楞的高度; D_b 为 B 楞的高度; G 为面纸及芯纸的定量^[11]。

AAB 楞型重型瓦楞纸板的相对密度见式(6):

$$P_w = \frac{(4L + 2\pi D_a + 2\pi D_b)G}{Lh_c} \quad (6)$$

式中: h_c 为 AAB 楞型瓦楞纸板的厚度。

对于理想的 U 形楞 AAB 重型瓦楞纸板, $L=2D_a$, $D_b=D_a/2$, $h_c=(5D_a)/2$ 。则式(6)可简化为:

$$P_w = \frac{(2+3\pi)G}{5D_a} \quad (7)$$

要使蜂窝纸板耗纸量与 AAB 型重型瓦楞纸板耗纸量相等, 需设 $P_f = P_w$, 则简化后可得:

$$a = 0.48D_a \quad (8)$$

将 $D_a=5 \text{ mm}$ 代入式(8), 可得 $a=2.4 \text{ mm}$, 边长太小, 蜂窝纸板生产率太低, 需改变方案。调整后的方案为: 对蜂窝纸板面纸用两层原纸厚, 芯纸的用纸层数不变, 可计算出 $a=4 \text{ mm}$, 这样更符合实际状况。

2 蜂窝纸板与重型瓦楞纸板的屈曲分析

分别建立边长 $a=4 \text{ mm}$ 的蜂窝纸板与 AAB 型重型瓦楞纸板的有限元模型。其中, 蜂窝纸板面纸厚度为 0.538 mm , 芯纸厚度为 0.269 mm 。重型瓦楞纸板面纸、中纸、芯纸厚度均为 0.269 mm , 有限元模型选用 shell63 单元^[12-15]。

2.1 重型瓦楞纸板屈曲分析

由图 3a 可知, 约束重型瓦楞纸板底部所有节点的 6 个自由度, 对顶部每个节点施加 1 N 的向下载荷作为预加载荷。重型瓦楞纸板单元划分后顶部节点总数为 1550 个, 则总预加载荷为 1550 N 。对模型进行特征值屈曲分析, 得到前 5 阶屈曲模态, 见图 3b—f。其中第 1 阶屈曲模态为整体屈曲模态, 代表试样整体失稳; 第 2 阶至第 5 阶为局部屈曲模态, 局部屈曲模态代表试样局部结构失稳。选用整体屈曲模态代表重型瓦楞纸板的抗压能力, 第 1 阶屈曲模态特征值为 0.69 , 根据式(9)可计算出屈曲载荷为 1067 N 。

$$P = P_0 \lambda \quad (9)$$

式中: P 为纸板屈曲载荷(N); P_0 为总预加载荷(N); λ 为屈曲特征值。

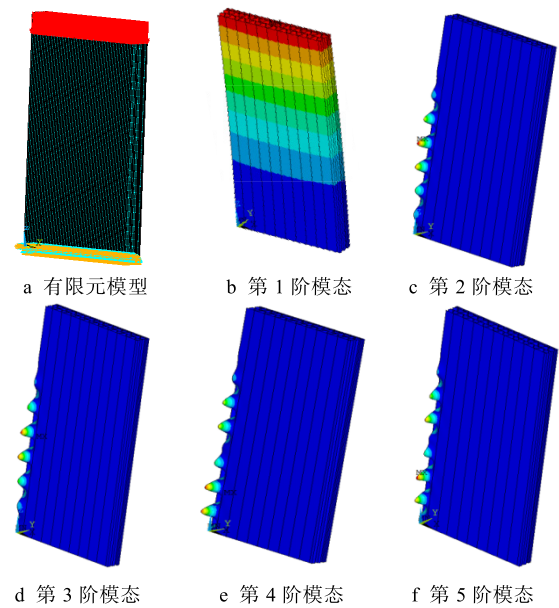


图 3 重型瓦楞纸板的有限元模型及屈曲模态
Fig.3 Finite element model and buckling mode of heavy corrugated fiberboard

2.2 蜂窝纸板屈曲分析

将图 1 中垂直于 1, 4 边的方向定义为横向(TD), 平行于 1, 4 边的方向成为肋向(RD)。蜂窝纸板模型 TD 方向有限元载荷及约束见图 4a, 约束底部边缘节点的所有自由度, 在顶部边缘每个结点施加 1 N 的 y 坐标轴方向的集中力, 顶部受力节点总数为 240 个, 则总预加载荷为 240 N 。蜂窝纸板 RD 方向的有限元模型见图 4b, 约束左侧边缘节点的所有自由度, 在右侧边缘每个节点施加 1 N 的 x 坐标

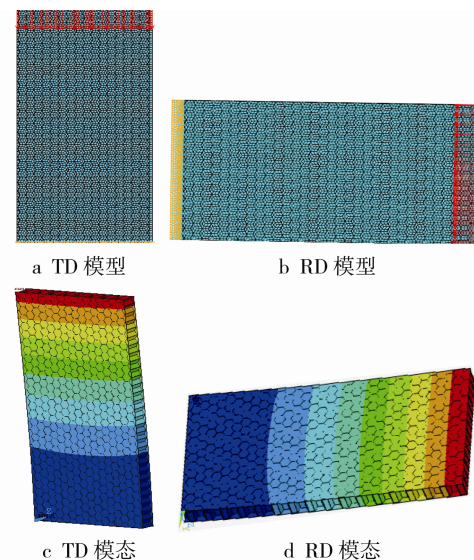


图 4 蜂窝纸板有限元模型及屈曲模态
Fig.4 Finite element model and buckling mode of honeycomb fiberboard

轴方向的集中力, 受载节点总数为 448, 总预加载荷 448 N。对 2 个模型进行特征值屈曲分析, 分别得到第一阶整体屈曲模态见图 4c, d, 其整体屈曲特征值分别为 6.25 和 3.4。利用式(9)可得到 2 个模型的屈曲载荷分别为 1500, 1523.2 N。

对比以上 3 个模型的计算结果可知, 蜂窝纸板 2 个方向的侧压强度非常接近, 约为 AAB 重型瓦楞纸板的 1.5 倍左右。

3 结语

对蜂窝纸板与 AAB 型重型瓦楞纸板的材料、相对密度、试样规格进行了精确的控制。建立了 2 种夹芯结构的大尺寸规格有限元模型, 并基于屈曲准则(特征值屈曲或线弹性失稳)和数值分析方法, 将结构对蜂窝纸板及重型瓦楞纸板侧压强度的影响从众多影响因素中解耦, 消除了实验时测试系统误差、环境温湿度、试样材质、试样加工成型、用胶量及裁切误差等因素对分析结果的干扰, 对 2 种重型夹芯纸板的侧压强度进行了计算分析。

研究结果表明, 在材质、相对密度及试样尺寸规格相同的情况下, 蜂窝纸板的 2 个方向的侧压强度非常接近, 蜂窝纸板侧压强度为 AAB 重型瓦楞纸板的 1.5 倍左右, 因此, 在侧向承压能力方面, 蜂窝纸板是一种更优的夹芯结构。采用大尺寸规格的试样更接近重型夹芯纸板的实际使用状态, 研究结果能够为蜂窝纸板和重型瓦楞纸板的力学性能的正确认识及合理选择提供依据。

参考文献:

- [1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [2] HU Ling-ling, YOU Fan-fan, YU Tong-xi. Analyses on the Dynamic Strength of Honeycombs under the Y-directional Crushing[J]. Materials and Design, 2014, 53(1): 293—301.
- [3] 计宏伟, 徐革玲, 李俊超. 蜂窝纸板侧压强度实验研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 90—91.
JI Hong-wei, XU Ge-ling, LI Jun-chao. Experimental Research on the Edgewise Compressive Strength of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 90—91.
- [4] 刘晔, 王振林, 周建伟, 等. 三重组合瓦楞纸板压缩承载规律的实验研究[J]. 包装工程, 2003, 24(3): 43—46.
LIU Ye, WANG Zhen-lin, ZHOU Jian-wei, et al. An

- Experimental Study of the Compressive Intensity Rule of Triple Wall Corrugated Fiber Board[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(3): 43—46.
- [5] 熊宏智, 耿敏. 瓦楞结构与蜂窝结构刚度比较[J]. 北京工商大学学报, 2001, 19(3): 42—46.
XIONG Hong-zhi, GENG Min. Contrast of Rigidity Between Honeycomb Cardboard and Corrugated Cardboard[J]. Journal of Beijing Technology and Business University, 2001, 19(3): 42—46.
- [6] 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 Guang-jun, XIANG Hong, FENG Wei. Finite Element Modeling and Buckling Analysis of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 34—35.
- [7] MENNA C, ZINNO A, ASPRONE D, et al. Numerical Assessment of the Impact Behavior of Honeycomb Sandwich Structures[J]. Composite Structures, 2013, 106(12): 326—339.
- [8] 高山, 王宝中. 基于 ANSYS 的双层蜂窝纸板有限元分析[J]. 机械工程与自动化, 2012(6): 69—71.
GAO Shan, WANG Bao-zhong. Finite Element Analysis of Double Honeycomb Cardboard by ANSYS[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012(6): 69—71.
- [9] HU Ling-ling, YU Tong-xi. Dynamic Crushing Strength of Hexagonal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 467—474.
- [10] ALBERDI R, PRZYWARA J, KHANDELWAL K. Performance Evaluation of Sandwich Panel Systems for Blast Mitigation[J]. Engineering Structures, 2013, 56(6): 2119—2130.
- [11] ZHANG Jin, SUPERNAK P, MUELLER-ALANDE S, et al. Improving the Bending Strength and Energy Absorption of Corrugated Sandwich Composite Structure[J]. Material and Design, 2013, 52(24): 767—773.
- [12] 彭键林, 尹志宏, 宋俊杰. 基于 ANSYS 的蜂窝纸板静压特性研究[J]. 机械, 2007, 34(10): 31—33.
PENG Jian-lin, YIN Zhi-hong, SONG Jun-jie. Research on Static Compression Performance of Honeycomb Paperboard Based on ANSYS[J]. Machinery, 2007, 34(10): 31—33.
- [13] 张文峰, 张安宁. 基于 ANSYS8.0 的蜂窝纸板力学性能研究[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 57—58.
ZHANG Wen-feng, ZHANG An-ning. Research on Static Properties of Honeycomb Paperboard Based on ANSYS 8.0[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 57—58.
- [14] 王志伟, 姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 49—55.
WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 49—55.
- [15] 李厚民. 蜂窝纸板受压时的有限元分析[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 34—36.
LI Hou-min. FEM Analysis of the Compression Properties of Honeycomb Paperboard[J]. 2006, 27(1): 34—36.