

包装件缓冲特性的有限元仿真可靠性分析

李梦雅, 黄秀玲, 王军
(上海大学, 上海 200072)

摘要: **目的** 研究计算机有限元仿真在缓冲包装研发环节的可靠性。**方法** 利用计算机仿真进行缓冲包装研发, 能够较全面地提供所需参数, 缩短开发周期, 但计算机仿真的可靠性有待进一步验证。通过 Ansys Workbench 对智能灯泡包装件的缓冲特性进行仿真分析, 主要分析包装衬垫的加速度响应, 并结合传统的振动与跌落试验进行对比。**结果** 振动、跌落的仿真结果与真实试验的结果误差分别为 9% 和 15.91%, 排除客观存在的误差, 两者差异在可接受范围内。**结论** 验证了有限元仿真方法在缓冲包装研发环节的可靠性, 可为传统的包装研发环节提供新方法。

关键词: 振动; 跌落; 有限元仿真; 加速度响应; 缓冲包装

中图分类号: TB485.1; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0059-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.012

Finite Element Simulation Reliability of Package Cushioning Characteristics

LI Meng-ya, HUANG Xiu-ling, WANG Jun
(Shanghai University, Shanghai 200072, China)

ABSTRACT: The work aims to study the reliability of computer finite element simulation in the research and development of cushioning packaging. Computer simulation could be used for cushioning packaging R&D, which could comprehensively provide the required parameters and shorten the development cycle. However, the reliability of computer simulation should be further verified. The cushioning characteristics of intelligent bulb packages were simulated by Ansys Workbench, mainly analyzing the acceleration response of the packaging liner and making comparison combined with the traditional vibration and drop test. The errors of the simulation result of vibration and drop test and the real test result were respectively 9% and 15.91%. Except the objective errors, the difference of the both was within the acceptable range. The study verifies the reliability of finite element simulation method during cushioning packaging research and development. The study can provide a new method for traditional packaging R&D.

KEY WORDS: vibration; drop; finite element simulation; acceleration response; cushioning packaging

智能灯泡的不断演变, 已从最初的单一照明功能向增添生活乐趣的功能进行转变, 其附加值越来越高, 因此产品的保护性能越来越重要。灯泡这类易碎品在线上销售时, 包装对产品的保护性能是企业包装研发过程中的重中之重。在缓冲包装设计的研究环节, 通常通过传统的破坏性试验, 例如振动与跌落试验, 获得并分析产品及包装的变形量、最大加速度和动态力等响应结果^[1]。这里利用 Ansys Workbench 软

件进行振动与跌落试验的仿真, 提供研发人员所关注的更为详细的参数, 例如整体的最大加速度、整体的应力应变等^[2-3]。不仅如此, 这种方法还能通过对包装的全面分析, 在节省成本的前提下, 快速得出最合理的包装结构设计^[4]。计算机仿真结果与真实试验结果存在误差, 其仿真结果是否具有可靠性是计算机仿真能否真正被利用到包装研发环节的关键。

这里以智能灯泡及其整体缓冲包装为对象, 首先

收稿日期: 2017-09-20

作者简介: 李梦雅 (1992—), 女, 上海大学硕士生, 主攻缓冲包装特性的有限元仿真。

通信作者: 黄秀玲 (1978—), 女, 博士, 上海大学副教授, 主要研究方向为包装技术、食品安全等。

通过传统的振动与跌落试验,对其缓冲性能有初步的了解,再运用 Ansys Workbench 有限元分析软件,研究整个包装件在振动和自由跌落情况下的缓冲特性。通过比较这 2 种方法结果的差异,探究计算机仿真技术在缓冲包装研发环节中是否可行。

1 运输包装缓冲理论基础

交通工具等物流中的外界因素会对产品及包装产生激励,继而产生振动,这种振动称为强迫振动。虽然阻尼存在,但外界力会向系统不断提供能量,使得系统振动不会衰减^[5-6]。这里运输工具的振动可视为振源,产品即为振体,缓冲衬垫则为弹簧。

设包装件自高度 H 处自由下落,见图 1。 H 为跌落高度, H_r 为回弹高度, x 为衬垫变形量, $\dot{x}$ 为衬垫形变速度, $\dot{x}_0$ 为初始时衬垫形变速度, $\dot{x}_r$ 为恢复阶段衬垫形变速度。缓冲衬垫的最大弹性力因数 $F_{\max}$ 与产品最大加速度因数 $G_{\max}$ 的关系式为^[7]:

$$F_{\max} = \frac{F_m}{mg} = \frac{\sqrt{\frac{k_0^2 + 4rmgH}{r}} \cdot (-k_0 + \sqrt{k_0^2 + 4rmgH})}{mg} = G_{\max} \quad (1)$$

式中: F_m 为激振力的峰值; m 为产品质量; k_0 为衬垫的初始弹性常数; r 为弹性衬垫的非线性常数。

从式(1)可以看出,加速度可用来描述衬垫的弹性性能,进而评价包装的缓冲性能^[8]。文中将在一定范围内对加速度进行分析,用以评价衬垫的缓冲性能。

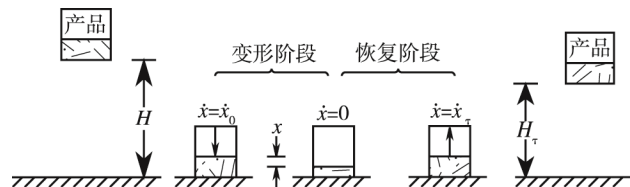


图1 包装件自由跌落
Fig.1 Free drop of packages

2 智能灯泡包装的缓冲特性试验

文中的分析对象为飞利浦智能灯泡,型号为 Hue BR30,规格为 94 mm×130 mm。外包装箱为 0427 型瓦楞纸盒,尺寸为 229 mm×153 mm×130 mm,为 B 楞。衬垫的材料是瓦楞纸板,为 B 楞。外包装及内部实物见图 2。

2.1 瓦楞纸板的物理性能测试

瓦楞纸板在制造及储存过程中,湿度、温度等环境因素会对其物理性能产生影响,进而影响试验及后续仿真结果的准确性。为保证仿真结果的准确性,需要对瓦楞纸进行静态压缩及边压试验,获取准确的材料参数。需要获得的参数有密度、弹性模量、剪切模量、泊松比等^[9-10]。



图2 智能灯泡整体包装
Fig.2 Integral intelligent bulb packaging

2.1.1 测量材料的基本参数

按照 GB/T 6547—1998《瓦楞纸板厚度测定法》^[11]对材料进行取样,并测量其厚度及密度等基本参数。为确保试验结果的准确性,选取 3 个样品,每个样品上取 4 个点用以采集数据。

2.1.2 测量材料的弹性参数

选取尺寸规格为 100 mm×25 mm 及 100 mm×100 mm 的样品,每种规格各 5 个,试样的温湿度预处理按照 GB/T 10739—2002《纸、纸板和纸浆试样处理和试验标准的大气条件》进行^[12]。边压试验按照 GB/T 6546—1998《瓦楞纸板边压强度测定法》^[13]进行,并设置试验机的压缩速率保持在 12 mm/min。

对测试数据进行处理后,得到瓦楞纸板厚度为 3.6 mm,密度为 148.5 kg/m³。试验虽得到了瓦楞纸板的弹性参数,但纸板本身为各向异性材料,折叠后外箱及内部衬垫不同方向的参数有所差别^[14],因此需要对瓦楞纸板折叠成外箱及衬垫后各个方向的参数进行单独定义,见表 1。其中, E_x , E_y , E_z 分别为纸

表 1 瓦楞板材料性能参数
Tab.1 Performance parameters of corrugated board

结构	方向	E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}
外箱	前后	3.2	0.2	9.7	0.56	0.27	7.42	0.01	0.01	0.14
	左右	0.2	3.2	9.7	0.56	7.42	0.27	0.01	0.14	0.01
	上下	3.2	9.7	0.2	7.42	0.27	0.56	0.14	0.01	0.01
衬垫	前后	5.3	1.02	6.7	0.11	0.22	2.43	0.01	0.01	0.29
	左右	1.02	5.3	6.7	0.11	2.43	0.22	0.01	0.29	0.01
	上下	5.3	6.7	1.02	2.43	0.22	0.11	0.29	0.01	0.01

板 x , y , z 方向的弹性模量; G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} 为纸板 xy , yz , xz 平面的剪切模量; μ_{xy} , μ_{yz} , μ_{xz} 为纸板 xy , yz , xz 平面的泊松比。

2.2 包装件振动试验

振动试验采用的振动设备由功率放大器及振动筛组合而成,在内部衬垫上粘贴可以记录 y 方向加速度的传感器,放置位置见图 3,通过数据采集器进行数据采集。



图 3 加速度传感器粘贴位置

Fig.3 Acceleration sensor pasting position

1) 随机振动试验。实际运输环境十分复杂,产品包装的振动更贴近于随机振动。为更加真实地拟合现实的运输情况,这里将进行随机振动试验。该试验采用 ASTM D 4728 Truck, 振动 15 min, 获得的随机振动谱见图 4。频率响应曲线见图 5, 为随机振动的结果。可以看出, 包装件的一阶固有频率为 100 Hz, 可作为定频振动试验的试验条件。

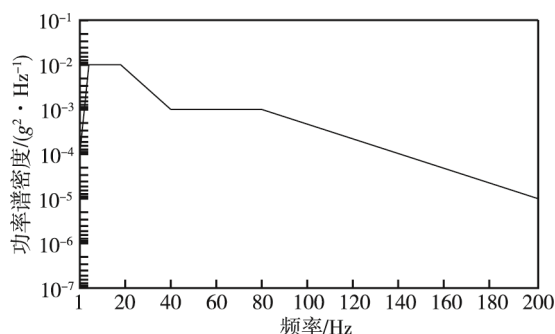


图 4 随机振动谱

Fig.4 Random vibration spectrum

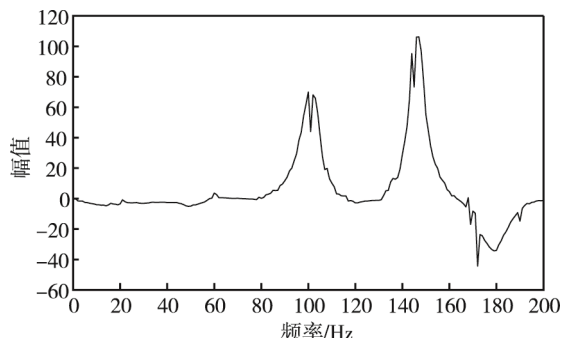


图 5 随机振动试验的频率响应曲线

Fig.5 Frequency response curve of random vibration test

2) 定频振动试验。根据随机振动试验得出的包装件固有频率进行定频振动试验,测得产品在固定频率下的加速度响应。该试验的频率取 100 Hz, 固定包装件在振动筛上,并附上与随机振动试验相同的竖直方向加速度传感器,振动时间为 1 min。取振动稳定的一段输出信号,见图 6。试验结果显示,在固有频率下,衬垫在竖直方向上的加速度为 $-3.844 \sim 4.194 \text{ m/s}^2$ 。

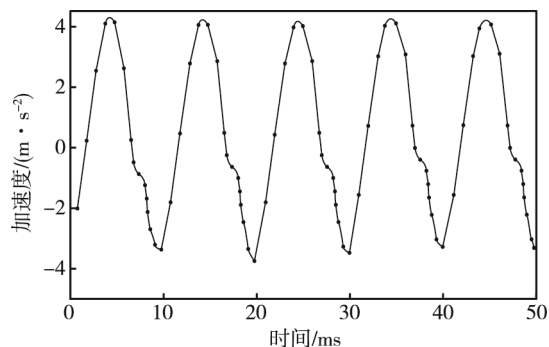


图 6 定频振动试验的加速度响应

Fig.6 Acceleration response of constant frequency vibration test

2.3 包装件跌落试验

试验采用的跌落机设备由跌落平台、控制装置及竖直导杆组成,跌落时通过数据采集器对 y 方向上的加速度进行数据采集。根据飞利浦照明公司的客户要求,跌落高度设置为 0.46 m, 初速度为 0 m/s, 跌落姿态为正跌落, 加速度响应曲线见图 7。可以看出, 在 430 ms 时, 包装件有最大加速度 443.2 m/s^2 。

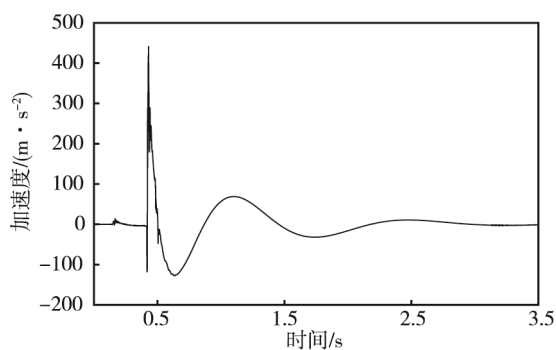


图 7 自由跌落试验的加速度响应

Fig.7 Acceleration response of free drop test

3 智能灯泡缓冲包装的有限元分析

3.1 有限元模型建立

为了方便网格划分、求解设置、计算收敛等,对智能灯泡进行分析,忽略一些内部以及灯头螺旋处不影响整体作用的结构,对模型进行简化。运用 SolidWorks 软件进行建模,将各部分按照实际接触组装成完整的整体包装件模型并存储为 *iges* 格式,导入 Ansys Workbench 中进行有限元模型的创建。

仿真分析主要分析衬垫的变形及应力等参数,而对产品、振动台及地面的各项参数不加以讨论,故均视为刚体。衬垫及外箱的各项参数已在表1中给出,其余材料的物理参数见表2。

表2 相关材料性能参数
Tab.2 Related material performance parameters

参数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
振动台	7860	212	0.34
灯壳	1190	3.3	0.37
灯头	2770	70.7	0.33
地面	2300	30	0.18

模型的接触定义根据实物在试验中的实际接触情况进行设置。定义产品与衬垫的接触方式为摩擦接触,摩擦系数为0.2,衬垫与外箱上下面及外箱侧面分别为光滑去摩擦接触和不分离接触。将全部接触行为均设置为非对称接触,接触半径为0.01 m。在振动分析中,接触算法为罚函数法,Update Stiffness均设为Each Iteration。

在仿真分析中,衬垫参数是研究重点,故将这部分网格细化,用弹塑性材料模型,对薄壁结构抽取中面并采用四面体主导自动划分网格形式^[15]。对于刚性体部分,不需要精确求解,只产生面网格。有限元模型网格划分后,单元数为8554,节点数为9342,网格划分效果见图8。

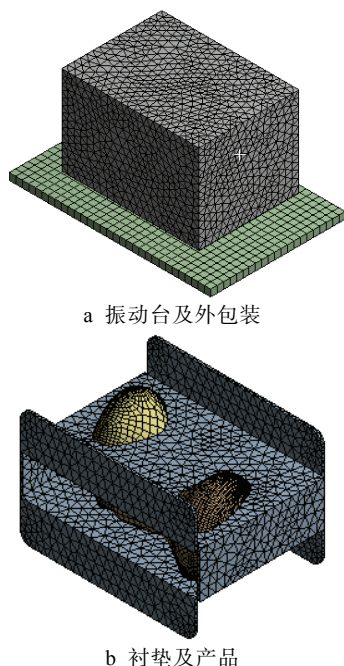


图8 有限元模型

Fig.8 Finite element model

3.2 振动仿真计算及分析

利用Workbench中的Harmonic Response进行定

频振动分析,分别选择振动台和产品的某个面,施加远端位移载荷。保持与试验条件一致,施加加速度激励于振动台底面,方向为竖直方向。仿真得到衬垫的振动加速度曲线,衬垫在竖直方向上加速度为 $-4.164 \sim 4.557 \text{ m/s}^2$ 。将仿真结果与试验结果进行对比,可以看出误差在9%以内,见图9。

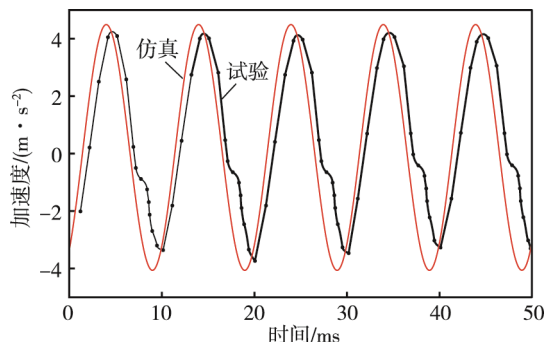


图9 振动试验与仿真结果对比

Fig.9 Comparison between vibration test and simulation results

3.3 跌落仿真计算及分析

与试验条件保持一致,跌落高度为0.46 m。为节省计算资源,根据自由落体的公式,将跌落等效为如下工况:跌落高度为0.003 m,初始速度为3.004 m/s,方向为竖直向下方向。添加标准重力加速度,并施加固定载荷于地板上表面。跌落姿态采用平跌落,设置分析时间为0.02 s,初始时间步长为0.5 ms,最小时间步长为1 μs ,最大步长为0.1 ms,并启用最大变形功能。

0.01 s时,在竖直方向上内部衬垫的加速度达到最大。此时的响应加速度云图见图10,可以看出,跌落过程中,传感器所在位置的加速度为 370.93 m/s^2 ,与试验结果进行比较,误差约为16.31%。

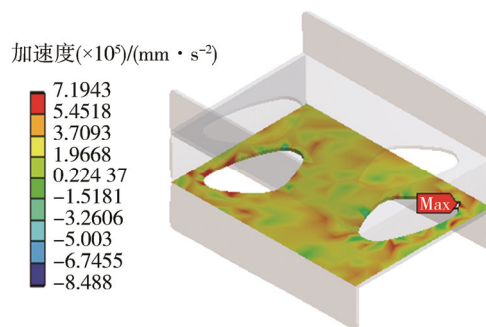


图10 衬垫加速度仿真结果

Fig.10 Acceleration simulation result of liner

4 结语

通过Ansys Workbench软件进行包装件缓冲特性的仿真,并与真实试验结果相比较,可以得出以下结论。

1) 振动、跌落的仿真结果与真实试验的结果误

差分别为 9%, 15.91%, 试验与仿真结果存在误差, 是因为仿真建模时对产品形状进行了简化、参数测定及计算所带来的误差以及试验客观存在的误差等因素导致的, 在可接受范围内。

2) 试验与仿真的结果差异在可接受范围之内, 故有限元分析的方法能够较好地反映包装件振动及跌落的动态缓冲特性, 验证了计算机仿真分析的可行性。在企业的包装研发环节, 可采用有限元仿真的方法, 进而缩短研发周期, 降低研发成本。

3) 在实际生产环节, 不同批次的包装材质也会有所不同。为增强仿真结果的可信度, 实验材料参数的获取一定要保证尽量准确, 最大程度地缩小仿真与实际结果的差距。

参考文献:

- [1] 李小丽. 非线性缓冲包装系统冲击特性的仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
LI Xiao-li. Simulation Study on Shock Property of Package Cushioning System with Non-linearity[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.
- [2] 杨书仪, 刘德顺, 赵继云. 基于 LS-DYNA 的移动硬盘跌落冲击耐撞性能分析[J]. 振动与冲击, 2012(9): 13—17.
YANG Shu-yi, LIU De-shun, ZHAO Ji-yun. Drop Impact Crashworthiness Analysis of Mobile Hard Disk Based on LS-DYNA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012(9): 13—17.
- [3] 张云华, 李珊, 刘冠玉, 等. 红外镜头跌落冲击仿真及缓冲包装方法选择研究[J]. 振动与冲击, 2014(24): 133—137.
ZHANG Yun-hua, LI Shan, LIU Guan-yu, et al. Dropping Simulation and Selecting of Cushion Packaging Methods for a Infrared Lens[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(24): 133—137.
- [4] 杨旭彪. 基于 ANSYS Workbench 的液晶电视包装件跌落冲击数值模拟[D]. 济南: 山东大学, 2015.
YANG Xu-biao. Numerical Simulation on Drop Impact of LCD TV Package Based on ANSYS Workbench[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [5] 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 Jin-chen. On Cushioning Performance of Corrugated Panel[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [6] 杨书仪, 刘德顺, 赵继云. 基于 LS-DYNA 的移动硬盘跌落冲击耐撞性能分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 13—17.
YANG Shu-yi, LIU De-shun, ZHAO Ji-yun. Drop Impact Crashworthiness Analysis for Mobile Hard Disk Based on LS-DYNA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(9): 13—17.
- [7] 高德. 包装应用力学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013.
GAO De. Packaging Applied Mechanics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.
- [8] 陈安军. 非线性包装系统跌落冲击问题变分迭代法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 105—107.
CHEN An-jun. Variational Iteration Method in Dropping Shock Problem on Cubic Non-linear Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18): 105—107.
- [9] QU J, JIN Q L, XU B Y. Parameter Identification of Super-plastic Constitutive Model by GA-Based Global Optimization Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008(1): 212—220.
- [10] 潘凤丽, 李光. 基于 Ansys Workbench 的塑料蜂窝板仿真分析及优化[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 44—49.
PAN Feng-li, LI Guang. Ansys Workbench-based Simulation Analysis and Optimization of Plastic Perforated Board[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 44—49.
- [11] GB/T 6547—1998, 瓦楞纸板厚度测定法[S].
GB/T 6547—1998, Corrugated Fibreboard: Determination of thickness[S].
- [12] GB/T 10739—2002, 纸、纸板和纸浆试样处理和试验标准的大气条件[S].
GB/T 10739—2002, Paper, Board and Pulps: Standard Atmosphere for Conditioning and Testing[S].
- [13] GB/T 6546—1998, 瓦楞纸板边压强度测定法[S].
GB/T 6546—1998, Corrugated Fibreboard: Determination of Edgewise Crush Resistance[S].
- [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 Li-xin, SUN Ju-jie, WANG Jun. Effect of Fatigue Vibration on the Load Capacity and Cushioning Properties of Corrugated Fiberboard[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 43—46.
- [15] 刘永辉, 张银. 基于有限元分析的洗衣机跌落冲击仿真及改进设计[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 164—166.
LIU Yong-hui, ZHANG Yin. Dropping Simulation and Design Improvement of Washing Machine Based on FEM Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 164—166.