

装备防护

某新型导弹包装箱-箱架联吊动力学仿真分析

孙红运¹, 王光定¹, 袁惠群², 陶文斌³, 刘智敏⁴

(1.东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819; 2.东北大学 理学院, 沈阳 110819;

3.中国兵器装备集团国营第五七二七厂, 江西 九江 332006;

4.空装上海局驻南昌地区军事代表室, 南昌 330024)

摘要:目的 研究某新型导弹包装箱-箱架系统的动力学响应。方法 建立包装箱-箱架系统的动力学模型, 利用有限元分析方法对其进行联吊工况下的瞬态动力学分析, 并通过试制样件进行联吊工况的试验。结果 通过仿真分析得到了箱架系统起吊过程中各部位处的应力结果。在包装箱-箱架以1×4, 2×2等2种堆码方式起吊时箱架系统的最大应力分别为78 MPa和158 MPa, 以1×4堆码方式起吊时箱架系统的最大应力水平明显低于2×2堆码方式起吊时的最大应力水平; 2种工况下起吊的最大应力明显小于材料的屈服强度。结论 箱架系统以2.5g的冲击联吊载荷起吊时结构不会发生强度破坏。包装箱在进行吊装试验后, 包装箱外形结构完好, 无破损, 无裂纹, 无影响使用的永久性变形。

关键词:动力学响应; 有限元; 结构强度

中图分类号: TB48; TH113.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)17-0104-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.015

Dynamic Simulation of a New Structure Missile Packing Box-frame

SUN Hong-yun¹, WANG Guang-ding¹, YUAN Hui-qun², TAO Wen-bin³, LIU Zhi-min⁴

(1.School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2.School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3.State-owned 5727 Factory of China South Industries Group Corporation, Jiujiang 332006, China;

4.Military Representation Room of Air Force Stationed in Nanchang, Nanchang 330024, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the dynamic response of a new structure missile packing box-frame. A dynamic model of packing box-frame was established. Finite element (FE) and experimental approaches were applied to analyze the transient dynamics under the combined lifting condition. The stress results of the missile packing box-frame were obtained. The maximum stress of the box-frame system when lifting by 1×4 stacking and 2×2 stacking modes was 78 MPa and 158 MPa respectively. The maximum stress level box-frame system when lifting by 1×4 stacking mode was significantly lower than the maximum stress level when lifting by 2×2 stacking mode. The maximum stress in the process of lifting was obviously less than the yield stress of the material under these cases. When the system was lifted under 2.5g hoisting load, the structure not suffered from strength failure. The outer structure of the packing box-frame is intact without damage, crack or permanent deformation after lifting.

KEY WORDS: dynamic response; finite element; structural strength

收稿日期: 2019-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(51775093)

作者简介: 孙红运(1993—), 男, 东北大学博士生, 主要研究方向为转子动力学。

通信作者: 袁惠群(1954—), 男, 东北大学教授、博导, 主要研究方向为转子动力学。

随着军事装备不断向高技术方向发展,一些精密仪器如制导系统、陀螺、战斗机、高技术导弹陆续问世。相对于普通的武器装备,该类军事装备的勤务处理要求较高,因此,在运输、装卸、搬运、堆叠、储藏等过程中需要格外小心,保证以上操作对弹体的影响最小^[1-5]。

目前,许多学者对包装系统的动力学特性进行了深入研究,并取得了一定的成果。Chonhenchob 等^[6]分析了包装箱在运输过程中的振动水平。Pan 等^[7]对手机包装箱进行了数值模拟和试验测试,并对包装结构进行了优化。Lu 等^[8]研究了缓冲作用对包装动力学特性的影响。Xu 等^[9]研究了蜂窝纸板缓冲包装的设计方法。Lu 等^[10]研究了气囊包装材料的动态缓冲性能。

相对于运输和跌落工况,关于包装系统和其他结构的堆码方式及起吊过程的研究相对较少。王小明等^[11]对导弹吊具自动化设计系统进行了研究,为吊具的研发提供了一定基础。方治华等^[12]对比了起吊过程中 2 种动力学模型的特点和选用原则,对于分析重物的起吊过程具有一定意义。李斌等^[13]基于有限元方法分析了潜水器结构在起吊工况下的动力学特性,提高了计算效率。胡亚等^[14]对火箭炮运发箱不同工况进行受力分析,并对运发箱的结构进行了优化。袁惠群^[15]等研究了导弹包装箱在运输工况下的动力学响应。

为了研究导弹包装箱在起吊工况下的动力学特性,文中采用新型结构包装箱代替传统的包装箱结构,建立不同堆叠和起吊方式的包装箱-箱架系统仿真模型,研究不同堆叠方式下,包装箱-箱架系统的动力学特性,并进行试验测试,校核该结构的强度,为包装结构的设计和起吊方式的选择奠定一定的基础。

1 动力学分析理论

当系统受到外部载荷激励作用时,系统作受迫振动,其各点振动位移、速度及加速度随时间变化而变化,称之为系统振动响应。文中采用直接积分法求解系统的动响应。假设初始时刻($t=0$)的位移、速度和加速度向量分别为 $\{\delta_0\}$ 、 $\{\dot{\delta}_0\}$ 和 $\{\ddot{\delta}_0\}$,求运动方程从 $t=0$ 到 $t=T$ 的解。将时间历程 T 划分成 n 个相等的时间区间 Δt ($\Delta t=T/n$)。为了建立求解各离散时刻点上的运动方程近似解通用公式,在此假定 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, t$ 时刻的解已经求得,现求 $t+\Delta t$ 时刻的位移、速度和加速度。具体计算过程如下所述。

1.1 初始计算

1) 形成刚度矩阵 K 、质量矩阵 M 和阻尼矩阵 C ,若阻尼矩阵为比例阻尼矩阵,则可取 $C=\alpha M+\beta K$ 。

2) 给定初始值 $\{\delta_0\}$ 、 $\{\dot{\delta}_0\}$ 和 $\{\ddot{\delta}_0\}$ 。

3) 选取时间步长 Δt , $\Delta t < \Delta t_{cr}$, Δt_{cr} 为时间步长的临界值,定义 $\Delta t_{cr}=T_n/\pi$, 其中 T_n 为系统的最小周期, n 为系统的阶。计算积分常数 $\alpha_0 = \frac{1}{\Delta t^2}$, $\alpha_1 = \frac{1}{2\Delta t}$, $\alpha_2 = 2\alpha_0$, $\alpha_3 = \frac{1}{\alpha_2}$ 。

4) 计算 $|\delta_{t+\Delta t}| = |\delta_0| - \Delta t |\dot{\delta}_0| + \alpha_3 |\ddot{\delta}_0|$ 。

5) 形成有效质量矩阵 $\tilde{M} = \alpha_0 \tilde{M} + \alpha_1 C$ 。

6) 对 \tilde{M} 进行三角分解: $\tilde{M} = LDL^T$ 。

1.2 对每一个时间步长进行计算

1) 计算在 t 时刻的有效载荷 \tilde{F}_t 。

$$\tilde{F}_t = F_t - (K - \alpha_2 M)\delta_t - (\alpha_0 M - \alpha_1 C)\dot{\delta}_{t-\Delta t}$$

2) 求解 $t+\Delta t$ 时刻的位移、速度和加速度。

$$LDL^T \delta_{t+\Delta t} = \tilde{F}_t; \quad \dot{\delta}_{t+\Delta t} = \alpha_1 (-\delta_{t-\Delta t} + \delta_{t+\Delta t});$$

$$\ddot{\delta}_{t+\Delta t} = \alpha_0 (\delta_{t-\Delta t} - 2\delta_t + \delta_{t+\Delta t})$$

通过上述分析方法,可以获得系统中各点在激励载荷作用下的动响应结果。

2 包装箱有限元模型

2.1 包装箱-箱架结构简介

导弹等军用装备在装卸的过程中会受到振动和冲击作用,容易造成弹体损伤从而降低性能。文中研究联吊工况下新型导弹包装箱-箱架系统的动力学响应,系统整体结构主要由箱体、箱盖、弹体、箱架和其余辅件组成。包装箱采用上侧开盖结构,方便弹体的存取,弹体与弹体支撑之间放置缓冲衬垫,减小弹体承受的外部振动和冲击强度,包装箱外部固定有箱架。新型包装箱具有结构简单、轻便、强度高、隔振性强等特点。导弹包装箱-箱架三维实体模型见图 1。

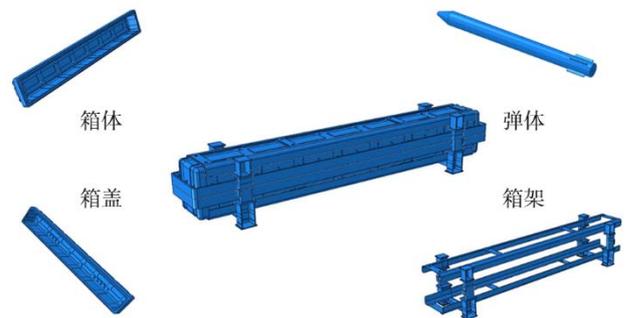


图 1 导弹包装箱-箱架三维实体模型
Fig.1 3D model of the missile packing box-frame

根据包装箱-箱架系统的实体结构,建立三维模型,然后导入到有限元仿真分析软件中对其进行网格划分。考虑到其结构形状较为复杂,且含有较多的过渡圆角,因此在建模过程中进行简化处理,主要包括 3 部分:不考虑部件之间的连接方式,忽略与连接有关的特征操作,如连接螺栓、孔等部件;不考虑对结

构质量特性和刚度特性影响较小的局部倒角特征;对网格划分造成极大困难的不规则部件如阀门、锁扣等予以忽略。有限元模型采用四六面单元结合的方式进行网格划分,单元数量总数为338900个。导弹包装箱-箱架系统动力学仿真模型见图2。

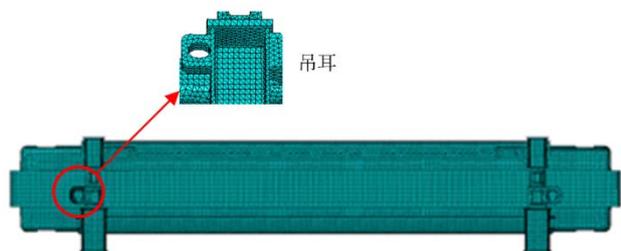


图2 动力学仿真模型
Fig.2 Dynamic simulation model

2.2 结构材料参数

新型包装箱-箱架系统主要部件的材料参数见表1。

表1 箱架系统材料参数
Tab.1 Material parameters of box-frame system

部件	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
箱体	1600	9.0	0.27
弹体	2800	72	0.33
箱架	7800	200	0.28
橡胶垫	900	0.05	0.3
弹体支撑托	2800	72	0.33

2.3 堆叠/起吊方式

弹体常常被放置于具有隔湿、防振的包装箱中,为了便于日常的运输和储存,常将其固定于箱架中,并以1×4和2×2的方式进行堆码或吊装操作,这2种堆码方式见图3。

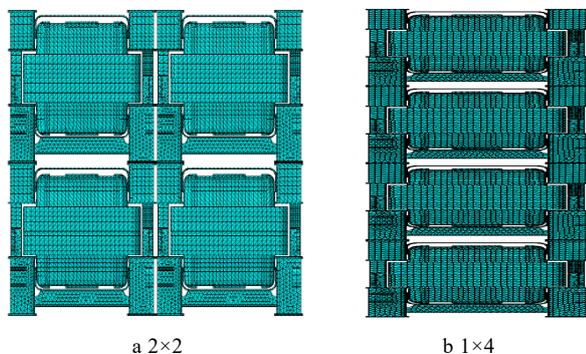


图3 堆码方式
Fig.3 Stacking mode

2.4 约束条件及载荷

包装箱-箱架系统以1×4和2×2等2种堆叠方式

中,上下箱架间水平方向的定位主要通过箱架顶端的销钉和箱架底部销孔位置,左右箱架间竖直方向的定位主要通过箱架两侧面的销钉和销孔位置。在箱架起吊动力学分析过程中,为了降低仿真分析模型的规模、提高仿真分析的计算效率,将定位销钉和销孔简化为刚性杆单元。在研究包装箱-架起吊时的动力学响应时,对系统施加2.5g瞬时起吊加速度载荷。为了避免系统由于瞬时加载而导致的敛散性问题,文中以斜坡曲线的形式加载起吊冲击载荷。仿真分析时间为0.1s,其中0~0.01s时间段内加速度载荷由0线性增大至2.5g。0.01~0.1s时间段内加速度载荷恒为2.5g。仿真分析的载荷变化曲线见图4。

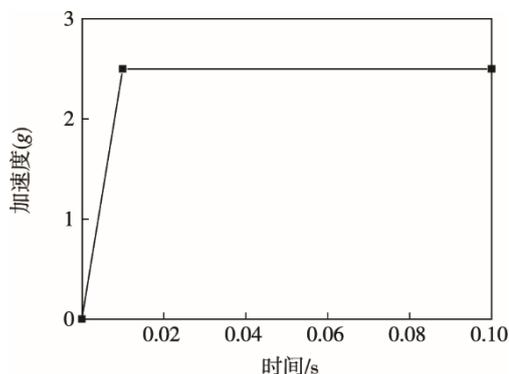


图4 包装箱起吊冲击载荷
Fig.4 Impact load curve of packing box

3 包装箱联吊动力学分析

根据动力学分析理论,结合包装箱-箱架系统的有限元模型,对其动力学特性进行分析,获得了系统在联吊工况下的动力学响应。并根据获得的系统各部位处最大应力结果,该校核该结构是否满足工程需要。

3.1 1×4联吊动力学响应

当包装箱-箱架系统以1×4方式进行起吊时,为了研究该过程中系统中的最大应力水平及最大应力出现的位置,采用瞬态动力学分析方法,对该动态过程进行模拟,获得了系统中箱架各部位处的应力、位移、加速度等响应结果。系统中最大应力的变化情况见图5。0.1s时系统的应力分布见图6a,0.1s时系统中最大应力部位见图6b。

由图5可以看出,在起吊过程中,箱架系统中的最大应力在60~78MPa范围内波动,且应力波动趋势逐渐趋于平稳。

由图6可以看出,包装箱架以1×4堆码方式在2.5g冲击联吊载荷作用下进行起吊时,系统中的最大应力区域主要集中在底部1号箱架和2号箱架的连接区域(箱架支撑腿和箱支撑板过渡区域),此刻系统最大应力为69.6MPa。箱架采用的材料为Q345

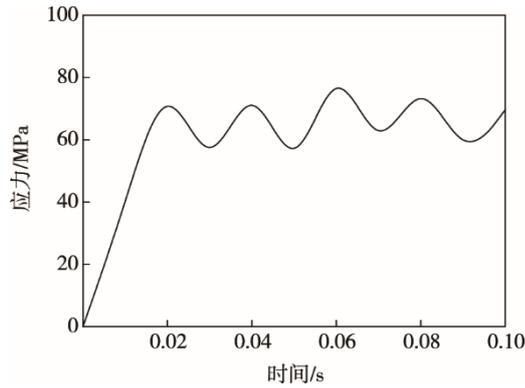


图 5 1×4 型联吊最大应力变化曲线
Fig.5 Maximum stress variation curve of 1×4 combined lifting

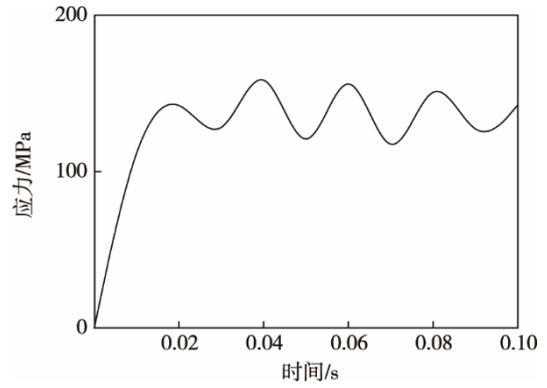
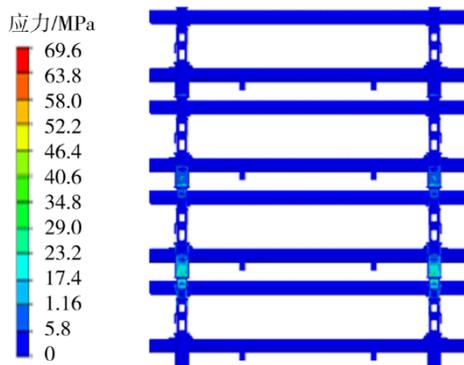
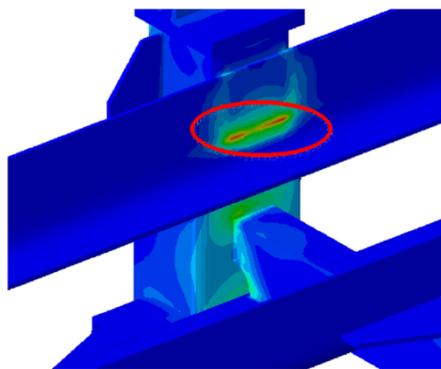


图 7 2×2 型联吊最大应力变化曲线
Fig.7 Maximum stress variation curve of 2×2 combined lifting



a 系统应力分布



b 局部应力分布

图 6 1×4 型联吊应力分布云图 ($t=0.1\text{ s}$)
Fig.6 Stress distribution cloud map of 1×4 combined lifting ($t=0.1\text{ s}$)

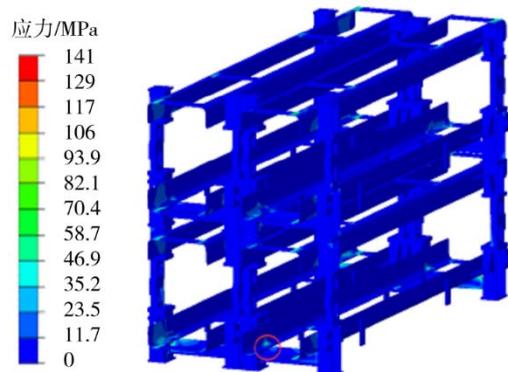
号钢材，起吊时的最大应力远小于材料的屈服强度，故采用 1×4 堆码方式，并以 2.5g 冲击联吊载荷起吊时，箱架结构不会发生强度破坏。

3.2 2×2 联吊动力学响应

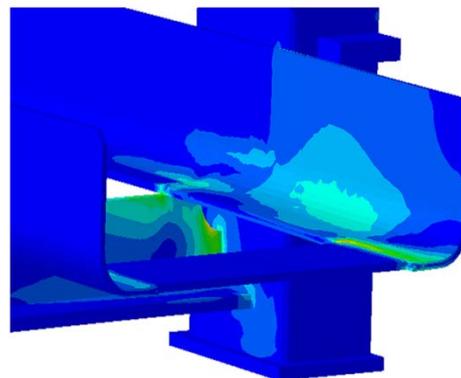
当包装箱架系统以 2×2 堆码方式进行起吊时，系统最大应力的变化情况见图 7。0.1 s 时系统的应力分布见图 8a，0.1 s 时系统中最大应力部位见图 8b。

由图 7 可以看出，在起吊过程中，箱架系统最大应力在 120~158 MPa 范围内波动，且应力波动趋势逐渐趋于平稳。

由图 8 可以看出，包装箱架以 2×2 堆码方式在 2.5g 冲击联吊载荷作用下进行起吊时，系统中的最大应力区域主要集中在底部箱架部位（箱架支撑腿、箱支撑板和横梁的连接区域），此刻系统最大应力为 141 MPa。箱架采用的材料为 Q345 号钢材，起吊时的



a 系统应力分布



b 局部应力分布

图 8 2×2 型联吊应力分布云图 ($t=0.1\text{ s}$)
Fig.8 Stress distribution cloud map of 2×2 combined lifting ($t=0.1\text{ s}$)

最大应力远小于材料的屈服强度,故采用 2×2 的堆码方式,并以 2.5g 冲击联吊载荷起吊时,箱架结构不会发生强度破坏。

综上所述分析结果可以发现,当对 4 个包装箱架系统进行联吊操作时,以 1×4 堆码方式起吊时的系统应力水平明显低于 2×2 堆码方式起吊时的应力水平。产生该现象的原因主要是由于 2×2 堆码方式增加了起吊时的横向距离。

4 试验验证

为了探究仿真分析的可靠度,文中通过试制样件并进行吊装试验对其验证分析。

4.1 试验目的和依据

验证新型包装箱在不同堆码工况下承受联吊载荷时,产品结构的合理性、耐压强度、抵御破坏的能

力。此试验依据《X 型包装箱工程研制阶段试验大纲》。

4.2 试验步骤

对外观一致检验合格的 4 件包装箱样件,进行吊装试验,具体步骤如下所述。

1) 将装有弹体样件的包装箱以 1×4, 2×2 堆码方式放置在坚实、平整的水泥地面。

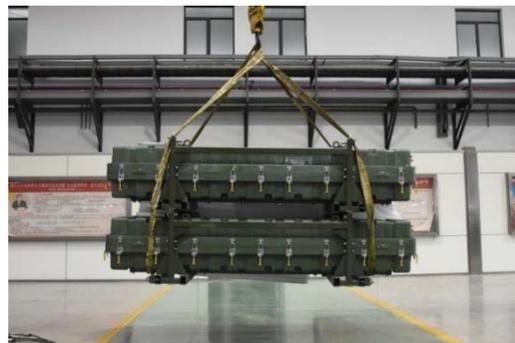
2) 将以 1×4 方式堆码的包装箱上下锁紧,随后启动行车,吊起联在一起的包装箱,距地面 1.5 m、行走 30 m 后放下,循环 3 次,目测检查包装箱的外形结构变化。

3) 将以 2×2 方式堆码的包装箱上下锁紧、左右锁紧,随后启动行车,吊起联在一起的包装箱,在距地面 1.5 m、行走 30 m 后放下,循环 3 次,目测检查包装箱的外形结构变化。

包装箱以 1×4, 2×2 堆码方式吊装试验见图 9。



a 1×4



b 2×2

图 9 包装箱联吊试验
Fig.9 Combined lifting test of packing box

4.3 试验结果

产品经吊装试验后,依据《X 型包装箱工程研制阶段试验大纲》的要求对样品进行检测,结果见表 2。

表 2 试验结果
Tab.2 Experimental results

试验项目	试验次数	试验结果
1×4型联吊试验	第1次	结构完好
	第2次	结构完好
	第3次	结构完好
2×2型联吊试验	第1次	结构完好
	第2次	结构完好
	第3次	结构完好

4.4 试验结论

包装箱进行吊装试验后,外观、尺寸均未发生变化,箱体无明显变形,无倒箱、塌箱、破损、裂纹,

包装箱架外形结构完好,无破损、无裂纹、无影响使用的永久性变形,试验结果符合《X 型包装箱工程研制阶段试验大纲》要求。

5 结语

文中采用新型包装箱代替传统的钢架包装箱结构,利用有限元分析方法,建立了不同堆叠方式的包装箱-箱架动力学仿真模型,研究了不同堆叠方式下,系统的动力学响应,获得了 2 种堆叠方式下箱架系统的最大应力,分别为 78 MPa 和 158 MPa,其最大应力明显小于材料的屈服强度,故结构不会发生强度破坏。此外,当对 4 个包装箱架系统进行联吊操作时,以 1×4 堆码方式起吊时系统的应力水平明显低于 2×2 堆码方式起吊时的应力水平。为了研究新型包装箱在联吊工况下的可靠性,文中采用试制样件进行试验测试,测试结果表明,新型包装箱以 1×4, 2×2 堆码方式在联吊试验工况下结构完好,符合《X 型包装箱工程研制阶段试验大纲》要求。

参考文献:

- [1] 刘承, 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, 33(2): 6—11.
LIU Cheng, LU Jie, CHEN Man-ru. Computer Simulation of Vibration Characteristics for the Product/Packages in Transportation[J]. Packaging Engineering, 2002, 33(2): 6—11.
- [2] 李蓓蓓. 防振结构设计原理[J]. 包装工程, 1996, 17(3): 30—32.
LI Bei-bei. Design of Ant-vibration Structure and Principle[J]. Packaging Engineering, 1996, 17(3): 30—32.
- [3] 智秀娟. 浅谈振动理论在缓冲防振包装中的应用[J]. 水利电力机械, 2005, 27(4): 41—43.
ZHI Xiu-juan. Discussion on the Application of Vibration Theories in Cushioning and Shockproof Packaging[J]. Water Conservancy and Electric Power Machinery, 2005, 27(4): 41—43.
- [4] 张鹏, 王文博, 王宏伟. ANSYS 软件在导弹包装设计中的应用研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(4): 53—57.
ZHANG Peng, WANG Wen-bo, WANG Hong-wei. The Application of ANSYS Software on Missile Packing Design[J]. Aeronautical Science and Technology, 2015, 26(4): 53—57.
- [5] 陈马旭, 乐贵高. 带泡沫缓冲的导弹跌落仿真[J]. 兵工自动化, 2014, 33(3): 34—35.
CHEN Ma-xu, LE Gui-gao. Simulation of Missile Drop with Foam Cushions[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(3): 34—35.
- [6] CHONHENCHOB V, SINGH S P, SINGH J J, et al. Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Delivering Packages in Small-sized and Medium-sized Trucks and Automobiles[J]. Packaging Technology & Science, 2012, 25(1): 31—38.
- [7] PAN D, QIN H Y, LIU S Q, et al. Optimal Structure Design of Mobile Phone Packing Box Based on Dynamic Analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556/557/558/559/560/561/562: 4664—4667.
- [8] LU F D, GAO D. 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.
- [9] XU J, WANG Y, LU X, et al. The Research of Cushioning Packaging Design Method in Logistics and Transportation for Honeycomb Paperboard[C]// International Conference on Remote Sensing, IEEE, 2011: 891—894.
- [10] LU J D, XU W C, ZHANG G M. The Dynamic Cushioning Property Analysis of Gasbag Packaging[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 37—41.
- [11] 王小明. 导弹吊具自动化设计系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
WANG Xiao-ming. The Research of the Missile Sling Automation Design System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [12] 方治华, 贾宏玉, 顾永强. 重物起吊过程两种动力学模型比较研究[J]. 机械研究与应用, 2007, 20(5): 24—25.
FANG Zhi-hua, JIA Hong-yu, GU Yong-qiang. Comparing Research of Two Mechanical Models in Lifting a Weight[J]. Mechanical Research & Application, 2007, 20(5): 24—25.
- [13] 李彬. 潜器起吊工况结构强度及模态分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
LI Bin. Strength and Modal Analysis of Composite Structure for under Water Vehicle in Lifting Condition[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [14] 胡亚. 某火箭炮运发箱优化设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
HU Ya. Optimization Design and Analysis of the Launcher of the Launching Canister of Storage and Transport[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [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 Characteristics of a New Structure Missile Packing Case[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 124—130.