

EPE/EPS 与蜂窝纸板组合静态缓冲性能的研究

钟玲珠¹, 陈安军^{1,2}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 国家轻工业包装制品质量监督检测中心, 无锡 214122)

摘要: 以 EPE 与蜂窝纸板组合结构和 EPS 与蜂窝纸板组合结构为研究对象, 通过静态压缩试验得到了 3 种材料和 2 种组合结构的应力-应变曲线和缓冲系数曲线。对比分析表明, 组合结构力学性能得到了改善; 较小应力状态下, 组合结构分别呈现出 EPE 和 EPS 的缓冲性能, 且 EPE 与蜂窝纸板组合结构的缓冲性能优于 EPS 与蜂窝纸板组合; 压缩中间阶段, 2 种组合结构缓冲曲线基本重合, 且接近于蜂窝纸板缓冲曲线; 压缩后期, 较大应力条件下, 组合结构仍有一定的缓冲性能。组合后的材料结合了 2 种材料的优点, 在较小应力和较大应力条件下均具有较好的缓冲性能。

关键词: EPE; EPS; 蜂窝纸板; 组合结构; 缓冲性能

中图分类号: TB484.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)09-0036-04

Study on Static Cushion Performance of EPE/EPS and Honeycomb Paperboard Combination

ZHONG Ling-zhu¹, CHEN An-jun^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. China National Control and Test Center for Packaging Quality, Wuxi 214122, China)

Abstract: EPE and honeycomb paperboard combination, and EPS and honeycomb paperboard combination were taken as objects. Static compression test were carried out and the stress-strain curves and cushion coefficient curves of the three materials and two combinations were obtained. The result showed that the mechanical performance of combination structure is better; at the smaller stress, the combination structure presented the cushion performance of EPE and EPS respectively; and EPE and honeycomb paperboard combination is superior to EPS and honeycomb paperboard combination; in the intermediate stage of compression, the cushion performance curves of the two combination structures are basically identical, which are similar with the honeycomb paperboard; at the later larger stress stage, the combination structures still have some cushion ability. The combination structures combine the advantages of the two materials, and have better cushion performance under smaller or larger stress.

Key words: EPE; EPS; honeycomb paperboard; combination structure; cushion performance

发泡聚乙烯(EPE)、发泡聚苯乙烯(EPS)以及蜂窝纸板等缓冲材料广泛应用于产品保护,其缓冲性能的研究对缓冲包装设计具有重要价值。孙聚杰等^[1]通过静态压缩试验,比较不同密度、不同厚度 EPE 材料的力学性能和缓冲性能;路冰琳等人^[2]通过试验探讨预压缩前后 EPE 的力学性能及缓冲性能的改变;文献[3]试验研究了 EPS 应力-应变曲线与材料厚度和压缩速率的关系,用 Avalle 理论完善了 EPS 的应力-应变模型,探讨了材料厚度与压缩速率对 EPS 隔

振及冲击能量吸收的影响;文献[4]通过静态压缩试验,对比分析了 EPE 与 EPP(发泡聚丙烯)压缩特性,研究表明 EPP 比 EPS 静态缓冲性能优良;文献[5-6]分别针对蜂窝纸板及两层叠加结构,讨论了不同压缩速率下的力学性能;李厚明等人^[7]以瓦楞纸板、蜂窝纸板及其组合结构为研究对象,试验对比分析表明组合结构兼有两者的优点,具有良好的缓冲性能;文献[8]以 EPE 和 EPS 及两者组合结构为研究对象,通过静、动态压缩试验,对比分析表明在一定条件下,EPE

收稿日期: 2013-01-07

作者简介: 钟玲珠(1987-),女,浙江人,江南大学硕士研究生,主攻运输包装。

通讯作者: 陈安军(1962-),男,河南潢川人,江南大学教授,主要从事运输包装动力学、机器人动力学及控制的研究。

与 EPS 组合结构静动态力学性能优于 EPE 及 EPS。卢富德等人^[9]基于试验数据建立了单层瓦楞纸板的动态本构关系和多层瓦楞纸板组合的串联动力学模型;文献[10]通过引入虚拟质量,用动态方程表示了串联缓冲结构的准静态压缩,对 EBE 楞瓦楞纸板和发泡聚乙烯的 3 种组合串联板的应力-应变关系进行了计算分析,并与试验数据进行对比,验证了方法的正确性。文献[11-12]对多层瓦楞纸板的缓冲性能进行了研究。包装设计中,EPE 与蜂窝纸板、EPS 与蜂窝纸板组合形式较为常见,其静态力学性能及缓冲性能的试验研究对包装设计具有一定的应用价值。

文中以 EPE 与蜂窝纸板、EPS 与蜂窝纸板组合为研究对象,通过静态压缩试验,在应力-应变曲线的基础上对比分析静态力学性能,探讨组合材料的静态缓冲性能。对 EPE 与蜂窝纸板、EPS 与蜂窝纸板组合设计具有一定的指导意义。

1 试验

1.1 标准及设备

标准:GB 8168《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》的相关标准;设备:选用英国 Lloyd 公司生产的 LRX-PLUS 电子材料试验机。

1.2 试样

试样选用密度为 27.9 kg/m^3 的发泡聚乙烯材料(EPE)、密度为 17 kg/m^3 的发泡聚苯乙烯材料(EPS)和面纸定量为 170 g/m^2 的牛皮纸、纸芯定量为 110 g/m^2 的蜂窝纸板。试样的类型有 EPE、EPS、蜂窝纸板单层材料,EPE 和蜂窝纸板组合,EPS 和蜂窝纸板组合。试样的尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,厚度为 25 mm ,试验样品在 23°C ,相对湿度 50% 的环境中预处理 24 h 以上。由于蜂窝纸板压缩后不可恢复,试验中准备 5 组相同材料的样品,取数据的均值进行分析。

2 应力-应变曲线

准静态压缩试验加载速率为 12 mm/min ,通过试验记录压力值、变形量以及材料几何尺寸,应力、应变

由以下式(1)和式(2)确定:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{x}{t} \quad (2)$$

式中: F 为压力; A 为试样承载面积; x 为变形量; t 为试样的原始厚度。根据试验数据,EPE、EPS、蜂窝纸板,EPE 与蜂窝纸板组合结构,EPS 与蜂窝纸板组合结构的应力-应变曲线见图 1。

EPE 和 EPS 的压缩过程可分为弹性阶段,屈服阶

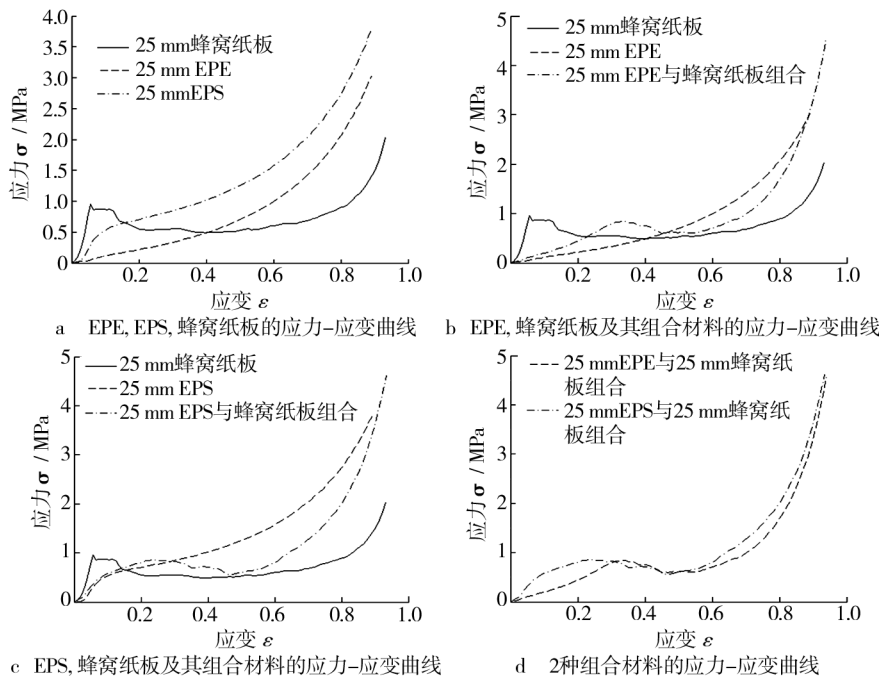


图 1 应力-应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curves

段和密实化阶段。弹性阶段主要靠基体材料的弹性变形吸收能量,其吸收的能量只占总吸收能量的一小部分。屈服阶段则是能量吸收的最主要阶段,其吸收的能量占总吸收能量的大部分。当大部分胞体屈服破坏后,材料进入密实化阶段。由图 1 可以看出,EPE 和 EPS 材料的应力-应变曲线有明显的差别:EPS 材料在小应变情况下表现出较好的弹性,随应变的增加,应力逐渐上升,当应变达到一定值后,应力增加缓慢,相应的曲线呈现出较长的平滑阶段,随着应变的增加,材料结构遭到破坏,应力随应变增加而持续增加,3 个阶段的分布比较明显。EPE 材料在受载初期处于弹性阶段,应力随应变线性增加,当应变到达一定值后,应力-应变曲线的斜率随着应变的增加而不断增大,其屈服阶段表现不够明显,和密实化阶段基本合为一体。

蜂窝纸板从开始加压到峰值前,应力增加迅速,应力-应变曲线接近线性关系;峰值之后,蜂窝纸板的芯纸被压溃,应力小幅下降,然后在小范围内波动,应变增加迅速,进入屈服阶段,此阶段蜂窝结构已基本破坏,卸载之后不能恢复;随后进入密实化阶段,蜂窝纸板完全被压溃,应力随应变的增加而大幅增加,失去缓冲性能。

EPE 与蜂窝纸板组合结构,试验观察压缩前期,EPE 被压缩,蜂窝纸板基本无变化。由于开始压缩阶段受到的应力较小,2 种材料均处于线弹性变形阶段,蜂窝纸板材料比 EPE 材料的刚度大得多。当应力达到一定程度后,EPE 材料进入屈服阶段,而蜂窝纸板仍处在弹性阶段。由图 2 知,当应变达到 0.33 时,应力达到峰值点(且与蜂窝纸板应力峰值接近),蜂窝纸板开始屈服。在此阶段由于蜂窝纸板的纸芯开始坍塌,蜂窝纸板的承载能力迅速下降,使其组合结构能承受的应力也随之下降,但下降的速度没有单层蜂窝纸板迅速。可见,在这一阶段 EPE 材料在蜂窝纸芯压溃的过程中承受了一部分载荷。在应变为 0.47~0.57 时,曲线较平坦,主要体现了蜂窝纸板进入屈服阶段的特征。当应变达到 0.57 时,即此时的组合结构厚度为 21.5 mm,由实验观察可知蜂窝纸板基本被压溃,形变量由绝大部的蜂窝纸板和一小部分的 EPE 材料产生。随着应变的增加,主要体现为 EPE 材料的特性。EPE 与蜂窝纸板组合结构与 EPE、蜂窝纸板相比,组合结构压缩过程的开始及最后阶段主要表现为 EPE 特性,且应力峰值比蜂窝纸板滞后,中间阶段主要表现为蜂窝纸板特性。

EPS 与蜂窝纸板组合结构,其压缩各阶段的特征和 EPE 与蜂窝纸板组合结构的特征基本一致。试验观察由图 1c 知,在压缩初期,主要体现 EPS 的特性,当应变达到 0.23 左右时,应力达到第一峰值(且与蜂窝纸板应力峰值接近),在应变为 0.23~0.47 之间,蜂窝纸芯开始坍塌,应力随着应变缓慢减小,主要表现

为蜂窝纸板的特性,并在小范围内波动,由于 EPS 在此阶段提供一定的承载能力,组合材料的承载应力大于单层蜂窝纸板此阶段能承受的应力。当蜂窝纸板完全被压溃,应力随着应变大幅增加,曲线主要表现为 EPS 的特性。

由图 1d 知,2 种组合结构在压缩前期,EPS 与蜂窝纸板组合比 EPE 与蜂窝纸板组合可承受更大的静态应力,在压缩中期及后期,2 种组合的静态力学性能差别不大。

3 缓冲系数曲线

当缓冲材料的应力-应变曲线单调增时,如单层 EPE 和 EPS 材料,缓冲系数 C 可表示为:

$$C = \sigma_m / \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \tag{3}$$

对蜂窝纸板、EPE 与蜂窝纸板组合以及 EPS 与蜂窝纸板组合,由于应力-应变曲线的波动,采用分段处理的方法,计算获得缓冲系数-最大静应力曲线。

计算得到的 EPE、EPS、蜂窝纸板、EPE 与蜂窝纸板组合结构以及 EPS 与蜂窝纸板组合结构的缓冲系数-最大静应力曲线见图 2。

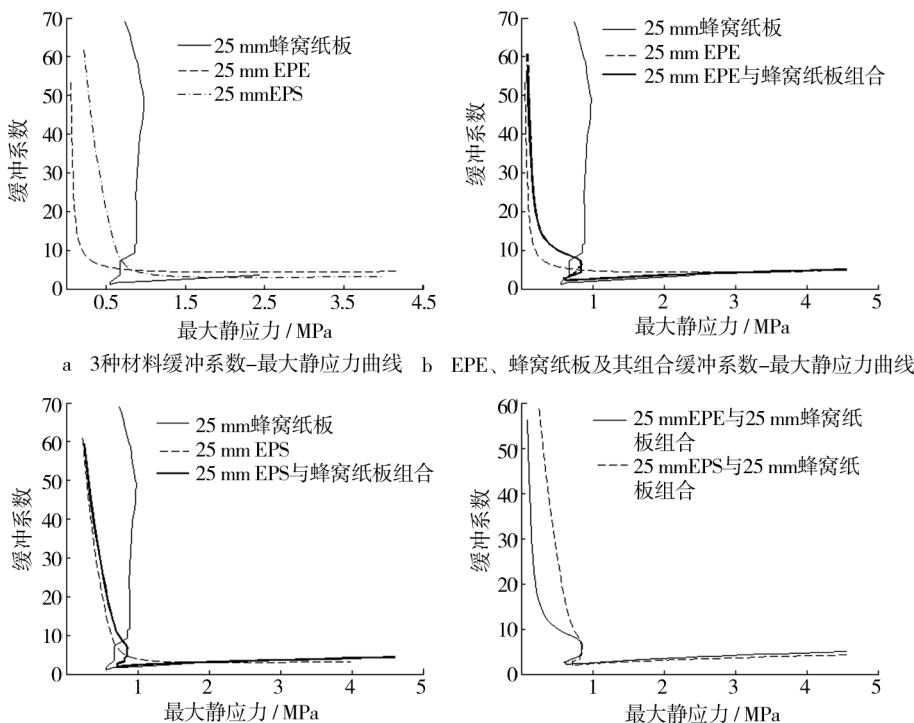


图 2 缓冲系数-最大静应力曲线

Fig. 2 The $C-\sigma_m$ curves

由图 2a 知,应力较小时,蜂窝纸板的缓冲性能差,EPS 次之,EPE 的缓冲系数最小。在压缩中间阶段(蜂窝纸板压溃阶段),体现蜂窝纸板的缓冲特性,在一定载荷范围内,缓冲系数小于 EPS 和 EPE。当载荷继续增大时,蜂窝纸板完全压溃,无缓冲作用,而 EPE, EPS 仍有一定缓冲作用。

由图 2b,c,d 知,当应力较小时,组合的缓冲系数曲线相对 EPE 或 EPS 小幅右移,分别呈现的缓冲特性主要是 EPE 和 EPS 的缓冲性能,且 EPE 与蜂窝纸板组合结构的缓冲性能优于 EPS 与蜂窝纸板组合结构的缓冲性能。压缩中间阶段,2 种组合结构缓冲曲线基本重合,且接近于蜂窝纸板缓冲曲线。压缩后期,较大应力时,蜂窝纸板压溃后,组合结构仍有一定的缓冲性能。

4 结语

EPE 与蜂窝纸板组合结构、EPS 与蜂窝纸板组合结构与 EPE, EPS, 蜂窝纸板相比,压缩过程的开始及最后阶段主要表现为 EPE, EPS 的力学性能,且应力峰值比蜂窝纸板滞后,中间阶段主要表现为蜂窝纸板力学性能,组合结构力学性能得到改善。

较小应力状态下,组合后的缓冲系数曲线相对 EPE 或 EPS 小幅右移,组合材料分别呈现出 EPE 和 EPS 的缓冲性能,且 EPE 与蜂窝纸板组合结构的缓冲性能优于 EPS 与蜂窝纸板组合结构的缓冲性能。压缩中间过程,2 种组合结构缓冲曲线基本重合,且接近于蜂窝纸板缓冲曲线。压缩后期,在较大应力状态下,蜂窝纸板压溃后,组合结构仍有一定的缓冲性能。这说明组合后的材料结合了 2 种材料的优点,在较小应力和较大应力条件下均具有较好的缓冲性能。

参考文献:

- [1] 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 Curve for EPE Static Compression[J]. Packing and Food Machinery, 2009, 27(1): 37-39.
- [2] 路冰琳. 发泡聚乙烯缓冲材料的静态压缩曲线研究[J]. 包装工程, 2007, 28(2): 42-44.
LU Bing-lin. The Study of Static Compression Curve for EPE [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2): 42-44.
- [3] 李连进,马春雪,计宏伟. 聚苯乙烯发泡塑料的本构关系模型及参数识别的研究[C]//第十三届全国包装工程学术会议论文集,第十三届全国包装工程学术会议, 2010:99-103.
LI Lian-jin, MA Chun-xue, JI Hong-wei. A Study on the Constitutive Model and Parameter Identification of Polystyrene Plastic Foam[C]//The 13th National Packaging Engineering Academic Conference Proceedings, The 13th National Packaging Engineering Academic Conference, 2010: 99-103.
- [4] 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.
- [5] 王梅. 蜂窝纸板缓冲性能的研究及应用[J]. 包装工程, 2000, 21(4): 5-8.
WANG Mei. The Research of the Honeycomb Paperboard Cushioning Performance and the Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4): 5-8.
- [6] 张安宁,童小燕,刘效云,等. 多层叠加蜂窝纸板压缩特性研究[J]. 包装工程, 2004, 25(6): 31-32.
ZHANG An-ning, TONG Xiao-yan, LIU Xiao-yun, et al. Research on Static Compression Properties of Two Stratum of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2004, 25(6): 31-32.
- [7] 李厚明,朱若燕,周金枝,等. 蜂窝纸板与瓦楞纸板组合结构的缓冲性能[J]. 湖北工业大学学报, 2005, 20(5): 110-112.
LI Hou-ming, ZHU Ruo-yan, ZHOU Jin-zhi, et al. Research on the Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and Corrugated Paperboard [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2005, 20(5): 110-112.
- [8] 刘晓艳,郑华明,曹国荣. EPE 与 EPS 组合使用的力学性能的研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 17-18.
LIU Xiao-yan, ZHENG Hua-ming, CAO Guo-rong. Study of the Mechanical Performance of EPS and EPE Combination [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 17-18.
- [9] 卢富德,陶伟明,高德. 瓦楞纸板串联缓冲系统动力学响应[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 30-32.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Dynamic Response of a series Cushioning Packaging System made of Multi-layer Corrugated Paperboard [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 30-32.

多官能度功能单体,使聚合物的交联度在反应过程中有明显的提高,并且分子结构由线性变为网状。

4 结论

1) 采用 FTIR 分析对改性前后纯丙乳液的分子结构进行了表征,结果表明,功能单体参与了聚合反应。通过 TEM 结果可知,改性后乳液粒子的核-壳结构明显,粒径略有减小,粒子呈规则球形。

2) 通过耐水性测试、耐热性测试和力学性能测试,结果表明 PETA 改性后纯丙乳液膜的耐水性、耐热性和力学性能均有显著的提高,更有利于其在水性油墨及上光涂料等领域的应用。

参考文献:

- [1] BANIK I, DUTTA S K, CHAKI T K, et al. Electron Beam Induced Structural Modification of a Fluorocarbon Elastomer in the Presence of Polyfunctional Monomers [J]. Polymer, 1999, 40: 447-458.
- [2] KADER M A, BHOWMICK A K. Thermal Aging, Degradation and Swelling of Acrylate Rubber, Fluororubber and Their Blends Containing Polyfunctional Acrylates [J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 79: 283-295.
- [3] YOSHII F, SUHARTINI M, NAGASAWA N, et al. Modification of Biodegradable Polymers by Radiation Crosslinking Technique with Polyfunctional Monomers [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2003, 208: 370-373.
- [4] 陈立军, 张心亚, 黄洪, 等. 纯丙乳液研究进展 [J]. 中国胶黏剂, 2005, 14(9): 34-38.
CHEN Li-jun, ZHANG Xin-ya, HUANG Hong, et al. Research Progress of Pure Acrylic Emulsion [J]. China Adhesives, 2005, 14(9): 34-38.
- [5] 张宇. 丙烯酸酯核壳乳液的合成及性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
ZHANG Yu. Study on Synthesis and Properties of Acrylic Emulsion with Core-shell Structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [6] 冀晓敏, 焦利勇, 柳雅君, 等. 水性 UV 固化涂料用多羟甲基苯酚丙烯酸酯的合成 [J]. 包装工程, 2012, 33(9): 62-65.
JI Xiao-min, JIAO Li-yong, LIU Ya-jun, et al. Synthesis of Multi-hydroxymethyl-phenol Acrylate for Waterborne UV Curing Coating [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 62-65.
- [7] 张庆轩, 杨普江, 刘金河, 等. 有机硅-丙烯酸酯聚合物乳液合成及粒径分析 [J]. 化学研究与应用, 2010, 22: 431-435.
ZHANG Qing-xuan, YANG Pu-jiang, LIU Jin-he, et al. Preparation and Particle Size Analysis of Organosilicon Modified Acrylate Polymer Latex [J]. Chemical Research and Application, 2010, 22: 431-435.
- [8] 全凤玉, 夏延致, 纪全, 陈丽丽. 聚乙烯醇/二氧化硅互穿网络膜的研究 [J]. 精细化工, 2008, 25(10): 937-910.
QUAN Feng-yu, XIA Yan-zhi, JI Quan, et al. Study of Novel PVA/SiO₂ Interpenetrating Polymer Network Membranes [J]. Fine Chemicals, 2008, 25(10): 937-910.
- [9] 骆小伟, 李国明, 高回春, 等. 聚丙烯酸酯与不饱和聚酯互穿网络聚合物的合成-热固性聚丙烯酸酯树脂的合成与表征 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2009(3): 84-87.
LUO Xiao-wei, LI Guo-ming, GAO Hui-chun, et al. Synthesis and Characterization of Crosslinking Acrylate Copolymers [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2009(3): 84-87.
- [10] 卢富德, 陶伟明, 高德. 串联缓冲结构压缩响应虚拟质量分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(8): 1431-1436.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Compression Response of Series Cushioning Structures by a Virtual Mass Method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(8): 1431-1436.
- [11] ROUILLARD V, SEK M. Behaviour of Multi-layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads [J]. Strain, 2007, 43(4): 345-347.
- [12] SEK M, ROUILLARD V, TARASH H, et al. Enhancement of Cushioning Performance with Paperboard Crumple Inserts [J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(5): 273-278.
- [13] 黄蜜, 吴淑芳, 杜启祥. EBE 瓦楞纸板缓冲曲线研究 [J]. 包装工程, 2011, 32(13): 28-31.
HUANG Mi, WU Shu-fang, DU Qi-xiang. Cushion Curve Study of Corrugated Paperboard with EBE-flute [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 28-31.

(上接第 39 页)