平板玻璃运输包装设计及保护性能分析

李琛,孙登辉,徐涛

(东北林业大学 工程技术学院,哈尔滨 150040)

摘要:目的 采用瓦楞纸箱内衬聚氨酯泡沫衬垫设计平板玻璃运输包装,通过仿真分析检验设计的合 理性与可行性。方法 采用 Creo parametric 软件建立运输包装件模型,采用 Ansys Workbench 软件对 模型进行仿真分析,完成静态堆码载荷仿真、模态仿真、随机振动仿真,并利用 LS-DYNA 与 Ansys Workbench 进行联合模拟跌落仿真。结果 将瓦楞纸箱与木箱运输包装形式的仿真结果进行对比分析, 得出相同静应力作用下,瓦楞纸箱包装的最大响应应力最小且分布均匀;随机振动过程中,虽然瓦 楞纸箱相对于木箱形变量较大,但避免应力集中情况且满足变形限度要求;跌落过程中,瓦楞纸箱 相对于木箱传递到平板玻璃的作用力较小,且避免了应力集中现象。结论 综合分析结果,瓦楞纸箱 加聚氨酯缓冲衬垫的运输包装形式设计合理,能够在运输过程中更好保护平板玻璃的安全,设计方 案可行。

关键词:平板玻璃;运输包装;保护性能;仿真 中图分类号:TP487 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2020)13-0095-09 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.013

Design and Protective Performance of the Transport Packaging of Flat Glass

LI Chen, SUN Deng-hui, XU Tao

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to design the transport packaging of flat glass with the polyurethane foam pad of corrugated box and verify the rationality and feasibility of the design through simulation analysis. The model of transport package was built with Creo parametric software and analyzed with Ansys Workbench software to complete the static stacking load, modal and random vibration simulations. In addition, LS-DYNA and Ansys Workbench were jointly used to simulate the dropping. The simulation results of transport packaging forms of corrugated box and wooden box were compared and analyzed to obtain the result that the maximum response stress of corrugated box was the minimum and uniformly distributed under the same static stress. In the process of random vibration, although the deformation of corrugated box was larger than that of wooden box, it was required to avoid stress concentration and meet the requirements of deformation limit. During the dropping, the force of corrugated box was less than that of wooden box transmitted to flat glass and the stress concentration was avoided. The comprehensive analysis on the results shows that, the transport packaging form of corrugated box with polyurethane cushion is designed reasonably and can better protect the safety of flat glass during transportation. The proposed design solution is feasible.

KEY WORDS: flat glass; transport packaging; protective performance; simulation

收稿日期: 2019-10-22

· 95 ·

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572018BL07);东北林业大学2016年度专业建设项目 作者简介:李琛(1979—),女,东北林业大学副教授,主要研究方向为运输包装技术。

平板玻璃是许多成型品的基础材料,其抗冲击、 耐振动、耐热等性能较差。目前,平板玻璃的运输包 装形式包括木箱包装、钢木箱包装、裸装及钢架支撑 等。我国平板玻璃的运输包装形式比较落后,在运输 过程中破损率可达到 8%,且运输成本较高。研究开 发新型的平板玻璃运输包装,以提高保护性能降低破 损率,降低运输成本,显得十分必要^[1—4]。

分析平板玻璃的特性及其运输流通环境,选择合适的缓冲材料,设计衬垫结构,充分发挥其缓冲性能, 采用瓦楞纸箱作为外包装箱。设计缓冲衬垫——瓦楞 纸箱组合包装形式,并采用 Ansys 软件,仿真分析其 保护性能能否满足运输要求,达到降低破损率和运输 成本的要求。

1 平板玻璃运输包装设计

1.1 选择材料

单片平板玻璃尺寸为 600 mm×400 mm×5 mm, 设计以 20 片平板玻璃为一组,单片厚度为 5 mm,单 片质量为 3 kg,总质量约为 60 kg。选择缓冲材料密 度为 0.03 g/cm³ 的聚氨酯泡沫(PU),选择楞型为 C-A-A 型的高强度三瓦楞纸板作为瓦楞纸箱材料(日本 福冈三瓦楞容器株式会社生产"TRI-WALL PAK")^[5]。

1.2 基本参数

平板玻璃性能参数见表 1。

另外,运输方式主要采用公路运输和铁路运输, 公路运输主要共振频率有2个分别为3Hz和8~10 Hz,铁路运输主要共振频率为5~8Hz,应尽量避免 此频段。

估算等效跌落高度,见式(1),取等效跌落高度 为 38 cm。

$$h = \frac{300}{\sqrt{m}} = 37.5 \text{ cm}$$
 (1)

式中: *m* 为包装件质量(kg),估算玻璃加包装 箱总质量约 65 kg; *h* 为等效跌落高度(cm)。

参考中国机械标准化研究所推荐的产品脆值范围,见表2,选择脆值(G)为60g。

1.3 缓冲衬垫设计

设计 20 片平板玻璃为一件,为了简化衬垫结构, 缩小包装件体积,将 20 块玻璃分为 4 组,每组 5 片。

选择密度为 0.03 g/cm³ 的 PU 为缓冲材料,根据 缓冲系数(C)-最大应力(σ_m)曲线^[6],取 σ_m =0.07 MPa 时,所对应最小缓冲系数 C=3.3,计算底部缓冲衬垫 厚度见式(2),取沉淀厚度为 2 cm。

$$T = \frac{CH}{G} = 1.925 \text{ cm}$$
(2)

式中: *T* 为衬垫厚度 (cm); *C* 为缓冲系数; *H* 为跌落高度 (cm); *G* 为脆值 (g)。

底部缓冲衬垫面积为:

$$A = \frac{WG}{\sigma_{\rm m}} = 5040 \,\rm cm^2 \tag{3}$$

式中:*A* 为缓冲衬垫面积(cm²); *W* 为平板玻璃 的重量(N); σ_m 为最大应力(MPa)。

下底采用一体式的全面缓冲形式,衬垫总面积约 为 5040 cm²,底部衬垫结构见图 1a。侧边加入防护 衬垫,见图 1b。顶部衬垫分为上角和上边,上角衬 垫分为4个放置槽,每个槽内放置5片玻璃,每个槽 宽为25 mm,见图 1c,上边衬垫结构见图 1d。缓冲 衬垫整体组装效果,见图 1e。

1.4 瓦楞纸箱设计

根据玻璃及缓冲衬垫综合尺寸,设计瓦楞纸箱结构,采用 0201 型瓦楞纸箱,二页箱,根据内装产品的强度要求,选配箱板纸并计算瓦楞纸箱尺寸^[6-7]具体步骤此处省略,利用凯里卡特公式校核理论强度后,得到瓦楞纸箱结构,见图 2。

Tab.1 Performance parameters of flat glass					
参数名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	最大抗拉强/MPa	最大抗压强/MPa
数值	2 500	70	0.22	50	500

表 1 平板玻璃性能参数

퀸	₹2	产品	脆	值耳	又值:	范围		
Tab.2 T	he h	range	of	the	pro	duct	fragi	lity

脆值(g)	产品类型	
25~40	冰箱压缩机	
40~60	彩色电视机、显示器、鸡蛋	
60~90	黑白电视机、电冰箱	
90~120	陶瓷器皿、单放机、电动玩具	



Fig.1 Buffering cushion construction and assembly

纸箱侧边采用钢钉钉合,钢钉规格为 16 号 U 形 镀锌钢钉,宽度为 2.25 mm,厚度为 0.72 mm。钉的 个数为 40 个,采用双排钉的方式,每排 20 个,钉距 为 23 mm。采用冷轧中碳钢捆扎带,其抗拉强度约为 830 MPa,伸长率约 5%~8%^[8]。外包装箱整体效果见 图 3。



Fig.3 Overall effect diagram of outer packaging box

1.5 木箱结构结构

为了验证设计的合理性,分别建立瓦楞纸箱结构 和木箱结构2种运输包装模型,以便于在仿真分析中 进行对比。木箱包装结构见图4。



图 4 木箱包装结构 Fig.4 Structure of wooden box

2 静力学模拟与分析

静力学分析主要模拟运输和仓储过程中平板玻 璃包装箱的堆码情况。

2.1 参数设置

C-A-A 三瓦楞纸板材料参数见表 3。

PU 材料参数见表 4。聚氨酯材料为非线性材料, 故在 Ansys 仿真过程中加入应力-应变曲线关系。

表 3	C-A-A 三瓦楞纸板材料参数				
Tab.3 Ma	terial parameters of C-A-A triple				
corrugated board					

方向	弹性模 量/MPa	泊松 系数	剪切模量/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)
纵向	476.6	0.37	335.1	
横向	640.8	0.15	42.6	2.17
弦向	11.38	0.15	25.2	

表 4 PU 材料参数 Tab.4 Material parameters of PU

参数名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
数值	30	4.6	0.252

表 5 木箱材料参数 Tab.5 Material parameters of wooden box

方向	弹性模 量/MPa	泊松 系数	剪切模 量/MPa	密度/ (kg·m ⁻³)
纵向	9171	0.558	521.7	
横向	460.4	0.337	44.48	0.5
弦向	831.6	0.472	666.7	

2.2 瓦楞纸箱运输包装模型

静力学分析采用 Creo parametric 4.0 软件建立模型,文件保存为*.igs 格式,该文件格式可直接导入 Ansys Workbench 中进行仿真分析^[9]。在 Ansys Workbench 中导入的实体模型,采用默认单元为 10 节点的四面体单元和 20 节点的六面体单元类型。采 用 Automatic 网格划分方式,将模型划分为 268 577 个节点,59 873 个单元,外包装箱及内装物网格划分 效果,见图 5。

对模型施加载荷和约束,设计堆码层数为4层, 堆码载荷为上部 3 层包装件对底层包装件产生的压 力载荷,静压力值为:

$$P = \frac{F}{A} = 7582.72 \text{ Pa}$$
 (4)

式中:*P* 为静压力值(Pa);*F* 为上层产品重量(N);*A* 为受静压力面积(m²)。

施加约束为底部全自由度约束。采用 Ansys Workbench 软件自动建立接触对,玻璃与玻璃之间使 用 bonded 接触方式,平板玻璃与缓冲材料之间设置 为 frictional,摩擦因数为 0.2,缓冲材料与瓦楞纸箱 之间设置为 frictionless 接触方式^[10]。仿真结果主要为 应力分析和形变量分析,见图 6。



Fig.5 Mesh division effect of package

由图 6a 可知,最大变形量为 0.6138 mm 出现在 上接触面处。实际运输过程中,单个包装件在载荷作 用下的许用变形量是其高的 0.8%,即为 3.896 mm, 模拟得到的最大变形值小于许用变形量,符合运输 包装要求。图 6b 和图 6c 中,最大应力作用在缓 冲衬垫上,平板玻璃所受应力范围在 0.0178~0.089 MPa 之间,且应力分布较均匀,最大应力小于平板 玻璃的最大拉压强度,不会出现破损情况,故平板 玻璃安全。

2.3 木箱运输包装静力学分析

木箱运输包装的静力学仿真结果见图 7。由图 7a 可知,木箱在静应力作用下的最大变形量为 83 µm, 出现在木箱的梁上,对于平板玻璃影响较小。由图 7b 可知,平板玻璃所受到的最大应力值为 2.768 MPa, 主要集中在木箱的中间梁上,存在应力集中现象,此 处平板玻璃破损的可能性较高。

3 模态分析

模态分析主要寻找运输过程中包装件的共振频率,与公路和铁路运输的实际固有频率进行对比,检验是否出现共振现象。首先,在 Toolbox 选择 Modal,



图 6 瓦楞纸箱静力学仿真结果 Fig.6 Static simulation results of corrugated box

将包装件模型导入 Workbench 中,网格的划分方法与静力学分析过程一致,在此不再赘述。

3.1 瓦楞纸箱运输包装模态分析

设置边界条件为底部固定,模态分析求解结果为 每一阶模态的固有频率,前6阶模态固有频率情况, 见表6。实际运输过程中,公路运输主要共振频率有 2个,分别为3Hz和8~10Hz,铁路运输主要共振 频率为5~8Hz,均低于前6阶模态的固有频率,故 包装件不会发生共振现象。

3.2 木箱运输模态分析

木箱运输模态分析获得前6阶固有频率,见表7。 木箱运输的固有频率远大于实际运输中公路和铁路 的固有频率,故包装件不会发生共振现象。



图 7 木箱静力学仿真结果

Fig.7 Static simulation results of wooden box

表 6 瓦楞纸箱运输模态分析结果 Tab.6 Transport mode analysis results of corrugated box

模态	频率 /Hz
1	21.815
2	38.068
3	42.433
4	43.962
5	58.612
6	61.922

表 7 木箱运输模态分析结果

Tab.7	Transport	mode a	analysis	results	of	wooden	box
-------	-----------	--------	----------	---------	----	--------	-----

模态	频率/Hz	
1	376.91	
2	717.13	
3	1236	
4	1648.5	
5	2056.6	
6	2435.2	

4 随机振动模拟与分析

4.1 瓦楞纸箱运输随机振动分析

完成模态分析后,利用 Ansys 进行随机振动分析。随机振动需要添加功率谱密度,运输过程中的振

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,见表8。

获得瓦楞纸箱运输随机振动仿真结果见图 8。由 图 8 可以看出, z 方向的最大变形量为 98.539 μm,

表 8 重力加速度功率谱密度 Tab.8 Power spectral density of gravitational acceleration

频率/Hz	重力加速度(×10 ⁻⁵)/((m/s ²) ² ·Hz ⁻¹)
1	1
5	1
30	10
50	10
70	1
100	1



图 8 瓦楞纸箱运输随机振动仿真结果 Fig.8 Simulation results of random transportation vibration of corrugated box

出现在平板玻璃的侧边; x 方向的最大变形量为 30.961 µm,出现在底部的缓冲衬垫上; y 方向的最大 变形量为 93.703 µm,出现在底部的缓冲衬底上。在 实际运输过程中由于振动产生的位移上下方向最大, 前后方向次之,左右方向最小,因此,仿真得到的变 形量规律与实际情况一致。所采用的 PU 缓冲衬垫具 有优良的回弹性能,在运输过程中能够将外界的振动 能量转化为变形能,进而延长外力作用的时间,降低 传递到玻璃上的冲量,同时,消耗一部分冲击能量, 减小运输过程中的振动对玻璃产生损伤,因此,虽然 3 个方向的最大变形量较大,但均在安全范围内且应 力分布较均匀,避免应力集中现象。

4.2 木箱随机振动分析

木箱运输随机振动仿真结果见图 9。由图 9 可以



Fig.9 Simulation results of random transportation vibration of wooden box

看出,在随机振动情况下 z 方向最大变形量为 9.886 nm,出现在平板玻璃顶端;x 方向最大变形量为 7.365 nm,出现在平板玻璃中心;y 方向最大变形量为 1.6834 nm,出现在平板玻璃两侧。采用木箱运输,3 个方向的变形量均小于采用瓦楞纸箱+PU 衬垫的包 装方式,3 个方向的形变量均在安全范围内,但出现 明显的应力集中现象,因此,反而容易造成平板玻璃 破损。

5 动力学仿真分析

5.1 瓦楞纸箱运输跌落分析

5.1.1 载荷施加

跌落模型的主要载荷施加为:跌落的时间和地 面的位移约束,由于运算量较大,为了缩短求解时 间,分析中模型与地面的距离设置为1 mm。模拟 跌落高度为 38 cm 时平板玻璃受损情况,冲击速度 计算:

$$v = \sqrt{2gH} = 2.73 \text{ m/s}$$
 (5)

式中:v为冲击速度(m/s);H为跌落高度(m)。 5.1.2 求解设置

求解设置主要对求解的时间进行设置,取求解时间为 0.0005 s,足够模型跌落至地面。在求解结果中选取接触时的情况进行后处理^[11]。

5.1.3 后处理结果

瓦楞纸箱包装跌落分析的后处理结果为总体所 受的等效应力、玻璃所受最大应力、包装件底部接触 应力^[12—15],见图 10。

图 10a 中包装件跌落中最大等效应力为 47.939 kPa,出现在第2组玻璃边缘位置,其余部分应力值 较小。图 10b 中平板玻璃的最大压应力值为 43.6 kPa, 出现在第2组玻璃边缘处,最大应力值小于平板玻璃 的抗压强度,平板玻璃安全;平板玻璃的最小应力值 为-1.4862 kPa, 负数说明玻璃受拉力, 其拉力值小于 玻璃的抗拉强度,玻璃安全。图 10c 中底部接触应力 最大值为 270.69 kPa , 由于采用 PU 缓冲衬垫后 , 底 面跌落时在极短的碰撞时间内底面的四棱最先与碰 撞面发生接触 ,因此在底面四边特别是四角处产生的 应力相对较大;跌落碰撞发生后,在缓冲衬垫的保护 下,冲击力快速分布到整个底面,因此,从图 12c 可 以看到虽然底面四棱及四角出现了最大应力值,但底 面应力分布相对比较均匀 ,且最大应力低于玻璃的屈 服极限,通过缓冲材料传递到玻璃上的应力值更低, 平板玻璃不会受到损伤,在实际运输包装的设计过程 中应加强对边角处保护。



图 10 瓦楞纸箱包装跌落仿真 Fig.10 Drop simulation of corrugated box

5.2 木箱跌落分析

木箱包装跌落分析的后处理结果为总体所受的 等效应力、玻璃所受最大应力、包装件底部接触应力, 见图 11。

图 11a 中平板玻璃所受的最大等效应力值为 153.83 kPa,出现在平板玻璃的边角处。图 11b 中平 板玻璃的最大压应力值为 101.55 kPa,出现在平板玻 璃的边角处。最大拉应力值为 7.0818 kPa,出现位置 为另一侧边角,其最大拉压应力均小于平板玻璃允许 的应力值,平板玻璃没有出现破损。图 11c 中木箱底 部接触应力的最大值为 11.551 MPa,最大的接触应力 出现在木箱的下角处。木箱包装发生跌落时,木质材 料的回弹性相对于 PU 缓冲材料差很多,因此虽然应 力集中现象不突出,最大应力值也在玻璃的屈服极限 内,但其最大应力值为瓦楞纸箱+PU 衬垫包装形式的 43 倍,因此,保护性相对较差。



图 11 木箱包装跌落仿真分析 Fig.11 Drop simulation analysis of wooden box

6 结语

以平板玻璃为研究对象,设计聚氨酯泡沫组合瓦 楞纸箱的运输包装形式,应用 Creo parametric 软件建 立模型,应用 Ansys Workbench 与 LS-DYNA 软件进 行仿真分析。由仿真结果得到如下结论:所设计的瓦 楞纸箱运输包装静应力范围在 0.0178~0.089 MPa 之 间,满足平板玻璃的强度要求;在模态分析和随机振 动分析中,其共振频率为 21 Hz 以上,避开了公路和 铁路运输的共振频率;所设计的瓦楞纸箱运输包装相 比于木箱形式,发生跌落时玻璃所承受的应力减小, 且避免了应力集中现象,能够更好地保护平板玻璃运 输安全。

该设计使用瓦楞纸箱和聚氨酯泡沫衬垫材料绿 色环保、无毒无害、可回收利用,并节约森林资源。 在实际应用中,可以在此基础上增加或减少平板玻 璃数目调整缓冲衬垫的结构及瓦楞纸箱尺寸,操作 简单。

参考文献:

- 徐美君. 平板玻璃包装与物流功效[J]. 国外建材科 技, 2008, 29(4): 4—8.
 XU Mei-jun. Flat Glass Packing and Logistics Efficiency[J]. Foreign Building Materials Technology, 2008, 29(4): 4—8.
- [2] 谢军,朱留欣,黄静刚,等. 平板玻璃包装运输形式的探讨[J]. 河南建材, 2007, 22(4): 65—66.
 XIE Jun, ZHU Liu-xin, HUANG Jing-gang, et al. Discussion on Forms of Flat Glass Packaging and Transportation[J]. Henan Building Materials, 2007, 22(4): 65—66.
- [3] 李琛, 牛美亮, 赵玉松. 钢化玻璃运输包装设计与有限元分析[J]. 包装工程, 2018, 39(15): 113—118.
 LI Chen, NIU Mei-liang, ZHAO Yu-song. Transportation Package Design and Finite Element Analysis of Tempered Glass[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(15): 113—118.
- [4] 何雯,陈满儒.薄型烟机包装实验室测试与跌落仿 真分析[J].包装工程,2019,40(3):125—130.
 HE Wen, CHEN Man-ru. Laboratory Test and Drop Simulation Analysis of Thin Tobacco Machine Packaging[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 125—130.
- [5] 潘幸珍.复合瓦楞纸板结构性能的研究[D].南京: 南京林业大学,2007:10—20.
 PAN Xing-zhen. Study on the Structural Properties of Corrugated Cardboard Composites[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007:10—20.
 [6] 彭国勋.运输包装[M].北京:印刷工业出版社,
- [6] 奶白奶、足物 B & ([M])、 B M、 B M Y L B M (F, 1999: 80—120.
 PENG Guo-xun. Transport Packaging[M]. Beijing: Printing Industry Press, 1999: 80—120.
 [7] 秋高 其王右限元的瓦楞纸板摆型研究[D] 大连:
- [7] 赵亮.基于有限元的瓦楞纸板楞型研究[D].大连: 大连理工大学, 2009: 20—30.
 ZHAO Liang. Study on the Shape of Corrugation Based on FEM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009: 20—30.
- [8] 夏善同. 捆扎带的选用[J]. 中国包装, 1982, 4(3):
 44—45.
 XIA Shan-tong. Selection of Strapping[J]. Chinese

XIA Shan-tong. Selection of Strapping[J]. Chinese Packaging, 1982, 4(3): 44—45.

- [9] 喻永巽. ANSYS Workbench 的应用现状及分析[J]. 机电工程技术, 2014, 15(9): 138—140.
 YU Yong-xun. Current Situation and Analysis of ANSYS Workbench[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2014, 15(9): 138—140.
- [10] DADKHAH F, ZECHER J. ANSYS Workbench Software Tutorial with Multimedia CD Release11[M]. Mission: Schroff Development Corporation, 2008: 40-80.
- [11] 李艳敏.复杂结构的冲击动力学分析与仿真[D].西安:西北工业大学,2005:30—50.
 LI Yan-min. Impact Dynamics Analysis and Simulation

of Complex Structures[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005: 30-50.

- [12] 蒲雪. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的电子产品跌落仿真研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016: 30—40.
 PU Xue. Dropping Simulation Research of Electronic Products Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016: 30—40.
- [13] 刘畅,李娜,刘佳. 气动柔性草莓采摘机械手 ADAMS 动力学仿真分析[J]. 中国科技论文, 2017, 12(4): 390—393.

LIU Chang, LI Na, LIU Jia. Dynamic Simulation Analysis of ADAMS on Pneumatic Flexible Strawberry Picking Manipulator[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(4): 390-393.

- [14] 崔浩龙,魏晓辉,徐海啸.高速碰撞仿真计算的优化 方法[J].中国科技论文,2017,12(20):2295—2300.
 CUI Hao-long, WEI Xiao-hui, XU Hai-xiao. Optimized Method of High-sped Colision Simulation[J].
 China Sciencepaper, 2017, 12(20):2295—2300.
- [15] 常江, 巩雪. 电饭煲运输包装设计及跌落仿真分析
 [J]. 包装学报, 2019, 11(5): 38—43.
 CHANG Jiang, GONG Xue. Transport Package Design and Drop Simulation Analysis of Rice Cooker[J].
 Packaging Journal, 2019, 11(5): 38—43.