

蜂窝/瓦楞叠合纸板的缓冲性能研究

赵英芹¹, 王玉龙¹, 蒋春华²

(1. 武汉大学, 武汉 430079; 2. 深圳宝龙达信息技术股份有限公司, 深圳 518055)

摘要: 结合蜂窝纸板和瓦楞纸板的粘弹塑性和压缩破损机理, 通过静态压缩实验, 得到了蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞纸板的应力应变曲线和缓冲系数应变曲线, 建立了两者的静态本构关系, 并分析了缓冲特性曲线。结果表明, 蜂窝/瓦楞纸板的缓冲性能较蜂窝纸板更佳, 为以瓦楞纸箱为外包装箱, 蜂窝纸板为缓冲材料的包装件系统的优化设计提供参考。

关键词: 蜂窝/瓦楞叠合纸板; 本构关系; 缓冲性能

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)23-0060-04

Cushion Performance of Honeycomb Superposed Corrugated Paperboard

ZHAO Ying-qin¹, WANG Yu-long¹, JIANG Chun-hua²

(1. Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Shenzhen Baolongda Information Technology Co., Ltd., Shenzhen 518055, China)

Abstract: Combining the visco-elastic plasticity and the compression damage mechanism of honeycomb paperboard and corrugated paperboard, the strain-stress curve and cushioning-coefficient curves were acquired and the static constitutive relation of honeycomb paperboard and the superposed paperboard was established based on results of static compression test, and the cushion performance curve was analyzed. The result showed the cushion performance of honeycomb superposed corrugated paperboard is better than honeycomb paperboard. The purpose was to provide reference for the optimal design of packaging system using honeycomb paperboard as cushion material.

Key words: honeycomb superposed corrugated paperboard; constitutive relation; cushion performance

蜂窝纸板作为结构新颖、承载性能好、缓冲性能好的绿色材料受到包装界的广泛关注, 并已成功应用于家电产品、机械零件、陶瓷制品等的缓冲包装^[1-2]。瓦楞纸箱具有良好的再利用率和加工性能, 是最重要的运输包装容器。传统上设计蜂窝衬垫时, 只按照其缓冲曲线进行计算, 忽略了瓦楞纸箱的缓冲性能^[3]。因此, 将瓦楞纸板和蜂窝纸板上下层叠合, 比较研究蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞叠合纸板的缓冲性能^[4-6], 量化瓦楞纸板的缓冲作用以减少蜂窝纸板的用量具有重要的实际意义。

1 蜂窝纸板和瓦楞纸板的缓冲性能表征

1.1 蜂窝纸板和瓦楞纸板的缓冲性能表征方法

缓冲包装材料之所以能保护产品是因为它能够大

量吸收外界冲击和振动产生的动能^[7]。目前, 材料的缓冲性能表征方法主要有 Janssen 因子法、Rusch 曲线法、Cusion 因子法、能量吸收率曲线法和能量吸收图法^[8], 其中 Cusion 因子法将材料的缓冲效率与其应力应变性能相联系, 是表征材料缓冲特性最经典的方法。

1.2 蜂窝纸板和瓦楞纸板的压缩破损机理及本构关系

1988 年, 英国剑桥大学工程系的 Gibson 和 Ashby^[9]最早系统地研究了不同材料的蜂窝结构的压缩过程, 提出了材料变形产生线弹性、平台、密实化 3 个阶段。2006 年, 王冬梅^[10]研究了蜂窝纸板的压缩破损机制, 将其应力应变曲线分为线弹性、弹塑性、塑性坍塌和密实化 4 个阶段。瓦楞纸板和蜂窝纸板一样都是具有各向异性和粘弹塑性的夹层板材, 试验表明瓦楞纸板的压缩过程同样可分为以上 4 个阶段^[11-12]。

收稿日期: 2013-09-25

作者简介: 赵英芹(1990-), 女, 安徽人, 武汉大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 王玉龙(1965-), 江苏人, 硕士, 武汉大学副教授, 研究领域为运输包装、包装结构设计。

1945年,R. D. Mindlin^[13]将缓冲材料按力学性能的不同分为6类:线型弹性体、双直线型弹性体、三次函数型弹性体、双曲正切型弹性体、正切型弹性体和不规则弹性体,并给出了载荷变形 $F-x$ 公式。双曲正切型是弹性极限较小的材料在较大范围内的典型表现。

材料的应力应变曲线与 $F-x$ 曲线有一样的函数形式,为了研究方便,可将材料在标准温度下的压缩应力应变曲线公式化,建立本构关系。1990—2012年间,奚德昌、王振林、高德^[14-15]等,率先考虑温度、湿度、变形种类、层数、密度、冲击次数、起始刚度的损失、强化增量等因素对蜂窝纸板和瓦楞纸板缓冲性能的影响,运用经典的粘弹塑性理论,识别模型参数,建立了蜂窝纸板和瓦楞纸板的静、动态非线性本构模型^[16]。笔者借鉴前人的研究成果,建立以下静态本构关系。

1) 蜂窝纸板的静态本构关系。

$$\text{线弹性阶段 } \sigma = a_1 \varepsilon \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1$$

$$\text{弹塑性阶段 } \sigma = a_2 + a_3 \varepsilon + a_4 \varepsilon^2 + a_5 \varepsilon^3 \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_2$$

塑性坍塌及密实化阶段

$$\sigma = a_6 \tanh(a_7 \varepsilon) + a_8 \tan(a_9 \varepsilon) \quad \varepsilon_2 \leq \varepsilon \leq 1$$

2) 瓦楞纸板的静态本构关系。

$$\sigma = a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon^3 + a_4 \varepsilon^4 + a_5 \varepsilon^5 \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1, \text{ 其中}$$

$a_1 \sim a_5$ 为待识别参数。

2 蜂窝/瓦楞叠合纸板的静态缓冲实验

2.1 试样准备

静态压缩试验所用的蜂窝纸板和瓦楞纸板由武汉荷力胜蜂窝材料有限公司提供,试样为5块蜂窝纸板,5块蜂窝/瓦楞叠合纸板,具体结构参数见表1—2。

表1 蜂窝纸板试样结构参数

Tab. 1 Structural parameter of honeycomb paperboard

试样	面纸定量 /(g·m ⁻²)	芯纸定量 /(g·m ⁻²)	胞元边长 /mm	长×宽 /mm ²	厚度 /mm	数量
蜂窝 纸板	160	110	6.28	100×100	30	10

表2 瓦楞纸板试样结构参数

Tab. 2 Structural parameter of corrugated paperboard

试样	楞形	楞型	瓦楞 层数	长×宽 /mm ²	厚度 /mm	数量
瓦楞纸板	UV	C	1	100×100	4	5

2.2 试验步骤

试验操作步骤参照国家标准《GB/T 8168—2008

包装用缓冲材料静态压缩试验方法》。

1) 按 GB/T 4857. 2—2005《运输包装件基本试验第2部分:温湿度调节处理》,选择温度、相对湿度为60%的条件,将试样置于温湿度调节处理箱内经历24 h。

2) 静态压缩试验分为A法和B法,B法需要对试验进行预加压处理,A法无需预处理,本试验采用A法。试验设备为YED-50型电子式包装件压力试验机,最大载荷为50 kN,压缩速率为12 mm/min。对5块蜂窝纸板进行试验,自动记录装置记录5组力位移数据。

3) 对5块蜂窝/瓦楞叠合纸板进行试验,记录5组力位移数据。

3 实验数据处理与结果分析

3.1 静态应力应变 σ - ε 曲线

计算蜂窝纸板的5组力位移数据的平均值,由力 F 和变形 x 与应力 σ 和应变 ε 的关系,得静态应力应变数据,绘制蜂窝纸板的静态应力应变 σ - ε 曲线,见图1。

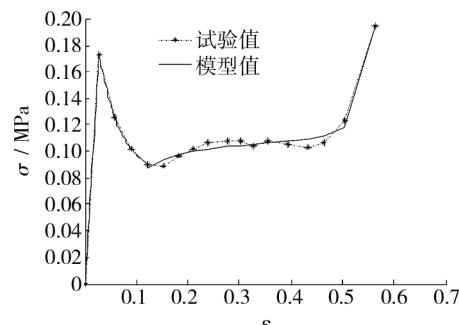


图1 蜂窝纸板静态应力应变 σ - ε 曲线

Fig. 1 Static stress-strain curve of honeycomb paperboard

由图1可知,当 $0 \leq \varepsilon \leq 0.028$ 时,应力与应变呈线性关系,为线弹性阶段;当 $0.028 \leq \varepsilon \leq 0.153$ 时,应力随应变增大而减小,为弹塑性阶段;当 $0.153 \leq \varepsilon < 1$ 时,应力出现较长的平台,随后急剧增大,为塑性坍塌和密实化阶段。因此,建立蜂窝纸板的静态本构关系为:

$$\sigma = \begin{cases} a_1 \varepsilon & 0 \leq \varepsilon \leq 0.028 \\ a_2 + a_3 \varepsilon + a_4 \varepsilon^2 + a_5 \varepsilon^3 & 0.028 \leq \varepsilon \leq 0.153 \\ a_6 \tanh(a_7 \varepsilon) + a_8 \tan(a_9 \varepsilon) & 0.153 \leq \varepsilon < 1 \end{cases} \quad (1)$$

运用 Matlab 软件对数据进行最小二乘法拟合,识别 $a_1 \sim a_9$ 的值见表 3。蜂窝纸板的静态应力应变曲线见图 1 中的模型值,模型值与试验值的平均相对偏差为 2.20%,模型较准确。

表 3 蜂窝纸板静态本构关系的参数识别

Tab. 3 Parameter recognition of honeycomb paperboard

static constitutive relation					MPa
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
0.6786	0.2496	-3.4279	26.8638	-77.7943	
a_6	a_7	a_8	a_9		
0.1011	10.2	0.0035	2.7147		

计算蜂窝/瓦楞叠合纸板的 5 组力位移 $F-x$ 数据的平均值,由力 F 和变形 x 与应力 σ 和应变 ε 的关系,得静态应力应变 $\sigma-\varepsilon$ 数据,并由此得出静态应力应变 $\sigma-\varepsilon$ 曲线,见图 2。

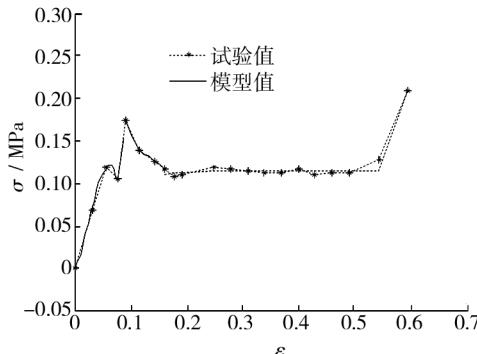


图 2 蜂窝/瓦楞纸板应力应变 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

Fig. 2 Static stress-strain curve of honeycomb superposed corrugated paperboard

由图 2 可知,当 $0 \leq \varepsilon \leq 0.091$ 时,应力先增大到一个峰值(0.118 MPa,此时 $\varepsilon = 0.056$),然后下降,最后又上升至一个更高的峰值(0.175 MPa)。瓦楞纸板的刚度较蜂窝纸板差,故其峰值应力应变比蜂窝纸板小,从而可知,当 $0 \leq \varepsilon \leq 0.076$ 时为瓦楞纸板的压溃阶段,当 $0.076 \leq \varepsilon \leq 0.091$ 时为蜂窝纸板的线弹性阶段,当 $0.091 \leq \varepsilon \leq 0.162$ 时,应力随应变增大而减小,为弹塑性阶段;当 $0.162 \leq \varepsilon \leq 1$ 时,应力出现较长的平台,随后急剧增大,为塑性坍塌和密实化阶段。由此,建立蜂窝/瓦楞叠合纸板的静态本构关系为:

$$\sigma = \begin{cases} a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 & 0 \leq \varepsilon \leq 0.076 \\ a_4 + a_5\varepsilon & 0.076 \leq \varepsilon \leq 0.091 \\ a_6 + a_7\varepsilon + a_8\varepsilon^2 + a_9\varepsilon^3 & 0.091 \leq \varepsilon \leq 0.162 \\ a_{10} \tanh(a_{11}\varepsilon) + a_{12} \tan(a_{13}\varepsilon) & 0.162 \leq \varepsilon \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

运用 Matlab 软件对数据进行最小二乘法拟合,识别 $a_1 \sim a_9$ 数据见表 4。蜂窝/瓦楞纸板静态应力应变 $\sigma-\varepsilon$ 曲线见图 2 的模型值,模型值与试验值的平均相对偏差为 2.45%,模型较准确。

表 4 蜂窝/瓦楞叠合纸板静态本构关系的参数识别结果

Tab. 4 Parameter recognition result of honeycomb superposed corrugated paperboard

static constitutive relation					MPa
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
1.1565	56.2146	-700.7034	-0.2497	4.6667	
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	
0.9852	-18.1137	130.0830	-317.2150	0.1155	
a_{11}	a_{12}	a_{13}			
12.3962	-0.0001	2.6462			

比较分析蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞纸板的静态应力应变 $\sigma-\varepsilon$ 曲线,见图 3,可作以下分析。

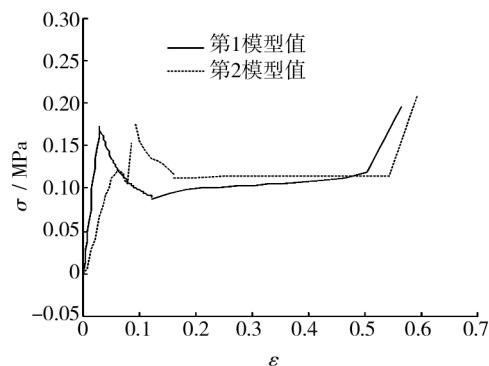


图 3 蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞叠合纸板的静态应力应变 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

Fig. 3 Static stress-strain curves of honeycomb paperboard and honeycomb superposed corrugated paperboard

1) 蜂窝/瓦楞叠合纸板的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线比蜂窝纸板增加了瓦楞纸板的压缩阶段,说明瓦楞纸板也能发挥一定的缓冲作用。

2) 蜂窝纸板的临界屈曲载荷为 0.173 MPa,而蜂窝/瓦楞叠合纸板的临界屈曲载荷为 0.175 MPa,提高了 0.002 MPa。

3) 蜂窝纸板的平台应力为 0.105 MPa 左右,而蜂窝/瓦楞叠合纸板的平台应力为 0.113 MPa 左右,提高了 0.008 MPa。

4) 以上变化使蜂窝/瓦楞叠合纸板的曲线下的面积比蜂窝纸板大,即应变能大,说明等体积的蜂窝/瓦楞叠合纸板较蜂窝纸板能吸收更多的能量,缓冲性能更好。

3.2 静态缓冲系数应变 $C-\varepsilon$ 曲线

由蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞叠合纸板的静态应力应变数据可分别计算其静态缓冲系数 C , 绘制蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞叠合纸板的静态缓冲系数应变 $C-\varepsilon$ 曲线, 见图 4。比较图 4 中的 2 条曲线, 可作以下分析。

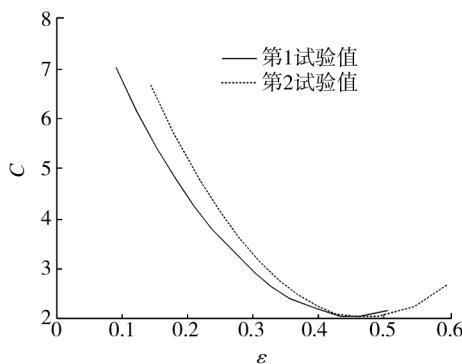


图 4 蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞叠合纸板的静态缓冲系数应变 $C-\varepsilon$ 曲线

Fig. 4 Static cushioning coefficient-strain curves of honeycomb paperboard and honeycomb superposed corrugated paperboard

1) 蜂窝/瓦楞叠合纸板的 $C-\varepsilon$ 曲线较蜂窝纸板向右方推移, 这是由于瓦楞纸板被压缩使整体的应变增大的缘故。

2) $0 \leq \varepsilon \leq 40\%$ 时, 虽然蜂窝/瓦楞叠合纸板的应变能较蜂窝纸板大, 但其应力也大, 使 $C=\sigma/e$ 的值较大。

3) 随着应变继续增大, 由于蜂窝/瓦楞叠合纸板的应力处于平台期(较长), 而蜂窝纸板经历剩余的平台期(较短)后逐渐进入密实化阶段, 缓冲系数 C 较前者大, 且 $C_{min}=2.1$, 出现在 $\varepsilon=43.3\%$ 处, 而蜂窝/瓦楞叠合纸板在应变 $49\% \sim 54.4\%$ 范围内, 都有 $C_{min}=2.0$ 。

4) 以上变化使蜂窝/瓦楞叠合纸板的最佳缓冲区域大于蜂窝纸板, 最小缓冲系数较小, 缓冲性能好。

4 结语

借助静态压缩试验, 得到了蜂窝纸板和蜂窝/瓦楞叠合纸板的缓冲特性曲线, 蜂窝/瓦楞叠合纸板的应力应变曲线比蜂窝纸板增加了瓦楞纸板的压缩阶段, 临界屈曲载荷和平台应力都有提高, 静态缓冲性能更好。蜂窝/瓦楞叠合纸板的静态缓冲系数较蜂窝纸板向右下方推移, $\varepsilon \geq 40\%$ 时, 缓冲系数较小, 且最

佳缓冲区域增大, 静态缓冲性能更好。为以瓦楞纸箱为外包装箱、蜂窝纸板为缓冲材料的包装件系统的优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 辛成龙, 郭彦峰. 蜂窝纸板静态缓冲特性的实验研究与分析[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 56-58.
XIN Cheng-long, GUO Yan-feng. Experimental Research and Analysis on Static Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 56-58.
- [2] 韦伽. 包装用瓦楞纸板的性能研究及发展趋势[J]. 中国包装工业, 2012(19): 9-11.
WEI Jia. The Performance Research and Development Trend of Wrapping Corrugated Paperboard [J]. China Packaging Industry, 2012(19): 9-11.
- [3] 张焕勤. 蜂窝纸板缓冲包装设计方法研究[Z]. 2009.
ZHANG Huan-qin. The Design Method Research of Buffering Packaging for Honeycomb Paperboard [Z]. 2009.
- [4] 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, 2005, 26(4): 9-11.
LI Hou-min, ZHU Ruo-yan, YANG Xiao-jun. Buffering Characteristics Research of Honeycomb Paperboard and Corrugated Paperboard Composite Structure [J]. Packaging Engineering, 2005, 26(4): 9-11.
- [5] 言利容, 谢勇. 蜂窝纸板/EPE 组合材料的动态缓冲性能[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 13-16.
YAN Li-rong, XIE Yong. Dynamic Cushioning Performance of Composite Material of Honeycomb Paperboard and EPE [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 13-16.
- [6] 贺丹华. 蜂窝/瓦楞复合纸板力学性能的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
HE Dan-hua. Mechanical Properties Research of The Composite Board of Honeycomb Paperboard and Corrugated Paperboard [D]. Nanning: Guangxi University, 2008.
- [7] 王冬梅, 罗陈, 刘映平. 多孔材料缓冲吸能特性表征方法[C]//第六届中国功能材料及其应用学术会议, 武汉, 2007.
WANG Dong-mei, LUO Chen, LIU Ying-ping. Methods of Showing Cushioning Properties of Porous Materials [C]//The Sixth Academic Meeting of China Functional Materials and Its Application. Wuhan, 2007.
- [8] 陈淑荣. 发泡材料缓冲性能表征方法的研究进展[J]. 印刷质量与标准化, 2013(1): 25-27.

(下转第 67 页)

- Engineering, 2011, 32(9):44–47.
- [8] 宋宝丰,袁志庆.缓冲包装设计中构建破损边界曲线的新途径[J].包装学报,2013,5(3):46–50.
- SONG Bao-feng, YUAN Zhi-qing. A New Way of Constructing Damage Boundary Curve in Cushioning Packaging Design[J]. Packaging Journal, 2013, 5(3):46–50.
- [9] WILLIAM I K. Development in Testing Products for Distribution [J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(3):89–98.
- [10] UMUD E O, GUNAY A. Finite Element Analysis of Expanded Polystyrene Foam under Multiple Compressive Loading and Unloading[J]. Materials and Design, 2011, 32(2):773–780.
- [11] GB/T 8166—1987,缓冲包装设计方法[S].
GB/T 8166—1987, Package cushioning design method[S].
- [12] 赵荣丽,李克天,何卫,等.变压器运输包装缓冲衬垫设计[J].包装工程,2010,31(21):19–22.
ZHAO Rong-li, LI Ke-tian, HE Wei, et al. Design of Bumper Pad for Transport Package of Transformer [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(21):19–22.
- [13] 梅林玉.缓冲包装结构设计浅析[J].中国包装,2007(6):7–9.
MEI Lin-yu. Analysis of Package cushioning Structure Design[J]. China Packaging, 2007(6):7–9.
- [14] 李连进.产品隔振缓冲包装结构的设计方法[C]//中国
- 农业机械学会 2006 年学术年会论文:1459–1461.
- LI Lian-jin. Method of Design of Product Packing Structure of Vibration Isolation and Buffering[C]//China Agricultural Machinery Association 2006 Annual Conference Paper: 1459–1461.
- [15] 向红.包装设计工程基础[M].长沙:国防科技大学出版社,2002:99–102.
- XIANG Hong. Fundamentals of Packaging Design Engineering[M]. Changsha: National Defence Industry Press, 2002: 99–102.
- [16] 张华良,刘乘.包装材料缓冲特性曲线研究及其在缓冲设计中的应用[J].西北轻工业学院学报,1990,8(3):45–48.
ZHANG Hua-liang, LIU Cheng. Study on Cushion Curves and Its Using in Cushion Design [J]. Journal of Northwest Institute on Light Industry, 1990, 8(3):45–48.
- [17] 彭国勋.物流运输包装设计[M].北京:印刷工业出版社,2012:106–112,136–137.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packaging Design [M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012:106–112,136–137.
- [18] 高德,计宏伟.包装动力学[M].北京:轻工业出版社,2010:156–172.
GAO De, JI Hong-wei. Packaging Dynamics [M]. Beijing: Light Industry Press, 2010:156–172.

(上接第 63 页)

- CHEN Shu-rong. The Research Progress of Cushioning Performance Characterization Methods for Foaming Materials [J]. Printing Quality & Standardization, 2013(1):25–27.
- [9] GIBSON L J, ASHBY M F, KUMAR K S. Cellular Solids: Structure and Properties, 2ded[J]. MRS Bulletin-Materials Research Society, 1998, 23(7):69.
- [10] 王冬梅.蜂窝纸板压缩破坏机理研究[J].包装工程,2006,27(1):37–39.
WANG Dong-mei. The Research on Compression Damage Mechanism of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1):37–39.
- [11] 李晓丽.蜂窝纸板静态压缩力学性能仿真研究[D].合肥:安徽理工大学,2011.
LI Xiao-li. Simulation Research of Static Compressive Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2011.
- [12] 温时宝.层合瓦楞纸板结构沿瓦楞方向的准静态压缩性能研究[J].包装工程,2011,32(9):30–32.
WEN Shi-bao. Quasi-static Compressive Properties of Laminated Structure of Corrugated Paper-board along Corrugated Direction [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9):30–32.
- [13] MINDLIN R D. Dynamics of Package cushioning[M]. Bell Telephone Laboratories, 1945.
- [14] 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(7):336–341.
LU Fu-de, GAO De. Drop Impact Study on Cushioning Packaging System of Honeycomb Paperboard [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(7):336–341.
- [15] 卢富德,高德.C 榻瓦楞纸板动态缓冲模型及应用[J].功能材料,2012(1):39–41.
LU Fu-de, GAO De. Dynamic Cushioning Model and Application of C Corrugated Paperboard [J]. Functional Materials, 2012(1):39–41.
- [16] 李正伟,李无穷.B 榻瓦楞纸板本构模型及其应用[J].包装工程,2011,32(21):42–44.
LI Zheng-wei, LI Wu-qiong. Constitutive Model and Application of B Corrugated Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21):42–44.