

红酒运输中包装的缓冲减振隔衬性能分析

Performance analysis of buffer and vibration isolation lining for red wine transport packaging

王成位 顾文娟 刘美红 李书浩

WANG Cheng-wei GU Wen-juan LIU Mei-hong LI Shu-hao

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500)

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and
Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

摘要:目的:将有限元仿真结合到随机振动试验中,为红酒运输包装研究提供新思路。方法:以 3 种不同缓冲减振材料制成的红酒内包装隔衬作为研究对象,通过随机振动试验研究其振动响应,并采用有限元仿真模拟分析试验与仿真结果的关联性。结果:随机振动试验结果与有限元仿真结果高度一致,且有限元仿真较随机试验节省物料、节约时间。结论:通过随机试验与有限元相结合的方法可提高试验效率,有限元仿真方法可为运输振动环境下产品内包装件的分析与设计提供有效指导。

关键词:红酒;运输;随机振动;内包装;有限元仿真

Abstract: Objective: In this study, the finite element simulation was integrated into random vibration experiment to provide a new way of thinking about transportation packaging. **Methods:** The red wine inner packaging spacer, made of three different cushioning materials, was used as the research object, and the vibration response was studied through random vibration experiment. Then the finite element simulation was used to analyze the correlation between the experiment and the simulation results. **Results:** The results of random vibration test were highly consistent with the results of finite element simulation, and the finite element simulation was less material- and time-consuming, compared with the random test. **Conclusion:** The combination of random experiment and finite element method can improve the efficiency of the experiment. The finite element simulation method can provide effective guidance for the analysis and design of product inner packaging under the vibration environment of transportation.

Keywords: red wine; transportation; random vibration; inner packaging; finite element simulation

作者简介:王成位,男,昆明理工大学在读硕士研究生。

通信作者:顾文娟(1985—),女,昆明理工大学讲师,博士。

E-mail: guwenjuan001@163.com

收稿日期:2021-11-11 **改回日期:**2022-09-27

振动是造成产品损坏的主要原因,且产品会随着振动等级变化出现不同程度的破坏^[1-3]。在红酒运输过程中,由于路面不平而引起的振动是包装件破损的主要原因^[4],生产厂家多采用缓冲隔衬的方法来减少振动产生的影响。Studmanl 等^[5-6]通过对纸箱整体进行时域法与频域法研究,发现在实际运输过程中纸箱内部物体会承受各种各样的振动、摆动、颠振等情况。孙君等^[7-8]通过随机振动试验分析了单层啤酒周转箱与堆码啤酒瓶周转箱中不同位置的单个啤酒瓶的振动特性及加速度峰值分布规律。

随着计算机辅助技术的迅猛发展和日渐成熟,可利用有限元仿真软件来处理随机振动问题。刘龙涛等^[9]通过有限元分析软件 Ansys 对某机载产品进行了模态分析和随机振动分析,得到了随机振动下的应力响应功率谱。Rouillard 等^[10-13]利用功率密度谱函数,对车辆在道路上实际行驶产生的随机振动信号进行了分析,得到货物在车厢中的装载情况也会影响运输的振动响应。

研究拟以红酒类产品运输单元为研究对象,通过随机试验对 3 种不同内包装缓冲隔衬进行研究,并用有限元仿真对其结果进行验证,旨在验证有限元仿真对随机振动下对红酒内包装结构分析具有可行性。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

由云南省昆明市两岸旺丹酒庄提供的长宽高为 40 cm×30 cm×34.8 cm 内有 EPS 缓冲衬垫的纸箱与长宽高为 29.5 cm×25 cm×27 cm 内有 3 层瓦楞纸板、5 层瓦楞纸板的纸箱。每个纸箱均可放置 12 瓶红酒。红酒瓶选择 750 mL 标准红酒瓶。采用三自由度采样头、采集卡、苏试 DC-300-3 振动台。

红酒瓶在运输过程中会受到来自水平方向的单轴随机振动激励,也会受到来自垂直方向的随机振动,或同时来自水平方向、垂直方向的振动。有关研究^[11]表明,与水

平方向的振动相比,垂直方向上的振动对包装件的影响最大。所以采用三自由度测量头进行测量,并对垂直方向的振动情况进行对比分析。在相同位置对每瓶红酒进行采样,采样位置为酒瓶顶部,方便采取垂直方向信号(见图1)。

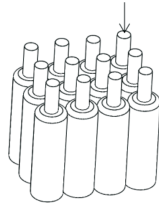


图1 加速度传感器固定位置

Figure 1 The fixed position of the acceleration sensor

红酒内包装结构:EPS作为内包装缓冲材料,上部分与下部分为两对称结构,为更好观察酒瓶及内包装分析结果,在结果显示中选择打开上部分进行展示;使用瓦楞纸板作为内包装,底部均有与隔衬瓦楞层数相同的瓦楞纸板作为底部保护放入纸箱内,后续分析中,将放入纸箱底部的瓦楞纸板与整个纸箱视为一个整体。为更好展示仿真结果,选择将纸箱打开,对其隔衬视图进行展示。进而对比不同材料作为内包装隔衬对红酒瓶垂直方向上的缓冲振动效果。

1.2 方法

对产品运输包装系统进行振动性能测试和损伤评估,目前常见的测试评估方法有两种:实地运输测试和实验室模拟测试^[14],前者通过按照实际运输情况,保证测试与实际运输情况相同来测试产品安全,后者通过采集实际运输过程中车辆的振动加速度信号,并将该信号在实验室振动台上进行复现,以此来对产品运输过程的模拟。在实际运输过程,车辆自身带有一定的减震效果,在实际运输途中的振动非正弦振动,而是随机振动,所以随机振动试验在缓冲包装设计中更具有现实意义。

在有限元分析中,材料参数^[15-17]如表1所示。其中3层瓦楞纸板与5层瓦楞纸板的面纸、芯纸、底纸取相同材料参数。

2 结果与分析

2.1 公式计算

内包装缓冲衬垫的减振效果主要取决于产品衬垫系

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/GPa
外纸箱	1.200	0.150	0.041
红酒瓶	2.530	0.243	90.300
面纸	1.040	0.340	7.600
芯纸	1.040	0.340	5.400
底纸	1.040	0.340	6.660
EPS	20.000	0.100	0.002

统的固有频率与易损零件系统的固有频率的比值,该比值通过包装件的两次共振放大系数(① 包装件不经过缓冲包装共振放大系数;② 包装件经过缓冲包装共振放大系数)所推导出来。

损件第1次共振时的放大系数如式(1)所示。

$$H_{max} = \frac{1}{2\xi_s} \tag{1}$$

式中:

H_{max} ——易损件第1次共振时的放大系数;

ξ_s ——易损件阻尼比。

损件第2次共振时的放大系数如式(2)所示。

$$H_z = \frac{1}{2\xi_s} \sqrt{\frac{1+4\xi^2\lambda^2}{(1-\lambda^2)^2+4\xi^2\lambda^2}} \tag{2}$$

式中:

H_z ——易损件第2次共振时的放大系数;

ξ_s ——易损件阻尼比;

ξ ——衬垫系统阻尼比;

λ ——衬垫系统的固有频率 f_n /易损零件系统的固有频率 f_{sn} 。

通过将式(1)与式(2)推导出缓冲衬垫要达到减振效果的条件如式(3)所示。

$$f_n < \frac{f_{sn}}{\sqrt{2}} = 0.707 f_{sn} \tag{3}$$

式中:

f_n ——衬垫系统固有频率,Hz;

f_{sn} ——易损零件系统的固有频率,Hz。

通过仿真得出各个系统的固有频率如图2所示。通过计算后得出只有5层瓦楞纸板[图2(d)]内包装系统满足式(3),说明只有5层瓦楞纸板适合作为内装物缓冲隔衬。又因式(3)多用于正弦加速度下,所以理论计算要与试验结果相结合。

2.2 振动试验分析

试验前对12瓶红酒进行标号如图3所示,方便后续

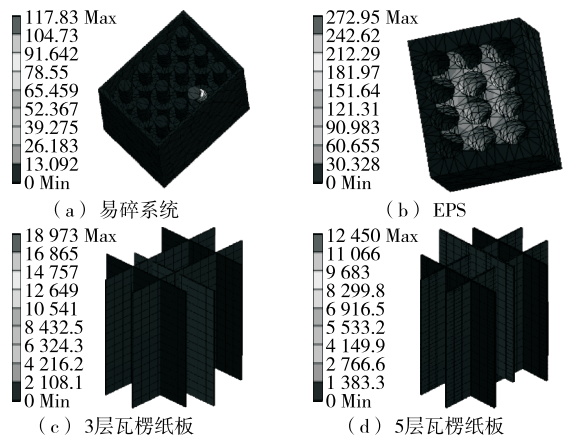


图2 仿真结果

Figure 2 Simulation results

试验进行说明。依次对 EPS 材料、3 层瓦楞纸板、5 层瓦楞纸板缓冲隔衬 3 种材料进行试验数据采集,并观察影响最大的垂直方向的时域与频域,对材料的减震效果进行随机试验分析。

对 EPS 材料减震效果进行分析,其中单独提出垂直方向的数据,转出时域图与频域图,结果如图 4 所示。

对 3 层瓦楞纸板减震效果进行分析,其中单独提出 z 轴方向的数据,转出时域图与频域图,结果如图 5 所示。

对 5 层瓦楞纸板减震效果进行分析,其中单独提出 z

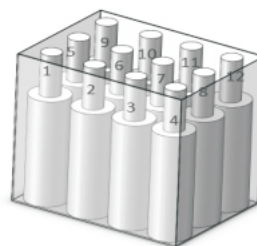


图 3 酒瓶顺序

Figure 3 Wine bottle sequence

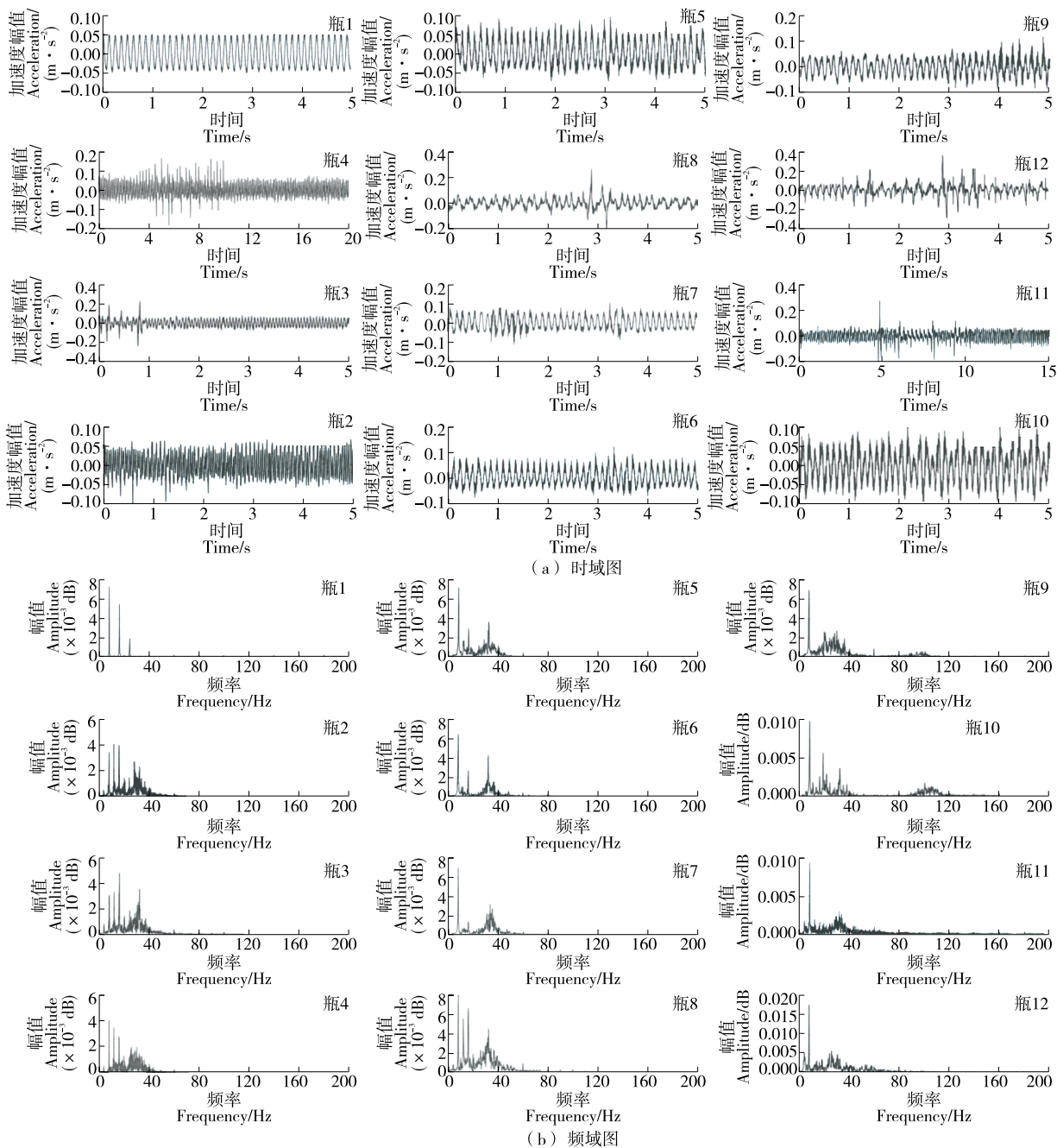


图 4 EPS 材料垂直方向时域与频域图

Figure 4 Time domain and frequency domain diagram of EPS material in the vertical direction

轴方向的数据,转出时域图与频域图,结果如图6所示。

通过 Matlab 软件对红酒瓶的采样数据进行处理,在频域中提出每一组振动幅值最大的频率,整合时域图后得出图7,通过对比不同加速度峰值分析不同缓冲材料的减振效果。

(1) 时域分析:由图5~图7可知,红酒瓶的加速度—时间图中正负半轴均有数值,呈非对称结构,说明红酒瓶在振动过程中会发生跳动情况。由图7(a)可知,

EPS材料的振动数值出现最大值0.35 Hz,为3种隔衬中最大的。3层和5层瓦楞纸板的最大值分别为0.25,0.20 Hz,其余数值均<0.10 Hz。

(2) 频域分析:加速度峰值越大,对酒瓶的损坏风险越大。由图7(b)~图7(d)可知,使用3层瓦楞纸板时幅值最大,振动频率常出现在频率的倍频处,表明随着振动幅度的不断加大,使用3层瓦楞纸板的酒瓶破损风险变大。使用EPS材料时,同样有最大值出现在频率的倍频

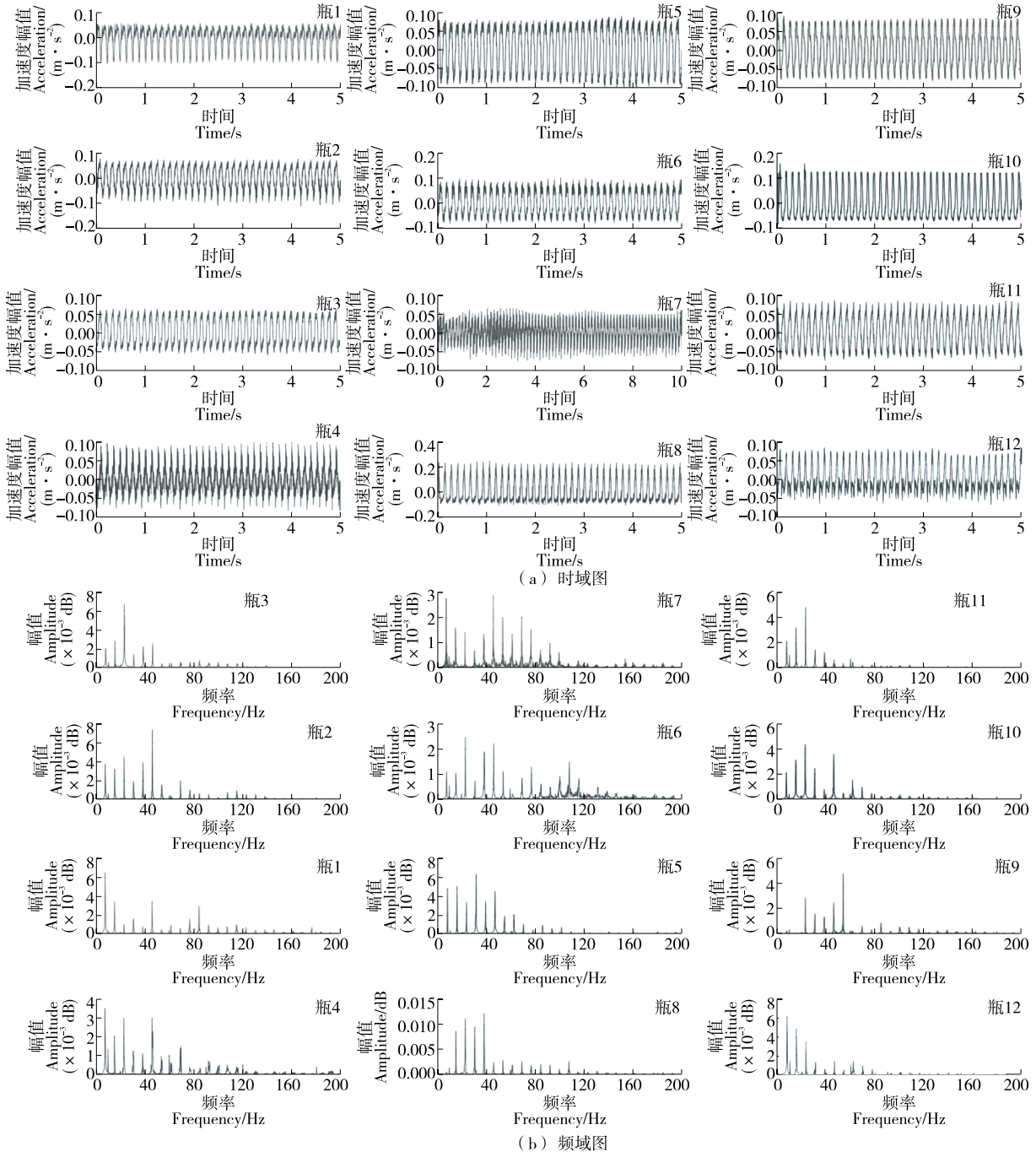


图5 3层瓦楞纸板垂直方向时域与频域图

Figure 5 Vertical time domain and frequency domain diagram of three-layer corrugated cardboard

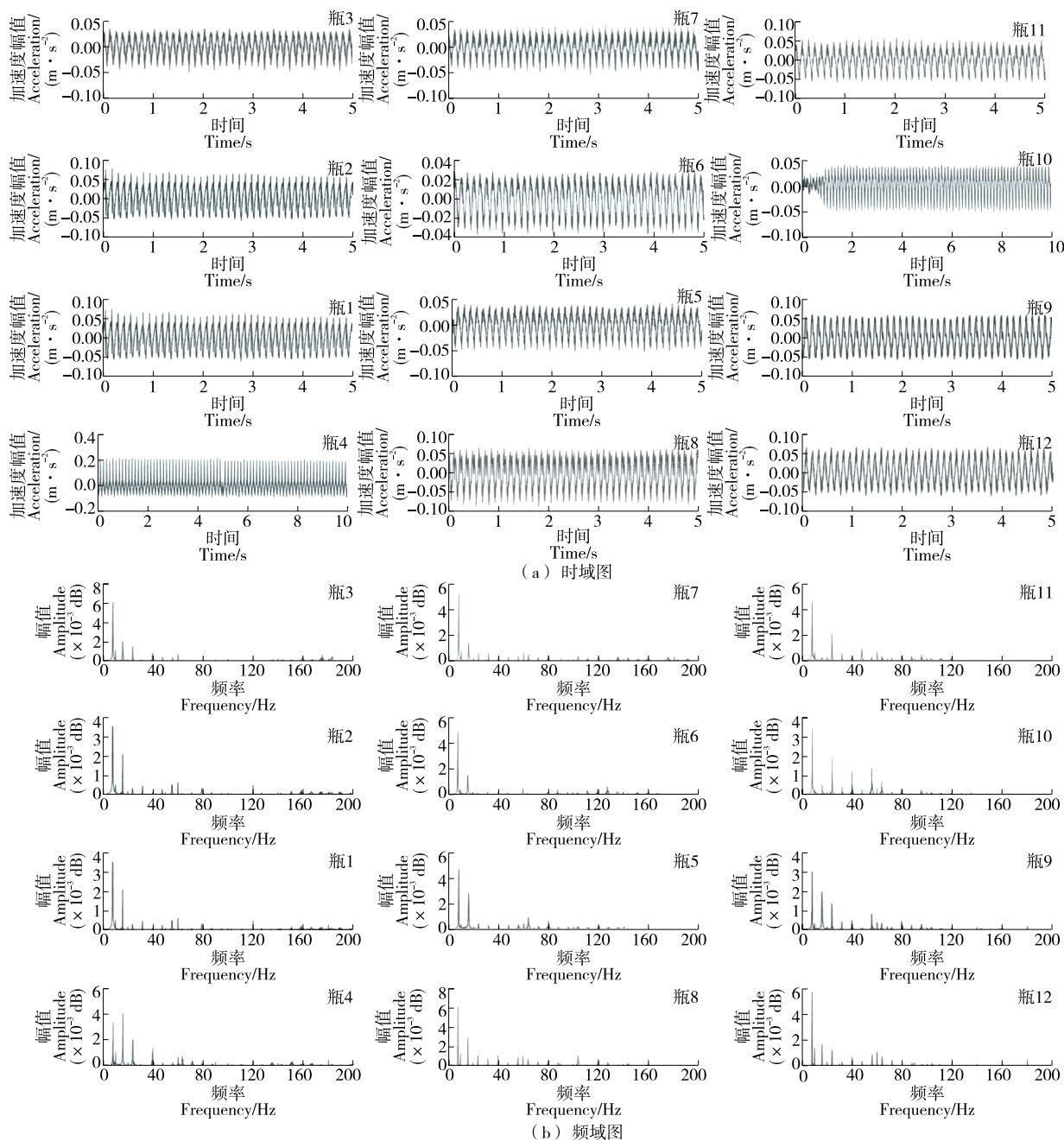


图 6 5 层瓦楞纸板垂直方向时域与频域图

Figure 6 Vertical time domain and frequency domain diagram of five-layer corrugated cardboard

处情况,酒瓶破损风险同样会变大。而使用 5 层瓦楞纸板时,不会出现随振动幅度增加而减振效果下降的情况,对于减少振动的效果相对前两种材料相对稳定。

根据厂家提供资料获得对应材料价格。又了解到内装物重量在同一范围内,包装件越大运输费用也越高。EPS 材料、瓦楞纸板两种材料对环境污染也不同。综上,得出如表 2 所示结论。

2.3 仿真分析

为实现与试验的相互验证,同时对 EPS 材料、3 层瓦

楞纸板与 5 层瓦楞纸板 3 种材料在红酒运输过程中出现的振动进行有限元仿真模拟。在 Solidworks 软件中建立三维实体模型,将其导入使用 Ansys Workbench 进行随机振动与力学仿真求解,观察随机振动仿真情况下 3 种缓冲隔衬对红酒瓶的减振效果。

(1) 材料属性设定:在有限元分析中,仿真对象材料参数按表 2 进行设置。定义酒瓶分别与 EPS 材料、3 层瓦楞纸板与 5 层瓦楞纸板底部为面接触。

(2) 网格划分:如图 8 所示,各单元数与节点数见表 3。

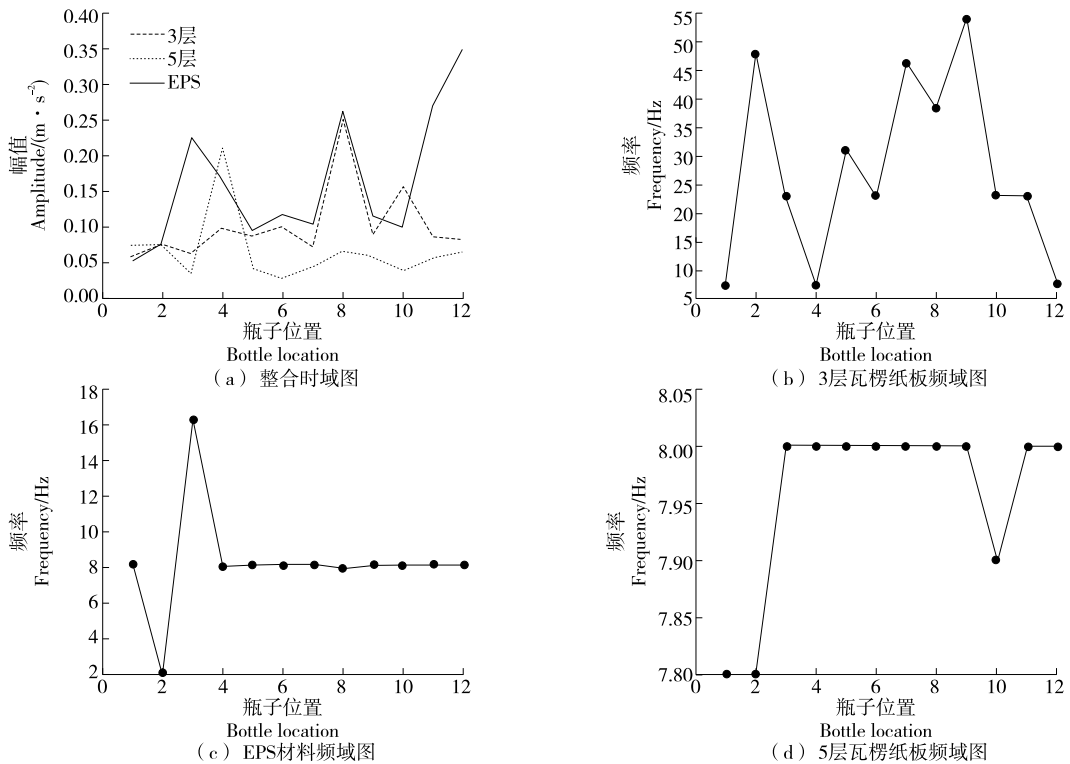


图 7 试验数据

Figure 7 Experimental data

(3) 载荷的施加:随机振动分为两个模块,首先对产品进行模态分析,确定模型前6阶固有频率。再根据此

频率下,将产品输入到随机模块中模拟振动。仿真结果如图 9 所示。

表 2 试验结论

Table 2 Experimental conclusion

项目	EPS	3层瓦楞纸板	5层瓦楞纸板
时域	出现振动幅值最高	出现振动幅值较高	出现振动幅值低
频域	出现振动幅值较高,对高频率后的振动吸收较弱	出现振动幅值最高,对高频率后的振动吸收弱	出现振动幅值中,对高频率后的振动吸收强
经济性	60元/m ² ,运输成本高	4.0~4.8元/m ² ,运输成本低	5.8~6.0元/m ² ,运输成本低
环保性	难降解材料,易造成白色污染	绿色环保材料	绿色环保材料

(4) 力学仿真:为观察整体内包装系统下红酒瓶的受力情况,选取其中单个酒瓶进行受力仿真,方便仿真计算得出结果,同时不影响红酒瓶与内包装缓冲隔衬间的受力情况。仿真结果如图 10 所示。

红酒放入整体包装系统中,通过随机振动仿真及力学仿真观察红酒瓶在垂直方向上的情况。由图9可知,

表 3 节点单元数

Table 3 Number of node units

材料	单元数	节点数
EPS	101 794	50 732
3层瓦楞纸箱	179 783	64 095
5层瓦楞纸箱	246 668	74 510

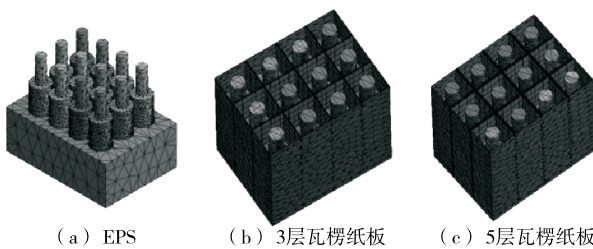


图 8 网格划分

Figure 8 Mesh division

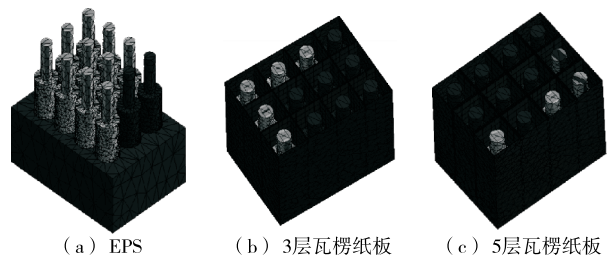


图 9 随机振动仿真结果

Figure 9 Random vibration simulation results

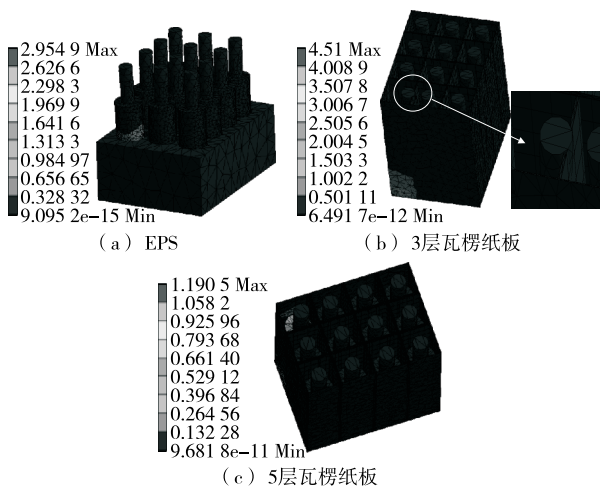


图 10 力学仿真结果

Figure 10 Mechanical simulation results

当加载条件相同时,使用 EPS,酒瓶会因振动产生更多的形变,有 10 个(80%)酒瓶在瓶身上有 $1\sigma(68\%)$ 的几率会出现形变。同样概率下,使用 3 层瓦楞纸板,有 5 个(41%)酒瓶在瓶身上会出现形变;使用 5 层瓦楞纸板,有 3 个(25%)酒瓶在瓶身上会出现形变。

由图 10 可知,当隔衬选择 3 层瓦楞纸板时,纸板出现压溃现象,应力数值出现最大,仿真分析解释了在随机试验中 3 层瓦楞纸板出现频率数值最高的现象,说明随机振动试验得出频谱数值高于其他两种材料的原因。EPS 材料虽未出现破损情况,但应力数值为 5 层瓦楞纸板的 1.4 倍。通过仿真分析结果对比,得出选取 5 层瓦楞纸板作为内包装缓冲隔衬最为合理。

仿真结果与试验振动频域图所得到的结果较吻合,能较好地反映产品包装件的振动特性。在对振动试验进行分析时,借助有限元分析能减少试验耗时,节约材料,同时也能为运输中的随机振动包装件分析与设计提供有效手段。

3 结论

研究了红酒运输中,使用 EPS、3 层瓦楞纸板和 5 层瓦楞纸板 3 种缓冲减振材料在理论计算中、随机振动试验中及仿真情况中出现的振动情况。结果表明,振动过程中,随着振动等级的增强,红酒的加速度响应发生变化。红酒所在纸箱内位置不同,导致其加速度响应不同,红酒在振动过程中存在垂直振动情况。由 3 种不同内包装隔衬下的时域图与频域图可知,使用 5 层瓦楞纸板作为内包装隔衬最合适。使用 5 层瓦楞纸板能较好地控制振动的产生,且其经济性与环保性出色,较符合绿色包装提倡的可持续发展观念。通过有限元仿真分析得出的结论与试验结论一致。有限元仿真得到的结论与试验结论较好吻合,表明该仿真准确,与随机振动试验相符,证明了将仿真用于随机振动分析的可行性。试验测试的道路距离较短,后续可以适当加长道路距离进行测试;还可以进

一步完善对模型及网格的设置,并对结果进行应变、加速度功率谱等分析。

参考文献

[1] 王秉. 基于 DEM 离散元技术的玉米直线振动筛仿真分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 89-92.
WANG B. Simulation analysis of corn linear vibrating screen based on DEM discrete element technology[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 89-92.

[2] 郑茜, 夏自龙, 袁海霞, 等. 高频阶梯式烟梗分选筛的设计与应用[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 124-127.
ZHENG Q, XIA Z L, YUAN H X, et al. Design and application of high-frequency stepped tobacco stem sorting screen[J]. Food & Machinery, 2019, 35(7): 124-127.

[3] 尚长沛, 张松泓. 基于 EMD 和 AR 模型的轴承故障诊断[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 117-120, 146.
SHANG C P, ZHANG S H. Bearing fault diagnosis based on EMD and AR model[J]. Food & Machinery, 2019, 35(7): 117-120, 146.

[4] 许文才, 向明. 连续冲击载荷对包装产品的影响[J]. 振动与冲击, 2001, 20(3): 26-28.
XU W C, XIANG M. Influence of bump load on packed products[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(3): 26-28.

[5] STUDMAN C J, GEYER M. Modelling the load distribution of stacked apples and other spherical objects [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(1): 65-72.

[6] KITTHAWEE U, PATHAVEERAT S, SRIRUNGRUANG T, et al. Mechanical bruising of young coconut[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(3): 211-219.

[7] 王志伟. 现代包装力学[J]. 包装工程, 2002, 23(1): 1-5.
WANG Z W. Modern packaging mechanics [J]. Packaging Engineering, 2002, 23(1): 1-5.

[8] 孙君, 王志伟. 啤酒瓶周转箱随机振动响应的实验研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(5): 37-49.
SUN J, WANG Z W. Experimental investigation of dynamic response of beer bottle-turnover boxes in random vibration [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(5): 37-49.

[9] 刘龙涛, 李传日, 程祺, 等. 某结构件的随机振动疲劳分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 97-101.
LIU L T, LI C R, CHENG Q, et al. Random vibration fatigue analysis for a structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(21): 97-101.

[10] ROUILLARD V, SEK M A. Monitoring and simulating non-stationary vibration for package optimization [J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(4): 149-156.

[11] ROUILLARD V, RICHMOND R A. Novel approach to analysing and simulating railcar shock and vibrations [J]. Packaging Technology and Science, 2007, 20(1): 17-26.

[12] ROUILLARD V. Generating road vibration test schedules from pavement profiles for packaging optimization [J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(8): 501-514.

(下转第 177 页)

- [21] 蒋丽婷, 李理. 豆腐乳质构与其成分相关性研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(8): 797-800, 854.
JIANG L T, LI L. The relation of chemical component to texture of White Sufu[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(8): 797-800, 854.
- [22] 殷俊, 梅灿辉, 陈斌, 等. 肉丸品质的质构与感官分析[J]. 现代食品科技, 2011, 27(1): 50-55.
YIN J, MEI C H, CHEN B, et al. Sensory evaluation and instrumental measurement of meatballs[J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(1): 50-55.
- [23] 孙啸, 尤金杰, 周颀, 等. 添加木质素的火腿肠品质特性分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 153-159.
SUN X, YOU J J, ZHOU D, et al. Analysis on quality characteristics of ham sausage with woody breast[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 153-159.
- [24] 徐晨, 诸永志, 葛庆丰, 等. 不同外源蛋白对小龙虾丸品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(4): 20-26.
XU C, ZHU Y Z, GE Q F, et al. Effect of exogenous proteins on the quality of crayfish balls[J]. Meat Research, 2020, 34(4): 20-26.
- [25] 赵子科, 曹文红, 何啸峰. 中国毛虾虾丸的研制[J]. 食品科技, 2013, 38(11): 142-152.
ZHAO Z K, CAO W H, HE X F. Development of the Shrimp Ball based on *Acetes chinensis*[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(11): 142-152.
- [26] 刘岩, 李翔宇, 李成会. 色氨酸营养研究进展[J]. 中国饲料, 2019(5): 50-53.
LIU Y, LI X Y, LI C H. The research of tryptophan nutrition[J]. China Feed, 2019(5): 50-53.
- [27] FAO/WHO/UNU. Energy and protein requirements, report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation, world health organization technical report series 724[R]. Geneva: WHO, 1985: 121-123.
- [28] 张泽生, 高山, 郭擎, 等. 棕榈油酸的研究现状及展望[J]. 中国食品添加剂, 2016(9): 198-202.
ZHANG Z S, GAO S, GUO Q, et al. Processing and comprehensive utilization of palmitoleic acid [J]. China Food Additives, 2016(9): 198-202.
- [29] DEMAN J M, FINLEY J W, HURST W J, et al. Principles of Food Chemistry[M]. [S.l.]: Springer, Cham, 2018.
- [30] KATSUMI K, EMI H, HIROMI K, et al. Taste-masking effects of various foods on crude drug products[J]. Japanese Journal of Food Chemistry and Safety, 2019, 26(1): 68-76.
-
- (上接第 109 页)
- [27] HE L, LAN W, AHMED S, et al. Electrospun polyvinyl alcohol film containing pomegranate peel extract and sodium dehydroacetate for use as food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100390.
- [28] KHALID S, YU L, FENG M, et al. Development and characterization of biodegradable antimicrobial packaging films based on polycaprolactone, starch and pomegranate rind hybrids[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 18: 71-79.
- [29] ZAHRA E D, AREZOO M, SEYED A, et al. Antimicrobial activity of pomegranate (*Punica granatum L.*) peel extract, physical, mechanical, barrier and antimicrobial properties of pomegranate peel extract-incorporated sodium caseinate film and application in packaging for ground beef[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(10): 869-881.
- [30] HANANI Z A N, YEE F C, NOR-KHAIZURA M A R. Effect of pomegranate (*Punica granatum L.*) peel powder on the antioxidant and antimicrobial properties of fish gelatin films as active packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 253-259.
- [31] 户帅锋, 谢庆超, 梁贤波, 等. 含石榴皮提取物的活性薄膜在猪肉保鲜中的应用研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 131-136.
LU S F, XIE Q C, LIANG X B, et al. Application of active film containing pomegranate peel extract in pork preservation[J]. Food & Machinery, 2016, 32(5): 131-136.
- [32] MELENDEZ P A, CAPRILES V A. Antibacterial properties of tropical plants from puerto rico [J]. Phytomedicine: International Journal of Phytotherapy and Phytopharmacology, 2006, 13(4): 272-276.
-
- (上接第 116 页)
- [13] ROUILLARD V, SEK M A. Creating transport vibration simulation profiles from vehicle and road characteristics [J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26: 82-95.
- [14] 高德, 吴朝武, 陆俊杰. 运输包装系统振动行为研究与发展趋势分析[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 51-58.
GAO D, WU C W, LU J J. Dynamic behavior research and dynamic development of transportation packaging system [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 51-58.
- [15] 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: 2-4.
WANG L J. Investigation on accelerated random vibration test of product transportation packaging system [D]. Guangzhou: Jinan University, 2019: 2-4.
- [16] 宋卫生, 薛阳, 边文慧, 等. 瓦楞纸板楞形参数对力学性能的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 147-151.
SONG W S, XUE Y, BIAN W H, et al. Influence of corrugated parameters of corrugated board on mechanical properties [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 147-151.
- [17] 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): 135-140.
SHI Y, ZHANG K, WANG F, et al. Design and dropping analysis of package lining for red wine with all corrugated board [J]. Packing Engineering, 2017, 38(9): 135-140.