

缓冲与隔振

逐层交错对瓦楞纸板静态缓冲性能的影响

孙德强^{a,b}, 李靖靖^{a,b}, 李国志^{a,b}, 郝静^{a,b}, 金强维^{a,b}, 史英惠^{a,b}, 李耿^{a,b}, 胡昕^{a,b}

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室

b.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究在逐层交错的方式下, 交错角度对瓦楞纸板静态缓冲性能的影响。**方法** 将单瓦楞纸板以逐层交错的方式粘合, 制得 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 等 5 种角度的试样, 通过平压试验和侧压试验, 研究交错角度对瓦楞纸板承载性能和吸能性能的影响。**结果** 交错角度对试样的密实化应变影响较小; 在侧压试验中, 交错角度在 0°~45° 之间时, 试样的侧压强度和比吸能随着角度的增大而减小; 交错角度在 45°~90° 之间时, 随着角度的增大, 试样的侧压强度和比吸能先增大后减小; 在平压试验中, 交错角度对试样的平均抗压强度和比吸能影响较小。**结论** 交错角度对瓦楞纸板侧压缓冲性能影响较大, 对平压缓冲性能影响较小。

关键词: 瓦楞纸板; 逐层交错; 侧压试验; 平压试验; 缓冲性能**中图分类号:** TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)21-0042-06**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.009

Influences of Interlacement Mode Layer by Layer on Static Cushioning Properties of Corrugated Paperboard

SUN De-qiang^{a,b}, LI Jing-jing^{a,b}, LI Guo-zhi^{a,b}, HAO Jing^{a,b}, JIN Qiang-wei^{a,b},
SHI Ying-hui^{a,b}, LI Geng^{a,b}, HU Xin^{a,b}

(a. Shaanxi Province Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper b. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: This paper aims to study influences of interlacement mode layer by layer on static cushioning properties of corrugated paperboard. Single corrugated paperboards were glued with the interlacement mode to obtain specimens with five different interlacement angles of 0°, 30°, 45°, 60° and 90°. By edgewise compressive test and flatwise compressive test, influences of interlacement angles on the bearing capacity and energy absorbing capacity of corrugated paperboard were studied. The results show that interlacement angles had little effect on the densification strain of specimens. In edgewise compressive test, when the interlacement angles were between 0°~45°, the edgewise compressive strength and specific energy absorption decreased with the increase of interlacement angles. However, the edgewise compressive strength and specific energy absorption of specimens first increased and then decreased with the increase of interlacement angles when the angles were between 45°~90°. In the flatwise compressive test, interlacement angles had little influence on the mean crushing strength and specific energy absorption of specimens. Therefore, it is concluded that interlacement angles have great influence on the edgewise compressive cushioning properties, and have little influence on the flatwise compressive cushioning properties of corrugated paperboard.

收稿日期: 2018-05-21**基金项目:** 国家自然科学基金 (51575327); 陕西省教育厅重点试验室及基地项目 (16JS014); 陕西省教育厅 2014 陕西本科高校专业综合改革试点子项目 (陕教高[2014]16 号)**作者简介:** 孙德强 (1976—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。**通信作者:** 李国志 (1979—), 男, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为包装材料结构与系统设计。

KEY WORDS: corrugated paperboard; interlacement mode layer by layer; edgewise compressive test; flatwise compressive test; cushioning properties

瓦楞纸板是由 2 层强度较高的薄面板与填充 2 层面板中间的波纹状芯层组成，面板具有较高的弯曲强度和拉伸强度，能够承受由弯矩引起的面内拉伸载荷，芯层能够承担由横向力产生的剪应力^[1]。瓦楞纸板具有灵活性和可设计性，可采用不同的材质配比和结构形式设计缓冲吸能元件^[2]。瓦楞纸板属于多孔材料，能够利用孔隙被挤压来吸收能量，具有优良的缓冲性能，在运输包装领域有广泛的应用前景^[3]。

国内外许多学者对瓦楞纸板的性能进行了研究，建立了瓦楞纸板的相关模型，研究了各参数对瓦楞纸板性能的影响，分析了压缩破坏模式。Harrysson 和 Ristinmaa^[4]提出了适用于瓦楞纸板的大应变正交各向异性的弹塑性模型，并通过双轴拉伸试验进行验证。Talbi^[5]等提出了瓦楞纸板的均匀化分析模型及其在壳单元中的数值实现，对叠层板和夹层板理论进行研究。Haj-ali^[6]等利用非线性有限元方法，建立瓦楞纸板结构模型，模拟单轴拉伸试验和边压试验。Abbès 和 Guo^[7]提出了正交各向异性夹层板转矩的解析均匀化模型，以及该模型在瓦楞纸板中的应用。Åslund^[8]等利用连续破坏模型，并通过施加面内边压载荷，分析瓦楞纸板的应变局部化和表面皱褶的形成。Kueh^[9]等利用有限元法模拟单轴压缩试验，研究瓦楞纸板在不同面内边界条件下的临界载荷和后屈曲性能。Szewczyk 和 Głowacki^[10]研究了湿度对瓦楞纸板弹性模量、泊松比等参数的影响，以及对弯曲刚度和边压强度的影响。Yali^[11]等采用有限元法对瓦楞纸板进行屈曲分析和静态分析，得到瓦楞纸板的屈曲载荷，分析瓦楞纸板厚度与波长对其力学性能的影响。Bivainis 和 Jankauskas^[12]研究了楞型、定量对瓦楞纸板戳穿强度的影响。

瓦楞纸板是各向异性材料，存在多种不同的组合方式，因此研究不同组合方式的瓦楞纸板的缓冲性能具有重要意义。王冬梅^[13]通过静态压缩试验，比较了折叠型、交叉叠置型、平行叠置型的多层瓦楞纸板以及瓦楞/蜂窝/瓦楞复合材料的吸能性能。孙聚杰和郝笑梦^[14]以不同组合角度的双瓦楞纸板为研究对象，通过边压强度、平压强度试验，得到其强度与组合角度之间的规律，并通过静态压缩试验获得缓冲系数曲线。文中试验通过平压试验和侧压试验，研究在逐层交错的方式下，交错角度对瓦楞纸板承载性能及吸能性能的影响，从而得到交错角度对瓦楞纸板缓冲性能的影响规律。

1 试验

1.1 材料与设备

主要材料：试验材料采用陕西天成纸业有限公司生产的瓦楞纸板，瓦楞形状为 UV 形，瓦楞楞型为 B 型，面纸、芯纸和里纸的定量分别为 160, 110, 130 g/m²；粘合剂采用汉高百得卓效型熊猫白胶。

主要设备：SANS 万能材料试验机，美特斯工业系统（中国）有限公司。

1.2 方法

瓦楞纸板的空间方向见图 1，文中试验将单瓦楞纸板以逐层交错的方式粘合，即设瓦楞纸板 x 方向为 0°，则试样底层为 0°，其他各层以下一层为参照，旋转 α 角度，各层依次旋转，直至顶层与底层平行。例如 30° 试样，其底层为 0°，则第 2 层为 30°，第 3 层为 60°，依次类推。试验所用试样的角度 α 有 0°，30°，45°，60°，90°，见图 2。

试验前对试样进行预处理，在温度为 20 °C，相对湿度为 75% 的环境下处理 24 h 以上，并在相同的

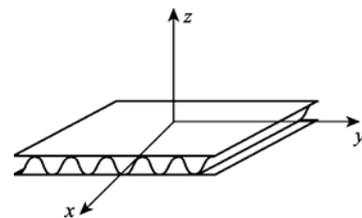


图 1 瓦楞纸板空间方向

Fig.1 Spatial direction of corrugated paperboard

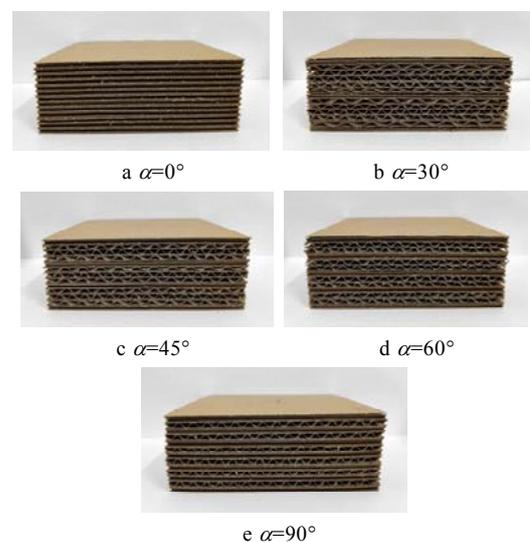


图 2 逐层交错瓦楞纸板试样

Fig.2 Corrugated paperboard specimens of interlacement mode layer by layer

条件下进行试验。试验参照 GB/T 1454—2005《夹层结构侧压性能试验方法》^[15]、GB/T 1453—2005《夹层结构或芯子平压性能试验方法》^[16]和 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[17]对 5 种角度的试样进行静态压缩试验,试验包括侧压试验和平压试验。侧压试验所用试样长、宽、厚分别为 75, 75, 25 mm, 试样编号为 E-LR- α , 平压试验所用试样长、宽、厚分别为 100, 100, 28 mm, 试样编号为 F-LR- α , 试验机压缩速率均为 12 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 侧压试验

2.1.1 应力-应变曲线和变形模式

侧压试验是指试验机沿平行于试样面纸的方向施加载荷。该试验以 0°层为基准,沿着瓦楞的方向进行压缩试验。压缩过程中,试样从接近压板的位置开始发生变形,面纸出现剥离、褶皱现象,瓦楞芯纸褶皱堆叠,0°试样压缩过程见图 3。5 种角度的应力-应变曲线见图 4,包括线弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段。

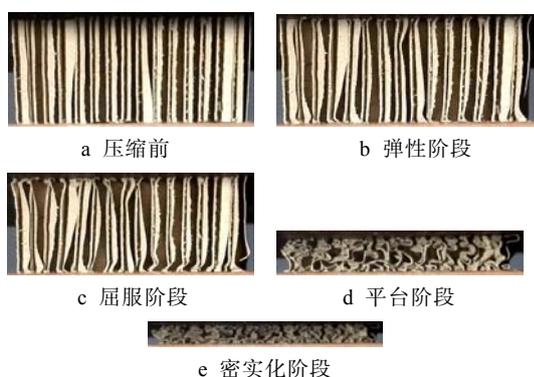


图 3 0°试样侧压过程

Fig.3 Edgewise compressive process of 0° specimens

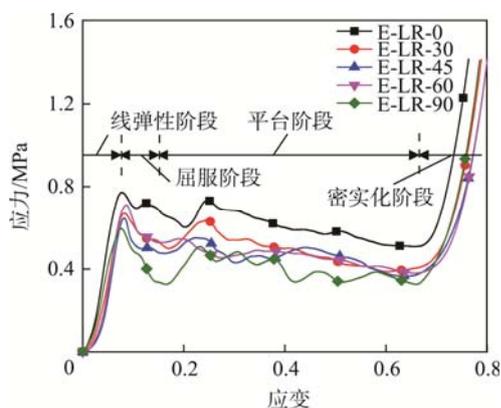


图 4 5 种角度试样侧压应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of edgewise compression for specimens of five different angles

在线弹性阶段,应力随应变线性增加,若在该阶段撤去外力,并静置一段时间,试样可恢复原状,由于该阶段跨度较小,因此吸收的能量较少;到达屈服点后,进入屈服阶段,此时试样失去了抵抗变形的能力,开始发生塑性变形,应力随应变有所减小;平台阶段是吸收能量的主要阶段,由于试样在压缩过程中发生弯折,因此该阶段的应力略有波动;试样压实后进入密实化阶段,应力急剧上升,试样完全被破坏,逐渐失去吸收能量的能力。

2.1.2 侧压强度和密实化应变

侧压强度是评估瓦楞纸板侧压承载性能的重要指标,是瓦楞纸板发生屈服时能够承受的最大压缩应力。试验获得了 5 种角度的侧压强度,数值由大到小依次为 0°, 60°, 30°, 45°, 90°, 见图 5。

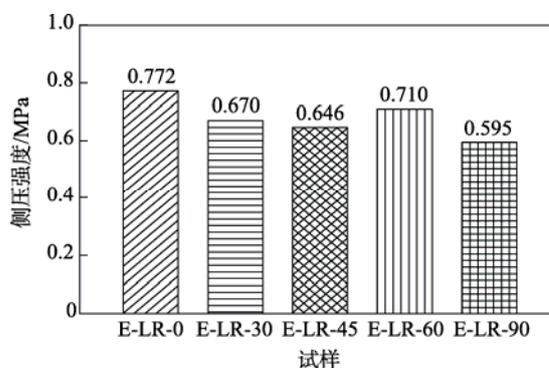


图 5 5 种角度试样侧压强度

Fig.5 Edgewise compressive strength for specimens of five different angles

通过试验结果并观察试样的交错角度可知,在 0°, 30°, 45°, 90°试样中,0°层所占比例逐渐减少,90°层所占比例逐渐增多,且大角度层所占比例逐渐增多,因此侧压强度逐渐减小。而对于 60°试样,侧压强度仅次于 0°试样,因为即使 60°试样包含角度较大的 60°层和 120°层,但是不包含 90°层,且 0°层所占比例大于 30°, 45°, 90°试样。由此可见,0°层和 90°层对试样的侧压强度起着决定性的影响。

密实化应变是评估缓冲材料吸能性能的重要参数,与材料密度呈反比关系^[18],试样压实后基本不再吸收能量。经测量,5 种角度试样的密度分别为 0.176, 0.172, 0.176, 0.174, 0.176 g/cm³,由此可见沿某一角度裁切瓦楞纸板,并不会使其密度发生较大变化,因此,交错角度对密实化应变影响不大,见图 6。

2.1.3 比吸能和吸收能量

压缩过程中,瓦楞纸板通过自身变形吸收能量,从而保护产品。比吸能是指单位质量的能量吸收,是评估瓦楞纸板吸能性能的重要指标,可由力和位移值计算得到试样的吸收总能量,进而得到试样单位质量的吸收能量。

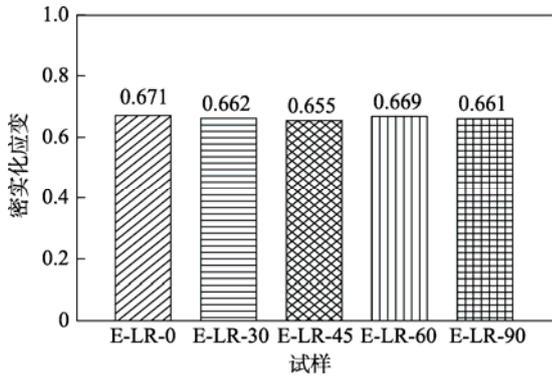


图 6 5 种角度试样侧压密实化应变
Fig.6 Densification strain of edgewise compression for specimens of five different angles

力-位移曲线下包含的面积即试样吸收的总能量，可由式 (1) 计算：

$$E_a = \int_0^x F dx \quad (1)$$

式中： E_a 为吸收总能量 (J)； x 为压缩位移 (mm)； F 为施加在试样上的力 (kN)。

比吸能是吸收总能量与试样质量的比值，可由式 (2) 计算：

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (2)$$

式中： SEA 为比吸能 (J/g)； m 为试样的质量 (g)。

5 种角度的侧压比吸能见图 7，其数值由大到小依次为 0° ， 30° ， 60° ， 45° ， 90° 。在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间，比吸能与角度 (α) 近似呈线性关系，在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间，比吸能与角度近似呈二次函数关系：

$$SEA = \begin{cases} 2.678 - 0.011\alpha & 0 \leq \alpha \leq 45 \\ 1.185 + 0.03604\alpha - 0.000307\alpha^2 & 45 < \alpha \leq 90 \end{cases} \quad (3)$$

应力-应变曲线下包含的面积为试样单位体积吸收的能量，可由式 (4) 计算：

$$W = \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

式中： W 为单位体积吸收的能量 (J/cm^3)。

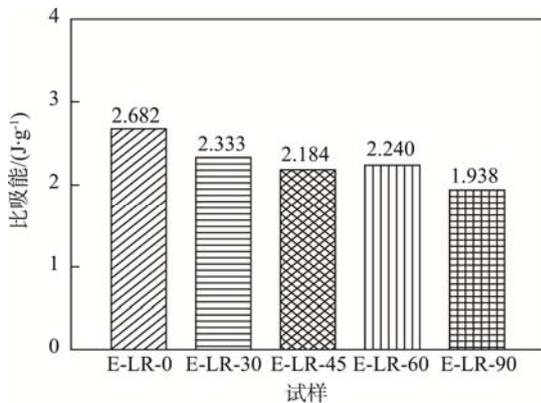


图 7 5 种角度试样侧压比吸能
Fig.7 Specific energy absorption of edgewise compression for specimens of five different angles

能量吸收曲线表征了单位体积吸收能量与应力的关系，5 种角度试样在应力 σ_p 下单位体积可吸收的能量曲线见图 8。每种角度都有最佳选择的 σ_p ，由曲线上肩部凸出部的肩点给出，该点是最佳吸收能量点，将这些肩点连接起来的包迹线描述了 W 与 σ_p 的关系。 60° 试样的肩点介于 30° 和 45° 试样之间，在 0° ， 30° ， 45° ， 90° 试样中，随着角度的增大，肩点向左下方偏移，即最佳应力和单位体积吸收的最大能量逐渐减小。

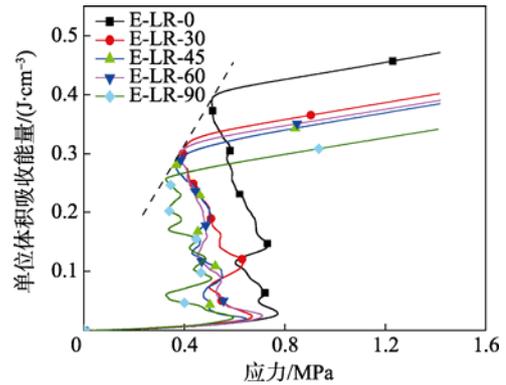


图 8 5 种角度试样侧压能量吸收曲线
Fig.8 Energy absorption curve of edgewise compression for specimens of five different angles

2.2 平压试验

2.2.1 应力-应变曲线和变形模式

平压试验是指试验机沿垂直于试样面纸方向施加载荷，得到力和位移值。以 30° 试样为例，观察试样侧面压缩变形过程，见图 9。压缩过程中，首先其中一个芯层的瓦楞峰顶被压平，然后向左或向右一侧偏斜，随后坍塌至压实，其他瓦楞芯层皆依次以此形式发生变形。

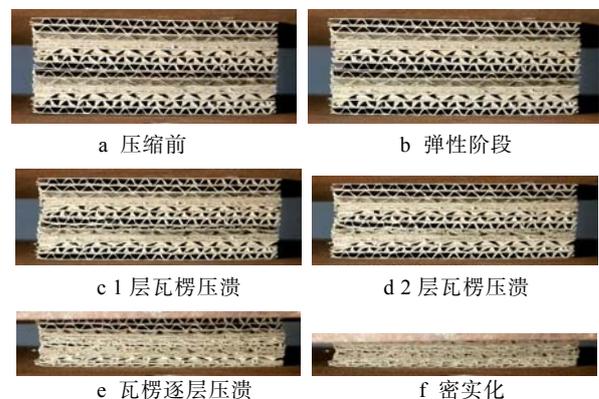


图 9 30° 试样平压过程
Fig.9 Flatwise compressive process of 30° specimens

试验得到 5 种角度的应力-应变曲线，见图 10，曲线包括线弹性阶段、塑性阶段和密实化阶段。在线弹性阶段，试样的最弱层首先发生变形，应力快速增

加,该阶段能量吸收较少。当应力到达屈服点后,进入塑性阶段,该阶段波动起伏,13个波峰对应13个瓦楞芯层,表明试样逐层压溃,共发生了13次塑性变形。试样压实后,进入密实化阶段,应力急剧上升,试样逐渐失去缓冲能力。

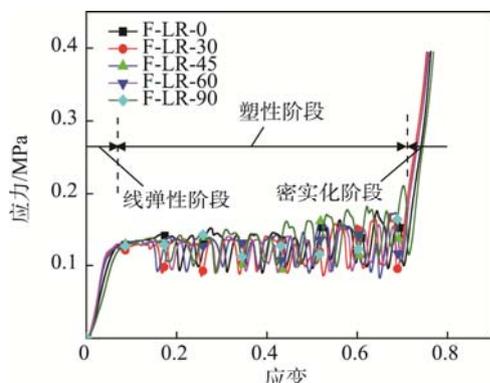


图 10 5种角度试样平压应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of flatwise compression for specimens of five different angles

2.2.2 平均抗压强度和比吸能

由于交错角度对试样的密度影响不大,所以在平压试验下,5种角度试样的密实化应变较接近,见图11。平均抗压强度又名平台应力,是评估瓦楞纸板能量吸收性能的重要指标^[19],由应力-应变曲线计算得出:

$$\sigma_m = \frac{1}{\epsilon_D} \int_0^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (5)$$

式中: σ_m 为平均抗压强度 (MPa); ϵ_D 为密实化应变。

在平压试验下,5种角度试样的平均抗压强度和比吸能相差较小,见图12—13。与0°,30°,45°,60°试样相比,90°试样的平均抗压强度提高了3.10%~7.75%,比吸能提高了6.16%~9.95%。由此可见,交错角度对瓦楞纸板的平均抗压强度和比吸能影响较小,相较而言,90°试样性能更为优异。

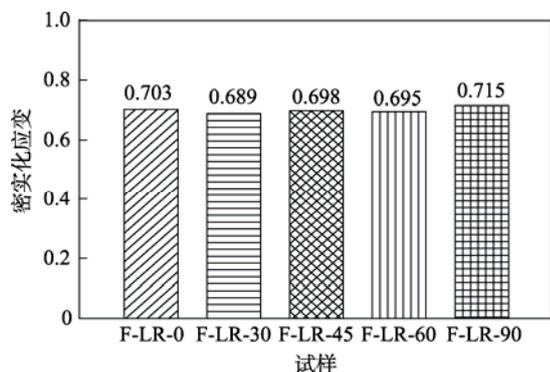


图 11 5种角度试样平压密实化应变

Fig.11 Densification strain of flatwise compression for specimens of five different angles

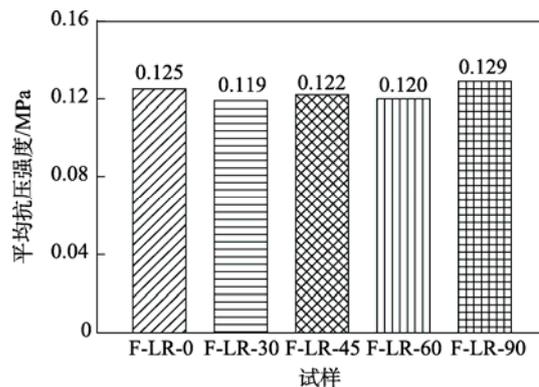


图 12 5种角度试样平压平均抗压强度

Fig.12 Mean crushing strength of flatwise compression for specimens of five different angles

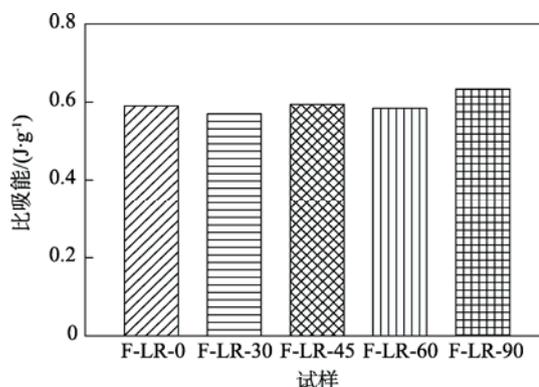


图 13 5种角度试样平压比吸能

Fig.13 Specific energy absorption of flatwise compression for specimens of five different angles

3 结语

将瓦楞纸板以逐层交错的方式粘合,得到0°,30°,45°,60°,90°交错的试样。通过侧压试验和平压试验,可得到以下结论。

- 1) 由于沿某一角度裁切瓦楞纸板对其密度影响不大,因此交错角度对密实化应变影响较小。
- 2) 在侧压试验中,交错角度对瓦楞纸板的侧压强度和比吸能影响较大。交错角度在0°~45°之间时,试样的侧压强度和比吸能随着角度的增大而减小;交错角度在45°~90°之间时,随着角度的增大,试样的侧压强度和比吸能先增大后减小。
- 3) 在平压试验中,交错角度对平均抗压强度和比吸能影响较小,相较而言,90°试样的性能较好。在实际应用中要根据需要合理设计瓦楞纸箱和缓冲衬垫的结构。

参考文献:

[1] 肖锋, 谌勇, 章振华, 等. 夹层结构冲击动力学研究综述[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 1—7.
XIAO Feng, CHEN Yong, ZHANG Zhen-hua, et al. A

- Review of Studying on Impact Dynamics of Sandwich Structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(18): 1—7.
- [2] 鄂玉萍, 王志伟. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究进展[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(5): 40—45.
E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Research Advance in Paper-based Cushioning Packing Structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(5): 40—45.
- [3] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展[J]. *包装工程*, 2014, 35(7): 149—155.
LIU Ji-fei. Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(7): 149—155.
- [4] HARRYSSON A, RISTINMAA M. Large Strain Elastic-plastic Model of Paper and Corrugated Board[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2008, 45(11): 3334—3352.
- [5] TALBI N, BATTI A, AYAD R, et al. An Analytical Homogenization Model for Finite Element Modelling of Corrugated Cardboard[J]. *Composite Structures*, 2009, 88(2): 280—289.
- [6] HAJ-ALI R, CHOI J, WEI B S, et al. Refined Nonlinear Finite Element Models for Corrugated Fiberboards[J]. *Composite Structures*, 2009, 87(4): 321—333.
- [7] ABBÈS B, GUO Y Q. Analytic Homogenization for Torsion of Orthotropic Sandwich Plates: Application to Corrugated Cardboard[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(3): 699—706.
- [8] ÅSLUND P E, HÄGGLUND R, CARLSSON L A, et al. An Analysis of Strain Localization and Formation of Face Wrinkles in Edge-wise Loaded Corrugated Sandwich Panels Using a Continuum Damage Model[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2014, 56: 248—257.
- [9] KUEH C, NAVARANJAN N, DUKE M. The Effect of In-plane Boundary Conditions on the Post-buckling Behaviour of Rectangular Corrugated Paperboard Panels[J]. *Computers & Structures*, 2012, 104(4): 55—62.
- [10] SZEWCZYK W, GŁOWACKI K. Effect of Humidity on Paper and Corrugated Board Strength Parameters[J]. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 2014, 22(5): 133—137.
- [11] YALI M, ZHEN G, LIANG Z, et al. Finite Element Analysis of Buckling of Corrugated Fiberboard[J]. *Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8(1): 257—263.
- [12] BIVAINIS V, JANKAUSKAS V. Impact of Corrugated Paperboard Structure on Puncture Resistance[J]. *Materials Science*, 2015, 21(1): 57—61.
- [13] 王冬梅. 瓦楞复合材料静态压缩吸能性能研究[J]. *包装工程*, 2007, 28(12): 71—73.
WANG Dong-mei. Static Compression and Energy Absorption Properties of Corrugated Composites[J]. *Packaging Engineering*, 2007, 28(12): 71—73.
- [14] 孙聚杰, 郝笑梦. 不同组合角度瓦楞纸板缓冲性能研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(19): 43—45.
SUN Ju-jie, HAO Xiao-meng. Research on Cushion Properties of Corrugated Boards Structure with Different Angles[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(19): 43—45.
- [15] GB/T 1454—2005, 夹层结构侧压性能试验方法[S].
GB/T 1454—2005, Test Method for Edgewise Compressive Properties of Sandwich Constructions[S].
- [16] GB/T 1453—2005, 夹层结构或芯子平压性能试验方法[S].
GB/T 1453—2005, Test Method for Flatwise Compression Properties of Sandwich Constructions or Cores[S].
- [17] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
GB/T 8168—2008, Testing Method of Static Compression for Package Cushioning Package Materials[S].
- [18] 王冬梅, 王志伟. 纸蜂窝压缩密实化应变评估[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5): 285—289.
WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Evaluation of Compressive Densification Strain of Paper Honeycombs[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5): 285—289.
- [19] LIU Q, FU J, Ma J, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with EPP Foam[J]. *Composites Part B Engineering*, 2017, 130: 236—247.