

# 不同缓冲材料的堆码包装振动特性分析

曾台英, 周龙炎, 许增刚, 杨佳文

(上海理工大学 出版印刷与艺术设计学院, 上海 200082)

**摘要:** **目的** 研究物流运输中采用不同缓冲材料的堆码包装件的振动特性。**方法** 以缓冲材料聚乙烯泡沫 (EPE) 和聚苯乙烯泡沫 (EPS) 为研究对象, 采用三维建模软件 SolidWorks 和有限元仿真软件 Workbench 建立有限元模型进行模态与谐响应分析, 结合扫频振动试验和随机振动试验对各层堆码件的振动响应特性进行分析。**结果** 2 类包装件共振频率处的第一激励能量都大于第二激励能量, 振动幅值随层数增加而升高。EPE 包装件第一和第二共振频率的激励能量占比分别为 35.7% 和 3%, EPS 包装件第一和第二共振频率的激励能量占比分别为 26.8% 和 16.8%。EPE 包装件共振区域主要分布于 15~40 Hz, 而 EPS 包装件共振频率区域分布于 15~40 Hz 和 60~80 Hz。三层堆码件的中上层包装件受第一共振频率控制, EPS 材料的底层包装件受多个共振频率影响, EPE 材料的底层包装件受到第二共振频率控制。**结论** 经过循环载荷作用后的 EPE 的吸振缓冲性能优于 EPS 的。通过试验与有限元仿真数据绘制了相应的防振性能曲线, 同时验证了有限元仿真的可靠性。这为堆码产品选择不同缓冲材料组合提供了理论指导。

**关键词:** 多层堆码; 缓冲材料; 扫频振动; 共振频率; 防振曲线

中图分类号: TB484; TH238 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)05-0262-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.033

## Vibration Characteristics of Stacking Packaging with Different Buffer Materials

ZENG Tai-ying, ZHOU Long-yan, XU Zeng-gang, YANG Jia-wen

(College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology,  
Shanghai 200082, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the vibration characteristics of stacking packages with different buffer materials in logistics transportation. Buffer materials EPE and EPS were used as research objects. Three-dimensional modeling software SolidWorks and finite element simulation software Workbench were used to establish the finite element model for modal and harmonic response analysis. The vibration response characteristics of each stacking part were analyzed by the combination of sweep vibration experiment and random vibration experiment. The first excitation energy at the resonant frequency of both packages was greater than the second excitation energy. The amplitude of vibration increased with the increase of the number of layers. The excitation energy of the first and second resonance frequencies of EPE packaging accounted for 35.7% and 3%, while the excitation energy of the first and second resonance frequencies of EPS packaging accounted for 26.8% and 16.8%. The resonance region of EPE packaging was mainly distributed in 15-40 Hz, while the resonance frequency region of EPS packaging was distributed in 15-40 Hz and 60-80 Hz. The middle and upper packaging was controlled by the first resonance frequency, the bottom packaging of EPS material was affected by multiple resonance frequencies. And the bottom packaging of EPE material was controlled by the second resonance frequency. The vibration absorbing and buffering performance of EPE under cyclic loading is better than that of EPS. The corresponding an-

收稿日期: 2022-10-16

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

ti-vibration performance curve is drawn by comparing the experimental data with the finite element simulation data, and the reliability of the finite element simulation is verified. It provides theoretical guidance for selection of different buffer material combinations for stacking products.

**KEY WORDS:** multiwall stacking; buffer material; frequency sweep vibration; resonance frequency; vibration control curves

随着物流行业运输的托盘化和集中化, 产品运输过程中发生冲击、碰撞、跌落的情况逐渐减少, 而振动破坏逐渐成为了流通过程中产品破坏的主要因素并且难以避免<sup>[1]</sup>。其一表现为产品结构自身的振动破坏, 现如今电子类、家电类等产品的结构精密, 对长时间的振动很敏感, 极易造成部件松动以及破坏。其二是对堆码产品而言, 产品运输不仅存在外部的振动冲击, 堆码件之间也会存在上下跳动和层间的侧向运动<sup>[2]</sup>, 因此会使用缓冲材料来对产品进行保护, 而不同组合的内外缓冲材料的性能也会对运输过程中的包装件和包装产品的共振频率、最大响应加速度等振动响应有不同的影响<sup>[3]</sup>。

对物流运输的缓冲包装和堆码系统的振动特性研究, 国内外已经有不少学者有所涉猎。林深伟等<sup>[4]</sup>通过仿真和振动试验验证了两层堆码包装件的上层产品的振动主要受第一共振频率控制, 下层产品的振动受到第一和第二共振频率共同控制。产品加速度在共振频率附近的响应很大, 在非共振频率范围的响应很小。尹兴等<sup>[5]</sup>以不同厚度的 EPE、三层瓦楞纸板、五层瓦楞纸板为研究对象, 将 3 种材料进行组合分析拟合, 发现五层瓦楞纸板/EPE 的缓冲性能要大于三层瓦楞纸板/EPE 和 EPE 的缓冲性能, 拟合的函数也可用于快递包装设计。王志伟等<sup>[6]</sup>以常见的散装货物的托盘堆码形式, 研究了散装货物托盘单元在随机振动激励下产品的加速度响应规律, 并分析和讨论了激励谱型、振动等级、约束方式和产品位置的影响。王妮睿等<sup>[7]</sup>研究了猕猴桃在运输过程中振动特性, 并通过扫频和定频振动试验分析了不同振动加速度对多层堆码件之间的振动传递率以及猕猴桃的表面损伤指数的影响, 为增强水果运输包装的防护性提供可靠的理论依据。Molnár 等<sup>[8]</sup>对小批量堆码件的水

平和垂直方向上的运动进行了研究, 通过分析堆码件的动力学特性表明了单轴振动模拟与实际振动相关性较低。

考虑到实际运输过程中, 往往将堆码产品—内外包装—载体视为耦合结构形式。因为外界多样复杂的激励输入, 载体运输时的不确定性振动会增加堆码产品在运输过程中发生共振破坏的概率<sup>[9]</sup>。所以耦合结构中起关键承接作用的内外缓冲包装材料选取至关重要, 如果内外缓冲材料的组合选取位于振幅放大区域, 不仅无法达到衰减振动的效果, 还会引发包装件共振, 因而研究不同缓冲材料结构的动力学参数变化来分析结构的输出变化规律具有重要的意义。结合上述文献, 文中将选择内缓冲材料 EPE、EPS 作为研究对象, 五层瓦楞纸箱为外包装, 运用有限元和试验相结合的方法来研究分析堆码产品在模拟振动环境下的共振频率和加速度响应特性, 探究三层堆码件之间的振动传递规律, 并设计出堆码产品的防振性能曲线。为堆码产品在流通过程中的合理装载运输提供理论指导。

### 1 堆码单元动力学模型与振动传递率

产品在运输过程中的流通形式往往以多件货物堆叠, 最常见的货垛是以重叠式堆码运输。载体在运输过程中与外界环境以及车内的货物构成了一个整体系统, 道路为整个系统所有对象提供激励输入, 因此, 文中以三层堆码件来构建受迫振动模型, 如图 1 所示。

对单个包装件而言, 假设内装物的位移为  $x$ , 外包装的位移为  $y$ , 系统激励为  $f(t)$ , 当包装件受到外界激励时, 内装物会往复振动, 此时内装物受到的弹

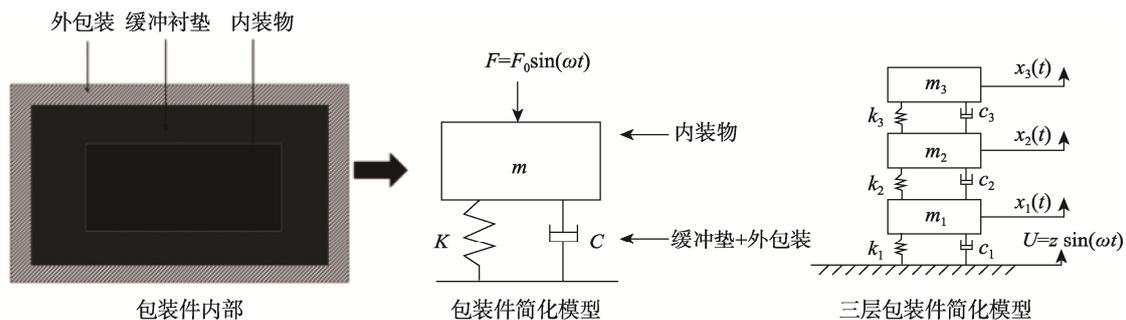


图 1 堆码单元动力学模型  
Fig.1 Dynamic model of stacking unit

性力为  $-k(x-y)+k\delta$ ，阻尼力为  $-c(x'-y')$ ，本身重力为  $-mg$ 。由于  $\delta$  是因为内装物的重量  $mg$  引起的衬垫位移，与  $mg$  大小相等，方向相反，即  $k\delta=mg$ ，则可以得到包装件的运动方程：

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

堆码件在运输过程中受到的外界激励通过振动传递到整个运载载体，并带动堆码货物之间产生振动响应<sup>[10]</sup>。因而可以假设载体运输工具的振动频率为  $\omega$ ，系统的固有频率为  $\omega_0$ ， $\lambda$  为  $\omega/\omega_0$  的比值，振动的振幅为  $U$ ，阻尼为  $c$ ，阻尼比为  $\zeta$ ，则根据式 (1) 可以得到三层包装件的动力学方程：

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 &= k_1(x_2-x_1)+c_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1) \\ m_2\ddot{x}_2 &= k_2(x_3-x_2)+c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2)- \\ & k_1(x_2-x_1)-c_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1) \\ m_3\ddot{x}_3 &= k_3(U-x_3)+c_3(\dot{U}-\dot{x}_3)- \\ & k_2(x_3-x_2)-c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2) \end{aligned} \tag{2}$$

则振动传递率  $T_r$  可以表示为：

$$T_r = \sqrt{\frac{1+(2\xi\lambda)^2}{(1-\lambda^2)^2+(2\xi\lambda)^2}} \tag{3}$$

当  $\lambda$  比值趋近于 1 时，振动传递率达到最大值，这将导致产品自身的加速度值很可能大于材料自身的强度极限，从而产生共振破坏，引起产品破损，因此，可以通过振动传递率来描述由外部载体激励所引起的包装系统之间的振动传递特性，分析堆码包装层之间的振动响应特性。

## 2 仿真分析

### 2.1 内缓冲材料选择

本次研究以 EPE、EPS 和五层瓦楞纸箱为研究对象。EPS 和 EPE 作为现如今用途较广的几种材料之

一，2 种缓冲材料对传递到包装件的振动冲击的能量都具有良好的吸收性。2 种材料都是发泡制成，在受到振动外力时，内部气泡会相互挤压，内部气体产生滞流压缩。从而将振动外力转换成热能和形变能。2 种缓冲材料在缓冲特性上有所差别。相较于 EPS，EPE 经过多次冲击的变形量很小，仍能保持较好的回弹和缓冲性能<sup>[11-12]</sup>。

### 2.2 三维模型建立

使用 SolidWorks 建立三层电磁炉堆码模型，对试验结果没有影响的倒角、曲面等部分进行适当的简化，并对装配体结构进行干涉检查，实体单层产品模型如图 2a 所示。试验所用的外包装为尺寸 305 mm×115 mm×338 mm 的瓦楞纸箱，毛质量为 3 kg。电磁炉的主要外部部件由玻璃、上盖板、底座、旋钮等 ABS 材料组成。材料有限元模型如图 2b、c 所示。

### 2.3 有限元设置

将三维模型导入到 Workbench19.0 中，通过表 1 参数在 Engineer Data 中对电磁炉的各部件赋予具体参数<sup>[13-15]</sup>。根据实际运动情况对装配体模型的有限元接触进行设置，考虑到包装产品在运输过程中主要以法线方向和切线方向的运动为主，因此，衬垫与电磁炉顶部采用无摩擦接触；衬垫与产品左右端面采取不分离接触；衬垫与瓦楞纸箱采用不分离接触；纸箱与纸箱之间，木板与纸箱以及纸箱与振动台面均采用绑定接触。振动台底面施加固定约束，将木板和振动台的螺栓孔施加弹簧约束等效为弹簧单元。对外层包装纸箱采用壳单元划分，对支撑的底座和木板使用六面体网格划分方式，其余部件采用四面体网格划分。为保证应力结果与网格的质量无关，对整体包装件应力较大的电磁炉顶部的玻璃面、排风扇等位置进行收敛性验证，设置应力变化百分比为 2%。划分完毕后，获得模型的节点数为 246 372，单元数为 109 888。模型整体网格划分后如图 3 所示。



图 2 实物模型与有限元模型  
Fig.2 Solid model and finite element model

表 1 材料特性  
Tab.1 Material properties

产品与包装材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$	弹性模量/ MPa	剪切模量/ MPa
玻璃	2 500	0.22	$7\times 10^4$	—
木板	437.47	0.3	$2\times 10^3$	—
ABS	1 050	0.39	$2\times 10^2$	—
EPS	22	0.1	5.14	—
EPE	27.8	0.1	3.02	—
振动台	7 850.00	0.3	$2\times 10^3$	—
瓦楞纸箱	143.40	0.34/0.01/ 0.01	118.50/64.30/ 0.59	33.78/1.84/ 2.15

注: 瓦楞纸箱泊松比分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的值, 弹性模量分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的值, 剪切模量分别表示  $xy$ 、 $yz$ 、 $xz$  方向的值。

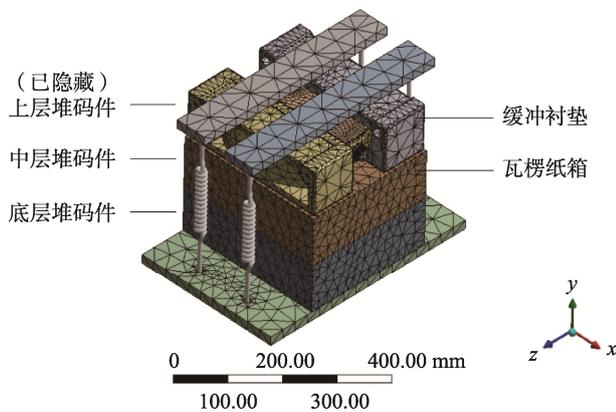


图 3 有限元网格划分  
Fig.3 Finite element meshing

## 2.4 模态分析

模态分析是对结构性能的动力学评估, 本质上是通过分析运输过程中的振动对产品结构的动力学特性的影响。对一般结构而言, 往往要求各阶模态的频率与结构的工作频率不在一个范围内, 或是工作频率不落在某阶模态的半功率带宽内。模态分析可以直接得到结构各阶的固有频率以及模态振型, 因此模态分析是各类动力学分析的基础<sup>[16]</sup>。通过模态分析获取前 6 阶固有频率, 见表 2。

通过表 2 可知, EPS 和 EPE 缓冲堆码件的前 6 阶固有频率主要集中在 100 Hz 以内, 且模态应力集中的部位大致相同。前 3 阶振型相似且前 3 阶振型的频率都主要分布在 5 Hz 内。前 3 阶变形位移分布最大位置位于电磁炉外围的 ABS 外壳以及底部排风扇部分。EPS 后 3 阶振型频率主要分布在 30 ~ 75 Hz 内。

## 2.5 随机振动分析

在模态分析的基础上继续进行随机振动分析, 随机振动分析可以通过输入实际的 PSD 加速度激励来获

得结构在实际运输过程中的结构响应。通过随机振动分析可以找出结构自身的最大变形和应力位置。输入 GB/T 4857.23—2021 中的中国公路随机振动功率谱密度曲线, 如图 4 所示。选择等级 2 的曲线进行导入, 设置水平方向为  $z$  向进行等效应力、应变分析。

表 2 2 种材料包装下的结构固有频率  
Tab.2 Natural frequencies of structures packaged with two materials

阶数	EPS 频率/Hz	EPS 振型	EPE 频率/Hz	EPE 振型
1	3.406	中间层电磁炉扭转	3.657	中间层电磁炉扭转
2	4.451	顶层电磁炉扭转	4.780	顶层电磁炉扭转
3	4.501	底层电磁炉的扭转	4.828	底层电磁炉的扭转
4	30.239	堆码包装件的左右倾斜	31.494	堆码件的上下振动
5	36.897	中间产品的上下振动	38.130	整体由外向内部的振动
6	74.575	上、中产品的上下振动	76.397	顶层产品的由外向内的振动

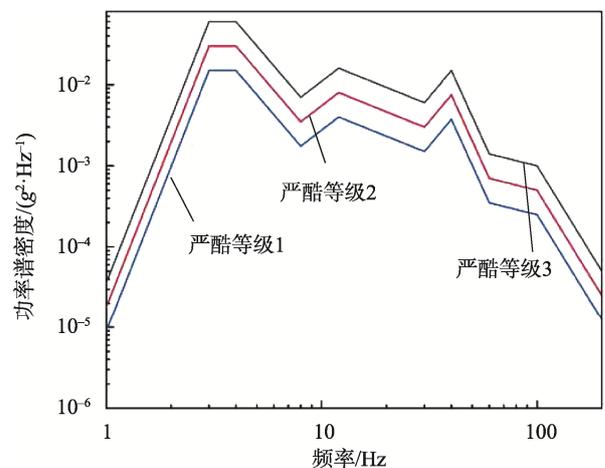


图 4 公路运输水平 II 随机振动 PSD 曲线  
Fig.4 PSD curve of random vibration for cruel level II of highway transportation

随机振动分析结果如图 5 所示, 为方便观察内部情况, 隐藏了外部纸箱。在 3Sigma 下的包装件最大等效应力和应变位置都位于顶层包装件, EPS 最大等效应力为  $6.709 2\times 10^{-4}$  MPa, 最大位移为  $6.382 5\times 10^{-4}$  mm。EPE 最大等效应力为  $5.821 3\times 10^{-4}$  MPa, 最大位移为  $7.116 6\times 10^{-4}$  mm。通过随机振动分析可以发现, 2 种缓冲材料下的堆码件的应变区域都是自下而上的增加, 结合模态分析结果可知, 堆码件的应变主要集中于顶层区域。

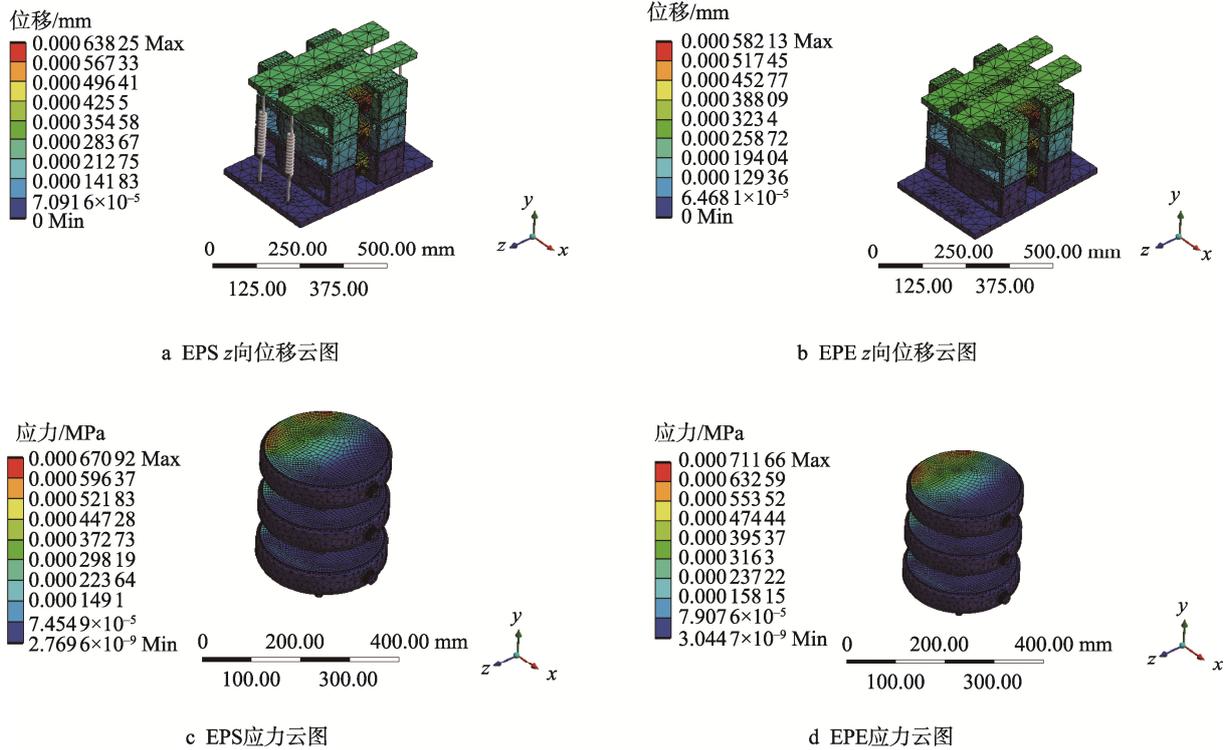


图 5 2种缓冲材料的随机振动分析结果  
Fig.5 Random vibration analysis results of two buffering materials

## 2.6 谐响应分析

谐响应分析是采用 Workbench19.0 对系统结构的稳态响应进行分析。它通过施加不同频率的周期正弦激励来分析响应结果<sup>[17]</sup>。文中使用模态叠加法来求解随机振动的谐响应分析。根据模态分析结果可知,堆码包装模型的固有频率为 3~80 Hz,谐响应分析的范围应大于固有频率范围,设定谐响应频率为 1~100 Hz,定义重力加速度信号为 y 轴  $9\ 800\ \text{mm/s}^2$ ,谐响应分析曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,2 种材料在 100 Hz 内主要存在 2

处共振峰, EPS 的整体振幅峰值要大于 EPE 的;在扫频范围内 EPE 材料堆码件的位移响应在 31.5、76.3 Hz 处出现较大峰值, EPS 材料包装件的位移响应的峰值位于 30.2 和 74.5 Hz。说明堆码件会在该峰值处发生共振,且最大共振处的频率都位于低频段。结合模态分析可知,发生共振处的频率处于其固有频率范围内,分别对应于固有频率的第 4 阶和第 6 阶振型。考虑到实际运输时,顶层产品在堆码件中受到的约束最小而活动区域最大,因此高频振动时顶层会产生较大的振幅。结合模态分析可知,发生共振时,顶层包装件更容易发生破坏。

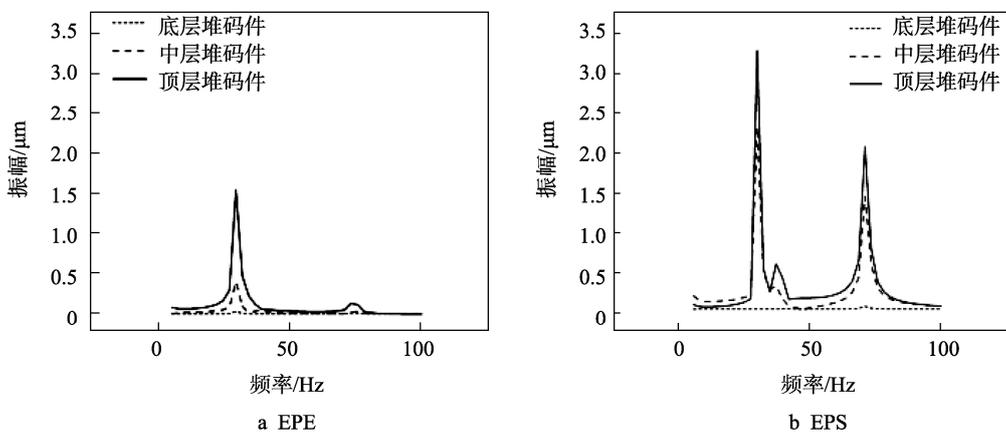


图 6 2种缓冲包装件的谐响应曲线  
Fig.6 Harmonic response curves of two buffer packages

如图 7 所示, 分析 2 种材料包装下的顶层堆码件的能量分布, EPE 的第一和第二共振频率的能量占比为 35.7% 和 3%, EPS 的第一和第二共振频率的能量占比为 26.8% 和 16.8%。结合图 6 可知, 2 种材料在第一共振区域的位移响应都要大于第二共振区域的位移响应, 原因在于第一共振频率处的激励能量都大于第二共振处的激励能量。EPE 的第一共振频率峰值的陡峭程度要远大于第二共振峰值的, EPS 的第一和第二共振峰值差距不大, 从能量分布可以说明 EPE 与五层瓦楞组合的包装件共振区域主要位于 15~40 Hz, 而 EPS 与五层瓦楞组合的包装件共振频率区域分布于 15~40 Hz 以及 60~80 Hz。

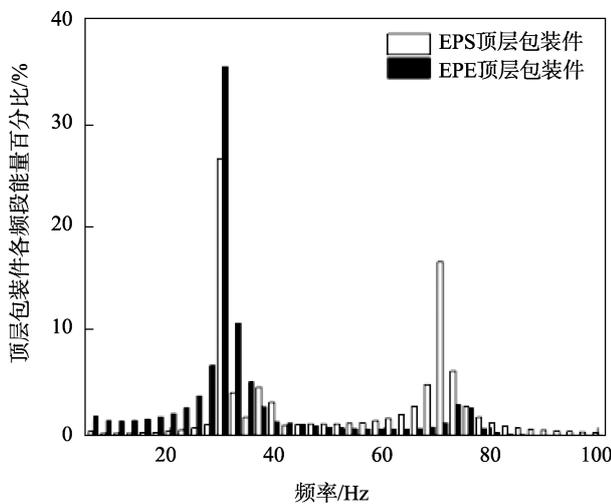


图 7 2 种材料顶层包装件的能量占比分布  
Fig.7 Energy proportion distribution of top packaging of two materials

产品在运输过程中振动频率多集中于 0~50 Hz 低频段<sup>[18]</sup>, 并且在运输过程中面对外界振动冲击的环境, 缓冲材料会吸收振动冲击从而产生形变。外界的振动产生的能量将会一部分传递给缓冲材料, 另一部分再传递给内部包装的产品。对相同材料而言, 一般变形程度越大吸收的能量越多, 而不同缓冲材料则需要结合自身的材料特性。根据文献[5]可知, 在受到冲击振动时 EPE 的形变要小于 EPS 的, 但 EPE 的回弹速度快, 经过多次循环振动仍能保持完整性。结合文献[4]以及模态分析可知, 产品应变的区域主要集中于顶层, 顶层产品的共振区域主要受第一共振频率控制, 因此, 由谐响应分析和能量分布可知, 在振动低频段的 EPE 的承压吸能要优于 EPS 的, 并且 EPE 的振幅更小, 能更快地恢复缓冲性能。在实际运输过程中, EPE 与五层瓦楞包装件可以较好的承压吸能, 并恢复到原来的尺寸, 防止二次回弹。EPS 与五层瓦楞组合的包装件在峰值区域的变形更大, 原因在于 EPS 发泡膨胀形成的硬质封闭空腔可以吸收较大振动能量, 但连续的高频振动会使得材料发生不可恢复的应

变, 累积塑性变形导致缓冲材料与产品之间产生空隙, 会增加二次冲击和共振的可能。

### 3 试验分析

#### 3.1 试验产品与设备

试验涉及的设备有 NV3062A 采集分析仪、单向加速度传感和 DASP-V11 分析软件; L.A.B HV 系列 M7000 液压振动台及采集传感器等。试验件为外包装为五层瓦楞纸箱的三层堆码件, 顶部放置木板并使用 150 mm 弹簧与振动台面的螺栓固定。

#### 3.2 扫频振动试验

将试验样品放置于恒温恒湿箱中进行 48 h 预处理并进行标号。参照运输包装基本试验的 GB/T 4857.10—2005, 设定振动台的频率范围为 3~100 Hz, 重复 2 次; 加速度值设置为 0.2g, 扫频总时长 2 min。为减少试验误差保证传感器平行于振动方向, 将振动台 1 号传感器置于振动台面并使用双面胶固定, 振动台 2 号传感器垂直放置于产品表面。信号采集仪的 3 个传感器分别垂直置于三层堆码件产品内部排风扇处, 并使用双面胶固定。对 DASP 软件示波采样进行设定, 采样频率选择 512 Hz, 采样方式选择自由振动。

#### 3.3 结果与分析

结合式 (3) 将采集获得的数据经 DASP-v11 分析得到 2 种缓冲材料包装各层的时域响应, 如图 8 和表 3 所示, 各层包装件的最大共振峰值的时间点及响应加速度值如表 3 所示。仅观察一段周期内产品的加速度情况可知, 各层堆码件在扫频范围内存在多个共振点, 产品最大响应加速度由底层至顶层呈现递增状态, 顶层堆码件的振动加速度值最大, 且达到振动峰值的时间点最快。底层堆码件的共振加速度值小, 共振的时间点也最晚, 但共振时间点频繁, 峰值随时间推移而升高。中上层包装件在共振范围内响应变化幅值明显, 在非共振范围内响应较小。EPE 与五层瓦楞组合包装件的整体加速度要小于 EPS 与五层瓦楞组合包装件的。

根据式 (3) 计算获得各层振动传递率关系如图 9 所示, 在受迫振动下, 当包装件的固有频率等于振动台的振动频率时会发生共振, 此时的包装件的振动传递率达到最大值。

通过观察表 4 和图 9 各层的传递关系可知, 对于约束力较小的中上层包装件, 第一共振频率处的振动传递率随层数增加而升高。在第二共振频率处 2 种材料的中上层频率值相近, 但传递率都明显减小。说明中上层包装件受第一共振频率控制, 与文献[4]对两层包装堆码件试验的结果相同。

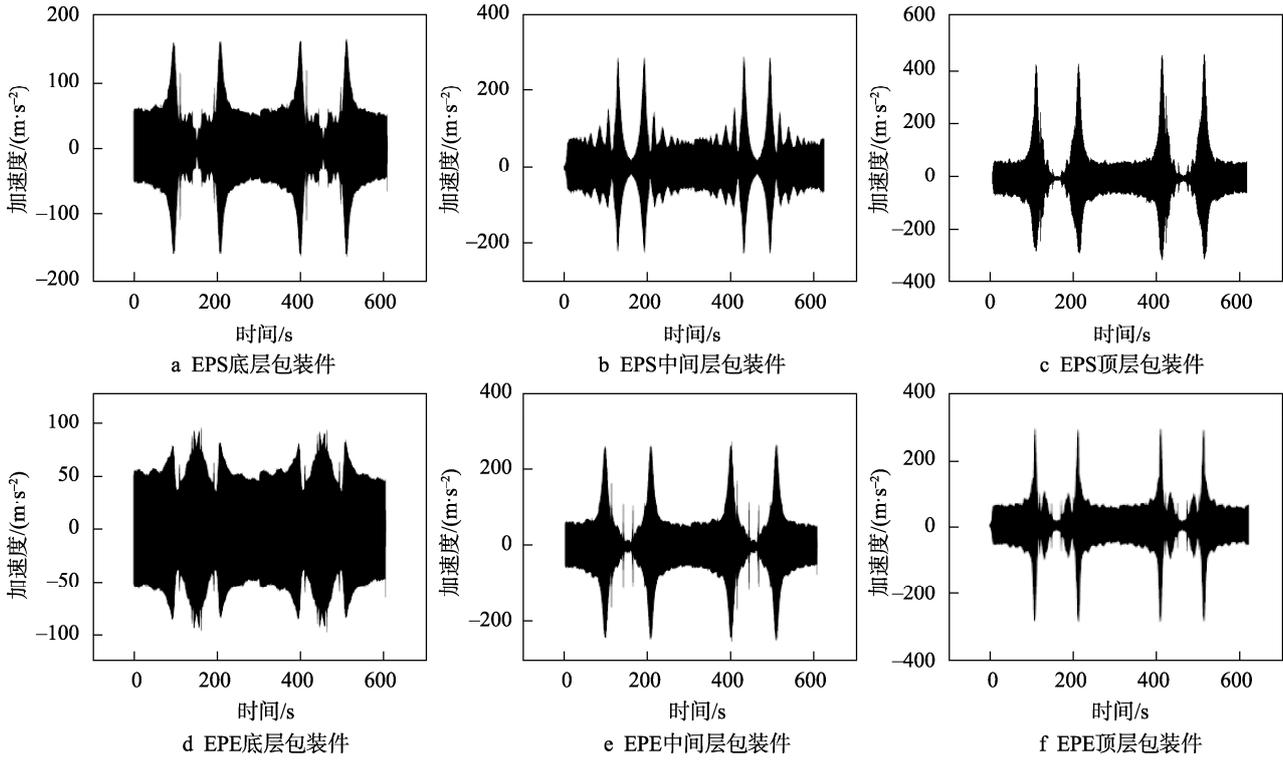


图8 2种缓冲材料包装的各层时域响应图

Fig.8 Time domain response diagram of each layer of packaging of two buffer materials

表3 包装件的最大共振峰值的时间点及响应加速度值

Tab.3 Time point and response acceleration value of the maximum resonance peak of the package

堆码层	EPS		EPE	
	最大共振处的时间点/s	最大响应加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	最大共振处的时间点/s	最大响应加速度/(m·s <sup>-2</sup> )
底层	129.8	279.5	145.0	94.0
中间层	109.0	290.0	97.7	158.1
顶层	105.0	431.4	96.4	203.0

2种材料的底层包装件的振动传递率随扫频时间逐渐上升。通过谐响应分析可知,因为堆码件之间以及产品与缓冲材料之间在垂直方向存在约束,间隙很小,所以两两之间的相对运动很小。尤其是底层包装件,振动的传递输出与振动台输入激励作用力接近于线性。结合时域分析和2种材料的振动传递关系可知, EPS 底层包装件峰值受多个共振频率影响。EPE 底层包装件的第二共振频率逐渐增大并高于第一共振频率和中上两层的,说明 EPE 底层堆码件主要受

到第二共振频率控制。

根据2种材料的缓冲性能可知,2种材料在顶层振动传递的比值上具有较大的差异, EPE 对顶层产品的振动吸收保护要远好于 EPS 对顶层产品的振动吸收保护。经过循环载荷作用后, EPS 的回弹性性能下降,对能量的吸收降低,振动更多地作用于产品上。EPE 在循环载荷作用下的变形可以较好地恢复至原来尺寸,衰减振动能量的能力没有下降,对长途运输而言, EPE 可以更好地保护产品,防止疲劳破损。

表4 缓冲材料共振频率与传递率关系

Tab.4 Relation between resonance frequency and transmissibility of buffer materials

堆码层	EPS				EPE			
	第一共振频率/Hz	传递率比值	第二共振频率/Hz	传递率比值	第一共振频率/Hz	传递率比值	第二共振频率/Hz	传递率比值
底层	28.5	1.92	63.9	2.36	27.8	1.63	87.0	2.29
中间层	29.0	3.40	75.6	1.46	28.8	3.61	75.9	1.55
顶层	30.2	9.25	76.1	1.12	29.0	5.49	75.2	1.06

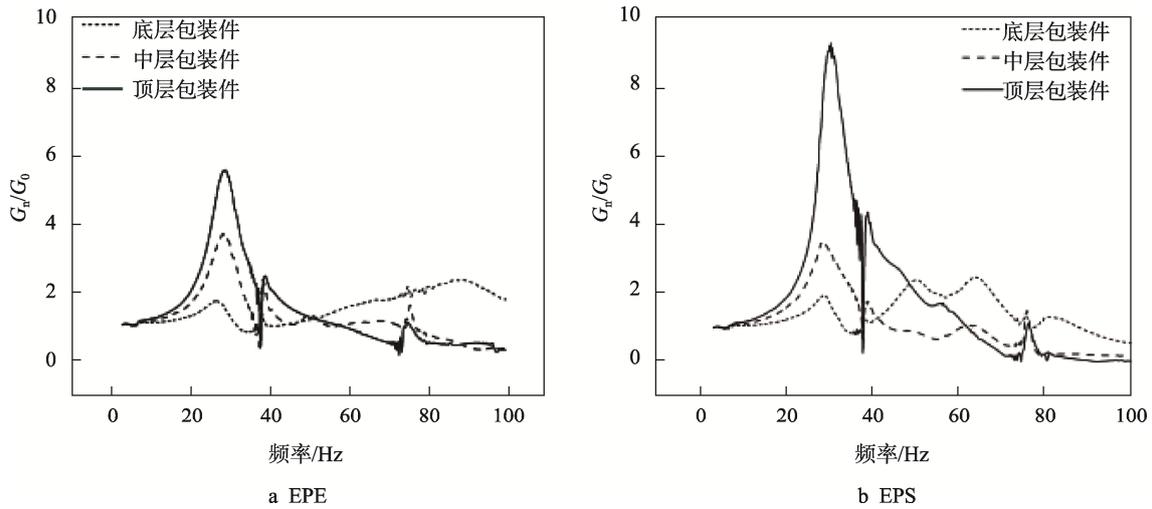


图 9 各层传递率关系  
Fig.9 Relationship between the transmissibility of each layer

### 3.4 随机振动试验分析

为观察 2 种缓冲材料包装下产品在实际运输过程中的运动响应情况, 对包装件进行随机振动分析。按照视频振动试验对包装件进行处理, 将传感器放置于振动区域较大的顶层包装件的产品内部。按照试验标准对包装件进行试验, 输入图 4 功率谱密度曲线 II 标准, 得到 2 种材料的随机振动的加速度功率谱曲线。由图 10 可以看出, 2 种材料的响应加速度曲线都位于边界值内部, 并且与标准值差异较小, 可以得出本次随机振动试验具有可靠性。用 EPE 做缓冲的产品的振动曲线相较于 EPS 做缓冲的产品的振动曲线更加贴合标准值, 说明 EPE 对顶层包装件的保护性更好, 也验证了仿真试验的可靠性。

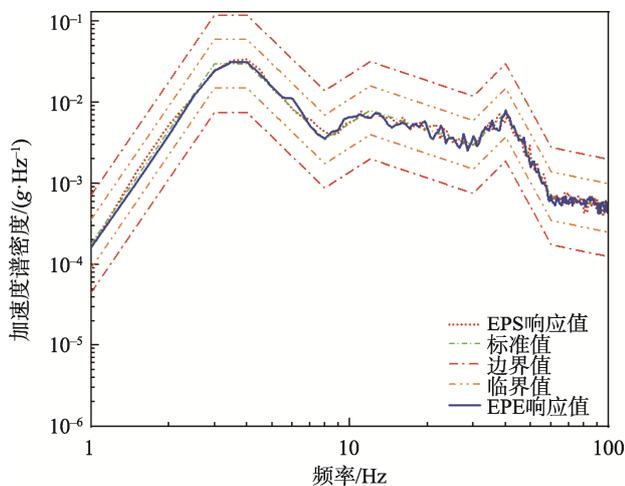


图 10 2 种材料的随机振动加速度谱密度  
Fig.10 Response acceleration spectral density of two materials

### 3.5 防振曲线

综合表 1 中 2 种材料的参数以及振动传递率数据, 选取各层包装件的共振点和传递率值均为 1.1 的交点绘制三层堆码件的防振性能曲线, 如图 11 所示。耦合线至共振线区域为振幅放大区域, 共振线至衰减线为振幅衰减区域。该防振曲线描述内外缓冲包装件的振动特性随着堆码层数增加的变化趋势。根据图 1 弹簧质量模型分析可知, 刚度系数不变时随着堆码层数的增加, 整体堆码包装件的固有频率会降低, 因此整体曲线呈下降趋势, 考虑到共振区域位于低频段, 应注意堆码层数过高时, 整体的共振问题。将产品的共振频率绘制一条直线于曲线图上, 分别与 2 种材料包装件的衰减线相交, 位于衰减线内的区域对应为堆码载荷的应力范围, 并且在该区域内的静应力-频率值对应缓冲材料能够衰减的最大静应力-频率值, 而超过该区域的静应力-频率值, 会对包装产品产生振动破坏, 因此, 材料和堆码层数应选择在该应力范围内。

从表 5 可知, 通过有限元仿真分析得到的共振频率与扫频振动分析得到的试验结果数据, 除第二共振频率底层包装件的误差外, 其他层的误差均不超过 6.5%。底层包装件受多个共振频率控制, 因此第二共振频率处的误差率稍大。考虑到结构在共振段的频率区域时的变形位移、加速度都会被放大, 即使是激励很小也会得到较大的响应加速度和变形位移量, 因此, 2 种材料通过仿真表现出的振动响应趋势与试验的表现相同, 验证了仿真的可靠性。

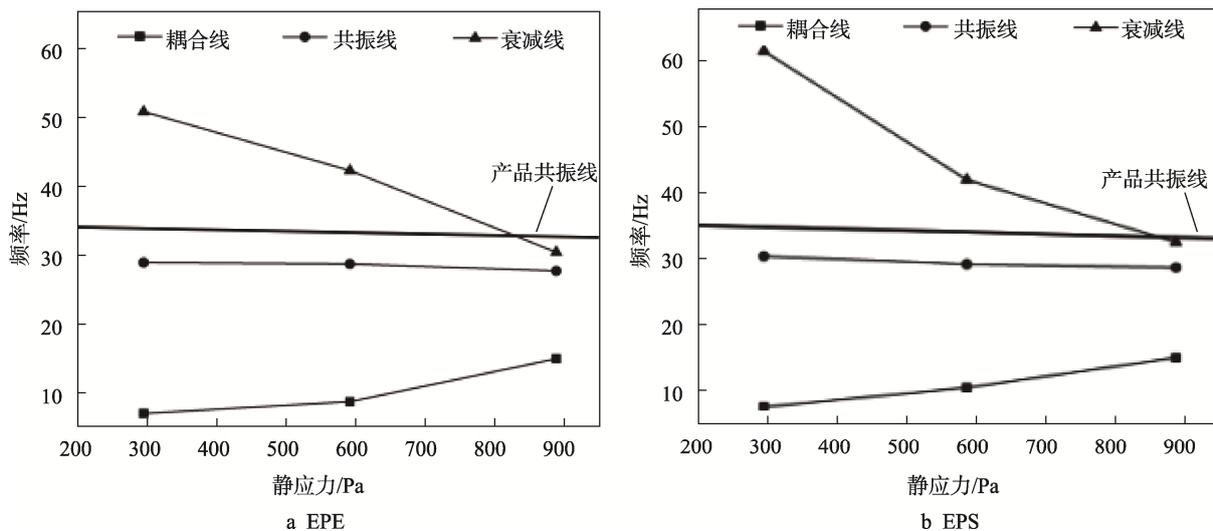


图 11 2 种材料的防振性能曲线  
Fig.11 Anti-vibration performance curves of two materials

表 5 试验与仿真误差对比  
Tab.5 Comparison error between experiment and simulation

堆码层	EPS 材料试验与仿真误差/%		EPE 材料试验与仿真误差/%	
	第一共振频率	第二共振频率	第一共振频率	第二共振频率
底层	3.8	18.1	6.4	18.5
中间层	2	3.0	2.7	6.5
顶层	1.9	0.7	2	5.4

### 4 结语

文中通过有限元仿真和实际试验研究了 2 种不同缓冲材料的堆码振动特性。首先建立理论模型来分析包装件在运动过程中的振动状态。其次以 EPE/EPS 和瓦楞纸箱的三层堆码包装件为研究对象。通过 SolidWorks 和 Workbench 建立模型, 并进行有限元随机振动分析和扫频振动分析, 研究了 2 种缓冲材料包装件的振动特性。由试验得到了 2 种包装件的共振频率处的激励能量、振动幅值随层数的变化状态。最后进行了扫频振动试验, 获得了 EPE 和 EPS 包装件的共振区域分布范围, 以及共振频率与传递率之间的关系。综合上述工作内容设计出了堆码包装产品的防振曲线, 验证了有限元的合理性。

#### 参考文献:

[1] 王志伟, 伍炼. 托盘运输包装单元冲击响应的试验与有限元分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 124-131.  
WANG Zhi-wei, WU Lian. Experimental Study and Finite Element Analysis of Impact Response of Pallet

Stacked Transportation Packaging Units[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 124-131.

[2] 王立军. 产品运输包装系统的加速随机振动试验研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019: 1-10.  
WANG Li-jun. Investigation on Accelerated Random Vibration Test of Product Transportation Packaging System[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019: 1-10.

[3] 钟玲珠, 陈安军. EPE/EPS 与蜂窝纸板组合静态缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 36-39.  
ZHONG Ling-zhu, CHEN An-jun. Study on Static Cushion Performance of EPE/EPS and Honeycomb Paperboard Combination[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 36-39.

[4] 林深伟, 王志伟. 两层堆码包装单元的随机振动响应[J]. 包装学报, 2017, 9(4): 10-19.  
LIN Shen-wei, WANG Zhi-wei. Response of Two Layer Stacked Packaging Unit in Random Vibration[J]. Packaging Journal, 2017, 9(4): 10-19.

[5] 尹兴, 陈志强, 崔久刚, 等. 快递包装 EPE/瓦楞纸板动态缓冲性能[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 52-57.  
YIN Xing, CHEN Zhi-qiang, CUI Jiu-gang, et al. Dynamic Buffering Performance of EPE/Corrugated Board Used in Express Packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 52-57.

[6] 王志伟, 曹燕. 托盘堆码包装单元随机振动响应的实验研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(6): 1187-1197.  
WANG Zhi-wei, CAO Yan. Experimental Investigation on Response of Random Vibration for Pallet Stacked Packaging Unit[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(6): 1187-1197.

[7] 王妮睿, 尤飞, 江智. 猕猴桃的模拟振动实验及特性研究[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 172-177.

- WANG Ni-ruì, YOU Fei, JIANG Zhi. Simulated Vibration Experiment and Features of Kiwifruit[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(5): 172-177.
- [8] MOLNÁR B, BÖRÖCZ P. Experimental Comparison of Field and Accelerated Random Vertical Vibration Levels of Stacked Packages for Small Parcel Delivery Shipments[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7): 1-5.
- [9] WANG Zhi-Wei, WANG Li-Jun. Accelerated Random Vibration Testing of Transport Packaging System Based on Acceleration PSD[J]. *Packaging Technology and Science*, 2017, 30(10): 1-6.
- [10] 王军, 王志伟. 多层堆码包装系统冲击动力学特性研究(II): 破损边界[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(8): 108-109.
- WANG Jun, WANG Zhi-wei. Combined Damage Boundary Curve of Linear Stacking Packaging System[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(8): 108-109.
- [11] 王妮睿, 陈景华, 尤飞, 等. 基于缓冲材料选择的打印机防护包装设计[J]. *包装工程*, 2018, 39(7): 126-131.
- WANG Ni-ruì, CHEN Jing-hua, YOU Fei, et al. Protective Package Design of Printer Based on Buffer Material Selection[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(7): 126-131.
- [12] SONG X, ZHANG G, LU J, et al. Study on the Cushion Performance of the Cushion Material Composed of EPE and Corrugated Paperboard[J]. *Springer Singapore*, 2019, 13(8): 636-643.
- [13] 米男男, 李光. 分析天平包装件随机振动仿真分析及优化设计[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(4): 206-212.
- MI Nan-nan, LI Guang. Random Vibration Simulation Analysis and an Optimization Design of Analytical Balance Packages[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(4): 206-212.
- [14] 李琛, 孙登辉, 徐涛. 平板玻璃运输包装设计及其性能分析[J]. *包装工程*, 2020, 41(13): 95-103.
- LI Chen, SUN Deng-hui, XU Tao. Design and Protective Performance of the Transport Packaging of Flat Glass[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(13): 95-103.
- [15] 张沙, 钱怡. 电磁炉包装件的振动特性仿真分析[J]. *包装工程*, 2012, 33(23): 56-60.
- ZHANG Sha, QIAN Yi. Simulation Analysis of Vibration Characteristics of Induction Cooker Package[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(23): 56-60.
- [16] 张帆, 汤婧雅, 朱友林. 基于ANSYS Workbench的多士炉包装设计与仿真分析[J]. *数字印刷*, 2020(1): 29-37.
- ZHANG Fan, TANG Jing-ya, ZHU You-lin. Packaging Design and Simulation Analysis of Toaster Based on ANSYS Workbench[J]. *Digital Printing*, 2020(1): 29-37.
- [17] LU Tao, ZHOU Bin, PAN Kai-lin, et al. Harmonic Vibration Analysis and S-N Curve Estimate of PBGA Mixed Solder Joints[J]. *Sensors and Transducers*, 2013, 14(2): 30-31.
- [18] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 2版. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 67-70.
- PENG Guo-xun. *Logistics Transportation Packaging Design*[M]. 2nd ed. Beijing: Printing Industry Press, 2012: 67-70.

责任编辑: 曾钰婵