七层瓦楞纸箱结构优化研究

李慧亮,张广文

(河北联合大学, 唐山 063009)

摘要:目的 增加七层瓦楞纸箱在堆码过程中的强度。方法 对市面上常见的瓦楞组合通过 Ansys进 行静态仿真实验分析,并用 Excel 对数据进行处理,比较瓦楞组合的强度大小。在选择 BBE 瓦楞组合 的基础上,对主要受力楞边提出了3种加筋方式来增加瓦楞纸板的强度,对3种加筋和未加筋方式进 行了理论和实验的屈曲分析,比较结果,观察扩展模态。结果 将数据以表格的形式显示,可以看出在 相同条件下,理论和实验表明不同的加筋方式临界压力也不同。结论 适当加筋能够增加瓦楞的强 度,并且外加筋方式的强度最大。

关键词: Ansys; 加筋; 屈曲分析; 扩展模态

中图分类号: TB484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2014)11-0023-05

Structure Optimization of Seven Corrugated Boxes

LI Hui–liang, *ZHANG Guang–wen* (Hebei United University, Tangshan 063009, China)

ABSTRACT: Objective To increase the strength of seven corrugated boxes in the stacking process. **Methods** Firstly, static analysis of the common corrugated combinations in the market was carried out by Ansys simulation, and excel was used for data processing. The strength of the corrugated combinations was compared. On the basis of choosing the BBE corrugated combination, the author proposed three ways to increase the strength of reinforced corrugated cardboard against the main force flute edge. Theoretical and experimental buckling analysis was performed for the 3 reinforced cardboard and the unreinforced cardboard, the results were compared, and the expansion mode was observed. **Results** The data was displayed in tabular form, it could be found under the same conditions, the theoretical and experimental results showed that the critical pressure was different in different reinforcing ways. **Conclusion** Appropriate stiffener could increase the strength of corrugated boxes, and the strength of the external reinforcement was the highest.

KEY WORDS: Ansys; reinforced; buckling analysis; expansion mode

随着包装业的发展,瓦楞纸箱以成本低、装箱方 便、易回收等特点逐渐取代其他运输包装。根据瓦楞 的齿形,即从瓦楞纸板横截面看到的波形,瓦楞纸板可 以分为U形、V形和UV形等3种;根据瓦楞楞型,我国 将瓦楞分为A,C,B,E,F等5种。为了满足不同产品的 需求,市面上出现了不同的瓦楞楞型的组合,如BBE, BAB,CAC,BAC,AAA等,这些组合使用都是根据经验 来使用的,没有一定的理论作为指导。鉴于此,笔者提 出对市面上常见的瓦楞纸板进行静态分析,比较缓冲 能力的强弱,为瓦楞纸板的选取提供理论指导。

大部分商家为节约存储空间和存储费用,在堆码 过程中货物堆码层数超过了指定的层数,导致货物倒 塌。针对这一问题,笔者在选取瓦楞组合的基础上, 提出了3种加筋方式增强瓦楞纸板强度,即外加筋瓦

收稿日期: 2014-03-14

作者简介:李慧亮(1987一),男,河北衡水人,河北联合大学硕士研究生,主攻包装运输。

楞、内加筋瓦楞和三角形加筋瓦楞。对3种方式和未 加筋方式进行了理论和实验的屈曲分析,比较它们的 大小,对瓦楞加筋有一定的指导意义。

1 瓦楞组合的静态分析

以AAA 瓦楞为例进行 Ansys 仿真实验,在实验前选取长度为 30 mm、高为 10 mm 进行建模,在 Pro/E 中将模型建立好,保存成 IGES 格式导入到 Ansys 中。选取材料的湿度为 60%, x 方向的弹性模量 E_{x1} =420 MPa, y方向的弹性模量 E_{y1} =620 MPa^[1-2],利用公式:

$$\begin{cases} E_z = \frac{E_y}{200}, G_{xy} = 0.387 \ \sqrt{E_x E_y}, G_{xz} = \frac{E_x}{55}, \\ G_{yz} = \frac{E_y}{35} \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_x = \frac{\sum_{i=1}^n E_{fx_i} t_i}{H}, E_y = \frac{\sum_{i=1}^n c_j E_{c_y} t_j}{H} \\ E_x = \frac{E_{fx1} + E_{fx2} t_2}{H}, E_y = \frac{E_{fy1} + E_{fy2} t_2 + c E_{cy} t_c}{H} \end{cases}$$

$$\Re \overset{\text{#}}{=}$$

性模量。

式中:*E*_x为单瓦楞纸板*x*方向的等效弹性模量;*E*_y 为单瓦楞纸板*y*方向的等效弹性模量;*E*_x为多层瓦楞 纸板的等效弹性模量;*E*_{fi}为第*i*层面纸的等效弹性模 量;*t*_i为第*i*层面纸的厚度;*n*为面纸的层数;*H*为多层 瓦楞纸板的总高度;*E*_y为多层瓦楞纸板的等效弹性模 量;*E*_{fi}为第*i*层面纸的等效弹性模量;*c*_j为第*j*层芯纸 的展开系数;*E*_{ey}为第*j*层芯纸的等效弹性模量;*t*_i为第 *j*层芯纸的厚度;*m*为芯纸的层数。各楞型组合的弹性 模量见表1,注意统一单元。

表1 各瓦楞型组合的弹性模量

 Tab. 1 Elastic modulus of corrugated combinations

MPa

	E_{x2}	E_{y2}	E_{z^2}	G_{xy2}	$G_{\scriptscriptstyle yz2}$	$G_{\scriptscriptstyle XZ2}$
AAA	179	330	1.65	94	9.43	3.25
ACB	214	367	1.835	108	10.5	3.89
ABE	274.8	475	2.375	140	13.6	5
BCE	291	484	2.42	145	13.8	5.3
BBE	291	484	2.42	145	13.8	5.3
ABA	259	417	2.085	127	11.9	4.7

表1中:Ex为x方向的弹性模量,即与瓦楞方向垂

直的方向; *E*_{x2}为*y*方向的弹性模量,即与瓦楞方向平行 的方向; *E*_{x2}为与*E*_x和*E*_y垂直的方向; *G*_{xy2}为*xy*方向的剪 切模量; *G*_{x22}为*yz*方向的剪切模量; *G*_{x22}为*xz*方向的剪 切模量。泊松比取 γ_{xy}=0.24, γ_x=0.01, γ_{yz}=0.01,单元 类型为 solid185。采用映射网格划分,划分单元为 0.5 mm。在各个节点上施加100 N的压力,加载求解 设定后,得到仿真结果见图 1。



图 1 AAA型瓦楞静态分析结果 Fig.1 Static analysis results of AAA type corrugation

其他楞型组合分析与AAA型雷同,先将结果以表格的形式写出,见表2。用Excel得到数据绘制条形对比图,见图2⁶⁶。

在相同条件下,不同楞型组合的瓦楞表现出来的 最大值和最大变形量不同,这2个指标能够反应瓦楞 的缓冲性能,同等条件下受力小的,缓冲能力强。它 们所表现出来的最大应力值中最小的分别是ABE型 (189.95 MPa)和BBE型(190.912 MPa)。从最大变形 量上可以看出,同等条件下变形量小的缓冲能力好。 对比ABE型和BBE型,在应力相差不大的情况下,

楞型组合形式	最大应力/ MPa	最大应变/mm
AAA型	220.673	3.294
ABA型	212.728	2.591
ABE 型	189.95	2.283
ACB型	220.983	2.954
BBE 型	190.912	2.231
BCE 型	201.621	2.235



图2 不同楞型组合最大应力-应变

Fig.2 Maximum stress-strain diagram of different combinations of corrugation

BBE型的变形小,因此BBE型的缓冲能力最强。

2 加筋楞边理论和实验的屈曲分析

屈曲分析是一种用于确定结构开始变得不稳定 的临界载荷和屈曲模态形状(结构发生屈曲响应的特 征形状)的技术。在堆码过程中,大约2/3的力由瓦楞 纸箱的4个楞边来承受,因此要增加瓦楞纸箱的堆码 强度,只要增加4个楞的强度即可。对主要受力楞边 采用3种加筋处理,即外加筋、三角形加筋和内加筋^[7], 见图3。笔者还对1/4加筋楞的主要受力部分进行了 理论和实验的屈曲分析^[8]。



Fig. 3 Three reinforcing ways $% \left(\frac{1}{2} \right) = 0$

2.1 加筋楞边理论屈曲分析

以外加筋为例计算出外加筋的临界压力。其截

面见图 4, 瓦楞纸板的屈服极限 $\sigma_s=1.4$ MPa, 比例极限 $\sigma_p=1.2$ MPa^[7]。



图4 外加筋截面 Fig. 4 Cross-section of external reinforcement

根据材料力学压杆稳定问题,由公式 $\frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_p$ 或 $\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}}$ 可知: $\lambda_1 \approx 63$ 。此截面的惯性距公式 可查,将数据代入公式可得 $I_x=271$ 992。再将惯性矩 等数据代入柔度公式 $\lambda = \frac{\mu l}{i}$ 中,求得 $\lambda = 92$ 。因为 $\lambda > \lambda_1$,所以,可以用欧拉公式求临界压力。取 E=484 MPa,因为属于一端固定,另一端自由的问题,因此 将数据代入公式¹⁹ $F_{cr} = \frac{\pi E I}{(2l)^2}$ 中,求得 $F_{cr}=811$ N。其 他 2种加筋方式和未加筋的求法一致,不再赘述,计算 结果见表3。

表3 屈曲分析理论计算结果

Tab. 3 Theoretical calculation results of buckling analysis

加筋方式	未加筋	外加筋	内加筋	三角形加筋
临界压力/N	275	811	695	328

由表3的结果可以看出,加筋瓦楞的临界压力比 未加筋瓦楞的临界压力要大,即加筋后的瓦楞抗压能 力有所增强,并且外加筋方式比其他2种加筋方式的 强度要大。

2.2 加筋楞边实验屈曲分析

以未加筋的瓦楞来仿真模拟楞边的临界压力。 按Ansys求解屈曲分析的步骤方法,可以求出未加筋 瓦楞边单元网格分别为4,5,6 mm时的屈曲解,材料 类型和单元类型与BBE型瓦楞一致,图5a,b,c分别是

Ν

网格单元为4,5,6 mm时的屈曲结果。进行扩展模态 后可得其屈曲变形时的形态,图 6a 为一阶变形,表示 瓦楞边在58.902 N时的屈曲模态;图 6b,c分别为二 阶、三阶的变形,表示瓦楞边在359.341,383.723, 670.225 N时的屈曲模态。



图 5 不同单元网格划分的变形 Fig. 5 Deformation of different grid unit methods



图 6 加筋瓦楞的扩展模态 Fig. 6 Expansion mode of reinforced corrugation

其他3种加筋方式的临界载荷的求解方法与未加 筋的类似,不再赘述。将结果以表的形式列出,见表 4。表5为理论值和实验值的对照。

表4 实验屈曲分析结果

Tab. 4 Experimental results of buckling analysis

Ν

加筋方式	未加筋	外加筋	内加筋	三角形加筋
4 mm	58.90	490.88	332.27	218.73
5 mm	58.94	493.28	331.54	217.61
6 mm	58.85	490.69	331.57	216.07
平均值	58.90	491.62	331.79	217.47

观察对比3种不同加筋方式的理论结果和实验结 果,说明理论值和实验值有一定差别。这符合屈曲分 析的特点,这并不影响对3种加筋方式优劣的判断,无

表5 理论和实验的屈曲分析

Tab. 5	Theoretical	and	experimental	buckling	analysis

加筋方式	未加筋	外加筋	内加筋	三角形加筋
理论值	275	811	695	328
实验值	58.90	419.62	331.79	217.47

论理论值还是实验值的临界压力由大到小都依次为 外加筋>内加筋>三角形加筋>未加筋。可以看出,加 筋后的楞边比未加筋的楞边临界压力大,即抗压能力 增强了,最好的加筋方式为外加筋。

3 外加筋的实例应用

七层瓦楞纸箱主要用于集装大型的电器设备。以 HDE1109智能坐便器为例,产品毛质量为61.9 kg,产品 净质量为53.9 kg。分别用加筋瓦楞和未加筋瓦楞对 HDE1109进行包装,在Ansys中仿真时,将模型进行简 化,利用对称性原则,模型取原来的1/4进行分析。材 料类型和单元类型的选取和BBE型瓦楞一致,网格单 元大小为9 mm,施加楞面上的载荷为原来的1/4,对称 面上要施加对称条件。求解后的结果见图7,为堆码5 层时的应变图。外加筋瓦楞的最大变形位移为0.4343 mm,未加筋瓦楞的最大变形位移为1.418 mm,由此可



图7 瓦楞纸箱加筋前后应变

Fig.7 Strain diagram of reinforced and unreinforced corrugated boxes

知加筋后的瓦楞强度比加筋前的强度要大。由此可见,加筋后对瓦楞强度有一定的增强。

4 结语

利用有限元软件对常见七层瓦楞组合进行仿真 分析,对瓦楞组合的选取有一定的理论指导。对3种 加筋方式进行理论实验比较,可知适当加筋能提高瓦 楞的强度,外加筋为最好的方式。

参考文献:

[1] 贾丽平. 瓦楞纸箱抗压强度的试验研究与有限元分析[D]. 西安:陕西科技大学,2012.

JIA Li-ping. Experimental Study and Finite Element Analysis of the Compressive Strength of Corrugated Box[D]. Xi' an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.

[2] 方艳平. 瓦楞纸箱抗压试验研究与有限元分析[D]. 广州: 暨南大学,2011.

FANG Yan-ping. Experimental Research Corrugated Box Compression and Finite Element Analysis[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.

- [3] NORDSTRAND T, ALLANSSON A. Stability and Collapse of Corrugated Board Panels, Numerical and Experimental Analysis[C]//Proceedings of 6th International Conference on Sandwich Structures, USA, Florida, 2003.
- [4] 孟超莹. 瓦楞形状对瓦楞纸板力学性能的影响分析[D]. 武 汉:武汉理工大学,2010.
 MENG Chao-ying. Influence on the Mechanical Properties of Corrugated Shape of Corrugated Board Analysis[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2010.
- [5] 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 Xiao-li. Finite Element Analysis and Experimental Study of Corrugated Boxes[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.

- [6] 罗玲. 瓦楞纸箱抗压强度研究[D]. 广州:暨南大学,2010.
 LUO Ling. Compressive Strength of Corrugated Box[D].
 Guangzhou: Jinan University, 2010.
- [7] 袁国娜. 瓦楞纸板托盘的结构及其性能研究[D]. 无锡:江 南大学,2008.

YUAN Guo-na. Structure and Properties of Corrugated Board Tray[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.

[8] 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,2009.

ZHAO Liang. Finite Element Model of Corrugated Board Flute Studies[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.

- [9] 严圣平. 材料力学[M]. 北京:科学出版社,2012.
 YAN Sheng-ping. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Science Press,2012.
- [10] 马宴苹. AB型双瓦楞纸板衬垫缓冲性能的试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.

MA Yan-ping. Experimental Research of AB Double Corrugated Cardboard Pad Cushioning Performance[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.

[11] 刘伯. 瓦楞纸板力学性能的有限元分析[D]. 西安: 西安理 工大学, 2004.

LIU Bo. Corrugated Board Mechanical Properties of Finite Element Analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.

[12] 车庆浩. 新型四层瓦楞纸板结构的性能研究及灰色分析 [D]. 天津:天津科技大学,2005.

CHE Qing-hao. Study the Performance of the new Four-story Structure of Corrugated Board and Gray Analysis[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2005.

[13] 应祖光,邱吉宝.加筋瓦楞纸板的承压能力分析[J].包装工程,1994,15(4):154—156.

YING Zu-guang, QIU Ji-bao. Reinforced Corrugated Cardboard of Bearing Capacity Analysis[J]. Packaging Engineering, 1994, 15(4):154—156.

Bearing Capacity[J]. Packaging Engineering, 1990, 11 (2) : 19–22.