

基于 Hypermesh 联合 LS-DYNA 对冰柜跌落的仿真研究

张重, 韩宝坤, 常羽宁, 刘泽坤, 王晓玉, 贾思祥, 贾玉光

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要: 目的 优化冰柜的包装结构设计, 保证冰柜在运输和搬运过程中不被损坏。方法 首先对冰柜跌落冲击进行理论分析, 然后利用 SolidWorks 进行三维建模; 使用 Hypermesh 对建立的模型进行前处理, 基于有限元法用 LS-DYNA 进行跌落仿真实验, 利用 LS-PrePost 对仿真结果进行后处理。结果 仿真结果表明, 冰柜部分结构会发生塑性变形, 为此对冰柜底部支撑结构进行了改进, 改进后易损部位的变形量减小了 1.87 mm。结论 采用 Hypermesh 联合 LS-DYNA 的仿真形式对冰柜跌落进行模拟, 可以使设计者检测到产品内部受冲击后的变化特性, 也可以预知设计缺陷, 针对缺陷进行纠正。这样不仅能够保证设计产品的质量, 而且能够大大减少生产周期、节约成本, 具有很大的市场推广价值。

关键词: 有限元; 冰柜; 跌落; 支撑结构; Hypermesh; LS-DYNA; LS-PrePost

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)19-0097-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.014

Simulation of Freezer Drop Based on Hypermesh and LS-DYNA

ZHANG Zhong, HAN Bao-kun, CHANG Yu-ning, LIU Ze-kun, WANG Xiao-yu, JIA Si-xiang, JIA Yu-guang

(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the design of freezer packaging structure to ensure that the freezer is not damaged during transportation and handling. Firstly, theoretical analysis of freezer drop impact was carried out, and then three-dimensional modeling was carried out by Solidworks. The model was pre-processed by Hypermesh, simulated by LS-DYNA based on finite element method, and post-processed by LS-PrePost. The simulation results showed that, plastic deformation would occur in some structures of the freezer. Aiming at this problem, the support structure at the bottom of the freezer was improved. After the improvement, the deformation of the vulnerable parts was reduced by 1.87 mm. Hypermesh and LS-DYNA used to simulate the freezer drop can enable the designer to detect the change characteristics of the product inside after impacted, predict the design defects, and correct the defects. This can not only ensure the quality of the design products, but also greatly reduce the production cycle and save costs, and has a wide range of market promotion values.

KEY WORDS: finite element; freezer; drop; support structure; Hypermesh; LS-DYNA; LS-PrePost

冰柜等家电在运输和搬运过程中, 会受到振动和冲击, 从而导致冰柜损坏。在短暂而又强烈的动态力作用下, 物体的运动状态在极短时间内发生了剧烈变化, 这种现象被称为冲击^[1]。在各种各样的冲击环境中, 跌落冲击对冰柜产生的影响最大, 不管是人工搬

运还是机械装卸, 跌落冲击都是损害冰柜的最直接因素。根据相关统计, 有近 80% 的产品损坏都来自跌落冲击^[2-3], 因此, 冰柜结构的抗跌落性能和可靠性成为包装结构设计过程中必须考虑的重要内容。传统的跌落冲击研究就是根据牛顿碰撞理论原理, 以动力学为基

收稿日期: 2019-04-22

作者简介: 张重 (1993—), 男, 山东科技大学硕士生, 主攻机械振动控制。

通信作者: 韩宝坤 (1971—), 男, 山东科技大学教授, 主要研究方向为机械振动控制。

础,对研究对象进行跌落试验。由于传统的跌落试验方法时间历程很短,很难完整地观察到试验全过程,不易控制,费用也较高,无法获得时间和空间上连续的结果。使用跌落仿真分析很好地解决了这一问题,其利用计算机仿真技术对产品的跌落过程进行合理的有限元仿真分析^[4-5],为产品结构改进和包装结构设计提供理论先导,也可以缩短生产周期、提高生产效率^[6-7]。

关于跌落仿真,国内已有部分研究成果,文献[8]应用 Ansys/LS-DYNA 对某种结构的箱体进行了仿真跌落,得出应力响应及箱体变形情况,证明了有限元软件跌落仿真的可靠性。文献[9]应用 Ansys 的仿真模拟,得到此构件关键部位的应力响应及跌落后的变形结果,为该壳体类型产品的结构优化设计提供了参考依据。文献[10]利用 Hyperworks, LS-DYNA 联合仿真的形式对一种新型空调室内机的跌落过程进行了模拟。针对设计中存在的问题,对空调器进行了局部改进设计和重新分析验证,仿真计算结果验证了改进方案的有效和可行性。

文中将有限元法引入到冰柜的跌落仿真中,运用 SolidWorks 进行三维建模,使用 Hypermesh 对建立的模型进行前处理,提高有限元前处理的效率^[11-12],基于有限元法用 LS-DYNA 进行跌落仿真实验,利用 LS-PrePost 对仿真结果进行后处理。

1 冰箱跌落过程的理论分析

在算法上,传统的有限元法属于静态隐式算法。求解中每个时间步都要重新计算大型非线性刚度矩阵,并进行反复迭代以获得收敛解。需要较长计算时间和较大存储空间。近年来,显式动力学有限元法在碰撞冲击领域已得到了广泛应用,并显示了在处理大规模接触问题时的优势。不同于静态隐式算法,显式动力学有限元法无需建立刚度矩阵和求逆运算,而是采用中心差分法显式^[13]求解有限元方程,并通过单点高斯积分和集中质量提高求解速度,具有节省计算时间和存储空间以及易于处理问题的优点。

冰柜从运输车上跌落冲击到地面的过程中,会受到空气阻力影响及冰柜底部泡沫的缓冲作用,因此,建立单自由度系统的力学模型,见图1。图1中 m 为冰柜的质量; k 为弹簧系数; c 为阻尼系数; x 为位移。

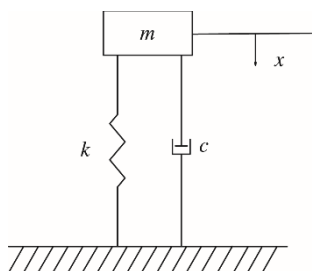


图1 力学模型
Fig.1 Mechanical model

运动方程见式(1)。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

2 冰柜包装件结构和跌落环境的简化及其有限元模型前处理

2.1 冰柜结构简化和跌落环境的简化

家用冰柜主要由箱体、底板、压缩机、毛细管等组成,压缩机用螺栓固定在底板上,压缩机上为毛细管。在跌落过程中,冰柜的压缩机不易发生损坏,因此把压缩机看作是刚体。对冰柜模型进行适当简化,去除管路的重量,去除倒角和对跌落仿真结果影响不大的特征,这样既能保证跌落仿真的准确性,同时可减少建模的难度^[14]。为了真实反应冰柜跌落落地时对冰柜底部损坏的程度,把对冰柜受冲击时影响较大的泡沫考虑在内。根据以上分析条件建立仿真模型,能较好地反应冰柜跌落的实际情况。

2.2 有限元模型的前处理

模型简化和网格划分是建立有限元模型的一个重要环节,也将直接影响计算结果精度和时间,因此,文中首先在 SolidWorks 软件中对冰柜模型做了相关简化,模型见图2。利用 SolidWorks 与 Hyperworks 的数据接口直接将冰柜包装件的装配体导入到 Hypermesh 中进行网格划分,将有限元模型导入 Hypermesh 中进行网格划分(见图3)。

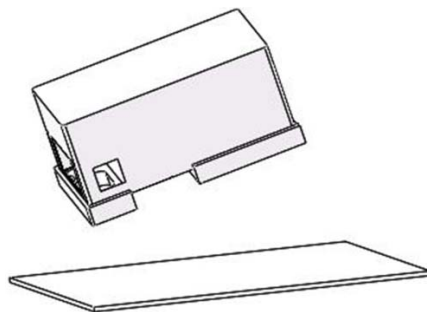


图2 冰柜有限元模型
Fig.2 Finite element model of freezer

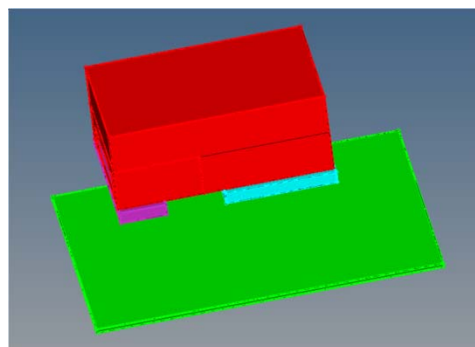


图3 网格划分
Fig.3 Mesh generation

冰柜壳体采用壳单元划分, 有 53 681 个, 缓冲泡沫和刚性地面用四面体网格进行划分, 分别为 24 651 个和 13 421 个, 网格质量良好。

2.3 有限元模型的材料参数和边界条件

冰柜材料参数由厂家提供, 其中泡沫为发泡聚乙烯 (EPE), 其主要材料属性见表 1。

表 1 冰柜的材料参数
Tab.1 Material parameters of freezer

材料名称	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa
钢	7.9×10 ³	2.06×10 ⁵	0.3	235
泡沫	2.5×10 ²	7.68	0	
橡胶	1000	40	0.49	

将边界条件进行以下设置, 根据冰柜在装卸过程中的实际情况, 冰柜从 0.5 m 的高度自由下落, 初速度为 0。LS-DYNA 有 3 种接触面处理方式^[15], 分别是单面接触、点面接触和自动双面接触。冰柜与缓冲泡沫、冰柜本体与缓冲泡沫、缓冲泡沫与刚性地面的接触界面均采用自动双面接触。

3 仿真结果后处理分析及优化

3.1 冰柜跌落的仿真实验

冰柜自由跌落刚接触地面时的应力分布见图 4, 冰柜角跌落刚接触地面时的应力分布见图 5, 由图 5—6 可以得到, 冰柜自由跌落和角跌落时, 冰柜易损坏部位的应力主要集中在冰柜底角处。其中, 当冰柜角跌落时, 冰柜易损坏部位变形量远远大于自由跌落, 因此消除冰柜底角处的集中应力是解决冰柜在跌落时损坏的关键。

3.2 冰柜底部支撑结构的优化

首先针对原有的底部支撑结构进行优化, 优化后的底部支撑结构见图 6。底部支撑结构的材料为普通

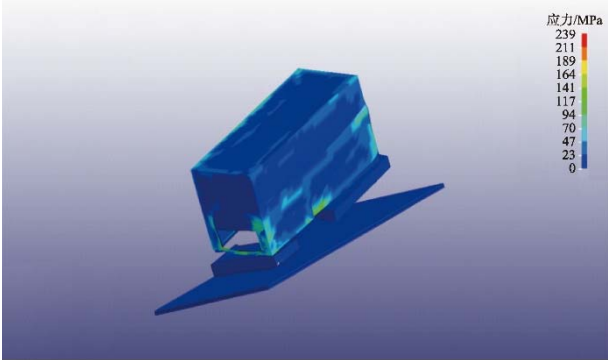


图 5 冰柜角跌落接触地面的应力分布
Fig.5 Stress distribution of freezer corner in contact with the ground after drop

钢, 厚度为 0.5 mm, 结构利用三角形稳定原理, 有力于提高底部支撑结构的稳定性。当冰柜从一定高度自由下落时, 底角受到外力冲击, 导致底角出现应力集中现象, 改进后的支撑结构可以把冰柜底角受到的应力传递到结构两边, 减少应力集中。结构优化后对冰柜进行跌落仿真, 冰柜角跌落刚接触地面时的应力分布见图 7, 易损坏部位的应力分布见图 8, 底部支撑结构的应力分布见图 9。由图 6—9 可以看出, 与优化前底部支撑结构的应力分布对比, 优化后的底部支撑吸收了大量冲击应力, 冰柜角跌落时底角处的应力明显减小, 底边的应力变形也明显减小。

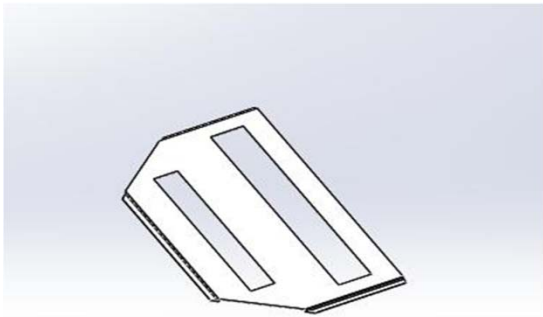


图 6 底部支撑结构
Fig.6 Bottom support structures

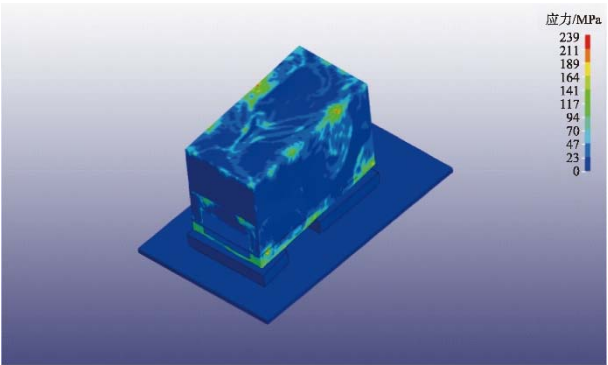


图 4 冰柜自由跌落接触地面的应力分布
Fig.4 Stress distribution of freezer in contact with the ground after free drop

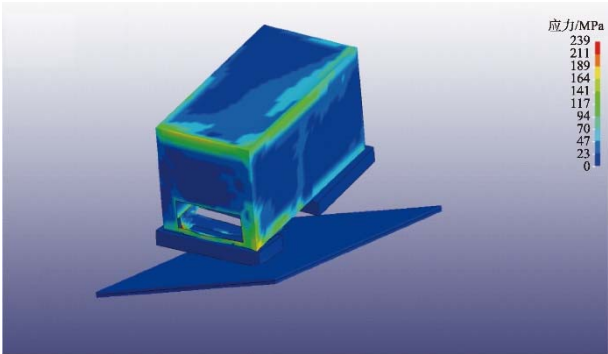


图 7 冰柜角跌落刚接触地面的应力分布
Fig.7 Stress distribution of freezer corner just in contact with the ground after drop

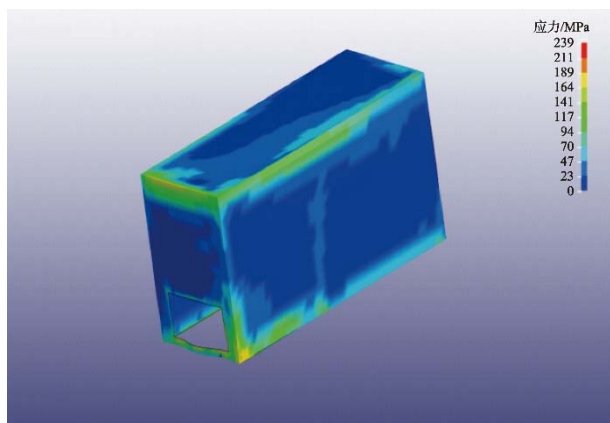


图8 易损部位的应力分布
Fig.8 Stress distribution in vulnerable parts

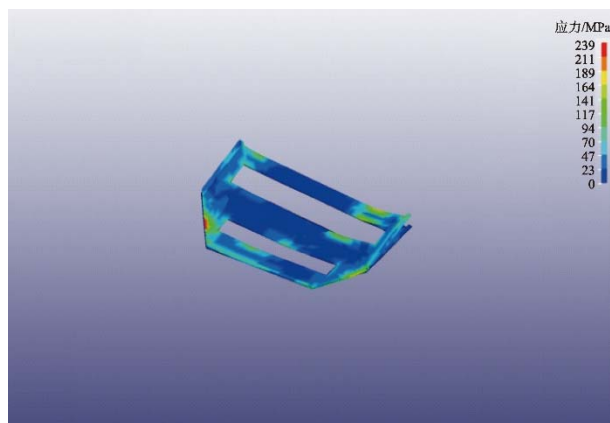


图9 底部支撑结构的应力分布
Fig.9 Stress distribution of bottom support structures

分布在冰柜跌落底角处取一节点单元 3570, 分析冰柜底部支撑结构优化前后在跌落过程中应力和变形量随着时间变化的对比情况, 见图 10—11。由图 10—11 可以得到, 底部支撑结构经优化后, 冰柜角跌落处 3570 节点单元的应力和变形量都显著减小, 详细数据见表 2。单元节点 3570 底部支撑结构优化前的最大应力为 142.6 MPa, 最大变形量为 2.932

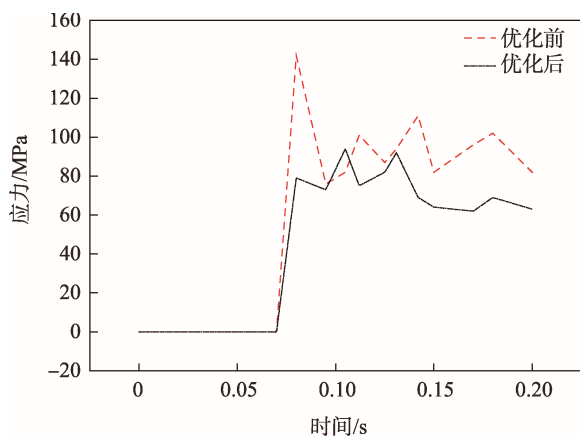


图10 应力变化
Fig.10 Stress change

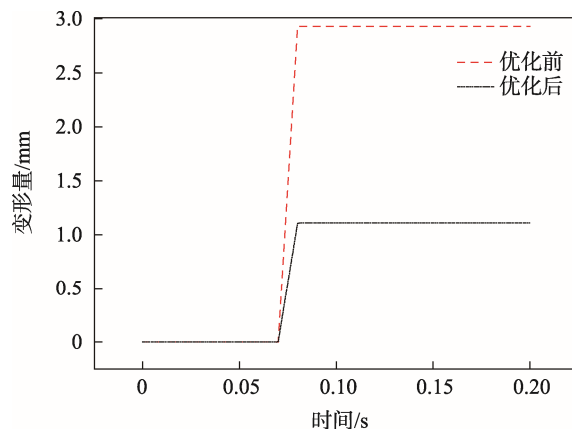


图11 变形变化
Fig.11 Deformation change

表2 单元节点 3570 底部支撑结构改进前后的应力和变形的对比情况

Tab.2 Comparisons of stress and deformation before and after optimizing the bottom support structure of unit node 3570

结构优化前后	最大应力/MPa	最大变形量/mm
支撑结构改进前	142.6	2.932
支撑结构改进后	94.6	1.018

mm; 优化后最大应力为 94.6 MPa, 最大变形量为 1.018 mm, 从仿真结果来看底部支撑结构优化后, 很好地解决了冰柜在跌落过程中易损部位变形较大的问题, 是一个合适的优化方案。

3.3 仿真和实验结果对比

冰柜包装件跌落冲击实验需要的设备有冲击台、提升装置、支撑装置、释放装置。实验过程: 提升冰柜样件至 0.5 m 处, 并按角跌落状态将其支撑住, 其提升高度与预定高度之差不超过预定高度的 $\pm 2\%$ 。跌落高度是指测试样品最低点与冲击台面的距离, 按角跌落状态释放冰柜, 按照标准检查冰柜的损坏情况, 并分析实验结果。实验过程见图 12, 支撑结构未改进前和改进后冰柜底角处的形变数据由游标卡尺测量得到, 实验数据对比见表 3。

在底部支撑结构优化前, 仿真分析中其底角处的最大变形量为 2.932 mm, 实验中其底角处最大变形量为 3.02 mm, 与实验的真实值相比, 误差为 2.7%; 在底部支撑结构优化后, 仿真中其底角处的最大形变为 1.018 mm, 实验中其底角处最大变形量为 1.15 mm, 与实验的真实值相比, 误差为 11.4%。虽然仿真和实验的结果有差距, 但在允许范围之内。跌落仿真和实验研究结果都说明底部支撑结构改进后, 明显减小了冰柜易损部位的变形量, 单元 3570 变形量减少了 1.87 mm, 冰柜易损部位的受损程度在可接受范围内, 达到了预期效果。

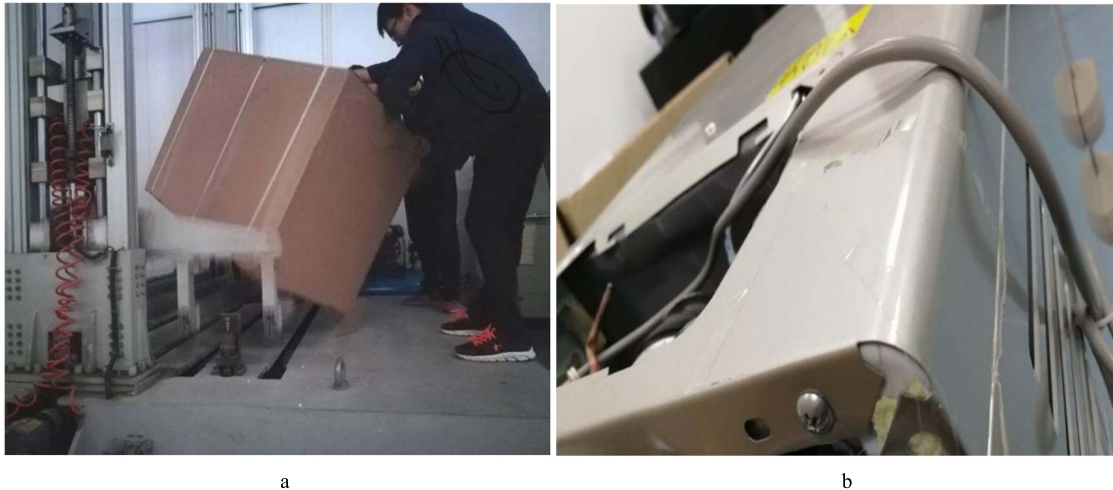


图 12 冰柜的跌落试验
Fig.12 Drop test of freezer

表 3 结构改进前后实验数据对比
Tab.3 Comparison of experimental data before and after structural improvement

结构优化前后	易损部位的变形量/mm
支撑结构改进前	3.02
支撑结构改进后	1.15

4 结语

文中使用 Hypermesh 对建立的模型进行前处理，基于有限元法用 LS-DYNA 进行冰柜跌落仿真实验，最后利用 LS-PrePost 对仿真结果进行后处理。冰柜在自由跌落和角跌落时，冰柜易损坏部位的应力主要集中在冰柜底角处，消除冰柜底角处的集中应力是解决冰柜在跌落时损坏的关键。根据仿真结果，对冰柜底部支撑结构进行了优化，并针对支撑结构的优化设计做了冰柜实体跌落试验，验证了方案的有效性和可行性。

1) Hypermesh 联合 LS-DYNA 的仿真形式对冰柜跌落进行模拟，可以使设计者检测到其内部产品受冲击后的变化特性，也可以预知设计缺陷，针对缺陷进行纠正，这样不仅能够保证设计产品的质量，而且能够大大减少生产周期、节约成本，具有很大的市场推广价值。

2) 通过仿真结合实验的方法发现冰柜底部支撑结构经改进后，明显减小了冰柜易损部位的变形量，并通过实验方法证明了改进后的底部支撑结构可以达到预期效果，该结构是一种可靠的支撑结构。

参考文献：

[1] 高德. 包装应用力学[M]. 北京：中国轻工业出版社，2013，34—35.

GAO De. Applied Packaging Mechanics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013, 34—35.

[2] 李杨, 陈曲. 基于 ANSYS 的打印机全瓦楞缓冲包装设计[J]. 包装报, 2012, 4(2): 37—41.

LI Yang, CHEN Qu. ANSYS-based Printer all Corrugated Cushioning Package Set[J]. Packing Newspaper, 2012, 4(2): 37—41.

[3] 张璐, 丁毅. 古瓷瓶文物的运输包装设计[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 25—27.

ZHANG Lu, DING Yi. Transportation and Packaging Design of Ancient Porcelain Bottles[J]. Packaging Engineering. 2013, 34(7): 25—27.

[4] 李鹏. 包装泡沫在空调外机跌落中的分析与优化[J]. 日用电器, 2015(5): 49—53.

LI Peng. Analysis and Optimization of Packaging foam Drop in External Air Conditioning[J]. Daily Electric Fan, 2015 (5): 49—53.

[5] 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.

PU Xue. Ansys/LS-DYNA-based Electronic Product Drop Simulation Study[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiao-tong University, 2016.

[6] 章军. 组合橡塑瓦楞板及用该瓦楞板制造 RFID 周转箱：中国, 201610644802.5[P]. 2016-11-09.

ZHANG Jun. The Combination of Rubber-plastic Corrugated Board and the Use of the Corrugated Board to Make RFID Turnover Box: China, 201610644802.5[P]. 2016-11-09.

[7] 章佳平, 章军, 崔军. 塑料瓦楞板组合式周转箱设计及跌落分析[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 96—101.

ZHANG Jia-ping, ZHANG Jun, CUI Jun. Design and Drop Analysis of Plastic Corrugated Board Combined Revolving Box[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 96—101.

[8] 黄黎, 赵立军, 甘朝虹. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的箱体跌落仿真[J]. 科技资讯, 2012(14): 6—8.

HUANG Li, ZHAO Li-jun, GAN Chao-hong. Box

- Drop Simulation Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Science and Technology News, 2012(14): 6—8.
- [9] 谷骁勇, 张黎明. 基于 ANSYS 的壳体构件跌落强度研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(2): 51—53.
- GU Xiao-yong, ZHANG Li-ming. Study on Falling Strength of Shell Member Based on ANSYS[J]. Coal Mining Machinery, 2010, 31(2): 51—53.
- [10] 刘刚, 王海波, 苏炳超. 基于 Hyperworks/LS-DYNA 的一种新型空调器室内机的跌落仿真分析[J]. 家电科技, 2017(1): 58—61.
- LIU Gang, WANG Hai-bo, SU Bing-chao. Drop Simulation Analysis of a New Air Conditioner Based on Hyperworks/LS-DYNA[J]. Home Appliances Technology, 2017(1): 58—61.
- [11] 谭天水. Ansys 仿真跌落试验[J]. 机械, 2014, 31(8): 33—34.
- TAN Tian-shui, Ansys Simulated Drop Test[J]. Mechanical, 2014, 31(8): 33—34.
- [12] 申展, 罗俊杰, 卓毅. 某型包装箱的低密度聚乙烯缓冲结构设计与分析[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 54—57.
- SHEN Zhan, LUO Jun-jie, ZHUO Yi. Design and Analysis of Low Density Polyethylene Buffer Structure in a Packing Box[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 54—57.
- [13] 郝智伟, 钱静. 洗衣机关键部位的跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 27—29.
- HAO Zhi-wei, QIAN Jing. Simulation Analysis of the Fall of Key Parts of Washing Machine[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 27—29.
- [14] 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 Yong-hui, ZHANG Yin. Simulation and Improved Design of Washing Machine Drop Impact Based on Finite Element Analysis[J]. Vibration and Shock, 2011, 30(2): 164—166.
- [15] MINH T V, SANTOSA S P, WIDAGDO D, et al. Steel Plate Behavior under Blast Loading-numerical Approach Using LS-DYNA[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 842: 200—207.