

基于有限元分析的瓦楞纸板包装设计

李鸿明¹, 钟鸣², 周义³

(1.东莞职业技术学院, 东莞 523808; 2.广州市包装印刷集团有限责任公司, 广州 510120;
3.广州市帝盛广告有限公司, 广州 510900)

摘要: **目的** 开发一种瓦楞纸板包装设计的集成设计方法。**方法** 通过一系列有限元分析软件 ABAQUS 的应用实例, 来展示瓦楞纸板包装的有限元集成设计方法。**结果** 采用该集成设计方法开发出了 2 种常用的瓦楞纸板包装: B1 型纸箱和农用盘式纸箱。**结论** 通过 2 类盒型包装设计实例并利用 ABAQUS 模拟技术所提供的夹层包装结构材料的简化模型, 这一集成设计方法可扩展应用到不同种类的瓦楞纸板包装设计中。

关键词: 瓦楞纸板; 包装设计; 集成设计方法; 纸箱压缩

中图分类号: TB482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)15-0137-06

Corrugated Board Package Design Based on the Finite Element Analysis

LI Hong-ming¹, ZHONG Ming², ZHOU Yi³

(1.Dongguan Polytechnic, Dongguan 523808, China; 2.Guangzhou Packaging & Printing Group Co., Ltd., Guangzhou 510120, China; 3.Guangzhou Disheng Advertising Co., Ltd., Guangzhou 510900, China)

ABSTRACT: The work aims to develop an integrated design methodology of corrugated board package. Through a series of application examples for finite element analysis software ABAQUS, the finite element integrated design methodology of the corrugated board package was presented. Such integrated design methodology was used to develop two commonly used corrugated board packages: B1 boxes and agricultural disc boxes. Through these two kinds of box design examples and the simplified model of sandwich materials provided by using ABAQUS simulation technique, the integrated design methodology can be extensively applied in different kinds of corrugated board package designs.

KEY WORDS: corrugated board; package design; integrated design methodology; box compression

有限元的模拟技术已经广泛应用到各包装工业领域的结构分析中,它是“虚拟样机”的基础。从最初的土木工程、航空和汽车工业,到现今的电子、医疗器械、包装,特别是瓦楞纸箱包装设计中有限元模拟技术都得到了广泛的应用。一般说来,压缩强度是包装容器最重要的力学参数,至少对于应用到运输和存储的所有包装容器来说该参数的要求是最基本的。在堆码中纸箱必须支撑起上面所有纸箱的重量。最早瓦楞纸箱包装中将有限元方法视为一种代替传统半经验公式的工具^[1]。后来出现了使用数值模拟技术预测纸箱包装压缩强度的改进方法,并将该方法扩张应用

到不同类型的包装设计上^[2-4]。

相比其他领域,在瓦楞纸板行业中引入有限元分析要缓慢得多,主要原因在于纸和瓦楞纸板结构的复杂性,正确模拟需要专用材料模型或先进有限元技术。尽管开始缓慢,但有限元技术在瓦楞纸板包装中的应用发展快速,类似瓦楞纸板的复合材料及其层合板结构的先进模型已经得到了充分利用。文中总结了用于瓦楞纸板包装结构分析和包装设计的相关模拟技术,主要目标在于提供一种开发的模拟方法,该方法将 ABAQUS 软件应用到瓦楞纸板包装设计开发中,并展示相关包装设计实例。

收稿日期: 2017-05-11

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划青年基金(15YJC760007); 广东省科技厅省部产学研结合项目(2012B040500007); 广东省教育厅质量工程研究项目(GDJG2015002)

作者简介: 李鸿明(1981—),男,硕士,东莞职业技术学院副教授,主要研究方向为包装设计。

1 瓦楞纸板包装有限元模拟的一般方法

1.1 纸力学行为的模拟

制造过程导致纸属于各向异性材料,在3个主方向具有不同的力学性能,3个主方向分别为厚度方向(ZD)、垂直于转棍的共面方向即加工方向(MD)和垂直于MD的共面方向即横向(CD)^[5]。除了各向异性以外,纸的行为还有2个另外的特性使得简单材料模型不能模拟:高度的非线性;MD和CD这2个方向的拉压性能区别大。

纸的其他特性会增加模拟的复杂性,如明显的蠕变,力学性能对湿度依赖性强,遇湿膨胀性等。各向异性、非线性和拉压性能的差异在室温控制下的包装纸盒压缩测试(BCT)中起到重要作用,因此,对纸力学性能的模拟常采用用户所开发的材料模型^[6-7]。在文中展示的包装例子中,模拟通过ABAQUS/Standard和ABAQUS/Explicit的UMAT和VUMAT用户子程序来完成,壳单元所要求的横向剪切强度值是通过纸的异面剪切弹性模量计算出的。该模型的可靠性利用边压测试(ECT)和平压测试结果(FCT)进行了验证^[4-8]。

图1展示了通过ABAQUS/Explicit对单瓦楞模型

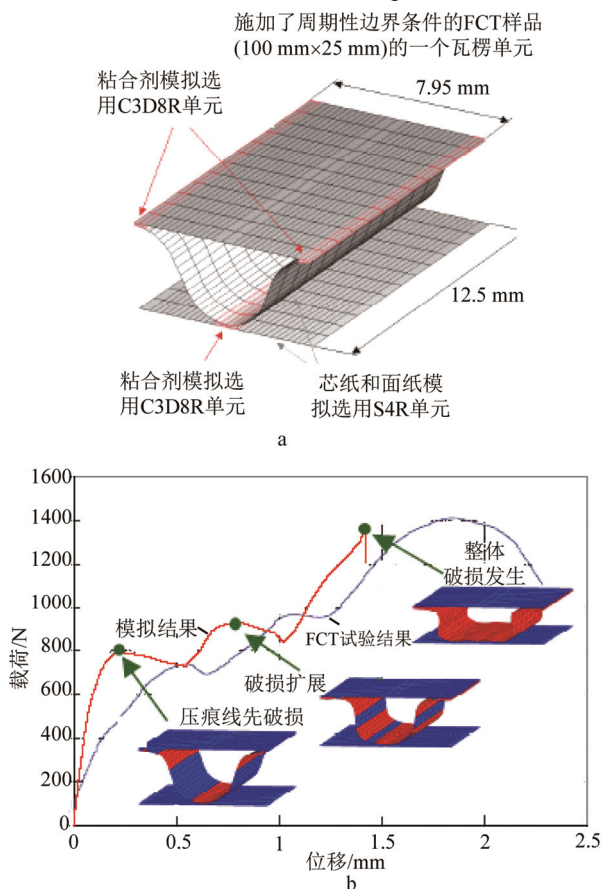


图1 单瓦楞 FCT 模拟结果和试验结果的对比

Fig.1 Comparison of simulation and experimental results for FCT of single flute paperboard

的 FCT 模拟验证了纸张材料模型的可靠性,其中对所有边施加了对称性的边界条件,对应该单瓦楞 FCT 试样外形尺寸为 100 mm×25 mm。结果显示在应变达 10%前出现 3 个载荷峰值。由于各种原因,如纸张粘合剂和异面行为的模拟简化,使得位移的模拟结果更高。

如下所述展示了农产品装载托盘,除了 BCT 要求外,还有另一重要的要求,即持续载荷或蠕变条件下的“底部凹陷”,这一要求是以位移而不是强度来衡量的。为了考虑蠕变,纸的材料模型也加入了持续载荷条件下的粘弹性应变,选定的包装材料模型是基于 Coffin 等式的蠕变模型^[9]。使用单瓦楞在不同拉伸破坏应力百分比下的拉伸的模拟结果见图 2,并直接与试验结果进行了对比,验证了其可靠性。

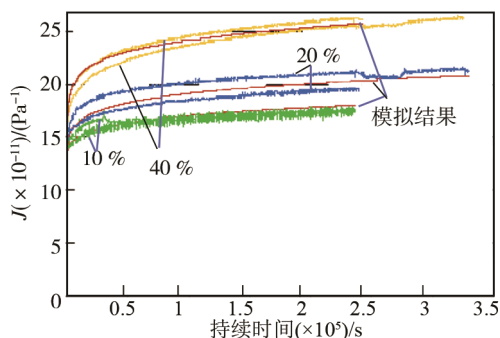


图2 一种样品纸的蠕变特性结果及相应蠕变模型的试验验证

Fig.2 Results of creep characterisation of a sample paper and validation of user creep model for paper through tensile patch test

为了获得更高的计算效率,文中所提有关 BCT 模拟和底部凹陷分析的方法利用 ABAQUS/Standard 软件进行^[10]。任何情况下,在初始阶段 ABAQUS/Explicit 软件也可以用于关于时间的模拟计算中。

2.2 简化的层合包装材料模型

瓦楞纸板包装结构的芯纸和面纸采用三维壳单元来模拟,见图 3,与实际不符。基于三维壳的瓦楞包装结构模拟效率问题不仅与时间有关,而且还与包装结构的复杂性模拟细节有关。另外,必须注意纸板强度分析需要进行非线性有限元分析。瓦楞板包装详细的结构,有限元模拟模型是难以试验测量的,但考虑到包装种类的多样性对整个包装的模拟也是不现实的,故模拟的难度不仅与计算本身有关,还与几何模型的复杂性有关。

模拟中瓦楞纸板包装被简化为由薄的面纸和芯纸复合而成的包装层合板结构。从结构形式上来说瓦楞纸板常被视为带有非连续芯的夹层结构,类似于带有蜂窝芯的蜂窝板结构。模拟的第 1 步是将实际瓦楞芯结构转化为具有等价力学性能参数的连续体,就可

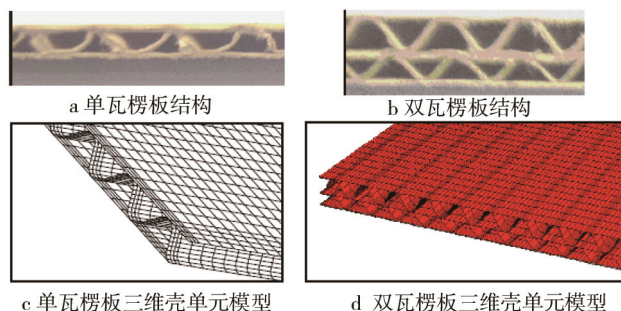


图 3 单双瓦楞板包装的结构及相应的三维壳单元模型
Fig.3 Pictures of single flute and double flute corrugated board and corresponding 3D-shells models

以使用各种用在夹层板结构分析中的各种技术,如层状固体、多层壳、分层连续壳或各种方法的组合。为了降低连续体简化而导致的共面弯曲行为的误差以及横向剪切特性, Nordstrand 采用了几种方法^[11]。文中横向剪切模量的估计是通过如图 4 所示的瓦楞板的模拟得到,该平板模型尽管不适合于最终包装的模拟,但对等价特性参数的确定易于参数化和自动化。

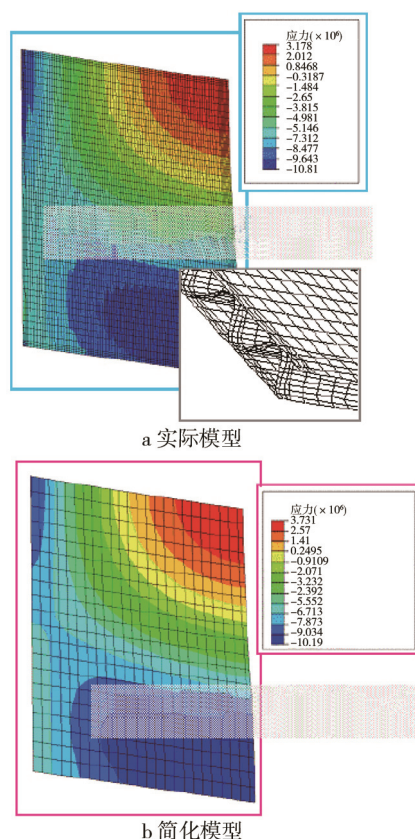


图 4 包含瓦楞芯纸包装的实际模型和等价的简化模型 CD 方向的应力值比较
Fig.4 Comparison of CD stresses between detailed model including corrugated flute geometry and equivalent composite model

一旦瓦楞芯连续体等价参数被确定后,瓦楞板包装模拟最有效的单元是考虑横向剪切模量的 S4R 单元。当然也可以采用其他方法,例如采用实体单元或

采用多层的实体单元 (C38R)。在瓦楞板非线性屈曲分析中面纸 CD 方向的应力见图 4。采用 S4R 单元的实际包装模型的分析结果见图 4a,采用单层 S4R 单元的并将芯简化连续体的复合壳模型分析得到的结果见图 4b。实际模型的模拟需要对其网格划分尺寸施加许多限制,在同样划分精度下,实际模型的计算结果要比简化模型的低 6%。

包装简化模型尽管简单,但当进行破损预测时,该模型就会存在问题。图 5 的实际模型可直接用来预测局部的不稳定性,但没有考虑瓦楞构型的包装简化模型的本地屈曲,分析实现起来就没有这么简单。

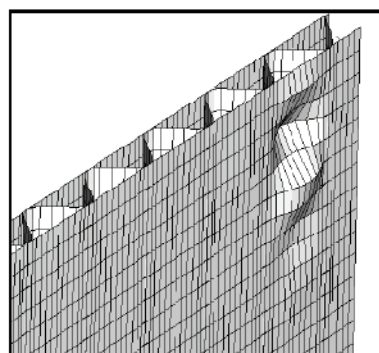


图 5 可进行局部屈曲预测的实际模型
Fig.5 Detailed FE model for local buckling prediction

纸张强度分析中最常用的破损准则是 Tsai-Wu 破损准则。纸是瓦楞纸板的一部分,破损准则也要考虑面纸的局部屈曲,引起屈曲的载荷明显低于强度破损。在简化模型中可考虑局部屈曲,其破损准则是带有局部屈曲准则的 Tsai-Wu 破损准则。瓦楞形状的不同,该方法对于不同的瓦楞纸板需要专门确定不同的屈曲准则^[3]。模拟方法的开发和验证需要大量试验数据的支撑,这些试验数据涉及了包装这一层次,也涉及了瓦楞板包装的共面压缩等。

2.3 单元类型的选择

等价的简化模型不仅可以采用多层壳单元,还可以采用不同单元的组合,例如面纸采用壳,芯采用实体单元或多层实体。在任何有限元模拟中正确的单元选择是至关重要的,例如 Jiménez 为瓦楞板的弯曲模拟选择了合适的单元类型^[4]。纸箱底部凹陷分析需要进行弯曲模拟,因此横向剪切强度在此起重要作用。不是用于简化模型的所有单元都在同一精度下考虑了横向剪切强度,它们也没有完全考虑到瓦楞板薄的特性。文中研究的结果显示,对于单瓦楞板来说采用连续体模型利用带有简化积分点的复合厚壳单元 (S4R) 来划分网格是最有效的建模方式。对于双瓦楞板来说,通常是在承载托盘的案例中,纸板的横向剪切和薄的特性得到了明显增强,模拟至少要采用带有简化积分点的四层复合壳(SC8R)。单双瓦楞的区别

见图 6。图 6a 显示了复合壳是如何准确得到单瓦楞板强度的, 图 6b 显示了同种单元在双瓦楞分析显得

太过“生硬”, 图 6c 使用四层的复合连续壳单元(SC8R)可以解决该问题。

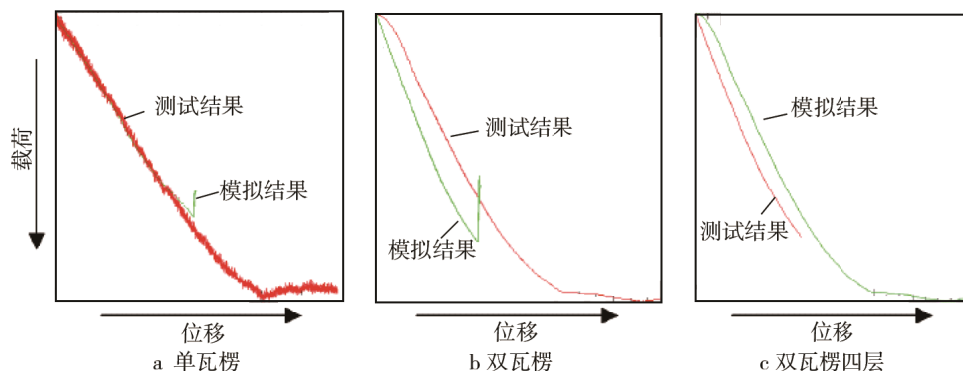


图 6 不同类型的等价复合简化模型的弯曲强度预测能力的比较

Fig.6 Comparison of flexural stiffness prediction capabilities for different types of equivalent composite models

3 B1 型纸箱纸的选择和农用盘式纸箱包装中的应用

3.1 BCT 试验的模拟

在瓦楞纸板包装中, BCT 值是包装容器最重要的特性值, 它是在一定温度和湿度条件下包装容器置于万用测试仪器 2 个刚性板间, 在静态压缩载荷作用下测得的最大载荷值。就包装功能来说, BCT 值指的是包装抵御堆码中上层重量的承载能力。图 7 是模拟 B1 型纸箱 BCT 测试的有限元模拟结果及其试验破损模式, 两者吻合性较好。

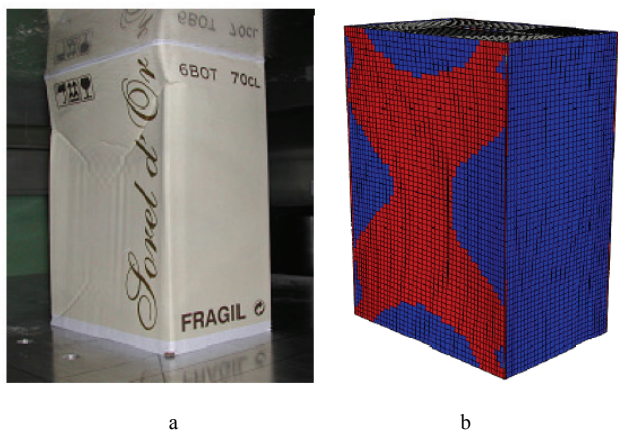


图 7 BCT 模拟和试验结果的比较

Fig.7 Comparison of BCT simulation with experiment result

示例中, 连接部分采用连接单元, 而不是采用施加约束的方式来模拟。图 8 中的有限元模型的单元有壳单元(S4R)和连接单元(CONN3D2)。连接部分的力学参数是参考 Beldie 等的研究, 对纸箱折线部分进行相关试验测试后确定的^[12-15]。该模拟的更大复杂性在于纸箱摇翼及其与压板之间接触的定义。该模拟涉

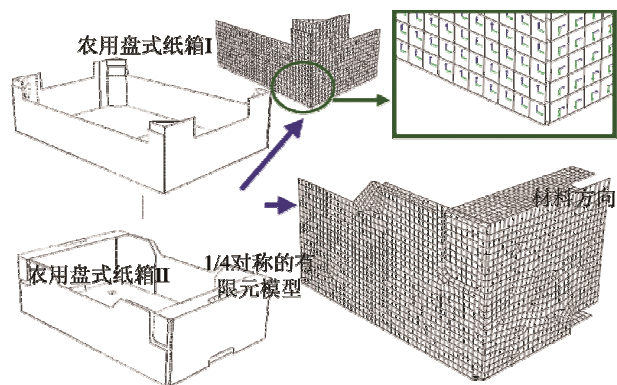
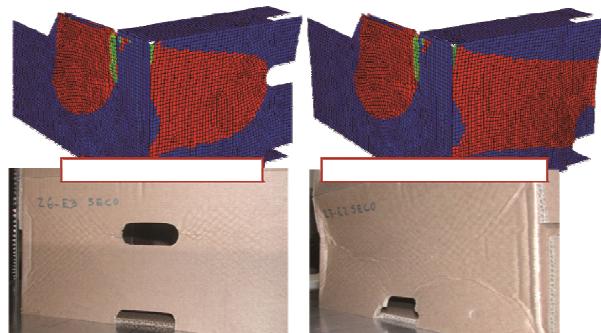


图 8 用来装载农产品的农用盘式纸箱包装的有限元模型

Fig.8 FE models of carrying trays for agricultural products

及了局部材料的破损和整体的不稳定性及其屈曲变形, 所以要考虑纸箱的几何不完整性。通常 B1 型纸箱在高度上是对称的, 故可仅分析纸箱的上半部分。农用盘式纸箱是四周对称的, 可仅分析其 1/4, 见图 8。农用盘式纸箱包装的有限元模拟见图 9, 分为 2



a 带有手抓孔和通风口的纸箱 b 带有放大的通风口的纸箱

图 9 用带有不同形状通风口和手抓孔的农用盘式纸箱的整体破损面积的预测和验证

Fig.9 Validation and prediction of global failure areas in agricultural trays with different geometry for venting and carrying holes

种情形,第1种在纸箱包装侧面有手抓孔和底部的通风口,第2种仅仅是放大了通风口。该模拟得到的纸箱包装 BCT 载荷值、破损面积和破损模式得到了试验的全面验证。

按上述方法进行的模拟结果比 BCT 的试验数据低,有 10% 的误差。考虑到关于材料行为和破损模式,折叠压痕线的力学行为以及整体非线性屈曲行为带来的模拟复杂性,该误差是非常低的。不同包装所有模拟细节的验证需要大量的试验检测数据,其中异面位移和局部屈曲产生的测试需要高速摄像机。

3.2 农用盘式纸箱包装的底部凹陷模拟

农用盘式包装托盘也可以采用层合板模型进行模拟,其设计目标就是要避免过量位移而导致托盘底部与产品的触底现象,所以需要考虑初始载荷施加后的蠕变位移。对于图 10 的模拟进行了相关试验,测量了箱底中心的位移。载荷由装满产品的箱中袋施加,载荷较均匀地施加到箱底。载荷是静态载荷,并指明了持续时间。纸张材料选用 Coffin 模型。关于蠕变位移的模拟和试验结果尽管存在一定差异但吻合较好,这种差异主要源于实际箱底不平整导致支撑载荷不均匀。

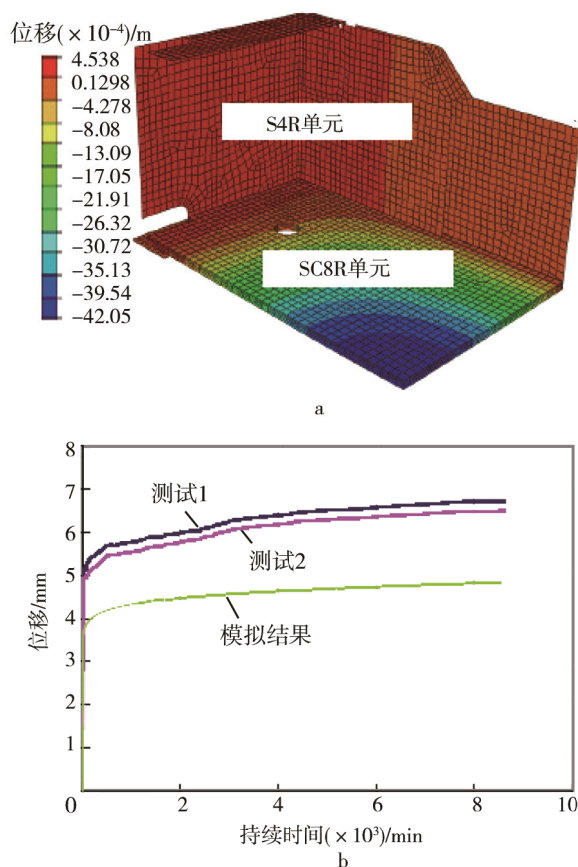


图 10 随时间农用盘式纸箱底部凹陷模拟与试验结果的比较

Fig.10 Simulation of bottom sag in agricultural creep and comparison to experimental results in terms of displacement increase in time

4 其他包装设计的应用案例

瓦楞纸板的有限元分析不仅仅局限于 B1 箱和农用盘式纸箱包装设计中。使用简化的复合三维壳单元进行建模,对于大多数分析来说精度足够。洗涤剂包装用瓦楞筒的模拟和试验结果见图 11,表明模拟结果对破损模式预测较好。

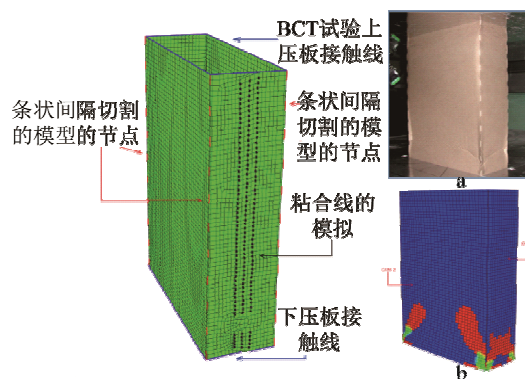


图 11 洗涤剂包装用瓦楞筒的 BCT 试验模拟
Fig.11 Simulation of BCT of corrugated tube for the washing powder packaging

市场和包装设计的个性化发展产生了多样化的包装,瓦楞板始终是一种有效而环保的包装材料,可制瓦楞纸板销售包装。该瓦楞纸箱沿表面进行条状间隔切割形成“撕裂条”,销售时可破坏撕裂条去掉顶部形成销售包装箱。该包装箱首先可做运输包装,而后去掉顶部后用作销售包装。采用 ABAQUS 模型模拟条状间隔切割线对瓦楞纸箱破损模式的影响,作为比较并绘制了对应完好纸箱的分析结果,见图 12。该模型可用于分析条状切割线的不同设计对最终 BCT 性能的影响,其目标就是要保持最高的 BCT 值。

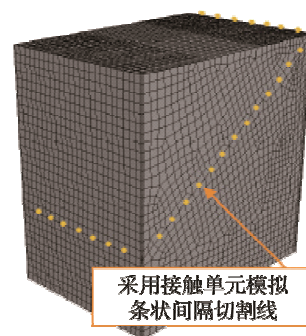


图 12 考虑条状间隔切割线的瓦楞纸箱销售包装 BCT 有限元模型

Fig.12 BCT FE model of corrugated sell box with stepped-cuts design

5 结语

模拟瓦楞纸板包装的流程和单元种类多样,使得

可用建模方式多样化。ABAQUS 为瓦楞纸板的包装设计和模拟提供了解决方案。文中展示的结果表明了 ABAQUS 可以采用从连续体到考虑楞型的包装设计实际模型的解决方案,在给定的某种性能要求下可设计包装的结构尺寸。有限元分析软件特别是 ABAQUS 具有先进的性能,可为瓦楞板包装提供更多的应用,例如纸箱白装生产过程分析,从微结构上来分析纸张宏观性能等。

参考文献:

- [1] KEE R C M, GANDER J W, WACHUTA J R. Compression Strength Formula for Corrugated Board[J]. Paperboard Packaging, 1963, 48(8): 149—159.
- [2] GILCHRIST A C, SUHLING J C, URBANIK T J. Nonlinear Finite Element Modeling of Corrugated Board[C]// The 1999 ASME Joint Applied Mechanics Division Meeting, Blacksburg, Virginia, USA, 1999: 27—30.
- [3] BIANCOLINI M E, BRUTTI C. Numerical and Experimental Investigation of the Strength of Corrugated Board Packages[J]. Packaging Technology and Science, 2003, 16(2): 47—60.
- [4] JIMÉNEZ M A, LIARTE E. Simulation of the Edge Crush Test of Corrugated Paperboard Using ABAQUS[C]// ABAQUS World Users Conference, Munich, 2003.
- [5] BAUM G A, BRENNAN D C, HABEGER C C. Orthotropic Elastic Constants of Paper[J]. TAPPI Journal, 1981, 64: 97—101.
- [6] ISAKSSON P, HÄGGLUNDB R, GRADINA P. Continuum Damage Mechanics Applied to Paper[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(16/17): 4731—4755.
- [7] ALFTHAN J, GUDMUNDSON P. Linear Constitutive Model for Mechano-sorptive Creep in Paper[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(24): 6261—6276.
- [8] BIELSA J M, RODRIGUEZ R, VILA L, et al. Parametrized Finite Element Analysis of Tribological Instabilities on Polymer-metal Sliding Contacts[J]. Springer Netherlands, 2006: 305.
- [9] COFFIN D W. The Creep Response of Paper[C]// 13th Fundamental Research Symposium, Cambridge, 2005: 651—747.
- [10] BREZINSKI J P. The Creep Properties of Paper[J]. TAPPI Journal, 1956, 39(2): 116—128.
- [11] NORDSTRAND T, CARLSSON L A. Evaluation of Transverse Shear Stiffness of Structural Core Sandwich Plates[J]. Composite Structures, 1997, 37(2): 145—153.
- [12] BELDIE L, SANDBERG G, SANDBERG L. Paperboard Packages Exposed to Static Loads-Finite Element Modelling and Experiments[J]. Packaging Technology & Science, 2001, 14(4): 171—178.
- [13] 李小丽, 郭彦峰. 瓦楞纸箱在运输包装系统中的应用与设计[J]. 包装工程, 2006, 27(3): 126—127.
LI Xiao-li, GUO Yan-feng. The Application and Design of Corrugated Box in the Transport Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2016, 27(3): 126—127.
- [14] 缪丽娜, 仲金泉, 张新昌. 瓷砖产品的全瓦楞纸板缓冲包装设计[J]. 包装工程, 2010, 31(21): 65—68.
MIAO Li-na, ZHONG Jin-quan, ZHANG Xin-chang. The Tile Products' Whole Corrugated Board Buffer Packaging Design[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(21): 65—68.
- [15] 何璐. 瓦楞纸板在现代包装设计中的运用[J]. 学术评论, 2009(1): 260—261.
HE Lu. The Application of Corrugated Cardboard in Modern Packaging Design[J]. Academic Review, 2009(1): 260—261.