

基于 ANSYS Workbench 的瓦楞纸箱抗压性能仿真研究

段艳健, 钱怡

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 建立了瓦楞纸箱的有限元模型并进行了结构修正,应用 ANSYS Workbench 有限元分析软件对纸箱结构模型进行了屈曲分析,从而求得了瓦楞纸箱的抗压强度,最后通过抗压试验进行了验证。有限元分析结果与试验结果比较接近,验证了模型的有效性。

关键词: 有限元模型; 屈曲; 抗压强度; Ansys Workbench

中图分类号: TB487; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)09-0023-04

Simulation Study of Compression Strength of Corrugated Box Based on ANSYS Workbench

DUAN Yan-jian, QIAN Yi

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Finite element models of corrugated box were established and modification of corrugated box structure was carried out. Buckling analysis was carried out on corrugated box structure models using ANSYS Workbench and the compression strength of corrugated boxes was obtained. Compression experiments were carried out to verify the simulation. The result showed that finite element analysis result is close to the experiment result; the models are valid.

Key words: finite element model; buckling; compression strength; ANSYS Workbench

瓦楞纸箱是用瓦楞纸板制成的纸质容器。瓦楞纸箱以其优越的使用性能和良好的加工性能逐渐取代了木箱等运输包装容器,成为运输包装的主力军。它除了保护商品、便于仓储和运输之外,还起到美化商品、宣传商品的作用^[1]。瓦楞纸箱是一种应用最广的包装制品,用量一直居各种包装制品之首。抗压强度是瓦楞纸箱在实际应用中的主要性能指标之一^[2],准确地测试其大小对于保护流通中的产品具有重要的意义。目前瓦楞纸箱的抗压强度主要是通过试验得到的,存在着一些弊端,诸如试验周期长、成本高、受试验条件限制等^[3]。近年来有不少人研究瓦楞纸板的屈曲性能,但是对瓦楞纸箱的结构屈曲研究尚少。滑广军对纸箱模型进行了特征值屈曲分析,得到了临界载荷,证明有限元方法计算瓦楞纸箱抗压强度是可行的^[4],但并没有研究瓦楞纸箱的后屈曲部分。文中考虑瓦楞纸箱的几何非线性以及初始几何缺陷,

利用 ANSYS Workbench 软件对纸箱的有限元模型进行非线性屈曲分析,得到其后屈曲载荷,与瓦楞纸箱的抗压试验结果进行比较,来验证纸箱模型的可行性。目前瓦楞纸箱在产品防护包装设计中应用越来越广泛,因此研究瓦楞纸箱的屈曲性能具有重要的现实意义和工程价值。

1 瓦楞纸箱非线性屈曲分析

屈曲分析主要用于研究结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷。瓦楞纸箱屈曲变形在有限元分析和抗压试验中的含义是不同的。纸箱在试验中屈曲变形主要是侧板受压逐渐丧失稳定并出现横向挠曲导致的。当达到临界屈曲后,相邻侧板的直棱处仍然保持平直,能继续承受一定的压力,直到纸箱的 4 个角压溃为止,这个阶段是后屈曲

收稿日期: 2011-11-22

作者简介: 段艳健(1985—),男,河北沧州人,江南大学硕士生,主攻运输包装。

通讯作者: 钱怡(1962—),女,江苏无锡人,江南大学副教授、硕士生导师,主要从事包装结构及机械的动静性能研究。

阶段。

在瓦楞纸箱的有限元分析中,纸箱有限元模型发生屈曲变形的部位只有纸箱侧板,纸箱的4个角不会出现屈曲或压溃。通常纸箱的屈曲分析结果远小于其抗压强度试验结果,原因是在有限元分析中忽略了纸箱模型中4个角的承压能力。因此为了提高仿真精度,需要对纸箱的结构模型进行结构修正,提高纸箱4个角的承压能力。

1.1 建立纸箱的几何模型

建立瓦楞纸箱的有限元模型是进行仿真分析的前提。利用 Pro/E 软件建立瓦楞纸箱的几何模型,瓦楞纸箱的几何尺寸为 290 mm×170 mm×190 mm。为了便于建模和计算,将瓦楞纸板用等效板^[5]来代替,等效板是性能和瓦楞纸板相同的均质薄板,文中等效板的厚度为 3.8 mm。

纸箱由 6 块等效板经粘接而成,其中前后侧板的尺寸为 290 mm×190 mm;左右侧板的尺寸为 170 mm×190 mm;上下板的尺寸为 290 mm×170 mm。瓦楞纸箱的分解见图 1。

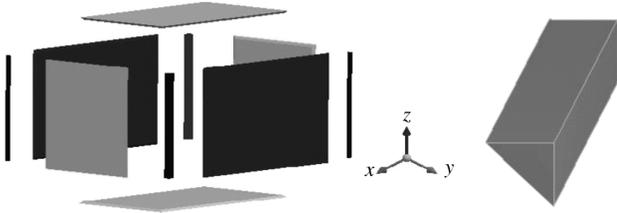


图 1 瓦楞纸箱分解图

Fig. 1 Exploded view of corrugated box

为了使加强筋和纸箱侧板更好地接触,得到高质量的网格,加强筋选用三棱柱形状,截面为等腰直角三角形,高度与纸箱的内尺寸高度相等,见图 1。

试验表明,瓦楞纸箱 4 个角承受的压力约为整个纸箱抗压强度的 2/3,为了简化计算过程,文中将三角形加强筋的临界屈曲载荷设为纸板临界屈曲载荷的 2 倍^[6],即:

$$F_s = 2F_b \quad (1)$$

式中: F_s 为单个三角形加强筋的临界屈曲载荷; F_b 为单个纸箱侧板的临界屈曲载荷;令三角形的直角边长为 a ,由三角形截面的惯性矩公式^[7]可知:

$$I = \frac{a^4}{36} \quad (2)$$

式中: I 为惯性矩。

所以三角形加强筋的临界载荷公式可以表示为:

$$F_s = \frac{\pi^2 E a^4}{36 l^2} \quad (3)$$

式中: l 为三角形加强筋的高度。

根据文献[8],瓦楞纸板侧板的临界载荷公式:

$$F_b = \frac{\pi^2}{L^2} \left[D_{11} \left(\frac{H}{L} \right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) + D_{22} \left(\frac{L}{H} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: $D_{11}, D_{22}, D_{66}, D_{12}$ 分别为纸板在 x, y, z, xy 方向的抗弯刚度^[9]; G_{xy} 为纸板在 xy 方向上的剪切模量;

$$D_{11} = \frac{E_x t^3}{12(1 - \mu_{xy}\mu_{yx})}; D_{22} = \frac{E_y t^3}{12(1 - \mu_{xy}\mu_{yx})};$$

$$D_{66} = \frac{G_{xy} t^3}{12}; D_{12} = \mu_{xy} D_{11}; G_{xy} = 0.387 \sqrt{E_x E_y}; L$$

= 290 mm; $H = 990$ mm。

纸板的弹性参数见表 1,将数值代入上式得出三角形加强筋的直角边长为 $a = 9.8$ mm。

1.2 网格控制与划分

在 ANSYS Workbench 软件^[10]中,对于壳体程序默认的单元是 4 结点的四边形壳单元 (SHELL181)。将 Pro/E 软件建立的瓦楞纸箱几何模型导入 ANSYS Workbench 软件中,板与板之间、加强筋与板之间的接触选用绑定接触。

根据 GBT 6546-1998《瓦楞纸板边压强度的测定法》进行试验,得到瓦楞纸板的载荷-位移 ($F-l$) 曲线。利用弹性模量公式 $E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\Delta F l}{S \Delta l}$ (式中: Δl 为纸板长度的变化; ΔF 为与 Δl 对应的载荷的变化; l 为纸板的初始长度; S 为纸板的横截面积)得到瓦楞纸板的弹性模量 E_x, E_y ,由经验公式^[8,11]得到 $E_z, G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}, \mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{xz}$ (见表 1)。以等效板来代替瓦楞

表 1 等效板的弹性参数

Tab. 1 Elastic parameters of equivalent paperboard

	E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}
	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa			
前后板	276.6	1.38	440.8	5.2	12.6	135.1	0.01	0.01	0.37
左右板	1.38	276.6	440.8	5.2	135.1	12.6	0.01	0.37	0.01
上下板	276.6	440.8	1.38	135.1	12.6	5.2	0.37	0.01	0.01
加强筋	276.6	276.6	440.8	107.0	7.9	5.0	0.29	0.01	0.01

纸板,瓦楞纸板属于正交各向异性板,因此构成纸箱的 6 块等效板的弹性参数需要单独定义。

利用多域法来划分网格,网格大小设置为 10

mm,多域法主要用于划分六面体网格。其特点就是具有几何体自动分解功能,从而产生六面体网格,见图2。

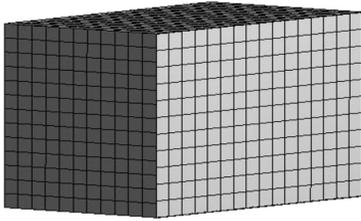


图2 瓦楞纸箱的网格划分

Fig. 2 Meshing of corrugated box

1.3 定义载荷和约束

瓦楞纸箱在抗压试验中受到试验机上板的压缩,因此选用 $F=100\text{ N}$ 的分布载荷,均匀作用在纸箱的上表面,方向垂直于上表面向下。

纸箱在试验过程中,纸箱底板是不发生任何位移的,因此在纸箱的底板施加固定约束,4个侧板不受任何约束。

1.4 纸箱的非线性屈曲分析

非线性屈曲分析是在大变形效应打开的情况下的一种静力分析。在进行非线性屈曲分析时,需要在纸箱模型上施加初始缺陷,并且考虑几何非线性。

首先进行特征值屈曲分析,得到瓦楞纸箱的特征值屈曲载荷为 $1\,409.7\text{ N}$ 。把特征值屈曲分析的第一阶屈曲模态的位移形态作为非线性屈曲分析的初始几何缺陷^[12],并将施加一个比特征值屈曲载荷大 $10\%\sim 20\%$ 的载荷。

非线性屈曲分析结束后,瓦楞纸箱的等效应力见图3。纸箱的4个角等效应力值最大,侧板的中间区



图3 纸箱的等效应力图

Fig. 3 Equivalent stress distribution of corrugated box

域等效应力最小。红色区域表示加强筋,说明纸箱的4个角在非线性屈曲分析中承受的压力是最大的,加强筋在整个抗压过程中起了很大作用。

使用牛顿-拉普森法进行迭代收敛计算直至满足收敛条件。经过9次平衡迭代其结果出现收敛,因此,瓦楞纸箱的极限载荷为 $1\,220\text{ N}$ 。

2 抗压试验

选取试验样品的数量为5个。参照 GB/T 10739—2002《纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件》对试验材料进行温、湿度预处理,试验标准大气条件温度为 $(23\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $50\%\pm 2\%$,预处理时间为 24 h 。

参照 GB/T 4857.4—2008《包装运输包装件基本试验 第4部分 采用压力试验机进行的抗压和堆码试验方法》进行试验。将瓦楞纸箱放置在试验机的下压板中心,抗压试验机上压板以 12 mm/min 的速度向下运动对纸箱施加载荷,直至纸箱出现损坏现象为止。

通过抗压试验可以得到纸箱的载荷-位移曲线,读取曲线上的最高点并记录,见表2。

表2 瓦楞纸箱的抗压试验结果

Tab. 2 The experiment results of compression strength of corrugated box

样品	1	2	3	4	5	均值
F/N	1 320	1 195	1 275	1 350	1 230	1 280

3 结果与分析

瓦楞纸箱的有限元仿真分析结果和试验结果对比见图4,带有加强筋纸箱的仿真结果明显大于不带

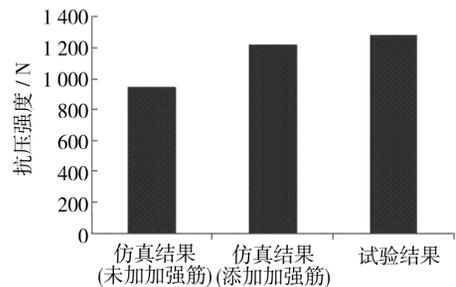


图4 抗压强度结果对比

Fig. 4 Results contrast of compression strength

加强筋纸箱的仿真结果,加强筋增加了瓦楞纸箱的承载能力。带有加强筋纸箱的屈曲载荷比较接近抗压试验结果,误差率约为 4.69% ,验证了瓦楞纸箱有限

元模型的可行性。

4 结语

根据瓦楞纸箱的受力特点对常规的纸箱有限元模型进行修正,在4个角处添加加强筋,并利用有限元方法得到瓦楞纸箱的屈曲载荷,最后通过抗压试验来验证有限元分析结果的精确程度。结果表明,经过修正后的瓦楞纸箱有限元模型是可行的。在有限元仿真分析过程中,纸板的弹性参数精确与否是有限元分析的关键。另外为了简化纸箱模型,将瓦楞纸板用与其性能相同的等效板来替代,因此有限元结果有一定的局限性。目前有限元仿真分析在纸质包装容器的设计方面应用并不广泛,原因之一就在于材料属性,比如弹性模量、剪切模量等参数的测定方法还有待完善。

参考文献:

- [1] 章建浩. 食品包装学[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
ZHANG Jian-hao. Food Packaging Science[M]. Beijing: China Agriculture Press,2005.
- [2] 刘喜生. 包装材料学[M]. 长春:吉林大学出版社,2005.
LIU Xi-sheng. Packaging Material Science[M]. Changchun: Jilin University Press,2005.
- [3] 何自芬. 基于有限元法的包装箱抗压性能研究[J]. 包装工程,2009,30(3):39-41.
HE Zi-fen. Compression Properties of the Corrugated Box Based on Finite Element Method[J]. Packaging Engineering,2009,30(3):39-41.
- [4] 滑广军. 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. Finite Element Modeling and Buckling Analysis of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering,2009,30(3):34-35.
- [5] 贺妙欣. 瓦楞纸板屈曲临界载荷的一种等效计算方法[J]. 包装工程,2010,31(1):38-41.
HE Miao-xin. An Equivalent Calculation Method of Critical Load of Corrugated Board[J]. Packaging Engineering,2010,31(1):38-41.
- [6] 鄢腊梅,袁友伟. 瓦楞纸箱抗压强度的计算方法及其计算机辅助设计[J]. 包装工程,2000,21(1):24-27.
YAN La-mei, YUAN You-wei. Compressive Strength Calculation Method of Corrugated Carton and Computer Aided Design [J]. Packaging engineering,2000,21(1):24-27.
- [7] 孙训方. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1997.
SUN Xun-fang. Material Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press,1997.
- [8] BIANCOLINI M E, BRUTTI C. Numerical Evaluation of Buckling and Post-buckling Behaviour of Corrugated Board Containers[J]. AIAS,2005. (余不详)
- [9] LUO S, SUHLING J C. The Bending Stiffness of Corrugated Board[J]. Mechanics of Cellulosic Materials,1992. (余不详)
- [10] 浦广益. Ansys Workbench 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
PU Guang-yi. Ansys Workbench Tutorial and Example Explanation[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press,2010.
- [11] ALLANSSON A. Stability and Collapse of Corrugated Board[D]. Sweden:Lund University,2001.
- [12] 赵亮. 基于有限元的瓦楞纸板楞型研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
ZHAO Liang. Research of Corrugated Board Corrugation. Based on Finite Element[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2008.