

研究进展

缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展

刘继飞

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 综述目前常用缓冲包装材料及其性能研究的理论或方法。**方法** 通过研究本构模型、BP神经网络、缓冲特性曲线、应力-能量法、仿真分析法的基本理论和应用思路,综述国内外学者利用上述理论在缓冲特性领域研究中的发展与创新。**结果** 不同研究理论的优势各不相同,应用范围、应用特点、应用难易程度存在差异,其中应力-能量法、仿真分析法在缓冲特性的研究中作用巨大。**结论** 缓冲材料及其缓冲包装系统综合性能的研究仍然存在不足,发展与完善缓冲特性研究理论需要各国学者的共同努力。

关键词: 本构模型; BP神经网络; 缓冲特性曲线; 应力-能量法; 仿真分析

中图分类号: TB485.1; TB484

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)07-0149-07

Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials

LIU Ji-fei

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: **Objective** This paper elaborates several cushioning materials and common theories or methods in the research of cushioning performance. **Methods** The progress and application process of constitutive model, BP neural network, cushioning curves as well as stress-energy and simulation analysis were analyzed, and the application condition and innovation of these cushioning theories were reviewed. **Results** Different methods have different advantages, characteristics, application scopes and convenience, in particular, stress-energy and simulation analysis methods have inapproachable advantages. **Conclusion** Given the deficiency in comprehensive research of system performances, it is common task for experts from home and abroad to develop and improve the research theories.

KEY WORDS: constitutive model; BP neural network; cushion curves; stress-energy; simulation analysis

商品在仓储、运输、装卸等各个环节都要经历冲击、振动和激扰外力的作用。缓冲包装材料将外界冲击或振动产生的动能转换成其他种类的能量,并将其部分吸收,使作用在被包装产品上的外力或能量降低到某一限度以下,从而起到保护内装产品的作用。为了满足不同的包装要求,会应用到不同的包装材料,当前应用较广泛的缓冲材料主要有纸板类、发泡塑料类及缓冲气垫类等。

为了准确高效地研究各缓冲材料在运输中所发挥的性能,国内外许多学者从缓冲包装应用之初就不断地进行理论探索和应用研究,目前主要有本构模型、BP神经网络、缓冲特性曲线、应力-能量法、仿真分析等理论或方法。对于不同的缓冲包装设计,根据不同的研究要求,需要采用不同的研究理论或方法。

1 常用的缓冲包装材料

为了实现缓冲包装的防护性能,目前包装行业普遍运用瓦楞纸板、蜂窝纸板、发泡塑料、缓冲气垫等材料。瓦楞纸板是由波纹状芯纸构成的纸板;蜂窝纸板是依据蜂巢结构、利用瓦楞原纸粘结而成的具有空心立体正六边形的纸板;发泡塑料是通过物理或化学发泡方式制成的具有微孔结构的材料;缓冲气垫是由空气和胶膜组成的含有多个均匀、连续气柱的材料。

瓦楞纸板、蜂窝纸板、发泡塑料表现出多孔性,在缓冲机理上,都是利用冲击过程中空隙被挤压或泡孔破裂来吸收冲击变形能,从而起到减震作用,而缓冲气垫是利用气柱的压缩变形来吸收冲击能量,从而达到保护产品的目的。上述缓冲材料都属于不规则的弹性材料,具有非线性力学特征,其应力-应变曲线普遍表现为线弹性区、屈服区、密实区等 3 个阶段,而且瓦楞纸板、蜂窝纸板尤为明显。除了加工工艺和原料自身性质的影响,瓦楞纸板、蜂窝纸板和发泡塑料的缓冲性能受外界环境,如湿度、温度等因素的影响较大。

2 缓冲材料特性的研究理论与方法

目前对于缓冲材料性能研究比较常用的理论或方法主要有本构模型、BP 神经网络、缓冲特性曲线、应力-能量法和仿真分析,其不同的研究理论有不同的优势,在具体应用时要根据情况分类选用。

2.1 本构模型

表征缓冲包装材料缓冲特性最经典的方法是采用静态或动态材料本构关系^[1]。本构方程是将应变与应力联系起来的方程式,在缓冲包装领域就是研究材料受压缩后应力-应变关系,从而构建一种经验公式。本构模型的应用思路见图 1。

对于本构模型的研究,主要分为 3 个阶段:理论阶段——对发泡聚合物本构关系的提出与研究,并得到一系列经典理论模型;模型修正阶段——对理论模型修正并应用到纸质缓冲材料上;发展应用阶段——对发泡聚合物与纸质缓冲材料组合下本构模型的研究与应用。

研究初期,Gibson^[2]建立了微力学模型,将泡沫变形分为 3 个阶段:线弹性阶段、塑性阶段、压实阶段,并得出带参数识别的分段函数本构方程,利用试

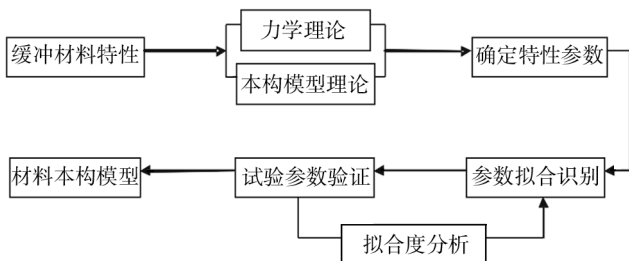


图 1 本构模型的构建思路

Fig. 1 Construction process of the constitutive relation model

验数据识别了单值函数的参数。K. C Rusch^[3-4]指出应力是可以通过应变的形状函数和弹性模量的无量纲函数来得到,但是该模型在泡沫塑料的密实阶段精确性差。20 世纪 90 年代,James A. Sherwood 与 Frost^[5],Avalle^[6]提出了与密度、温度、应变率、形状函数相关的缓冲材料压缩本构方程,这也是目前应用比较成熟的压缩本构模型。

后来国内学者对基本的本构模型进行了修正和扩展研究。胡时胜^[7]、李俊^[8]在 Sherwood Frost 模型基础上,忽略温度,建立了与密度、应变率相关的低密度下聚氨酯、聚乙烯本构方程,并识别了模型参数。王嵩^[9]根据 Sherwood-Frost 本构方程,引入了空心球填充比变量,建立了综合考虑应变率、密度、空心球填充比的聚氨酯复合泡沫塑料压缩本构关系。高德^[10]将 Sherwood-Frost 本构模型扩展应用到秸秆纤维 EPS 材料,建立了非线性本构关系模型,并利用实验数据识别了模型参数。

对于纸质缓冲材料本构模型的构建主要是基于材料力学试验数据。计宏伟^[11]全面改进纸浆模塑的经验型本构关系,建立了不同密度、加载速率耦合下的修正压缩本构方程。高德^[12-13]等研究了瓦楞纸板的首次、多次跌落的本构方程,综合考虑 30 个特性参数,建立了能全面反映瓦楞纸板缓冲特性的本构方程。王梅^[14]、郭彦峰^[15]研究了蜂窝纸板蠕变、塑性的本构方程,分析了在回复性及蠕变的实际力学性能表征。卢富德等^[16]利用 Runge-Kutta 法对系统动力学方程进行求解,建立 BC 双瓦楞纸板和发泡聚乙烯准静态与动态的单轴本构关系,研究串联缓冲系统的冲击响应。

产品在运输过程中,缓冲材料的性能对包装的保护作用影响巨大^[17],利用本构模型在理论以及实践上可行性比较强,但本构模型多是基于静态来分析缓冲特性,这与实际的缓冲状况有所差异。

2.2 BP 神经网络

人工神经网络中应用最成功、最广泛的是 BP 神经网络。BP 神经网络模型在处理非线性特征的研究上优势显著。

在缓冲性能研究中,首先确定与研究目的相关的变量参数——输入量,如缓冲衬垫的厚度、跌落高度或静应力等,再根据训练与学习算法确定中间隐藏层的各量,最后得到研究结果——输出量,如最大加速度。当达到目标误差或预定训练步骤后,神经网络训练完成,此时可以用其进行缓冲材料特性预测与分析。BP 神经网络模型的结构思路见图 2。

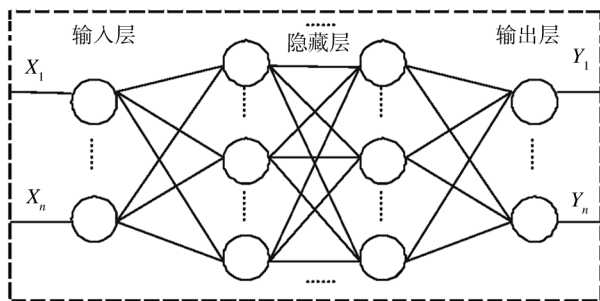


图2 BP神经网络应用思路

Fig. 2 Application idea map of BP neural network

各学者将 BP 神经网络的基本理论应用到缓冲包装领域。李书印等人^[18]将跌落高度 H 、产品脆值 G 和静应力等 3 个参数作为 BP 网络的 3 个输入,衬垫厚度 t 作为输出,最后 BP 网络的结果与实际情况十分接近。周廷美等人^[19]将应力和应变作为 2 个输入,将蜂窝纸板的动态模量和厚度 t 作为输出,从而以较少的训练次数得到高预测精度的 BP 模型。汪甜甜^[20]对 4 种不同厚度的蜂窝纸板进行动态压缩和振动传递特性的测试,建立了反映其冲击和振动特性的神经网络模型,并成功绘制出多条最大加速度-静应力曲线和振动传递率-频率曲线。杜娟^[21]、徐伟民^[22]选取了 3 个输入节点(衬垫厚度 t 、跌落高度 H 、静应力)、一个输出节点 G_m ,构建了咨询模型,对比了不同的网络算法,结果表明 Bayesian 算法的泛化能力更好。

虽然神经网络具有优秀的非线性逼近能力,但估计网络容量的理论却不完善,而且目前的学习算法都存在一些缺陷,比如算法复杂、计算量大、收敛速度比较慢等,所以在应用神经网络进行预测缓冲特性时会受到一定的限制。

2.3 缓冲特性曲线

缓冲特性曲线主要分为静态和动态特性曲线,如应力-应变曲线、最大加速度-静应力曲线、缓冲系数-最大应力曲线等。由于不需要太多的理论基础,测试方法容易实现,利用缓冲特性曲线分析材料的缓冲性能是最基本、最常用的方法。其常见思路见图 3。

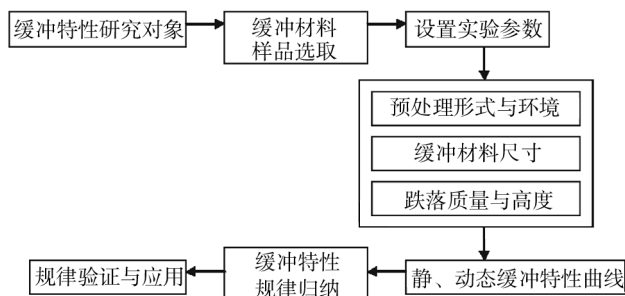


图3 缓冲特性曲线法应用思路

Fig. 3 Application idea map of dynamic cushion curves

缓冲曲线在分析缓冲材料特性上应用较广。吴丽娟等人^[23]研究了泡沫塑料和蜂窝纸板在同一跌落高度下不同厚度的动态特性曲线,表明发泡塑料缓冲系数的减小更明显。李书印等人^[24]研究了不同的压缩速度、次数、厚度和面积下 EPS 的静、动态缓冲曲线,表明压缩次数越多,其最小缓冲系数点的应力值越小,而一定范围内的压缩速度、面积和厚度并不会对缓冲特性构成明显影响。沈剑锋^[25]研究了不同充气压力、结构尺寸下柱状薄膜空气垫的准静态压缩,根据承载力-变形特性,分析得到充气压力提高会增加承载能力,且承载力会在一定范围内影响空气垫的缓冲系数。明星等人^[26]通过改变约束条件-加压速度、压缩次数,对比分析了 EPP 和 EPS 的缓冲特性曲线,表明当压缩速度较快时,EPS 的动态缓冲性能更好。方婷等人^[27]分析了 EPE 在常温、40、60 °C 等 3 种条件下的动态缓冲特性,表明温度上升会使 EPE 的理想静应力处的最大加速度值增大、动态缓冲性能降低。李厚明等人^[28]研究了瓦楞纸板与蜂窝纸板组合结构下的缓冲特性曲线,结果表明小载荷处表现出瓦楞纸板的缓冲特性,大载荷处表现出蜂窝纸板的特性。孙聚杰等人^[29]绘制不同厚度、密度下 EPE 的静态压缩的应力-应变曲线,然后利用最小二乘法对其关系进行拟合,得到应力-应变的关系表达式,使其关系式更具实用意义。

利用缓冲特性曲线进行性能分析时,多采用对比

的研究方法,如改变衬垫尺寸、跌落高度、重锤质量等,其结论具有最直接的实用价值,但是广泛性不强,而且获得一种材料的一组缓冲曲线(常用跌落高度范围、7 种衬垫厚度)将至少需要 10 500 次跌落冲击、175 h 的测试时间^[30],由于机台的限制,传统方法测定的最大加速度-静应力曲线的开始及结尾部分均靠拟合或估算得出,不够精确,传统方法无法测出任意高度下的缓冲曲线^[31],所以应用缓冲特性曲线评价材料的缓冲性能会比较耗时且结论局限性强。

2.4 应力-能量法

由于传统方法测定缓冲曲线过程复杂、成本较高、测定曲线范围有限,Dr. Matthew Daum 提出了应力-能量法,用来研究缓冲材料在受到动态冲击时动应力和动能量之间的关系。应力-能量法是利用一系列相关公式建立缓冲材料最大加速度与跌落高度、厚度和静应力的关系式。应力-能量法的应用思路见图 4。

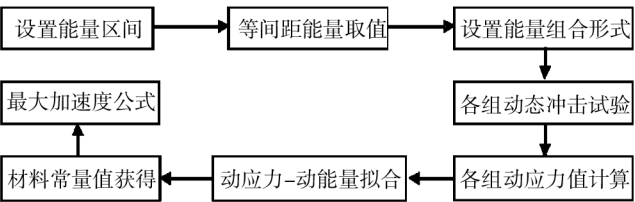


图 4 应力-能量法应用思路

Fig.4 Application idea map of the stress-energy method

应力-能量理论从 1990 年被提出后,国内外许多学者对此进行了研究,并不断将其应用到缓冲设计及测试中。应力-能量的原始理论最早是由 Michigan State University 的 Dr. Gary Burgess^[32]提出,随之并进行了系统的公式推导研究。Wenger Eric^[33]运用此法做了瓦楞纸板的相关研究,证实了应力-能量法在进行瓦楞纸板缓冲特性时的研究价值。后来 Dr. Matthew Daum^[30]进行了公式简化,使得该法具有普遍应用意义,其推导的公式也是目前使用较多的公式。Patricia Marcondes^[34]进行了利用应力-能量法进行缓冲曲线绘制的最小材料用量的研究。Kendalyn Paulin^[35]进行了关于应力-能量法在缓冲曲线绘制应用中的数据精度统计分析。

张波涛^[36]简述了应力-能量法应用到缓冲材料特性曲线绘制中的具体思路和方法,并运用该方法进行了实验验证,证实该方法的高效性。刘乘^[37]对比分析了标准测试法和应力-能量法在测试缓冲特性曲

线时的优缺点,指出在精确度要求不高时,基于应力-能量法的全面、高效的优势,其可以作为首选考虑。张慧^[38]根据应力-能量法的一般公式,提出了直线法测定泡沫塑料缓冲系数曲线的新方法,从而以较少实验数据、较快测试速度但较高精度来完整确定整个缓冲系数曲线簇的绘制。刘乘^[39]基于动应力、动能量的关系,编写数据采集软件,记录冲击中的加速度、位移与时间的关系,验证了缓冲系数与高度、厚度、材料的面积无关的结论。路冰琳等人^[40]利用应力-能量法,进行了不同厚度、跌落高度下的 EPE 的动态缓冲特性研究,其数据与 ASTM D1596 的测试数据拟合程度较高。

与 ASTM D1596 标准^[41]和 GB/T 8167^[42]相比,对于绝大部分静应力,利用应力-能量法测试出来的 G 值与实际 G 值的偏差都在 ASTM D1596 允许的实验室误差范围之内。利用应力-能量法确定材料动态缓冲特性曲线时,是假定冲击过程中没有能量损失,因此在利用应力-能量法时,会存在一定的误差。虽然存在误差,其仍然是一种评价材料缓冲特性的高效方法。

2.5 仿真分析

对于单种或多种缓冲材料在复杂包装系统下的性能分析,上述单一的理论或方法难以实现,此时有限元仿真便成为首选方法。仿真分析在缓冲包装设计、产品脆值评价、缓冲包装动态特性分析等研究中是一种切实可行的方法,其应用思路见图 5。

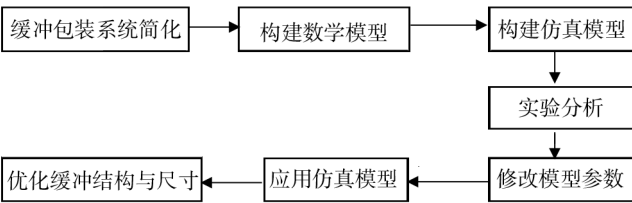


图 5 仿真分析法应用思路

Fig.5 Application idea map of the simulation analysis method

各学者利用多种不同的仿真软件对许多复杂的包装系统进行了研究。杨虹等人^[43]通过分析单自由度三次函数型非线性缓冲包装系统,利用 Matlab/Simulink 建立仿真框图,并绘制出该系统跌落冲击相应的一系列曲线图。高德等人^[44]应用 Abaqus 有限元软件,对 AB 型瓦楞纸板动态冲击进行仿真分析,得到表征瓦楞纸板缓冲性能的加速度曲线。李厚

民^[45]利用 Ansys 仿真模拟了蜂窝纸板的压缩过程,得到了蜂窝纸板及芯纸在不同压缩量下的应力分布规律。刘学^[46]基于发泡聚乙烯的应力-应变数据,利用有限元软件,计算了八角衬垫结构的 EPE 包装系统的角跌落冲击响应,确定了跌落时的应力分布规律。王俊丽等人^[47]利用 Ansys/LS-DYNA 建立了电脑液晶显示器缓冲系统的跌落仿真模型,优化了液晶显示器的缓冲包装结构及尺寸。华丽^[48]和郝智伟^[49]分别运用 Pro/E 软件和 Ansys 对洗衣机及其关键部位进行实体建模,通过接口导入有限元软件中,进行参数设置、网格划分等生成有限元模型,并进行了跌落仿真。张文明^[50]利用 UG 和 Ansys 建立了 Q18 滚筒洗衣机的模型,并进行了裸机状态和有蜂窝纸板包装下的仿真分析,从而设计了 Q18 洗衣机的整体包装方案。李良春等人^[51]利用仿真软件对新型着陆缓冲气囊的整个着陆过程进行了全面仿真,通过仿真验证了气囊的缓冲效果,证明了设计的可行性。

对缓冲包装系统进行计算机仿真可减少或避免不必要的破坏性实验,缩小实验周期和费用,有利于反复修改模型参数、优化缓冲结构及尺寸,但是仿真分析对研究人员的专业素质要求较高,而且仿真度受所建模型精度的影响较大。但无论如何,仿真分析在复杂缓冲包装系统的分析中具有无可比拟的优势。

3 结语

缓冲包装材料性能的研究已成为包装动力学研究的重点和热点。有效表征材料的缓冲特性是揭示材料缓冲机理的关键,也是进行产品缓冲包装设计的理论基础和设计依据。

缓冲包装材料的研究理论或方法从材料应用之初就不断地产生与发展,虽然目前一些理论能够准确地反映材料的缓冲性能,研究的基本方法和思路也更加清晰,但是缓冲材料及缓冲包装系统综合性能的评价与分析仍然不足,还需要国内外学者的共同努力,从而为缓冲包装材料性能研究理论的长足发展奠定基础。

参考文献:

- [1] 杨嫣红,王志伟. 缓冲包装材料及其性能研究进展[J]. 包装工程,2002,23(4):97—99.
YANG Yan-hong, WANG Zhi-wei. Research Progress in Cushioning Materials and Their Properties[J]. Packaging Engineering,2002,23(4):97—99.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids Structure and Properties[D]. Cambridge:Cambridge University,1997.
- [3] RUSCH K C. Load-compression Behavior of Flexible Foams[J]. Journal of Applied Polymer Science,1969,13(11):2297—2311.
- [4] RUSCH K C. Load-compression Behavior of Brittle Foams[J]. Journal of Applied Polymer Science,1970,14(5):1263—1276.
- [5] SHERWOOD J A, FROST C C. Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam[J]. Polymer Engineering & Science,1992,32(16):1138—1146.
- [6] AVALLE M. Mechanical Models of Cellular Solids: Parameter Identification from Experimental Tests[J]. International Journal of Impact Engineering,2007,34(1):3—27.
- [7] 胡时胜,刘剑飞. 硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J]. 力学学报,1998,30(2):151—156.
HU Shi-sheng, LIU Jian-fei. Research on Constitutive Relation of Rigid Polyurethane Foam[J]. Journal of Mechanics,1998,30(2):151—156.
- [8] 李俊,高德. 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. Study of the Constitutive Relation of Low Density Polyethylene Foam under Compression[J]. Packaging Engineering,2008,29(12):25—26.
- [9] 王嵩,卢子兴. 聚氨酯复合泡沫塑料压缩本构关系[J]. 强度与环境,2003,32(4):22—26.
WANG Song, LU Zi-xing. Experiential Compressive Constitutive Relation for PUR Syntactic Foamed Plastics[J]. Structure and Environment Engineering,2003,32(3)22—26.
- [10] 高德,刘壮. 秸秆纤维 EPS 缓冲包装材料性能的研究[J]. 农业机械学报,2006,37(8):201—204.
GAO De, LIU Zhuang. Studies on Cushioning Package Material Made of Corn Straw and EPS and Its Properties[J]. Journal of Agricultural Machinery,2006,37(8):201—204.
- [11] 计宏伟,王怀文. 纸浆模塑材料本构方程拟合的改进[J]. 包装工程,2009,30(10):11—13.
JI Hong-wei, WANG Huai-wen. Modification of Constitutive Equation Fitting of Molded Pulp Material[J]. Packaging Engineering,2009,30(10):11—13.
- [12] 高德,奚德昌. 瓦楞纸板的动态压缩性能及模型[J]. 包装工程,1995,16(3):5—10.
GAO De, XI De-chang. Dynamic Compressive Property and Model of Corrugated Paperboard[J]. Packaging Engineering,1995,16(3):5—10.
- [13] 程志胜,魏天路,高德. 瓦楞纸板缓冲动态模型的建立及参数识别[J]. 农业机械学报,2000,31(2):100—103.
CHENG Zhi-sheng, WEI Tian-lu, GAO De. A Model for

- Dynamic Compressive Performance of Corrugated Board and Its Application [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 100—103.
- [14] 王梅, 李克天, 赵荣丽. 蜂窝纸板力学模型的建立和缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(8): 29—30.
WANG Mei, LI Ke-tian, ZHAO Rong-li. Mechanical Model Establishment and Cushioning Performance Study of Honeycomb Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8): 29—30.
- [15] 郭彦峰. 蜂窝纸板动态缓冲特性及振动传递特性试验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
GUO Yan-feng. Research on Dynamic Cushioning Property and Vibration Transmission of Honeycomb Paperboard[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [16] 卢富德, 陶伟明. 串联缓冲系统冲击响应与结构优化[J]. 浙江大学学报, 2012, 46(10): 1773—1777.
LU Fu-de, TAO Wei-ming. Impact Response of Series Cushioning System and Structure Optimization Analysis[J]. Journal of Zhejiang University, 2012, 46(10): 1773—1777.
- [17] 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. Design of Transportation Packaging[M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2006.
- [18] 李书印, 沈凤武, 和克智, 等. 神经网络建立缓冲包装材料特性模型[J]. 中国包装, 2001(1): 104—106.
LI Shu-yin, SHEN Feng-wu, HE Ke-zhi, et al. Cushioning Properties Modeling Based on Artificial Neural Networks[J]. China Packaging, 2001(1): 104—106.
- [19] 周廷美, 毛凌. 基于神经网络的蜂窝纸板缓冲特性建模[J]. 计算机工程, 2003, 29(18): 109—111.
ZHOU Yan-mei, MAO Ling. Cushion Properties Modeling of Honeycombed Paperboard Based on Artificial Neural Networks[J]. Computer Engineering, 2003, 29(18): 109—111.
- [20] 汪甜甜. 神经网络在蜂窝纸板缓冲特性研究中的应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
WANG Tian-tian. Application of Neural Network in Research for Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005.
- [21] 杜娟, 王春生. 基于改进 BP 神经网络的蜂窝纸板缓冲特性模型[J]. 中国包装工业, 2007(11): 43—44.
DU Juan, WANG Chun-sheng. Cushion Properties Modeling of Honeycombed Paperboard Based on Artificial Neural Networks[J]. China Packaging Industry, 2007(11): 43—44.
- [22] 徐伟民, 孙国正, 曾山. 基于神经网络包装缓冲特性预测模型的研究[J]. 包装工程, 2004, 25(2): 29—32.
XU Wei-min, SUN Guo-zheng, ZENG Shan. A Prediction Model for Packaging Impact Cushioning Characteristics Based on Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(2): 29—32.
- [23] 吴丽娟, 姜帅. 三种常见缓冲材料的动态压缩缓冲性能[J]. 中国水运, 2006, 6(11): 62—64.
WU Li-juan, JIANG Shuai. Dynamic Cushioning Property of Three Common Cushioning Materials[J]. China Water Transportation, 2006, 6(11): 62—64.
- [24] 李书印, 万明习, 李玉成, 等. 从静态压缩试验结果看缓冲包装材料特性[J]. 中国包装, 1999, 19(3): 94—97.
LI Shu-yin, WAN Ming-xi, LI Yu-cheng, et al. Cushioning Characteristics of Materials Based on Static Compressing[J]. China Packaging, 1999, 19(3): 94—97.
- [25] 沈剑锋, 卢立新, 任冬远. 柱状塑模空气垫承载与缓冲性能的试验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 6—8.
SHEN Jian-feng, LU Li-xin, REN Dong-yuan. Research on Loading and Cushioning Performance of Plastic Cylinder Airbag[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 6—8.
- [26] 明星, 赵燕, 卢杰, 等. 基于静态压缩试验的缓冲包装材料性能对比分析[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 59—61.
MING Xing, ZHAO Yan, LU Jie, et al. Contrast and Analysis of Packaging Material Buffering Performance Based on Static Compression Testing[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 59—61.
- [27] 方婷, 康勇刚, 杨帅. 环境温度对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(21): 41—44.
FANG Ting, KANG Yong-gang, YANG Shuai. Effect of Environmental Temperature on Dynamic Cushioning Performance of EPE[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 41—44.
- [28] 李厚民, 朱若燕, 杨晓俊, 等. 蜂窝纸板与瓦楞纸板组合结构缓冲特性研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 9—11.
LI Hou-min, ZHU Ruo-yan, YANG Xiao-jun, et al. Research on the Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and Corrugated Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 9—11.
- [29] 孙聚杰, 温时宝. EPE 静态压缩应力—应变曲线模拟[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(1): 37—39.
SUN Ju-jie, WEN Shi-bao. Simulation of Stress-strain Curves for EPE Static Compression[J]. Food and Packaging Machinery, 2009, 27(1): 37—39.
- [30] MATTHEW D. A Simplified Process for Determining Cushion Curves: The Stress-energy Method[D]. East Lansing: Michigan State University, 1999.
- [31] 刘乘, 陈绍德, 宋海燕. 缓冲包装材料动态压缩试验的数据采集及其处理系统[J]. 包装工程, 2001, 22(5): 4—6.
LIU Sheng, CHEN Shao-de, SONG Hai-yan. Dynamic Data Collection and Processing System of Cushioning Materials[J]. Packaging Engineering, 2001, 22(5): 4—6.
- [32] BURGESS G. Consolidation of Cushion Curves[J]. Packa-

- ging Technology and Science, 1990(3):189—194.
- [33] WENGER E. Corrugated Board as a Packaging Cushioning Material [D]. East Lansing: Michigan State University, 1994.
- [34] PATRICIA M. Minimum Sample Size Needed to Construct Cushion Curves Based on the Stress-energy Method [D]. Clemson: Clemson University, 2007.
- [35] KENDALYN P. Statistical Analysis of Stress-energy Methodology Application to Cushion Curve Determination [D]. Clemson: Clemson University, 2012.
- [36] 张波涛. 应力-能量法在测定泡沫塑料缓冲曲线中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(1):59—61.
ZHANG Bo-tao. Application of Stress-energy Method in Determining Cushion Curves of Foam Materials [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1):59—61.
- [37] 刘乘, 刘晶. 应力-能量法在求取包装材料最大加速度-静应力曲线方面的应用分析[J]. 包装工程, 2011, 32(1):74—75.
LIU Sheng, LIU Jing. Application of Stress-energy Method in Determination Packaging Material's Buffer Characteristics [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1):74—75.
- [38] 张慧, 谢宇坤, 王军. 直线法测定泡沫塑料缓冲系数曲线[J]. 包装工程, 2011, 32(3):36—38.
ZHANG Hui, XIE Yu-kun, WANG Jun. Determination of Cushioning Performance of Foam Using Improved Stress-energy Method [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3):36—38.
- [39] 刘乘, 吴莎. 测试缓冲材料性能的方法及其分析[J]. 包装工程, 2011, 32(13):25—27.
LIU Sheng, WU Sha. Cushioning Material Properties Testing Methods and Analysis [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13):25—27.
- [40] 路冰琳, 孙诚, 韩雪山. 运用数学拟合方法绘制动态冲击缓冲曲线的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(15):4—6.
LU Bing-lin, SUN Cheng, HAN Xue-shan. Study on Drawing Dynamic Shock Cushioning Curve Based on Mathematic Fitting Method [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15):4—6.
- [41] ASTM D 1596 (2011), 包装材料的动态冲击缓冲特性的标准测试方法[S].
ASTM D 1596 (2011), Standard Test Method for Dynamic Shock Cushioning Characteristics of Packaging Material[S].
- [42] GB/T 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩试验方法[S].
GB 8167—2008, Dynamic Compression for Package Cushioning Materials Experiment Method[S].
- [43] 杨虹, 郑全成, 郭红菊, 等. 基于 MATLAB/SIMULINK 的非线性缓冲包装系统冲击响应特性的仿真分析[J]. 包装工程, 2008, 29(3):36—38.
YANG Hong, ZHENG Quan-cheng, GUO Hong-ju, et al. Simulation Study of Shock Properties of Nonlinear Cushioning Packaging System Based on MATLAB/SIMULINK [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3):36—38.
- [44] 高德, 董静, 李军. 基于非线性有限元的瓦楞纸板动态冲击响应的仿真研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4):10—12.
GAO De, DONG Jing, LI Jun. Research on Simulation of Dynamic Response of Corrugated Board with Nonlinear Finite Element [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4):10—12.
- [45] 李厚民. 蜂窝纸板受压时的有限元分析[J]. 包装工程, 2006, 27(1):34—36.
LI Hou-min. FEM Analysis of the Compression Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1):34—36.
- [46] 刘学. 发泡聚乙烯包装系统动力学有限元分析[J]. 包装工程, 2011, 32(13):11—13.
LIU Xue. Finite Element Analysis of Dynamic Properties of Expanded Polyethylene Cushion Packaging System [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13):11—13.
- [47] 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. Dropping Simulation of Cushion Packaging [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9):8—10.
- [48] 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 Transport Package [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [49] 郝智伟. 波轮式洗衣机关键部件的跌落仿真[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
HAO Zhi-wei. Dropping Simulation Analysis on Crucial Component Part of Pulsator Washing Machine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [50] 张文明. 基于蜂窝纸板对 Q18 滚筒洗衣机包装的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2009.
ZHANG Wen-ming. Research on Packaging of Q18 Roller Washing Machine Based on Honeycomb Paperboard [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2009.
- [51] 李良春, 黄刚, 李文生等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的新型着陆缓冲气囊仿真分析[J]. 包装工程, 2012, 33(15):16—20.
LI Liang-chun, HUANG Gang, LI Wen-sheng, et al. Simulation Analysis of New Type Landing Cushion Airbag Based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15):16—20.