

缓冲包装材料的本构建模研究进展

奚德昌, 高德

(浙江大学, 杭州 310027)

摘要: 在多年研究及大量文献调研的基础上, 综述了瓦楞纸板、发泡聚乙烯、蜂窝纸板、纸浆模塑、植物秸秆等常用缓冲包装材料的本构模型研究进展, 并指出了相关模型的特点与存在的问题。为缓冲包装材料本构建模的进一步研究提供参考。

关键词: 缓冲包装材料; 动力学特性; 本构模型

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)01-0001-04

The Review on Constitutive Modeling of Cushion Packaging Materials

XI De-chang, GAO De

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The development, characteristics and existing problems of the constitutive modeling for cushion packaging materials such as corrugated cardboard, polyethylene foam, honeycomb cardboard, paper mould, plant fiber were pointed out based on investigation and research for many years as well as lots of research literatures, and provide some references for advanced research of constitutive modeling of cushion packaging materials.

Key words: cushion packaging material; dynamics characteristics; constitutive modeling

包装动力学的概念是 1945 年由美国学者 R. D. Mindin^[1]率先提出的, 作者运用经典振动理论, 论述了物品包装在跌落工况下的响应; 实际使用包装材料并不都是与文[1]所述的典型特性相吻合, 为便于包装设计, 1952 年 R. R. Janssen^[2]得到了缓冲系数-最大应力曲线; 1961 年 P. E. Franklin^[3]将缓冲系数-最大应力曲线拓展至了最大加速度-静应力曲线。这些研究成果, 使采用单自由度线性或非线性物品包装模型进行跌落缓冲包装设计计算成为了可能。缓冲包装材料种类繁多, 获得表征它们缓冲特性曲线族的实验工作量十分巨大。如 1964 年出版的《美国军事标准化手册》^[4]提供的聚乙烯泡沫塑料最大加速度-静应力曲线图谱, 包含了 7 种跌落高度(12, 18, 24, 30, 36, 42 和 48 英寸)下 6 种缓冲衬垫厚度(1, 2, 3, 4, 5 和 6 英寸, 1 英寸=2.54 cm)的共计 800 多条实验曲线。尽管如此, 这本手册还是难以满足包装工程应用的要求。为了减少试验工作量, 1974 年 T. L. Cost^[5]

建立了几种缓冲材料所包装物品最大加速度的数学表达式, 由不同的缓冲衬垫的静应力、厚度、包装件跌落高度及环境温度, 可以计算出物品的最大加速度。1988 年, MTS 公司^[6]归纳出了缓冲包装设计的“五步法”, 在工程实用化上有所推进。以上方法均需耗用大量时间来测试, 并且无法适用于多自由度物品包装的缓冲设计。鉴于此, 国内外包装工程界并未放弃探求解决该类问题的更有效途径。

振动与冲击激励下, 求解物品包装的响应规律时需要 3 个关系式: 一是运动方程, 二是初始条件及/或边界条件, 三是缓冲包装材料的本构模型。因此, 本构模型是求解物品包装响应的一个必要条件。瓦楞纸板、蜂窝纸板、纸浆模塑、发泡聚乙烯(EPE)因有卓越的环保性与良好的防振缓冲性能, 成为应用最多的缓冲包装材料, 对它们的缓冲性能的基础性量化研究尚处于起步阶段。本文拟综述这几种材料的非线性本构模型研究现状, 为包装防护理论提供研究提供参考。

收稿日期: 2010-12-08

作者简介: 奚德昌(1932—), 男, 上海人, 浙江大学教授, 中国振动工程学会包装动力学专业委员会学术委员会主任。

1 本构模型

本构关系(constitutive relations)指反映物质宏观性质的物理关系,把本构关系写成具体的数学表达式就是本构方程。在许多文献中,往往都不把本构关系和本构方程区别开来,而本构模型就是指本构关系或本构方程。熟知的反映纯力学性质的本构关系有胡克定律、牛顿粘性定律、圣维南理想塑性定律等;反映热力学性质的有克拉珀龙理想气体状态方程、傅里叶热传导方程等^[7]。

确定材料的本构关系即求出其本构方程的过程,称为本构建模。每种材料的本构模型都是依靠实验和理论共同来确定的,一般步骤为:在实验数据的基础上提出简化数学模型;从理论上找出一般形式的本构关系;再由实验以及优化方法确定待定的参数,从而将一般形式的本构关系演变为具体函数表达式。

2 缓冲包装材料的本构建模

2.1 瓦楞纸板

瓦楞纸板的缓冲性能涉及应变历史、塑性变形、温湿度影响等因素,很长时间以来其缓冲性能的理论性描述和建模鲜有人问津。1990年起,奚德昌、高德、王振林等人^[8-11],应用经典的粘弹塑性理论,考虑了温度、湿度、变形种类、层数、密度、冲击次数、起始刚度损失、强化增量等因素对瓦楞纸板缓冲性能的影响,建立了瓦楞纸板的静态、动态非线性模型,并识别了模型参数。瓦楞纸板在静态边压与侧压下的模型分别为:

$$\sigma = a_1 \epsilon + a_2 \sin(a_3 \epsilon) + a_4 \tan(a_5 \epsilon) \quad (1)$$

$$\sigma = a_0 + a_1 \epsilon + a_2 \epsilon^2 + a_3 \epsilon^3 + a_4 \epsilon^4 + a_5 \epsilon^5 \quad (2)$$

瓦楞纸板平压动态模型为:

$$\sigma + a \dot{\sigma} = f(\sigma_p) f(\sigma_d) f(\sigma_{HR}) \{ K^* \epsilon + a_2 \sin[a_3(\epsilon - \epsilon_p)] + f(\sigma_n) a_4 \tan(a_5 \epsilon) + E \} \quad (3)$$

以上瓦楞纸板系列模型的建立,为瓦楞纸板包装,尤其是多自由度物品包装的缓冲包装设计应用奠定了理论基础,文献[13-14]应用建立的本构模型,对电视机6自由度非线性物品包装进行了实例计算,但尚未考虑材质、松弛、蠕变、能量吸收、疲劳、层数、楞形等因素。

2006年,A. Harrysson^[14]运用了复合材料夹层板理论,考虑了蠕变-时间曲线的分段式公式及其特

征系数,用有限元方法分析了渐变增强连续损伤,建立了破坏与分层的力学模型,对瓦楞纸板的各向异性弹塑性本构模型进行了研究。M. A. Minett^[15-16]研究了多层瓦楞纸板的静、动态缓冲性能,分析了瓦楞纸板受压缩前和压缩过程的脉冲加速度特点,建立了力学行为的数学模型。

以上本构模型考虑的影响因素较多,具有理论研究意义;但是所建模型对应的本构方程过于复杂,往往包含了几十个参数,给工程应用带来了困难。

2.2 泡沫塑料

1998年起童忠钊、胡强等^[17-22]考虑了多次跌落冲击、初刚度损失、应力变化率、应变率、塑性应变、屈服强化等因素,建立了发泡聚苯乙烯(EPS)的非线性粘弹塑性模型,并进行了多自由度缓冲包装设计,为包装优化设计奠定了理论基础。其本构模型如下:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = f\left(\frac{\rho}{\rho_1}\right) \{ K \text{th}[a_2(\epsilon - \epsilon_p)] + a_4 \tan(a_3 \epsilon) + a_5 \tan^3(a_3 \epsilon) E_1 + E_2 \} + E_3(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_p) + E_4(\ddot{\epsilon} - \ddot{\epsilon}_p) \quad (4)$$

文献[23-26]考虑大主应力、大主应变及密度等因素,基于塑性增量理论、黏弹塑性特征等,研究了大应变EPS的本构模型。

聚氨酯泡沫作为一种良好的能量吸收和减振材料,经常应用于缓冲包装的衬垫材料,对聚氨酯泡沫的力学性能及建模研究的文献较多,目前比较成熟的Sherwood和Frost^[27]模型考虑了温度、密度、应变和应变率的影响,其本构模型为:

$$\sigma = H(T) G(\rho) M(\epsilon, \dot{\epsilon}_0) f(\epsilon) \quad (5)$$

卢子兴等^[28-29]修正了Sherwood模型,得到不同密度、不同应变率时的硬质聚氨酯泡沫塑料的拉伸本构关系为:

$$\sigma = [c(\rho - \rho_0) + 1] \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{a+b} \sum_{i=1}^6 A_i \epsilon^i \quad (6)$$

胡时胜等^[30]认为Sherwood模型中的密度和应变是耦合影响应力的,为此将模型中的 $G(\rho)$ 改为 $G(\frac{\rho}{\rho_0}, \epsilon)$,并用一种幂指数关系表示,得到硬质聚氨酯的压缩本构关系为:

$$\sigma = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^A \cdot \epsilon^B \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \left(1 + C \lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \sum_{i=1}^6 A_i \epsilon^i \quad (7)$$

但在高应变率下,该本构方程的误差较大。

发泡聚乙烯(EPE)是EPS的换代产品,其环保性能优于EPS。EPE缓冲材料与一般多孔材料的压缩特征相似,应力-应变曲线也具有弹性段、塑性屈服

平台段及致密段 3 个阶段。当变形量达到 40% 后,应力迅速增加,但压缩变形却增长缓慢。材料表现出明显的非线性特征。这种材料的应力-应变关系可采用如下模型^[31]:

$$\sigma = A + B\varepsilon + C\varepsilon^{2.5} + D\varepsilon^3 \quad (8)$$

Ruiz-Herrero^[30-31]研究了不同发泡密度下的发泡聚乙烯在平压冲击下的力学行为,并与几种理论模型进行了对比,为缓冲包装设计奠定了基础。

2008 年起,高德、卢富德、李俊等人^[32-36]考虑材料密度、加载速度、发泡种类等因素,建立了 EPE 缓冲包装材料的模型,并用此模型进行了缓冲包装优化设计。

以上关于 EPE 缓冲性能及本构建模的研究,还没有考虑温度、湿度、损伤、能量吸收等因素的影响,进一步的研究有待进行。

2.3 蜂窝纸板

蜂窝纸板的比强度和比刚度高,重量小,内芯密度几乎与发泡塑料相当。由于内芯中充满空气且互不流通,故具有不俗的防振缓冲性能,适用于精密仪器、仪表、家用电器与易碎物品的运输包装。1998 年 Chen 等人^[37]基于等效的应变能及广义连续介质力学,推导了六边形、三边形和四边形蜂窝结构的本构关系;1994 年 Wang 和 Stronge^[38]基于微极弹性理论,推导了规则蜂窝结构的应力-应变本构关系;2008 年 Park^[39]基于修正的应力偶理论,提出了六边形蜂窝结构细观力学模型,该模型考虑了细胞壁弯曲与轴向变形。

我国蜂窝纸板缓冲防护机理的研究基本上还处于实验分析阶段。2006 年王冬梅^[40]用分段函数方法建立了蜂窝纸板的压缩本构模型;2008 年王梅等人^[41]通过蜂窝纸板的静态压缩性能试验,进行力学性能研究,建立了蜂窝纸板的粘弹塑性力学模型:

$$\sigma + P_1 \dot{\sigma} + m_0 \sigma_s = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} \quad (9)$$

以上研究均限于静态建模,且未考虑温湿度、材质、密度、蜂窝形状、蜂窝高度等因素的影响,与包装防护设计直接相关的防振缓冲的动态模型研究,未见报道。

2.4 纸浆模塑

纸浆模塑大多用废纸为主要原料,原料来源丰富,但其承载及回弹性不尽如人意,目前主要用于一些小型电子产品、水果、蛋类等轻量物品的缓冲包装。2000 年 John Hoffmann^[42]研究了单元结构对缓冲性能的影响。2004 年 Ma^[43]开发了结构因素法,用模块设计法指导薄壁结构的包装设计,使用 ABAQUS 有

限元软件计算结构因素在静力作用下的影响,给出了结构单元与力的承载能力的经验关系。2007 年田羽^[44]在分析软件 ANSYS 中实现了高效、合理的结构设计方法。2007 年张业鹏^[45]利用有限元分析软件 ANSYS 对 3 种典型结构单元的缓冲性能进行静态压缩仿真分析。2009 年王怀文、计宏伟^[46]对纸浆模塑材料的压缩力学行为进行了较系统的实验研究,利用描述泡沫塑料的经验型本构关系框架,给出了一种经验型的纸浆模塑材料本构模型,根据不同密度材料在不同应变率下的压缩实验数据,对该模型中的相关参数进行了拟合,给出的纸浆模塑材料本构模型为:

$$\sigma = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^A \varepsilon^B \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 + \lg \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \sum_{i=1}^6 A_i \varepsilon^i \quad (10)$$

纸浆模塑力学性能的分析至今大多集中于衬垫制品,而表征材料本身性能的本构模型研究较少。

2.5 植物秸秆

用植物秸秆为原料制造缓冲包装材料是一个新的研发方向。植物秸秆来源广、可降解,鉴于在农业废弃物再利用工程中的重要前景,引起了广泛的关注,其市场潜力和社会意义十分巨大。国际上,在该类材料开发上投入了不少的力量,但至今获得的制品性能仍有待改进。植物秸秆类包装材料的动力学性能,有待于深入研究。国内高德、刘壮、常江等人^[47-51]以植物秸秆为基材研发了复合缓冲包装材料,通过静态压缩、动态跌落实验方法,分析对比了发泡聚苯乙烯的缓冲性能,仅考虑了密度、加载速度、秸秆的添加量等因素,建立了初步的力学模型。以上研究还没有考虑温湿度、初刚度损失、多次冲击等的影响。

综上所述表明,缓冲包装材料缓冲性能及建模研究总体上还不成熟。理论研究上的滞后,使缓冲包装结构的科学设计,成为了包装产业现代化进程中的一个“瓶颈”。

3 结语

1) 缓冲包装材料的本构建模时,反映缓冲包装材料宏观性质的物理因素是最本质的,从包装工程的应用视角,因素及其对应参数的数量也是必需考虑的。因素及其对应的参数数量越多,本构模型越全面,越能逼近材料的固有性质,但是随着因素及参数的增多,变得过于复杂而难以实际应用;因素及其对应的参数数量越少,本构关系越简单,越便于应用,但是数量

太少,甚至漏掉了重要因素,就不能反映研究对象的本质了。所以,应该针对不同缓冲包装材料及它们的使用条件,合理地选定因素及其对应的参数数量。

2) 建立缓冲包装材料的本构方程时,必需考虑使用条件,即考虑外界因素,包括外界环境因素(温度、湿度等)、外界激励力性质(振动、冲击、随机等)及条件(松弛、蠕变、多次冲击等)。需要强调的是,本构关系是物质宏观性质的内因表征。虽然本构方程含有外界环境因素、外界激励力性质等,例如湿度因素、外力的因素,但是这个湿度因素、外力因素已经通过湿度、外力的影响规律成为物质性质的内在因素。例如,本构方程中的应力,是含有外界力的因素,但是为了抵抗、平衡外界力,物质内产生了内力,由内力产生应力,这个应力是物质的内因。缓冲包装材料受载时的力学行为强烈地依赖于其内部的应力应变状态,不同的应力应变状态对应着不同的损伤机理。

注:此文为2010年《第十三届全国包装工程学术会议》大会主旨报告的部分内容。

参考文献:

- [1] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24(3): 353-461.
- [2] JANSSEN R R. A Method for the Paper Selection of a Package Cushion Material and Its Dimensions[R]. Rept NA-51-1004, Novth American Aviation, Inc, 1952.
- [3] FRANLIN P E, HATAE M T. Packaging Design. Shock and Vibration Handbook[K]. NY: McGRAW-Hill Book Co, 1961.
- [4] Minitary Standardization Handbook, Package Cushioning Design[K]. MIL-HDBK-304B, U. S. Department of Defense, 1964.
- [5] COST T L. Dynamic Response of Container and Container Cushion Structure [R]. Athena Engineering Company, Northport, Alabama Technical Report No. 74-003, 1974.
- [6] ROOT D. Six-step Method for Cushioned Package Development[K]. Lansmont Report, Original, 1997.
- [7] 中国大百科全书力学编辑委员会. 中国大百科全书(力学卷)[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985.
- [8] 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.
- [9] 高德, 胡洪志, 奚德昌. 瓦楞纸板的动态压缩性能建模及应用[J]. 非线性动力学学报, 1998(5): 202-208.
- [10] 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.
- [11] 高德, 王振林, 陈乃立. B楞双层瓦楞纸板衬垫平压缓冲动态性能建模[J]. 振动工程学报, 2001, 14(2): 172-177.
- [12] 吴天明. 瓦楞纸板平压冲击性能的研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 1992.
- [13] 高德. 瓦楞纸板缓冲性能理论及模型[D]. 杭州: 浙江大学, 1994.
- [14] MINETT M A. Study of Air Flow Effects on the Cushioning Characteristics of Multi Layered Pre-compressed Fiberboard[D]. Melbourne: Victoria University, 2006.
- [15] ROUILLARD V, SEK M A. Behaviour of Multi-layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads[J]. Strain, 2007, 43(4): 345-347.
- [16] HCRRYSSON A, RISTTINMAA M. Large Strain Elastoplastic Model of Paper and Corrugated Board[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45: 3334-3352.
- [17] 胡强, 童忠飏. 非线性粘弹性材料的微分型本构方程[J]. 浙江大学学报, 1989, 23(4): 6-15.
- [18] 胡强. 泡沫塑料包装衬垫缓冲性能和缓冲包装优化设计的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1990.
- [19] 胡强, 童忠飏. 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.
- [20] 胡强, 童忠飏. 泡沫塑料包装衬垫的非线性弹性模型[J]. 振动与冲击, 1990, 9(2): 9-13.
- [21] 胡强, 童忠飏. 泡沫衬垫缓冲性能模型参数混合优化方法[J]. 包装工程, 1991, 12(1): 23-27.
- [22] 胡强, 童忠飏. 聚苯乙烯泡沫衬垫缓冲性能的改进模型[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1992. (S1)
- [23] HAZARIKA H. Stress-strain Modeling of EPS Geofom for Large-strain Applications[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006(24): 79-90.
- [24] 凌建明, 吴征, 叶定威. 压缩条件下发泡聚苯乙烯的本构关系和疲劳特性[J]. 同济大学学报, 2003, 31(1): 21-25.
- [25] 刘晓曦, 岑国平. 压缩条件下发泡聚苯乙烯蠕变本构关系及有限元分析[J]. 中国塑料, 2006, 20(4): 86-90.
- [26] 刘晓曦, 李薇. 压缩条件下发泡 EPS 黏弹塑性力学模型研究[J]. 合成树脂及塑料, 2006, (23)6: 24-27.
- [27] SHERWOOD J A, FROST C C. Constitutive Modeling and Simulation Energy Absorbing Polyurethane Foam [J]. Polymer Eng Sci, 1992, 32(16): 1138-1146.
- [28] 卢子兴, 黄筑平, 王仁. 开孔泡沫塑料率相关的拉伸力学性能及本构关系[J]. 高分子学报, 1997(4): 387-392.
- [29] 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, 2005, 32(4): 22-27.
- [30] 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.
- [31] RUSCH K C. Load-compression Behavior of Flexible Foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1969, (13): 2297-2311.

3 结论

1) 合成了 $\text{Eu}(\text{BA})_3\text{Phen}$ 三元配合物以及 $\text{Eu}(\text{BA})(\text{TTA})_2\text{Phen}$ 四元配合物,利用红外光谱仪测定了其红外光谱,表明配体与中心离子发生了配位。

2) 利用荧光分光光度计测定了 $\text{Eu}(\text{BA})_3\text{Phen}$ 三元配合物的最佳激发波长为 378 nm,发射波长为 614 nm; $\text{Eu}(\text{BA})(\text{TTA})_2\text{Phen}$ 四元配合物最佳激发波长为 383 nm,发射波长为 614 nm; $\text{Eu}(\text{BA})(\text{TTA})_2\text{Phen}$ 相对荧光强度 422.355,远大于 $\text{Eu}(\text{BA})_3\text{Phen}$ 的相对荧光强度 158.015。

3) 制备了 2 种稀土铈荧光防伪油墨,测定了其荧光光谱,与相应配合物的发射光谱形状相同,发射峰位相同,仅强度有所降低,表现为铈离子的特征荧光发射。在可见光下印迹无色,在紫外灯下呈现明显红色荧光。通过对制备油墨印刷适性的测定,结果表明其符合荧光防伪油墨要求。

(上接第 4 页)

- [32] RUIZ-HERRERO J L. Prediction of Cushion Curves for Closed Cell Polyethylene-based Foams. Part I: Experimental[J]. Cellular Polymers, 2005, 24(6): 329-346.
- [33] RUIZ-HERRERO J L. Prediction of Cushion Curves for Closed Cell Polyethylene-based Foams. Part II: Experimental[J]. Cellular Polymers, 2006, 25(3): 159-175.
- [34] 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.
- [35] 卢富德.发泡聚乙烯缓冲与隔振性能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2010.
- [36] 李俊.发泡聚乙烯缓冲性能的研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [37] CHEN J Y, HUANG Y, ORTIZ M. Fracture Analysis of Cellular Materials: A Strain Gradient Model[J]. J Mech Phys Solids, 1998, 46: 789-828.
- [38] WANG X L, STRANGE W J. Micropolar Theory for Two-dimensional Stresses in Elastic Honeycomb [J]. Proc R Soc Lond, 1999, 455: 2091-2116.
- [39] PARK S K, GAO X L. Micromechanical Modeling of Honeycomb Structures Based on a Modified Couple Stress Theory[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2008, 15: 574-593.
- [40] 王冬梅,廖强华.蜂窝纸板静态压缩力学性能建模研究[J].包装工程,2006,27(4):129-132.
- [41] 王梅,李克天,赵荣丽.蜂窝纸板力学模型的建立和缓冲

参考文献:

- [1] 陈野,蔡伟民.铈、钆-苯甲酸-1,10-菲咯啉的合成及荧光性质[J].稀有金属,2005,29(6):865-870.
- [2] 宝金荣,朱晓伟,王智亮.铈、钆-2-噻吩甲酸-1,10-菲咯啉三元配合物的合成及荧光性质的研究[J].稀土,2007,28(3):38-41.
- [3] 钱军浩.油墨配方设计与印刷手册[K].北京:中国轻工业出版社,2004.
- [4] 孙建新.新型紫外荧光防伪油墨的研究及其印刷适性的研究[D].郑州:中国人民解放军信息工程学院,2001.
- [5] 王正祥,陈洪,谭美军,等.铈-苯甲酸-邻菲咯啉掺杂配合物体系的合成与荧光性能研究[J].光谱学与光谱分析,2005,25(7):1106-1109.
- [6] 郝晓秀,杨淑蕙,孙诚.荧光防伪包装纸荧光强度的测定技术[J].包装工程,2007,28(9):24-26.
- [7] 江祖成,蔡汝秀,张华山.稀土元素分析化学[M].第2版.北京:科学出版社,2000.
- [8] 孙建新.新型紫外荧光防伪油墨的研究及其印刷适性的研究[D].郑州:中国人民解放军信息工程学院,2001.
- [9] 孙建新.新型紫外荧光防伪油墨的研究及其印刷适性的研究[J].包装工程,2008,(29)8:29-31.
- [42] HOFFMANN John. Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging[J]. Packag Technol Sci, 2000, 13: 211-220.
- [43] MA X, SOHL A K, WANG B. A Design Database for Moulded Pulp Packaging Structure[J]. Packag Technol Sci, 2004, 17: 193-204.
- [44] 田羽.纸浆模塑衬垫力学性能的测试与仿真研究[D].北京:北京印刷学院,2007.
- [45] 张业鹏.纸浆模塑包装结构的缓冲性能及其可靠性研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.
- [46] 王怀文,计宏伟,苗惠.纸浆模塑材料压缩力学行为及其本构关系的研究[J].机械强度,2009,31(3):382-386.
- [47] 高德,刘壮,孙智慧.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.
- [48] 高德,景全荣.植物秸秆包装容器压缩性能分析[J].农业机械学报,2009,40(3):201-204.
- [49] GAO De, WANG Yu, LIU Zhuang. A Set of Constitutive Models for a Corn Stover Fiber-based Composite Cushioning Packaging Material[J]. Advanced Materials Research, 2011, 174: 513-516.
- [50] 刘壮.植物纤维发泡聚苯乙烯缓冲包装材料及其性能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2006.
- [51] 常江.植物秸秆包装材料缓冲性能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2007.