缓冲与隔振

某型包装箱跌落动力学仿真分析

袁惠群¹, 付凡², 杨淑良³, 秦俊生²

(1.东北大学,沈阳 110819;2.空装上海局驻南昌地区军事代表室,南昌 330024;

3.中国兵器装备集团国营第五七二七厂,江西九江 332006)

摘要:目的研究某新型导弹包装箱跌落工况下的冲击动力学响应,校核箱体结构是否满足设计要求。 方法 采用有限元仿真技术,研究包装箱结构跌落冲击动力学行为。建立箱体结构三维仿真模型,分析 水平跌落和棱边跌落等2种工况,得到箱体的应力分布以及加速度响应,进一步对仿真分析结果的可靠 性进行试验验证。结果2种跌落工况下,箱体所受最大应力均小于材料的屈服极限。经跌落试验测试, 箱体结构完好,无损伤和变形,试验结果与仿真结果吻合。结论有限元分析结果合理可靠,包装箱结 构性能满足设计要求。

关键词:包装箱;跌落;有限元;试验

中图分类号:TB48;TH113.1 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2020)11-0072-06 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.11.011

Drop Kinetics Simulation of a Packaging Box

YUAN Hui-qun¹, FU Fan², YANG Shu-liang³, QIN Jun-sheng²

(1.Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2.Military Representation Room of Air Force Stationed in Nanchang, Nanchang 330024, China;
3.State-owned 5727 Factory, China SouthIndustries Group Co., Ltd., Jiujiang 332006, China)

ABSTRACT: The work aims to study the impact dynamic responses of a new missile packaging box under drop condition and check whether the box structure meets the design requirements. The finite element simulation technique was used to investigate the dynamic behavior of packaging box with drop impact. The three-dimensional simulation models of the box were established. Level drop and edge drop were analyzed, respectively. The stress distribution and acceleration response of the box were obtained, and the reliability of the simulation analysis results was verified by experiment. The maximum stress on the box was less than the yield limit of the material under the two drop conditions. After drop experiment, it could be found that the box had no damage and deformation, which agreed well with the simulation results. The finite element analysis results are reasonable and reliable, and the structural property of the packaging box satisfies the design requirements.

KEY WORDS: packaging box; drop; finite element; experiment

跌落冲击是一种复杂的非线性动态响应过程。在 跌落冲击中,包装件可能发生大转动、大变形,这就 会涉及材料的非线性、几何非线性和边界条件非线性 的问题。由于包装件的可靠性分析和跌落冲击问题较 为复杂,因此研究包装件的跌落冲击力学响应就显得 非常重要。

收稿日期: 2019-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(51775093)

作者简介:袁惠群(1954—),男,博士,东北大学教授,主要研究方向为转子动力学、机械振动。

已有很多研究学者对包装件运输搬运过程中的 跌落冲击情况进行了研究^[1-10]。在包装箱结构跌落冲 击研究方面,Mills等^[11]使用有限元法对带有聚乙烯 泡沫缓冲衬垫的包装件进行了跌落试验研究,对比了 加导弹与不加导弹时包装箱跌落工况下缓冲衬垫的 变形情况。黄黎等^[12]采用有限元法对某种箱体结构进 行了跌落仿真,得到了应力响应及箱体变形情况。罗 思源等^[13]采用有限元仿真技术对某包装件进行了跌 落仿真分析,分析了结构的受冲击情况。钟卫洲等^[14] 对某放射性包装结构件开展了跌落碰撞仿真研究,考 虑了结构件正碰、角碰和侧碰等多种工况,对包装箱 的抗冲击性能进行了考核。袁惠群等^[15]研究了导弹包 装箱的振动特性以及随机激励作用下结构的动力学 响应。从以上文献可以看出,针对包装箱结构动力学 特性的研究大多以有限元仿真与试验手段为主。

文中针对某新型导弹包装箱结构,采用有限元分 析技术对箱体结构的跌落冲击进行仿真分析,以得到 不同跌落方式下结构的应力分布情况。进一步对有限 元分析结果的可靠性进行试验验证,以期很好地完成 对弹体包装箱结构设计的评估。

1 包装箱计算模型

1.1 几何模型的建立

某导弹包装箱实体结构见图 1。根据包装箱-弹体-箱架系统的尺寸参数,利用三维建模软件,建立导弹包 装箱的几何模型。由于导弹包装箱的结构比较复杂,因 此在建模时需要对箱-弹系统结构进行必要的简化。在 建模时,删除了螺纹、连接螺栓、连接孔、倒角等特征; 对包装箱整体结构影响较小,且划分网格比较困难的一 些不规则部件,如阀门、锁扣等,也予以忽略。在计算 中,根据 GJB 150.18A《军用装备实验室环境试验方法 冲击试验》,定义2种工况来模拟包装箱的跌落过程, 一种工况是整个箱体平行于地面进行水平跌落,箱底与 地面的垂直距离为 46 cm,见图 2;另一种工况为箱体 棱边跌落,将箱子一条棱边垫高 15 cm,提起对角棱边 达到与地面距离为 46 cm,使其自由下落,该工况下, 包装箱几何模型见图 2b。



图 1 包装箱实体 Fig.1 Packaging box in kind



图 2 包装箱跌落几何模型 Fig.2 Geometric model of packaging box drop

1.2 有限元模型的建立

包装箱跌落到地面的过程,是箱体的自由落体及 与刚性地面相碰撞的过程,因此,在进行箱体跌落分 析时,需要在箱体模型的下面增加一刚性地面。在仿 真时,将地面模型添加刚体约束,箱体以自由落体运 动撞向刚性地表面,将弹体简化为质量点,耦合在弹 体支撑架上。

合理的网格划分是保证计算结果精确的基础。对 于导弹包装箱结构,采用四六面体单元结合的方式进 行网格划分,在保证计算精度和敛散性的前提下,尽 量提高计算效率。包装箱在各个工况下跌落的有限元 仿真模型见图 3。网格划分完成后,根据运动关系, 对模型各部件施加相应的绑定、耦合等约束关系,并 添加结构件的材料属性。仿真模型主要由箱体、弹体 支撑、捆绑带及地面组成,各部件的材料属性见表 1。





图 3 包装箱有限元模型

Fig.3 Finite element model of packaging box

表 1 仿真模型各部件材料参数

Tab.1 Material parameters of the simulation model pa	irts
--	------

部件	密度/(mg·mm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	
箱体	1.72	16	0.28	
弹体支撑	2.8	72	0.33	
地面	7.8	200	0.28	
捆绑带	1.44	131	0.28	
				-

2 包装箱跌落仿真结果分析

对于导弹包装箱水平跌落的工况,选取了跌落过 程中箱子接触地面和接触地面后第1次弹起等2个时 刻,给出了箱体应力分布情况,见图4—5。

包装箱水平跌落工况下与地面撞击时刻箱体的 应力云图见图 4。从图 4 中可以看出,在箱体接触地 面的瞬间,箱体的最大应力为 194.773 MPa,最大应 力出现在箱盖与地面接触的棱角处,同时箱体两侧的 应力较大。图 5 给出了弹起时刻箱体的应力分布情 况。当箱子弹起时,箱体整体应力减小,最大应力为 110.302 MPa,应力波由箱体两侧向中间传播,箱体 中间部位应力逐渐增大。



图 4 包装箱水平跌落撞击地面时刻应力云图 Fig.4 Stress contour plot of packaging box at the moment of impact under level drop



图 5 包装箱水平跌落弹起时刻应力云图 Fig.5 Stress contour plot of packaging box at the moment of upspring under level drop

为了分析包装箱结构在跌落过程中的动力学响 应,提取了箱盖上 831 号节点的应力以及加速度时间 历程曲线,见图 6。可以发现,箱体在与地面撞击时 刻,应力和加速度均达到最大值,随后各参数值均逐 渐减小,说明系统趋于稳定。

对于弹体包装箱棱边跌落的工况,仍然选取了跌 落过程中箱子接触地面和接触地面后第1次弹起等2 个时刻,给出了箱体的应力分布情况,见图7—8。

弹体包装箱棱边跌落工况下箱体与地面碰撞时 刻的应力云图见图 7。从图 7 中可以看出,包装箱所 受的最大应力是 123.84 MPa,出现在弹体支撑与箱体 接触的区域,箱体与地面接触端部位的应力较大。随 着时间的增加,箱体开始回弹。包装箱跌落接触地面 后回弹时刻的应力云图见图 8,可以发现,箱体整体 应力水平变小,箱体最大应力仅为 106.67 MPa,应力



图 6 包装箱水平跌落动力学响应





图 7 包装箱棱边跌落撞击地面时刻应力云图 Fig.7 Stress contour plot of packaging box at the moment of impact under edge drop



Fig.8 Stress contour plot of packaging box at the moment of upspring under edge drop

波沿箱体纵向传播,逐渐传播到整个箱子上面。包装 箱棱边跌落工况下应力最大部位处的动力学响应见 图 9,其中,图 9a 为应力时间历程曲线,图 9b 为加 速度时间历程曲线。可以看出,箱体的应力和加速度 变化存在着明显的波动,随着时间的增大,2 个参数 值先增大后减小。在箱体与地面碰撞时刻,各参数值 均达到最大值。



图 9 包装箱棱边跌落动力学响应 Fig.9 Dynamic response of packaging box under edge drop

从计算结果可以看出,水平跌落和棱边跌落工况 下,包装箱结构所受最大应力均小于材料的屈服极 限,不会出现屈服现象,故箱体结构满足设计要求。

3 试验

3.1 方法

为了验证仿真分析结果的可靠性,针对包装箱样件进行了跌落试验。试验包装箱为经过军厂双方检测 合格的产品。主要考核包装箱在跌落环境下承受冲击 的能力及保护内装炸弹产品的能力。

试验前对包装箱进行外观、结构检查,并记录检测结果。将配重弹按照装箱程序装入包装箱,分别进行水平跌落和棱边跌落试验。在进行水平跌落试验时,通过跌落试验快速脱钩装置,将箱子升到46 cm的高度,使底面平行地面,令其自由下落,见图10。对于棱边跌落试验,将箱体一条棱边用木块垫高15

cm,见图 11a;对角棱边通过跌落试验快速脱钩装置, 将其提至距地面 46 cm 的高度,见图 11b。通过直流 电源为脱钩装置供电,令其快速脱钩,使包装箱自由 下落。分别对箱子底面的前后两边进行跌落试验(共 跌落 2 次)。每次跌落试验结束后对包装箱进行外观 检查、结构检查,并检查箱内配重弹有无影响产品使 用的损伤、变形,记录检测结果和试验测试数据。



图 10 包装箱水平跌落试验 Fig.10 Level drop experiment of packaging box





图 11 包装箱棱边跌落试验 Fig.11 Edge drop experiment of packaging box

3.2 结果

跌落试验后,对包装箱结构进行检查,见图 12, 试验过程中各工况下记录的数据见表 2。由试验结果 可知,各工况下,包装箱结构均无严重损坏、脱焊, 主体结构完好,紧固件无松脱,箱盖可正常开启,炸 弹配重弹可正常取出;箱内炸弹配重弹无损伤、变形。 试验结果说明所设计的弹体包装箱结构强度满足要 求,这与仿真结论吻合。

为了进一步验证有限元仿真结果的可靠性,分别 输出了水平跌落和棱边跌落工况下包装箱危险部位 的加速度计算结果,并将其与试验测试结果进行了对 比,见图 13。从图 13 中可以看出,有限元计算结果 与试验数据吻合良好,表明有限元分析结果是合理可 靠的。



图 12 开箱检查 Fig.12 Open-case inspection 表 2 试验数据

Tab.2 Experimental data

跌落边	包装箱检查		配重弹检查
横向后底边	无损伤、	变形	无影响产品使用的损伤、变形
横向前底边	无损伤、	变形	无影响产品使用的损伤、变形
底面	无损伤、	变形	无影响产品使用的损伤、变形



图 13 有限元分析与试验结果对比 Fig.13 Comparison of finite element analysis and experiment results

4 结语

文中基于有限元仿真技术,对某型导弹包装箱跌 落冲击工况下的动力学响应以及承载冲击能力进行 了研究。建立了包装箱仿真模型,分别考虑了水平跌 落和棱边跌落等2种工况,得到了各工况下箱体的应 力分布情况,并通过试验对仿真计算结果的可靠性进 行了验证,主要得出以下结论。

 1)通过对包装箱进行跌落仿真分析发现,箱体 在与地面撞击时刻应力和加速度达到最大值,随后各 参数值均逐渐减小,系统趋于稳定。

2)水平跌落工况下箱体的最大应力为 194.773 MPa,出现在箱盖与地面接触的棱角处;棱边跌落时 箱体最大应力为 123.84 MPa,出现在弹体支撑与箱体 接触的区域。

3)2种跌落工况下,包装箱结构所受最大应力 均小于材料的屈服极限,说明结构部件不会发生断 裂、损坏现象,故箱体结构满足设计要求。

4)通过跌落试验测试,试验结果与有限元分析 结果基本吻合,说明仿真结果合理有效。

参考文献:

- 刘乘, 卢杰, 陈满儒. 运输包装件振动特性的计算机 仿真[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 20—22.
 LIU Cheng, LU Jie, CHEN Man-ru. Computer Simulation of Vibration Characteristics for The Product/Packages in Transportation[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 20—22.
- [2] LIM C T, TEO Y M, SHIM V P W. Numerical Simulation of the Drop Impact Response of a Portable Electronic Product[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(3): 478–485.
- [3] 李小丽, 郭彦峰, 刘志鹏. 缓冲包装系统冲击特性的 分析[J]. 陕西科技大学学报, 2004(1): 74—77.
 LI Xiao-li, GUO Yan-feng, LIU Zhi-peng. Analysis and Discussion of Shock Characteristic on Cushioning Package System[J]. Journal of Shanxi University of Science and Tecnology, 2004(1): 74—77.
- [4] WANG Y Y, LU C, LI J, et al. Simulation of Drop/Impact Reliability for Electronic Devices[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41(6): 667–680.
- [5] GU B, SHU D W, LUO J, et al. FEA Simulation of Linear and Rotary Drop Test for Small form Factor HDD[C]// 2006 International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, 2006: 1264—1268.
- [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.
 ZHANG Yun-hua, LI Shan, LIU Guan-yu, et al. Drop-

ping Simulation and Selecting of Cushion Packaging

Methods for a Infrared Lens[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24): 133-137.

 [7] 王叶奔儒,潘孝斌,周鑫,等.榴弹包装箱跌落实验 装置的设计与分析[J].机床与液压,2018,46(11): 145—148.
 WANG Ye-ben-ru, PAN Xiao-bin, ZHOU Xin, et al.

Design and Analysis of Gripping Device for Grenade Crates Dropping Experiment[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2018, 46(11): 145—148.

 [8] 张波,丁汉,盛鑫军.板级电子封装在跌落冲击载荷 下的动态响应分析[J].振动与冲击,2008,27(6): 108—113.
 ZHANG Bo, DING Han, SHENG Xin-jun. Dynamic Desenance of Decent Line Electronic Deduces UNDER

Response of Board-level Electronic Package UNDER Drop Impact Load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(6): 108—113.

- [9] 丁玉平, 钱怡. 包装件跌落仿真分析与结构优化[J].
 包装与食品机械, 2014, 32(4): 44—47.
 DING Yu-ping, QIAN Yi. Drop Simulation Analysis and Structure Optimization of the Overall Package[J].
 Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 44—47.
- [10] FRANO R L, SANFIORENZO A. Demonstration of Structural Performance of IP-2 Package by Simulation and Full-scale Horizontal Free Drop Test[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016, 86(1): 40–49.
- [11] MILLS N J, MASSO-MOREU Y. Finite Element

Analysis (FEA) Applied to Polyethylene Foam Cushions in Package Drop Tests[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(1): 29—38.

- [12] 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. Simulation of Box Drop Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Science and Technology, 2012(14):6—8.
- [13] 罗思源, 兀光波, 王延琦, 等. 某运输包装件的跌落 冲击仿真分析[J]. 机械与电子, 2016, 34(8): 16—20.
 LUO Si-yuan, WU Guang-bo, WANG Yan-qi, et al.
 Drop Impact Simulation Analysis for a Transport Package[J]. Machinery and Electronics, 2016, 34(8): 16—20.
- [14] 钟卫洲,张则熊,刘小刚,等.多层包装箱冲击缓冲 效应数值分析[J].中国测试,2018,44(10):184—188.
 ZHONG Wei-zhou, ZHANG Ze-xiong, LIU Xiao-gang, et al. Numerical Analysis on Impact Cushion Behavior of Multilayer Container[J]. China Measurement and Test, 2018, 44(10): 184—188.
- [15] 袁惠群,陶文斌,龙哲,等.某新型导弹包装箱动力 学特性分析[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 124—130.
 YUAN Hui-qun, TAO Wen-bin, LONG Zhe, et al. Dynamic Characteristic of a New Structure Missile Packing Case[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 124—130.