蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载及静态缓冲性能研究

刘 冰[1]，阮红斌[2]，曹海斌[2]，张新昌[1]

(1. 江南大学，无锡 214122；2. 宁波奥迪斯丹包装有限公司，宁波 315514)

摘要：通过静态压缩试验，测定了蜂窝纸板、蜂窝-瓦楞复合纸板的静态缓冲特性曲线，讨论了蜂窝-瓦楞双面复合纸板的静态压缩变形过程，并分析了复合层数和瓦楞楞型对蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载性能和静态缓冲性能的影响。结果表明，蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载能力明显低于未经复合的蜂窝纸板；蜂窝-瓦楞复合纸板在低应力阶段的缓冲性能明显优于蜂窝纸板，但在高应力阶段与蜂窝纸板的缓冲性能基本一致。

关键词：蜂窝-瓦楞复合纸板；面外承载性能；静态缓冲性能

中图分类号：TB484.1；TB487 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-3563(2012)07-0004-05

Research on Outside Bearing and Static Cushioning Performance of Honeycomb-corrugated Composite Paperboard

LIU Bing[1], *RUAN Hong-bin*[2], *CAO Hai-bin*[2], *ZHANG Xin-chang*[1]

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Ningbo Hotel Star Packaging Co., Ltd., Ningbo 315514, China)

Abstract: Static cushioning characteristics curves of honeycomb paperboard and honeycomb-corrugated composite paperboard was determined with static compressive test. The static compressive deformation process of double lined honeycomb-corrugated composite paperboard was discussed. The influence of composite layers and flute-type of honeycomb-corrugated composite paperboard on its outside bearing capacity and static cushioning performance was analyzed. The results showed that the outside bearing performance of the composite board is obviously lower than the honeycomb paperboard; in the low stress phase, the static cushioning performance of the composite board is apparently better than the honeycomb board while they are basically similar in the high stress phase.

Key words: honeycomb-corrugated composite paperboard; outside bearing performance; static cushioning performance

蜂窝纸板和瓦楞纸板是目前我国包装行业中广泛使用的两种纸质绿色环保包装材料。在实际应用中，蜂窝纸板多以面外承载形式——即受力方向垂直于纸板表面——作为填充材料或缓冲材料使用。然而人们也发现，虽然蜂窝纸板具有良好的面外承载性能，但其在低应力状态下的缓冲性能欠佳，瓦楞纸板与蜂窝纸板的复合则从一定程度上弥补了蜂窝纸板的这个缺陷。在小荷载情况下，瓦楞纸板具有良好的减震性能，对偶尔出现较大的冲击荷载，蜂窝纸板则可以起到一定的缓冲作用。因此将蜂窝纸板和瓦楞纸板组合使用，可结合两者的优点，拓展蜂窝纸板的应用领域。

目前已有学者针对蜂窝-瓦楞单面复合纸板进行了相关研究，如李厚民[1]、都学飞[2]、贺丹华[3-4]等，但针对蜂窝-瓦楞双面复合纸板的研究较少[5]。笔者拟采取对比试验的方法，分别对蜂窝纸板、蜂窝-瓦楞单面复合纸板、蜂窝-瓦楞双面复合纸板进行试验，研究复合层数、瓦楞楞型对蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载性能与静态缓冲性能的影响。

收稿日期：2011-12-29

作者简介：刘冰(1987－)，女，河北人，江南大学硕士生，主攻包装材料与结构。

1　试验

1.1　方法

参照 GB/T 8168《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》[6]，试验设备为 THS-A7C-100AS 型可程式恒温恒湿试验机和 LRX Plus 型万能电子材料试验机。试验步骤如下。

1）根据 GB/T 4857.2《运输包装件基本试验 温湿度调节处理》[7]，在恒温恒湿箱中对试验样品进行预处理 24 h。

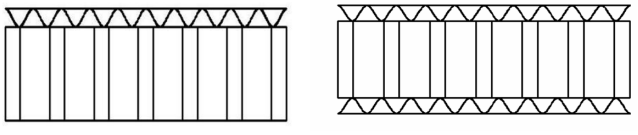
2）测量各试验试样原始厚度(T)。

3）依据 GB/T 8168，将试样放在试验机的上下压块之间，分别对试样进行静态压缩试验直至试样被压溃，试验机将自动记录下压力值和试样对应的受压变形量。试验环境温度为(23±1)℃，相对湿度为50%±2%，加载速度为(12±2)mm/min。每次压缩试验进行 5 次，试验结果平均值。

4）试验数据处理。通过静态压缩试验得到试样的压力变形曲线，根据应力 $\sigma=F/A$，应变 $\varepsilon=X/T$，转换成试样的应力-应变曲线。试样的比能等于应力-应变曲线下曲边三角形的面积，每一个曲边三角形对应着一个最大应力，因此可以计算与这个最大应力对应的缓冲系数。自原点起，由小到大依次作不同的曲边三角形，就可以求得缓冲系数与最大应力的函数关系，从而绘制出试样的缓冲系数-最大应力(C-σ_{max})曲线。

1.2　材料

蜂窝-瓦楞复合纸板分为蜂窝-瓦楞单面复合纸板(图 1a)和蜂窝-瓦楞双面复合纸板(图 1b)。为防止纸板间错动，蜂窝纸板和瓦楞纸板通过粘合剂粘合在一起。



a 蜂窝-瓦楞单面复合纸板　　b 蜂窝-瓦楞双面复合纸板

图 1　蜂窝-瓦楞复合纸板

Fig. 1 Honeycomb-corrugated composite cardboards

选取 4 组试验试样，其中 1 号蜂窝纸板为对照组，2 号试样为蜂窝-瓦楞单面复合纸板，3 号和 4 号试样为蜂窝-瓦楞双面复合纸板。

蜂窝纸板试样的规格为：纸板厚度 25 mm；芯纸定量 150 g/m^2；芯纸孔径类型为 B，即孔径为 15 mm；面纸定量为 250 g/m^2。参考荷力胜蜂窝材料集团的标准[8]，纸板代号为 150B/250－25。复合用的瓦楞纸板选 A 楞和 B 楞 2 种，其中 A 楞瓦楞纸板的厚度为 5 mm，B 楞瓦楞纸板的厚度为 3 mm。因此，A 楞蜂窝-瓦楞单面复合纸板可表示为 150B/250－25＋A，A 楞蜂窝-瓦楞双面复合纸板可表示为 A＋150B/250－25＋A，其他类同。试验试样的面积均为 100 mm×100 mm，试样的规格见表 1。

表 1　试样的规格

Tab. 1 Specification of specimens

编号	试样名称	原始厚度(T)/mm	复合层数	瓦楞纸板楞型
1	150B/250－25	25	无	无
2	150B/250－25＋A	30	1	A
3	A＋150B/250－25＋A	35	2	A
4	B＋150B/250－25＋B	31	2	B

2　结果与分析

2.1　蜂窝-瓦楞双面复合纸板的静态压缩变形过程分析

以 4 号试样为例，分析蜂窝-瓦楞双面复合纸板的静态压缩变形过程，其压力-变形量曲线见图 2。

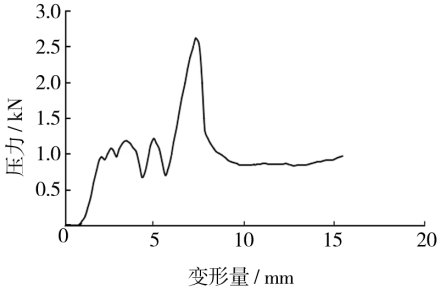


图 2　4 号试样的压力-变形曲线

Fig. 2 Pressure-deformation curve of No. 4 specimen

通过 4 号试样的压力-变形曲线可以看出，蜂窝-瓦楞双面复合纸板经历了瓦楞纸板、蜂窝纸板逐层压溃的过程。其中，第 1 层瓦楞纸板首先被压溃，依次为第 2 层瓦楞纸板被压溃，最后蜂窝纸板被压溃。其中每个过程中均包括线弹性阶段和屈服阶段。

1）线弹性阶段。双面复合纸板受力较小，各层纸板均处于线弹性变形阶段，见图 3。

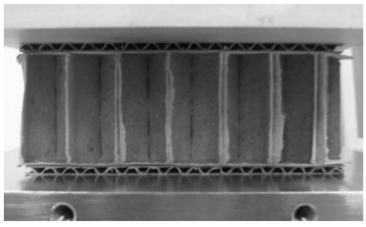


图 3 4 号试样静态压缩的线弹性阶段

Fig. 3 Linearly elastic portion of static compression of No. 4 specimen

2）第 1 层瓦楞纸板被压溃。纸板受力逐渐增大，达到第 1 层瓦楞纸板屈服应力后，第 1 层瓦楞纸板首先进入屈服阶段，直至完全压溃，另一层瓦楞纸板仍处于弹性阶段，见图 4。

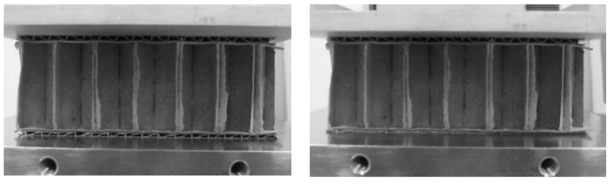


图 4 第 1 层瓦楞纸板被压溃阶段

Fig. 4 Phase in which the first layered corrugated board is crushed

3）第 2 层瓦楞纸板被压溃。随着纸板受力进一步增大，第 2 层瓦楞纸板也达到其屈服应力从而进入屈服阶段，直至完全压溃。直至此时，上下 2 层瓦楞纸板全部完全压溃，见图 5。

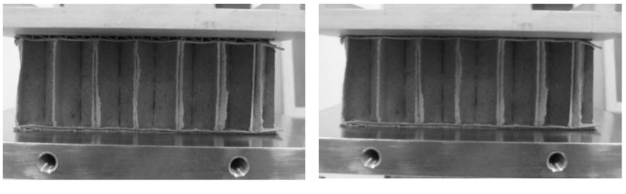


图 5 第 2 层瓦楞纸板被压溃阶段

Fig. 5 Phase in which the second layered corrugated board is crushed

4）蜂窝纸板最后被压溃。此时，2 层瓦楞纸板均已完全压溃，压力直接作用在蜂窝纸板上，蜂窝纸板经历弹性阶段，达到其屈服应力时进入屈服阶段，直至完全压溃，见图 6。

2.2 复合层数对蜂窝-瓦楞复合纸板静态压缩特性的影响

蜂窝-瓦楞复合纸板的复合层数分别为无复合、1 层复合和 2 层复合。其中，无复合指未复合瓦楞纸板的单独一层蜂窝纸板，1 层复合为蜂窝-瓦楞单面复合结构，2 层复合为蜂窝-瓦楞双面复合结构。以复合层数作为影响因素考察其对蜂窝-瓦楞复合纸板的静态压缩特性的影响。1－4 号试样的静态压缩试验数据见表 2，其中，1－3 号试样的应力-应变曲线见图 7，缓冲系数-最大应力曲线见图 8。

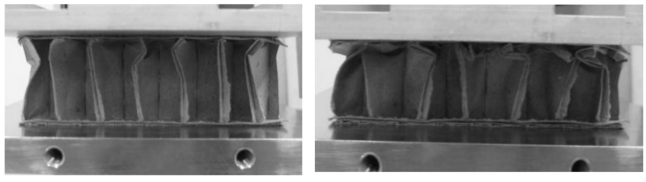


图 6 蜂窝纸板最后被压溃阶段

Fig. 6 Phase in which the honeycomb board is crushed

表 2 1－4 号试样的静态压缩试验数据

Tab. 2 Experimental data of static compression of No. 1－4 specimens

编号	试样名称	第 1 应力峰值/kPa	第 2 应力峰值/kPa	第 3 应力峰值/kPa	最大应力/kPa
1	150B/250－25	347.26	无	无	347.26
2	150B/250－25＋A	85.05	264.58	无	264.58
3	A＋150B/250－25＋A	105.13	72.62	248.67	248.67
4	B＋150B/250－25＋B	118.3	122.02	261.94	261.94

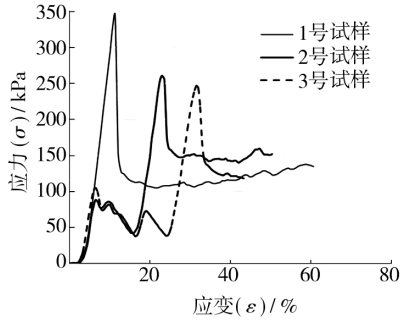


图 7 1－3 号试样的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of No. 1－3 specimens

1）观察图 7 中各试样的应力峰值个数，1 号试样只有 1 个应力峰值；2 号试样有 2 个应力峰值，其中第 1 个为瓦楞纸板的应力峰值，第 2 个为蜂窝纸板的应力峰值；3 号试样有 3 个应力峰值，其中前 2 个峰值为瓦楞纸板的应力峰值，第 3 个峰值为蜂窝纸板的应力峰值。由此可知，复合纸板中的各层纸板不是同时压溃的，而是由屈服应力较小的瓦楞纸板开始逐层压溃的，并且应力峰值的个数与复合纸板的层数相同。

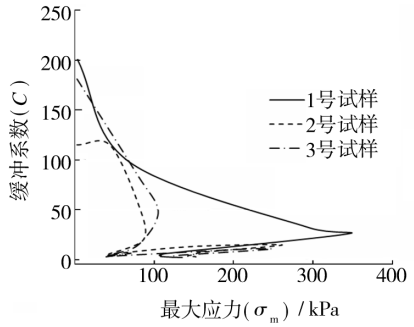


图 8　1－3 号试样的缓冲系数-最大应力曲线

Fig. 8 C-σ_m curves of No. 1－3 specimens

2）对比图 7 中 1,2,3 号试样的第一应力峰值分别为 347.26,85.05,105.13 kPa。研究发现,蜂窝-瓦楞复合纸板的第一应力峰值明显低于无复合的蜂窝纸板,这是因为瓦楞纸板的面外承载能力要远低于蜂窝纸板,而复合纸板的面外承载性能是由第一应力峰值决定的。

比较图 7 中 2 号和 3 号试样的曲线,3 号试样的第一应力峰值大于 2 号试样,且 3 号试样的第 2 应力峰值略低于其第一应力峰值。因此,随着复合层数的增加,复合纸板的第一应力峰值逐渐提高,即复合纸板的面外承载性能逐渐提高。究其原因,双层结构中的第 1 层瓦楞纸板承载的同时,第 2 层瓦楞纸板和蜂窝纸板的面外承载性能叠加在了第 1 层瓦楞纸板上,从而提高了第 1 层瓦楞纸板的面外承载性能。

3）比较图 7 中 1,2,3 号试样的蜂窝纸板应力峰值分别为 347.26,264.58,248.67 kPa。可以看出与瓦楞纸板复合后的蜂窝纸板的屈服应力明显低于未经复合的蜂窝纸板的屈服应力。随着复合层数的增加,蜂窝纸板的屈服应力逐渐降低,即面外承载性能逐渐降低。分析其原因,是因为在瓦楞纸板直接承载阶段,蜂窝纸板也间接承受载荷,产生弹性变形,因此本身能量有所损失。当瓦楞纸板完全压溃后,由蜂窝纸板直接承载时,其面外承载性能会有所降低。

4）结合图 7 和图 8 可知,在应力为 0～100 kPa、应变为 0～7%阶段时,蜂窝纸板和蜂窝-瓦楞复合纸板的缓冲系数都比较大,但蜂窝-瓦楞复合纸板的缓冲系数较蜂窝纸板小一些,且单面复合纸板的缓冲系数略小于双面复合纸板。此时,3 种纸板缓冲性能的关系为:单面复合纸板＞双面复合纸板＞蜂窝纸板。

在应力为 100～260 kPa 阶段,相同应力条件下蜂窝-瓦楞复合纸板的缓冲系数明显低于蜂窝纸板,而此时双面复合纸板的缓冲系数略小于单面复合纸板。此时,3 种纸板缓冲性能的关系为:双面复合纸板＞单面复合纸板＞蜂窝纸板。

当应力大于 350 kPa 时,此时蜂窝纸板与蜂窝-瓦楞复合纸板的缓冲系数基本一致,说明此时 3 种纸板缓冲性能基本相同。

2.3　瓦楞楞型对蜂窝-瓦楞复合纸板静态压缩特性的影响

对比 3 号试样和 4 号试样的静态缓冲曲线,可以分析瓦楞纸板的楞型对蜂窝-瓦楞复合纸板力学特性的影响。3 号和 4 号试样的应力-应变曲线见图 9,其缓冲系数-最大应力曲线见图 10。

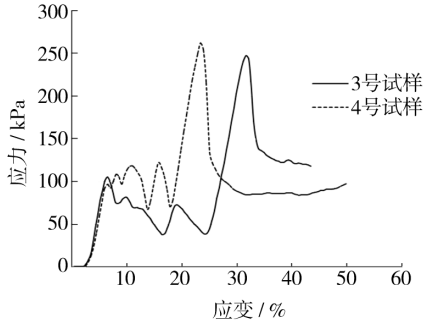


图 9　3 号和 4 号试样的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of No. 3 and No. 4 specimen

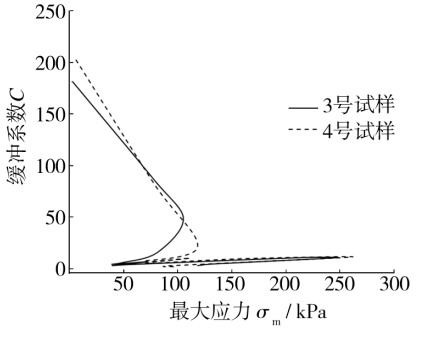


图 10　3 号和 4 号试样的缓冲系数-最大应力曲线

Fig. 10 C-σ_m curves of No. 3 and No. 4 specimen

由图 9 可知,4 号试样的第一应力峰值(118.3 kPa)高于 3 号试样的对应值(105.13 kPa)。随着瓦楞纸板楞高的降低,瓦楞纸板的面外承载性能逐渐提高,相应地,蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载性能也逐渐提高。

由图 10 可知,在 1～70 kPa 应力阶段,3 号试样的缓冲性能优于 4 号试样;在 70～120 kPa 应力阶段,4 号试样的缓冲性能优于 3 号试样;在应力大于

120 kPa 的应力阶段，3 号和 4 号试样的缓冲性能基本一致。

3 结论

1）蜂窝-瓦楞复合纸板的压溃过程是由面外承载能力较低的材料开始逐层压溃。一般是瓦楞纸板先压溃，蜂窝纸板后压溃。

2）随着复合层数的增加，蜂窝纸板的屈服应力逐渐降低，即面外承载性能逐渐降低。

3）蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载性能是由其第一应力峰值决定的，因此蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载性能明显低于未经复合的蜂窝纸板，其中双面复合纸板的面外承载性能略优于单面复合纸板。

4）随着瓦楞纸板楞高的降低，瓦楞纸板的面外承载性能逐渐提高，复合纸板的面外承载性能也随之提高，但其缓冲性能相差不大。

5）蜂窝-瓦楞复合纸板在低应力阶段的缓冲性能明显优于蜂窝纸板，在高应力阶段与蜂窝纸板的缓冲性能基本一致，在低应力和高应力阶段均表现出优良的缓冲性能。

此外，蜂窝纸板与瓦楞纸板组合使用，还可弥补蜂窝纸板折叠成型困难，边压强度较差，戳穿强度低等缺点[9]，从而达到整体性能的优化，因而，蜂窝-瓦楞复合纸板具有较大的实用价值和应用前景。

参考文献：

[1] 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. Research on the Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and Corrugated Paperboard[J]. Packaging Engineering，2005，26(4)：9－11.

[2] 都学飞，郭彦峰，陶良毅，等. 瓦楞/蜂窝复合结构纸板强度性能的试验研究[J]. 包装工程，2008，29(8)：41－43.
DU Xue-fei，GUO Yan-feng，TAO Liang-yi. Experimental Research on Strength Properties of Corrugated-honeycomb Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering，2008，29(8)：41－43.

[3] 贺丹华，王双飞，黄崇杏，等. 蜂窝/E 形瓦楞复合纸板的缓冲特性的研究[J]. 包装工程，2008，29(2)：15－16.
HE Dan-hua，WANG Shuang-fei，HUANG Chong-xing，et al. Research on the Cushion Properties of Honeycomb/E Corrugated Composite Cardboard[J]. Packaging Engineering，2008，29(2)：15－16.

[4] 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. Study of Mechanical Property of Honeycomb/Corrugated Composite Cardboard[D]. Nanning：Guangxi University，2008.

[5] 王冬梅. 瓦楞复合材料动态压缩吸能性能试验研究[J]. 包装工程，2008，29(4)：10－11.
WANG Dong-mei. Experimental Study of the Dynamic Compression and Energy Absorption Properties of Corrugated Composites[J]. Packaging Engineering，2008，29(4)：10－11.

[6] 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 Materials[S].

[7] GB/T 4857.2，运输包装件基本试验 第 2 部分：温湿度调节处理[S].
GB/T 4857.2，Packaging-Basic Tests for Transport Packages——Part2：Temperature and Humidity Conditioning[S].

[8] 王虹，王文明，胡兵林，等. 纸蜂窝材料的有效缓冲及其预压缩试验[J]. 包装工程，2012，33(1)：20－23.
WANG Hong，WANG Wen-ming，HU Bing-lin，et al. Effective Cushioning of Paper Honeycomb Material and Precompression Test[J]. Packaging Engineering，2012，33(1)：20－23.

[9] 大冬. 瓦楞纸板与蜂窝纸板的性能对比[N]. 中国包装报，2006-06-20.
DA Dong. Performance Comparison Between Corrugated Cardboard and Honeycomb Cardboard[N]. China Packaging News，2006-06-20.