

基于物流过程的蜂窝纸板缓冲性能研究进展

吴月, 王桂英

(东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 综述国内外关于蜂窝纸板性能研究的理论、方法、主要成果与不足。**方法** 根据实际物流的仓储、运输、装卸搬运等3个基本环节, 总结出了静压、疲劳振动、共振、垂直冲击和跌落冲击造成蜂窝纸板损坏的主要因素。**结果** 归纳总结了蜂窝纸板相关性能的国内外研究方法和研究现状, 基于仓储、运输和装卸搬运过程的蜂窝纸板性能研究, 涉及了蜂窝纸板的理论研究、静压试验、动压试验、跌落试验、模拟仿真等方面。**结论** 将物流的仓储、运输、装卸搬运等3个基本环节联合起来, 作为蜂窝纸板性能测试的方法, 能更好地保护商品并避免过度包装。

关键词: 蜂窝纸板; 缓冲性能; 仓储; 运输; 装卸搬运

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)01-0083-06

Research Progresses of Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard Based on Logistic Process

WU Yue, WANG Gui-ying

(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: This review summarized the theories, methods, the main achievements and shortcomings of domestic and international researches on cardboard performance. In light of the actual logistics segments such as transportation, storage and handling, this paper summed up the static pressure, impact pressure, resonance, vertical vibration and drop impact as the main factors causing damage of honeycomb paperboard. This article summarized research methods and research status of the performance of honeycomb paperboard at home and abroad and researches of honeycomb paperboard performance based on the stacking process, the transport process and the handling process, which involved the study of the theory of the honeycomb cardboard, static pressure test, dynamic pressure test, drop test, simulation, etc. By integration of the three basic links including storage, transportation, loading and unloading as the method of testing and improving the performance of honeycomb, the goods can be better protected and the excessive packaging can be avoided.

KEY WORDS: honeycomb paperboard; cushioning performance; storage; transport; loading and handling

随着人们对环保问题的日益重视, 环保缓冲材料正在逐步取代传统泡沫塑料等严重污染环境的缓冲材料^[1]。环保缓冲包装材料主要包括蜂窝纸板、瓦楞纸板、纸浆模塑材料、可降解泡沫塑料、再生泡沫塑料、发泡植物纤维等^[2], 其中蜂窝纸板以强度高、质量小、隔音隔热效果好、缓冲隔振效果好、价格便宜等诸多优点受

到国际市场的欢迎, 成为缓冲包装行业的宠儿。

近年来, 关于蜂窝纸板缓冲性能的测定、预测和提高成为国内外专家学者的研究热点^[3-5]。产品从出厂到销售的一系列物流过程中(运输、仓储、装卸和搬运等), 缓冲包装起到防止产品因静压、振动、冲击和温湿度等环境因素影响而遭受破坏的作用^[6]。由此,

收稿日期: 2015-03-17

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E201122)

作者简介: 吴月(1990—), 女, 河北秦皇岛人, 东北林业大学硕士生, 主攻物流包装。

通讯作者: 王桂英(1968—), 女, 辽宁庄河人, 东北林业大学教授, 主要研究方向为包装工艺与设备。

考虑实际物流过程,根据不同作业对材料性能的要求和影响,来测定和改进蜂窝纸板的缓冲防护性能,更具有现实指导意义。

1 基于物流仓储过程的蜂窝纸板性能研究

仓储堆码是指将物品整齐、规则地摆成货垛的作业^[7],要求包装件具有一定的强度,能承受一定的堆码力,即来自上方物品的静压力,否则将出现堆码破袋或封口开裂等包装问题。国内外学者主要应用理论分析、试验、仿真等方法展开研究^[8-14],主要研究方法与内容见图1。

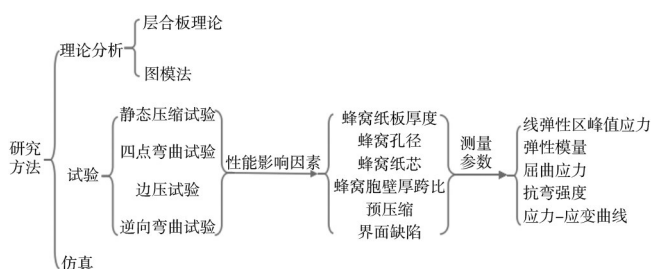


图1 基于仓储堆码过程的蜂窝纸板性能研究方法

Fig.1 The research methods of the performance of honeycomb cardboard based on warehouse stacking process

Andreas 对蜂窝纸板在平压载荷下的稳定性进行了试验和非线性有限元分析,并采用 Matlab 软件做了计算机模拟,研究表明蜂窝之间的线性屈曲对整体的位移响应有重要影响,并建立了考虑材料性能和结构失效性能的简单复合模型,可用于预测材料的承载能力^[15]。Biancolini 运用层合板理论分析了蜂窝纸板的屈曲行为,通过边缘压缩实验进行了试验验证,进而建立了蜂窝纸箱的有限元分析模型,该模型可以准确地预测纸箱在压力作用下的屈曲行为^[16]。Hallback 采用有限元分析方法模拟了胶粘纸板箱粘接接头处的力学性能^[17]。

唐勇研究了蜂窝纸板平压强度与蜂窝半径比的理论计算模型,得出了平压强度的预测计算公式^[18],奚德昌总结了蜂窝纸板本构建模成果及不足^[19],卢立新测定了蜂窝纸板在外压力下的临界屈曲载荷^[20]。鄂玉萍总结了蜂窝纸板缓冲吸能影响因素,包括组分性能(原纸性能、胶黏剂性能)、加工条件(成形工艺、制芯工艺、涂胶工艺)、结构形式(叠置并置、与其他材料复合)、几何参数(蜂窝胞元边长、蜂窝胞壁厚度、蜂窝纸板厚度、相对密度、是否贴面、孔径比)、试验条件(准静态动态、环境温湿度、加载方向、预压缩)等^[21]。王冬

梅绘制了蜂窝纸板的能量吸收图,该图可以形象地描述纸板随着压力的增加而发生的形变^[22]。徐烁测定了3种不同厚跨比的蜂窝纸板在不同湿度条件下的应力-应变曲线,构建含相对湿度、蜂窝纸板厚跨比等信息的能量吸收图,结果表明,随着相对湿度的增大,蜂窝纸板最佳能量吸收点向左下方偏移,其单位体积吸收能量的能力减弱^[23]。李厚民绘制了蜂窝纸板的压缩曲线、卸载曲线及二次加载曲线,结果表明预压的蜂窝纸板缓冲效果更好^[24]。王虹研究了不同预压缩率下纸蜂窝材料缓冲性能的变化,得到了一组 $C-\sigma_m$ 曲线(C 为缓冲系数, σ_m 为最大静应力),并提出了纸蜂窝材料有效缓冲的概念^[25]。孙德强基于蜂窝单元阵列的方法构筑了单双壁厚六边形蜂窝芯材异面类静态压缩有限元数值计算模型和分析方法,分析计算了不同结构参数条件下单双壁厚六边形蜂窝芯材的异面变形模式、变形曲线和类静态峰值应力值^[26]。张绍云对考虑蜂窝纸板作用的泡沫包装系统动力学行为进行了有限元分析,研究结果表明,当冲击物初始冲击动能较小时,泡沫发挥主要缓冲作用,当冲击物初始冲击动能增加到一定程度后,蜂窝纸箱对系统整体缓冲性能贡献增大^[27]。李厚民、赵英芹、刘冰等人对蜂窝纸板与瓦楞纸板组合结构材料进行了性能测试,试验结果均表明组合结构兼具两者的优点,对于小幅荷载和较大荷载都有良好的缓冲能力^[28-30]。

对比测试试验在蜂窝纸板性能研究方法中应用范围最为广泛,如改变蜂窝纸板厚度、环境温湿度、是否预压缩等,其结论具有最直接的实用价值,但是局限性较强,需要多次重复试验且结果不够精确。数学建模方法的理论性比较强,结果比较精确,但是数学模型比实际材料简化,因此计算结果与试验结果会有一定偏差。仿真分析可以减少或避免不必要的破坏性试验,可以反复修改、优化模型,避免了大量的人工计算,是一种比较实用的方法,但是也存在仿真度受所建模型准确度影响较大等弊端。

2 基于运输过程的蜂窝纸板性能研究

物流运输指用设备和工具,将物品从一地点向另一地点运送的物流活动。运输工具在运输过程中会产生振动,从而对包装件产生振动激励,此时下层包装件受到来自上层包装件的动态载荷。长距离运输时,蜂窝纸箱受到长时间振动,称为疲劳振动。当激励频率接近蜂窝纸箱的固有频率时,蜂窝纸箱和车辆发生共振,此时蜂窝纸箱受到的动态载荷将增大数倍

甚至数十倍。振动对包装件的作用是一个非常复杂的过程,有些包装件在贮存过程中能保持完好无损,但在运输过程中却发生了破损,因此基于运输过程研究蜂窝纸板的缓冲性能实用性更强。

Cox在研究蜂窝纸箱侧板的受力情况时提出了一个半经验公式,指出纸箱侧板的受损程度与材料所受压力和临界载荷存在幂指数关系^[31]。Ben用有限元仿真方法仿真整个包装系统,包括生产机械、材料和产品,仿真结果可以用于设计与安装模具、最佳工艺设置、箱子性能确定等操作^[32]。Berry通过试验研究了水分对以回弹性为主要缓冲作用的纸箱性能的影响,为纸箱的贮存和处理提出了建议^[33]。Gibson提出蜂窝纸板作为包装运输材料时,一般的应变速率都在 0.1 s^{-1} 以下,当出现碰撞或跌落等突发情况时应变率可能达到 10^5 s^{-1} ^[34]。Jay等人研究了包装移动夹持装置夹持力的大小、夹持方式和载质量等因素与纸质包装箱移动效果之间的关系,试验得出了不同振动水平、不同受冲击次数下的包装损坏率^[35]。

张志坤分析了蜂窝纸板的振动传递特性,建立了刚度和阻尼性能激励幅值的函数,发现随着激励幅值的增加,响应幅值减少,共振频率左移,仿真结果表明该模型能够预测蜂窝纸板的振动传递率^[36]。李晓刚以车辆、包装件构成的六自由度运输包装系统为基础,构建了以白噪声为输入的路面不平激励下的振动模型,建立了路面不平激励的数学模型、运输车辆以及包装件的动力学模型,借助Matlab/Simulink仿真技术,对运输包装系统随机振动进行了频域分析,得到了内装产品及包装件随机振动加速度响应的幅值频谱和功率谱密度,仿真结果得出了随机振动强弱程度与频率的关系^[37]。张鸣宇通过堆码扫频振动传递试验研究了果蔬包装箱的振动性能,试验数据表明共振频率从底层到顶层逐渐减小,从底层到顶层发生共振的最大峰值加速度逐渐增大,各层包装件在发生共振时的响应加速度均大于同一时刻的激励加速度^[38]。张琴推导出了随机振动传递率的计算公式,试验研究了蜂窝纸板在不同加速度、频率和应力的随机振动下的振动传递特性,得到了振动传递率曲线和峰值频率^[39]。孙中振通过对多种湿度环境下处理的纸板进行不同程度的疲劳振动,探究了蜂窝纸板在不同程度疲劳振动下缓冲效果的变化规律,结果表明随着振动次数和相对湿度的不断增加,材料的承载能力、剩余屈服力、缓冲效果、吸能特性都随之减弱^[40]。

振动传递性能是评价缓冲材料好坏的重要参数,可以采用建立函数^[41-42]、试验测试、仿真分析等方法进

行研究。多轴多自由度振动系统比单轴振动系统的试验结果更加具有真实性和实用性,且振动试验涉及到的其他项目也应该尽量接近运输环境实际,如温湿度控制、多点振动、试验夹具的改进等。计算机建模模拟试验也是振动试验的重要组成部分,学者可在前人研究的基础上将模型和试验进一步细化和改进,使其与实际振动试验所得结果趋于一致。

3 基于装卸搬运过程的蜂窝纸板性能研究

装卸指物品在指定地点以人力或机械装入运输设备或卸下。搬运指在同一场所内对物品进行水平移动为主的物流作业。因为装卸搬运是使货物产生一定的位移,货物在移动过程中容易受到振动、挤压、跌落等作用,造成外包装和货物的损坏。

1968年Newton教授提出了破损边界理论,即用产品所能经受的典型加速度脉冲冲击的幅值和速度变化量来间接描述产品的脆值,做出破损边界曲线,当所受的加速度脉冲幅值或速度变化量小于其临界值时,产品不会发生破损^[43]。Low在实验获得数据的基础上,用MSC.Patran软件模拟了纸箱包装电视机的自由跌落过程,并提出了GL分析方法,根据分析结果对整个模型进行了改进^[44]。

曾克俭通过动态跌落冲击试验得到了厚度为10,20,30,40,50 mm的蜂窝纸板的动态缓冲系数-最大静应力曲线,且在每个跌落高度都能找到曲线的最低点^[45]。刘晶对蜂窝纸板进行不同程度的预压缩处理,并对经处理后的蜂窝纸板特性进行动态冲击试验研究,利用动态缓冲试验软件得到了最大加速度-静应力和缓冲系数-最大应力特性曲线^[46]。文奇研究了在一定高度下不同厚度组合的两层蜂窝纸板吸收能量的大小,通过有限元模拟动态冲击试验过程,并与实际试验结果进行了对比,得出了随着上层纸板厚度的增加,双层纸板的单位体积能量吸收量将越来越大的结论^[47]。卢富德为了研究外包装箱对缓冲包装系统的影响,首先基于压缩试验分别确立了制作外包装箱的蜂窝纸板与缓冲材料发泡聚乙烯的本构关系,其次建立了发泡聚乙烯与蜂窝纸板的串联力学模型,并介绍了求解算法,最后设计了串联缓冲包装结构目标优化函数并介绍了优化函数的求解步骤^[48]。王志伟应用试验方法和有限元技术研究分析了蜂窝纸板的动态冲击压缩过程,研究不同湿度不同厚跨比的蜂窝纸板的冲击承载能力和能量吸收能力,蜂窝纸板冲击压缩过程与金属蜂窝板冲击压溃过程类似,是一个从顶部

到底部渐进叠缩压溃的过程,给出的不同环境湿度下不同厚跨比的蜂窝纸板冲击压缩能量吸收曲线对产品缓冲包装设计有重要的参考价值^[49]。

目前,国内外学者关于蜂窝纸板在承受跌落冲击性能方面的研究主要包括包装件跌落过程分析、动力学研究、试验研究、试验有效性分析、包装件跌落模拟计算、仿真分析、缓冲结构优化等方面,跌落试验具有破坏性,仿真分析能很好地避免这一点,因此系统研究包装件跌落过程、开发能广泛便捷应用的仿真软件具有重要意义。

4 结语

蜂窝纸板的作用是保护产品在物流过程中不受损坏,因此基于物流的不同环节来研究蜂窝纸板的缓冲性能更能贴近实际需求。基于仓储过程的蜂窝纸板性能研究主要考虑蜂窝纸板的抗静压力性能,对应的蜂窝纸板主要特征参数包括蜂窝纸板厚度、蜂窝胞壁厚度、蜂窝胞壁边长、纸芯定量和面纸定量,主要性能指标有静态缓冲系数、最大压缩载荷、最大压缩应力和最大压缩应变。基于运输过程的蜂窝纸板性能研究主要考虑蜂窝纸板的振动传递性能和抗疲劳振动性能,主要性能影响因素包括振动频率、振动次数和振动加速度,主要性能指标有振动传递率、阻尼比和剩余屈服应力。基于装卸搬运过程的蜂窝纸板性能研究主要涉及面跌、楞跌和角跌等3种形式,主要性能影响因素包括系统参数和无量纲跌落冲击速度,主要性能指标为最大加速度响应。

考虑蜂窝纸板在物流过程中受到的不同影响,建立反映蜂窝纸板静压特性、振动特性和冲击特性的BP神经网络模型,并与传统方法多项式拟合的结果相比较,从而得出蜂窝纸板满足不同需求的性能指标,是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] GB/T 18354—2006,物流术语[S].
GB/T 18354—2006,Logistics Terms[S].
- [2] JOCHEN P, IGNAAS V, DIRK V. Folded Honeycomb Cardboard and Core Material For Structural Applications[C]// Proceeding of the 5 Sandwich Construction Conference, 2010.
- [3] BRUNO C, YULFIAN A, PASCAL T. Discrete Modeling of the Crushing of Nomex Honeycomb Core and Application to Impact and Post-impact Behavior of Sandwich Structures[J]. Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures Solid Mechanics and Its Applications, 2013, 192:427—489.
- [4] 唐勇. 蜂窝纸板结构性能及生产用料技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
TANG Yong. Study on Structural Properties and Raw Material Consumption of Honeycomb Paperboard[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2012.
- [5] 夏甸清, 宗林, 胡达丰. 现代商品包装设计[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
XIA Dian-qing, ZONG Lin, HU Da-feng. Modern Packaging Design[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2013.
- [6] 周兴建, 张北平. 现代仓储管理与实务[M]. 北京: 北京大学出版社 2012.
ZHOU Xing-jian, ZHANG Bei-ping. Modern Warehouse Management and Practice[M]. Beijing: Peking University Press, 2012.
- [7] 高山. 双层异形蜂窝纸板结构及力学性能研究[D]. 唐山: 河北联合大学, 2013.
GAO Shan. Study on Structure Mechanical Property of Double-deck Abnormity Honeycomb Paperboard[D]. Tangshan: Hebei United University, 2013.
- [8] 刘冰. 分体式空调机的纸质缓冲包装设计及其仿真分析[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
LIU Bing. Paper Cushion Packaging Design and Simulation Analysis of the Split-floor Type Air-conditioner[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [9] 王虹, 王文明, 胡兵林. 纸蜂窝材料的有效缓冲及其预压缩试验[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 20—23.
WANG Hong, WANG Wen-ming, HU Bing-lin. Effective Cushioning of Paper Honeycomb Material and Pre-compression Test[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 20—23.
- [10] 王兴业, 王赫楠. 对蜂窝纸板缓冲性能的探索[J]. 中国包装工业, 2010(11): 25—27.
WANG Xing-ye, WANG He-nan. Exploration on the Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[J]. China Packaging Industry, 2010(11): 25—27.
- [11] 高山. 基于 Ansys 的双层蜂窝纸板有限元分析[J]. 机械工程自动化, 2012(6): 69—70.
GAO Shan. Finite Element Analysis of Double Honeycomb Cardboard by Ansys[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2012(6): 69—70.
- [12] 言利容, 谢勇, 赵德坚. 芯子开槽工艺对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(5): 14—17.
YAN Li-rong, XIE Yong, ZHAO De-jian. The Influence of Slotting Craft of Honeycomb Core on Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(5): 14—17.
- [13] XIE Yong, YAN Li-rong. Experimental Investigation into the Static Cushioning Properties of Rhombic Honeycomb Paperboard Applied Mechanics and Materials[C]// Recent Trends in

- Materials and Mechanical Engineering Materials, Mechatronics and Automation, 2011(2):1299—1304.
- [14] BELDIE L, SANDBERG G, SANDBERG L. Paperboard Packages Exposed to Static Loads—finite Element Modeling and Experiments[J]. Packaging Technology and Science, 2001(14):171—178.
- [15] ANDREAS A, BJORN S. Stability and Collapse of Corrugated Board[J]. London: Lund University, 2001.
- [16] BIANCOLINI M E, BRUTTI C. Numerical and Experimental Investigation of the Strength of Corrugated Board Packages[J]. Packaging Technology and Science, 2003, 16:47—60.
- [17] NILS H, CHRISTER K. Finite Element Analysis of Hot Melt Adhesive Joints in Carton Board[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 9(27):701—712.
- [18] 唐勇, 黄利强. 蜂窝结构对蜂窝纸板平压性能影响的研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5):56—58.
- TONG Yong, HUANG Li-qiang. Influence of Honeycomb Structure on Flat Comprehensive Performance[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5):56—58.
- [19] 奚德昌, 高德. 缓冲包装材料的本构建模研究进展[J]. 包装工程, 2012, 33(1):1—4.
- XI De-chang, GAO De. The Review on Constitutive Modeling of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1):1—4.
- [20] LU Li-xin, SUN Ya-ping, WANG Zhi-wei. Critical Buckling Load of Paper Honeycomb under Out-of-plane Pressure[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18:141—150.
- [21] 鄂玉萍, 王志伟. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5):40—45.
- E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Advance in Study on Energy-absorbing Property of Paper-based Cushion Packing Material[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5):40—45.
- [22] WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei, LIAO Qiang-hua. Energy Absorption Diagrams of Paper Honeycomb Sandwich Structures[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22:63—67.
- [23] 徐烁, 王志伟. 基于湿度影响的蜂窝纸板动态压缩能量吸收图[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23):203—206.
- XU Shuo, WANG Zhi-wei. Energy-absorption Diagrams of Honeycomb Paperboards under Dynamic Compression in Different Relative Humidities[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(23):203—206.
- [24] 李厚民, 熊健民, 朱若燕, 等. 蜂窝纸板力学性能的试验研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(8):147—149.
- LI Hou-min, XIONG Jian-min, ZHU Ruo-yan, et al. Experimental Research on Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2006, 17(8):147—149.
- [25] 王虹, 王文明, 胡兵林, 等. 纸蜂窝材料的有效缓冲及其预压缩试验[J]. 包装工程, 2012, 33(1):20—23.
- WANG Hong, WANG Wen-ming, HU Bing-lin, et al. Effective Cushioning of Paper Honeycomb Material and Precompression Test[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1):20—23.
- [26] 孙德强, 孙玉瑾, 郑波波, 等. 六边形蜂窝芯异面类静态压缩力学行为的仿真分析[J]. 包装工程, 2014, 35(1):18—22.
- SUN De-qiang, SUN Yu-jin, ZHENG Bo-bo, et al. Simulation Analysis of the Out-of-plane Quasi-static Compression of Hexagonal Honeycomb Cores[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1):18—22.
- [27] 张绍云, 储火, 卢福德, 等. 蜂窝-泡沫缓冲系统动力学有限元分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2):52—54.
- ZHANG Shao-yun, CHU Huo, LU Fu-de, et al. Finite Element Analysis for Dynamic Response of Cushioning System Made out of Honeycomb Paperboard and Foam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2):52—54.
- [28] 李厚民, 朱若燕, 周金枝, 等. 蜂窝纸板与瓦楞纸板组合结构的缓冲特性[J]. 湖北工业大学学报, 2005, 20(5):110—112.
- LI Hou-min, ZHU Ruo-yan, ZHOU Jin-zhi, et al. Research on the Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and Corrugated Paperboard[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2005, 20(5):110—112.
- [29] 赵英芹, 王玉龙, 蒋春华. 蜂窝/瓦楞叠合纸板的缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2013, 34(23):60—67.
- ZHAO Ying-qin, WANG Yu-long, JIANG Chun-hua. Cushion Performance of Honeycomb Superposed Corrugated Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23):60—67.
- [30] 刘冰, 阮红斌, 曹海斌, 等. 蜂窝-瓦楞叠合纸板的面外承载及静态缓冲性能研[J]. 包装工程, 2012, 33(7):4—8.
- LIU Bing, RUAN Hong-bin, CAO Hai-bin, et al. Research on Outside Bearing and Static Cushioning Performance of Honeycomb-corrugated Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7):4—8.
- [31] COX H L. Buckling of Thin Plates in Compression[C]// Air Research Committee Report and Memoranda. British, 1954.
- [32] BEN J H, GLEN M, DANIEL S. A Finite Element-based Approach for Whole-system Simulation of Packaging Systems for Their Improved Design and Operation[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(4):209—227.
- [33] BERRY C, HICKS B J, MCPHERSON C J. Impact of Environmental Conditions on the Performance of Cartonboard Skillets[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(9/10):225—241.
- [34] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [35] JAY S, TYLER B, SOMA R, et al. Carton Clamp Test Method—

- ologies and the Effects on Load Containment and Retention[J]. Packaging Technology And Science, 2015, 28: 15—30.
- [36] ZHANG Zhi-kun, ZHAO Yue-li. Honeycomb Paperboard Vibration Transmissibility Analysis and Modeling[C]// Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging. America, 2010.
- [37] 李晓刚. 运输包装系统随机振动频域分析[J]. 包装工程, 2012, 33(7): 50—54.
- LI Xiao-gang. Random Vibration Frequency Domain Analysis of Transport Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 50—54.
- [38] 张鸣宇, 张连文, 洛紫晨, 等. 库尔勒香梨物流堆码运输包装件振动传递试验研究[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(4): 13—17.
- ZHANG Ming-yu, ZHANG Lian-wen, LUO Zi-chen, et al. Research on Vibration Transmissibility Tests of Korla Pear Transporting Stacking Packages[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(4): 13—17.
- [39] 张琴, 王宝升. 随机振动下蜂窝纸板振动传递特性分析[J]. 包装工程, 2013, 34(15): 7—10.
- ZHANG Qin, WANG Bao-sheng. Vibration Transmissibility Properties of Honeycomb Paperboard under Random Vibration[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 7—10.
- [40] 孙中振, 王珺, 王军. 疲劳振动对蜂窝纸板缓冲性能影响[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 1—4.
- SUN Zhong-zhen, WANG Jun, WANG Jun. Effect of Vibration Fatigue on Cushion Performance of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 1—4.
- [41] BACELOS M S. Analysis of Conical Spouted Bed Fluid Dynamics Using Carton Mixtures[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 70(8): 37—47.
- [42] LARISSA M A, THIAGO P X, MARCOS A B. Dynamic Analysis of Reaction Kinetics of Carton Packaging Pyrolysis[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2012, 31: 180—184.
- [43] NEWTON R E. Fragility Assessment Theory and Practice[M]. California: Monterey Research Laboratory, 1968.
- [44] LOW K H. Drop Cushioning Effects of Electronics Products Formed by Plates[J]. Advances in Engineering Software, 2003, 34: 34—49.
- [45] 曾克俭, 刘珊. 蜂窝纸板动态缓冲性能分析研究[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 15—18.
- ZENG Ke-jian, LIU Shan. Analysis on Dynamic Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 15—18.
- [46] 刘晶, 刘乘, 陈满儒. 不同预压程度下蜂窝纸板动态缓冲特性的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(13): 45—46.
- LIU Jing, LIU Cheng, CHEN Man-ru. Research on Dynamic Cushioning Properties of Honeycomb Type Board under Different Extent of Precompression[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13): 45—46.
- [47] 文奇. 基于纸质件缓冲的洗衣机运输包装技术及其性能评价[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- WEN Qi. Research on Washing Machine Transportation Packaging Technology and Performance Evaluation Based on Buffer of Paper[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [48] 卢富德, 高德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3): 335—341.
- LU Fu-de, GAO De. Study on Drop Impact Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3): 335—341.
- [49] 王志伟, 姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 49—55.
- WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 49—55.

(上接第18页)

- [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(3).
- [13] JJF 1059.1—2012, 测量不确定度评定与表示[S].
- JJF 1059.1—2012, Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement[S].
- [14] 李宝林. 浸渍法测定塑料包装材料密度的测量不确定度评定[J]. 包装与食品机械, 2013, 31(2): 70—72.
- LI Bao-lin. Evaluation of Measurement Uncertainty for Plastic Density Determined by Immersion Method[J]. Packaging and Food Machinery, 2013, 31(2): 70—72.
- [15] 周霞. 直接干燥法测定大豆中水分的不确定度分析[J]. 北方药学, 2011, 8(3): 119—120.
- ZHOU Xia. The Uncertainty Analysis of Determination of Moisture Content in Soybean by Direct Drying Method[J]. Journal of Northern Medicine, 2011, 8(3): 119—120.
- [16] JJG 130—2011, 工作用玻璃液体温度计[S].
- JJG 130—2011, Liquid-in-Glass Thermometers for Working [S].