

缓冲与隔振

运输包装系统振动行为研究与发展趋势分析

高德¹, 吴朝武², 陆俊杰¹

(1.浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315010; 2.浙江日高智能机械股份有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 目的 开展运输包装系统振动行为分析, 旨在指导科学设计包装结构, 完善运输包装工程的合理性。**方法** 针对道路运输过程中包装振动系统所暴露的问题, 围绕运载体-道路耦合机理、包装隔振材料和包装物易损件承载能力等3个方面进行研究现状分析与讨论, 并对运输包装系统动力学相关技术问题的研究方向和发展趋势进行分析。**结论** 运输包装系统是一个多自由度的非线性复杂系统, 涉及运载工具、道路条件、包装防护结构等诸多因素, 在今后的发展中, 应更注重固体力学、机械振动和控制与材料科学和工程的前沿交叉。

关键词: 振动隔离; 动力学模型; 振动响应; 非线性动力学; 运输包装

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)15-0051-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.008

Dynamic Behavior Research and Dynamic Development of Transportation Packaging System

GAO De¹, WU Chao-wu², LU Jun-jie¹

(1.Ningbotech of University, Ningbo 315010, China; 2.Zhejiang Rigao Machinery Corp. Ltd., Wenzhou 325000, China)

ABSTRACT: The paper aims to guide the scientific design of packaging structure and improve the rationality of transportation packaging engineering through analyzing the vibration behaviors of transport packaging. In view of the problems exposed by the packaging vibration system in road transportation, this paper analyzed and discussed the current research situation in three aspects: the mechanism of carrier-road coupling, the bearing capacity of packaging vibration isolation materials and vulnerable parts. The research direction and development trend of the technical problems related to the dynamics of transportation packaging system were analyzed. Transport packaging system is a nonlinear complex system with multiple degrees of freedom, which involves many factors such as vehicles, road conditions, packaging protection structure, etc. In future development, more attention should be paid to the frontier cross-disciplines of solid mechanics, mechanical vibration and control as well as material science and engineering.

KEY WORDS: vibration isolation; dynamic model; vibration response; nonlinear dynamics; transport packaging

在道路运输过程中, 包装衬垫起到隔振并控制系统振动传递速率, 避免共振发生等作用, 实现保护物品的功能。随着我国经济的不断发展, 2019年公路运输货运量高达400亿t, 主要发生在乡村、城镇、市际、跨省运输, 占全国货运量的78.15%, 但

是在全国500万km道路中, 二级及以上公路占比仅为13.4%。可想而知, 道路的不平顺以及持续性高强度的颠簸会给包装件带来无可挽回的损耗。据统计, 我国每年在商品流通环节的损失高达650亿元, 其中还不包括产品成本、时间人力、资源配置的浪费, 而

收稿日期: 2020-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(51905480); 宁波“科技创新2025”重大专项(2018B10007); 宁波市自然科学基金(2019A610161)

作者简介: 高德(1963—), 男, 博士, 浙大宁波理工学院教授, 主要研究方向为包装动力学。

发达国家损失率则在5%以内,美国仅为1%~2%。例如,水果、蔬菜的包装盒(箱)在不同道路运输中会受到形式多样的振动、冲击、摆动等无法避免的外界因素的影响,造成包装盒(箱)被物品汁液浸润,破坏了包装盒(箱)的整体承压能力,致使纸箱损坏的概率增大,从而导致我国的水果、蔬菜的储运合格率远低于70%^[1],与国外相差较大。由此说明,包装结构缓冲防振设计与动力学基础分析,是制约现代包装科技与商品流通减损的重要因素。

运输包装系统是一个多自由度的非线性复杂系统,涉及运载工具、道路条件、包装防护结构等诸多因素。在前期探索研究中发现,包装物品的循环交变载荷来自于运输过程中的道路不平顺及运载工具所产生振动激励,令物品受到该种振动与冲击的持续作用而发生破损,从而推断出破损的关键问题:运载体-道路耦合激励、隔振材料、包装物易损件的承载能力。可见,探索拟实工况下运输包装系统的动力学建模及响应,深入掌握包装结构的非线性振动机理,揭示物品包装在运输环境中的运动演变规律,寻求科学有效的包装防振机理,从而进行包装结构优化设计,为各类机电产品、家用电器等运输过程的防护提供重要的理论依据,对实现科学包装设计具有重要的科学意义和工程应用价值。

1 国内外研究发展现状

多年来,国内外专家学者致力于寻求实际工况振

动、多场耦合和高精度计算模型下的运输包装系统动力学行为的定量识别与优化,典型运输包装系统见图1。运输过程中,包装物的振动行为可分为3个关键问题:物品包装运输过程中的随机激励、包装材料隔振衬垫本构模型、运输包装系统的动力学方程及易损件的响应,并取得了相应的研究成果与进展,见图2。

2 物品包装过程的随机激励

Rouillard等^[2-5]利用功率密度谱函数,对车辆在道路上实际运行后产生的随机振动信号进行分析,并考虑了路面轮廓参数,得到货物在车厢中的装载情况也会影响卡车运输的振动响应,同时,在实验室模拟了道路相关振动,并讨论了该方法用于包装结构设计和验证的可行性。Zeebroeck等^[6]测量了2类运输包装货物的道路状况和车辆速度。Berardinelli^[7]、Jarimopas^[8]和 Shahbazi^[9]等分析了不同加速度对果实受损程度的影响,但是实验结果差异不明显。以上研究只针对国外高等级公路的运输情况,与国内道路标准不一致。为此,Wang^[10]针对我国典型二级公路的不平顺情况,研究了二级公路路面谱激励下物流运输包装系统的动力学响应,但是此研究只是利用现有的路面谱作为激励,得到的理论结果没有进行实验验证。张丙强等^[11-12]基于运输过程中的关键问题,把路面简化成 Kelvin 地基上板,通过轮胎的刚性滚子接触模型将车辆与路面耦合在一起,建立了考虑人车、车路耦合作用的用于评价车辆乘坐舒适度的三

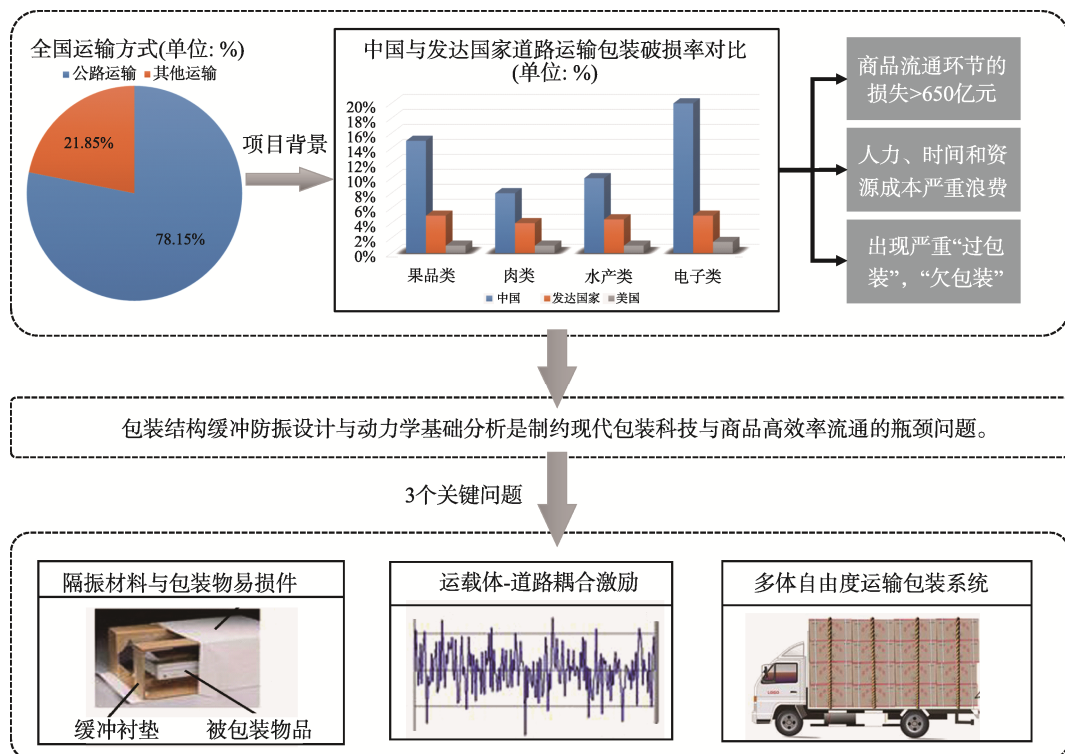


图1 运输包装背景与系统

Fig.1 Transport packaging background and system

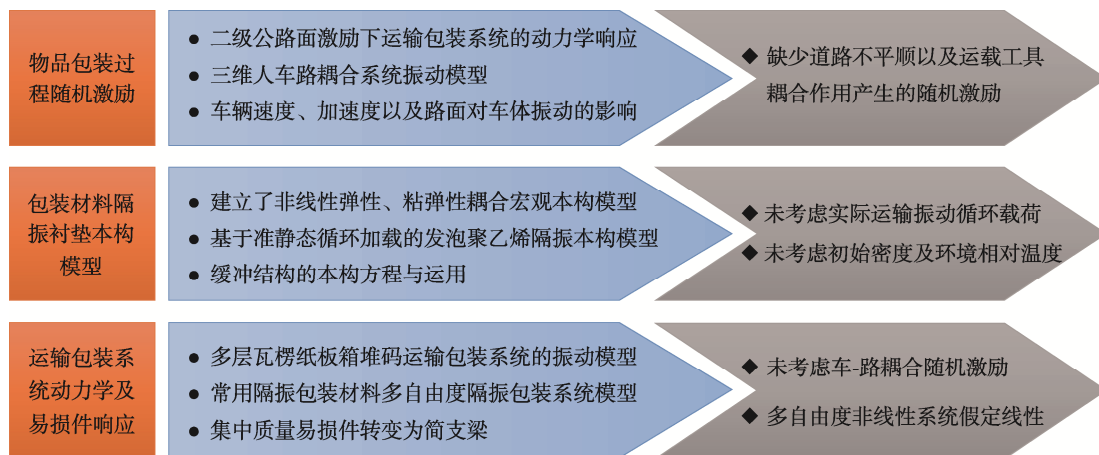


图 2 相关研究成果与进展

Fig.2 Related research achievements and progress

维人车路耦合系统振动模型，并推导出其运动平衡方程，得到了车辆运动速度、加速度以及路面不平顺对车体振动的影响，为研究建立货物运输系统模型提供了车路耦合随机激励理论依据。卢立新等^[13]根据等效加速试验原理，模拟实际公路运输工况，研究了不同缓冲衬垫对箱装水晶梨运输振动和损伤的影响。

以上的研究分析表明，道路不平顺以及运载工具耦合作用产生的随机激励，才能体现实际运输过程对物品包装的影响，所以开展道路不平顺激励下的随机信号分析，探索道路、运载工具等多因素耦合作用响应机理，可为研究物品运输包装防护技术奠定理论基础。

3 包装材料隔振衬垫本构模型

现有工作多数基于泡沫在某个特定的密度、具体的环境温度条件下进行，并没有把泡沫的初始密度和环境因素引入本构模型中。

在缓冲材料隔振模型的相关研究工作中，Borgqvist^[14]、Tjahjanto^[15]、Jeong^[16]等针对不同包装材料特性，提出了应变弹塑模型、高密度响应模型以及表征泡沫的本构模型。另外，Chen 等^[17]基于相似性准则和仿生特点，建立了新的本构模型并用于包装夹层结构。White^[18]与 Giampiero 等^[19-20]建立了非线性弹性、粘弹性耦合宏观本构模型，利用弹簧元件的组合来表征泡沫的非线性弹性与粘弹性力学行为，分别研究了密度为 27 kg/m^3 的聚氨酯在常温下所呈现的非线性与粘弹性耦合隔振模型，以及密度为 27 kg/m^3 聚酯型聚氨酯泡沫的非线性弹性、粘弹性耦合宏观本构模型，见图 3^[20]。王冬梅等^[21]研究了不同应变率下的 A、C、B、E 型多层瓦楞纸板的静态压缩力学性能，但以上模型未考虑环境温度因素。

考虑到泡沫的材料特性后，Zhang^[22]和 Yu^[23]等

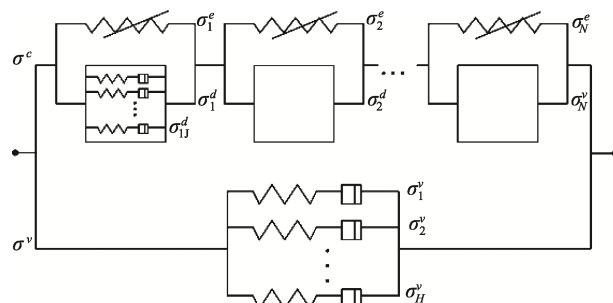


图 3 非线性弹性与粘弹性耦合宏观本构模型

Fig.3 Macroscopic constitutive model of nonlinear elastic and viscoelastic coupling

致力于预测纸箱的压缩应力，改进了 FEM 模型和应力模型，分析了不同层数的纸箱在不同环境下的力学特性。Pampolini^[24]、Romero^[25]和 Markert^[26]等在上述 Zhang、Yu 等的研究基础之上，结合弹塑性变形，建立了更加全面的力学模型。以上的工作是基于泡沫在某个特定的密度、具体的环境温度条件下进行的，并没有把泡沫的环境时变性（密度与温度）引入本构模型中。泡沫的承载能力会随初始密度的增加而增大，随环境温度的增加而下降^[27-29]，且对力学性能影响显著。高德等^[30]对不同加工温度下钙塑片材的力学性能进行了测试分析，研究发现钙塑复合包装材料片材的力学性能对制品性能有显著影响，其主要影响因素有加工工艺和材料配方。为此，应把这 2 个重要因素引入到本构模型中，才能得出较为完整的泡沫本构关系，并科学应用于实际的隔振设计中。考虑到环境时变因素，胡强等^[31]考虑了发泡聚苯乙烯（EPS）初始密度的影响因素，在循环加载条件下，提出了其非线性与粘弹性耦合模型，为包装隔振优化设计奠定了理论基础，研究的模型中未考虑温度效应。张连文^[32]、高德^[33-36]等早期针对常用的泡沫、蜂窝及复合结构等，介绍了各种缓冲结构的压缩性能表征、本构方程与工程运用的研究现状，分析了试验压缩响应与数值

模拟方面的研究动态进展;同时,高德等^[37-41]在近几年提出了基于准静态循环加载的发泡聚乙烯隔振本构模型,并对其在冲击载荷下的缓冲性能进行了研究。Zhang等^[42]通过多次试验发现回弹性能存在差异,3种回弹性(完全回弹、部分回弹和无回弹)与不同材料形成对应,为后期研究奠定了基础。

以上的研究工作存在2点局限性:没有把泡沫的初始密度以及环境相对温度因素引入到本构模型;利用压缩或冲击试验台,根据试验数据建立本构关系,而未针对实际运输过程的振动循环载荷隔振建立非线性本构模型,从而难以描述在环境时变与实际运输中,振动循环载荷下所诱发的包装力学行为,导致隔振包装的科学设计成为了包装工业发展的一个“瓶颈”。因此,应把环境时变因素与实际运输中的循环振动载荷引入到本构模型中,揭示物品运输包装系统防护机理,推动包装动力学的快速发展。

5 运输包装系统动力学方程及易损件的响应

Mindlin^[43]将包装件简化为一个单自由度线性系统,但是模型未考虑实际环境的振动因素。Sek等^[44]发现多层瓦楞纸板的实际变形演变规律较为复杂,无法利用线性思想进行单一化处理。Studman^[45]和Kitthawee^[46]发现纸箱在实际运输过程中会承受各种各样的振动、摆动、颠簸等,而且互为干扰,因此建议对纸箱整体运输全过程进行探索。同时,McKee^[47]、Urbanik、Frank^[48]等以及其他学者的研究均没有考虑纸箱寿命模型的建立和进行深入探索。

由于在运输过程中,运输包装与被包装物之间存在一定的间隙,因此在实际运输过程中,被包装物也存在被损坏的可能性。Xi^[49]建立了多自由度系统包装系统,但是该模型存在一定的局限性:与实际连接存在差异,最终理论计算结果与实际测试结果存在较大偏差。

基于此,将易损件按照离散质量考虑,Goyal^[50]

研究了产品内部具有电路板弹性元件的物品包装系统,此连续系统无法用一个变量表示,研究结果说明不能用质量-弹簧模型分析这类部件的响应。从此开启了集中质量易损件转变为简支梁易损件的研究,Subir^[51]和Zhou^[52]在分析电路板的响应过程中,将电路板简化为简支梁形式,模型见图4,并分析了集中质量、简支梁式的关键部件响应规律,得到了简支梁的响应与脉冲幅值和脉宽的相互关系。

高德等^[53-56]针对包装物在跌落过程的破损因素,探索了激励作用下的动力学行为,获取了高精度优化设计方法和参数库,为后期的研究提供了强有力的支撑。Li^[57]、孟光^[58]和Yau^[59]等都将研究重点定位在了物品跌落过程中的力学特性,因此分别建立了电子电器元件的支点弯曲模型、电路板的FEM模型,结合试验,对比分析了力学特性。以上的研究都未考虑简支板现象,因此高德等^[60-62]在考虑了正矢波作用,将电路板简化为简支板的情况下,求得了跌落冲击的响应。

另一方面,对于实际运输情况,多层堆码运输包装系统的动力学建模问题成为众多学者的研究热点。Ge^[63]研究了多层瓦楞纸板箱堆码运输包装系统的振动模型,并借助模态试验成功识别了瓦楞纸板箱的阻尼和刚度。Wang等^[64]研究了多层堆码包装系统在半正弦脉冲激励下的冲击特性,并将逆子结构理论^[65]引入运输包装领域,用弹簧-质量块组成的实体进行了实验验证。以上研究依据的方法和理论限于线性范畴,但是隔振材料性能具有较强的非线性,难免会产生误差,造成包装设计不当。而且假定物品损坏与否的标准为物品容许响应加速度,研究的对象为集中质量易损件,所对应的载荷为冲击压缩。

多层堆码运输包装系统的动力学建模问题一直是各国学者十分关注的问题,然而这些研究主要存在2方面的不足:未考虑路面与车辆部件耦合的随机激励;将运输包装的多自由度非线性系统假定为线性系统。

为解决多自由度系统总体动力学方程的数值计

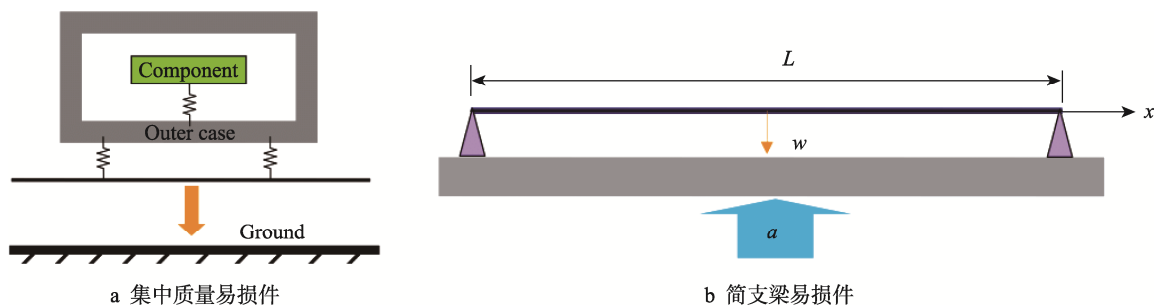


图4 典型易损件
Fig.4 Typical fragile parts

算难题, 笏筱亭^[66—68]等提出了一种多体系统传递矩阵法, 该建模方法采用化整为零的思想, 将系统分割为若干个元件, 将各元件的力学特性利用传递矩阵来表示, 最后通过矩阵相乘将各个元件拼装出系统的总体传递矩阵和总传递方程。该方法涉及的矩阵阶次远低于系统自由度数, 具有较高的计算效率, 在多管火箭、自行火炮、舰炮等复杂机械系统的动力学分析与设计中得到了广泛的使用; 该方法只适用于线性系统。为了解决时变、非线性系统的动力学建模问题, 笏筱亭等^[69—70]在多体系统传递矩阵法的基础上, 又提出了多体系统离散时间传递矩阵法, 该方法结合了多体系统传递矩阵法和时间逐步积分法的各自优点, 将元件的非线性动力学方程通过时间逐步积分线性化, 从而避免强非线性问题的数值积分难题。

运输包装系统是一个由多个包装件组装而成的系统, 是一个典型的多输入多输出的多体系统, 其系统构建形式与多体系统传递矩阵法的建模思路十分相似。若能将多体系统传递矩阵法(包括多体系统离散时间传递矩阵法)引入运输包装系统的动力学建模理论研究中, 将可望避免出现动力学方程组数值积分的难题, 为运输包装动力学的发展带来新的突破。

综上所述, 应当研究运输包装系统在随机激励载荷作用下的振动响应, 并把物品离散为梁式易损件与质量主体, 探究易损件不发生随机共振的条件, 为物品运输包装系统损坏理论提供支撑。

6 结语

运输包装系统是一个多自由度的非线性复杂系统, 涉及运载工具、道路条件、包装防护结构等诸多因素。前期研究发现, 包装物品的循环交变载荷来自运输过程中的道路不平顺及运载工具所产生的振动激励, 令物品受到该种振动与冲击的持续作用而发生破损, 从而造成商品在流通环节的损失巨大。对运输包装系统动力学行为的研究可以揭示包装物品的响应规律, 奠定包装隔振材料量化指标的基础, 同时更是实现科学方法设计包装结构与合理运输的理论基础, 为物品非线性运输包装系统动力学建模理论研究提供了新的思路与解决方案。

在今后的发展中, 应更注重固体力学、机械振动与控制 and 材料科学与工程的前沿交叉, 需针对物品包装运输过程中受到的破损问题, 依据缓冲材料特点, 充分考虑环境时变效应(温度与密度), 探索拟实运输激励下隔振衬垫的力学行为, 揭示材料的本构关系, 同时获取易损件、衬垫非线性、随机激励等与多层堆码的多因素耦合的影响, 从而获取系统动力学响应机理, 对物品包装破损规律进行定量描述, 完善运输包装动力学理论。

参考文献:

- [1] STROPEK Z, GOLACKI K. The Effect of Drop Height on Bruising of Selected Apple Varieties[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 85: 167—172.
- [2] ROUILLARD V, SEK M A. Monitoring and Simulating Non-stationary Vibration for Package Optimization[J]. *Packaging Technology and Science*, 2000, 13(4): 149—156.
- [3] ROUILLARD V, RICHMOND R. A Novel Approach to Analysing and Simulating Railcar Shock and Vibrations[J]. *Packaging Technology and Science*, 2007, 20(1): 17—26.
- [4] ROUILLARD V. Generating Road Vibration Test Schedules from Pavement Profiles for Packaging Optimization[J]. *Packaging Technology and Science*, 2008, 21(8): 501—514.
- [5] ROUILLARD V, SEK M A. Creating Transport Vibration Simulation Profiles from Vehicle and Road Characteristics[J]. *Packaging Technology and Science*, 2013, 26: 82—95.
- [6] ZEEBROECK M V, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. The Discrete Element Method (DEM) to Simulate Fruit Impact Damage During Transport and Handling: Model Building and Validation of DEM to Predict Bruise Damage of Apples[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2006, 41(1): 85—91.
- [7] BERARDINELLI A, DONATI V, GIUNCHI A, et al. Damage to Pears Caused by Simulated Transport[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 66(2): 219—226.
- [8] JARIMOPAS B, SINGH S P, SAENGNI L W. Measurement and Analysis of Truck Transport Vibration Levels and Damage to Packaged Tangerines During Transit[J]. *Packaging Technology & Science*, 2010, 18(4): 179—188.
- [9] SHAHBAZI F, RAJABIPOUR A, MOHTASEBI S, et al. Simulated In-transit Vibration Damage to Watermelons[J]. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 2010, 12(1): 23—34.
- [10] WANG Zhi-wei, WANG Jun. Inverse Substructure Method of Three-Substructures Coupled System and Its Application in Product-transport-system[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2011, 17(6): 943—951.
- [11] 张丙强, 李亮. 人车路系统三维耦合振动分析及舒适度评价[J]. *计算力学学报*, 2013, 30(2): 302—307.
ZHANG Bing-qiang, LI Liang. Dynamic Analysis and Comfort Evaluation of the Three-dimension Body-vehicle-road Coupled System[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(2): 302—307.
- [12] 张丙强, 李亮. 车辆-路面耦合振动系统模型与仿真分析[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(2): 35—38.
ZHANG Bing-qiang, LI Liang. Dynamic Model and Simulation of A Vehicle-road Coupled System[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(2): 35—38.
- [13] 卢立新, 黄祥飞, 华岩. 基于模拟运输条件的梨果实

- 包装振动损伤研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 110—114.
- LU Li-xin, HUANG Xiang-fei, HUA Yan. Effect of Packaging Methods on Vibration Bruising of Pear Fruits by Simulated Transport Tests[J]. Transaction of the CSAE, 2009, 25(6): 110—114.
- [14] BORGQVIST E, LINDSTRÖM T, TRYDING J, et al. Distortional Hardening Plasticity Model for Paperboard[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51: 2411—2423.
- [15] TJAHAJANTO D D, GIRLANDA O, ÖSTLUND S. Anisotropic Viscoelastic-visco Plastic Continuum Model for High-density Cellulosebased Materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 84: 1—20.
- [16] JEONG K Y. Constitutive Modeling of Polymeric Foams Having A Four-parameter Modulus Function with Strain Rate Sensitivity[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2016, 30(2): 683—688.
- [17] CHEN J, ZHANG X M, OKABE Y, et al. The Deformation Mode and Strengthening Mechanism of Compression in the Beetle Elytron Plate[J]. Materials and Design, 2017, 131: 481—486.
- [18] WHITE S W, KIM S K, BAJAJ A K, et al. Experimental Techniques and Identification of Nonlinear and Viscoelastic Properties of Flexible Polyurethane Foam[J]. Nonlinear Dynamics, 2000, 22(1): 281—313.
- [19] GIAMPIERO P, MICHEL R. Nonlinear Elasticity, Viscosity and Damage in Open-cell Polymeric Foams[J]. Archive of Applied Mechanics, 2014, 84(12): 1861—1881.
- [20] GIAMPIETRO P, PAMPOLINI G. The Influence of Viscosity on the Response of Open-cell Polymeric Foams in Uniaxial Compression: Experiments and Theoretical Model[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2012, 24(3): 181—199.
- [21] 王冬梅, 柏子游, 龚户祥, 等. 瓦楞夹层结构动态力学性能评估[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 94—97.
- WANG Dong-mei, BAI Zi-you, GONG Hu-xiang, et al. Dynamic Property Evaluation for A Corrugated Sandwich Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3): 94—97.
- [22] ZHANG F. On Further Modeling of Stiffness and Damping of Corrugated Cardboards for Vibration Isolation Application[D]. Canada: University of Saskatchewan, 2014.
- [23] E Y P, WANG Z W. Stress Plateau of Multilayered Corrugated Paperboard in Various Ambient Humidities[J]. Package Technology Science, 2012, 25(4): 187—202.
- [24] PAMPOLINI G, GIAMPIERO P. Strain Localization in Open-cell Polyurethane Foams: Experiments and Theoretical Model[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2008, 3(5): 969—981.
- [25] ROMERO P A, ZHENG S F, CUITIÑO A M. Modeling the Dynamic Response of Visco-elastic Open-cell Foams[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2008, 56(5): 1916—1943.
- [26] MARKERT B. A Biphasic Continuum Approach for Viscoelastic High-porosity Foams: Comprehensive Theory, Numerics, and Applications[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2008, 15: 371—446.
- [27] FABRICE S, LAURENT C, JEAN-YVES C, et al. Mechanical Properties of High Density Polyurethane Foams: I. Effect of the Density[J]. Composite Science and Technology, 2006, 66(15): 2700—2708.
- [28] AREZOO S, TAGARIELLIV L, SIVIOUR C R, et al. Compressive Deformation of Rohacell Foams: Effects of Strain Rate and Temperature[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 51(1): 50—57.
- [29] BOUIX R, VIOT P, LATAILLADE J L. Polypropylene Foam Behaviour under Dynamic Loadings: Strain Rate, Density and Microstructure Effects[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 329—342.
- [30] 高德, 王召霞, 许文才. 加工温度及偶联剂对钙塑瓦楞材料力学性能影响的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 1—4.
- GAO De, WANG Zhao-xie, XU Wen-cai. Effects of Processing Temperature and Coupling Agents on Mechanical Properties of Corrugated Calcium Carbonate-plastic Materials[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 1—4.
- [31] 胡强, 童忠钊. 泡沫塑料包装衬垫缓冲性能建模[J]. 振动工程学报, 1990, 3(3): 9—17.
- HU Qiang, TONG Zhong-fang. Modeling of Dynamic Cushioning Performances of Expanded Plastics Cushions on Shockproof Packaging[J]. Journal of Vibration Engineering, 1990, 3(3): 9—17.
- [32] 张连文, 冯冰冰, 程金茹, 等. 双面国家 A 级高强度 AB 楞纸板边压和耐破强度试验研究[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(5): 5—8.
- ZHANG Lian-wen, FENG Bing-bing, CHENG Jin-ru, et al. Research on Edgewise Crush Resistance and Bursting Strength Tests of Double-sided National a Level High Strength AB Corrugated Paperboard[J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(5): 5—8.
- [33] 李俊, 高德, 王振林. 低密度聚乙烯泡沫塑料压缩本构关系的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 25—26.
- LI Jun, GAO De, WANG Zhen-lin. Study of the Constitutive Relation of Low Density Polyethylene Foam under Compression[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 25—26.
- [34] 卢富德, 刘雄建, 高德. 多胞缓冲材料本构模型与应用进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(7): 1336—1344.
- LU Fu-de, LIU Xiong-jian, GAO De. Review of Con-

- stitutive Model and Its Application of Cellular Cushioning Material[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(7): 1336—1344.
- [35] 刘壮, 高德. 基于有限元玉米秸秆纤维缓冲包装材料性能分析[J]. 包装工程, 2010, 31(9): 46—49.
LIU Zhuang, GAO De. Investigation of Cushioning Performance Produced by Corn Stalk Fibers Based on the Finite Element Analysis[J]. Packaging Engineering, 2013, 31(9): 46—49.
- [36] 卢富德, 高德. 蜂窝纸板一维动态本构关系及应用[J]. 振动工程学报, 2016, 29(5): 38—44.
LU Fu-de, GAO De. One-dimension Constitutive Relationship and Its Application for Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(5): 38—44.
- [37] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料跌落包装系统优化设计[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 69—72.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.
- [38] 武剑锋, 许富华, 高德. 预压缩多层钙塑瓦楞纸板隔振性能研究[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 27—32.
WU Jian-feng, XU Fu-hua, GAO De. Vibration Isolation Performance of Pre-compression Multi-layer Calcium Plastic Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 27—32.
- [39] LU F D, TAO W M, GAO D. Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushion Packaging System[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(S1): 32—42.
- [40] 冯军, 高德. 钙塑瓦楞复合纸板性能的实验研究[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 43—45.
FENG Jun, GAO De. Experimental Study on Properties of Calcium Plastic Composite Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 43—45.
- [41] 张炜, 薛飞, 卢富德, 等. 考虑易损件物品-EPE缓冲系统冲击响应分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 116—119.
ZHANG Wei, XUE Fei, LU Fu-de, et al. Impact-response Analysis of the System Composed of Critical Component and EPE Cushion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(9): 116—119.
- [42] ZHANG Y Q, ZONG Z J, LIU Q, et al. Static and Dynamic Crushing Responses of CFRP Sandwich Panels Filled with Different Reinforced Materials[J]. Materials and Design, 2017, 117: 396—408.
- [43] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24(3/4): 353—461.
- [44] SEK M, ROUILLARD V, TARASH H, et al. Enhancement of Cushioning Performance with Paperboard Crumple Inserts[J]. Packaging Technology & Science, 2010, 18(5): 273—278.
- [45] STUDMAN C J, GEYER M. Modelling the Load Distribution of Stacked Apples and Other Spherical Objects[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(1): 65—72.
- [46] KITHAWEE U, PATHAVEERAT S, SRIRUNGRUANG T, et al. Mechanical Bruising of Young Coconut[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(3): 211—219.
- [47] MCKEE R C, GANDER J W, WACHUTA J R. Compression Strength Formula for Corrugated Boxes[J]. Paperboard Packaging, 1963, 48(8): 149—159.
- [48] URBANIK T J, FRANK B. Box Compression Analysis of World-wide Data Spanning 46 Years[J]. Wood & Fiber Science Journal of the Society of Wood Science & Technology, 2006, 38(3): 399—416.
- [49] XI D C, CHEN Q H, PEN N L, et al. The Vibration and Shock Testing in China[C]//Proceeding of the 5th IAPRT World Conference on Packaging, 1986, 32—35.
- [50] GOYAL S, BURATYNSKI E, ELKO G. Shock-protection Suspension Design for Printed Circuit Board[J]. Advancing Microelectronics, 2001(3/4): 7—13.
- [51] SUHIR E. Predicted Fundamental Vibration Frequency of A Heavy Electronic Component Mounted on A Printed Circuit Board[J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 2000: 122(1): 3—5.
- [52] ZHOU C Y, YU T X. Analytical Models for Shock Isolation of Typical Components in Portable Electronics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1377—1384.
- [53] GAO D, LU F D, Chen S J. Drop Impact Analysis of Cushioning System with an Elastic Critical Component of Cantilever Beam Type[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 379068(5): 1—5.
- [54] 高德, 卢富德. 考虑转动的双曲正切与正切组合模型缓冲系统冲击响应研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(1): 6—11.
GAO De, LU Fu-de. The Shock Response of Hyperbolic Tangent and Tangent Comprehensive Model on Cushion System Considering Rotary Motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(1): 6—11.
- [55] GAO De, LU Fu-de. Nonlinear Dynamic Analysis of Series Cushioning System Made with Expanded Polyethylene and Corrugated Paperboard[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013(5): 249—255.
- [56] 卢富德, 许晨光, 高德, 等. 悬臂梁易损部件在矩形加速度脉冲激励下的动力学响应与有限元分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5): 191—195.
LU Fu-de, XU Chen-guang, GAO De, et al. Shock Response and Finite Element Analysis of Critical Components with Cantilever Beam Type under Action of a Rectangular Acceleration Pulse[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 191—195.
- [57] LI R, WANG B, LI G. Benchmark Bending Solutions of Rectangular Thin Plates Point-supported at Two Adjacent Corners[J]. Applied Mathematics Letters, 2015, 40: 53—58.
- [58] 刘芳, 孟光. 随机振动载荷下电路板组件三维有限元模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 61—64.

- LIU Fang, MENG Guang. Three-dimension Finite Element Simulation for a PCB Assembly under Random Vibration Loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 61—64.
- [59] YAU Y H, SHIJIE N H. A Comprehensive Review of Drop Impact Modeling on Portable Electronic Devices[J]. Applied Mechanics Reviews, 2011, 64: 1—17.
- [60] 陈思佳, 许富华, 阮丽, 等. 正矢波激励下简支印制电路板的跌落响应研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 203—207.
- Chen Si-jia, Xu Fu-hua, Ruan Li, et al. Dropping Response of Simple Supported PCB under Versine Stimulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 203—207.
- [61] 卢富德, 高德, 梁爱锋. 立方非线性双层包装在矩形方波冲击下破损边界曲线的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 7—10.
- LU Fu-de, GAO De, LIANG Ai-feng. Study of Damage Boundary Curve of Cubic Non-linear Double Layer Package under Rectangular Pulse[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 7—10.
- [62] 李光, 阮丽, 高德, 等. 非线性运输包装系统动力学建模研究进展[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 1—6.
- LI Guang, RUAN Li, GAO De, et al. Research Progress of Dynamic Modeling of Nonlinear Transport Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 1—6.
- [63] GE C F, SUTHERLAND S. Application of Experimental Modal Analysis to Determine Damping Properties for Stacked Corrugated Boxes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1—8.
- [64] WANG Z W, WANG J. Inverse Substructure Method of Three-substructures Coupled System and Its Application in Product-transport-system[J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(6): 943—951.
- [65] WANG Z W, WANG J, ZHANG Y B, et al. Application of the Inverse Substructure Method in the Investigation of Dynamic Characteristics of Product Transport System[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25(6): 351—362.
- [66] RUI X T, HE B, LU Y Q, et al. Discrete time Transfer Matrix method for Multibody System Dynamics[J]. Multibody System Dynamics, 2005, 14(4): 317—344.
- [67] RUI X T, WANG G P, LU Y Q, et al. Transfer Matrix Method for Linear Multibody System[J]. Multibody System Dynamics, 2008, 19(3): 179—207.
- [68] 芮筱亭, 戎保. 多体系统传递矩阵法研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(1): 5—17.
- RUI Xiao-ting, RONG Bao. Research Progress of Transfer Matrix Method for Multi-body Systems[J]. Progress in Mechanics, 2012, 42(1): 5—17.
- [69] 何斌, 芮筱亭, 陆毓琪, 等. 多体系统动力学 Riccati 离散时间传递矩阵法[J]. 兵工学报, 2006, 27(4): 622—625.
- HE Bin, RUI Xiao-ting, LU Yu-qi, et al. Riccati Discrete Time Transfer Matrix Method for Multibody System Dynamics[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(4): 622—625.
- [70] 芮筱亭, 何斌, 陆毓琪, 等. 刚柔多体系统动力学离散时间传递矩阵法[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(4): 289—294.
- RUI Xiao-ting, HE Bin, LU Yu-qi, et al. Discrete Time Transfer Matrix Method for Rigid-flexible Multibody System Dynamics[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(4): 289—294.