

包装件跌落冲击研究现状

田静敏, 黄秀玲

(上海大学, 上海 200072)

摘要: **目的** 介绍包装件的跌落冲击研究现状。 **方法** 从跌落冲击机理、冲击动力学、试验和仿真模拟等方面详细讨论其发展现状, 并指出各方面存在的问题。 **结果** 对于跌落冲击机理, 太多的经验公式忽略了时间、阻尼、摩擦等因素的影响, 物理试验不仅试验周期长、试验成本高, 且很难观察到包装产品内部冲击后的变化特性, 理论分析只局限于对简单的单自由度包装系统的研究, 模拟仿真技术解决了物理实验和理论分析的弊端。 **结论** 目前的模拟仿真技术还很不成熟, 很多数据库还未建立。

关键词: 包装件; 跌落冲击; 分析方法; 仿真模拟

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0199-05

Status of Package Dropping Impact Research

TIAN Jing-min, HUANG Xiu-ling

(Shanghai University, Shanghai 200072)

ABSTRACT: The research status of package dropping impact was introduced. The development status of package dropping was discussed in detail from four aspects, including dropping impact mechanism, impact dynamics, test and simulation, and the problems in every aspect were pointed out. The influences of factors such as time, damping and friction were neglected in many empirical formula about dropping impact mechanism; Physical test has a long test period and high test cost, and it is difficult to observe the internal change characteristics of packaging products after impact. Theoretical analysis is only suitable for studying simple single degree of freedom packaging system. The simulation technology solves the disadvantages of physical experiments and theoretical analysis. The simulation technology is very immature at the moment, and many databases have to be established in future.

KEY WORDS: package; dropping impact; analytical method; simulation

随着经济的发展, 我国渐渐成为了世界制造大国。在经济全球化的影响下, 我国的进出口贸易一直呈现蓬勃上升的趋势。近年来互联网技术的高速发展使得越来越多的人加入到网购行列。制造业的兴起、进出口贸易的蓬勃上升以及网购热潮所带来的是产品的运输和包装问题, 因此, 各种产品的运输包装的可靠性已成为无论是国际贸易还是国内贸易不可缺少的重要环节。怎样将产品完好无损地运往世界各地消费者手中就成为运输包装件产品的热点问题^[1]。避免产品在流通过程中损坏的一个有效手段是提高产品运输包装的可靠性^[2]。振动和

冲击是导致包装件产品在运输和搬运过程中损坏最主要的原因^[3-4]。其中跌落冲击对产品所造成的冲击较大, 容易超出产品的固有脆值, 使产品损坏^[5-6]。根据相关统计, 有近 80% 的产品损坏都来自跌落冲击^[7-8]。冲击是指在短暂并且强烈的动态力作用下, 物体的运动状态发生剧烈变化^[9], 因此产品包装件的跌落冲击可靠性成为了包装工程研究者十分重视的课题之一。如何使产品包装达到预计的设计意图, 如何在流通过程中保证产品免遭破损, 需要对包装件进行性能测试, 以此来评估产品包装的防护程度。文中从跌落对包装件的影响机理、冲击动力

收稿日期: 2015-10-31

作者简介: 田静敏 (1988—), 女, 山东济宁人, 上海大学硕士生, 主攻包装技术。

通讯作者: 黄秀玲 (1978—), 女, 山东青岛人, 博士, 上海大学副教授, 主要研究方向为包装技术、运输包装。

学、跌落试验以及仿真模拟等方面进行探讨分析,为研究提高产品包装的跌落冲击可靠性提供研究思路。

1 跌落冲击机理研究现状

近年来,国内外很多学者在包装件跌落冲击机理研究方面取得了一系列的重要成果,从最初提出的脆值理论到后来的破损边界理论,这些都为研究跌落冲击提供了有力指导。

1.1 国内外跌落冲击机理研究现状

首先提出脆值概念的是国外的 Mindlin,他认为产品包装件所承受的峰值加速度是否超过峰值直接决定了产品包装件的破损失效与否^[10]。首次提出疲劳破损边界曲线理论的是 Gary J. Burgess 等人,他们对 ASTM 标准中评估脆值测试程序的适用性进行了研究探讨,并形成了损坏边界理论^[11]。Newton 根据破损边界概念作出了损坏边界曲线,此曲线的纵坐标代表产品受到冲击后的易损度,横坐标代表产品在受冲击过程中速度的变化量^[12]。Schell 将产品受冲击时的加速度脉冲的平均值和后峰锯齿波同时使用^[13]。Goff 和 Pierce 建议在测定产品受冲击后的破损边界时使用半正弦脉冲^[14]。

在国内王振林等人首先提出了被包装产品的位移易损度和损坏边界理论,他们还结合产品跌落冲击时的加速度损坏边界确定了产品的安全区域,与此同时还讨论了 2 种损坏边界的关系^[15]。王军不仅建立了将被包装产品的关键部位考虑在内的二维包装系统模型,还提出了三维的跌落冲击响应谱和跌落冲击破损边界曲面^[16]。王志伟通过对非线性包装系统跌落冲击时的响应特性的研究,得到了包装系统冲击响应频谱和跌落破损边界,并且考虑到实验很难获取跌落过程中的脉冲信号以及 Newton 的传统边界破损理论在应用上所产生的局限性,提出了评价跌落破损的新思想,即将包装系统的特征参数和无量纲情况下的初始跌落速度这两点作为评价跌落破损的基本量^[17-18]。谢勇、宋宝丰等人通过冲击响应频谱技术来反应被包装件中易损零件在临界状态下加速度值的大小。冲击响应谱技术不仅简化了产品包装件破损状态的合理界限,使其可以进行直接分析,而且还提高了产品包装件缓冲设计的合理性^[19-20]。

1.2 存在问题

跌落冲击机理研究方面,经验公式和力学分析是机理研究的主要方面,并且经验公式是通过大量的实验数据进行统计、分析和总结得出来的。由于经验公式忽略了时间、阻尼、摩擦等很多因素的影响,因此在研究中利用这种公式得到的只是一个近似的结果。对于力学分析方法,首先是将分析的系统对象模型进行简化,然后通过建立运动方程对结构系统的激励和响应进行计算,最后得到相对简洁的物理量关系。这种方法对于比较简单的单自由度是可行的,但是如果碰到复杂的多自由度,计算量会相当大^[21]。再者对于后来的破损边界理论,研究者们只是提出了很多种界定方法,而没有具体、统一地提出一种边界数据作为评价产品包装跌落可靠性的依据。

2 跌落冲击动力学研究现状

对于跌落冲击动力学方面的研究,早在 17 世纪英国的物理学家牛顿就曾做过相关的研究,他不仅研究了弹性物体的跌落冲击问题,还提出了碰撞恢复系数的概念^[22]。Suhir 通过深入研究单质量弹簧阻尼模型,得到了系统冲击响应会受到非线性弹簧以及黏性阻尼的影响^[23-24]。美国的 Mindlin 提出了包装动力学理论,并提出了在跌落冲击环境中包装件的运动规律^[25]。国内的一些研究者在跌落冲击动力学方面也取得了显著成绩。太原科技大学的许富华等人将摩擦效应考虑到了包装件的跌落冲击响应中,他们分析了在摩擦力为常数和二次非线性函数等 2 种干摩擦模型下产品的最大加速度以及位移响应的变化,并得到了库仑干摩擦力对产品的影响可以忽略不计的结论,为研究包装件跌落冲击响应提供了依据^[26]。上海交通大学的刘芳等人从黏弹性角度研究了电路板组件跌落冲击作用下的动力学特性,研究表明电路板的黏性系数和尺寸对板的动力学特性有显著影响^[27]。

3 物理实验和跌落仿真研究现状

3.1 物理实验研究现状

最传统的产品包装件跌落测试研究是根据牛顿的碰撞理论原理,以包装动力学为基础对包装件进行跌落试验,最常见的试验是对实物产品进行自

由跌落试验。常用的实验仪器是跌落试验机,通过传感器采集冲击信息,其主要试验方法是传感器贴到所需测量产品的局部,然后模拟产品包装件在不同跌落姿态、跌落高度情况下进行跌落试验,得到包装件跌落冲击时的受损情况,再结合传感器的输出脉冲信号来评估包装件在运输搬运过程中的耐冲击强度,验证产品包装的可靠性。

3.2 仿真模拟研究现状

在 20 世纪 60 年代,一些发达国家就已开始着手开发有限元模拟仿真程序。有限元模拟仿真技术最早应用在连续体力学领域以及飞机结构静态特性分析中。随着产品包装件跌落分析研究的深入以及仿真模拟技术的发展,渐渐地将仿真技术引入了包装测试领域。

国内外的很多学者对产品包装件的仿真跌落做了很多详尽的研究。Y.Masso-Moreu 等人在对包装件中的聚乙烯泡沫缓冲衬垫进行跌落试验研究时就使用了有限元法(FEA),他们将加瓦楞纸箱和不加纸箱的 2 次跌落工况下缓冲衬垫的变形情况的模拟数据进行对比,得出了加瓦楞纸箱的跌落形变很小,从而证明此包装结构设计合理^[28]。Mills 等人对包装件进行跌落分析时不仅应用了有限元法,还将有限元法得到的分析数据和实物实验得到的数据进行了对比。除了得出带有缓冲结构和外包装瓦楞纸箱的缓冲性能更佳以外,另外还得出有限元模拟仿真分析的精确性^[29]。YI 等人根据 FEA 设计出一种 CRT 显示器包装缓冲结构的优化系统,从而最大化地减少了显示器包装材料(EPS)的用量^[30]。王俊丽,陈喜春等人在做电脑液晶显示器缓冲包装的跌落分析时,首先利用 Ansys/LS-DYNA 的跌落模块(Drop Test Module)。对缓冲包装系统进行建模,然后对带有缓冲结构的液晶显示器包装件进行跌落仿真试验,得到液晶显示器的应力应变和加速度响应等跌落冲击数据,最后利用所得到的数据对模型参数进行反复修改,以此使电脑液晶显示器的缓冲结构及尺寸达到优化^[31]。华丽在对洗衣机的运输包装件进行跌落分析时,首先运用 Pro/E 软件对运输包装件进行建模,然后将模型通过接口导入 Ansys/LS-DYNA 中进行参数设置、网格划分等操作,生成有限元模型,并进行跌落分析^[32]。董道坤在分析扫描仪包装件的抗压和跌落时也运用了 Ansys/LS-DYNA,并将仿真模拟的数据和试验数据进行比较,证实了仿真技术的可靠性^[33]。李兴洲在

分析电子产品包装件的抗压和冲击性能时运用的是 Ansys Workbench,并通过 Ansys Workbench 的仿真计算对抗压时缓冲结构进行了优化,而且还在静态仿真模拟中验证了缓冲泡沫优化的可行性和有效性^[34]。

3.3 存在的问题

物理实验研究的方法虽然能够给研究者提供一定的参考,但也存在诸多问题。首先如果产品包装没有被生产出来如何进行物理跌落试验,其次对于产品包装件如何观察包装内部产品的变化特征,第三测试所用的传感器只能贴在局部,这样所得到的实验数据是否准确。

对于跌落仿真模拟,这种技术不仅可以对产品跌落时内部应力、应变的分布情况进行模拟,而且还可以对产品可能出现的质量问题进行模拟。它不仅弥补了传统物理实验的重复性、破坏性、成本高的缺点,而且还弥补了理论分析结果的不可靠、不确定性等缺点。这种仿真技术所得到的结果是否和实际生活中真正的跌落对产品所产生的影响结果保持一致,对于包装以及缓冲材料自身的阻尼、摩擦等在跌落仿真中是否也都能考虑进去,诸如这些问题都有待解决。

4 结语

笔者从跌落冲击机理、冲击动力学、试验和仿真模拟等方面详细讨论了其发展现状,并指出各方面所存在的问题。目前的跌落仿真技术还不是很成熟,有很多问题需要深入研究。目前所做的很多关于跌落冲击的模拟仿真分析都没有进行实物实验的验证。对于不同缓冲材料包装件的模拟仿真,其仿真分析后的结果的可靠性是否都是一致的这个问题目前并没有相关研究。模拟仿真中忽略了很多包装缓冲材料本身的特性,在仿真软件中并没有建立这方面的数据库。

参考文献:

- [1] 张璐,丁毅. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的瓦楞纸箱跌落仿真研究[D]. 西安:陕西科技大学,2014.
ZHANG Lu, DING Yi. Dropping Simulation Analysis of Corrugated Boxes Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Xi'an:Shaanxi University of Science & Technology, 2014.
- [2] 朱霞,顾景喜,陈永安,等. JG3 军用合成制动液运输

- 包装跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2015, 36(9):64—65.
- ZHU Xia, GU Jing-xi, CHEN Yong-an, et al. Dropping Simulation Analysis of the Transport Package for JG3 Military Synthetic Brake Fluid[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9):64—65.
- [3] 张沙, 钱怡. 电磁炉包装件的振动特性仿真[J]. 包装工程, 2012, 33(23):56—60.
- ZHANG Sha, QIAN Yi. Simulation Analysis of Vibration Characteristics of Induction Cooker Package[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23):56—60.
- [4] SCHELL E H. Evaluation of a Fragility Test Method and Some Proposals for Simplified Method[J]. The Shock and Vibration Bull, 1969, 40(6):56—62.
- [5] 王军, 卢立新, 王志伟. 产品破损评价及防护包装动力学研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8):43—45.
- WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei. Kinetics of Product Damage Assessment and Protective Packaging[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8):43—45.
- [6] 丁毅, 董顺兰, 杨冠波. 基于包装件脆值的模糊推理方法的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(1):61—62.
- DING Yi, DONG Shun-lan, YANG Guan-bo. Study of Fuzzy Reasoning Methods Based on Packaging Fragility [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8):61—62.
- [7] 李杨, 陈曲. 基于 ANSYS 的打印机全瓦楞缓冲包装设计[J]. 包装学报, 2012, 4(2):37—41.
- LI Yang, CHEN Qu. Design of Full Corrugated Card-board Cushioning Packaging for Printer Based on ANSYS[J]. Journal of Package, 2012, 4(2):37—41.
- [8] 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. Transport Packaging Design for Ancient Porcelain Vase[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 25—27.
- [9] 张彬, 高强. 笔记本电脑跌落测试仿真分析与研究[J]. 计算机辅助设计, 2014, 34(5):11—12.
- ZHANG Bin, GAO Qiang. Free Fall Test Simulation Analysis and Research Based on Laptop Abstract[J]. Computer Aided Design, 2014, 34(5):11—12.
- [10] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24(3/4):353—461.
- [11] GARY J B. Effects of Fatigue on Fragility Testing and the Damage Boundary Curve[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1996(24):419—424.
- [12] NEWTON R E. Fragility Assessment Theory and Practice[C]// Monterey Research Laboratory Inc Monterey, 1968.
- [13] SCHELL E H. Evaluation of a Fragility Test Method and Some Proposals for Simplified Methods[J]. Shock Vibration Bull, 1969, 40(6):133—152.
- [14] GOFF J W, PIERCE S R. A Procedure for Determining Damage Boundary[J]. Shock Vibration Bull, 1969, 40(6): 127—131.
- [15] 王振林, 吴长富, 奚德昌, 等. 物品包装系统位移损坏边界[J]. 振动工程学报, 1998, 11(4):434—442.
- WANG Zhen-lin, WU Chang-fu, XI De-chang, et al. The Displacement Damage Boundary of Product Packaging System[J]. Journal of Vibration Engineering, 1998, 11(4): 434—442.
- [16] 王军, 王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损件(关键部件)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 Tangent Packaging System with Critical Components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1):167—168.
- [17] WANG Zhi-wei, HU Chang-ying. Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Nonlinear Package cushioning System[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(5):207—217.
- [18] WANG Zhi-wei. On Evaluation of Product Dropping Damage[J]. Packaging Technology and Science, 2002, 15:115—120.
- [19] 谢勇. 复杂激励条件下产品易损性评价方法的探讨[J]. 包装工程, 1998, 19(4):13—16.
- XIE Yong. Methods to Determine the Fragility of Packaging Products under Complex Excitation[J]. Packaging Engineering, 1998, 19(4):13—16.
- [20] 宋宝丰. 根据冲击响应谱确定产品冲击脆值新概念[J]. 包装工程, 2004, 25(1):16—17.
- SONG Bao-feng. The New Concept of Determining Product Shock Fragility Based on Shock Response Spectra[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(1):16—17.
- [21] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社, 2006.
- PENG Guo-xun. Logistics Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Publishing House, 2006.
- [22] 汤伯森, 向红. 包装动力学[M]. 长沙:湖南大学出版社, 2001.
- PENG Bo-shen, XIANG Hong. Packaging Dynamics[M]. Changsha: Hunan University Press, 2001.
- [23] SUHIR E. Shock Protection with a Nonlinear Spring[J]. CPMT Transactions, Advanced Packaging, Part B, IEEE, 1995, 18(2):430—437.
- [24] SUHIR E. Shock-excited Vibrations of a Conservative Duffing Oscillator with Application to Shock Protection in Portable Electronics[J]. International Journal Solids Struct, 1996, 33(24):3627—3642.
- [25] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushion[J]. Bell System Technical Journal, 1945(24):18—20.
- [26] 许富华, 武剑锋. 考虑摩擦效应的包装件跌落冲击响应研究[J]. 包装工程, 2015, 36(19):33—36.
- XU Fu-hua, WU Jian-feng. Dropping Impact Response Research of Package Considering Frictional Effects[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19):33—36.
- [27] 刘芳, 赵玫, 孟光. 电路板组件板级跌落冲击动力学分析[J]. 机械强度, 2007, 29(5):713—716.
- LIU Fang, ZHAO Mei, MENG Guang. Dynamic Analysis of Printed Circuit Board Assembly Subjected to Drop Impact[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(5): 713—716.
- [28] 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):29—38.
- [29] 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, 18:29—38.
- [30] YI Jeong-wook, PARK Gyung-jin. Development of a Design System for EPS Cushioning Package of a Monitor Using Axiomatic Design[J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36:273—284.
- [31] 王俊丽, 陈喜春. 缓冲包装的跌落仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(9):8—10.
WANG Jun-li, CHEN Xi-chun. Drops Simulation of Cushion Packaging[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9):8—10.
- [32] 华丽. 洗衣机运输包装的跌落仿真及可靠性探讨[D]. 无锡:江南大学, 2008.
HUA Li. Dropping Simulation and Reliability Discussion of Washing Machine's Transport Package[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [33] 董道坤. 扫描仪包装件抗压与跌落试验研究及有限元模拟[D]. 济南:山东大学, 2010.
DONG Dao-kun. The Scanner Package Compression and Drop Tests and Finite Element Simulation Study[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [34] 李兴洲. 电子产品包装性能 CAE 研究[D]. 济南:山东大学, 2011.
LI Xing-zhou. The CAE Research on Packaging Properties of Electronic Products[D]. Jinan: Shandong University, 2011.