# 落地镜缓冲包装设计及仿真分析

# 郭新明<sup>a</sup>,陈喜春<sup>a\*</sup>,马仁玉<sup>b</sup>,宋清<sup>a</sup>

(兰州交通大学 a.交通运输学院 b.测绘与地理信息学院,兰州 730070)

摘要:目的 基于落地镜的物理特性和运输环境,采用 SolidWorks 软件建立包装件模型,设计一款满足 多款式落地镜使用的包装产品,并提供一种新的包装设计思路。方法 应用 Ansys Workbench 软件对模 型进行仿真,完成模态分析和随机振动仿真分析,应用 Ansys Workbench 内置的显示动力学插件进行包 装件的跌落仿真分析,检验设计的合理性和可行性。结果 对比分析结果可知,新包装件受到冲击时的 变形量远小于旧包装件的变形量,且分布均匀,落地镜受其影响而破损的概率极低。在跌落仿真中,旧 包装件中落地镜铝合金下边框受到的等效应力为 42.158 MPa,大于玻璃镜子的许用应力(28 MPa),导 致包装件中的落地镜破损;在新包装件中,铝合金下边框受到的应力小于 28 MPa,落地镜不会发生破 损。结论 文中设计的落地镜蜂窝纸板箱加聚乙烯泡沫的包装箱具有合理性,其防护性能不仅优于原包 装箱,且适用范围更广,证明该设计思路可行。

关键词: 落地镜; 包装设计; 保护性能; 仿真

中图分类号: TB482 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)03-0299-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.035

### **Design and Simulation Analysis of Floor Mirror Buffer Packaging**

GUO Xinming<sup>a</sup>, CHEN Xichun<sup>a\*</sup>, MA Renyu<sup>b</sup>, SONG Qing<sup>a</sup>

(a. School of Transportation, b. School of Surveying and Geographic Information, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish a packaging model through SolidWorks software based on the physical characteristics and transportation environment of floor mirrors, design a packaging product that meets the needs of multiple styles of floor mirrors, and provide a new packaging design concept. Ansys Workbench software was used to simulate the model, complete modal analysis and random vibration simulation analysis, and the built-in display dynamics plugin of Ansys Workbench was used to conduct drop simulation analysis of packaging components, to verify the rationality and feasibility of the design. The comparative analysis results showed that the deformation of the new packaging under impact was much smaller than that of the old packaging, and the distribution was uniform. The probability of the floor mirror being damaged due to its influence was extremely low. In the drop simulation, the equivalent stress on the aluminum alloy lower frame of the floor mirror in the old packaging was 42.158 MPa, which was greater than the allowable stress of the glass mirror of 28 MPa, which could cause damage to the floor mirror will not be damaged. In conclusion, the design of the floor mirror honeycomb cardboard box and polyethylene foam packaging box in this paper is reasonable. It not only has protective performance better than the original packaging box, but also has a wider scope of application, which proves that the design idea is feasible.

KEY WORDS: floor mirror; packaging design; protective performance; simulation

收稿日期: 2023-05-26

电子商务行业的发展促进了物流行业的发展,易 碎品的远程运输成为当下亟须解决的难题。易碎品运 输困难的主要原因来自运输过程中运载工具的振动 冲击和装卸搬运不当,导致产品跌落,造成了冲击损 坏,良好的缓冲包装设计可以较好地解决这个问题。 在易碎品运输过程中,落地镜具有代表性,文中基于 落地镜的物理特性和运输环境,设计一款满足多款式 落地镜使用的包装。

国内外学者对易碎品包装运输做了许多研究,其 中部分学者利用仿真软件对包装件进行多次仿真,通 过数据分析了跌落碰撞的损坏规律,对包装件及产品 结构进行了优化。其中,付秋莹<sup>[1]</sup>、王吉祥等<sup>[2]</sup>通过 Ansys Workbench 软件进行跌落仿真分析,得到了产 品跌落的受力数据,为产品包装设计提供了有效数 据,从而缩短了包装的设计周期;何湧等<sup>[3]</sup>、李燕华 等<sup>[4]</sup>、李彦等<sup>[5]</sup>利用有限元方法对物品进行跌落仿真, 研究了物品的跌落过程、碰撞次数,再结合物品跌落 碰撞过程中的应力分布特征,分析了规律,优化了物 品的包装结构,从而避免或减小了物品真实碰撞时的 损坏; Kun 等<sup>[6]</sup>、王志伟等<sup>[7]</sup>利用有限元分析方法, 结合显式动力学理论,进行了产品的应力分析和强度 校核。

还有部分学者采用新型包装材料替代原有的木制、钢制箱,采用纸质缓冲材料代替塑料泡沫缓冲材料。其中,岑蕾等<sup>[8]</sup>、董静等<sup>[9]</sup>采用纸浆模塑和蜂窝纸板代替 EPS 作为大型家电的缓冲包装,并以此为例进行了仿真模拟;徐洁等<sup>[10]</sup>基于经验类比方法和有限元方法,建立了纸浆模塑缓冲支架的六步设计方法;李琛等<sup>[11]</sup>采用瓦楞纸箱加聚氨酯缓冲垫,并利用Ls-Dyna 和 Ansys Workbench 进行跌落仿真。以上研究为文中研究落地镜实验和仿真建模提供了参考。

文中结合先前学者的包装设计方法及仿真思路, 设计一款符合通用落地镜的包装,在设计上做到结构 简单且满足多类型落地镜的运输防护要求。利用 Ls-Dyna 和 Ansys Workbench 对包装件进行模态分 析、随机振动仿真及跌落仿真,以此来验证包装设计 的合理性。

# 1 运输损坏分析

#### 1.1 运输损坏形式

在运输过程中,物品大多在运输环节和装卸搬运 环节被损坏。在运输环节,运载工具的启动、临时变 向、紧急制动及路面不平所引起的颠簸都会使物品受 到冲击,从而加剧物品损坏的风险。在装卸搬运环节, 因工作人员操作不当导致产品从高处跌落,物品受到 的瞬时冲击载荷过大,同样也会导致物品的损坏。考 虑到落地镜的流通环境,在设计包装箱时主要考虑以 下几种形式的损坏。

1)在运输过程中受到碰撞。落地镜在运输过程

中可能受到其他物品的碰撞,导致玻璃表面破损,或 是铝合金边框发生轻微形变。

2) 共振与随机振动。在运输过程中,低频振动 是造成包装件发生机械损伤的主要原因,在3 Hz 和 8~10 Hz 时会出现产品共振,此时包装件发生损坏的 概率最大<sup>[12]</sup>。其次,在汽车运输过程中,震荡或振动 也可能导致落地镜表面出现划痕或裂纹,尤其是在长 途运输或在不平坦的路面上<sup>[13]</sup>。

3)装卸搬运。落地镜为易碎物品,许用应力为 28 MPa, 脆值为 25g~40g。在装卸搬运时用力过猛, 或是在运输途中未得到适当的支撑,均会导致落地镜 从高处跌落。在跌落时,受到冲击载荷的作用,包装 箱会发生剧烈且短暂的弹塑性形变,从而影响内部的 落地镜。当落地镜受到的冲击超出其固有脆值或许用 应力时,落地镜就会发生破损。

# 1.2 解决方法

1)运输过程。为了降低落地镜在运输过程中因 受到碰撞发生损坏的概率,在设计落地镜的新包装 时,应在考虑运输轻便的同时兼顾其抗压性,所以将 包装箱设计为内外两层,外包装箱选用轻便且抗压性 强的材料。

2) 共振和随机振动。设计的新包装箱必须有效 避开 3 Hz 和 8~10 Hz 共振频率,以保证落地镜不被 损坏。在包装件的模态分析实验中,只有前 6 阶模态 的固有频率不在 3 Hz 和 8~10 Hz 附近时,落地镜才 不会因共振而发生破损。在模态分析的前提下设计随 机振动实验,验证包装件内部落地镜的变形量是否超 过其所能承受的范围。

3)装卸搬运。落地镜在装卸搬运时发生的跌落, 最常见情况为落地镜包装箱的侧边最先着地(受到的 瞬时冲击最大),其次是落地镜包装箱的两端着地(受 到的冲击相对较小),所以在设计新包装时应着重考 虑此因素,并加以保护。利用 Workbench 进行包装件 跌落仿真模拟,验证落地镜包装设计的可行性。

# 2 落地镜包装设计

### 2.1 落地镜参数

传统的落地镜整体由 1 块 1 500 mm×400 mm× 3 mm 的玻璃镜子(图 1a)和 1 块尺寸为 1 500 mm× 400 mm 的铝合金框架组合而成,总质量为 8 kg。

考虑到铝合金框架与镜子结合的复杂性,在用 SolidWorks构建模型时把铝合金框架分为2个部分。 其中一部分是铝合金框架边框,仅有边框,边框中间 为中空,长度为1500mm,宽度为10mm,厚度为 20mm,如图1b所示,边框的作用是固定玻璃镜子及保 护玻璃镜子免于磕碰。另一部分是长度为1500mm、宽 度为400mm、厚度为2mm的铝合金底面,如图1c所示, 与玻璃镜子完全贴合。落地镜模型装配如图1d所示。



Fig.1 Assembly drawing of floor mirror parts and floor mirror model

# 2.2 落地镜旧包装参数及模型

落地镜常见的包装形式: 以楞数 34±3 个、瓦楞 系数 1.58 的 GB/T 6543—2008A 型瓦楞纸板为外包装 箱,配合木制框架固定,使其稳固,如图 2 所示。在 外包装箱与落地镜之间的缝隙处填充大量塑料泡沫 或其他可起到缓冲作用的填充物,这里的旧包装内部 填充物选取市面常见的聚乙烯泡沫。



图 2 旧包装箱模型 Fig.2 Model of old packaging box

# 2.3 外包装蜂窝纸箱设计

外包装采用广州荷力胜蜂窝制品有限公司生产的蜂窝纸板,其厚度为10mm,采用的蜂窝形状为正 六边形。考虑到蜂窝纸板不易弯曲折叠,因此不能设 计为瓦楞纸板样的一体化包装。将蜂窝纸板的外包装 箱设计为2个,一个是长度1540mm、宽度440mm、 高度60mm的五面体包装盒,如图3a所示;另一个 是长度1560mm、宽度460mm、高度70mm的包装 盖,如图3b所示。将落地镜和缓冲垫放进包装盒, 并加盖包装盖。包装盖与包装盒采用黏合方式或缠绕 绷带方式。

### 2.4 缓冲垫设计

在装卸搬运时,落地镜发生跌落最常见的情况为 落地镜包装箱的两端最先着地,受到的瞬时冲击最 大;其次是落地镜包装箱的侧边着地,受到的冲击相 对较小。将缓冲垫设计分 2 个部分,一部分为保护落 地镜两端的缓冲垫,如图 4a 所示(落地镜两端缓冲 垫 3D 模型),长度为 340 mm,宽度为 440 mm,高 度为 60 mm;另一部分为保护落地镜侧边的缓冲垫, 长度为 200 mm,宽度为 100 mm,高度为 60 mm,如 图 4b 所示(落地镜侧边缓冲垫 3D 模型)。材料选用 20 mm 的聚乙烯泡沫,该材料具有质地柔软、抗冲击 性强及耐磨损优良等特性。落地镜缓冲垫和落地镜装 配如图 4c 所示,有效缓冲面积大于 2 454.54 cm<sup>2</sup>。



a 蜂窝纸箱底

图 3 蜂窝纸箱底及蜂窝纸箱盖模型 Fig.3 Model of honeycomb cardboard box bottom and cover

b 蜂窝纸箱盖



图 4 落地镜缓冲垫及缓冲垫与 落地镜镜子装配 Fig.4 Floor mirror cushion and assembly of cushion and floor mirror

# 2.5 新旧包装对比

1)外包装。蜂窝纸板由柔韧性极高的纸芯和面 纸共同组成,与旧包装箱中使用的 A 型瓦楞纸板相 比,其韧性和回弹性优异,特殊的蜂窝夹芯结构使其 具有良好的缓冲性能,以及更强的抗冲击能力,且质 量轻、使用材料少、制造成本低、表面光滑平整、不 易发生形变,从而避免使用木制框架进行二次固定防 护,降低了成本,简化了落地镜包装作业的流程。蜂 窝纸板由可循环纸质材料制成,使用后可实现二次回 收再利用。

2)缓冲垫。新包装的缓冲垫采用局部缓冲方法, 着重对落地镜的两端及易破碎的2个侧边进行防护, 与落地镜的契合度高,缓冲防护效果更好。与旧包装 相比,节约了商家的包装成本。

# 3 模态分析

# 3.1 模型参数导入

将 SolidWorks 软件建立的落地镜蜂窝纸板箱模型、旧包装模型文件(2种模型均为落地镜和包装箱装配好的模型)保存为".x.t"格式,并导入 Workbench。

在 Ansys Workbench 材料库中无落地镜及包装 箱的部分材料类型,需要重新建立自定义材料。自 定义材料属性根据仿真需求,主要包括材料的弹性 模量、泊松比、密度。根据 Ansys Workbench 分析 的要求进行计算或仿真分析时需要材料的弹性模 量,其中蜂窝纸板和 A 型瓦楞纸板为非线性材料, 但是在静态分析时可将其看作线性材料,所以在导 入 Ansys Workbench 材料库前,通过简单的计算将 它们简化为线性材料,取平均弹性模量,然后再进 行仿真计算<sup>[14-15]</sup>。通过实验及查询相关资料得到了 其他所需材料的属性,见表 1。在进行动力学测试仿 真时,A 型瓦楞纸板及蜂窝纸板为非线性材料,需 要考虑其各向异性,通过查阅文献资料将材料的参 数列于表 2~3<sup>[16-17]</sup>。

表 1	各部件材料属性	
Tab.1 Material	properties of each	component

部件名称	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比
玻璃镜子	2 500	55	0.33
蜂窝纸板	40	0.22	0.3
聚乙烯泡沫	37	0.17	0.4
铝合金	2 700	70	0.3
木板	600	0.46	0.337
A 型瓦楞纸板	80	0.64	0.15

表 2 A 型瓦楞纸板参数 Tab.2 Parameters of A-type corrugated cardboard

方向	弹性 模量/MPa	泊松系数	剪切 模量/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
纵向	375.5	0.35	305.7	
横向	554.2	0.17	39.6	80
弦向	9.36	0.17	25.8	

表 3 蜂窝纸板纸板参数 Tab.3 Honeycomb cardboard parameters

方向	弹性 模量/MPa	泊松系数	剪切 模量/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
纵向	572.5	0.38	401.5	
横向	642.1	0.327	49.6	40
弦向	12.8	0.33	541.2	

### 3.2 接触设置

考虑到落地镜在物流运输过程中的实际情况,将 所有接触位置设置为 Bonded,将接触界面焊接在一 起,既不能分离也不能滑动。

## 3.3 模型网格划分

使用 Workbench 提供的网格划分工具 Meshing 划 分网格。经多次网格划分后,将单元尺寸设置为 2 cm 较合适。蜂窝纸板箱网格的划分如图 5a 所示,生成 网格后有 88 358 个节点、36 255 个单元。旧包装箱 网格的划分如图 5b 所示,生成网格后有 129 188 个 节点、36 340 个单元。





### 3.4 模态分析结果

在物流运输过程中, 落地镜为侧立放置, 设置边 界约束条件为侧边底面固定, 模态分析求解结果为前 20 阶模态的固有频率, 取前 6 阶模态固有频率, 见 表 4。考虑到落地镜在实际运输过程中多采用公路运 输, 公路运输过程中的主要共振频率有 2 个, 分别为 3 Hz 和 8~10 Hz, 均低于 2 种包装件的前 6 阶模态的 固有频率, 故 3 种包装件均不会发生共振现象, 落地 镜不会因共振而发生破损。

表 4 包装件的前 6 阶模态固有频率 Tab.4 Natural frequencies of the first 6 modes of packaging

	频率/	Hz
模态	蜂窝纸板箱模态	旧包装箱模态
	分析求解结果	分析求解结果
1 阶	36.873	46.311
2 阶	56.859	63.384
3 阶	86.48	94.911
4 阶	126.29	132
5 阶	156.53	179.06
6 阶	168.96	194.3

# 4 随机振动模拟与分析

#### 4.1 随机振动模拟

在上述模态分析结果的基础上,利用 Workbench 模块中的 random vibration 模块,对蜂窝纸箱包装件、 旧包装箱包装件进行随机振动分析。随机振动需要添 加功率谱密度,在运输过程中振动方向主要为重力方 向,故加入基于重力加速度的功率谱密度。随机振动 仿真结果如图 6 所示。

## 4.2 蜂窝纸箱随机振动结果分析

由图 6a 可知, x 轴的最大变形量为 1.896 8 μm, 集中分布在蜂窝纸板包装箱的蜂窝纸板及聚乙烯缓冲 垫上。由图 6b 可知, y 轴的最大变形量为 15.682 μm, 主要分布在蜂窝纸板箱两端偏上位置,以及蜂窝纸板 箱中部偏上位置。由图 6c 可知, z 轴的最大变形量为 1.311 7 μm, 主要分布在蜂窝纸板箱距离支撑面较远 的一边。

在公路运输过程中,由于重力的影响,其振动所 产生的位移及形变在上下方向上最大,在前后方向上 略小,在左右方向上最小,因此仿真分析得到的变形 量分布规律与实际情况相符。采用的聚乙烯泡沫缓冲 衬垫的回弹性能优异,在运输过程中可将受到的振动 能量转化为弹性形变能量,使直接作用于玻璃镜子的 振动冲击能量减小,起到了缓冲作用,且在缓冲过程



图 6 蜂窝纸板箱随机振动结果分析 Fig.6 Analysis of random vibration results of honeycomb carton

中,缓冲垫消耗吸收掉部分冲击能量,降低了运输过 程中因振动冲击导致玻璃镜子破损的风险。再观察 3 个方向上蜂窝纸板箱包装件各部分的形变及分布情 况发现,3个方向上的最大变形量均较小,且均在安 全范围内,应力分布较均匀,避免了应力集中现象, 因此落地镜因应力集中而发生破损的概率极小。

# 4.3 旧包装箱随机振动结果分析

采用旧包装箱运输, 在 x 轴方向的最大变形量为 6.774 3 μm, 如图 7a 所示; 在 y 轴方向的最大变形量 为 80.263 μm, 如图 7b 所示; 在 z 轴方向的最大变形 量为 6.131 7 μm, 如图 7c 所示。旧包装箱在 3 个方 向上的最大变形量均大于蜂窝纸板箱 3 个方向上的 最大变形量,且旧包装箱的最大形变均集中在远离支 撑面一边的木制边框上,内部缓冲垫及玻璃镜子均发 生了轻微形变。其中,在 y 轴方向上,玻璃镜子及其 周边缓冲垫发生的形变最大,为 64.27~73.452 μm, 在此种情况下不排除玻璃镜子损坏的可能性。

#### 4.4 新旧包装随机振动结果分析对比

由随机振动仿真测试结果可知,旧包装件在 *z* 轴上发生的变形量最大,且都集中发生在玻璃镜子 及周边缓垫上,所以不排除落地镜在运输过程中会 发生破损的可能性;新包装件的变形量远小于旧包 装的变形量,且分布均匀,落地镜受其影响而破损 的概率极低。







#### 跌落瞬态仿直 5

#### 5.1 前处理

网格划分和包装件的接触设置在模态分析章节 中已设置,此处不再叙述,唯一的区别是 A 型瓦楞纸 板及蜂窝纸板在进行缓冲测试时材料特性表现为非线 性,参数设置见表 1~2。利用 LS-DYNA 和 Ansys Workbench 进行跌落仿真。此次跌落仿真采用包装件侧 边着地的方式,地面由一块结构钢代替,假设它为受力 后形状、大小不变,且内部各点的相对位置不变的刚体, 将包装件与地面的连接方式设置为无摩擦。

#### 5.2 求解设置

模拟运输包装件在公路或铁路中的跌落,产品质 量小于 10 kg, 等效跌落高度为 800 mm。将产品看作 自由落体式跌落,即设置产品和缓冲衬垫的初速度为 3.96 m/s。设置分析时间为 0.003 s。

# 蜂窝纸板箱跌落仿真结果

在蜂窝纸板箱的跌落仿真过程中,外包装箱受到的 等效应力为 0.647 1 MPa (如图 8a 所示), 且变形量最大, 为 97.47 µm (如图 8b 所示), 说明外包装箱从高处跌落时 未发生破损。玻璃镜子受到的最大等效应力为14.373 MPa, 主要分布于玻璃镜子的四周(如图 8c 所示), 14.373 MPa 的等效应力小于玻璃镜子的许用应力(28 MPa),说明 玻璃镜子未发生破碎。在此次跌落仿真过程中,包装 件受到的最大等效应力为 25.861 MPa, 位于铝合金下



图 8 蜂窝纸板箱跌落仿真结果 Fig.8 Simulation results of honeycomb cardboard box drop 边框(如图 8d 所示)。由于镜子与铝合金下边框紧密贴合, 其铝合金下边框受到的应力可能会影响玻璃镜子的安全, 且 25.861 MPa 小于玻璃镜子的许用应力(28 MPa),所 以玻璃镜子不会因铝合金下边框受到的等效应力而发 生破碎。在包装件内部玻璃镜子的位置,使用加速度 探针对落地镜中玻璃镜子跌落仿真过程中的响应加 速度进行测量提取,提取结果如图 9 所示。在 1.05 ms 时,包装件顶部的加速度峰值达到 311.5 m/s<sup>2</sup>,玻璃 镜子的脆值为 5g~40g,此时玻璃镜子较抗冲击,不 容易破裂。

#### 5.4 旧包装箱跌落仿真结果

在旧包装箱的跌落仿真过程中,外包装箱受到的 等效应力为 0.086 MPa (如图 10a 所示),且变形量 最大,为 142.68 µm (如图 10b 所示),说明旧包箱 从高处跌落时未发生破损。玻璃镜子正面部位的等效应力最大,为23.425 MPa (如图 10c 所示),小于 玻璃镜子的许用应力 (28 MPa),证明镜子不会发生 破碎。在旧包装的跌落仿真过程中,最大等效应力 为42.158 MPa,位于与玻璃镜紧密贴合的铝合金下 边框 (如图 10d 所示)。由于镜子与铝合金框紧密贴 合,其铝合金边框受到的应力可能会影响玻璃镜子的 安全,其等效应力为42.158 MPa,大于玻璃镜子的许 用应力,所以在铝合金边框的影响下玻璃镜子可能发 生破碎。在包装件内部玻璃镜子位置,使用加速度探 针对落地镜中玻璃镜子跌落仿真过程中的响应加速 度进行测量提取,提取结果如图 11 所示。在 1.05 ms 时,包装件顶部的加速度峰值达到 404.7 m/s<sup>2</sup>,大于 玻璃镜子的脆值 (40g),此时玻璃镜子相对较脆弱, 容易发生破裂。



图 9 蜂窝纸板箱--玻璃镜子响应加速度折线图 Fig.9 Diagram of honeycomb cardboard box-glass mirror response acceleration line



图 10 旧包装箱跌落仿真结果 Fig.10 Simulation results of old packaging box falling



图 11 旧包装箱-玻璃镜子响应加速度折线图 Fig.11 Diagram of old packaging box-glass mirror response acceleration line

# 5.5 新旧包装仿真结果对比

结果表明,不论是旧包装箱还是蜂窝纸板箱,都 能很好地保护落地镜的安全。旧包装箱相对于蜂窝纸 板箱,其外包装箱受到的等效应力是蜂窝纸板外包装 箱的 1.5 倍,其最大变形量远远大于蜂窝纸板箱的最 大变形量,旧包装箱内部镜子受到的等效应力大于蜂 窝纸板箱内部镜子受到的等效应力,且旧包装内部的 铝合金边框受到的最大等效应力为 42.158 MPa,可能 导致玻璃镜子破碎。通过对比包装件跌落仿真中玻璃 镜子的加速度及脆值可知,蜂窝纸板箱中的玻璃镜子 破损的可能性更小。综上可知,蜂窝纸板箱各部位的 防护能力均大于旧包装箱。

# 6 结论

结合落地镜的特性及运输要求,设计了一款适用 于落地镜的新包装——蜂窝纸板箱包装。利用 SolidWorks 对蜂窝纸板件、旧包装件进行三维建模, 并利用 Ansys Workbench 对新旧包装件模型进行模态 分析、随机振动、跌落仿真。

 1)模态分析结果表明,新旧包装件的前6阶模态的固有频率均高于公路运输共振频率,表明新旧 包装箱在运输过程中均不会因共振导致落地镜发生 破损。

2)随机振动仿真测试结果表明,旧包装中落地镜的变形量更大,且都集中发生在玻璃镜子及周边缓垫上。新包装箱的变形量远小于旧包装的变形量,且 所受应力分布均匀。

3)跌落仿真的结果表明,在旧包装箱中落地镜的 铝合金下边框所受应力过大,导致包装件中落地镜破损 的风险增大。新包装箱中的落地镜无破损风险。对比2 种包装件跌落仿真中玻璃镜子的加速度和脆值可知,蜂 窝纸板箱对落地镜的防护效果更好。对比新旧包装件的 仿真结果可知,旧包装件中落地镜存在多个损坏风险, 而新包装件中落地镜则无此类风险,说明落地镜蜂窝 纸板箱加聚乙烯泡沫的新包装设计合理。 在包装的开发设计中,通过三维建模,并利用 Ansys Workbench 进行模拟仿真,可以获得有价值的 数据,避免在实际试验中发生产品损伤和破坏,同时 缩短了设计周期,降低了研发成本。文中提供了一种 思路,即使用碰撞仿真分析来指导易碎品的包装设 计,为实际应用提供了有意义的参考。

#### 参考文献:

- 付秋莹. 基于 ANSYS Workbench 对玻璃杯包装的跌 落分析[J]. 上海包装, 2018(6): 14-16.
   FU Q Y. Drop Analysis of Glass Packaging Based on ANSYS Workbench[J]. Shanghai Packaging, 2018(6): 14-16.
- [2] 王吉祥, 王家胜. 基于 ANSYS 的 258 mL 小容量啤酒 瓶跌落仿真应力分析 [J]. 农业工程, 2021, 11(5): 117-120.
  WANG J X, WANG J S. Stress Analysis of Drop Simulation of 258 mL Small Beer Bottle Based on ANSYS[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(5): 117-120.
- [3] 何湧,刘莉滋,苏丽旭. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的镁 合金材料某无人机滑橇式起落架的跌落分析[J]. 南方 农机, 2023, 54(8): 46-49.
  HE Y, LIU L Z, SU L X. Drop Analysis of Skid Landing Gear of a UAV Made of Magnesium Alloy Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 46-49.
- [4] 李燕华,郑永发,黎珍,等. 智能物流环境监测仪包装设计及跌落仿真[J]. 环境技术, 2022, 40(5): 188-194.
  LI Y H, ZHENG Y F, LI Z, et al. Packaging Design and Drop Simulation of Intelligent Logistics Environmental Monitor[J]. Environmental Technology, 2022, 40(5):
- [5] 李彦, 王学军, 何文杰. 手机跌落碰撞瞬态动力学分

188-194.

析[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(2): 157-160. LI Y, WANG X J, HE W J. Transient Dynamic Analysis of Mobile Phone Drop Collision[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(2): 157-160.

- [6] KUN G, XI W. Design and Analysis of Cushioning Packaging for Home Appliances[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 904-909.
- [7] 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,40(16):124-131.
  WANG ZW, WU L. Experimental and Finite Element Analysis of Impact Response of Pallet Transportation Packaging Units[J]. Vibration and Impact, 2021, 40(16): 124-131.
- [8] 岑蕾,潘晓芬,颜伟航. 空调室外机纸质缓冲包装设 计及其仿真研究[C]// 2020 年中国家用电器技术大会 论文集,2020: 636-641.

CEN L, PAN X F, YAN W H. Design and Simulation of Paper Buffer Packaging for Air Conditioning Outdoor Unit[C]// Collected Papers of 2020 China Home Appliance Technology Conference, 2020: 636-641.

- [9] 董静,李家成,余楚倩. 钢琴运输包装设计及有限元 仿真分析[J]. 包装学报, 2022, 14(4): 56-62.
  DONG J, LI J C, YU C Q. Design of Piano Transportation Packaging and Finite Element Analysis[J]. Packaging Journal, 2022, 14(4): 56-62.
- [10] 徐洁,王玉龙,陆晓娟,等.基于蜂窝纸板的缓冲包 装设计方法研究[C]// 第十三届全国包装工程学术会 议论文集,2010:26-29.

XU J, WANG Y L, LU X J, et al. Design Methods of Buffer Packaging Based on Honeycomb Paperboard[C]// Collected Papers of the 13rd National Packaging Engineering Academic Conference, 2010: 26-29.

 [11] 李琛, 孙登辉, 徐涛. 平板玻璃运输包装设计及保护 性能分析[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 95-103.
 LI C, SUN D H, XU T. Design and Protective Performance of the Transport Packaging of Flat Glass[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 95-103.

- [12] 赵彬. 电焊机运输包装技术及试验的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 43-50.
  ZHAO B. Transport Packaging Technology and Test Research of Electric Welder[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [13] 朱大鹏, 薛如壮, 曹兴潇. 基于单自由度参数激励模型的车辆随机振动分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(2): 79-86.
  ZHU D P, XUE R Z, CAO X X. Vehicle Random Vibration Analysis Using a SDOF Parametric Excitation Model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(2): 79-86.
- [14] 孙德强, 石威, 李彬, 等. 基于 Ansys Workbench 的投影仪运输包装仿真分析[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 11-16.
  SUN D Q, SHI W, LI B, et al. Simulation Analysis of Projector Transport Packaging Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 11-16.
- [15] 欧阳洪, 刘新彬, 沈雷皓. 有限元分析的准确性验证及应用[J]. 科学技术创新, 2022(20): 181-184.
  OUYANG H, LIU X B, SHEN L H. Accuracy Verification and Application of Finite Element Analysis[J].
  Scientific and Technological Innovation, 2022(20): 181-184.
- [16] 孟超莹. 瓦楞形状对瓦楞纸板力学性能的影响分析
  [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 54-58.
  MENG C Y. Analyze the Influence of Corrugated Shape on Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [17] 杜赛娜. 蜂窝纸板阻尼特性及其能量传递模型研究
  [D]. 西安: 西安理工大学, 2021: 41-54.
  DU S N. Research on Damping Characteristics and Energy Transfer Model of Honeycomb Paperboard[D].
  Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.