

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.04.002

# 卧式吸尘器包装结构有限元研究

邓志辉<sup>1</sup>, 李亮<sup>2</sup>, 刘红达<sup>2</sup>, 林岩琛<sup>2</sup>, 张新昌<sup>1,3</sup>

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 江苏美的清洁电器股份有限公司, 江苏苏州 215000;  
3. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

**摘要:**为了验证卧式尘袋吸尘器包装结构的安全性能,根据该吸尘器生产、物流过程中所处物流环境,采用Creo软件建模,通过施加相应约束条件,分析卧式吸尘器包装件在物流环境中抗压、随机振动、跌落等情况,采用ANSYS Workbench软件分析包装件在相应载荷作用下的应力、变形以及物理试验下包装、产品受损情况。结果表明卧式吸尘器包装件在最大堆码情况下,变形量未超过标准规定10 mm;经过模态分析,得到6阶模态参数表明不会发生共振现象;包装件跌落试验结果表明应力应变较小。该吸尘器包装设计满足抗压、随机振动、以及跌落测试等要求,方案可行。

**关键词:**卧式吸尘器;有限元分析;ANSYS Workbench;抗压;随机振动;跌落测试

中图分类号:TS206.5 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)04-0007-07

## Finite Element Verification of Packaging Structure of Horizontal Vacuum Cleaner

DENG Zhihui<sup>1</sup>, LI Liang<sup>2</sup>, LIU Hongda<sup>2</sup>, LIN Yanchen<sup>2</sup>, ZHANG Xinchang<sup>1,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Midea Clean Electric Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000, China;

3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** In order to verify the safety performance of horizontal dust bag vacuum packaging structure, analysis of pressure resistance, random vibration, drop etc. of the horizontal vacuum cleaner package in logistics environment was carried out by applying corresponding constraint conditions and using Creo software modeling, according to the logistics environment in the process of the vacuum cleaner production and logistics. ANSYS Workbench software was used to analyze the stress and deformation under the corresponding load, as well as the damage to packaging and products under the physical testing. The Results show that the deformation of the horizontal vacuum cleaner package does not exceed 10 mm of the standard in the case of the largest stacking. Through the modal analysis, the six orders modal parameters are obtained, indicating that no resonance will occur. The drop test results of the package show that the stress strain is small. The vacuum cleaner packaging design meet the requirements of pressure resistance, random vibration, and drop etc., which suggests that the scheme is feasible.

**Keywords:** horizontal vacuum cleaner; FEA (Finite Element Analysis); ANSYS Workbench; pressure resistance; random vibration; drop test

随着社会的进步,小型家电卧式吸尘器日益受到消费者喜爱。吸尘器产品在组装、检验以及运输至消费者手中的整个流通环节中,会受到振动、冲击等严酷考验,因此包装缓冲结构设计尤为重要。

包装结构的传统设计基于经验,通过测量产品及附件尺寸,设计包装结构并制作样品。再将产品装箱

并进行实验室实体跌落、振动等测试。通过试验结果评估产品及内外包装受损情况,进一步改进包装结构,并将改进后的包装结构再次制样进行试验,直到试验结果达到标准为止。传统设计方法对产品和包装都具有较大的破坏性,且需多次重复试验,成本较高。

包装缓冲材料能吸收一定的冲击能量,减小传递

收稿日期:2018-01-30;修回日期:2018-06-05

第一作者简介:邓志辉(1992),男,河南洛阳人,硕士,主要研究方向为现代物流工程与包装。E-mail:1256726477@qq.com

到内装产品上的冲击<sup>[1-2]</sup>。有限元的分析法通过分析产品流通过程的物流环境,选择包装材料,如瓦楞纸板、蜂窝纸板、纸浆模塑以及发泡材料等;设计包装结构,绘制图纸;根据设计方案建立包装结构三维模型,并导入相关软件,运用有限元分析的手段,对包装结构进行虚拟力学仿真,分析产品以及内外包装所受到的应力、应变,找到薄弱部位;修正包装结构;根据修正后的图纸打样,封装产品进行性能测试,以此检测包装的设计是否符合标准、满足运输要求,确保被包装物品在流通过程中不受损坏。

包装结构的设计运用有限元分析的方法克服了传统试验方法的缺点,缩短了设计周期和生产成本。

## 1 有限元建模

### 1.1 吸尘器包装件建模

试验对象为美的卧式吸尘器,型号为 VC14S2-

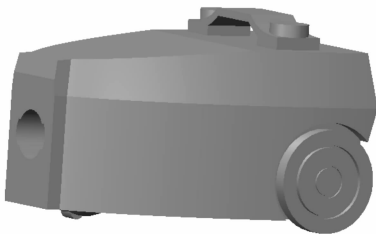


图1 简化后吸尘器示意图  
Figure 1 Schematic of Vacuum cleaner

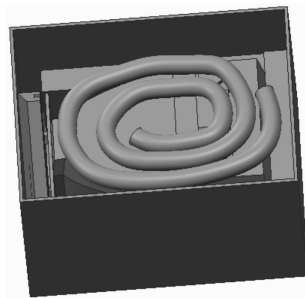


图2 吸尘器与附件示意图  
Figure 2 Schematic of Vacuum cleaner and accessories

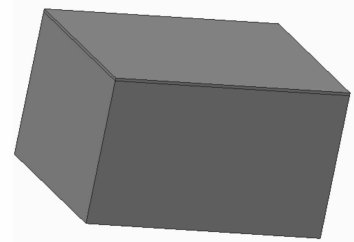


图3 整体包装示意图  
Figure 3 Schematic of overall packaging

### 1.2 设置材料参数

吸尘器主机材料为 ABS + PC 树脂,衬垫材质 BE 瓦楞纸板和厚度 20 mm 的蜂窝纸板,软管为 PVC 材料,这些材料参数不是 ANSYS Workbench 软件自带资料库中的材料参数,需查阅相关资料进行设置<sup>[3]</sup>。

瓦楞纸板与蜂窝纸板均由无锡某公司提供。外包装箱与瓦楞缓冲衬垫均选用 5 层 BE 瓦楞纸板,面纸定量 160 g/m<sup>2</sup>,芯纸定量 105 g/m<sup>2</sup>,里纸定量 140 g/m<sup>2</sup>。瓦楞纸板厚度为 5 mm,测得其耐破强度约 1 100 kPa,边压强度 5 kN/m。蜂窝纸板样品参数如表 1 所示,选用 160/130/160-20 规格的蜂窝纸板,蜂窝孔间距为 14.2 mm,蜂窝直径为 14.7 mm,孔径比约为 1,蜂窝边长为 7.6 mm,试验测得其抗压强度为 215.7 kPa。

吸尘器材料参数如表 2 所示。

瓦楞纸板和蜂窝纸板均属于正交各向异性材料,经试验测得其材料参数如表 3 所示。

FV,包装箱规格为 410 mm × 310 mm × 265 mm,包装箱材质为 BE 楞 5 层瓦楞纸板,采用 0201 型两片式结构。缓冲衬垫采用蜂窝瓦楞纸板缓冲结构,蜂窝纸板采用 20 mm 规格,尺寸为 100 mm × 80 mm;瓦楞纸板规格为 BE 楞。衬垫采用折叠结构,瓦楞纸板缓冲,蜂窝纸板主要起撑起吸尘器的主机作用,防止意外跌落时,主机电机等精密部件受到损坏。

为了便于在 ANSYS 中划分网格求解,在保证吸尘器部件完整的基础上,对一些电源线出口,主机接、插口部位,及按钮等进行适当简化。吸尘器分为主机、地刷、软管、衬垫和外包装箱共 6 部分,根据部件的材料类型进行定义。运用 Creo2.0 软件,进行三维建模,并保存为适当格式,导入到 ANSYS Workbench 中(如图 1~3 所示)。

表 1 蜂窝样品特征参数

Table 1 Characteristic parameters of honeycomb paperboard sample

样品规格	面层定量/ (g · m <sup>-2</sup> )	芯层定量/ (g · m <sup>-2</sup> )	纸板厚 度/mm	纸板 克重/g
160/130/160-15	160	130	15	695
160/130/160-20	160	130	20	820
160/130/160-30	160	130	30	1 070
160/130/160-35	160	130	40	1 320

表 2 吸尘器材料特性参数

Table 2 Materials characteristic parameters

材料	密度/(mg · mm <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
ABS/PC	1.07	2 350	0.398 7
PVC	1.38	3 920	0.300 0

表3 瓦楞纸板和蜂窝纸板材料参数

Table 3 Corrugated board and honeycomb board material parameters

纸板类型	弹性模量/MPa			剪切模量/MPa			泊松比		
	$E_x$	$E_y$	$E_z$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{xz}$	$\mu_{yz}$	$\mu_{xz}$	$\mu_{xy}$
瓦楞纸板	5.70	7.60	1.12	2.56	0.22	0.11	0.46	0.01	0.01
蜂窝纸板	2.75	3.58	2.80	1.21	0.10	0.06	0.33	0.01	0.01

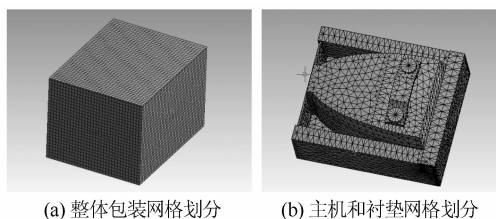
注: $x$ 表示瓦楞纸板平面内,垂直于瓦楞方向; $y$ 为瓦楞方向; $z$ 为垂直于瓦楞平面方向; $xy,yz,xz$ 分别表示由 $x$ 与 $y$ 、 $y$ 与 $z$ 、 $x$ 与 $z$ 2个方向构成的平面。

### 1.3 各相关部件接触类型设置

ANSYS Workbench 软件中有 5 种接触类型,根据吸尘器所处物流环境、包装状态,以及各个部件装配形式,设置相应的接触方式。定义吸尘器主机、附件与缓冲衬垫之间为绑定接触,外包装箱与缓冲衬垫为摩擦接触,摩擦因数为 0.12。

### 1.4 仿真模型网格划分

网格划分的精度决定了仿真准确度,也影响软件处理时间。在保证相应时间步长前提下,网格划分应尽可能细<sup>[4]</sup>。网格采用六面体,六面体网格不仅可减少分析时间,而且可提高仿真精确度。设置单元尺寸为 20 mm,可避免产生小网格。经过划分后,ANSYS 模型中总计节点 65 961 个,单元 53 018 个,如图 4 所示。



(a) 整体包装网格划分 (b) 主机和衬垫网格划分

图4 包装件网格划分

Figure 4 Packaging grid division

## 2 静态压缩仿真分析

吸尘器在流通环境中所受到的压力,主要来自堆码。合理进行堆码,不仅可提高空间利用率,还可避免最下层包装件压溃变形。

### 2.1 静压载荷计算

静压载荷计算公式为

$$F = 9.81KM(N_{\max} - 1)。 \quad (1)$$

式中: $F$ 为包装件所承载荷,N; $K$ 为载荷系数; $M$ 为包装件质量,kg; $N_{\max}$ 为最大堆码层数。

载荷系数 $K$ 根据载荷系数表<sup>[5]</sup>,取其值为2;包装件质量经测量为4.4 kg;已知40HQ型号的集装箱最多可装10层;根据公式(1)计算出 $F = 776.952$  N。

### 2.2 ANSYS 抗压仿真模拟

ANSYS Workbench 软件中,采用 Static Structural

模块对吸尘器包装件抗压试验进行仿真分析,包装箱底面设置固定约束,压力施加在包装箱顶面,模拟仓库、集装箱堆码中所受到的静载荷以及变形。

包装箱及衬垫变形情况如图5~6所示。由图5可知,吸尘器包装箱受力变形不明显,最大变形量位于缓冲衬垫靠近包装箱的一楞,为0.592 75 mm,远远小于包装件的变形标准10 mm。

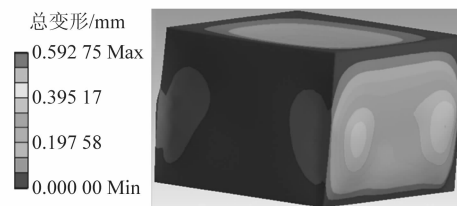


图5 吸尘器包装箱变形云图

Figure 5 Deformation cloud map of vacuum cleaner case

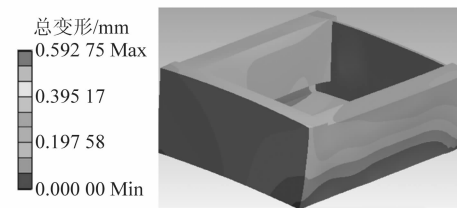


图6 缓冲衬垫变形云图

Figure 6 Cushion pad deformation cloud map

## 3 随机振动仿真分析

### 3.1 模态分析

模态分析作为随机振动仿真的基础,用来确定产品固有频率和振型。产品的固有频率和振型反映了包装件的振动特性是随机振动分析的必要条件<sup>[6-7]</sup>,动力学方程:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t)\}。 \quad (2)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 为系统的质量、阻尼及刚度矩阵; $t$ 为随机振动时间; $\{\ddot{q}\}$ 、 $\{\dot{q}\}$ 、 $\{q\}$ 表示各单元节点沿整体坐标系的位移集合而成的整体结构的广义加速度、速度和位移矢量; $\{F(t)\}$ 为激励向量。

对于模态分析,包装件其固有频率由自身决定,与外部载荷无关,阻尼对其影响小,可忽略。则公式(2)可简化为

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = 0. \quad (3)$$

发生谐振时,有

$$\{q\} = \{\varphi\}_i \cos(\omega_i t). \quad (4)$$

式中: $\{\varphi\}_i$ 为振型即特征向量; $\omega_i$ 为振型固有频率, $i$ 表示阶数。由公式(3)和(4)得

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\varphi\}_i \cos(\omega_i t) = 0. \quad (5)$$

若 $\{\varphi\}_i = 0$ 无意义,则有

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\varphi\}_i = 0. \quad (6)$$

$$[K] - \omega_i^2[M] = 0. \quad (7)$$

固有频率与振型可以由公式(7)得到。确定好固有频率和振型之后,在物流运输中应该避开产品的固有频率,防止发生共振。ANSYS Workbench 软件中添加 Modal 模块,建立模态分析。一阶振型为上下方向的颠簸,二阶振型为左右方向的振动,三阶振型是以包装箱为中心进行的收缩变形,四阶、五阶、六阶是集弯曲扭转为一体的混合振型<sup>[8]</sup>。

### 3.2 模态分析结果

经过添加 Modal 模块模态分析所得 6 阶固有频率见表 4 所示。

表 4 模态分析固有频率

Table 4 Natural frequencies of modal analysis

模态阶次	固有频率 $\times 10^{-4}/\text{Hz}$	振型
一阶	2.216	上下振动
二阶	3.316	左右晃动
三阶	4.595	以包装件几何中心为圆心收缩变形
四阶	11 580.000	弯曲兼扭转的混合振动
五阶	19 489.000	弯曲兼扭转的混合振动
六阶	21 580.000	弯曲兼扭转的混合振动

依据吸尘器产品的物流运输条件,参照图 7 国内公路运输随机振动功率谱密度曲线,其中 I 级路谱为外部激励(等级 I 最为残酷,一般测试采用等级 II)。

产品运输方式为集装箱货车公路运输,车辆为 20GP、40GP、40HQ 规格的厢式货车。从图 8 可以看出公路运输中随机振动频率在在 3~4 Hz 处达到峰值,若包装件的固有频率处于此频段,会发生共振使产品受损。因此需合理设计包装结构,避免固有频率出现在此频段。根据表 4 中模态分析结果可知,6 阶振型固有频率均未处于此频段,产品不会与集装箱货车发生共振,包装结构设计合理。

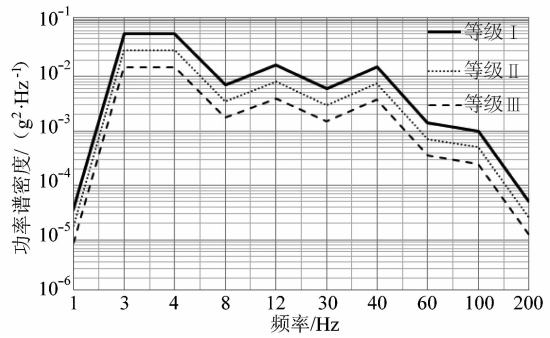


图 7 国内公路运输随机振动功率谱密度曲线  
Figure 7 Random vibration power spectral density curve of China's highway transportation

### 3.3 随机振动分析

根据模态分析得到的包装件固有频率,施加随机振动 Random Vibration 模块,根据表 5 中功率频谱密度(power spectral density, PSD)数据,选择 PSD G Acceleration<sup>[9]</sup>,根据包装件装箱运输中的位置状态,分析产品受力,求解 Directional Deformation 变形量。

表 5 公路运输不同水平下的随机振动 PSD 数据

Table 5 Data of random vibration PSD under different levels of road transportation

频率/Hz	功率谱密度/(g²·Hz⁻¹)		
	等级 I	等级 II	等级 III
1	0.000 036 00	0.000 018 00	0.000 009 00
3	0.060 000 00	0.030 000 00	0.015 000 00
4	0.060 000 00	0.030 000 00	0.015 000 00
8	0.007 000 00	0.003 500 00	0.001 750 00
12	0.016 000 00	0.008 000 00	0.004 000 00
30	0.006 000 00	0.003 000 00	0.001 500 00
40	0.015 000 00	0.007 500 00	0.003 750 00
60	0.001 400 00	0.000 700 00	0.000 350 00
100	0.001 000 00	0.000 500 00	0.000 250 00
200	0.000 050 00	0.000 025 00	0.000 012 50
加速度均方根/ (m·s⁻²)	0.82	0.58	0.41

ANSYS 中求解分析,得到吸尘器所受应力云图如图 8 所示,缓冲衬垫变形云图如图 9 所示,包装箱垂直方向变形云图如图 10 所示。

由图 8 可知,吸尘器产品受到最大应力位于吸尘器轮子处,根据 ABS/PC 材料的性质可知,其许用应力为 54.4 MPa。因此仿真中求解出的吸尘器所受最大应力远小于材料的许用应力,产品不会受到损坏。由图 9 可知,缓冲衬垫变形量较小,衬垫方案可靠。由图 10 可知,包装箱最大变形为 0.760 37 mm,变形较小,方案可靠。

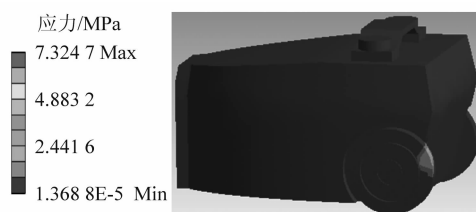


图8 吸尘器所受应力云图

Figure 8 Stress cloud map of vacuum cleaner

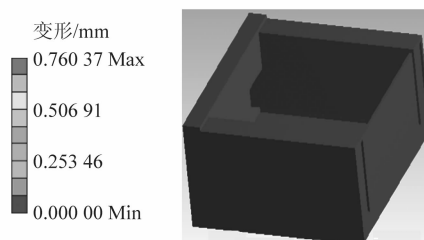
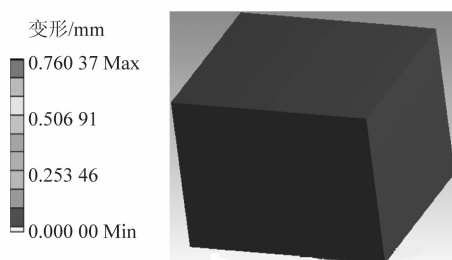


图9 缓冲衬垫变形云图

Figure 9 Deformation cloud map of cushion pad



包装箱竖直方向上变形云图

Figure 10 Deformation cloud map in vertical direction of packaging box

由模态分析和随机振动分析结果可得:卧式吸尘器包装件在运输中,未出现共振现象;随机振动产品所受应力,均不超过产品材质(ABS/PC)规定许用应力值54.4 MPa。满足产品防护功能,所以该包装设计合理。

#### 4 卧式吸尘器包装件跌落仿真

吸尘器经由生产线包装,通过传送装置传送至立体仓储。此过程中,最后一道工序是人工搬运作业和立体仓储堆码机器人堆码作业,可能因此包装件跌落,与地面产生冲击。冲击力与加速度大小由包装件所处高度、包装件质量、衬垫的缓冲性能和地面刚性决定<sup>[10]</sup>。供货紧张时,直接堆码,经叉车运至装货口,由人工装箱运至客户处。此过程,包装件受到残酷物流环境的考验,跌落概率增加。因此,设计缓冲包装结构时,跌落试验尤为重要。

#### 4.1 测试标准

包装跌落测试是模拟产品实际流通环境,测试检验产品包装是否具有抵抗严峻环境所造成的破坏的能力<sup>[11]</sup>。按照国家标准 GB/T 4857.1—92,对包装箱标示。根据产品的重心,将重心端放置在垂直标示人员右侧。保持试验样品试验状态与运输放置状态基本一致,如图11所示,1为试验样品的顶面,试验样品的右侧面标注为数字2,底面标注为数字3,左侧面标注为数字4,近端面标注为数字5,远端面标注为数字6。将包装件上襟片的粘接缝正对标注人员右肩,离标注人员最近的端面标示为5,进而确定其他各面。棱的编号则是以相交形成的棱这两面的号码来表示;角编号是以试样上相交构成角的3个面的号码来表示。

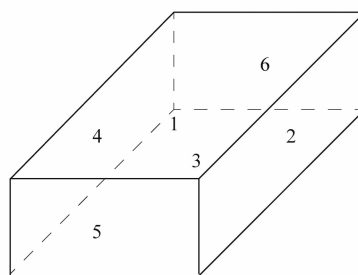


图11 标示方法

Figure 11 Marking method

根据美的吸尘器公司相关测试标准,并结合国标 GB/T 4857.5—92 包装运输包装件跌落试验方法,测出包装件质量约4.4 kg,小于规定的10 kg,根据美的吸尘器公司规定,非网购产品跌落高度参照 ISTA—1A 标准,设定跌落高度  $h_0 = 0.76$  m。

#### 4.2 跌落仿真模拟

此卧式吸尘器脆值73 g,在 ANSYS Workbench 软件中,导入模型并添加刚性地面,添加 Explicit Dynamics,添加固定约束(Fixed support)以固定地面。模拟包装件在物流运输过程中,仅受重力。为了缩短计算时间,降低包装件的跌落高度。设置跌落面距离地面为  $h_1 = 0.003$  m,与此同时,需加一个初速度  $v_0$ ,且有

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (8)$$

式中: $h$ 为跌落高度, $h = h_0 - h_1 = 0.757$  m; $g$ 为重力加速度,且  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>;故  $v_0 = 3.85$  m/s。

根据试验反复验证,设定模拟时间为0.012 s,运用 ANSYS Workbench,显示动力学模块(Explicit Dynamics)模拟跌落,做瞬态动力学分析<sup>[12]</sup>,设置地面为刚体,施加固定约束,设置初速度  $v_0$ 与纸箱重力加速

度<sup>[13]</sup>。并根据跌落测试标准,“1角3棱6面”跌落。综合试验结果,包装件在竖直方向上以及产品两轮部位,所受到的破坏性最严重,因此着重分析包装件在竖直方向上的变形和所受应力。

跌落仿真模拟主要研究整个包装件受力情况,进而分析所需要保护的产品受应力是否超过应力极限。

### 1) 角跌落

角跌落选择产品重心偏移的部位进行,且角应为齐缝角,其模拟跌落试验加速度、应力云图如图12和图13所示。

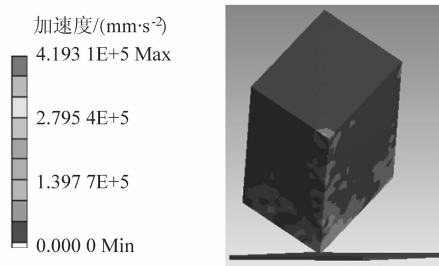


图12 角跌落加速度云图

Figure 12 Angle drop acceleration cloud map

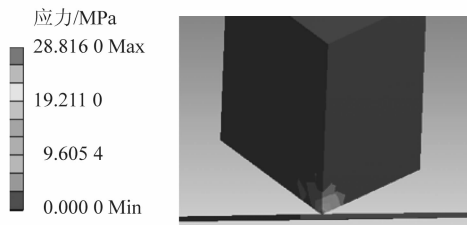


图13 角跌落应力云图

Figure 13 Angle drop stress cloud map

由图12和图13可知,最大响应加速度为419310 mm/s<sup>2</sup>,即41.931 g < 73 g。最大应力出现在外包装箱,为28.816 MPa,产品受到应力小于28.816 MPa,未超过产品材质ABS/PC的极限应力54.4 MPa。

### 2) 棱跌落

棱跌落加速度、应力云图如图14和图15所示。

最大响应加速度为452280 mm/s<sup>2</sup>,即45.228 g < 73 g。最大应力出现在外包装箱,为45.431 MPa,产品受到应力小于45.431 MPa,未超过产品材质ABS/PC的极限应力54.4 MPa。

### 3) 面跌落

面跌落需要做6面试验,对包装编号依次试验,根据实际验证发现小端面受损较严重,因此课题组着重研究小端面受力情况,面跌落加速度云图和应力云图如图16和图17所示。

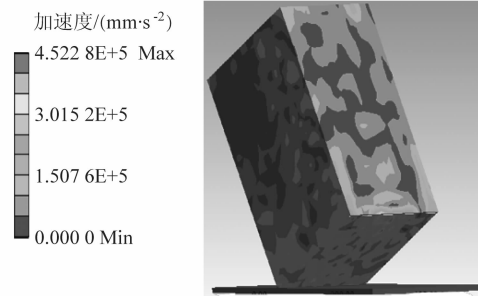


图14 棱跌落加速度云图

Figure 14 Prismatic drop acceleration cloud map

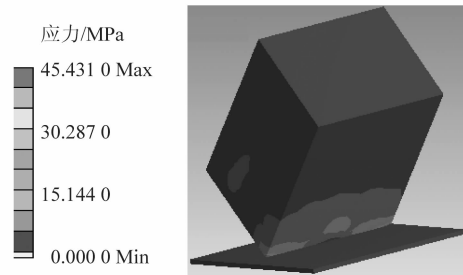


图15 棱跌落应力云图

Figure 15 Prismatic drop stress cloud map

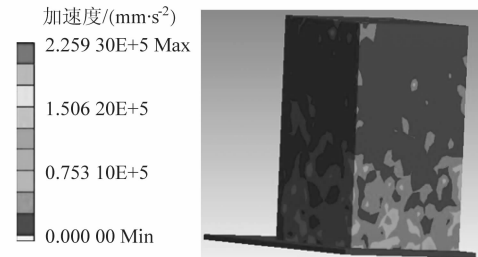


图16 面跌落加速度云图

Figure 16 Face drop acceleration cloud map

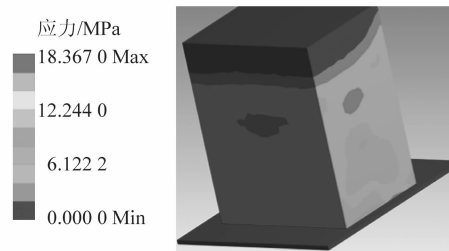


图17 面跌落应力云图

Figure 17 Face drop stress cloud map

最大响应加速度为225930 mm/s<sup>2</sup>,即22.593 g < 73 g。最大应力出现在外包装箱,为18.367 MPa,产品受到应力小于18.367 MPa,未超过产品材质ABS/PC的极限应力54.4 MPa。

综上所述,跌落试验在有限元环境下满足设计要求。

#### 4.3 跌落试验验证

参照 GB/T 4857.2—2005,运输包装件基本试验第2部分:温湿度调节处理,对包装件做温湿度处理。将包装件放置跌落试验台,设定高度为760 mm。根据操作说明书,结合国标试验步骤,进行1角、3棱、6面跌落试验(从齐缝角开始)。试验后按国家相关标准和规定检查包装及产品损坏程度,得出试验结果,跌落操作如图18所示。



图18 跌落试验

Figure 18 Drop test

试验完成后,检查外包装箱变形程度,以及缓冲衬垫、产品破损情况,并做相应标记。

美的吸尘器公司测试相关标准:①试验后包装箱不应破损;②吸尘器部件不能有影响外观的明显变形或者顶白、开裂、破损和脱落等异常;③通电检查整机功能正常。

跌落后经检查,包装箱子无破损,吸尘器部件功能正常,不存在影响外观的变形或者顶白、开裂、破损和脱落等异常现象,因此判定包装试样合格。

## 5 结论

课题组采用有限元方法,对该卧式吸尘器包装件进行仿真分析。得出以下结论:

1) 在规格为40HQ的集装箱中(装10层条件下),包装件受静态压力,其变形量为0.59275 mm,远小于企业规定的10 mm;随机振动环境下,模态分析得到包装件的固有频率,避开了会发生共振3~4 Hz频率区间,避免了与集装箱货车发生共振;跌落模拟试验,整体包装件所受力未超过产品材质ABS/PC所允许的最大应力,跌落试验加速度响应未超过脆值允许

的最大加速度。

2) 方案设计符合包装的保护产品功能。在有限元分析过程中,产品三维建模与网格划分时,应尽可能精确以尽可能减少误差;随机振动模态分析所求解的包装件固有频率应避免处于功率谱密度峰值段;包装设计应满足跌落试验加速度响应,尽可能低于产品脆值所要求的加速度。

3) 本研究在理论上可以验证包装结构设计在实验室阶段的合理性。在实际产品包装生产中,可以结合有限元手段辅助产品包装设计,尽可能消除设计瓶颈,节约资源,提高设计生产效率。对于虚拟与现实设计的差别该如何消除,以及二者对于细节的处理后续需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 李佳. X-PLY 超强瓦楞纸板的动力学特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2009:5.
- [2] 孙亮,陈希良,程蓓,等. 园林修枝机跌落仿真研究及结构优化设计[J]. 机电工程,2017,34(12):1403.
- [3] 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,2013:34-35.
- [4] ANJANEYULU Y, MANIKANTA K, PRASAD K. Modelling and optimization of I. C engine crank shaft with different materials and loads by using Finite Element Analysis[J]. International journal of innovative technologies,2015,12:1994-1998.
- [5] 丁玉平,钱怡. 基于 ANSYS Workbench 的整体包装件动态缓冲特性仿真分析[J]. 包装工程,2014,35(11):18-22.
- [6] 李勤建,高翠琢,边国辉. 组件的模态分析和随机振动分析[J]. 半导体技术,2012(10):16.
- [7] 张霞,陈志华,张立华,等. 玻璃/碳纤维增强聚合物基纳米复合材料冲击力学特性分析研究[J]. 机电工程,2016,33(5):546-550.
- [8] 崔拥军. 基于循环平稳与倒谱的工作模态分析研究[D]. 太原:太原理工大学,2013:48-50.
- [9] 苏婷. 基于 CPS 理念的电梯产品以纸代木包装设计[D]. 无锡:江南大学,2016:63.
- [10] 韩春晓,付芸. 基于 ANSYS Workbench 的镜头跌落仿真分析研究[J]. 长春大学学报,2013,23(2):149-151.
- [11] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社,2006:84-87.
- [12] 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,2015:20.
- [13] NEWTON R E. Fragility assessment theory and test procedure[J]. Viology,1968(1):235-239.