

钢琴运输包装设计及其有限元仿真分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.04.008

董 静 李家成 余楚倩

哈尔滨商业大学

轻工学院

黑龙江 哈尔滨 150028

摘 要: 针对钢琴这种含有精密零件且质量较大的产品,选用力学性能优良的瓦楞纸板环保材料,设计一页折叠成型、卡扣连接的缓冲衬垫与运输箱,对钢琴起到缓冲防护作用的同时,还可以减少胶带的使用,便于开箱和循环再使用;将钢琴底座固定到EPE-木质缓冲托盘上,便于对钢琴进行叉车装卸。通过 ABAQUS 有限元软件对钢琴的运输包装进行叉取装卸时的冲击仿真分析,模拟计算包装件受到的最大应力和冲击加速度。结果表明,钢琴运输包装受到的最大应力为 8.7 MPa,发生在钢琴琴脚处,未超过琴脚材料的屈服应力,未发生破损;最大冲击加速度为 78 m/s^2 ,说明底部的 EPE-木质缓冲托盘吸收了大量的冲击能,对钢琴起到了很好的缓冲防护作用。由瓦楞纸板缓冲垫、瓦楞纸箱、EPE-木质缓冲托盘组成的钢琴运输包装不仅避免了钢琴在装卸搬运过程中的冲击损坏,而且符合环保、可持续发展的绿色运输包装设计趋势。

关键词: 钢琴; 运输包装; 一页成型; 叉取; 冲击; 仿真

中图分类号: TB484.9

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2022)04-0056-07

引文格式: 董 静,李家成,余楚倩.钢琴运输包装设计及其有限元仿真分析[J].包装学报,2022,14(4):56-62.

0 引言

钢琴内含有成千上万个精密零件,在运输过程中,极易受到外力冲击、震动载荷^[1-2]而发生损坏,因此对钢琴的包装防护提出了较高要求。目前,较为常见的钢琴运输包装为里层采用毛毯或棉白纸、气泡膜、聚乙烯(polyethylene, PE)膜或发泡聚乙烯(expanded polyethylene, EPE)等缠绕钢琴以及琴腿部分,外层套上瓦楞纸箱,最后把钢琴固定在托盘上。为了有效保护钢琴在运输过程中不受损坏,在包装过程中通常使用大量的拉伸缠绕膜、气泡膜等不可降解塑料,势必给环境带来极大的压力。减少材料浪费、

使用环保材料以及实现包装循环利用是目前运输包装需要解决的主要问题^[3-4]。

相对于传统试验而言,基于有限元软件对运输包装跌落、碰撞、起吊强度等进行模拟分析,具有省时、省材的优点,具备更广阔的发展优势。刘永辉等^[5]基于有限元分析了洗衣机跌落冲击响应,并对洗衣机的包装进行局部改进设计,使包装强度得到有效提升,满足了跌落试验要求。张云华等^[6]通过跌落冲击仿真对红外镜头缓冲包装方法进行了选择研究。王志伟等^[7-8]通过有限元结合试验的方法,分析了托盘运输单元冲击响应特性的影响规律。

本文以珠江钢琴 C1 为包装对象,采用力学性能

收稿日期:2022-03-20

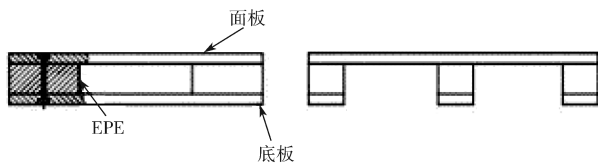
作者简介:董 静(1981-),女,广西桂林人,哈尔滨商业大学教授,主要研究方向为运输包装设计、生物可降解材料制备, E-mail: dongjing0320@163.com

优良的瓦楞纸板环保材料, 设计一页折叠成型、卡扣连接的缓冲衬垫及外包装箱, 并将钢琴底座固定到木质缓冲托盘上, 便于运输包装的开箱和钢琴的叉车装卸。利用 ABAQUS 有限元软件对钢琴的运输包装在叉取装卸时的冲击进行仿真分析, 验证包装的缓冲防护性能。

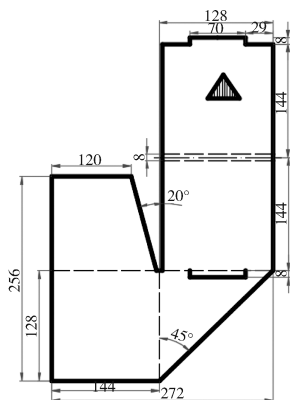
1 钢琴运输包装设计

本设计以珠江钢琴 C1 (外尺寸为 $1\,460\text{ mm} \times 592\text{ mm} \times 1\,174\text{ mm}$, 质量为 250 kg) 为对象, 进行运输包装设计。在运输过程中, 钢琴的质量较大, 需要叉车搬运, 所以本研究设计 EPE-木质缓冲托盘, 便于钢琴的叉车装卸, 且托盘可循环使用。EPE-木质缓冲托盘的面板和底板使用木材, 缓冲材料使用 EPE, 通过螺栓固定钢琴和托盘。在钢琴与外包装箱容易发生碰撞和摩擦的部位设有缓冲衬垫, 选用 BC 瓦楞纸板为材料; 外包装箱也采用 BC 瓦楞纸板, 既环保又具有良好的缓冲和抗压性能^[9]。钢琴各部位缓冲衬垫、外包装箱均采用一页折叠成型和卡扣设计, 避免胶带的使用, 同时衬垫和空箱储运时可平铺放置, 节约空间。

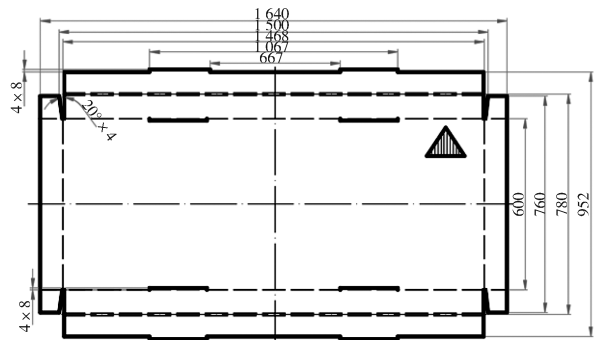
经尺寸计算后, 绘制钢琴运输包装各部分 (EPE-木质缓冲托盘、顶部角衬垫、底部衬垫、琴盖衬垫、外包装箱) 的结构图及整体效果图如图 1 所示。



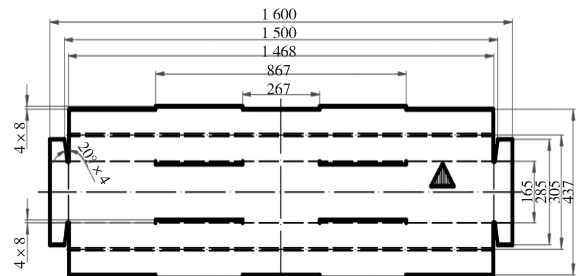
a) EPE-木质缓冲托盘结构图



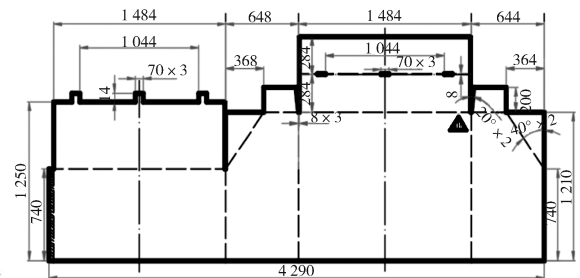
b) 顶部角衬垫结构图



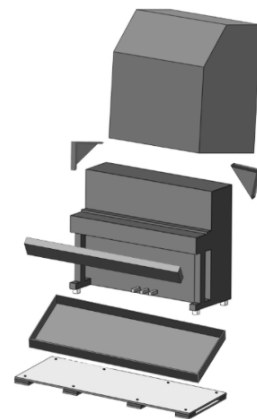
c) 底部衬垫结构图



d) 琴盖衬垫结构图



e) 外包装箱结构图



f) 钢琴运输包装整体效果图

图 1 钢琴运输包装件各组分结构图及整体效果图
Fig. 1 Structure diagram and overall diagram of each component of piano transport packaging

2 钢琴运输包装有限元仿真分析

2.1 有限元模型的建立及前处理

运用 SolidWorks 对珠江钢琴 C1、缓冲衬垫、外包装箱、缓冲托盘进行三维建模, 并进行适当的简化处理, 简化后模型如图 2 所示。将模型结构导出 IGS 格式, 导入到 ABAQUS 的 Part 中, 但对于一些孔、曲面等情况, 可能造成部分几何元素的丢失, 则可以通过执行 Tools → Geometry Edit 命令, 对几何体进行修复或在导入模型之前将模型的曲面、圆角等进行修改。将所有模型导入到 ABAQUS, 并对缺失元素修复完成后, 再建立一个刚体地面, 完成 Part 部分。

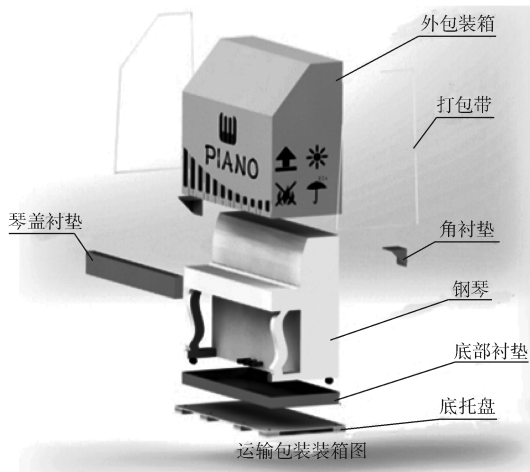


图 2 ABAQUS 简化模型图
Fig. 2 ABAQUS simplified model

对模型中各部件参数进行设置时, 由于钢琴外框材质主要为木材, 所以将钢琴外框的材料属性设为木材, 缓冲衬垫及外包装箱为 BC 型瓦楞纸板, 缓冲托盘底板和面板的材质为木板, EPE 材料为可挤压泡沫。瓦楞纸板和木板为各向异性材料, 设置时应定义材料方向。EPE 材料的应力 - 应变曲线如图 3 所示, 通过式 (1) 将实验数据转化为真实应变结果输入 ABAQUS。钢琴运输包装件模型中各组成部分的材料属性如表 1 所示^[10-13]。

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{\text{nom}}} \right), \quad (1)$$

式中: ε_{nom} 为名义应变; ε 为真实应变。

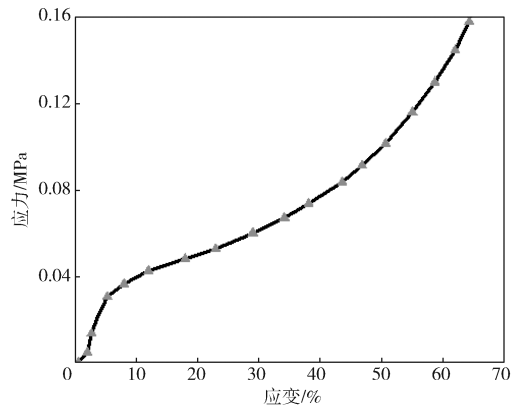


图 3 EPE 的应力 - 应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of EPE

表 1 钢琴运输包装件材料参数

Table 1 Material parameters of piano transport packaging

部 件	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比			弹性模量 /MPa			剪切模量 /MPa		
		μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
瓦楞纸板	126.5	0.500	0.010	0.010	1.7	5	0.85	1.13	0.14	0.03
木材	500.0	0.337	0.558	0.472	460.4	9171	831.60	44.48	521.70	666.70
EPE	22.0	0.010			1.0					
钢琴框架	300.0	0.337	0.558	0.472	460.4	9171	831.60	44.48	521.70	666.70
钢琴金属件	7 800.0	0.288			214 000.0					

网格划分的质量会直接影响到有限元分析的精度、收敛性和求解速度^[14]。为了加快运行速度, 增加运算精度, 对钢琴及运输包装使用六面体进行网格划分, 执行 Partition Cell: Define Cutting Plane 对模型进行分割, 再执行 Assign Mesh Controls → Hex → Medial axis 进行分割, 最后执行 Seed Edges 手动设置值进行网格划分, 得到模型网格如图 4 所示。定义各部件相互作用的摩擦系数为 0.3,

用 tie 约束模拟钢琴在托盘上的螺栓固定^[16]。

2.2 冲击仿真分析

钢琴在运输过程中受外力损坏通常发生在叉取装卸过程中与地面的碰撞冲击, 因此利用有限元模拟实际叉取过程的碰撞冲击响应, 以验证钢琴运输包装的缓冲防护性能。对叉车装卸包装件时的面冲击进行求解分析, 得到钢琴的应力云图如图 5 所示。

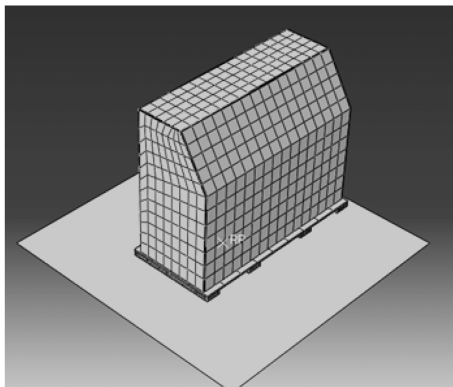
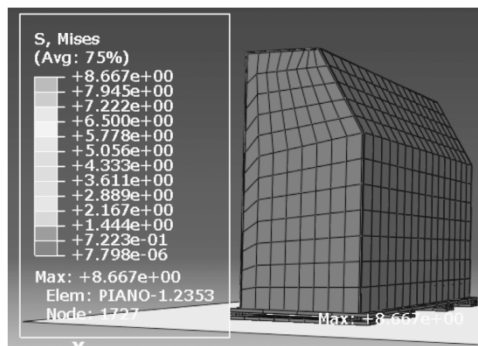
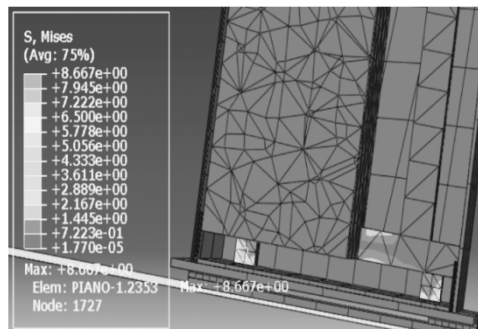


图 4 钢琴运输包装件的网格图

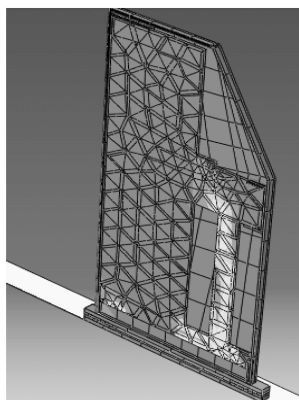
Fig. 4 Meshing of piano transport packaging



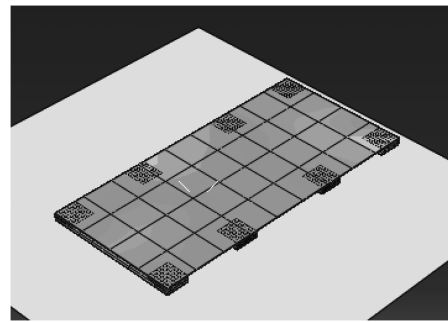
a) 包装件



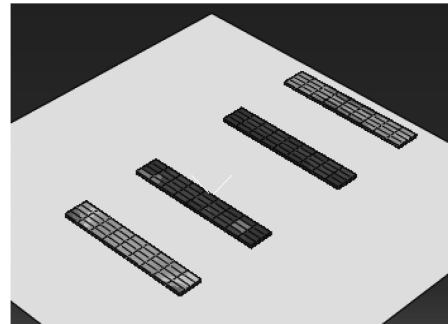
b) 琴脚



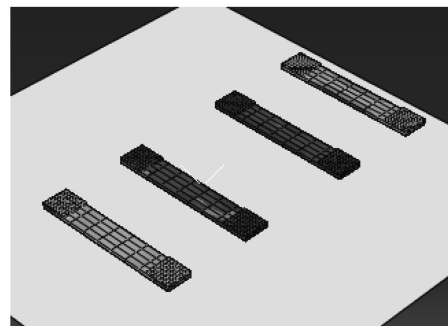
c) 琴腿



d) 托盘面板



e) 托盘底板



f) 托盘底板与 EPE 缓冲垫接触处

图 5 钢琴运输包装件各部位的冲击应力云图

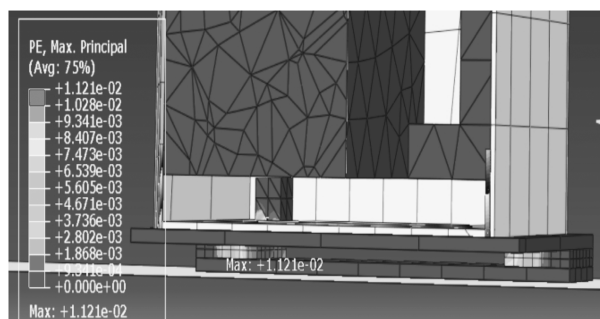
Fig. 5 Impact stress nephogram of each part of the piano transport packaging

由图 5a~b 可知, 最大应力约为 8.7 MPa, 集中在钢琴的琴脚处; 由图 5c 可知, 钢琴与地面发生碰撞时, 琴腿为曲面, 受力面积小, 外力冲击时易发生应力集中, 受力不均; 由图 5d~f 可知, 在冲击过程中缓冲托盘所受到的应力主要集中在与钢琴 4 个脚的接触位置上, 缓冲托盘两侧所受应力大于中间部位的, 钢琴的作用力主要分布在琴脚上。

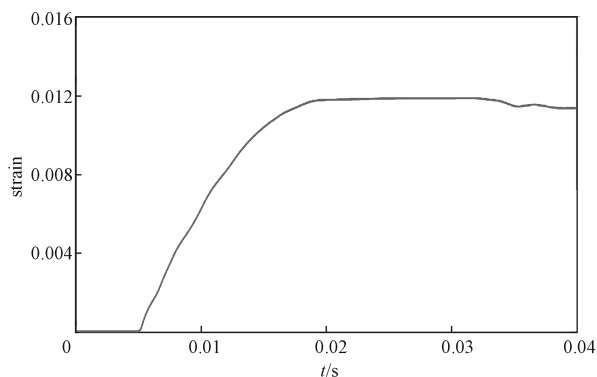
综合图 5 可知, 当钢琴与地面发生碰撞时, 应力主要分布在琴腿、琴脚、缓冲托盘的底板及面板上, 整个冲击过程中钢琴运输包装件所受到的最大应力约为 8.7 MPa, 位于钢琴的琴脚处。查阅相关资料可知, 木材所能承受的极限应力为 13 MPa, 由于本研究中

钢琴及其运输包装受到的应力均小于 13 MPa, 小于木材的屈服强度, 所以本研究设计的钢琴运输包装符合防护要求。

为了研究 EPE-木质缓冲托盘对钢琴缓冲防护的效果, 对撞击后的缓冲托盘进行塑性应变分析, 得到塑性应变变化曲线及分布云图如图 6 所示。



a) 塑性应变云图



b) EPE 塑性应变变化曲线

图 6 EPE-木质缓冲托盘塑性应变云图及塑性应变变化曲线

Fig. 6 Plastic strain nephogram and curve of EPE-wooden buffer tray

由图 6 可知, 对钢琴运输包装进行面冲击时, EPE-木质缓冲托盘的塑性应变主要分布在衬垫内侧, 应变随着时间的增加整体呈现先增大后保持稳定的趋势。图 6b 中在时间为 0~0.005 5 s 时塑性应变为 0, 此时对应跌落和弹性变形阶段; 在 0.005 5~0.017 0 s, 缓冲托盘塑性应变随时间增加而增大, 该阶段变形为不可逆变形; 0.017 0 s 时托盘塑性应变达到最大。初始碰撞使 EPE 缓冲垫产生了变形, 动能减少, 碰撞持续过程中, EPE 的变形将整个运输包装件所受冲击, 由动能逐渐转化为内能, 此时内能由弹性变形能和塑性耗散能组成^[15], 动能减少的同时内能增加; 弹性变形能上升到峰值后随着弹性变形的恢复而下降, 塑

性耗散能随着 EPE 的永久变形继续上升, 在 0.017 0 s 时塑性变形达到峰值。

由应力云图发现, 冲击应力主要集中在钢琴的琴脚和琴腿处, 因此在琴脚和琴腿处设置冲击加速度监测点, 经有限元分析得到冲击加速度曲线如图 7 所示。由图可知, 在 0.017 0 s 时作用在钢琴上的冲击加速度达到最大值 78 m/s^2 , 远小于钢琴的许用脆值 ($20g$)。在碰撞过程中, EPE-木质缓冲托盘对冲击能量的吸收性, 对钢琴起到了良好的缓冲作用, 避免了钢琴因冲击而发生损坏。

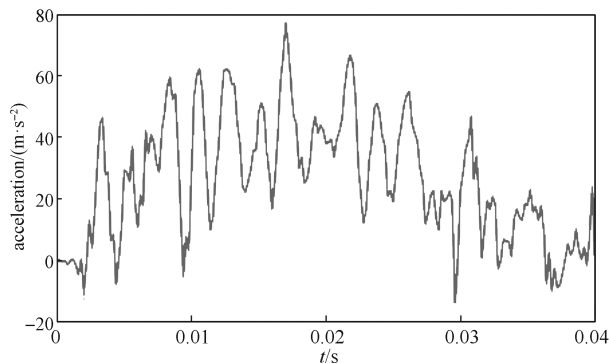


图 7 冲击加速度曲线

Fig. 7 Impact acceleration curve

3 结语

本研究以钢琴运输包装为研究对象, 结合了绿色包装理念, 设计一页折叠成型、卡扣连接的缓冲衬垫及运输箱, 在钢琴的顶部角、琴盖和底部辅以瓦楞纸板为材料的缓冲衬垫, 钢琴外部再套上带有卡扣的折叠运输箱, 并将钢琴固定在 EPE-木质缓冲托盘上。衬垫及运输箱均为一页折叠成型, 既具有良好的防护性能, 又方便成型及折叠运输。卡扣连接避免胶带的使用, 更为绿色环保。应用 ABAQUS 有限元分析软件对运输包装件进行有限元冲击分析, 结果表明包装件的最大应力约为 8.7 MPa, 未超过木板的极限应力 13 MPa; 最大冲击加速度为 78 m/s^2 , 远低于钢琴的许用脆值, 该运输包装设计符合钢琴的防护要求, 能保障钢琴的储运安全。仿真分析中充分考虑了瓦楞纸板和木材各向异性的材料属性, 网格划分采用六面体分割划分, 提高了分析精度, 但各部件之间的相互作用未做深入研究, 可能会产生部分计算误差, 在今后可进一步深入研究, 使有限元仿真分析逐步代替实验测试, 为运输包装设计

提供帮助。

参考文献:

- [1] 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 Wencai, XIANG Ming. Influence of Bump Load on Packed Products[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(3): 26-28.
- [2] WANG Z W, JIANG J H. Evaluation of Product Dropping Damage Based on Key Component[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(4): 227-238.
- [3] 李慧玲, 徐长妍, 蒋少华. 功能包装材料的发展现状与趋势[J]. 中国材料进展, 2019, 38(12): 1135-1144, 1134.
LI Huiling, XU Changyan, JIANG Shaohua. Development Status and Tendency of Functional Packaging Materials[J]. Materials China, 2019, 38(12): 1135-1144, 1134.
- [4] 卢富德, 高 德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3): 335-341.
LU Fude, GAO De. Study on Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3): 335-341.
- [5] 刘永辉, 张 银. 基于有限元分析的洗衣机跌落冲击仿真及改进设计[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 164-166.
LIU Yonghui, ZHANG Yin. Dropping Simulation and Design Improvement of a Washing Machine Based on FE Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 164-166.
- [6] 张云华, 李 珊, 刘冠玉, 等. 红外镜头跌落冲击仿真及缓冲包装方法选择研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 133-137, 143.
ZHANG Yunhua, LI Shan, LIU Guanyu, et al. Dropping Simulation and Selecting of Cushion Packaging Methods for a Infrared Lens[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24): 133-137, 143.
- [7] 王志伟, 刘远珍. 随机振动下包装件加速度响应的非高斯特征[J]. 振动与冲击, 2018, 37(17): 41-47.
WANG Zhiwei, LIU Yuanzhen. Non-Gaussian Features of Packages' Acceleration Responses Under Random Vibrations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(17): 41-47.
- [8] 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, 198.
WANG Zhiwei, 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, 198.
- [9] 白 婧. 瓦楞结构的轴向压溃响应研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
BAI Jing. Research on Axial Crushing Response of Corrugated Structure[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [10] İNCE F, TÜRKMEN H S, MECİTOĞLU Z, et al. A Numerical and Experimental Study on the Impact Behavior of Box Structures[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 1736-1741.
- [11] MÜLKOĞLU O, GÜLER M A, ACAR E, et al. Drop Test Simulation and Surrogate-Based Optimization of a Dishwasher Mechanical Structure and Its Packaging Module[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 55(4): 1517-1534.
- [12] 申 远. 胶合板与实木材料力学性能实验研究与仿真分析[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.
SHEN Yuan. Simulation Analysis and Experimental Study on Mechanical Properties of Plywood and Solid Wood Materials[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2019.
- [13] SCHULZE C, VOGEL D, SANDER M, et al. Calibration of Crushable Foam Plasticity Models for Synthetic Bone Material for Use in Finite Element Analysis of Acetabular Cup Deformation and Primary Stability[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2019, 22(1): 25-37.
- [14] 袁 骊, 王永亮, 徐俊杰. 二维自由振动的有限元线法自适应分析新进展[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 15-22.
YUAN Si, WANG Yongliang, XU Junjie. New Progress in Self-Adaptive Femol Analysis of 2D Free Vibration Problems[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 15-22.
- [15] MÜLKOĞLU O, GÜLER M A, ACAR E, et al.

Drop Test Simulation and Surrogate-Based Optimization of a Dishwasher Mechanical Structure and Its Packaging Module[J]. Structural and Multidisciplinary

Optimization, 2017, 55(4): 1517-1534.

(责任编辑: 李玉华)

Design of Piano Transportation Packaging and Finite Element Analysis

DONG Jing, LI Jiacheng, YU Chuqian

(College of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: For products of precision parts and big weight such as piano, by using corrugated cardboard environmental protection materials with excellent mechanical properties, one-page folding forming and buckle connection cushion and transport box was designed to provide buffering for the piano, while reduce the use of adhesive tape and facilitate unpacking and recycling. The base of the piano was fixed to the EPE-wooden buffer tray to facilitate forklift loading and unloading of the piano. ABAQUS finite element software was used to simulate and analyze the impacts on the piano transportation packaging during forklift picking and unloading, and the maximum stress and impact acceleration of the package were simulated. The results showed that the maximum stress was 8.7 MPa, sustained at the piano foot, but not exceeding the material yield stress, which caused no damage. The maximum impact acceleration was 78 m/s^2 , showing EPE-wooden cushion tray at the bottom absorbed a lot of impact energy, and played a good buffering protection role. The piano transportation packaging composed of corrugated cardboard cushion, corrugated box and EPE-wooden buffer tray not only avoided the impact damage of the piano in the process of loading, unloading and handling, but also conformed to the trend of environmental protection and sustainable development of green transportation packaging design.

Keywords: piano; transportation packaging; one-page folding forming; fork; impact; simulation