

# 塑壳式低压断路器纸质运输包装设计

王娴<sup>1</sup>, 陈满儒<sup>1</sup>, 陈建森<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学, 西安 710021; 2. 耐帆包装工程(东莞)有限公司, 广东 东莞 523833)

**摘要:** **目的** 改善目前国内低压电器在运输过程中破损率较高, 且运输包装保护性较差的现状。**方法** 首先选择合适的包装材料对产品进行缓冲包装设计, 使用 Iron CAD 对产品进行建模, 随后导入 PreSys 进行缓冲包装设计前处理。生成 K 文件使用 LS-DYNA 进行求解, 并利用 LS-PosProt 进行后处理, 最后借助 Matlab 中曲线拟合工具箱进行曲线拟合。**结果** 该缓冲包装设计能够在塑壳式低压断路器跌落过程中吸收冲击, 保证产品不受损坏。**结论** 低压断路器运输包装设计绿色环保且保护性能良好。

**关键词:** 塑壳式低压断路器; 运输包装; 包装设计; LS-DYNA

中图分类号: TB482.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)01-0088-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.01.014

## Paper Transport Packaging Design of Low-voltage Molded Case Circuit Breaker

WANG Xian<sup>1</sup>, CHEN Man-ru<sup>1</sup>, CHEN Jian-sen<sup>2</sup>

(1. Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. Nefab Packaging Engineering (Dongguan) Co., Ltd., Dongguan 523833, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the present situation of the high breakage rate of current domestic low-voltage electrical equipment in transportation process and the poor protection of transport packaging. Firstly, the appropriate packaging materials were selected to design a kind of cushioning packaging structure for the product. Iron CAD was used to model the product. Then, the product model was imported into PreSys for pre-processing of cushioning packaging structure. After the K file was generated, LS-DYNA was used to solve the problem. The post-processing was carried out by LS-PosProt. Finally, curve fitting was implemented with the curve fitting toolbox in Matlab. The cushioning package structure could absorb the impact in the drop process of the low-voltage molded case circuit breaker, so as to ensure that the product would not be damaged. The low-voltage circuit breaker transport packaging design is green and environmentally friendly, and has good protection performance.

**KEY WORDS:** low-voltage molded case circuit breaker; transport packaging; packaging design; LS-DYNA

随着我国智能配电网的建设, 低压电器在市场上的需求处于稳步上涨的趋势, 从工业制造到民用住宅, 均有广泛应用<sup>[1]</sup>。由于市面上大部分低压电器包装保护性能不佳, 因此造成了低压电器破损率较高的现象。为了改善这一现象, 选择某品牌塑壳式低压断路器为例进行运输包装设计。

根据市场调研, 质量较大的低压电器产品往往采

用木箱包装, 质量较小的低压电器采用纸箱包装。塑壳式低压断路器由于其质量较小, 因此低压断路器的运输包装大多以纸板和 EPS 等发泡塑料为原材料。虽然 EPS 具有良好的缓冲性能, 但因 EPS 用量以及所设计 EPS 结构方面的问题导致产品包装保护性不足, 且不环保。随着现在人们环保理念的增强, 缓冲包装的选材在环保方面开始有所考究。仲晨等<sup>[2]</sup>使用

收稿日期: 2019-06-11

作者简介: 王娴(1994—), 女, 陕西科技大学硕士生, 主攻物流运输包装。

通信作者: 陈满儒(1957—), 男, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为运输包装。

全纸形式的缓冲包装结构对汽车大灯进行了运输包装设计。邢月卿<sup>[3]</sup>提出只要缓冲结构设计合理且选配材合适,瓦楞纸板完全能够满足电子设备的缓冲包装需求。瓦楞纸板以及蜂窝纸板等纸质包装材料均具有可回收利用以及加工性能良好的特性,因此文中缓冲设计拟采用纸质包装材料。

## 1 设计步骤

文中设计按照以下步骤进行。

- 1) 对产品自身特性进行评估。
- 2) 设计不同类型的纸质缓冲包装方案进行比较,选定最终的设计方案,确定缓冲结构。
- 3) 对所设计的缓冲包装结构建模,进行跌落仿真分析,从而对选定方案进行评估。
- 4) 制作最终方案的原型运输包装件,进行测试。

## 2 产品特性分析

该塑壳式低压断路器运输包装件内装物除缓冲

结构外还包含产品、纸质说明书以及相关配件等。塑壳式低压断路器是一种将所有零件都密封于塑料外壳中的低压电器。结构紧凑,大部分塑壳式低压断路器无法进行检修,因此包装对于低压断路器是十分重要的。塑壳式低压断路器主要包含塑料外壳,辅助触点以及脱扣器等<sup>[4]</sup>。查询得到该型号塑壳式低压断路器的相关参数<sup>[5]</sup>见表 1。

已知塑壳式低压断路器的质量为 1.28 kg,最大外尺寸为 105 mm×107 mm×150 mm。通过市场调查得知,塑壳式低压断路器损坏通常是因欠包装造成外壳损坏的形式居多,损坏部位位于产品底部。因此塑壳式低压断路器的易损部位为外壳,尤其是底部外壳突出处,见图 1。塑壳式低压断路器形状规则紧凑,其塑料外壳均为可受力部分。塑壳式低压断路器属于电子记录装置及精密机械,需保证产品到达客户手中时没有刮痕以及破损。通过查询美国军用手册《MIL-HDBK-304》,得到产品的脆值在 40~59g 之间<sup>[6]</sup>,鉴于塑壳式低压断路器的结构较为规则,因此取塑壳式断路器的脆值为 59g。

表 1 塑壳式低压断路器参数

Tab.1 Parameters of low-voltage molded case circuit breaker

材料名称	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	长/mm (最大外尺寸)	宽/mm (最大外尺寸)	高/mm (最大外尺寸)	质量/kg
镍铜锌合金	8.4	108	0.37				
ABS 树脂	1.07	0.2	0.394	105	107	150	1.28
不锈钢	7.91	195	0.3				

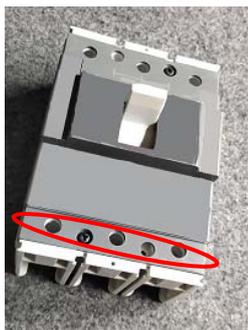


图 1 产品及易损部位示意

Fig.1 Schematic diagram of product and quick-wear parts

## 3 缓冲包装设计

### 3.1 方案 1

仲晨等<sup>[2]</sup>提出了一种一体成型式纸质缓冲包装结构,可用于汽车大灯包装。该结构为典型的折叠式缓冲包装结构,是通过已有盒型结构改进、组合等,设计出的一种新型的缓冲包装结构。塑壳式低

压断路器外形规则、质量轻,由此设计的缓冲包装结构见图 2。

此缓冲结构是由 3 部分组成,分别为缓冲结构 1、缓冲结构 2 以及缓冲结构 3。缓冲结构 1 成型后,作为产品的底部支撑件。图 2a 中标记结构是考虑到人工拆卸的便捷性问题所设计的提手结构,该结构上部借鉴自锁底结构,将缓冲结构 1 以及缓冲结构 3 固定。缓冲结构 2 是带有提手以及锁底结构的盘式纸盒,作为配件盒,见图 2b。缓冲结构 3 是变型的盘式纸盒,成型后作为产品的顶部支撑件,见图 2c。该缓冲结构 1 的成型结构见图 3—4。

### 3.2 方案 2

国际箱型标准中包含许多种箱型结构,其中箱型编号为 09 的结构为各种纸衬垫、纸隔板结构等<sup>[7]</sup>。方案 2 就是采用 0946 型纸附件变形结构与纸卡相结合的思路设计的包装结构,见图 5。其中结构 1 为该缓冲方案的主体部分,与结构 2、结构 3 以及结构 4 配合使用。结构 1 成型后,将结构 2 刀卡插入结构 1 的卡槽中,对产品四周进行保护;结构 3 插入结构 1

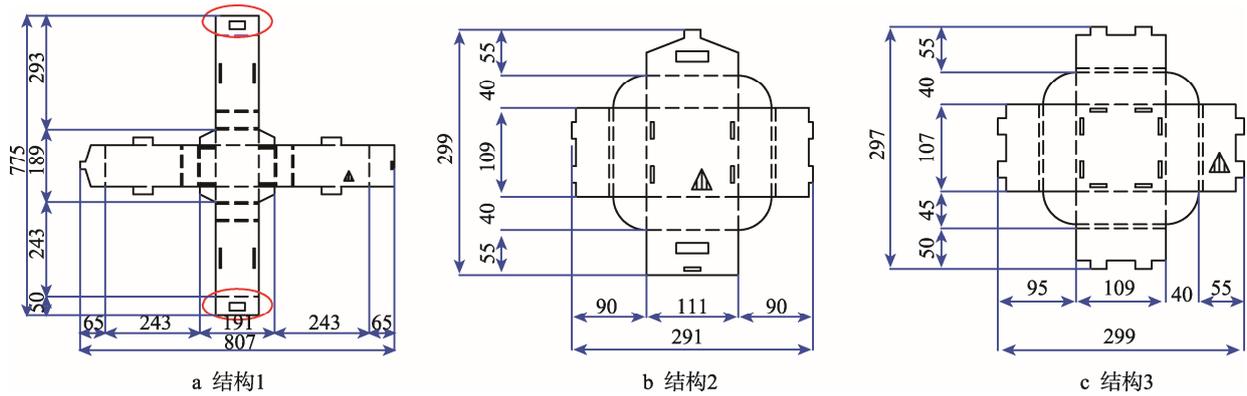


图2 方案1缓冲包装结构

Fig.2 Cushioning packaging structure in alternative 1

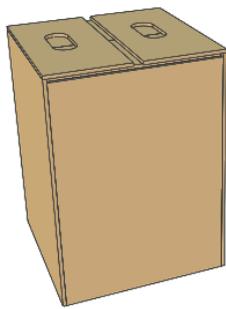


图3 缓冲结构1着色成型

Fig.3 Coloring molding of cushioning structure 1



图4 缓冲结构1线框

Fig.4 Wireframes of cushioning structure 1

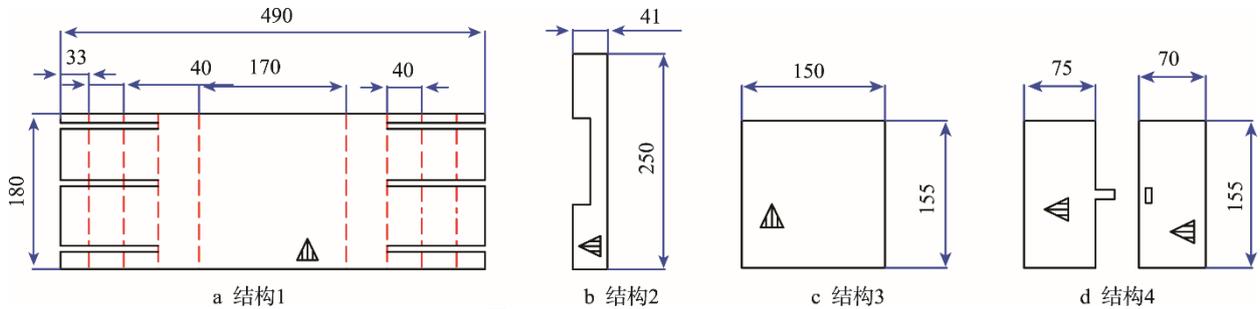


图5 方案2缓冲包装结构

Fig.5 Cushioning packaging structures in alternative 2

最下面的卡槽中形成底部支撑;结构4插入结构1的顶部卡槽,形成顶部支撑,最终缓冲结构见图6。

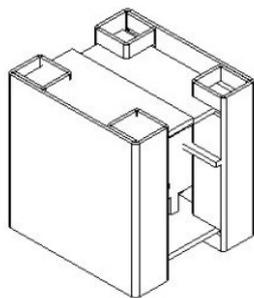


图6 方案2缓冲包装结构成型

Fig.6 Molding of cushioning packaging structure in alternative 2

### 3.3 方案3

方案3同样采用0946型纸附件变形形式。为了增强该缓冲结构对产品侧面的缓冲能力,在结构里加入具有优良平压能力的蜂窝纸板,与产品侧面接触,保护产品左右两侧不受损伤。方案3的缓冲结构见图7—8。缓冲结构可托住产品,缓冲结构1成型结构对产品的前后方向及上下方向进行保护。使用0951型纸附件作为配件箱放置在缓冲结构上部。

### 3.4 方案确定

塑壳式低压断路器质量轻,且形状规则,因此方案1、方案2与方案3采用瓦楞纸板作为原材料时均可行。方案1缓冲结构主体采用一体式折叠成型方

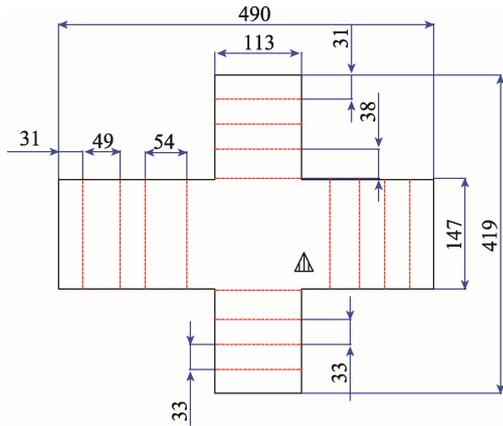


图 7 方案 3 缓冲包装结构

Fig.7 Cushioning packaging structure in alternative 3

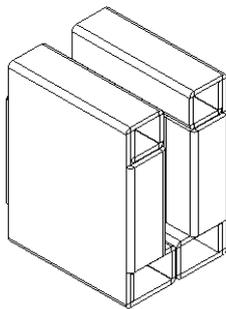


图 8 方案 3 缓冲包装结构成型

Fig.8 Molding of cushioning packaging structure in alternative 3

式，成型较为复杂，且使用材料较多；方案 2 缓冲结构主体采用组合式形式，成型复杂，在满足对产品保护性的同时，能够使用较少的材料；方案 3 同样采用组合式的缓冲结构形式，成型简单，且使用的材料较方案 1 以及方案 2 均要少。综上所述，从多方面因素考虑，确定方案 3 为最终方案。

### 3.5 包装材料选择

方案 3 使用的包装材料包括瓦楞纸板以及蜂窝纸板。GB/T 6544—2008 中列出的瓦楞规格有 A, C, B, E, F 等<sup>[8]</sup>。当单层瓦楞不能满足包装需求时，可采用多层瓦楞纸板。为了保证缓冲包装结构能够保护产品，因此使用 C 楞瓦楞纸板。通过计算得出 C 楞纸板里纸、芯纸与面纸的定量分别为 280, 130, 280 g/m<sup>2</sup>。丁玉平等<sup>[9]</sup>使用 Ansys Workbench 对整体运输包装件进行了动态缓冲特性仿真分析，因此可参考所使用 C 楞瓦楞纸板的性能参数（见表 2，表中  $E$  表示弹性模量， $G$  表示剪切弹性模量），使用蜂窝纸板的厚度为 20 mm。吴秀红<sup>[10]</sup>研究了蜂窝纸板的力学性能，从而得到了厚度为 20 mm 的蜂窝纸板性能参数，见表 3。根据缓冲结构大小及内部结构总质量，0201 型外包装箱使用的里纸、芯纸与面纸的定量分别为 170, 110, 160 g/m<sup>2</sup> 的 B 瓦楞纸板，纸箱内尺寸为

190 mm×210 mm×280 mm。外包装箱的材料性能参数见表 4<sup>[11]</sup>。

表 2 C 楞瓦楞纸板的性能参数  
Tab.2 Performance parameters of C corrugated board

	MPa				
$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$
276.6	440.8	1.38	135.1	12.6	5.2

表 3 厚度为 20 mm 的蜂窝纸板性能参数  
Tab.3 Performance parameters of 20 mm thick honeycomb paperboard

名称	弹性模量 ( $\times 10^3$ )/GPa	泊松比	剪切弹性模量/MPa
横向	163	0.258	4.79
纵向	209	0.325	4.8221
法向	234	0.311	4.755

表 4 B 楞的瓦楞纸板的性能参数  
Tab.4 Performance parameters of B corrugated board

	MPa				
$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$
416.84	634.719	3.189	199.531	11.595	7.579

## 4 CAE 分析

使用 IRON CAD 对包装方案建模，有限元模型有 4 部分，分别为缓冲衬垫 2 个、产品以及外包装箱，随后将其导入 PreSys 中进行前处理。PreSys 是针对 LS-DYNA 分析所设计的模型建构解决方案，支持 LS-DYNA 所有关键字。通过 K 文件可以将 PreSys 以及 LS-DYNA 相结合，进而配合解决仿真问题。首先对包装件模型进行简化处理及单元设置。为了缩短仿真计算时间，鉴于产品易损点为外壳，因此将产品壳体保留，内部模型简化为质量点，使用 Solid 164 单元。纸质包装结构使用弹性材料本构模型，采用 Shell 单元，随后进行网格划分。在 PreSys 中采用单元智能划分，设置网格尺寸为 7 mm。网格划分质量决定仿真的最终结果，因此待网格自动划分完成后，对局部网格进行细化处理，保证网格质量。输入材料参数，并与模型关联。为了保证仿真结果的真实性，正确设定包装件内各个部分的接触关系是十分必要的，因此设定产品与缓冲包装结构以及外包装箱之间为面面接触。最后是跌落测试设定，该产品为国内运输，查询 GB/T 4857.17—2017<sup>[12]</sup>得知，质量不大于 10 kg 的包装件跌落高度有 3 种情况。通过询问产品工程师，此产品需在等级 1 的环境下进行测试，因此跌落高度为 1 m。赋予该包装件相应的初始速度  $v=4.4$  m/s。包装件跌落是一个往复过程，直至因阻尼影响，弹跳幅值衰减为 0，停止跳动。在此过程中，包装件

首次与地面接触所产生的冲击力对产品的危害最大，因此仿真时间设定为 0.4 s。在 PreSys 中完成上述操作后，导出 K 文件，随后将其导入 LS-DYNA 中进行求解<sup>[13]</sup>。鉴于塑壳式低压断路器易损位置为底部，因此主要对产品底部进行面跌落仿真分析。塑壳式低压断路器从 1 m 处跌落，产品所受到的最大冲击加速度均小于产品所能承受的最大加速度，仿真分析得到的结果见图 9。缓冲结构因受到冲击发生变形，吸收了大部分冲击能量，从而保护产品不受损坏。

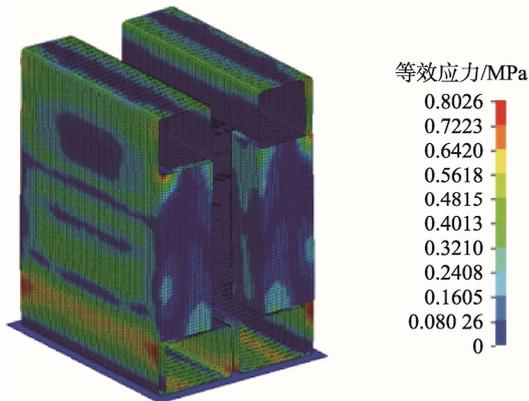


图 9 塑壳式低压断路器包装件跌落应力云图  
Fig.9 Stress contour resulting from drop of low-voltage molded case circuit breaker package

将仿真得到的数据在 Matlab 中进行数据处理<sup>[14]</sup>。将所得到的数据（冲击响应曲线，文件名 Plan34.csv）导入 Matlab 中，随后进行数据转换。为了更加直观地对比产品在跌落时产生的最大加速度值与产品自身脆值的大小，将冲击加速度响应曲线转化为纵坐标为脆值（G）、横坐标为时间的冲击响应曲线。在 Matlab 中导入数据 Plan34，并且在 Matlab 命令栏中输入如下命令（主要）：

```
time=table2array(plan34(:,1));
G=table2array(plan34(:,2))/9810
```

使用 Curve Fitting Tool 工具箱处理过后，拟合得到曲线，见图 10。

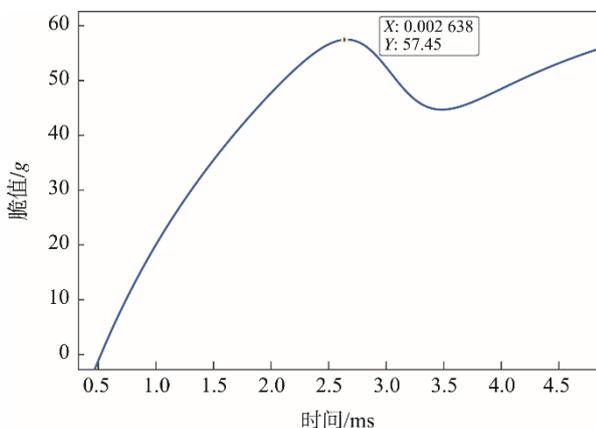


图 10 塑壳式低压断路器包装件冲击响应曲线  
Fig.10 Shock response curve of low-voltage molded case circuit breaker package

该产品的脆值为 59g，跌落过程中产品所受最大加速度值经转化后所得数值小于并且接近于这个数值。综上所述，该缓冲包装结构是可靠的。

## 5 实验评估

通过仿真分析，得出方案 3 的缓冲包装结构是可行的。制作的原型运输包装件见图 11。按照 GB/T 4857.17—2017<sup>[12]</sup>，使用单翼式跌落试验机进行包装件跌落测试。根据产品工程师要求，塑壳式低压断路器需保证产品到达客户手中时没有刮痕以及破损，因此该测试只需保证包装件从 1 m 高度处跌落，产品表面无损坏即可。塑壳式低压断路器包装件质量为 3 kg，按照国标要求需要进行 3 面 4 楞 4 角测试。对测试样品进行编号<sup>[15]</sup>，见图 12。编号后，对试验样品进行 48 h 的温湿度预处理<sup>[16]</sup>。随后按照包装件跌落测试标准<sup>[17]</sup>进行测试，测试结果见表 5。

包装件从 1 m 高度，经过 3 次面跌落以及 4 次棱跌落（见图 13a）后，外包装箱并无较大变形；经过 3 次角跌落（见图 13b）后，产品外包装有轻微变形，见图 13c。测试完成后打开包装件，内装产品完好（见图 14），缓冲结构有轻微变形（见图 14b—c）。

通过此次跌落测试，证明此方案能够保护产品不受损坏。

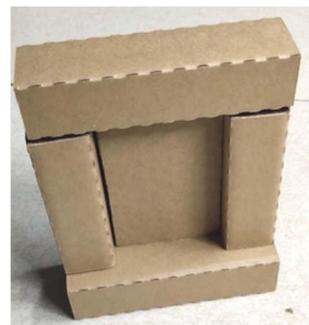


图 11 缓冲结构  
Fig.11 Cushioning structure



图 12 编号后的包装件  
Fig.12 Numbered package

表 5 塑壳式低压断路器跌落试验记录  
Tab.5 Drop test records for low-voltage molded case circuit breaker

跌落方式	包装件跌落后状况	产品是否损坏
编号为 3 的面跌落	包装箱无较大变形	否
编号为 2 的面跌落		
编号为 5 的面跌落		
底面棱跌落①	包装箱无较大变形	否
底面棱跌落②		
底面棱跌落③		
底面棱跌落④		
底面角跌落①	包装箱底部有变形	否
底面角跌落②		
底面角跌落③		
底面角跌落④		



图 13 跌落测试  
Fig.13 Drop test

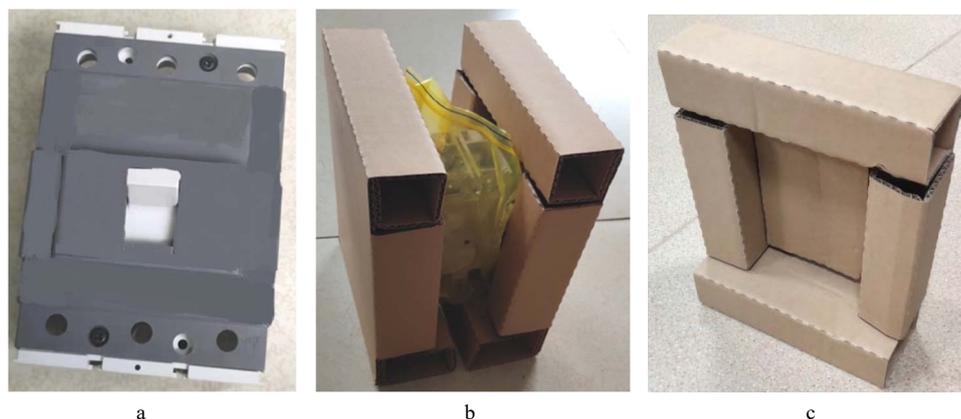


图 14 测试后的内装物  
Fig.14 Tested contents

## 6 结语

随着低压电器市场逐步扩大,低压电器需求量也越来越大,因此在低压产品市场中使用一款合理的运输包装结构是十分必要的。为了顺应国家环保政策并

且提高包装对产品的保护性,改善原先低压电器缓冲泡沫的包装形式,因此,使用绿色包装材料瓦楞纸板以及蜂窝纸板进行缓冲包装设计。使用国际箱型标准中的结构,通过对其进行变形从而设计出结构简单、缓冲性能良好的缓冲结构。该缓冲结构纸板利用率高、成型便捷、绿色环保。通过仿真分析以及跌落安

全性测试,证实了所设计的瓦楞纸板缓冲结构是合理的、可靠的。同时也说明所设计的纸制品缓冲件只要结构合理,就能够保护产品不受损坏。随着新型特种纸材料研究的不断深入,纸制品缓冲件在未来包装市场上会有很大的应用空间。

#### 参考文献:

- [1] 中国电器工业协会低压电器分会. 低压电器行业现状及“十三五”发展建议[J]. 电器工业, 2016(2): 14—18.  
China Electrical Equipment Industry Association Low Voltage Electrical Appliances Branch. The Status Quo of Low-voltage Electrical Industry and the "13th Five-Year" Development Proposal[J]. Electrical Appliance Industry, 2016(2): 14—18.
- [2] 仲晨, 夏征. 汽车大灯的全纸运输包装设计[J]. 包装学报, 2018, 10(2): 23—29.  
ZHONG Chen, XIA Zheng. Full-paper Transportation Packaging Design of Vehicle Headlamps[J]. Journal of Packaging, 2018, 10(2): 23—29.
- [3] 邢月卿, 陈满儒, 孙德强. 笔记本电脑的纸质缓冲包装设计[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 61—65.  
XING Yue-qing, CHEN Man-ru, SUN De-qiang. Paper Cushion Packaging Design of Laptop Computer[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 61—65.
- [4] 陈力. 中低压断路器智能控制器控制软件的研究与设计[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015: 8—16.  
CHEN Li. Research and Design of Intelligent Controller Control Software for Medium and Low Voltage Circuit Breakers[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015: 8—16.
- [5] 中国机械工程学会, 中国材料研究学会. 中国材料工程大典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 685—917.  
China Mechanical Engineering Society, China Society for Materials Research. China Materials Engineering Dictionary[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 685—917.
- [6] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 95—98.  
PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012: 95—98.
- [7] 孙诚. 包装结构设计[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 455—501.  
SUN Cheng. The Packaging Structure Design[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010: 455—501.
- [8] GB/T 6544—2008, 瓦楞纸板[S].  
GB/T 6544—2008, Corrugated Board[S].
- [9] 丁玉平, 钱怡. 包装件跌落仿真分析与结构优化[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 44—47.  
DING Yu-ping, QIAN Yi. Simulation Analysis and Structural Optimization of Package Drops[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 44—47.
- [10] 吴秀红. 蜂窝纸板的力学性能测试及有限元分析[D]. 北京: 北京工商大学, 2004: 8—26.  
WU Xiu-hong. Mechanical Properties Testing and Finite Element Analysis of Honeycomb Paperboard[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2004: 8—26.
- [11] 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: 11—22.  
FANG Yan-ping. Experimental Investigation and Finite Element Analysis of the Compression Strength of Corrugated Box[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011: 11—22.
- [12] GB/T 4857.17—2017, 运输包装件基本试验[S].  
GB/T 4857.17—2017, Basic Test of Transport Packages[S].
- [13] SAEED M. 有限元分析-ANSYS 理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 353—399.  
SAEED M. Finite Element Analysis-ANSYS Theory and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 353—399.
- [14] 王薇. MATLAB 从基础到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 335—384.  
WANG Wei. MATLAB from Basic to Proficient[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 335—384.
- [15] GB/T 4857.1—1992, 包装运输包装件 试验时各部位的标示方法[S].  
GB/T 4857.1—1992, Packaging-complete, Filled Transport Packages-identification of Parts when Testing[S].
- [16] GB/T 4857.2—2005, 包装运输包装件温湿度调节处理[S].  
GB/T 4857.2—2005, Temperature and Humidity Adjustment Treatment of Packaging and Transportation Packaging[S].
- [17] GB/T 4857.5—1992, 包装运输包装件 跌落试验方法[S].  
GB/T 4857.5—1992, Packaging-transport Packages-drop Test Method[S].