

泡沫塑料/瓦楞纸板组合结构的缓冲性能

梁秀, 王玉龙, 王柳
(武汉大学, 武汉 430079)

摘要: **目的** 分析比较不同种类缓冲材料组合结构的缓冲性能。**方法** 将 EPS 和 EPE 分别与单、双瓦楞纸板进行叠合, 获得 4 种组合结构件, 对上述缓冲材料进行静态压缩试验。**结果** 得到不同材料的应力-应变曲线及缓冲系数曲线。**结论** 泡沫塑料/双瓦楞纸板的应变能大于泡沫塑料/单瓦楞纸板; EPE/双瓦楞纸板的缓冲性能相对于 EPS/双瓦楞纸板来说更为优异; 泡沫塑料/双瓦楞纸板的最小缓冲系数低于相对应的泡沫塑料。

关键词: 泡沫塑料; 瓦楞纸板; 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(2016)15-0129-05

Cushion Properties of Composite Structures with Foamed Plastic and Corrugated Paperboard

LIANG Xiu, WANG Yu-long, WANG Liu
(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: The cushion properties of composite structures with different materials are analyzed and compared. The static compression tests were carried out and compared in terms of cushion properties of four single materials and four composite structures, i.e., EPS, EPE, single wall corrugated board or double wall corrugated board. The stress-strain curves and cushion coefficient curves of different materials were obtained. The strain energy of foamed plastic with double wall corrugated board is greater than that of the foamed plastic with single wall corrugated board. Cushion properties of EPE with double wall corrugated board are better than counterpart of EPS with double wall corrugated board. The minimum cushion coefficient of foamed plastic with double wall corrugated board is lower than that of corresponding foamed plastic.

KEY WORDS: foamed plastic; corrugated paperboard; composite structure; cushion performance

在现代包装领域, 瓦楞纸箱中引入泡沫塑料极为常见。发泡聚苯乙烯(EPS)、发泡聚乙烯(EPE)由于其缓冲性能好、成本经济, 是现阶段与瓦楞纸板组合应用最广的 2 种材料。国内外学者对泡沫塑料、瓦楞纸板及缓冲材料组合结构进行了较多的研究。李连进等人^[1-3]研究了 EPS 应力-应变曲线及其动力学响应。刘晓艳等人^[4]将 EPS 和 EPE 材料进行

组合试验, 并得出了组合结构样式对缓冲性能的影响规律。卢富德等人^[5-8]研究了瓦楞纸板力学本构关系, 并提出了多层瓦楞纸板组成的串联力学模型新概念。LEE 等人^[9-12]采用仿真模型、数字技术和试验方法, 研究瓦楞纸板结构、变形情况及如何提高其缓冲性能。杨凌云等人^[13-15]对 EPE, EPS 和蜂窝纸板或瓦楞纸板其组合结构的缓冲性能进行研

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 武汉大学开放实验项目 (201505)

作者简介: 梁秀 (1992—), 女, 江苏人, 武汉大学硕士生, 主攻运输包装和包装结构优化设计。

通讯作者: 王玉龙 (1965—), 男, 江苏人, 武汉大学副教授, 主要研究方向为运输包装、包装结构优化设计。

究,并对其力学性能进行比较,证明组合结构的性能优于单独的材料。

传统缓冲包装仅依据泡沫塑料的缓冲性能曲线进行设计,而忽略了瓦楞纸板的共同作用。文中通过静态压缩试验获得泡沫塑料/瓦楞纸板组合结构的应力-应变曲线与缓冲系数曲线,比较不同组合材料的静态缓冲性能,从而有助于优化缓冲结构、降低材料消耗,为泡沫塑料/瓦楞纸板组合结构缓冲设计提供基本的力学数据。

1 实验

1.1 标准与设备

依据 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩实验方法》,GB/T 4857.2—2005《运输包装件基本试验》。采用型号 RG 的万能力学试验机(浙江琳立有限公司)。

1.2 材料

试样类型为 EPS, EPE, 单瓦楞纸板和双瓦楞纸板及其 4 种叠合结构(EPS/单瓦楞纸板、EPS/双瓦楞纸板、EPE/单瓦楞纸板、EPE/双瓦楞纸板)。泡沫塑料选用密度为 16 kg/m^3 的发泡聚苯乙烯与 20 kg/m^3 的发泡聚乙烯,其型号为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 数量为 15。瓦楞纸板选用 B 型单瓦楞纸板和 BC 型双瓦楞纸板,因为它们在实际包装中使用广泛,具有代表性。瓦楞纸板的面纸和芯纸定量分别为 $350, 400 \text{ g/m}^2$, 型号分别为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 和 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 数量为 15。

1.3 方法

试样在温度为 $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(60 \pm 5)\%$ 的环境下进行 24 h 以上的预处理。静态压缩试验时,试验设备的载荷上限为 50 kN, 压缩速率为 10 mm/min 。对上述每组结构进行 5 组试验,记录每组试验数据并取其平均值。

2 应力-应变曲线分析

2.1 单一材料的静态应力-应变曲线

根据静态压缩试验数据, EPS, EPE, 单瓦楞纸板和双瓦楞纸板的静态压缩应力-应变曲线见图

1。对其分析可知, EPS 静态压缩过程主要分为 3 个阶段:线弹性阶段、塑性阶段与密实化阶段, 3 个阶段分布明显。在加载初期, EPS 依靠内部空腔内气体产生相应抵抗力, 仅发生较小变形, 应变范围在 $0\% \sim 6\%$ 。当应力达到材料的屈服值后, 泡沫内空腔结构开始发生破坏, 较小应力也会产生较大变形, 应变范围在 $6\% \sim 60\%$, 塑性变形阶段较长, 说明了 EPS 在受压过程中吸收了大量的能量。当应力再增加时, 泡沫内气体逐渐减少直至完全排出, 材料进入密实化阶段, 应变范围为 $60\% \sim 100\%$ 。缓冲包装设计主要研究前 2 个阶段。

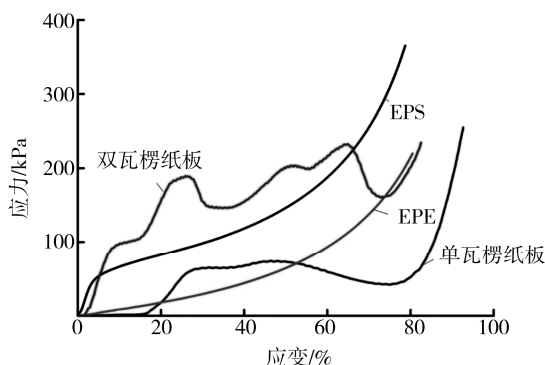


图1 单一材料的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curve of single material

EPE 静态压缩过程与 EPS 类似, 但曲线较为平缓, 3 个阶段的临界特征不是很明显。在线弹性阶段, 弹性模量较 EPS 小, 塑性屈服阶段不是很明显, 基本与其他阶段融为一体。这证明了 EPE 与 EPS 相比其韧性较好。单瓦楞纸板在初始阶段施加较小的应力时, 应变迅速增加, 在应变为 17.6% 时, 其应力-应变关系开始呈线弹性增加。当应变约达到 27% 时, 进入屈服阶段, 屈服应力为 61.2 kPa , 随后单瓦楞纸板被压实。双瓦楞纸板因其由 2 层瓦楞原纸组成, 故在变形过程中应力达到 2 个峰值。双瓦楞纸板被稍微压缩变形之后应力开始进入平坦期, 之后以较快速度增加到第 1 个峰值, 此时应变约为 26% , 应力峰值达 188 kPa ; 当应变为 64% 时, 应力达到第 2 个峰值, 峰值应力为 232 kPa , 此时瓦楞纸板的夹芯纸被压溃, 应力值在较小幅度范围内波动, 应变迅速增加, 接着进入密实化阶段。由于双瓦楞纸板的强度远大于单瓦楞纸板, 所以前者屈服应力远大于后者。

2.2 组合结构的静态应力-应变曲线

EPS/单瓦楞纸板、EPS/双瓦楞纸板、EPE/单瓦

楞纸板、EPE/双瓦楞纸板静态压缩应力-应变曲线见图 2。观察实验现象并分析曲线可知, 泡沫塑料/双瓦楞纸板曲线均位于泡沫塑料/单瓦楞纸板曲线之上, 曲线与两坐标轴所形成的面积较大, 即同样的应变下, 泡沫塑料/双瓦楞纸板组合结构的应变能大。

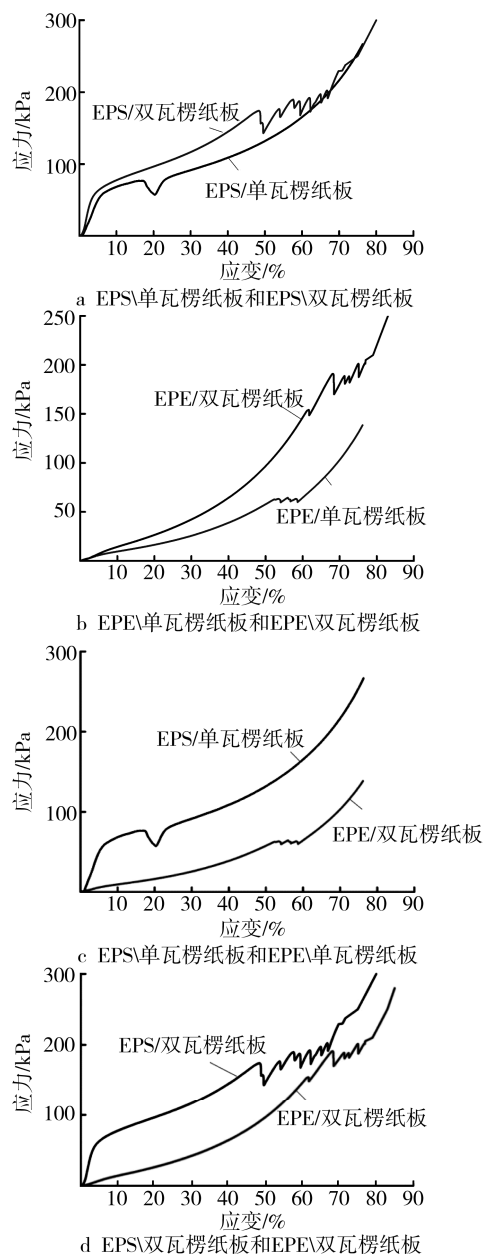


图 2 组合结构的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of composite structure

由图 2a 可知, 在压缩前期, EPS/瓦楞纸板组合结构的曲线与 EPS 相一致, 但由于有瓦楞纸板的部分承载作用, 组合结构的屈服应力高于单独的 EPS 材料。对于 EPS/单瓦楞纸板, 当应变达到 17% 左右时, 应力达到第 1 峰值 (与单瓦楞纸板的峰值

应力相近)。在应变为 17%~22% 时, 单瓦楞纸芯开始部分坍塌, 主要表现为瓦楞纸板的特性; 当应变为 22% 时, 单瓦楞纸板压缩到极限, 开始表现为 EPS 特性。EPS/双瓦楞纸板组合结构由于其坚挺的硬度, 故变形压溃发生在压缩过程最后阶段, 且压溃速度低于单瓦楞纸板组合结构。由图 2b 可知, EPE/瓦楞纸板组合结构曲线的中间和结束部分出现不规则曲线, 这是由瓦楞纸板缓冲作用所致, 代表瓦楞纸板由开始的压缩变形到最后达到其极限值。对于 EPE/单瓦楞纸板, 其压缩各阶段特征与 EPS/单瓦楞纸板组合结构特征基本一致。由试验观察知瓦楞纸板基本被压溃, 形变量由绝大多数瓦楞纸板和一部分 EPE 材料产生, 且随着应变持续增加, 组合结构主要表现为 EPE 材料特性。对于 EPE/双瓦楞纸板所需应力较高, 在应力较大时, 单瓦楞纸板组合结构已被压缩破坏, 而双瓦楞纸板组合结构才开始屈服。变形过程是 EPE 先屈服, 不断密实化, 然后瓦楞纸板才开始发生变形被破坏, 当应变达到 66% 时, 组合结构开始压溃。由图 2c 和 2d 可知, EPS/瓦楞纸板组合结构比 EPE/瓦楞纸板组合结构更早进入屈服阶段。瓦楞纸板在与 EPS 材料组合时, 在相同的应变下更容易被压溃。此外, EPS 组合结构弹性模量大于 EPE 组合结构, 前者能承受更大的静态压力。由图 2c 可知, 泡沫塑料/单瓦楞纸板组合结构均是在压缩的中间阶段开始屈服并逐渐被压溃的。相对于 EPS 的组合结构, EPE/单瓦楞纸板在较大的应变下才开始压溃, 说明 EPE 在压缩前期比 EPS 发挥较长时间的承受载荷能力。由图 2d 可知, 泡沫塑料/双瓦楞纸板组合结构均在压缩后期才开始压溃: EPS/双瓦楞纸板在应变为 53% 时开始屈服, 应力峰值为 176 kPa; EPE/双瓦楞纸板在应变为 67% 时才开始屈服, 其应力为 190 kPa, 比前者稍高一些。

3 缓冲系数曲线分析

缓冲系数主要反映缓冲材料在不同应力下的缓冲特性, 在实际包装选材及尺寸计算中, 一般会选择缓冲曲线上的最小值 $C_{\min}$, 以节约缓冲材料。EPE, EPS, EPE/单瓦楞纸板, EPE/双瓦楞纸板, EPS/单瓦楞纸板以及 EPS/双瓦楞纸板的缓冲系数曲线见图 3。

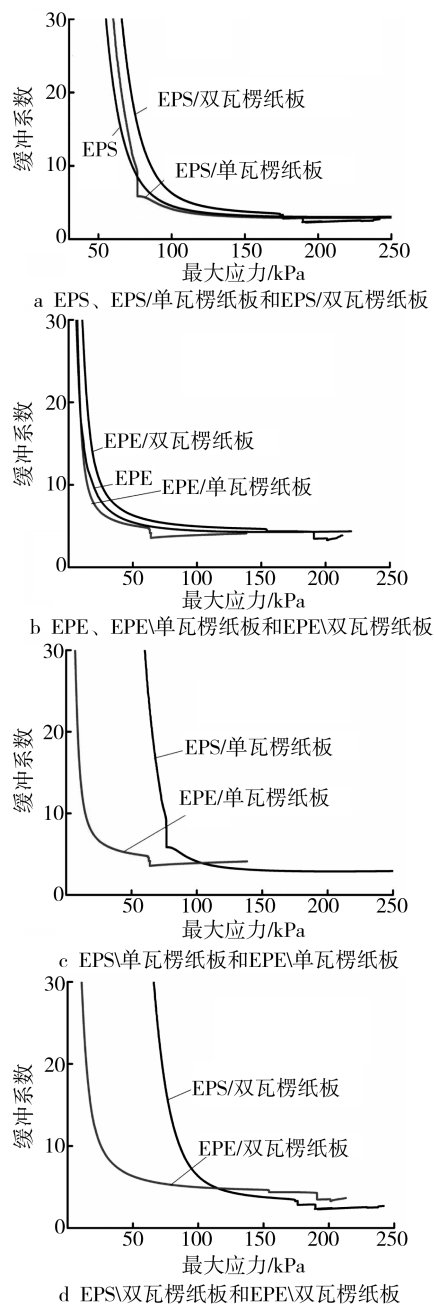


图3 缓冲系数曲线

Fig.3 Curves of cushion coefficient

由图 3a 和 3b 知, 泡沫塑料/双瓦楞纸板的最小缓冲系数低于相对应的泡沫塑料。EPS/双瓦楞纸板组合结构的缓冲系数最小值为 2.86, 低于 EPS/单瓦楞纸板组合结构及 EPS 的值 2.91。在小应力下, EPE/单瓦楞纸板组合结构的缓冲系数最小, 即选取 EPE/单瓦楞纸板最省材料。在应力较大时, EPE/双瓦楞纸板的缓冲系数值较小, 缓冲性能好。由图 3c 和 3d 知, EPS/瓦楞纸板的曲线较 EPE/瓦楞纸板向右方推移, 当应力低于 105 ~ 115 kPa 时, 在相同应力下, EPE/瓦楞纸板的值要低于 EPS/瓦

楞纸板, 缓冲性能较好; 当应力大于 105 ~ 115 kPa 时则相反。在压缩过程靠后阶段, EPS/单瓦楞纸板与 EPE/单瓦楞纸板、EPS/双瓦楞纸板和 EPE/双瓦楞纸板的缓冲曲线基本重合。

4 结语

泡沫塑料/瓦楞纸板组合结构的应力-应变曲线比单独的泡沫塑料增加了瓦楞纸板的压缩阶段, 屈服强度和平台应力都有所提高。泡沫塑料/双瓦楞纸板组合结构的应力-应变曲线下所围面积最大, 表示应变能较大, 缓冲性能较好。EPS/瓦楞纸板组合结构比 EPE/瓦楞纸板组合结构更早进入屈服阶段; EPE/双瓦楞纸板的缓冲性能相对于 EPS/双瓦楞纸板来说更为优异; 泡沫塑料/双瓦楞纸板的最小缓冲系数低于相对应的泡沫塑料。当许用应力较小时, EPE/单瓦楞纸板的缓冲系数最小; 当应力较大时, EPS/双瓦楞纸板的缓冲系数较小, 用材最省。

参考文献:

- [1] 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, 2010.
LI Lian-jin, MA Chun-xue, JI Hong-wei. A Study of the Constitutive Model and Parameter Identification of Polystyrene Plastic Foam[C]//The 13th National Conference on Packaging Engineering, 2010.
- [2] AVALLE M, BELINGARDI G, IBBA A. Mechanical Models of Cellular Solids: Parameters Identification from Experimental Tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(1): 3—27.
- [3] 王志亮. EPS 泡沫冲击压缩和吸能特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 630—636.
WANG Zhi-liang. Experimental Study of Impact Compression and Energy-absorbing Property of Expanded Polystyrene Foam[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 630—636.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 高德, 冯军, 卢富德, 等. 平压单瓦钙塑瓦楞纸板本构模型[J]. 振动工程学报, 2014, 27(6): 852—857.
GAO De, FENG Jun, LU Fu-de, et al. Study of Constitutive Model of Single-wall Calcium Plastic Composite Corrugated Cardboard Under Flat Compression Loadings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(6): 852—857.
- [7] 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(S): 32—42.
- [8] 李正伟, 李无穷. B 楞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 Relation of B-flute Corrugated Paperboard and Its Applications[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21): 42—44.
- [9] LEE M H, PARK J M. Flexural Stiffness of Selected Corrugated Structures[J]. Packaging Technology and Science, 2004, 17(5): 275—286.
- [10] BIANCOLINI M E, BRUTTI C E. Numerical and Experimental Investigation of the Strength of Corrugated Board Packages[J]. Package and Technology Science, 2003, 16(2): 47—60.
- [11] CONSIDINE J M, SCOTT C T, GLEISNER R, et al. Use of Digital Image Correlation to Study the Local Deformation Field of Paper and Paperboard[C]// The 13th Fundamental Research Symposium, 2005.
- [12] ROUILLARD V, SEK M. Behavior of Multi-layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads[J]. Strain, 2007, 43(4): 345—347.
- [13] 杨凌云, 郭勇, 吴淑芳. EPS 泡沫与 C 楞瓦楞纸板串联系统的缓冲分析与应用[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 10—12.
YANG Ling-yun, GUO Yong, WU Shu-fang. Cushioning Analysis and Application of EPS and C-flute Corrugated Paperboard Series Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 10—12.
- [14] 钟玲珠, 陈安军. EPS/EPE 与蜂窝纸板组合静态缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 36—39.
ZHONG Ling-zhu, CHEN An-jun. Study of Static Cushion Performance of EPE/EPS and Honeycomb Paperboard Combination[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 36—39.
- [15] 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 Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and EPE[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 13—16.