

基于 ABAQUS 的液态奶缓冲包装优化设计

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.05.006

杨程浩 张向宁

内蒙古工业大学

轻工与纺织学院

内蒙古 呼和浩特 010080

摘要: 目前我国液态奶礼盒的缓冲包装主要采用瓦楞纸板,但其缓冲性能不能满足产品的运输要求。针对上述问题,以某乳制品企业生产的液态奶礼盒的缓冲包装为研究对象,利用 SolidWorks 绘制包装件的三维立体图,并使用 Hypermesh 联合 ABAQUS 软件建立液态奶礼盒的有限元模型,并进行仿真跌落试验;通过分析上衬垫从 800 mm 处跌落的受力云图和变形云图,找出原有上衬垫的薄弱部位;针对上衬垫的薄弱部位,设计了两种新型的上衬垫,利用 AutoCAD 和 SolidWorks 绘制出相应的平面图和三维立体图并进行仿真分析。试验结果表明:两种优化方案的牢固程度均高于原结构,且能满足产品运输要求。

关键词: ABAQUS; 液态奶礼盒; 缓冲包装

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2018)05-0032-07

1 研究背景

随着我国经济的发展,人民生活水平的提高,乳制品的需求量不断增大。据统计,近十年来我国液态奶产量呈快速增长的态势,其占乳制品产量的比例从 2007 年的 80.62% 增长到 2016 年的 91.45% (数据来源于 <http://www.chyxx.com/industry/201801/602654.html>)。

液态奶是指由健康状况良好的奶牛所产的新鲜乳汁,经过加热杀菌等方式处理后,分装出售的饮用乳品。国际乳业联合会(International Dairy Federation, IDF)将液态奶分为巴氏杀菌乳、灭菌乳和酸乳三大类^[1]。我国乳制品企业为了提高市场竞争力,不断提高液态奶的品质,在液态奶包装方面也有较大投入。但相关乳制品企业主要是研发液态奶的内包装,对于液态奶礼盒的缓冲包装设计没有给予足够的重视,因而目前液态奶礼盒的缓冲包装存在很多弊

端亟需解决。以某乳制品企业生产的液态奶礼盒缓冲包装为例,其采用瓦楞纸板制作,分为上下两个衬垫。缓冲衬垫未装入液态奶礼盒时,可以平铺摆放(见图 1a),该设计方便运输,可降低运输成本^[2]。该包装缓冲衬垫的结构简单(见图 1b),因而从垫片到衬垫的成型过程也简单,整个装配过程不需要人工参与,可完全由机器进行装配,因而该衬垫的生产成本较低。但是该设计最大的问题是缓冲性能不佳,搬运工人在装卸液态奶礼盒时如果操作不当,易使上衬垫发生破损甚至断裂。有时上衬垫的破损会导致其侧边掉落至液态奶礼盒的透明开窗处(见图 1c),从而导致产品信息被遮盖,影响产品美观,更为严重的后果是使得缓冲衬垫失去缓冲作用,在运输或销售过程中可能导致液态奶损坏。因此,本课题组拟以液态奶礼盒的缓冲包装为研究对象,采用 ABAQUS 对其上衬垫进行优化设计,以期产品的缓冲包装设计提供参考。

收稿日期: 2018-07-22

作者简介: 杨程浩(1996-),男,湖北黄石人,内蒙古工业大学学生,主要研究方向为包装印刷及结构设计,

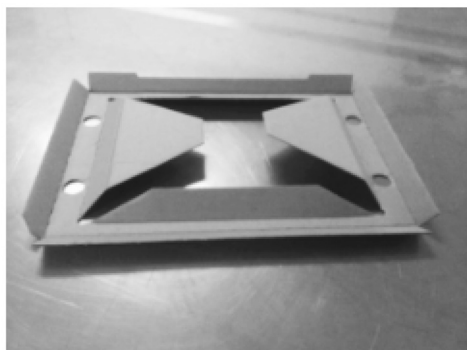
E-mail: 592136956@qq.com

通信作者: 张向宁(1973-),女,山东青岛人,内蒙古工业大学教师,主要研究方向为包装印刷及结构设计,

E-mail: 1156024208@qq.com



a) 上垫片平铺图



b) 上衬垫成型图



c) 上衬垫破损图

图1 某液态奶的缓冲上衬垫图

Fig. 1 The cushioning upper liner of liquid milk packing

2 基于 ABAQUS 的缓冲上衬垫问题分析

2.1 有限元模型假设

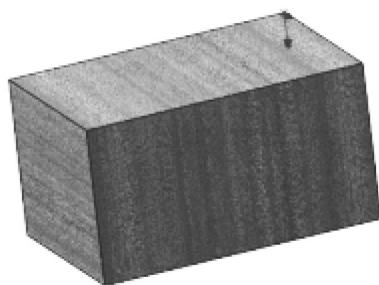
液态奶礼盒的加工制造、跌落方式、跌落环境等的不同会导致其破损程度不同。液态奶礼盒的跌落过程及跌落过程中其接触部位都较为复杂, 不确定因素较多^[3-4]。为合理简化跌落过程中不确定因素, 本课题组对液态奶礼盒的跌落过程进行假设^[5-10]:

1) 不考虑空气的作用, 根据模拟高度转化为速度, 施加至液态奶礼盒上。2) 由于跌落碰撞过程时间较短, 结构受力作用远远大于重力作用, 故不考虑重力

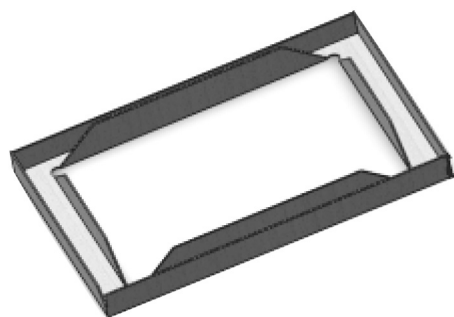
作用。3) 由于模拟测试只用结构原型, 因而不考虑加工误差的影响。4) 不考虑地面的粗糙度与不平整性, 地面采用刚性平面模型。5) 根据国家标准 GB/T 4857.5—1992《包装 运输包装件跌落试验方法》, 小型运输包装件进行自由跌落试验时, 跌落部位采用“1角3楞6面”^[11]。由于本课题组只分析上垫片的受力情况, 故只对两种极限情况下液态奶礼盒跌落试验进行分析, 即上衬垫与地面为45°的边接触以及上衬垫与地面为面接触时的情况。两种工况均为包装件与地面接触时, 上衬垫与地面较近的情况。在这两种工况下, 上衬垫会受到较大冲击作用而产生变形, 受力情况较明显。

2.2 有限元模型的建立

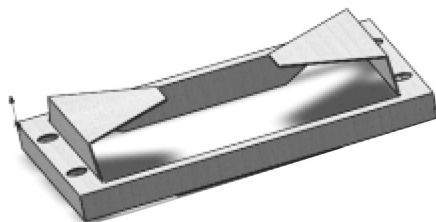
液态奶礼盒由独立销售包装、缓冲衬垫和外包装箱3个部件组成。首先将产品进行简化处理, 再按照液态奶礼盒的平面模切图尺寸, 利用 SolidWorks 软件绘制相应部件。外包装箱、下衬垫、上衬垫及其组装模型如图2所示。



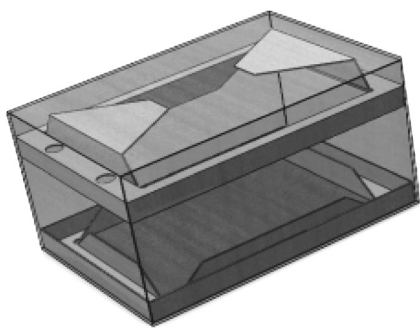
a) 外包装箱



b) 下衬垫



c) 上衬垫



d) 礼盒

图2 液态奶礼盒的三维图

Fig. 2 3D diagram of liquid milk giftbox

考虑液态奶礼盒的结构形状特殊,本课题组利用强大的前处理网格划分软件 Hypermesh 14.0 对其进行有限元网格划分。由于部件都是对称结构,因此,先将礼盒的实体切成均匀的4份;删除其中3份后,再对其进行切分和网格划分,采用映射网格划分时,单元尺寸设定为5 mm;将结构划分网格后,利用镜像对称命令使1/4模型镜像成为整体;最后通过 Import 功能将文件导出为 .inp 格式文件,以便有限元网格模型导入 ABAQUS 软件。图3为液态奶礼盒与地面为面接触时的剖面有限元网格模型。

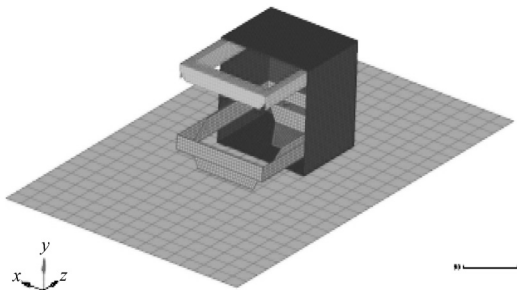


图3 液态奶礼盒与地面面接触的剖面有限元网格模型

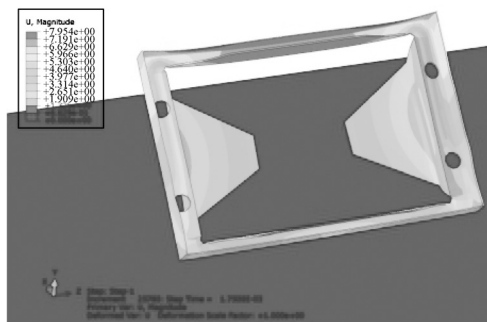
Fig. 3 Profile finite element mesh model of liquid milk gift box contacting the ground surface

.inp 格式文件导入 ABAQUS 软件后,仿真试验参数设置如下:1)内部缓冲衬垫的参数设置为密度 11.18 kg/m^3 、弹性模量 1.52 MPa 、泊松比 0.3 。外包装箱的参数设置为密度 12.5 kg/m^3 、弹性模量 276 MPa 、泊松比 0.3 。2)假定礼盒跌落于混凝土地面。混凝土地面属于刚性材料,其参数设置参照文献[12],密度为 2750 kg/m^3 ,弹性模量为 30 GPa ,泊松比为 0.3 。在耦合模块,将混凝土地面设定为刚形体,单元被耦合在一个参考点上。3)在 Step Manager 中,上衬垫与地面为 45° 角的边接触时跌落求解时间设定为 0.010 s ,上衬垫与地面为面接触时跌落求解时

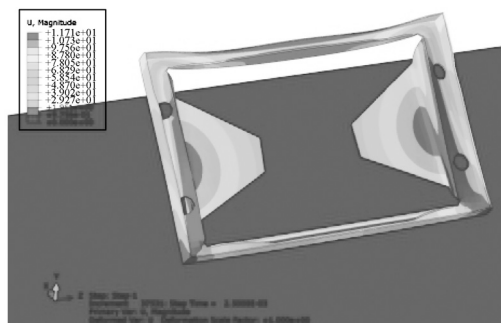
间设定为 0.005 s 。4)接触属性定义为切向和法向接触,切向摩擦系数为 0.15 。考虑结构接触较为复杂,本课题组采用自动接触。5)仿真跌落试验主要是分析上垫片的结构性能,因此液态奶礼盒内部的独立销售包装采用静载荷加载。独立销售包装的质量为 240 g 。液态奶礼盒中共有 12 个独立销售包装,其质量为 2880 g 。6)液态奶礼盒的运输方式主要为公路和空运,且其质量小于 10 kg ,依据 GB/T 4857.5—1992《包装 运输包装件跌落试验方法》中的相关规定,礼盒跌落高度设置为 800 mm [11]。当重力加速度取 9.8 m/s^2 时,通过计算可得,液态奶礼盒跌落地面的速度为 3959.79 mm/s ,近似等于 3960 mm/s 。因此,对地面参考点施加所有方向的自由度约束,液态奶礼盒在预定义场中被施加 3960 mm/s 的初始速度,模拟 800 mm 跌落的工况。

2.3 原结构跌落过程上衬垫的变形和受力分析

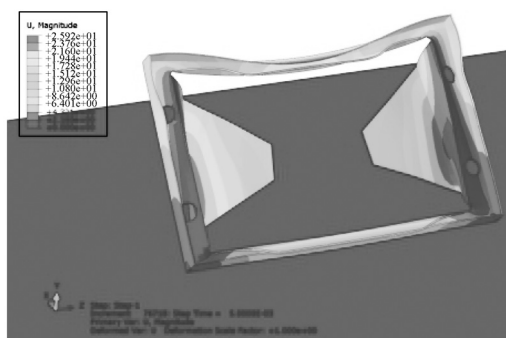
本课题组主要是分析上衬垫的变形和应力情况,因此隐藏了液态奶礼盒的外包装箱和下衬垫。图4为原结构 45° 角跌落时上衬垫在 0.00175 , 0.00250 , 0.00500 s 的变形云图。由图可以看出,跌落过程中上衬垫的变形越来越大,其中以上衬垫非边缘部分的变形最大。当瓦楞纸板变形程度超过一定极限时,瓦楞纸板就会发生破损甚至断裂,缓冲结构也失去了缓冲和固定内部产品的作用。



a) 0.001 75 s



b) 0.002 50 s

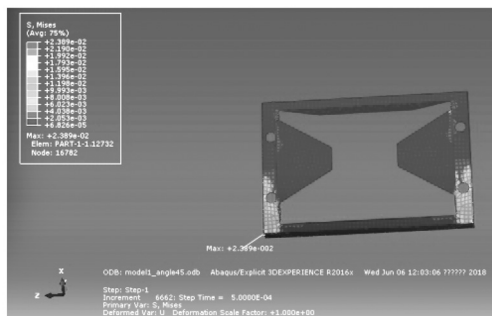


c) 0.005 00 s

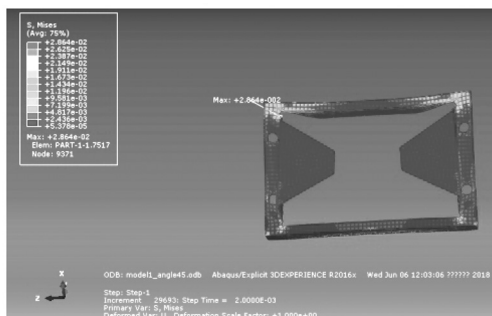
图 4 原结构 45° 角跌落时上衬垫的变形云图

Fig. 4 Deformation nephogram of upper structure with its original structure falling at 45° angle

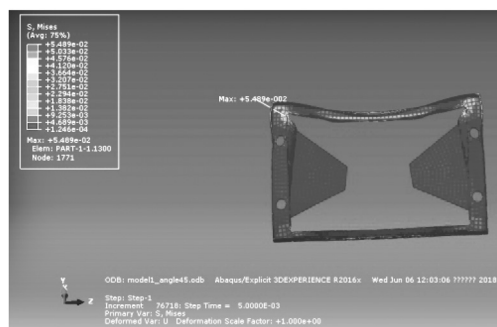
图 5 为原结构 45° 角跌落时上衬垫在 0.000 50, 0.002 00, 0.005 00 s 的应力云图。0.000 5 s 时, 液态奶礼盒接触地面。由图可以看出: 上衬垫受到最大应力的部位在边角处, 同时从应力云图在上衬垫的分布情况来看, 两个横梁以及横梁和纵梁角处的应力集中且较大; 0.002 00 s 时, 上衬垫下端由于接触地面无法继续运动, 上衬垫上部分结构在惯性作用下继续运动而发生较大的变形, 所以此时上衬垫被标注受到最大应力的部位是上部分结构中被模切成半圆的部位; 上衬垫在 0.005 00 s 时被标注受到最大应力的部位与在 0.002 00 s 时被标注的部位相比, 几乎在同一位置, 可见 0.002 00, 0.005 00 s 上衬垫变形严重且受到最大应力的部位为同一部位, 所以该部位是上衬垫的易损部位。



a) 0.000 50 s



b) 0.002 00 s



c) 0.005 00 s

图 5 原结构 45° 角跌落时上衬垫的应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of upper structure with its original structure falling at 45° angle

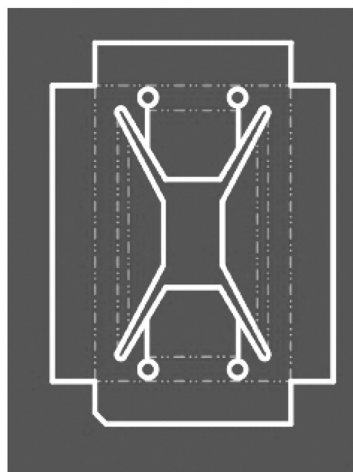
3 上衬垫结构优化

3.1 优化思路

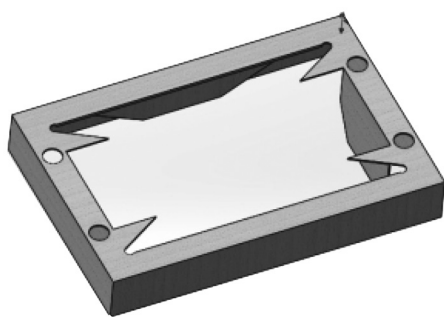
通过仿真跌落试验可知, 原结构的上衬垫是易损部位即该处受到的应力较大。为了改善上衬垫结构的缓冲性能, 可增加其厚度或者横向宽度。但目前产品包装公司不主张改变上衬垫的材料, 且缓冲包装的成型简单, 所以本课题组选择增加上衬垫的横向宽度。在原缓冲包装件中, 上衬垫被放置于独立销售包装和外包装箱之间, 且独立销售包装与外包装箱之间的距离是固定的, 因而独立销售包装上方的空间较大。因此, 若要增加上衬垫的横向宽度, 只有调整其位置, 并使其满足外包装箱的尺寸和运输过程中的缓冲要求。本课题组设计了两种优化方案, 两种优化方案都采用将上衬垫调整至独立销售包装上方的方法。

3.2 优化方案

上衬垫的优化设计方案 I 的设计图如图 6 所示。



a) 平面图



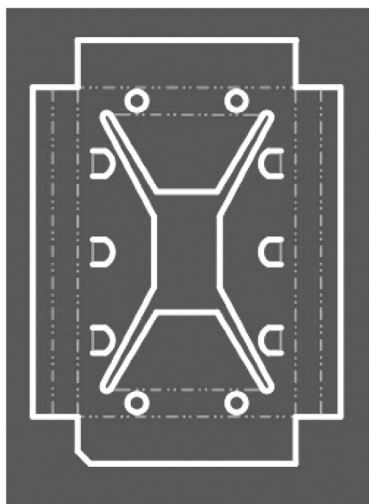
b) 立体图

图6 优化方案I的设计图

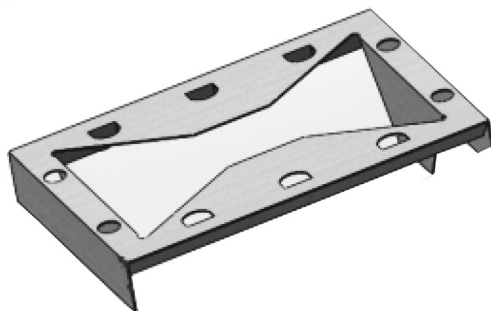
Fig. 6 Design charts of optimization plan I

本课题组在上衬垫的上平面中设计了4个小三角形,同时增加了4个侧面缓冲挡板的长度。这样既可以将上衬垫固定在独立销售包装的上方,又增加了上衬垫的宽度及其牢固程度。

上衬垫的优化设计方案II的设计图如图7所示。



a) 平面图



b) 立体图

图7 优化方案II的设计图

Fig. 7 Design charts of optimization plan II

本课题组在上衬垫的上平面设计了两个伸展长边,以固定上衬垫在独立销售包装的位置,同时利用

三角形最稳定原理^[13-17],将两个伸展长边设计为三角形;为了方便三角形部位的黏合成型,在上平面模切6个U型开口,将6个U型开口向三角形结构处按压并黏合。

3.3 缓冲衬垫的缓冲性能检验

为了检验液态奶礼盒的抗冲击性能及缓冲衬垫的强度,本次试验放在实际运输方式过程中进行^[18-21]。运输过程中有储运外箱,每个储运外箱中装有6个液态奶礼盒。本课题组将装有3种不同缓冲结构(每种缓冲结构均有5个储运外箱)的15个储运外箱放入物流车中,货车经高速公路将液态奶产品运输至200 km的某地。到达目的地后,工作人员检查并统计包装件的破损情况。

本次试验结果均通过肉眼进行评估。表1~3分别为装有原结构、优化结构I、优化结构II的液态奶礼盒的试验结果。

表1 原结构的试验结果

Table 1 Test results of original structure

| 参 数 | 组 号 | | | | | 平均值 |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 破损数量 / 个 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1.8 |
| 破损率 / % | 33.3 | 33.3 | 33.3 | 16.7 | 33.3 | 30.0 |

表2 优化结构I的试验结果

Table 2 Test results of optimizing structure I

| 参 数 | 组 号 | | | | | 平均值 |
|----------|-----|---|---|------|---|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 破损数量 / 个 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.2 |
| 破损率 / % | 0 | 0 | 0 | 16.7 | 0 | 3.3 |

表3 优化结构II的试验结果

Table 3 Test results of optimizing structure II

| 参 数 | 组 号 | | | | | 平均值 |
|----------|-----|---|---|---|---|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 破损数量 / 个 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 破损率 / % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

由表1~3可知:3种缓冲衬垫中,原结构的破损率最高,平均高达约30.0%,这说明该缓冲衬垫无法满足实际运输对缓冲衬垫牢固程度的要求;而另外两种优化方案的破损率相对于原结构有了较大的改善,方案I的破损率平均值约为3.3%,方案II的破损率为0,这说明两种优化方案能够满足实际运输要求。

4 结语

与传统的缓冲包装设计方法相比,有限元仿真分析能有效缩短试验周期,并且能够使人更加直观地

了解包装件的设计缺陷, 有针对性地改进设计缺陷, 可节省大量人力物力和试验成本。因此本课题组先对液态奶礼盒进行有限元建模, 再使用 ABAQUS 软件对其进行仿真跌落试验, 得到原结构中的易损部位, 最后对易损部位进行优化设计, 设计了两种优化方案, 并通过实际运输检验两种优化方案的缓冲性能, 试验结果表明: 两种优化方案的牢固程度均高于原结构, 且能满足产品的实际运输要求。

参考文献:

- [1] 李 然. 原农业部副部长: 进口牛奶比中国好是消费误区 [N/OL]. 北京青年报, 2017-04-25. <http://finance.people.com.cn/n1/2017/0424/c1004-29230613.html>.
LI Ran. Former Vice Minister of Agriculture: Consumer's Misconception: Imported Milk Better than That of China[N/OL]. Beijing Youth Daily, 2017-04-25. <http://finance.people.com.cn/n1/2017/0424/c1004-29230613.html>.
- [2] 肖颖喆. 瓦楞纸箱层叠式内衬与折叠式内衬结构比较: 以日用瓷器包装为例 [J]. 包装学报, 2014, 6(4): 44-48.
XIAO Yingzhe. Comparison Study of Multi-Layer and Folding Liners of Corrugated Cartons: Taking Ceramic Product Packaging as an Example[J]. Packaging Journal, 2014, 6(4): 44-48.
- [3] 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 Liping. A Test Study and Finite Element Analysis About Corrugated Box Compression Strength[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.
- [4] 滑广军, 罗定提, 吴若梅. 基于屈曲准则的瓦楞纸板强度仿真分析 [J]. 包装学报, 2010, 2(1): 18-20.
HUA Guangjun, LUO Dingti, WU Ruomei. The Simulation Analysis of Corrugated Board Strength Based on Buckling Criteria[J]. Packaging Journal, 2010, 2(1): 18-20.
- [5] BELDIE L, SANDBERG G, SANDBERG L. Paper-Board Packages Exposed to Static Loads: Finite Element Modeling and Experiment[J]. Package Technology and Science, 2001, 14(4): 171-178.
- [6] 卢富德, 雷树峰, 肖宁建, 等. 简支梁式关键部件在蜂窝纸板缓冲作用下的冲击响应研究 [J]. 包装学报, 2018, 10(1): 20-26.
LU Fude, LEI Shufeng, XIAO Ningjian, et al. Study on Shock Response of Critical Component of Simply Supported Beam Under Cushion Action of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2018, 10(1): 20-26.
- [7] LIM C T, TEO Y M, SHIM V P W. Numerical Simulation of the Drop Impact Response of a Portable Electronic Product[J]. IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(3): 478-485.
- [8] 王春霖. 贮液容器跌落冲击的计算机应力仿真 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
WANG Chunlin. Computer Stress Simulation for Drop Impact of Liquid Storage Container[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [9] 王鹤腾, 高德, 常江. 基于非线性有限元的瓦楞纸板静态压缩性能仿真研究 [J]. 包装工程, 2006, 27(5): 1-3.
WANG Heteng, GAO De, CHANG Jiang. Research on Simulation of Static Compression Performance of Corrugated Board with Nonlinear Finite Element[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 1-3.
- [10] 李兆元. 典型瓦楞纸板结构件的缓冲性能及其计算机仿真 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
LI Zhaoyuan. Research on Cushioning Property and Simulation of Typical Corrugated Board Structure[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [11] 机械电子工业部机械标准化研究所. 包装运输包装件跌落试验方法: GB/T 4857.5—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 1-2.
Institute of Mechanical Standardization, Ministry of Machinery and Electronic Industry. Packaging-Transport Packages-Vertical Impact Test Method by Dropping[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992: 1-2.
- [12] 常江, 巩雪, 李丹婷, 等. 鸡蛋缓冲包装设计及其力学性能分析 [J]. 包装工程, 2018, 39(3): 55-58.
CHANG Jiang, GONG Xue, LI Danting, et al. Design and Mechanical Properties of the Cushioning Packaging of Egg[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 55-58.
- [13] 田金琛. 瓦楞纸板缓冲结构件的缓冲性能研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2014.
TIAN Jinchun. On Cushioning Performance of Corrugated Panel[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [14] 卢立新, 孙聚杰, 王军. 疲劳振动效应对瓦楞纸板承载能力与缓冲性能的影响 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 43-46.
LU Lixin, SUN Jujie, WANG Jun. Effects of Fatigue Vibration on Load Capacity and Cushioning Properties of a Corrugated Fiberboard[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 43-46.

- [15] MCKEE R C, GANDER J W, WACHUTA J R. Compression Strength Formula for Corrugated Boxes[J]. Paperboard Packaging, 1963, 48(8): 149-159.
- [16] 刘 功, 刘占胜, 宋海燕. 瓦楞纸板缓冲包装结构的缓冲性能研究 [J]. 中国包装, 2003(6): 61-62.
LIU Gong, LIU Zhansheng, SONG Haiyan. The Research on the Cushion Performance of Corrugated Cardboard As Package Structure[J]. China Packaging, 2003(6): 61-62.
- [17] 李 光, 樊 明. 一种新型蜂窝纸板包边工艺及其制品缓冲性能研究 [J]. 包装学报, 2015, 7(3): 40-45.
LI Guang, FAN Ming. Analysis of a New Overlapping Technique for Honeycomb Paperboard and Its Energy Absorption Performance[J]. Packaging Journal, 2015, 7(3): 40-45.
- [18] 温时宝, 曹开化, 王 斌, 等. 高强瓦楞蜂窝复合纸板及其力学性能研究 [J]. 包装与食品机械, 2012, 30(3): 32-35.
WEN Shibao, CAO Kaihua, WANG Bin, et al. Study on High Strength Corrugated Honeycomb Composite Board and Mechanical Properties[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(3): 32-35.
- [19] 仲 晨, 夏 征, 张宜彩, 等. 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, ZHANG Yicai, et al. Full-Paper Transportation Packaging Design of Vehicle Headlamps[J]. Packaging Journal, 2018, 10(2): 23-29.
- [20] 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 Liping. A Test Study and Finite Element Analysis About Corrugated[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.
- [21] 鄂玉萍, 张新昌. 瓦楞纸板结构件承载性能研究 [J]. 包装工程, 2008, 29(1): 66-67.
E Yuping, ZHANG Xinchang. Study on Load Carrying Performance of Corrugated Board Structure[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 66-67.

Optimal Design of Liquid Milk Buffer Packaging Based on ABAQUS

YANG Chenghao, ZHANG Xiangning

(College of Textile and Light Industry, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010018, China)

Abstract: At present, corrugated cardboard is mainly used in cushioning packaging for liquid milk gift boxes in China, but its cushioning performance could not meet the transport requirements. In order to solve this problem, a liquid milk cushioning package manufactured by a dairy enterprise was taken as the research object. SolidWorks was used to draw the 3D stereogram of the package. The finite element model of the liquid milk gift box was established by using Hypermesh and ABAQUS software, and the drop test was carried out. By analyzing the force and deformation nephogram of the upper liner falling from 800 mm, the weak part of the original upper liner was found out. Two new types of upper liner were designed for the weak part of the upper liner, and the corresponding plane and three-dimensional drawings were drawn by using AutoCAD and SolidWorks, and the test was carried out. The test results showed that the firmness of the two optimization schemes was higher than that of the original structure and could meet the requirements of product transportation.

Keywords: ABAQUS; liquid milk gift box; cushioning packaging