

弹药包装运输动力学研究现状

刘跃龙¹, 安振涛¹, 李天鹏¹, 刘建国¹, 赵志宁²

(1.军械工程学院, 石家庄 050003; 2.国防大学 联合作战学院, 石家庄 050084)

摘要: **目的** 在总结现有包装动力学研究成果及不足的基础上, 为包装设计改进提出进一步的研究方向及相应措施。**方法** 从我军弹药包装历史与现代发展中所遇问题入手, 主要阐述近年来有关弹药包装动力学的模型构建、相关试验测试、数值分析方法等研究以及存在的不足。**结果** 现有包装的动力学模型构建大都基于线弹性、小变形假设, 与复杂的实际情况存在一定偏差。针对包装设计可靠性的试验所需模拟信号要进行一定的调整方能使用, 而不能单纯依靠标准所提供的试验谱形。另外, 虚拟激励法在其动力学响应分析上能够取得较好的分析结果。**结论** 弹药包装的设计研究仍存在一定的问题, 且对内部包装, 尤其是新型弹药的防护需要进一步加强。

关键词: 弹药包装; 动力学模型; 试验测试

中图分类号: TB485.1; TB489 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)23-0121-07

The Research Status of the Transportation Dynamics of Ammunition Packaging

LIU Yue-long¹, AN Zhen-tao¹, LI Tian-peng¹, LIU Jian-guo¹, ZHAO Zhi-ning²

(1.The Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2.Joint Staff College, National Defence University PLA China, Shijiazhuang 050084, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward the further research direction and relevant measures for the package design and improvement based on the summary of the existing research results and deficiencies of the package dynamics. Starting with the problems encountered in the history and modern development of the ammunition packaging in our army, the establishment of dynamic models, relevant tests, numerical analysis methods of relevant ammunition packages and the deficiencies in recent years were mainly elaborated. Most of the dynamic models of the existing packages were established based on the hypothesis of linear elasticity and small deformation, which resulted in certain deviation from the complicated reality. Moreover, the analog signals required by the test for package design reliability should be used after certain adjustment. However, the spectrum form simply provided according to the standards could not be relied on. In addition, the employment of pseudo-excitation method in its dynamic response analysis could obtain better analytical results. There are still so many problems remaining to be solved, especially in the protection for the inner package of a new type of ammunition.

KEY WORDS: ammunition packaging; dynamic models; experimental test

弹药作为必需装备在现代战争中不可替代的地位毋庸置疑, 但长期储存时, 外界各种影响因素的作用累积对弹药寿命极为不利。这类环境影响主要归因于温度、湿度、盐雾等因素, 并且已有深入研究^[1-4]。另外, 弹药具有在不利环境下易燃、易爆, 平时储备量多, 战时需求量大等特性, 都在不同程度上推动弹

药包装技术的快速发展。科学有效的弹药包装系统不仅能对弹药进行合理的防护, 有效减弱、阻隔不利环境侵害^[5](其中包括温度、湿度在内的自然环境侵蚀, 也包括运输过程中的冲击、振动等力学因素的损伤), 而且更有利于战时使用, 能够大大缩短弹药保障时间。虽然基于新材料、新设计的发展在近几年已取得

收稿日期: 2017-05-22

作者简介: 刘跃龙(1994—), 男, 军械工程学院硕士生, 主攻弹药运输力学分析。

通讯作者: 安振涛(1963—), 男, 军械工程学院教授、博导, 主要研究方向为装备运用环境与防护技术。

很大进步,但在设计与试验剪裁标准方面同外军依然有一定的差距^[6],仍存在许多亟待解决的问题。

1 弹药包装动力学模型

在较长时间内,我军弹药包装大多为木质包装箱,并采用炮油封存的简易包装方法^[5,7-8],其包装效果并不理想。由于当时受到弹种少、防护意识弱等条件限制,并未对弹药包装的研究产生足够重视。随着我国装备的日益发展,弹药包装的必要性愈发明显。经过一定的研究发展,我国弹药包装虽然取得显著进步,但相关文献^[8-9]分析表明,其形成了品种相对较多、外形结构有别、材料工艺各异、包装用材单一的特点。这显然不能适应新时期高效作战的要求,分析认为,其主要原因可归结于对弹药包装的动力学特性研究不充分,动力学模型构建得不够精细,相关试验设计、剪裁不合理,不能准确模拟现实情况下包装所经历的环境对其产生的影响等。

现有文献中,弹药包装运输的研究多是基于构建汽车公路运输的振动模型下考虑包装中弹药关重件的易损性^[10-12]展开的,并且通常情况下均构建便于模拟研究的线性模型^[13-16],这里所指的关重件主要是考虑引信的易损性。周彬^[10]等基于弹药安全性在于保证关重件的安全状态的假设,将弹药包装箱简化为二自由度模型后,采用 Matlab 与四阶龙格-库塔法进行仿真计算,并探讨了相关参数对引信冲击响应的影响程度。李海广^[11]主要针对 2 种主装弹中关重件的公路运输特性进行研究,分别模拟单层以及多层堆垛条件下弹药的振动特性,并通过实际运输试验验证所建模型的可靠度。Sen 等^[12]利用有限元分析软件研究评估了弹药在跌落条件下的安全性,并明确指出评估准则就是引信的安全状态是否改变。徐伟民^[13]等在忽略车辆悬架系统与轮胎质量的前提下,构建四自由度的车辆-包装件动力学模型,该模型基于包装件被牢固捆扎在车厢上的假设,因此不计两者之间的弹性与阻尼,但单独建立包装件内部的单自由度缓冲模型来研究对冲击载荷的响应。文献^[14]在建立相同动力学模型和进行相同假设的基础上,更进一步模拟了包装件在振动与冲击耦合作用下的响应,但该模型并不完全符合复杂的非线性车辆-包装件运输系统,且未将多层运输的实际情况纳入模型构建中。王列妮^[15]则基于汽车与包装件的线性二自由度系统振动模型,求解出包装件在外界激励下的响应加速度、功率谱密度函数等参数,最后分析计算了包装件的可靠性。

在大多数的工程实际应用分析中,多忽略其非线性特征,采用线性模型来简化运算,因此,在计算及以后的设计中不可避免地会出现一定的误差^[16-17]。吴晓^[17]等根据三次函数型表征的包装系统非线性特征,构建单自由度的动力模型与方程,然后利用谐波平衡

法与直接积分法探究了系统的非线性特征。该文献虽然仅针对瓦楞纸箱这种非线性材料进行研究,但就实际应用中同样具有非线性特征的弹药包装箱响应特性分析而言,也具有一定的参考价值。WANG^[18]等构建考虑包装缓冲特性在内的多自由度非线性包装系统,并模拟由高处跌落产生的冲击所造成的响应,还进一步讨论了包装非线性缓冲特性在保护内装物所起到的积极作用。王军^[19]等考虑包装系统复杂的结构,且较大部分缓冲材料具有正切型非线性弹性的事实,重点分析了冲击作用下具有该特性缓冲材料的响应特征。黄秀玲^[20]认为包装箱易损件的损坏才是导致包装失效的首要原因,基于此,对具有三次非线性特征系统易损件的冲击特性进行研究,其成果为包装设计提供了新的思路。李小丽^[21-22]等也研究了三次函数型的非线性包装系统的冲击特性,且采用 Simulink 模块进行模拟仿真,并测定了 3 种不同包装材料的抗冲击性能,为实际包装设计起到辅助作用。另外, Melan^[23]等设计了一种主要面向大口径后装炮弹且重点保护战斗部、底火的薄壳包装,完全摒弃了笨重的箱式包装,虽然可以大幅度减小无效包装质量,但包装的耐运输性值得进一步研究。

包装内二次缓冲材料的研究应用对弹药的运输储存安全也具有一定意义。缓冲包装通常是由外包装容器+中间缓冲介质+内包装物构成,并且具有非线性载荷-位移关系的系统^[24]。缓冲材料必需的特性之一:能够最大限度地吸收运输中冲击、振动产生的能量,从而达到减弱或避免包装内弹药所受到损伤的可能性。郭振斌^[25]在探究某型柱状空气垫刚度特性的基础上,建立了相应的动力学方程,并进一步研究了气垫的振动冲击特性,为气垫型缓冲包装的设计及应用提供一定的参考价值。文献^[26]则就某种新型灵巧弹药的防护包装以及缓冲减震问题进行探讨,测试了包装有不同体积密度与缓冲结构的泡沫塑料对不同密度弹药样品的缓冲性能。Rivin^[27]等论述了被动隔振系统的动力学特性及相关的工程应用准则。Smirnov^[28]等研究比较了线性与非线性隔振系统对精密器件的防护效能,结果发现非线性隔振系统的防护效率在低频振动区间要高于线性系统。意大利学者 Frano^[29]针对辐射废物包装箱的跌落仿真及试验结果进行了研究,其采用仿真与试验相互验证包装跌落可靠性的方式值得借鉴。

王蕾^[30]以悬挂式缓冲包装系统为研究对象,研究分析了该几何非线性系统的动力学性能,探讨了各项相关因素对系统振动、冲击响应的影响。悬挂式缓冲包装是将产品使用柔软塑料泡沫衬垫后包装于纸盒内,再用帆布裹覆纸盒后,利用弹簧吊在外包装箱中的缓冲包装系统,可见其复杂性。对弹药包装而言,显然其不合理性更大一些,但经适当改进后,可考虑

用于分装式的引信等关键件的包装。

缓冲材料的价值不言而喻,但值得考虑的是现有弹药包装容积有限,加入类似这种气垫或塑料缓冲材料是否或者能在多大程度上起到缓冲作用,都值得进一步的实验探究。另外,弹药大部分的寿命都是在储存中度过,少则 5 年,多则 20 年,甚至更久。这种情况下,需进一步深入研究缓冲材料的有效性对弹药本身安全是否产生一定的影响,缓冲材料的存在是否将大大提高战时弹药的保障能力,因此,轻便、高效、无害的缓冲材料将是研究的重点方向。

2 弹药包装试验

伴随着国家公路网的建设与我军保障体系的日臻完善,担负中、短途弹药运输保障的公路运输,因其承转速度较快、灵活便捷等特点,已成为主要的运输手段之一。公路运输中因紧急制动、转向等因素造成的冲击与路面不平度引起的随机振动是两项控制研究方向的主要因素^[17,24,31],而其他绝大多数环境应力对运输中弹药安全属于小的干扰力,很少或基本不改变弹药的安全状态^[32]。李金明^[33]通过研究不同型号迫弹在不同跌落高度以及不同缓冲层厚度条件下的响应特性后,提出弹药运输过程中受冲击损伤时的极限条件,为相应的弹药运输安全性评估提供了一定的理论依据。金潇明^[34]同样指出引起包装系统在流通过程中破坏的 2 种主要载荷为冲击与随机振动,分析认为虽然由冲击引起的响应加速度远大于随机振动,但由于作业机械化水平的提高,包装系统所受冲击的可能性较小,并且实际运输过程中系统所受激励也多为随机振动,因此,包装系统对运输过程中随机振动的响应将作为重点研究方向。Kendre^[35]通过研究测定得出在三轮汽车启动装置的垂直地面方向振动幅值最大,这与已有研究^[36-37]较一致,同时也可确定在弹药运输时的主要考虑振动因素。

杨会军^[36]等认为弹药运输过程中的安全与否同弹药在装运卸等勤务过程中其振动特性有较为密切的关系,简要介绍了相关振动力学模型,并对振动随机过程进行了模拟,最后就汽车装运卸弹药的基本要求作出归纳。文献^[37]则充分分析了卡车进行弹药运输时的力学环境,测试了卡车装卸、运输冲击特性,与公路运输的随机振动环境,并结合弹药运输时实际操作的要求,提出关于卡车运输弹药的几点要求。

理论及仿真研究均需试验验证其准确性。朱学旺^[38]等按照加载方式的不同,将包装的振动试验研究分为振动台试验、实地跑车试验、道路模拟系统试验以及室内模拟试验。其中,实地跑车试验能够直接获得真实的包装振动数据,对现役包装改进及新包装的

研究大有帮助,可以更好应对实际运输中的振动环境,从而有效发现包装的缺陷不足。康甜^[39]等也将实地跑车试验所测得的路谱作为制定模拟公路运输振动试验的首选,但受其试验场地,即道路等级选择、车型、时间以及试验费用的多种因素影响,实地跑车试验应用并不广泛。姚国年^[40]等也认为实地跑车试验存在较多难以克服的缺点,因此建议采用可控性好、可重复性强、消耗低的振动台试验,而进行振动台试验的关键在于获取准确可靠的汽车公路运输振动谱。一般所测振动谱均为运输车辆车厢地板的振动谱,而并非弹药包装箱或弹药本身的振动谱,这样测得的振动谱正符合将振动台作为运输车辆车厢地板输入激励的实际情况。另外,针对某一类型运输车在某一等级公路的路谱测定后,稍加修正即可用于不同类型弹药的运输模拟,能够节约大量的人力物力。

遗憾的是,如前所述,由于实地跑车试验进行得不够充分,所测得的标准路谱较少,难以满足实际需求,只有参照相关标准中的试验谱进行测试。现有文献^[41-43]指出,如若完全按照标准中所提供试验谱形与量值进行试验,很大程度上将会出现欠试验或过试验,甚至与实际环境条件相去甚远的现象,难以发现包装设计的真正缺陷所在,从而达不到试验效果。这主要是因为 GJB 150A 基本是参照 MIL-STD-810G 来编纂修订的,实际应用时需加以必要的修正。

大体上来说,振动台试验一般被设计成加速试验,以便最短时间内能够了解包装箱的设计不足。朱学旺^[44]等研究了 GJB 150.16A 中有关试验加速因子的适应性情况,得出在设计包装品的运输试验时要考虑实际工况影响的结论。文献^[45]指出加速试验的目的在于保持破坏面的状态,这一状态同时又是振动频率的函数,因此要求振动特性不能改变,分析认为提高振动量值要比改变振动频率特性可行。

振动台试验为在消耗最低的条件下模拟真实振动环境条件,以达到检验产品对振动的不良响应,是包装定型所不可缺少的技术环节。在实际操作过程中,许多问题有必要进行详细考虑。

1) 实验目的,即是否要求样品出现峰值破坏,也就是加速因子的确定。唐文^[43]等虽有加速因子表达式推导,但最终提出加速因子要基于实际工程的考虑进行取舍,这无疑增大了得到高可靠性试验结果的难度。

2) 测试时间。在加速振动试验测试时间与实际运输环境下包装的振动时间两者相互等效转化的问题上并没有统一认可的公式,一些经验公式也仅针对某些特殊情况下才具有一定的效用^[44],但仍然会存在一定的误差。由此,加速振动试验的时间控制问题也应当具体分析,根据路面等级、包装材料、堆垛情况等具体分析。

3) 响应分析方法。廖俊^[46]分析近年来常用的线性随机振动分析方法主要有模态叠加法、传递矩阵法、虚拟激励法等。其中虚拟激励法由大连理工大学林家浩教授首先提出,并逐渐发展完善成为一种效率、精度都较高的新型算法^[47]。该算法不仅在车辆运输振动方面具有较好运用,在船舶以及国防工程中都有大量应用^[48]。

4) 振动激励输入。实际振动激励中存在大量的非高斯特征时,传统响应分析方法将“失真”,蒋瑜^[49]等提出一套采用幅值调制与相位重构的非高斯随机振动的模拟算法,对具有超高斯、亚高斯随机振动特征的数值仿真具有较好效果。

5) 其他问题。诸如振动台试验中样品夹具设计、安装及其对试验的影响,相关对策^[50],试验样品数量的选择^[51]等问题,均能影响到最终测试结果。

3 结语

单就对包装的安全、可靠性研究而言,果蔬等农产品的运输包装研究更为广泛、深入,时间也更久,同果蔬类似,弹药同样是易损件,在运输过程中主要承受振动与冲击这两项环境力。防护不充分时,果蔬的经济价值会遭到一定程度的损坏,但不同的是,弹药若防护不足,造成的后果往往要严重得多。对果蔬运输中包装缓冲系统的研究可以相应地借鉴到弹药包装防护上来,但安全等级要根据实际作出必需的调整。

1) 总结分析不难发现,我军弹药包装防护技术形势依然较为严峻。不断研制的新型弹药使得针对该类弹药的包装技术越来越复杂化,其中关重件的防护更是重中之重,尤其对制导弹药中由精密零件组成的控制舱的包装防护。包装系统的动力学建模,同实际运输系统会出现一定的偏差,模拟结果自然不会十分精确。对包装系统中实际存在的非线性特征要予以一定的模拟表征,而不能以简约计算过程为目的进行忽略。

2) 精确模型的建立需要理论指导和大量试验数据的支撑。动力学特性的确定也离不开试验的验证,而试验的复杂性又可能使得结果偏离预期。这就需要试验中可能出现的各种影响因素进行预先分析研究,并不断进行试验对比分析,以排除干扰。同时,因试验数据,例如实地跑车试验振动谱难以获得,不得不采用军标中的标准谱,这无疑也将一定程度地增大试验误差,因此应针对军标中标准谱的修正系数进行专门研究。

3) 目前关于弹药包装运输研究多是分析对弹药某关重件的响应情况,较少针对药筒中发射药的安全状态进行研究。发射药在经历长距离或长时间运输后是否发生变化,这些变化是否能够改变其安全状态、

燃烧性能等都需要进一步研究确定。

参考文献:

- [1] 姚恺,吴雪艳,安振涛,等.新型涂料在弹药储运环境防护中的运用研究[J].装备环境工程,2006,3(5):53—57.
YAO Kai, WU Xue-yan, AN Zhen-tao, et al. Application Research of a New Type Coating in Ammunition Storage and Transportation Protection[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(5): 53—57.
- [2] 艾云平,刘琼,冯钟林,等.浅析湿度对海岛弹药储存的影响[J].物流工程与管理,2013,35(3):146—147.
AI Yun-ping, LIU Qiong, FENG Zhong-lin, et al. Brief Analysis the Influence of Humidity on Ammunition Storage of Island[J]. Logistics Engineering and Management, 2013, 35(3): 146—147.
- [3] 罗天元,吴波,但渝霞.弹药环境适应性设计需要考虑的几个问题[J].装备环境工程,2007,4(1):62—66.
LUO Tian-yuan, WU Bo, DAN Yu-xia. Problems Needed to be Considered in Ammunition Environmental Worthiness Design[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 62—66.
- [4] 高玉龙,易建政,王海丹.弹药储存环境对弹药质量的影响[J].装备环境工程,2010,7(5):77—78.
GAO Yu-long, YI Jian-zheng, WANG Hai-dan. Influence of Storage Environment on Ammunition Quality [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 77—78.
- [5] 王波,易建政,段志强,等.坑道储存弹药环境防护综述[J].装备环境工程,2010,7(4):63—66.
WANG Bo, YI Jian-zheng, DUAN Zhi-qiang, et al. On Ammunition Protection in Underground Tunnel Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(4): 63—66.
- [6] 张利.美军弹药产品验收方案新标准及六西格玛质量控制技术研究[D].南京:南京理工大学,2011.
ZHANG Li. Study on Quality Control of New Standard Military Ammunition Product Approval Scheme and Six Sigma[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [7] 高廷如,高欣宝,傅孝忠.我军弹药包装现状与发展设想[J].中国包装,2000,20(2):34—37.
GAO Ting-ru, GAO Xin-bao, FU Xiao-zhong. The Present Condition and Development Ideas for Ammunition Packaging in China Army[J]. China Packaging, 2000, 20(2): 34—37.
- [8] 谭艳.国内外弹药包装材料的研究进展[J].材料导报,2013,27(21):375—377.
TAN Yan. Research Progress on Ammunition Package Worldwide[J]. Materials Review, 2013, 27(21): 375—377.

- [9] 高欣宝, 王波, 李天鹏. 包装对弹药包装保障时效的影响[J]. 军械工程学院学报, 2006, 18(3): 28—30.
GAO Xin-bao, WANG Bo, LI Tian-peng. Influence of Packing on the Efficiency of Ammunition Support[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2006, 18(3): 28—30.
- [10] 周彬, 安振涛, 甄建伟, 等. 跌落条件下箱装弹药安全性的数值评估[J]. 包装工程, 2009, 30(5): 50—53.
ZHOU Bin, AN Zhen-tao, ZHEN Jian-wei, et al. Numerical Evaluation of Packaged Ammunition Security under Condition of Dropping[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5): 50—53.
- [11] 李海广. 弹药公路运输振动特性及安全性评估研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2014.
LI Hai-guang. Research on Ammunition Vibration Characteristics and Safety Assessment under Highway Transportation[D]. Shijiazhuang: The Ordnance Engineering College, 2014.
- [12] SEN Y, QING X. Numerical Simulation of Impact Acceleration on the Key Parts of Packing Ammunition on Condition of Dropping[C]// Third International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering, 2012: 1177—1179.
- [13] 翟萍依. 汽车平顺性脉冲输入形式试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
ZHAI Ping-yi. Experimental research on vehicle comfort under pulse input[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [14] 张秀梅, 徐伟民. 路面多种激励下汽车运输包装产品动态响应的数值仿真[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 67—70.
ZHANG Xiu-mei, XU Wei-min. Numerical Simulation of Packaging Product Dynamic Response under Two Excitations[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 67—70.
- [15] 王列妮. 道路危险货物包装件动力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
WANG Lie-ni. The Dynamic Characteristics of Package of Dangerous Goods in Road Transport[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [16] 唐红春, 史永高, 李东福. 塑料包装筒冲击强度的分析[J]. 西安工业学院学报, 2006, 26(2): 159—161.
TANG Hong-chun, SHI Yong-gao, LI Dong-fu. Research on Impact Strength of Plastic Packing Box[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2006, 26(2): 159—161.
- [17] 吴晓, 罗佑新, 杨立军. 基础位移激励下斜支撑弹簧减振系统的震动[J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 115—117.
WU Xiao, LUO You-xin, YANG Li-jun. Vibration of Shock Absorber System with Titled Support Spring under Displacement Excitation of Foundation[J]. Journal of Vibration and Shocks, 2009, 28(11): 115—117.
- [18] WANG Y Q, LOW K H. Damped Response Analysis of Nonlinear Cushion Systems by a Linearization Method [J]. Computer and Structures, 2005, 83(19): 1584—1594.
- [19] 王军, 王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损件的正切型包装系统冲击特性研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 167—168.
WANG Jun, WANG Zhi-wei. 3-D Mensional Shock Response Spectra Characterizing Shock Response of a Tangent Packaging System with Critical Components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1): 167—168.
- [20] 黄秀玲, 王军, 卢立新, 等. 三次非线性关键部件冲击响应影响因素分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 179—181.
HUANG Xiu-ling, WANG Jun, LU Li-xin, et al. Factors Influencing Shock Characteristics of Cubic Non-linear Packaging System with Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 179—181.
- [21] 李小丽. 非线性缓冲包装系统冲击特性的仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
LI Xiao-li. Simulation Study on Shock Property of Package Cushioning System with Non-linearity[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.
- [22] 李小丽, 郭彦峰, 刘志鹏. Matlab/Simulink 仿真技术在缓冲包装的应用[J]. 中国包装, 2003(6): 92—94.
LI Xiao-li, GUO Yan-feng, LIU Zhi-peng. Application of Shock Properties of Cushioning Packaging Based on Matlab/Simulink[J]. China Packaging, 2003(6): 92—94.
- [23] MELAN M, THIESEN S. Packaging Container for Large-caliber Ammunition: US, 6019217[P]. 2000-02-01.
- [24] 智秀娟, 周林森. 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, ZHOU Lin-sen. Discussion on the Application of Vibration Theories in Cushioning and Shockproof Packaging[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2005, 27(4): 41—43.
- [25] 郭振斌. 缓冲气垫包装系统振动机理及特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
GUO Zhen-bin. Research on the Vibration Mechanism and Characteristic of Packaging System with Air Cushion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [26] 李金龙, 朱宏, 赵耀辉, 等. 灵巧弹药缓冲减震性能试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(3): 83—86.
LI Jin-long, ZHU Hong, ZHAO Yao-hui, et al. The Study of Shock Absorption and Buffering Property for Smart Ammunition[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(3): 83—86.
- [27] EUGENE I. Passive Vibration Isolation[M]. New York: ASME Press, 2003.

- [28] SMIRNOV V, MONDRUS V. Comparison of Linear and Nonlinear Vibration Isolation System under Random Excitation[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 153: 673—678.
- [29] FRANO R, 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: 40—49.
- [30] 王蕾. 悬挂式缓冲包装系统动力学性能的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
WANG Lei. Research on Dynamic Characteristic of Suspension Cushioning Packaging System[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [31] 王军, 卢立新, 王志伟. 产品破损评价及防护包装力学研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(8): 43—45.
WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Product Damage Evaluation and Protective Packaging Dynamics[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(8): 43—45.
- [32] 安振涛, 李飞, 李金明, 等. 弹药公路运输安全影响因素分析及防护[J]. *工业安全与环保*, 2011, 37(9): 21—23.
AN Zhen-tao, LI Fei, LI Jin-ming, et al. The Effect Factor Analysis and Defence of the Ammunition Transportation Safety[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2011, 37(9): 21—23.
- [33] 李金明. 储运力学条件下典型弹药安全评估与防护对策研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2007.
LI Jin-ming. Study on Evaluation and Fense Countermeasure of the Typical Ammunition Safety in Mechanical Condition[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2007.
- [34] 金潇明. 包装系统在随机振动下的破坏准则与疲劳计算[J]. *株洲工学院学报*, 1999, 13(1): 13—16.
JIN Xiao-ming. Damage Criterion and Fatigue Calculation of Packaging System under Random Vibration [J]. *Journal of Zhuzhou Institute of Technology*, 1999, 13(1): 13—16.
- [35] KENDRE R. Random Vibration Analysis for Starter Motor of Three Wheeler Automobile[C]// 12th International Conference on Vibration Problems, 2015, 1381—1388.
- [36] 杨会军, 田润良, 赵世宜, 等. 汽车装运弹药的振动特性与安全可靠性研究[J]. *装备环境工程*, 2009, 6(6): 24—27.
YANG Hui-jun, TIAN Run-liang, ZHAO Shi-yi, et al. Study on Vibration Features, Safety and Realiability of Auto Loaded and Transported Ammunition[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2009, 6(6): 24—27.
- [37] 李金明, 安振涛, 丁玉奎, 等. 卡车运输弹药力学环境及防护要求[J]. *物流技术*, 2004(10): 66—67.
LI Jin-ming, AN Zhen-tao, DING Yu-kui, et al. Motive Environment and Protection Condition of Ammunition in Truck Conveyance[J]. *Logistics Technology*, 2004(10): 66—67.
- [38] 朱学旺, 范宣华, 宁佐贵. 特种包装产品公路运输环境振动室内模拟实验研究[J]. *强度与环境*, 2008, 35(1): 6—12.
ZHU Xue-wang, FAN Xuan-hua, NING Zuo-gui. Test Research in lab on a Missile Warhead Subjected to Transportation Vibration Environment[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2008, 35(1): 6—12.
- [39] 康甜, 李春丽, 蒋华兵. 模拟公路运输的随机振动试验谱及调整方法研究[J]. *航天器环境工程*, 2015, 32(5): 532—536.
KANG Tian, LI Chun-li, JIANG Hua-bing. Adjustment Method for Random Vibration Test Conditions in Simulations of Road Transportation[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, 32(5): 532—536.
- [40] 姚国年, 张卫东, 赵辉. 弹药公路运输随机振动特性分析[J]. *测控技术*, 2004, 23(7): 67—69.
YAO Guo-nian, ZHANG Wei-dong, ZHAO Hui. Random Vibration Characteristic Analysis of the Ammunition During Road Transportation[J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(7): 67—69.
- [41] 马升, 徐明. 振动环境试验条件的确定[J]. *航空标准化与质量*, 2004(2): 38—43.
MA Sheng, XU Ming. Determination of Vibration Environment Test Conditions[J]. *Aviation Standardization & Quality*, 2004(2): 38—43.
- [42] 姚国年, 卫军胡, 王丽娟, 等. 特种产品运输振动加速度模拟试验条件的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(3): 74—77.
YAO Guo-nian, WEI Jun-hu, WANG Li-juan, et al. Experimental Conditions of the Accelerated Vibration Simulation for Special Product Transportation[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(3): 74—77.
- [43] 唐文, 修建生, 方洪荣, 等. 结构动力学疲劳损伤等效关系的研究[J]. *强度与环境*, 2013, 40(6): 33—38.
TANG Wen, XIU Jian-sheng, FANG Hong-rong, et al. Research on Vibratory Fatigue Equivalency of Structure[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2013, 40(6): 33—38.
- [44] 朱学旺, 张思箭, 刘青林, 等. 包装产品公路运输环境模拟试验的加速因子[J]. *包装工程*, 2014, 35(15): 44—47.
ZHU Xue-wang, ZHANG Si-jian, LIU Qing-lin, et at. Discussions on the Accelerated Factor of Highway Transportation Environment Test for Packaged Products in Lab[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(15): 44—47.
- [45] 王保乾. 用数控电子-液压振动台模拟整体大件产品的公路运输试验[J]. *环境技术*, 2000(2): 2—8.
WANG Bao-qian. Using Numerical Control Electro-hydraulic Shaker to Simulate Road Transportation Test for Whole Product[J]. *Environmental Technology*,

- 2000(2): 2—8.
- [46] 廖俊. 基于正交分解的随机振动响应分析与随机载荷识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LIAO Jun. Research on Response Analysis of Structure Random Vibration and Random Loading Identification Based on Orthogonal Decomposition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [47] 林家浩. 随机地震响应的确定性算法[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1): 89—93.
- LIN Jia-hao. A Deterministic Method for the Computation of Stochastic Earthquake Response[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1985, 5(1): 89—93.
- [48] 林家浩, 张亚辉, 赵岩. 虚拟激励法在国内外工程界的应用回顾与展望[J]. 应用数学和力学, 2017, 38(1): 1—31.
- LIN Jia-hao, ZHANG Ya-hui, ZHAO Yan. The Pseudo-Excitation Method and Its Industrial Application in China and Abroad[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(1): 1—31.
- [49] 蒋瑜, 陶俊勇, 王得志, 等. 一种新的非高斯随机振动数值模拟方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19): 169—173.
- JIANG Yu, TAO Jun-yong, WANG De-zhi, et al. A Novel Approach for Numerical Simulation of a Non-Gaussian Random Vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(19): 169—173.
- [50] 朱彦彬, 许秀民, 李德葆, 等. 兵工器件振动环境试验中的若干问题[J]. 真空电子技术, 1997(1): 5—10.
- ZHU Yan-bin, XU Xiu-min, LI De-bao, et al. On Several Important Points in the Process of the Vibrational Environment Test for the Parts of Military Equipment[J]. Vacuum Electronics, 1997(1): 5—10.
- [51] 李海龙. 基于可靠性理论的包装的振动试验技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- LI Hai-long. The Research of the Method of Vibration Experiment in Package Based on Reliability[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.

《智能包装与活性包装》特色栏目征稿函

智能包装与活性包装是包装工程技术领域的发展趋势,也是全球包装行业研发和应用的焦点。智能包装新技术与活性包装新材料的应用,能改善包装物条件的体系(通过释放物质、排除或抑制SU),延长包装物使用寿命;提高卫生安全性;改善气味和口感特性的同时保证其品质不变。利用新型的包装材料、结构与形式对商品的质量和流通安全性进行积极干预与保障,通过信息收集、管理、控制与处理技术完成对运输包装系统的优化管理等。

鉴于此,本刊拟围绕“智能包装与活性包装”这一主线,作系列专项报道。本刊编辑部特邀请相关专家为该栏目撰写稿件,以期进一步提升本刊的学术质量和影响力。稿件以研究论文为主,也可为综述性研究,请通过网站投稿,编辑部将快速处理并优先发表。

编辑部电话: 023-68792294 网址: www.packjour.com

《包装工程》编辑部