

薄型烟机包装实验室测试与跌落仿真分析

何雯，陈满儒

(陕西科技大学 轻工科学与工程学院, 西安 710021)

摘要：目的 研究薄型烟机包装跌落状态下的变形问题，并根据测试及仿真分析结果提出整改方向和具体措施。**方法** 根据运输包装件跌落试验方法确定导致产品变形的跌落工况，基于 Creo 和 Ansys Workbench 软件进行产品包装件跌落仿真分析，得到产品的位移及应力分布。**结果** 扫频测试共振频率与模态分析固有频率一致，证明了有限元模型建立的正确性；跌落过程中能量守恒证明了分析结果的正确性；最大位移分布于滤网、蜗壳、电机上，最大应力分布于产品外壳上；实验室测试与仿真分析得到的加速度随时间的变化趋势基本相同。**结论** 分析产品跌落变形问题可采用实验室测试与有限元仿真分析相结合的方法，全面评价产品变形情况和应力集中现象。解决薄型烟机变形问题可通过增加衬垫、改进产品结构等方式实现。有限元模型的验证和分析过程中的能量守恒能够保证有限元分析结果的正确性。

关键词：跌落测试；扫频测试；模态分析；跌落分析

中图分类号： TB485.3; TB487 **文献标识码：**A **文章编号：** 1001-3563(2019)03-0125-06

DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.018

Laboratory Test and Drop Simulation Analysis of Thin-type Kitchen Ventilator Package

HE Wen, CHEN Man-ru

(College of Light Industry Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the deformation of the thin-type kitchen ventilator package under drop condition, and put forward the rectification direction and specific measures according to the test and simulation analysis results. The drop condition causing product deformation was determined according to the drop test method of transport packages. Based on Creo and Ansys Workbench software, the drop simulation analysis of product packages was carried out, and the displacement and stress distribution of products were obtained. The consistency between resonance frequency measured by sweep frequency test and the natural frequency of modal analysis proved that the finite element model established was reasonable. The conservation of energy in the drop process proved that the analysis result was correct. The maximum displacement was distributed on filter, volute and motor. The maximum stress was distributed on the product shell. In addition, the trend of acceleration obtained from laboratory test varying with time was basically the same with that obtained by simulation analysis. In order to analyze the drop deformation of products, laboratory tests and finite element simulation analysis can be combined to comprehensively evaluate the deformation and stress concentration of products. The deformation problem of the thin-type kitchen ventilator can be solved by adding pads and improving the product structure, etc. The validation of the finite element model and the conservation of energy in the analysis process can ensure the correctness of the finite element analysis results.

KEY WORDS: drop test; sweep frequency test; modal analysis; drop analysis

收稿日期：2018-09-26

作者简介：何雯（1994—），女，陕西科技大学研究生，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，主要研究方向为缓冲包装动力学。

冲击使产品在极短的时间内产生很大的加速度^[1],甚至可能超出产品的脆值范围造成损坏,其中跌落是最为严酷的冲击方式^[2]。随着有限元技术的发展,实验室测试不再是验证产品包装件缓冲性能的唯一手段。Kim 等^[3]运用显式动力学软件 Ansys/LS-DYNA 模拟了移动电话跌落冲击过程,证明了数值模拟技术的强大和高效。郝智伟等^[4]以波轮洗衣机为研究对象,建立了洗衣机关键部件的有限元模型,并对其跌落性能进行了研究。毛兰斌^[5]基于软件 Ansys/LS-DYNA 模拟了电路板组件自由跌落的具体过程,并阐述了 PCB 板及关键组件在自由下落过程中所受到的冲击情况。卜杨^[6]等基于 Workbench 仿真软件进行了吸尘器的振动及跌落仿真分析,验证了立式吸尘器整体包装方案优化设计的保护和安全性能。余芳^[7]应用 ABAQUS 模拟手持式电动工具跌落测试,找到造成失效的主要原因,从而在生产之前解决部分设计缺陷。有限元仿真技术已经逐渐成为研究产品包装件跌落过程中缓冲性能不可或缺的手段^[8]。

文中以某品牌薄型烟机为对象,研究其在跌落过程中发生的变形问题。首先通过实验室跌落测试复现市场反馈的变形情况,确定导致变形发生的跌落工况;再利用 Ansys Workbench 在该跌落工况下对产品包装件的有限元模型进行跌落仿真分析,模态分析与扫频测试结果的一致和分析过程中的能量守恒能够保证有限元分析结果的正确性;最后根据测试和仿真结果,分析产品变形原因,提出相应的整改措施,并总结分析产品跌落变形的方法。

1 实验室测试

1.1 包装件跌落测试

某品牌薄型烟机经常受到外壳变形的市场投诉,变形情况见图1。该品牌薄型烟机的目标市场是北美、欧洲等地区,包装要求是保证产品在从产地到消费地的流通过程中不发生肉眼可见的变形及损伤。包装件

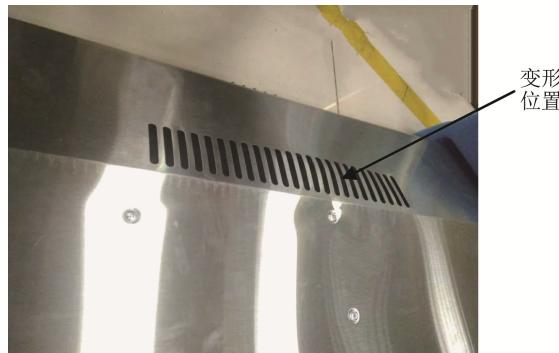


图1 薄型烟机变形

Fig.1 Deformed thin-type kitchen ventilator

的质量为 7.85 kg, 外尺寸为 830 mm×198 mm×550 mm, 外包装箱为 BC 楞一片式平口纸箱, 现用于缓冲的衬垫材料是 EPS, 衬垫分别位于两侧。

根据 GB/T 2423.8^[9]规定, 产品应选取的跌落高度为 760 mm, 但在实际市场反馈及跌落测试中, 560 mm 的跌落高度可使产品产生变形, 因此这里设定跌落高度为 560 mm。试验采用的跌落机设备是 CY-206 翻板式跌落试验机, 数据采集设备由莱斯蒙特公司的 Test Partner 3 信号采集分析系统和 PCB PIEZOTRONICS 的 356A24 三向压电加速度传感器组成, 测试过程中, 加速度传感器应固定在包装件内的缓冲衬垫支撑面与被测样品接触的刚性表面上, 且其最敏感的方向须与冲击方向一致。底面跌落时加速度传感器的安装位置见图 2。

按照 GB/T 4857.5^[10]运输包装件跌落试验方法依次进行“一角三棱六面”的跌落, 根据结果显示, 在产品包装件底面跌落测试时, 产品外壳顶面发生了变形, 与市场反馈的变形情况类似, 通过数据采集设备收集到的数据可得到产品的响应加速度曲线, 见图 3。分析可知, 跌落数据采集时间为 20 ms, 产品的损坏由跌落时产生的加速度大于其所能承受的临界加速度造成, z 方向的加速度响应远大于 x 和 y 方向的加速度响应, 证明产品损坏主要是由 z 方向受到的冲击导致。

产品的跌落过程大致分为 3 个阶段: 第 1 阶段加速度变化趋势较为平缓, 此时冲击脉冲作用于缓冲垫, 还未传递到产品; 第 2 阶段产品的加速度开始大幅度波动, 并出现峰值, 缓冲垫逐渐将冲击能量传递到产品上, 13 ms 时产品的加速度达到最大值, 为 1137.8 m/s^2 , 此时为缓冲垫压缩变形的极限时刻; 第 3 阶段是产品在惯性力和弹性恢复力的双重作用下, 加速度波动幅值逐渐变小直至为 0。通过测量得到产品最大变形位于外壳, 最大变形量约为 5 mm。从产品的变形情况推测, 造成变形的原因可能是产品长度方向跨度较大, 且电机、蜗壳固定于薄型烟机的外壳顶面, 跌落时蜗壳、电机对外壳顶面产生了较大的拉力。

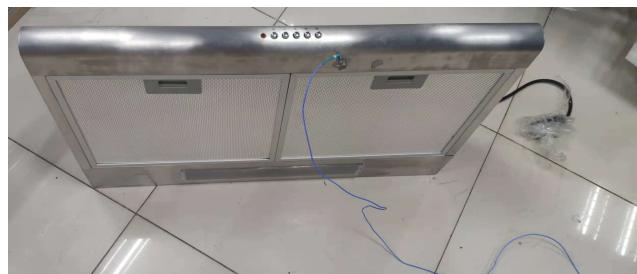


图2 传感器安装位置

Fig.2 Sensor mounting position

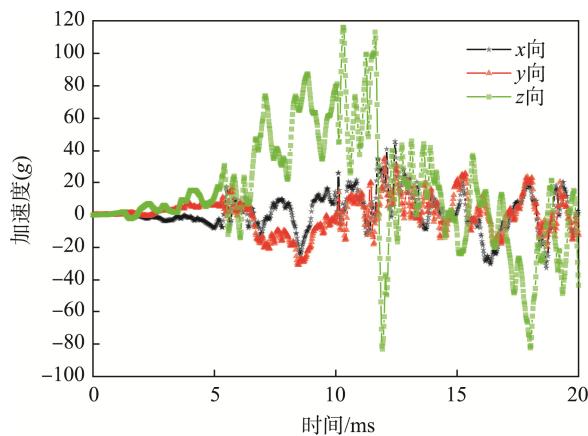


图 3 底面跌落时产品加速度响应
Fig.3 Acceleration response of product during bottom drop

1.2 产品扫频测试

扫频测试即正弦变频振动测试，试验目的是得出产品的共振频率。文中试验采用 DC-3200-36 电动振动试验机，根据 GB/T 4857.10^[11] 规定将振动频率范围设定为在 3~100 Hz，扫频速率设为每分钟 0.5 倍频，并将振动台的振动加速度设置为 0.5g，振动方向为竖直方向。加速度传感器在选择安装位置时，应该先确定产品是否含有易损部件。若含易损部件，应将传感器置于易损部件上；若无易损部件，可将传感器置于产品结构较为结实的框架上。文中试验中，输出传感器安装于产品的易损外壳底部，输入传感器安装于振动台，根据试验得到的产品响应加速度绘制产品的振动传递特性曲线。

振动传递特性是指振动传递率与频率之间的关系，振动传递率为振动测试系统在正弦振动激励下，产品（输出）与振动台（输入）的加速度幅值的无量纲比。振动传递率峰值处对应产品的共振频率，而最大峰值处则为主共振频率。振动传递曲线见图 4，3~30 Hz 频率范围内，振动传递率随着频率的增大基本保持稳定；频率在 30~100 Hz 范围内，振动传递率发生

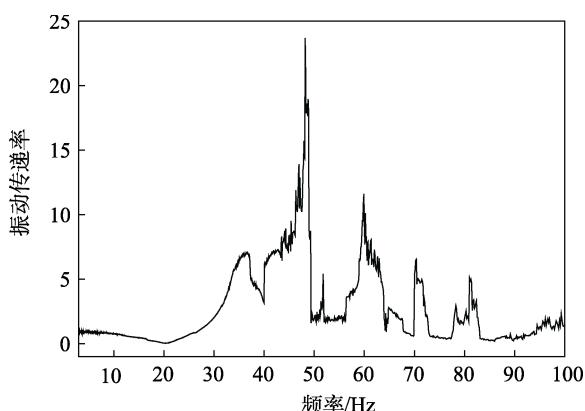


图 4 产品的振动传递曲线
Fig.4 Vibration transfer curve of product

了较大的波动，出现了多次峰值，并在频率为 48.2 Hz 时，产品的振动传递率达到了最大值，即产品的主共振频率为 48.2 Hz。

2 有限元仿真分析

2.1 有限元模型的建立

1) 模型导入。薄型烟机包装件的主要部件为产品外壳、蜗壳、蜗轮、电机、滤网、衬垫、纸箱等。利用 Creo 软件建立实体的三维模型，生成 ACIS 格式文件后导入 Ansys Workbench，并在 DM 模块中对产品模型进行切片、删除圆角等处理^[12]，便于后续的网格划分及网格质量控制，产品包装件模型见图 5。

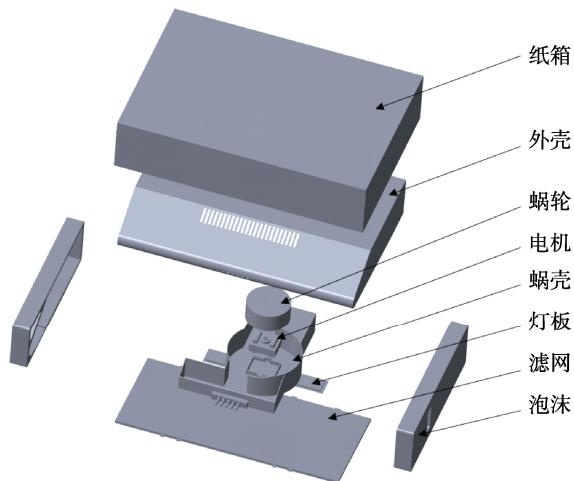


图 5 产品包装件模型
Fig.5 Product package model

2) 材料参数设定。为了模拟真实的跌落过程，需要对产品的各个部件赋予相应的材料属性^[13]，主要包括材料的密度、弹性模量、泊松比。薄型烟机包装件的零部件包含产品外壳、电机、蜗轮、蜗壳、灯板、滤网、纸箱、衬垫等。衬垫材料 EPS 和纸箱是非线性材料，按照显式动力学计算的要求，必须提供材料的弹性模量才可进行仿真，因此将其简化为线性材料，取平均弹性模量参与计算^[14]。具体的参数设置见表 1。

表 1 各部件材料参数
Tab.1 Material parameters of the components

部件	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比
外壳、电机	7850	212	0.274
灯板	1190	2.46	0.38
滤网	220	41.285	0.38
泡沫	22	0.0041	0.38
纸箱	225	0.2	0.34
蜗轮、蜗壳	900	1.2	0.38

3) 接触设置定义。Workbench 中的接触方式共包含 5 种, 即绑定(Bonded)、不分离(No Separation)、粗糙(Rough)、光滑无摩擦(Frictionless)、摩擦(Friction)。绑定适用于接触面或接触边之间不存在切向的相对滑动或者法向的相对分离的部件间接触^[15], 因此将产品内部的部件接触设置为绑定; 泡沫与纸箱、泡沫与产品设置为摩擦, 系数为 0.2; 纸箱与地面之间存在间隙, 该接触设为无摩擦。Workbench 可以自动检测并生成各个部件之间的接触对, 但过大的公差值(Tolerance Value)会导致部件间生成一些不必要的或者错误的接触对, 在此需将公差值设置为 2 mm。

4) 网格划分。在有限元分析中只有网格的节点和单元参与计算, 因此网格划分的质量会直接影响仿真结果^[15]。由于六面体网格的质量优于四面体网格, 且能够大大缩短计算时间, 因此划分时采用以六面体为主的网格划分方式, 需将不规则的体采用切片工具切分为规则体以提高网格质量, 纸箱六面体的网格划分见图 6^[16]。在 Workbench 的网格划分 Mesh 模块中, 可通过观察单元质量显示数值评判网格质量, 单元质量取值范围为 0~1, 数值越大, 表示网格质量越好, 数值越小, 则网格质量越差。由于烟机外壳厚度仅为 0.6 mm, 无法划分高质量的体网格, 因此在 DM 模块进行抽中面处理, 再采用四边形网格进行划分, 外壳开孔处需进行网格加密处理, 提高网格质量。外壳四边形的网格划分见图 7, 划分完成后共有 132 221 个单元, 网格平均单元质量达到 0.73。

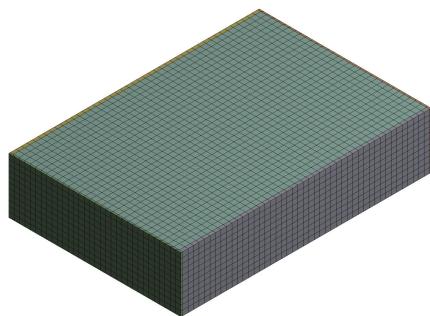


图 6 纸箱六面体的网格划分
Fig.6 Hexahedral meshing of carton

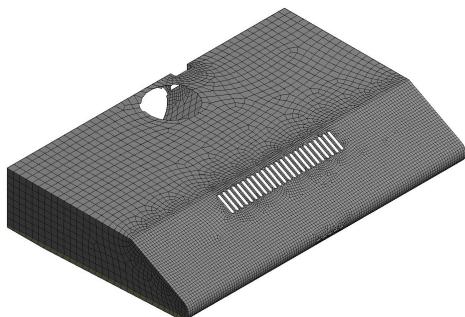


图 7 外壳四边形的网格划分
Fig.7 Quadrilateral meshing of shell

2.2 模态分析

模型的简化使得网格质量大大提高, 但为了获得准确可靠的仿真结果, 需验证有限元模型建立、简化的正确性。模态分析可用来计算结构的固有频率和振型, 当外界激振力的振动频率接近产品固有频率时, 产品就会产生共振^[17]。当某阶模态与扫频测试振动方向一致, 且该模态的固有频率值接近扫频测试得到的共振频率值时, 即可证明有限元模型的正确性。

利用 Workbench 中 Modal 模块对薄型烟机模型进行模态分析, 为了与实际扫频测试条件相对应, 边界条件设置烟机底面为全固定约束。通常情况下, 产品振动的低频处发生共振的概率较高, 前 5 阶最容易激发共振, 因此模态分析提取阶数按照 Workbench 默认取前 6 阶, 求解后得到产品的各阶振型及固有频率。

模态有效质量比是指在某一向量激励下, 某一模态参与的系统质量与系统总质量的比值。通过观察每阶模态各个方向的有效质量比, 可得出该模态的主振方向^[18]。各阶模态的有效质量比见表 2, 可以得出, 产品的第 1 阶模态主振型为 y 向的平动以及 x 向和 z 向的转动, 产品的第 2 阶模态主振型为 y 向的平动, 第 3 阶模态的主振型为 y 向的平动和 x 向的转动, 第 4 阶模态的振型为 z 向的平动, 第 5 阶模态的振型为 z 向的转动, 第 6 阶模态的振型为 x 向的平动。第 2 阶模态产品的运动方向与扫频测试时振动台的振动方向一致。产品的前 6 阶固有频率见图 8, 可得第 2 阶固有频率值为 44.135 Hz, 与扫频测试得到的共振频率 48 Hz 非常接近, 说明建立的有限元模型是合理的。

表 2 各阶模态的有效质量比

Tab.2 Effective mass ratio of different modes $\times 10^{-3}$

阶数	x 向有效质量比	y 向有效质量比	z 向有效质量比	x 转向有效质量比	y 转向有效质量比	z 转向有效质量比
1	0.0076	84	0.63	39	0.36	32
2	0.22	195	0.35	16	0.36	13
3	0.042	26	0.057	39	0.29	6.7
4	5.4	1.7	155	30	72	0.054
5	0.21	0.45	0.16	0.15	0.26	16
6	139	0.079	3.5	1.1	0.0039	16

2.3 跌落分析

产品包装件在底面跌落时发生了变形, 利用 Workbench 中 Explicit Dynamics 模块对该跌落工况进行分析。为了减少运算时间, 设置包装件与跌落平台初始距离为 3 mm^[19], 初速度为 -y 方向, 560 mm 跌落高度等效的初始速度为 3305 mm/s, 重力加速度为 -y 方向, 大小为 9806 mm/s², 边界条件设置跌落平台为全固定约束。根据实验室跌落测试数据时间, 输

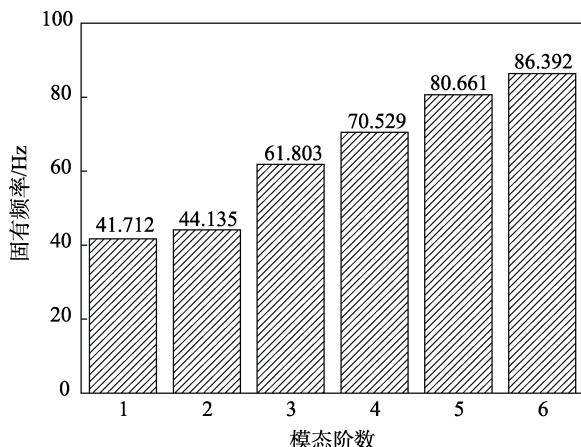


图 8 产品的各阶固有频率
Fig.8 Natural frequencies of product

出设置中运算时间设定为 0.02 s，最大错误能量因子为 0.1，结果中共保存 40 个时刻点的结果，即每 0.5 ms 保存 1 次结果。

在计算过程中，显式算法是利用前一时间点的节点参数结果预测下一时间点的结果，因此显式动力学计算中模型的质量、动量和能量应守恒，而这一点也正是评价显式动力学分析结果正确性的指标。在该跌落仿真过程中，总能量略低于参考能量，系统做功为负值，见图 9。这是因为包装件衬垫与产品、纸箱之间的摩擦力会做负功，分析过程符合能量守恒，证明分析的结果可靠。

产品在 8 ms 时出现了最大的位移量，见图 10。位移最大区域位于滤网，位移量在 21.0~23.8 mm 之间，这是由于跌落过程中冲击能量由衬垫传递到滤网上，但滤网与外壳的配合为薄弱的卡扣方式，能量传递不佳，导致滤网吸收了大量的冲击能量。其次为电机和蜗壳区域，位移量在 18.2~21.0 mm 之间。这是因为这 2 个零部件质量较大，且通过螺钉连接固定于厚度仅为 0.6 mm 的外壳上，较大的冲击能量在内部无法传递或被其他缓冲衬垫吸收。

跌落过程中，薄型烟机最大应力主要分布于外壳上。最大应力值出现在 3.5 ms 时刻，见图 11，最大应力为 940 MPa，远远超过了外壳材料结构钢的屈服应力 200 MPa。最大应力分布于外壳有较大开孔和连续开孔的位置，如开关孔、通风孔等，开孔会使产品整体结构强度下降，当孔周围有应力集中时，就会造成变形。实验室跌落测试中，烟机变形的位置也正好在外壳上。

试验和仿真 2 种情况下产品的最大响应加速度-时间曲线见图 12，分析可知，仿真得出的最大响应加速度为 95.47g。2 条曲线中加速度随时间变化的趋势基本吻合，证明仿真结果合理。存在的误差可能是由产品形状简化，部分非线性材料被简化为线性材料参与计算，分析过程中记录结果的时间间隔太大等因素造成。

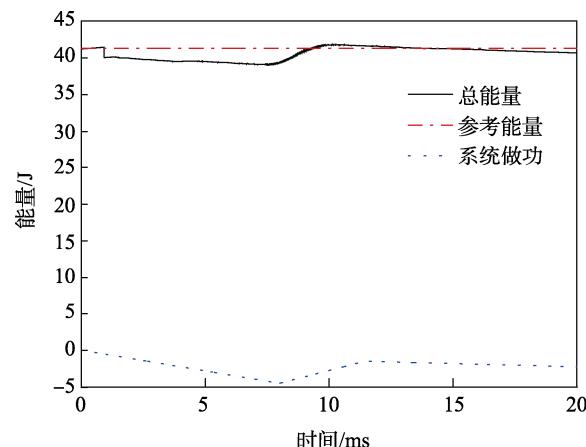


图 9 能量守恒追踪曲线
Fig.9 Energy conservation tracing curve

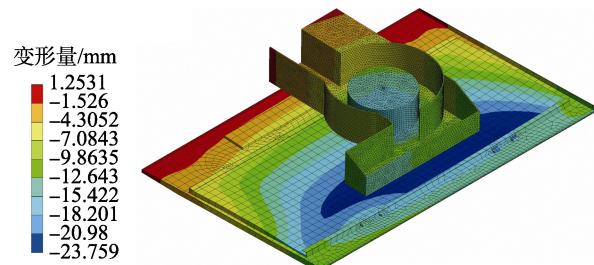


图 10 产品 y 轴方向的变形
Fig.10 Directional deformation (y axis) of product

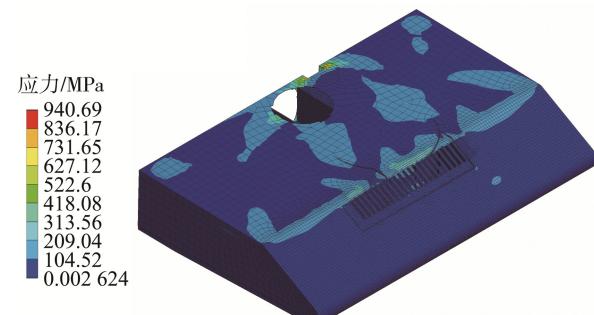


图 11 产品应力分布
Fig.11 Product's stress distribution

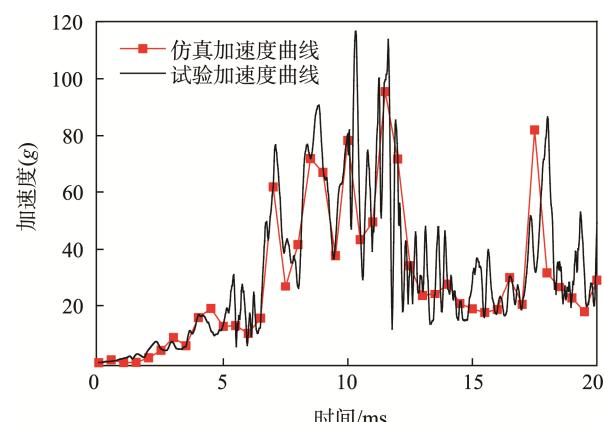


图 12 产品时间-加速度曲线
Fig.12 Time-acceleration curve of the product

3 结语

通过实验室测试和仿真手段对薄型烟机跌落变形问题进行分析,得到造成产品变形的原因。针对该类产品跌落变形问题,可按照以下方法进行研究:通过实验室跌落测试确定造成产品变形的跌落工况;结合有限元仿真中的跌落分析得到产品位移情况及应力分布,更加深入地探究导致产品发生变形的原因。

薄型烟机的跌落变形问题可能由包装结构设计不善或产品本身的结构缺陷引起,因此,建议从以下2个方面进行改进:在包装结构设计方面,适当增加外壳的缓冲接触面积,或在产品跨度的中央位置放置吸收能量的缓冲块,以解决外壳变形问题;在产品结构设计方面,应在保证产品性能的同时避免应力集中现象,减少大面积或连续的孔洞设计。

为了保证仿真分析结果的可靠性,应该从2个方面去验证分析过程:通过对对比扫频测试的共振频率与模态分析的固有频率是否一致,验证有限元模型建立的正确性;观察跌落分析过程中的能量是否守恒,验证仿真分析结果的正确性。

参考文献:

- [1] 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(4): 44—47.
DING Yu-ping, QIAN Yi. Drop Simulation Analysis and Structure Optimization of the Overall Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2014(4): 44—47.
- [2] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Logistics and Distribution Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [3] KIM J, PARK Y K. Experimental Verification of Drop Impact Simulation for a Cellular Phone[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(4): 375—380.
- [4] 郝智伟. 波轮式洗衣机关键部件的跌落仿真[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
HAO Zhi-wei. Numerical Simulation on Drop Impact of the Crucial Component of Pulsator Washing Machine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [5] 毛兰斌. 基于Ansys的电路板组件的跌落仿真[J]. 苏州市职业大学学报, 2007, 18(3): 73—75.
MAO Lan-bin. Drop Simulation of Circuit Card Assembly Based on Ansys[J]. Journal of Suzhou Vocational University, 2007, 18(3): 73—75.
- [6] 卜杨, 张新昌. 基于Ansys Workbench的吸尘器振动与跌落仿真[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 122—127.
BU Yang, ZHANG Xin-chang. Simulation of Vibration and Drop of Vacuum Cleaner Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 122—127.
- [7] 余芳. 基于Abaqus的手持式电动工具跌落仿真[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(S2): 297—300.
YU Fang. Drop Simulation of Hand-held Power Tool Based Abaqus[J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22(S2): 297—300.
- [8] 门超, 李光. 红酒包装跌落仿真分析及优化设计[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 38—42.
MEN Chao, LI Guang. Drop Simulation Analysis and Optimization Design of Red Wine Package[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 38—42.
- [9] GB/T 2423.8—1995, 跌落试验方法[S].
GB/T 2423.8—1995, Drop Test Method[S].
- [10] 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-Vertical Impact Test Method by Dropping[S].
- [11] GB/T 4857.10—2005, 包装 运输包装件 基本试验 第十部分: 正弦变频振动试验方法[S].
GB/T 4857.10—2005, Packaging Basic Tests for Transport Packages-Part 10: Sinusoidal Vibration Test Method Using at Vibration Frequency[S].
- [12] 申利发. 平板电视缓冲包装性能模拟分析计算[D]. 济南: 山东大学, 2014.
SHEN Li-fa. Simulation Analysis on the Performance of Cushioning Packaging for Flat Panel TV[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [13] 李梦雅, 黄秀玲, 王军. 包装件缓冲特性的有限元仿真可靠性分析[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 59—63.
LI Meng-ya, HUANG Xiu-ling, WANG Jun. Finite Element Simulation Reliability of Package Cushioning Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 59—63.
- [14] 李兴洲. 电子产品包装性能 CAE 研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
LI Xing-zhou. The CAE Research on Packaging Properties of Electronic Products[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [15] 张菊飞. 基于Ansys Workbench 的商用汽车暖风机的物流运输包装设计与研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
ZHANG Ju-fei. On Logistics and Distribution Packaging of Unit Heater for Commercial Automobile via Ansys Workbench[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2013.
- [16] 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.
- [17] 孙金坤, 李奎, 周文峰, 等. 两种理论下梁振动固有频率试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44(1): 33—36.
SUN Jin-kun, LI Kui, ZHOU Wen-feng, et al. Experimental Study on Natural Frequencies of Beam Vibration under Two Theories[J]. Sichuan Building Science, 2018, 44(1): 33—36.
- [18] 徐广晨, 孙兴伟. 模态有效质量在数控管螺纹车床动态特性仿真中的应用[J]. 工具技术, 2017, 51(12): 51—54.
XU Guang-chen, SUN Xing-wei. Application of Modal Effective Mass Based on Dynamic Characteristics Simulation of CNC Pipe Thread Lathe[J]. Tool Engineering, 2017, 51(12): 51—54.
- [19] 车宪香. 包装件跌落模拟计算与缓冲结构优化[D]. 济南: 山东大学, 2013.
CHE Xian-xiang. Computer Simulation on Drop Test of Packages and Optimization of Cushion Foams Structure[D]. Jinan: Shandong University, 2013.