

结构设计制造

灶具包装设计及鼓包问题研究

李志强, 李巧

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 设计一款缓冲包装, 以解决在实际物流过程中出现的灶具包装鼓包问题。 **方法** 采用发泡聚苯乙烯 (EPS) 与天地盖纸箱相结合的方案对灶具包装进行优化设计; 在 Ansys Workbench 有限元软件中建立灶具、缓冲衬垫和瓦楞纸箱的有限元模型, 通过有限元软件模拟灶具在运输、堆码过程中受压时纸箱的变形情况, 并与试验结果进行对比; 分析包装的缓冲效果, 验证包装方案对产品鼓包的改善情况。 **结果** 在压板上施加 11 kN 压力后, 旧方案纸箱整体最大变形量为 19.78 mm, 在 z 轴方向, 纸箱最大变形量为 3.79 mm, 在 x 轴方向, 纸箱最大变形量为 2.57 mm。新方案纸箱整体最大变形量为 9.17 mm, z 方向最大变形量为 0.50 mm, 在 x 轴方向, 纸箱最大变形量为 0.32 mm, 可见改善明显。玻璃面板、承液盘、底盘等易损部件的实际应力均小于许用应力, 且新方案各部件的实际应力低于旧方案, 与试验结果相符。 **结论** 新包装能够满足灶具在实际流通过程中的缓冲要求, 并能有效改善产品鼓包情况。

关键词: 缓冲包装; 有限元分析; 鼓包

中图分类号: TS206 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0137-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.018

Packaging Design and Bulging of Cookers

LI Zhi-qiang, LI Qiao

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to design a cushioning package to solve the problem of cooker packaging drum in the actual logistics process. EPS foam and the cover of the heaven and earth were adopted to optimize the design of cooker packaging. The finite element model of the stove, buffer cushion and corrugated box was established in the Ansys Workbench finite element software. The finite element software was used to simulate the deformation of the carton during the transportation and stacking process and compared with the test results. The buffering effect of the package was analyzed to verify the improvement of the package scheme on the product bulging. After 11 kN pressure was applied on the pressing board, the maximum deformation of the old scheme carton was 19.78 mm, 3.79 mm in z axis direction and 2.57 mm in x axis direction. The maximum overall deformation of the new scheme carton was 9.17 mm, 0.50 mm in z direction and 0.32 mm in x direction. The actual stress of the wearing parts such as the glass panel, the liquid receiving tray and the chassis was less than the allowable stress, and the actual stress of each component of the new scheme was lower than the old scheme, which was consistent with the test results. The new packaging can meet the buffer requirements of the cooker in the actual circulation process, and can effectively improve the product drum package.

KEY WORDS: cushioning packaging; finite element analysis; bulging

随着社会经济的发展, 人民群众的生活水平显著提高, 对厨房电器的体验也提出了更高的要求。灶具

作为厨房必需品, 在人们的生活中有着不可替代的作用。如何优化其包装设计, 降低运输过程中途的损坏

收稿日期: 2018-09-06

作者简介: 李志强 (1976—), 男, 副教授, 主要研究方向为包装测试、信号采集与虚拟仪器等。

率具有重要研究意义。目前,国内厨电行业首选的包装材料以发泡聚苯乙烯(EPS)和瓦楞纸箱为主^[1-2],其分别具有缓冲性能良好、模塑易成型、成本低廉和轻便、易加工、可折叠、吸能性好、绿色可循环的优势。目前国内恶劣的物流环境、灶具扁平的结构特点给此类包装设计带来了诸多挑战^[3],其中以瓦楞纸箱的鼓包问题最为突出。灶具在运输过程中,因内装物和周边纸箱产生的静载荷及纵向和横向加速度产生的动载荷达到了纸箱破损时的最大负载荷,箱面中央变形最大,纸箱四周的折痕似抛物线为鼓出状^[4],纸箱被压溃,形成鼓包。这不仅会造成产品损坏增加成本,更会使消费者产生产品质量低劣的疑虑,严重影响产品的用户体验,损害企业的声誉^[5-6]。产品缓冲包装设计不合理、仓储环境湿度较大、堆码层数超过设计层高、装卸搬运时的野蛮操作都是造成产品鼓包的重要原因。为了改善这一现象,文中拟针对某款灶具进行缓冲包装设计,利用 Ansys Workbench 对新旧方案进行仿真分析,并与试验结果进行对比,验证优化后的方案对产品包装箱鼓包现象的改善情况。

1 灶具缓冲包装设计

1.1 灶具结构及尺寸

文中选用的包装对象是市场常见的双炉头燃气灶,产品结构见图1,尺寸规格为730 mm×410 mm×135 mm,质量约为11.50 kg。

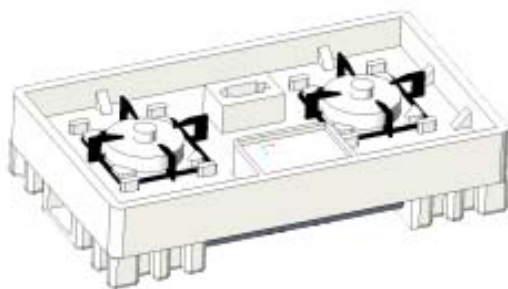


图1 灶具结构
Fig.1 Stove structure

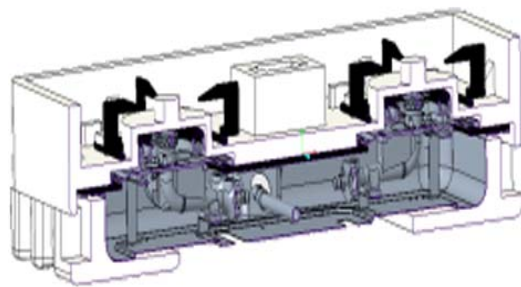
1.2 缓冲包装设计

目前灶具缓冲衬垫结构见图2,上泡沫与左右泡沫通过卡扣的结构接触,上泡沫上表面凹陷,四周宽度为20 mm的凸缘与纸箱接触起支撑作用,下表面与产品的玻璃面板直接接触。纸箱结构为0201型。

为了增加内装物在堆码时对包装箱的支撑作用,上泡沫上表面平整,与左右泡沫齐平,同时与纸箱接触;上泡沫与左右泡沫通过相嵌的方式接触,下表面与灶具产品的承液盘接触。优化设计后的缓冲衬垫结构见图3,纸箱选为扁平结构中支持性更优的天地盖纸箱。

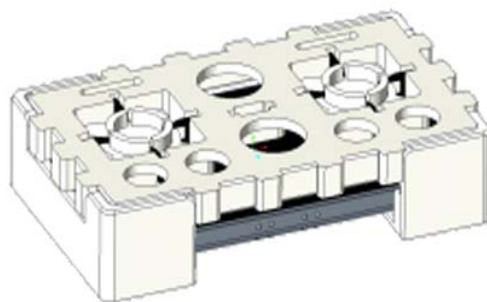


a 原衬垫整体

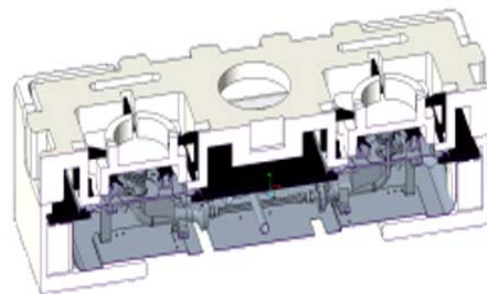


b 原衬垫剖视

图2 原缓冲衬垫模型
Fig.2 Original cushion pad model



a 新衬垫整体



b 新衬垫剖视

图3 新缓冲衬垫模型
Fig.3 New cushioning pad model

2 灶具有限元分析

2.1 灶具及纸箱实体模型简化

由于灶具结构复杂,直接进行网格划分具有一定困难,且会增加单元计算量,影响结果准确性,因此不能按照实体结构直接进行有限元分析。文中对实体

模型进行了合理简化,省略对灶具有限元分析影响不大的小部件、孔和工艺特征等,灶具简化后零件数量由 51 个下降到 33 个,模型见图 4。

灶具的纸箱为 UV 型 BC 楞瓦楞纸箱,在仿真过

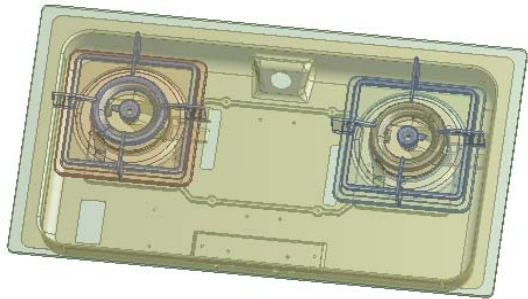


图 4 灶具有限元模型
Fig.4 Cooker finite element model

程中,对波浪状的瓦楞曲面网格划分和计算,但求解复杂并且低效^[7]。为了保证运算的准确性并提高运算效率,需要对纸箱模型进行一定程度的简化,采用相同厚度的纸板代替瓦楞结构。文中主要研究纸箱的抗压强度,因此简化了 0201 型纸箱,取消其短摇盖,模型见图 5。

2.2 材料属性设定

瓦楞纸板是一种具有粘-弹-塑性的非金属夹层结构材料,是由一层或多层波纹型芯纸和面纸粘合而成,为正交各向异性材料^[8]。在 Ansys 仿真分析时因对模型进行了简化,需根据面纸和芯纸的材料参数计算出瓦楞纸等效的模型参数。面纸、芯纸材料参数^[9—10]见表 1。

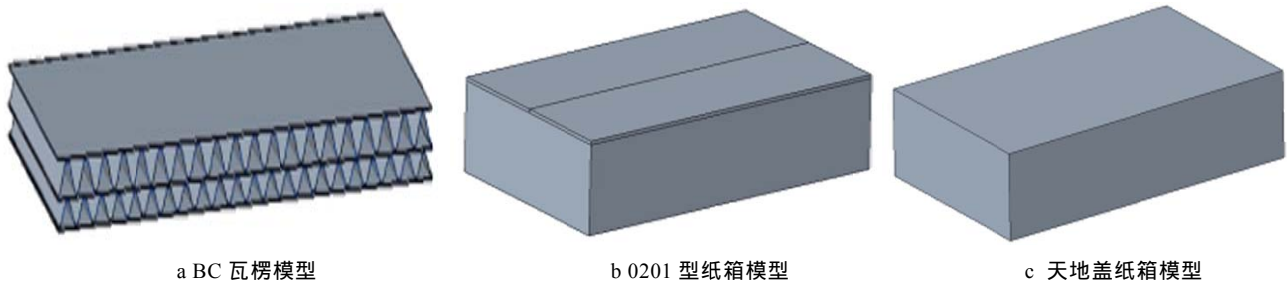


图 5 纸箱有限元模型
Fig.5 Carton finite element model

表 1 瓦楞纸板材料参数
Tab.1 Corrugated board material parameters

材料参数	E_x/MPa	E_y/MPa	E_z/MPa	厚度/mm
面纸	7600	4020	38	0.269
芯纸	5400	2280	27	0.263

瓦楞纸板 x 方向等效弹性模量的计算式为：

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n E_{fxi} t_i}{H} \tag{1}$$

式中： E_f 为单层面纸的等效弹性模量； E_{fxi} 为第 i 层面纸 x 方向的等效弹性模量； t_i 为第 i 层面纸的厚度； n 为面纸的层数； H 为瓦楞纸板的总高度。

瓦楞纸板 y 方向等效弹性模量的计算式为：

$$E_y = \frac{\sum_{i=1}^n E_{fyi} t_i + \sum_{j=1}^m c_j E_{cyj} t_{cj}}{H} \tag{2}$$

式中： c_j 为第 j 层芯纸的展开系数； E_{cyi} 为第 j 层芯纸 y 方向的等效模量； t_{cj} 为第 j 层芯纸的厚度； m 为芯纸的层数。

瓦楞纸板 z 方向等效弹性模量的计算式^[11]为：

$$E_z = \frac{E_x}{200} \tag{3}$$

瓦楞纸板等效剪切模量的计算式^[12—13]为：

$$G_{yz} = \frac{E_y}{35} \tag{4}$$

$$G_{xz} = \frac{E_x}{55} \tag{5}$$

$$G_{xy} = 0.387 \sqrt{E_x E_y} \tag{6}$$

通过计算及参考文献[14]可知瓦楞纸箱等效模型参数见表 2。产品其他零件材料特性见表 3。

2.3 网格划分

文中采用自动划分网格的方法,可以降低网格划分难度,提高效率。根据研究产品的抗压情况,细化纸箱、泡沫、玻璃的网格尺寸,网格边长设置为 15 mm,以保证计算精度。产品新旧方案网格分别包含 346 194 和 338 044 个网格节点、174 792 和 166 123 个网格单元。

表 2 瓦楞纸箱等效模型参数
Tab.2 Corrugated box equivalent model parameters

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	E_x/MPa	E_y/MPa	E_z/MPa	V_{xy}	V_{xz}	V_{yz}	G_{xy}/MPa	G_{yz}/MPa	G_{xz}/MPa
150	876.20	709.30	4.38	0.34	0.01	0.01	305.10	20.30	15.90

表 3 产品部分零部件模型参数
Tab.3 Model parameters of part of components in product

零件名称	材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
缓冲衬垫	发泡聚苯乙烯	21.5	0.0041318	0.1
玻璃面板	玻璃	2460	68.9	0.23
底盘	ST12	7850	230	0.3
密封条	丁晴橡胶	1300	0.00784	0.47
锅支架	Q235A	7860	212	0.288
承液盘	不锈钢	7800	210	0.3
燃烧气组件	不锈钢	7800	210	0.3
外环、内环、火盖	Hpb59-1	8500	105	0.324
旋钮组件	锌合金	6600	85	0.3

2.4 定义载荷和约束

根据实际流通过程中的情况及式(7)

$$P = KG(H_0 - h)/h \quad (7)$$

式中: K 为强度安全系数; G 为包装件的重力; H_0 为堆码高度; h 为包装件高度。

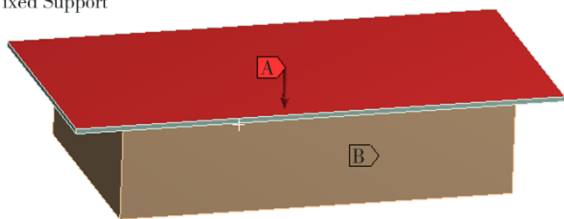
计算出产品堆码强度为 11 kN。在产品顶部加一压板,并将压板定义为刚性体,在压板上表面施加远程力(Remote Force),方向垂直向下。在实际过程中,纸箱底部不发生位移,因此对底面进行固定约束(Fixed Support),以约束其各个方向的自由度,见图 6。

3 结果分析

3.1 仿真结果

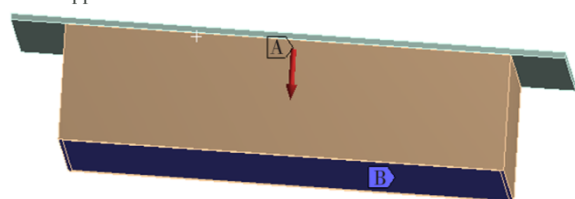
沿 y 轴方向对压板施加压力 11 kN,由仿真结果

Remote Force: 110 00 N
Fixed Support



a 旧方案模型

Remote Force: 110 00 N
Fixed Support

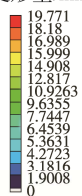


b 新方案模型

图 6 产品受力模型

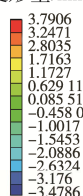
Fig.6 Product stress model

变形量/mm



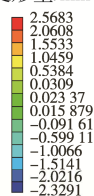
a 纸箱整体变形量

变形量/mm



b z方向变形量

变形量/mm



c x方向变形量

图 7 旧方案纸箱变形量

Fig.7 Carton shape variable in old plan

可知,旧方案纸箱整体最大变形量为 19.78 mm,在 z 轴方向纸箱最大变形量为 3.79 mm,在 x 轴方向纸箱最大变形量为 2.57 mm。在实际流通过程中,扁平的纸箱前后长度方向跨度大、抗压能力弱,比 2 个侧端面鼓起变形量大,仿真结果与实际情况相符。仿真后旧方案纸箱变形量见图 7。

对产品新方案施加相同压力后,纸箱整体最大变形量为 9.17 mm, z 方向最大变形量为 0.50 mm,在 x 轴方向纸箱最大变形量为 0.32 mm。由于内部缓冲衬垫影响,纸箱变形呈不规则形状,而不是均匀的向两侧递减,仿真后新方案纸箱变形量见图 8。

根据实际情况及试验可知,灶具产品的玻璃面板、承液盘、底盘为产品的易损件,在产品流通过程中易发生变形,各零部件仿真后实际应力见表 4。

由表 4 知,新旧方案中,承液盘、底盘的实际应力均远小于许用应力,新方案的实际应力相较于旧方案具有显著改善。此外,旧方案玻璃面板的实际应力

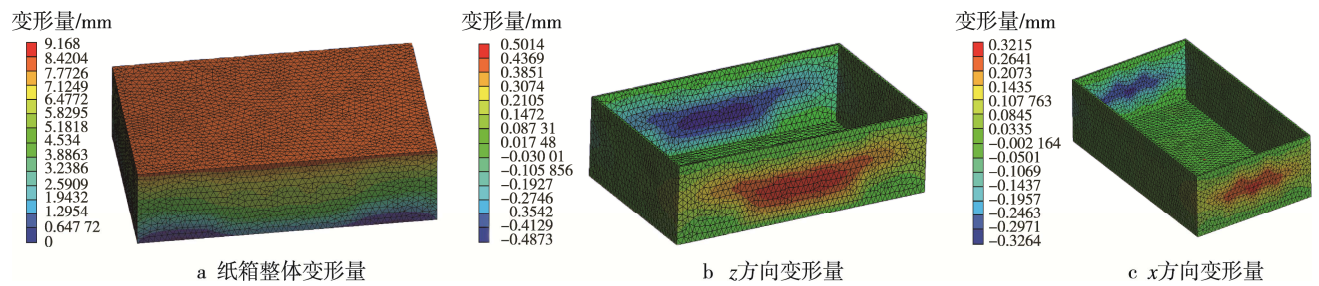


图 8 新方案纸箱变形量
Fig.8 Carton shape variable in new plan

表 4 产品部分零部件实际应力和许用应力
Tab.4 Actual stress and allowable stress of parts of the product

零件名称	材料	包装方式	实际应力/MPa	许用应力/MPa
玻璃面板	玻璃	新方案	6.274	14
		旧方案	8.973	
承液盘	不锈钢	新方案	35.413	137
		旧方案	50.638	
底盘	ST12	新方案	45.314	270~410
		旧方案	64.457	

偏大，超过许用应力的 1/2，这是因为在旧方案中玻璃面板与 EPS 泡沫直接接触。为改善玻璃的受力情况，新方案中的 EPS 上泡沫不再直接接触玻璃面板，而是通过承液盘、炉头将力分别传递给玻璃及底部支架，使得玻璃实际应力有所降低，但仍需考虑长期堆码带来的风险。

3.2 试验及结果对比

文中采用 ZB-KY 纸箱抗压试验机，根据 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》对新旧包装进行测试。将包装件放在试验机压板的中心处，试验设置恒压力，为 11 kN，压力试验机的压板以 10 mm/min 的加载速度对包装件均匀施加载荷，直至达到指定压力值 11 kN，压板返回，试验机统计包装件变形量^[15—16]。包装件试验与仿真结果见表 5，因试验设备的限制只能统计包装件整体变形量，纸箱侧面及端面变形量微小，现有设备不能进行测量。

通过表 5 数据对比可知，包装件变形量仿真结果与试验结果基本一致，误差在 10%以内，有限元

模型的准确性得到了验证。误差产生的原因主要是瓦楞纸板结构复杂，进行有限元分析时，使用性能相近的等效板对其进行了代替，其弹性模量、泊松比等参数的一致性对仿真结果造成了一定影响。此外，试验用到的纸箱样品经过压痕、折叠、运输等过程以后，导致纸箱强度有所下降，致使试验数据均略高于仿真数据。

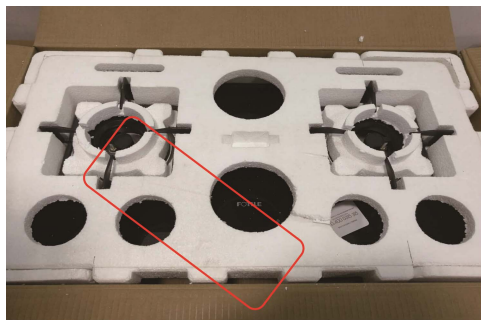
由表 5 可知，在 2 种包装的防护下，产品均未发生损坏，纸箱也均未发生明显变形。同时，新方案包装件相较于旧方案，整体变形量由 19.78 mm 降低至 9.17 mm，优化超过 50%，可见新方案包装的缓冲性能优于旧方案。此外，侧面变形量由 3.79 mm 降低到 0.50 mm，端面变形量由 2.57 mm 降低到 0.32 mm，说明新方案能有效改善产品的鼓包现象。

为了更加全面地评估新方案的保护性能，避免在运输过程中运载工具的振动和意外跌落等情况造成包装失效和产品损坏，文中根据 GB/T 1019—2008《家用和类似用途电器包装通则》对包装件进行了跌落分析。试验仪器为零跌落试验机，包装件质量为 13.60 kg，跌落高度为 600 mm，跌落顺序为角跌落、棱跌

表 5 产品仿真与试验结果对比
Tab.5 Comparison of product simulation and test results

包装方案	结果	产品整体变形量/mm	纸箱侧面变形量/mm	纸箱端面变形量/mm	产品损坏情况
旧包装	仿真	19.78	3.79	2.57	未损坏
	试验	21.90			未损坏
新包装	仿真	9.17	0.50	0.32	未损坏
	试验	10.10			未损坏

落、面跌落,包装件经过“一角三棱六面”的跌落后,试验结果见图9。



a 内衬垫损毁



b 产品

图9 跌落试验
Fig.9 Drop test

由图9可知包装件上泡沫中间断裂,左右泡沫无损坏。产品底盘、承液盘、玻璃面板等易损件均未发生损坏,通电后产品能够正常运行。说明新方案能缓解产品在流通过程中受到的冲击和振动,有效地保护产品。

4 结语

文中通过改进衬垫结构,改变纸箱箱型,设计了一款天地盖纸箱与顶面平整的发泡聚苯乙烯泡沫相结合的缓冲包装。运用有限元软件 Ansys Workbench 模拟了新旧方案在实际物流中对产品的保护情况,并与试验结果进行了对比。由纸箱、衬垫各方向变形量及零件应力应变结果可知,新方案的缓冲效果全面优于旧方案,并能有效解决物流运输中产品的鼓包现象。

参考文献:

- [1] 刘冰,于志彬,陈志周.基于蜂窝-瓦楞复合纸的空调室内机缓冲包装设计[J].包装世界,2015(4):36—38.
LIU Bing, YU Zhi-bin, CHEN Zhi-zhou. Design of

Cushioning Packaging for Air Conditioner Indoor Unit Based on Honeycomb Corrugated Composite Paper[J]. Packaging World, 2015(4): 36—38.

- [2] 刘扬,张惠忠.热态内装物对纸箱抗压强度的影响研究[J].包装工程,2016,37(3):111—115.
LIU Yang, ZHANG Hui-zhong. Influence of Hot Charging Contents on Compression Strength of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 111—115.
- [3] HUNG D V, NAKANO Y, TANAKA F. Preserving the Strength of Corrugated Cardboard under High Humidity Condition Using Nano-sized Mists[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(14): 2123—2127.
- [4] 戴晓莉,王艳丽.瓦楞纸箱强度的静态仿真分析及实验研究[J].包装学报,2013,5(4):20—21.
DAI Xiao-li, WANG Yan-li. Static Finite Element Analysis and Experimental Research on the Strength of Corrugated Box[J]. Packaging Journal, 2013, 5(4): 20—21.
- [5] 邢圆,姜静,张倍豪.基于环保意识下的适度包装设计研究[J].上海包装,2016(4):22—24.
XING Yuan, JIANG Jing, ZHANG Bei-hao. Study Based on Appropriate Packaging Design Environmentally Conscious Package[J]. Shanghai Packaging, 2016(4): 22—24.
- [6] 张立中.论环保材料在绿色包装设计中的应用[J].包装世界,2016(3):26—27.
ZHANG Li-zhong. On the Application of Environmentally Friendly Materials Green Packaging Design[J]. Packaging World, 2016(3): 26—27.
- [7] 张璐.基于ANSYS/LS-DYNA的瓦楞纸箱跌落仿真研究[D].西安:陕西科技大学,2014.
ZHANG Lu. Simulation of Corrugated Box Drop Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2014.
- [8] HAI-ALI R, CHOI J. Refined Nonlinear Finite Element Models for Corrugate Fiberboards[J]. Composite Structures, 2009, 87(4): 321—333.
- [9] 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. Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.
- [10] 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. Analysis of the Influence of Corrugated Shape on the Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [11] NORDSTRAND T M. Parametric Study of the

- Post-buckling Strength of Structural Core Sandwich Panels[J]. *Composite Structures*, 2000, 30(4): 441—451.
- [12] MANN R W, BAUM G A, HABEGER C C. Determination of All Nine Orthotropic Elastic Constants for Machine-made Paper[J]. *Tappi*, 1979, 63: 163—166.
- [13] BAUM G A, BRENNAN D C, HABEGER C C. Measurement of Orthotropic Elastic Constants of Paper[J]. *Tappi*, 1981, 64: 97—101.
- [14] PERSSON K. Material Model for Paper: Experimental and Theoretical Aspects[D]. Lund: Lund University, 1981.
- [15] 王斐, 母军. 瓦楞纸箱抗压强度的研究进展[J]. *包装工程*, 2014, 35(11): 133—138.
WANG Fei, MU Jun. Research Progress on Compressive Strength of Corrugated Box[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(11): 133—138.
- [16] 王悦, 张惠忠. 角柱型瓦楞纸套箱抗压强度的研究[J]. *包装工程*, 2014, 35(21): 30—34.
WANG Yue, ZHANG Hui-zhong. Compressive Strength of Angle-type Corrugated Carton[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(21): 30—34.