

基于不同防护材料易碎品运输可靠性结构设计

曾台英, 丁逸秋, 于水源
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 研究易碎品在运输包装过程中不同防护材质缓冲包装结构的防护性能。**方法** 通过 Ansys Workbench 中的模态分析 (Modal) 和随机振动分析模块 (Random Vibration), 对模型进行模态和随机振动仿真分析, 得到易碎品的各向应力、位移、总应力等, 分析对比 2 种防护材质的仿真结果, 选取最优的缓冲方案, 并进行随机振动和跌落实验。**结果** 2 种防护材质下缓冲结构都具有良好的防护性能, 选择设计的 EPE 缓冲结构更具有经济环保性, 且在随机振动和跌落试验中, 包装件没有发生变形和损坏, 内容物完好。**结论** 为易碎品低成本、高可靠性的结构设计提供了思路, 也为产品性能的预测和运输方案的检测提供了一种分析手段。

关键词: 缓冲材料; 随机振动; 功率谱密度; 结构设计

中图分类号: TH212; TH213.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)21-0118-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.018

Design of Reliable Structure of Fragile Transportation Based on Different Protective Materials

ZENG Tai-ying, DING Yi-qiu, YU Shui-yuan

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to study the protective performance of cushioning packaging structures made of different protective materials during the transportation and packaging of fragile products. Through modal analysis and random vibration analysis module in Ansys Workbench, the modal and random vibration simulation analyses of the model were carried out to obtain all-directional stress, displacement and total stress of fragile products. The simulation results of two kinds of protective materials were analyzed and compared, the optimal cushioning scheme was selected, and the random vibration and drop tests were carried out. The cushioning structures made of two protective materials had good protective performance, and it was more economic and environmental to select the designed EPE cushioning structure. Moreover, there was no deformation or damage to the package during random vibration and drop tests. It is concluded that ideas have been provided for low cost and high reliability structural design of fragile products, and an analysis method is also provided for product performance prediction and transportation plan detection.

KEY WORDS: cushioning material; random vibration; power spectral density; structural design

易碎品指的是化学性质稳定但抗冲击性能很差的玻璃制品、陶瓷制品的总称, 如陶瓷花瓶、玻璃器皿等。为了防止产品在运输过程中出现破损现象, 需要对其力学性能进行分析, 找出薄弱部位, 以便设计

合理的防护结构。在防护结构中, 缓冲材料的性能决定了整个防护的可靠性。在运输过程中, 缓冲材料能有效吸收受迫振动中产生的能量^[1]。

从之前的报纸和泡沫层包裹到如今的泡沫塑料、

收稿日期: 2019-06-14

作者简介: 曾台英 (1978—), 女, 博士, 上海理工大学讲师、硕导, 主要研究方向为包装运输动力学。

瓦楞纸板、珍珠棉、气柱缓冲包装等,缓冲材料在发展过程中不断更新换代。文中以陶器花瓶(后文简称花瓶)的物流运输包装方案为研究对象,进行运输包装可靠性结构设计。全文通过对常见 2 种典型泡沫缓冲材料的性能进行对比分析,利用 Ansys Workbench 15.0 进行数值仿真,分析不同防护材质下的包装件模态、随机振动响应。研究现有缓冲衬垫的合理性和保护性能,最后选取最优包装方案并通过随机振动、跌落实验进行验证。

1 缓冲泡沫塑料

缓冲材料能起到缓冲的作用,在商品运输过程中为了防止外部冲击而使用缓冲材料,进而更好地保护产品。在当前的物流运输中,泡沫塑料是使用最多的缓冲材料。

泡沫塑料是以热塑性或者热固性树脂为基础原料,通过发泡方式形成的具有无数蜂窝结构微小气孔的塑料。这些气孔具有防止空气对流的作用,不易传热。泡沫塑料的质量很轻,且具有吸音、弹性等特点^[2]。根据软硬程度,泡沫塑料可以分为软质、半硬质、硬质泡沫塑料等 3 种。泡沫塑料的力学性质非常复杂,既有弹性,还有明显的粘性。生活中常见的泡

沫塑料有聚乙烯泡沫塑料(EPE, Expandable Polyethylene)、聚苯乙烯泡沫塑料(EPS, Expanded Polystyrene)、聚氨酯泡沫塑料(PU, Polyurethane),常用泡沫塑料的性能见表 1^[3-4]。

1.1 聚乙烯泡沫塑料(EPE)

EPE 属于半硬质泡沫塑料,俗称珍珠棉,是先进的保护性内包装材料。它具有缓冲性能好、质量轻、易回收、防油、防潮、抗静电等特性。由于是完全独立气泡体,因此 EPE 能靠弯曲来吸收撞击力,达到缓冲的效果,进而克服了普通发泡塑料易碎、变形和恢复的缺点。此外,EPE 厚度越大,具有的缓冲能力负荷范围也越大。

1.2 聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)

聚苯乙烯泡沫塑料具有易模塑成形、质量轻、成本低等特点,此外,由于材料泡沫质硬、泡孔小而互不连通,因此也具有一定的柔软性和弹性。虽然在使用过程中会对环境造成污染,且具有易燃等缺点,但因其质量轻、加工成型方便,故而依旧被广泛使用。聚苯乙烯泡沫塑料在变形初期,甚至在超出线弹性范围后依旧具有良好的弹性性状。2 种缓冲材料的物理参数和力学性能见表 2^[5-6]。

表 1 常用泡沫塑料的性能
Tab.1 Performance of commonly used foams

种类	密度/ (g·cm ⁻³)	气泡	机械强度	吸水性	最高使用 温度/°C	耐药品性	耐燃性	柔软性	耐候性
EPE	0.4~0.03	闭孔	高	极少	85	极好	可燃	较硬	好
PU	0.06~0.02	开孔	低	大	120	好	可燃(有毒)	软	不好
EPS	0.03~0.016	闭孔	脆弱	小	80	差	可燃(有毒)	硬	不好

表 2 缓冲材料的物理和力学性能参数
Tab.2 Parameters of cushioning material's physical and mechanical properties

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	抗压强度/kPa	抗拉强度/kPa	撕裂强度/kPa
EPE	29	3	0.01	62	340	260
EPS	20	5.112	0.1	147	293	246

通过对 2 种材料的参数进行对比, EPS 与 EPE 泡沫塑料的抗拉和撕裂强度相差不大, EPS 的抗压强度明显优于 EPE。然而,在强度没有太大差别的情况下,EPE 泡沫塑料的环保性是考虑的首要因素。花瓶的缓冲衬垫可采用 EPS 或 EPE 泡沫塑料,基于这 2 种材料对包装件进行数值模态分析和随机振动分析。

2 有限元数值分析

2.1 动力学基础

对于 1 个简单的包装件而言,其包含 3 部分,分别是内装物、缓冲材料和外包装,如果只对内装物的运动情况进行分析,而不分析其余零件的局部效应,

且在摩擦力忽略不计的情况下,动力学行为可通过式(1)表示。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

式中: m 为内装物的质量; c 为阻尼系数; k 为弹性系数; $f(t)$ 为系统的激励; t 为时间。

在包装件运输过程中,会受到长时间或瞬时的激励,这种因激励而产生的振动称为强迫振动。此时的方程可以改写成:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: F_0 和 ω 分别为激励力的幅值及角频率; t 为时间。

通过特征方程可求得微分方程的通解为:

$$x = Ae^{-nt} \sin(\sqrt{\omega_0^2 - n^2}t + \alpha) + B \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

式中: A 为振幅; B 为强迫振动的振幅; φ 为相位差; α 为相位角; n 为阻尼, ω_0 为最大角频率。

从方程可以看出,有阻尼受迫振动分为2部分。

1) 自由振动。随着时间的增加,振幅快速衰减为0。

2) 强迫振动。当自由振动振幅衰减为0后,此振动依然存在,通常将此振动称为稳态解^[7]。

动力学主要寻求结构的固有频率和主振型,并通过有限元分析更好地了解结构的振动特点,以便更好地利用和减小振动。

2.2 有限元模型的建立

按照实际尺寸对花瓶包装件进行建模,在SolidWorks 2016中进行三维建模,包装件包含花瓶与缓冲衬垫,最终模型见图1。为了方便模型在Ansys Workbench中导入,将三维模型保存为“.IGS”格式^[8]。由图1可知花瓶与缓冲衬垫的装配关系。由于包装件是对称关系,为了方便观察花瓶的应力、应变,因此在有限元分析过程中隐藏掉其中一个缓冲衬垫对其进行分析、观察。

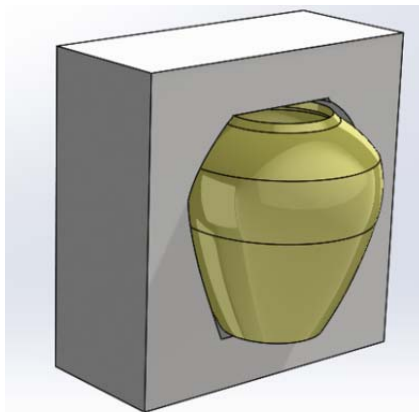


图1 产品三维模型

Fig.1 3D model of the product

首先将由SolidWorks建立好的三维模型导入Geometry模块进行模型激活,在Engineering Data模块添加材料及参数,其中缓冲材料的参数按表2进行设定,将陶瓷的密度设置为2700 kg/m³,弹性模量设置为94 GPa,泊松比设置为0.25^[9]。随后进行网格划分,采用自动划分网格的形式,网格划分的结果见图2。最后设定接触形式,花瓶的底部与缓冲衬垫采取绑定接触,2个缓冲衬垫接触面也采取绑定接触,花瓶的四周与缓冲衬垫内壁采取无摩擦接触^[10]。

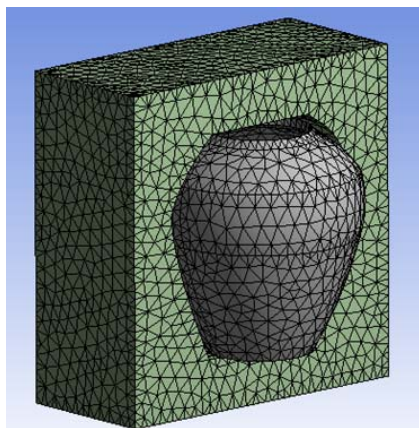


图2 划分网格后的几何模型

Fig.2 Geometric model after meshing

2.3 模态分析

模态是包装结构的固有振动特性,模态分析就是分析每一阶模态产生固有频率和响应模型的过程。通常情况下,结构的动态特性取决于低阶振型^[11]。为了更好地了解产品,取模态分析的前6阶模态进行观察,由于4—6阶的模态相似,此处只取第6阶模态进行观察。在EPS和EPE材料包装下,包装件1,2,3,6阶的固有频率和振动模型见图3,可知模型没有发生共振。

2种缓冲材料下模型拥有相同的振型,1阶是模型在 z 轴方向的左右摆动,2阶是模型在 z 轴方向的前后摆动,3阶是收缩变形,6阶是模型的弯曲与扭矩变形^[12—13]。

EPS和EPE材料下这4阶模态的最大位移量(mm)见表3,可知前3阶的最大位移量几乎没有差别,第6阶EPE材料下的位移量明显高于EPS。

2.4 随机振动分析

随机振动分析的外部激励是ISTA 3A车辆配送运输模式的加速度功率谱密度^[14]。首先在Random Vibration模块中添加PSD G Acceleration,将数值输入进去,方向为 z 方向。ISTA 3A模式的功率谱密度

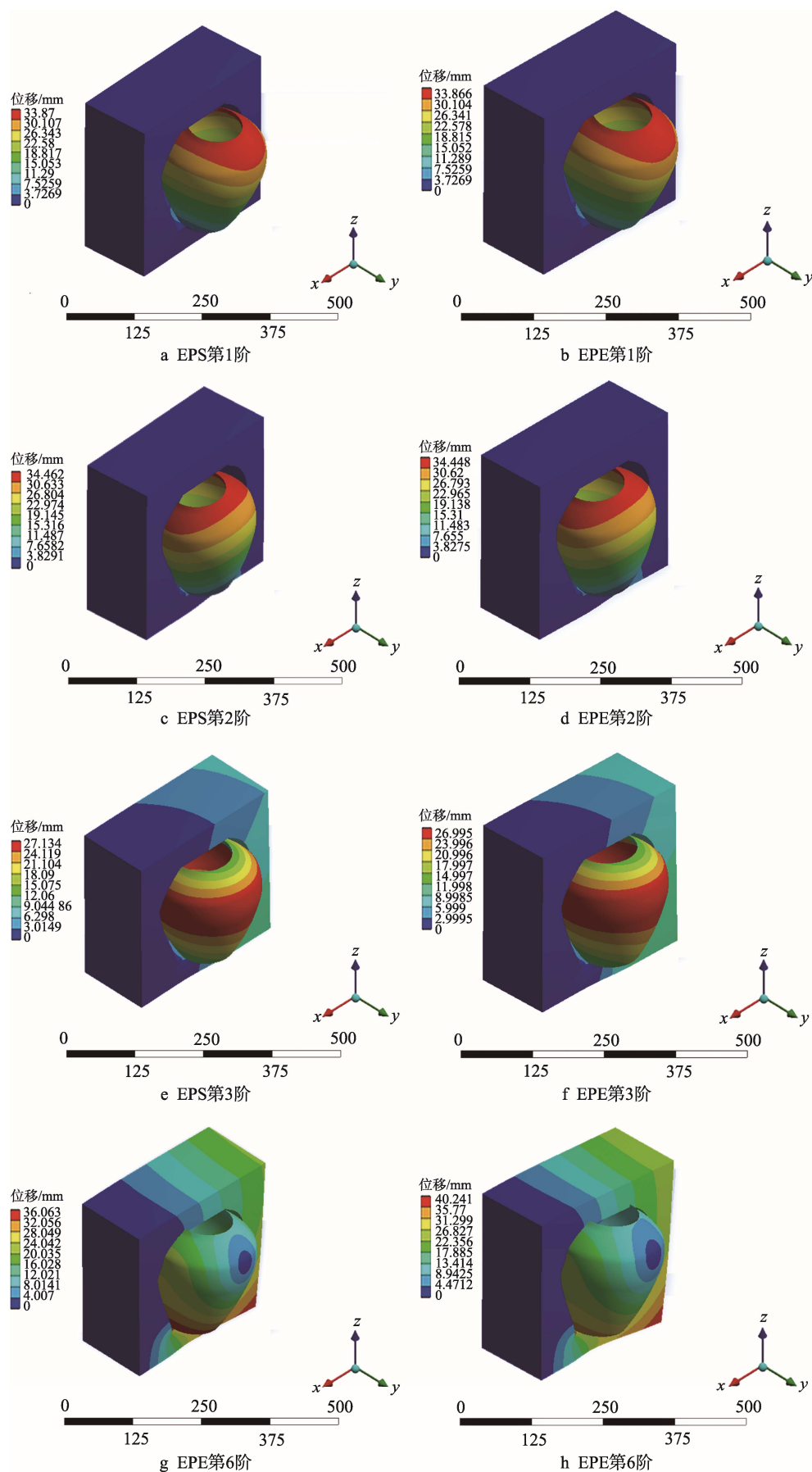


图 3 各阶模态振型

Fig.3 Different modal modes

表 3 各阶最大位移量
Tab.3 Maximum displacement of each mode

材料	1 阶	2 阶	3 阶	6 阶
EPS	33.87	34.462	27.134	36.063
EPE	33.866	34.448	26.995	40.241

见表 4^[15]。设置完成后,求解出 2 种材料下的模型在 z 方向上的总位移量,具体见图 4。通过对比可以得到在 z 方向,EPE 材料下的模型具有更大的位移量。

表 4 ISTA 3A 加速度功率谱密度
Tab.4 ISTA 3A acceleration power spectral density

频率/Hz	加速度谱密度/($g^2 \cdot kHz^{-1}$)
1	0.7
3	20
5	20
7	1
12	1
15	4
24	4
28	1
36	1
42	3
75	3
200	0.004

2 种材料下模型的应力云图见图 5,2 种材料下模型受到的最大应力数值见表 5。由表 5 可知,EPS 材料下整个模型受到的最大应力为 0.1681 MPa,花瓶受到的最大应力为 0.1681 MPa;EPE 材料下模型受到的最大应力为 0.146 33 MPa,花瓶受到的最大应力为

0.146 33 MPa。由图 5 可知,受到的最大应力位于瓶底的中心位置,说明整个模型的最大应力发生在花瓶上。衬垫受到的最大应力处于与花瓶底面接触的边缘,如若长时间发生激振,该处的缓冲衬垫会优先发生疲劳破损。通过对比发现 EPE 材料下整个模型都受到较小的应力作用。花瓶表面陶瓷材料的抗拉强度为 30 MPa,抗压强度为 300 MPa,远远大于受到的最大应力,因此花瓶在运输过程中是安全的。

2.5 跌落仿真分析

花瓶在搬运过程中难免会发生跌落,需进行跌落仿真模拟。其中在角跌落过程中会产生最大加速度,因此对角跌落进行仿真分析。设置一个跌落末速度替换等效跌落高度,跌落高度为 0.8 m,通过计算将末速度设置为 3.96 m/s,方向为 z 轴负方向,时间为 0.03 s,同时给底面的下表面添加固定端约束^[16]。EPE 和 EPS 材料下仿真角跌落得到的花瓶加速度曲线分别见图 6—7。2 种材料下的加速度曲线趋势虽一致,但 EPE 材料下包装件将获得更大的加速度。

3 可靠性结构设计分析

基于有限元分析得到,EPE 材质更优,且其质地柔软、减震性能好,因此用 EPE 材料作为花瓶包装缓冲材料,在运输途中有助于减缓其振动,保护花瓶免受伤害,把破损率降到更低^[17]。得到的最优包装方案见图 8,基于 EPE 缓冲衬垫,对包装件进行随机振动和跌落试验。

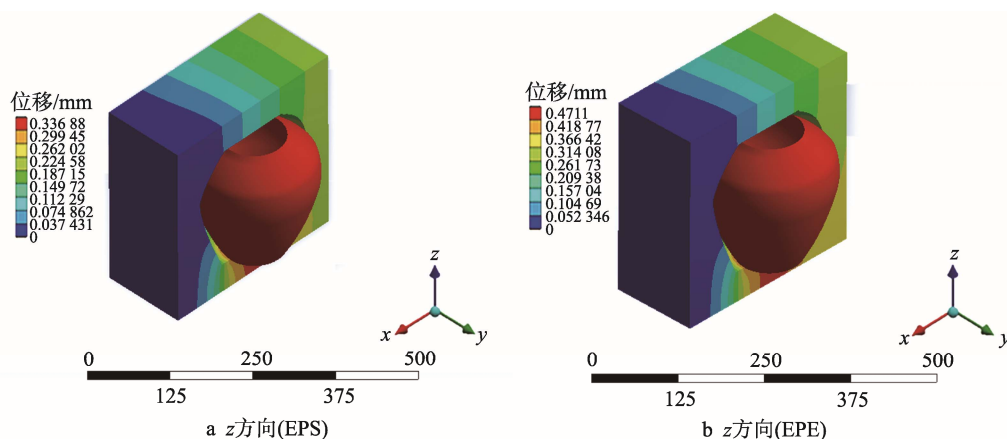


图 4 不同方向上的变形
Fig.4 Deformation in different directions

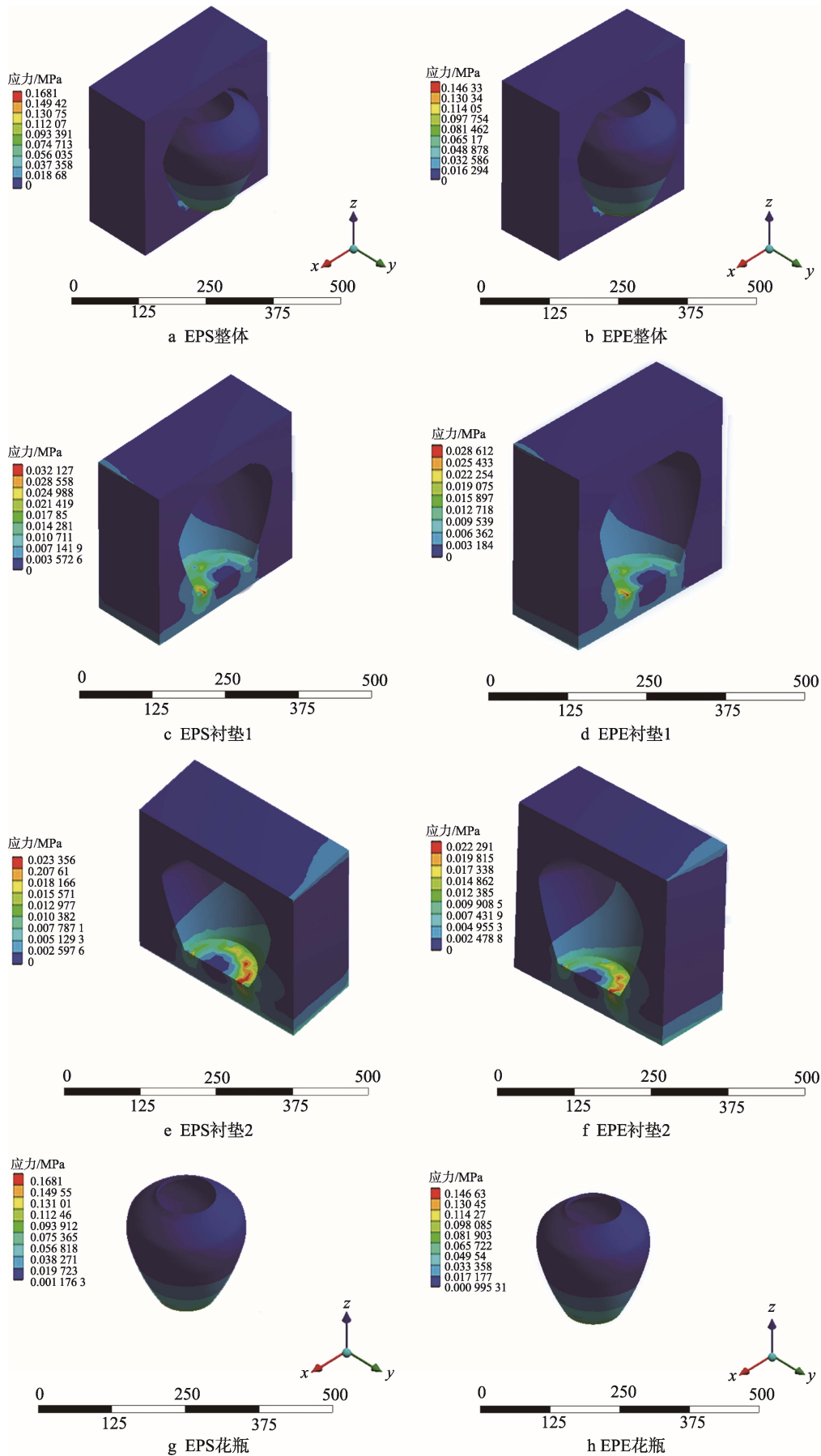


图 5 应力云图
Fig.5 Stress cloud

表 5 最大应力
Tab.5 Maximum stress

MPa

材料	整体	衬垫 1	衬垫 2	花瓶
EPS	0.1681	0.032	0.023	0.1681
EPE	0.146 33	0.028	0.022	0.146 33

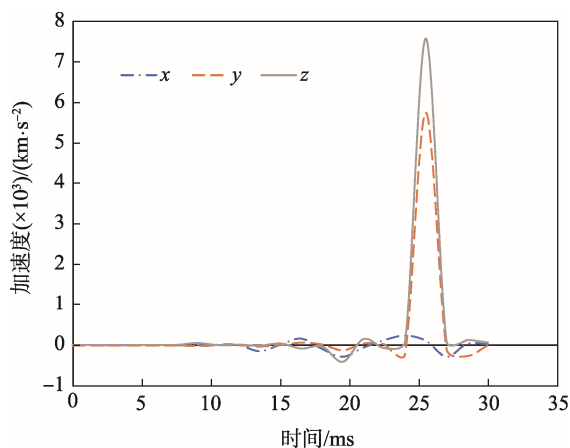


图 6 EPE 角跌落加速度曲线
Fig.6 EPE angle drop acceleration curve

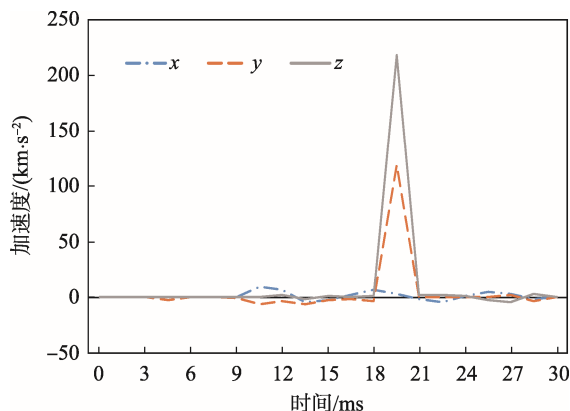


图 7 EPS 角跌落加速度曲线
Fig.7 EPS angle drop acceleration curve



图 8 基于 EPE 的物流运输包装件
Fig.8 EPE-based logistics and transportation package

的,因此最好的方法就是进行随机振动试验^[18]。随机振动试验的参数主要包括功率谱密度和振动时间^[19]。随机振动试验选择 ISTA 3A 的公路运输测试标准。

按试验要求进行试验,得到包装件的响应加速度谱密度见图 9。由图 9 可以看出,产品的响应加速度没有超过边界值,得出产品的随机振动试验具有可靠性。试验结束后检查包装件,发现缓冲衬垫和花瓶都完好无损。

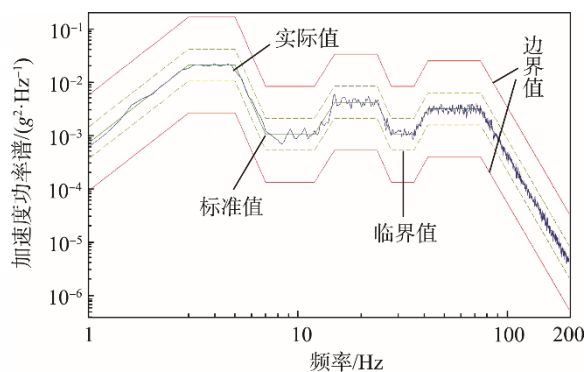


图 9 花瓶响应加速度谱密度
Fig.9 Response acceleration spectral density of vase

仿真得到的加速度谱密度见表 6。将试验和 EPE 材质仿真得到的响应加速度谱进行对比,见图 10。由图 10 可以看出,2 条曲线基本处于完全重合的状态。这说明仿真和试验的结果基本相同,仿真过程具有很高的准确性。可能存在的误差是由仿真建模结构的简化以及人为因素所致。

表 6 花瓶响应加速度谱密度
Tab.6 Response acceleration spectral density of vase

频率/Hz	加速度谱密度/(g ² ·kHz ⁻¹)
1	0.7
2.9432	18.66
4.5514	20
6.7679	0.845
12.282	1.36
15.032	3.94
24.643	3.158
28.693	1.1
36.355	1.22
42.097	3.65
75.009	2.45
200	0.004

3.1 随机振动试验

包装件在运输过程中的振动环境是复杂且随机

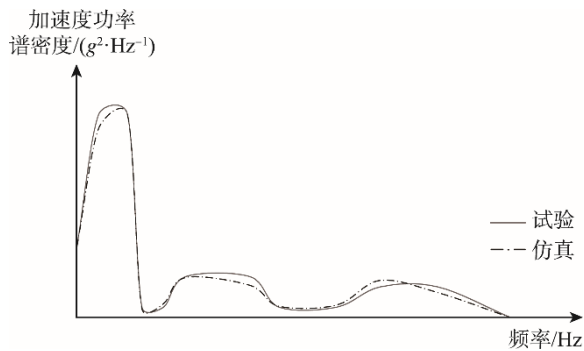


图 10 产品加速度谱密度曲线对比
Fig.10 Comparison of product acceleration spectral density curves

3.2 跌落试验

在外包装上放置传感器来收集产品跌落过程中的加速度响应。跌落试验机的组成部分包括控制仪、跌落平台和导杆^[20]。试验采用六面三棱一角的跌落方式。跌落完成后,花瓶与缓冲衬垫没有发生损坏,瓦楞纸箱也没有发生明显变形,表明该包装具有良好的防护性能。角跌落过程获取的是包装件加速度,最大加速度为 4100 km/s^2 ,与跌落仿真最大加速度一致,验证了仿真的可靠性,同时也说明这个运输包装系统满足物流运输的要求。

4 结语

文中分析了 2 种常见缓冲材料的力学性能,建立了花瓶包装件的数值三维模型,通过 Ansys Workbench 中的模态分析和随机振动分析,得到了包装件的位移、总应力、响应加速度谱密度等。通过对比分析,EPE 材质更优,随后选取优化的 EPE 缓冲包装结构,对整体结构件进行随机振动和跌落试验,验证了仿真和产品整体包装的可靠性,说明该运输包装结构满足物流运输的要求。文中借助数值手段对包装件进行有限元分析,在更好地了解典型防护材料性能的基础上,设计了低成本、高可靠性的结构设计方案。

参考文献:

[1] 吴萍,高铭悦.易碎品容器的瓦楞纸板包装设计研究[J].包装工程,2015,36(1):74—79.
WU Ping,GAO Ming-yue. Packaging Design of Corrugated Paperboard for Fragile Container[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 74—79.

[2] 宋晓利,张改梅,王灿,等.基于有限元法的缓冲材料力学性能分析[J].包装工程,2014,35(19):25—28.
SONG Xiao-li,ZHANG Gai-mei,WANG Can, et al. Analysis of Mechanical Properties for Cushioning Materials Based on Finite Element Method[J]. Pack-

aging Engineering, 2014, 35(19): 25—28.

[3] 辛丽颖.缓冲包装材料的应用及发展[J].印刷技术,2016(10):42—43.
XIN Li-ying. Application and Development of Cushioning Packaging Materials[J]. Printing Technology, 2016(10): 42—43.

[4] 陈满儒,刘兰.基于应力-能量法的缓冲包装材料性能研究[J].包装工程,2018,39(5):44—47.
CHEN Man-ru, LIU Lan. Study on Properties of Cushioning Packaging Materials Based on Stress-energy Method[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 44—47.

[5] 刘庆伦,冯嫄.包装材料 EPE 热封工艺的实验研究与分析[J].包装工程,2017,38(23):111—115.
LIU Qing-lun, FENG Chang. Experimental Study and Analysis of Heat Sealing Technology for Packaging Material EPE[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 111—115.

[6] 孙立国,杜成斌,王大鹏. EPS 材料力学性能测试及装饰构件数值仿真[J].建筑材料学报,2013(4):637—641.
SUN Li-guo, DU Cheng-bin, WANG Da-peng. Mechanical Analysis and Numerical Simulation of EPS Exterior Decorative Element[J]. Journal of Building Materials, 2013(4): 637—641.

[7] 汤伯森.包装动力学[M].北京:化学工业出版社,2011:45—46.
TANG Bo-sen. Packaging Dynamics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 45—46.

[8] 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.
DING Yu-ping, QIAN Yi. Dynamic Cushioning Property Simulation Analysis of the Overall Package Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 18—22.

[9] 周婉利.聚磷酸钙/硅酸钙复合生物陶瓷的制备及其性能研究[D].济南:山东大学,2018.
ZHOU Wan-li. Preparation and Properties Research of Calcium Polyphosphate/Calcium Silicate Composite Bioceramics[D]. Jinan: Shandong University, 2018.

[10] 唐杰,肖生苓,王全亮,等.吊灯灯罩缓冲衬垫的随机振动仿真分析及实验验证[J].包装工程,2018,39(15):16—24.
TANG Jie, XIAO Sheng-ling, WANG Quan-liang, et al. Simulation Analysis on Random Vibration and Experimental Verification of Chandelier Lampshade Buffering Cushion[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(15): 16—24.

[11] 王娜,赵俊凯,李孟红.基于 ANSYS Workbench 的振动筛模态分析[J].粮食加工,2018(4):66—72.
WANG Na, ZHAO Jun-kai, LI Meng-hong. Modal Analysis of Vibrating Screen Based on ANSYS Workbench[J]. Grain Engineering, 2018(4): 66—72.

- [12] KATSUHIKO S, JONNI V. Characterising Modal Definability of Team-based Logics via the Universal Modality[J]. *Annals of Pure and Applied Logic*, 2019, 45(3): 392—405.
- [13] RANDALL R B, ANTONI J, SMITH W A. A Survey of the Application of the Cepstrum to Structural Modal Analysis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 3: 716—741.
- [14] 丁群燕. 半挂车车架有限元仿真与静力分析[J]. *装备制造技术*, 2017(9): 15—19.
DING Qun-yan. Finite Element Simulation and Modal-analysis of Semi-trailer Frame[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2017(9): 15—19.
- [15] 曾庆平, 洪育成, 徐皖生. 基于 ANSYS Workbench 的电机转轴的随机振动分析[J]. *内燃机与配件*, 2018(4): 59—61.
ZENG Qing-ping, HONG Yu-cheng, XU Wan-sheng. Random Vibration Analysis of Motor Shaft Based on ANSYS Workbench[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2018(4): 59—61.
- [16] 刘笑天. ANSYS Workbench 有限元分析工程实例详解[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017: 126—127.
LIU Xiao-tian. ANSYS Workbench Finite Element Analysis Engineering Examples Explain[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017: 126—127.
- [17] 李彭. 折叠伸缩珍珠棉缓冲包装设计与工艺分析[J]. *包装世界*, 2015(4): 39—40.
LI Peng. Design and Process Analysis of Folding Telescopic Pearl Cotton Buffer Packaging[J]. *Packaging World*, 2015(4): 39—40.
- [18] 沈黎明, 张华良, 顾祖莉. 运输包装件振动试验系统研究[J]. *中国测试技术*, 2005, 31(6): 135—140.
SHEN Li-ming, ZHANG Hua-liang, GU Zu-li. Research on the Vibration Test System of Transport Package[J]. *China Measurement Technology*, 2005, 31(6): 135—140.
- [19] 陈志强, 陈振强. 解析运输包装随机振动试验[J]. *印刷技术*, 2010(22): 46—47.
CHEN Zhi-qiang, CHEN Zhen-qiang. Analytical Transport Packaging Random Vibration Test[J]. *Printing Technology*, 2010(22): 46—47.
- [20] 石岩, 张括, 王芳, 等. 全瓦楞纸板的红酒包装内衬设计及跌落分析[J]. *包装工程*, 2017, 38(9): 145—150.
SHI Yan, ZHANG Kuo, WANG Fang, et al. Design and Dropping Analysis of Package Lining for Red Wine with All Corrugated Board[J]. *Packaging Engineering*, 2017(9): 145—150.