

内含气体对蜂窝纸板静态缓冲性能的影响

雷晓东, 孙德强, 罗鹏飞, 胡昕
(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究蜂窝纸板的内部气体对其静态缓冲性能的影响规律。**方法** 通过静态压缩实验, 研究在不同孔隙率条件下蜂窝纸板的缓冲性能。**结果** 通过静态压缩实验, 得到了应力-应变曲线, 对比不同孔隙率条件下的应力-应变曲线, 可以观察到孔隙率越大, 蜂窝纸板在压缩过程中的静态峰应力越小, 蜂窝纸板越容易被压变形, 并且形成的密实层越薄, 其中孔隙率为 0 与孔隙率为 100% 时的应力-应变曲线变化明显, 且气体泄漏不受厚长比和孔径尺寸的影响。**结论** 在静态压缩过程中, 蜂窝纸板内的气体使蜂窝纸板所能承受的应力明显增强, 并且通过理论推导, 得出了内含气体影响下蜂窝纸板在静态压缩过程中各个阶段的应力理论公式, 为其缓冲性能的研究提供了一定的理论方法。

关键词: 内含气体; 蜂窝纸板; 静态压缩; 缓冲性能

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0039-05

Influence of Entrapped Air on the Static Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard

LEI Xiao-dong, SUN De-qiang, LUO Peng-fei, Hu-xin
(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to research the influence of entrapped air on the static cushioning performance of honeycomb paperboard. The static compression test was used to study the cushioning property of different percentages of holes of honeycomb paperboard. Curve of the stress-strain was achieved by the static compression test. With the increase of the percentages of holes, the plateau stress of honeycomb paperboard decreased and the honeycomb paperboard was easier to be deformed by pressure, and the thinner dense layer was formed by the curve of the stress-strain of different percentages of holes. When the percentages of holes was 0% and 100%, the curve of stress-strain had obvious changes, and entrapped air was not influenced by thickness to length ratio and aperture size. In conclusion, under static compression, the stress of honeycomb cardboard is significantly enhanced due to the entrapped air. The various stages of the stress theory formula are deduced under the influence of air by the static compression test. That provides a certain theoretical method for the research of its cushioning performance.

KEY WORDS: entrapped air; honeycomb paperboard; static compression; cushioning performance

蜂窝纸板作为一种绿色环保型缓冲包装材料, 具有质量轻、强度高、刚度好、缓冲性能好、结构

收稿日期: 2016-09-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目 (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: 雷晓东 (1990—), 男, 内蒙古多伦人, 陕西科技大学硕士生, 主攻包装材料与测试技术。

通讯作者: 孙德强 (1976—), 男, 山东沂水人, 陕西科技大学教授、硕导, 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。

稳定性好、隔热隔音性好等诸多优点^[1]。蜂窝纸板材料可以完全回收,无污染,满足绿色包装的要求,且价格便宜,材料来源广泛,可代替木材、塑料等,是比较理想的运输包装材料,在包装领域具有广泛的应用,目前主要市场包含蜂窝纸箱、缓冲制品、家具、托盘和建材 5 个主要领域,引发了国内外很多学者对其各方面性能的研究^[2-4]。

蜂窝纸板是以纸质材料制造而成的蜂窝状纸芯,两端分别敷以纸面板,从而形成了蜂窝夹层结构。影响蜂窝纸板缓冲性能的因素主要有原纸的物理性能、蜂窝纸芯的结构和弹性、蜂窝纸板的含水率等。其压缩、失稳、破坏机理十分复杂,而且不同生产厂家性能差异很大,要重复进行许多次试验,现已有学者对不同厚度蜂窝纸板的缓冲性能进行了实验研究与分析^[2, 5];针对不同规格蜂窝纸板缓冲性能进行了研究^[6-7];还研究了材料参数、温湿度对蜂窝纸板静态缓冲性能的影响^[3, 8-9]。很少有人研究蜂窝纸板内含气体对其缓冲性能的影响,目前有的研究仅仅是有关气体对铝蜂窝缓冲性能的影响^[10-11]。文中则针对蜂窝纸板,通过静态压缩实验,对比解释在不同孔隙率条件下的应力-应变曲线变化,并且推导出气体影响下的理论公式,研究内含气体对蜂窝纸板静态缓冲性能的影响。

1 实验

1.1 材料与仪器

材料:所有纸蜂窝测试样品均制作为 100 mm×100 mm 的蜂窝纸板,厚度(d)分别为 30, 40, 50, 60 mm 的蜂窝纸板,孔径大小(D)均为 18 mm。具体样品参数见表 1。

表 1 蜂窝纸板静态压缩实验试样规格
Tab.1 The standard specimens for static compression test of honeycomb paperboard

厚度/mm	厚长比	密度/(g·cm ⁻³)	芯纸定量 /(g·m ⁻²)	面纸定量 /(g·m ⁻²)
30	0.022	0.0307	130	180
40	0.0272	0.0275	137	180
50	0.0171	0.0226	140	180
60	0.0265	0.0233	160	180

该实验所使用的实验设备为微机控制电子万能试验机(CMT4304)。实验过程中,在蜂窝纸板试样上表面需要放置一块面积大于蜂窝纸板试样的

钢板,以保证蜂窝纸板试样的受压均匀。在下压头上放置带有漏气孔的支撑装置,见图 1,并将试样放置在带有漏气孔的底部支撑装置上表面,使试样上有空的一面与底部支撑装置上的孔相对应,以保证在实验过程中蜂窝纸板试样中的气体能充分地



图 1 带有漏气孔的底部支撑装置
Fig.1 The bottom supporting device with hole

1.2 方法

参照 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩实验方法》^[12],对厚度分别为 30, 40, 50, 60 mm 的蜂窝纸板,通过上下表面戳孔的方式,得到孔隙率为 0, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% 和 100% 的样品,制备面积为 100 mm×100 mm 的试样。实验前先对试样进行预处理,将蜂窝纸板试样放置在标准环境条件下处理 24 h 以上^[13],实验过程中保持温度为 20 ℃,相对湿度为 75%,压板以(12±3)mm/min 的速度沿厚度方向对试验样品施压,直至试样被压溃,压缩过程中试验机将自动记录下压力值和试样的受压变形量。不同试样各取 3 个进行实验,取其平均值作为实验的结果。

2 数据处理与分析

在标准条件下,通过静态压缩实验得出了不同厚度的蜂窝纸板,在不同孔隙率(q)条件下的应力-应变曲线,见图 2。

从图 2 中可以看出,不同厚度的蜂窝纸板在不同孔隙率下的应力-应变曲线分为 4 个阶段,即弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段,具体分析如下。

1) 弹性阶段。此阶段跨度较小,不同厚度的蜂窝纸板都有着同样的情况,就是随着孔隙率的增加,曲线的峰值逐渐降低,这是因为蜂窝纸板孔隙率越高,材料所能承受的应力程度越差,就越容易被压变形。

2) 塑性阶段。此阶段跨度较大,当材料开始

发生塑性变形从而进入屈服平台区时,可以观察到,随着蜂窝纸板孔隙率的不断增加,材料屈服点的应力值却持续降低,此现象表明在受到外力作用时,孔隙率越增加,蜂窝纸板就越容易达到屈服阶段,从而吸收了主要的能量,说明蜂窝纸板的孔隙率越高,其缓冲性能就越好。

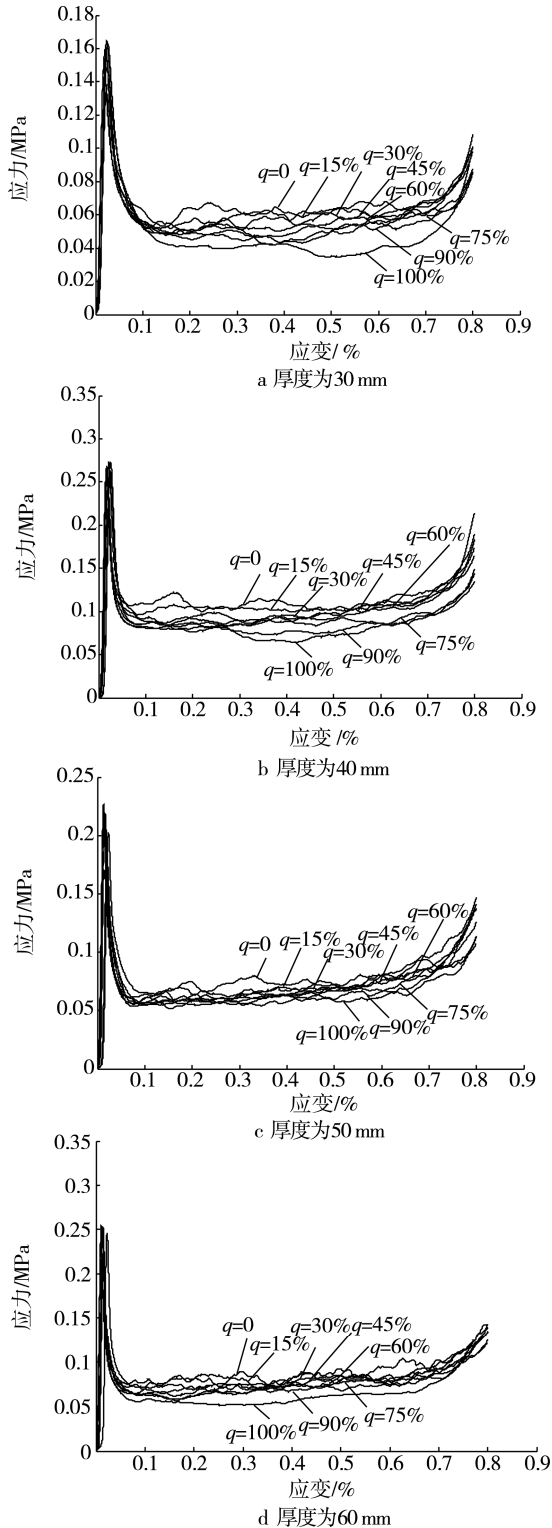


图 2 不同厚度的蜂窝纸板在不同孔隙率下的应力-应变曲线
Fig.2 Stress strain curves of honeycomb paperboard with different thickness under different porosity

3) 密实化阶段。此阶段的应力增长迅速而应变较小,随着蜂窝纸板孔隙率的增加,应力上升开始点的应力值逐渐下降,这就表明,在应变一定的情况下,蜂窝纸板的孔隙率越高,试样越晚被压实,并且形成的密实层越薄,从而使压溃应力越小。

根据实验现象,可以进一步进行理论分析,通过静态压缩实验,得到了应力-应变曲线,从而可以运用能源效率法^[14]计算出不考虑气体影响下的静态峰应力(平台应力) σ_{pl} 计算式:

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_0^{\varepsilon_s} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_s} \tag{1}$$

式中: ε 为蜂窝纸板在整个压缩过程中的应变; ε_s 为密实化应变。蜂窝纸板在静态压缩情况下,平台应力 σ_{pl} 与相对密度有关,然而对于标准的六边形蜂窝^[15],其相对密度与厚长比相关,因此可以得到 σ_{pl} 的表达式为:

$$\sigma_{pl} = C_0 \sigma_{ys} (\delta/l)^k \tag{2}$$

式中: δ/l 为孔壁材料的厚长比; σ_{ys} 为孔壁材料的屈服强度; C_0 和 k 为常数。蜂窝纸板样品平台应力曲线拟合参数见表 2,拟合的曲线见图 3。

表 2 蜂窝纸板样品平台应力曲线拟合参数
Tab.2 The curve fitting parameters of the honeycomb cardboard sample platform

样品厚度/mm	孔隙率/%	C_0	k
30	0	5.6	1.67
30	100	6.2	1.71
40	0	5.6	1.67
40	100	6.2	1.71
50	0	5.6	1.67
50	100	6.2	1.71
60	0	5.6	1.67
60	100	6.2	1.71

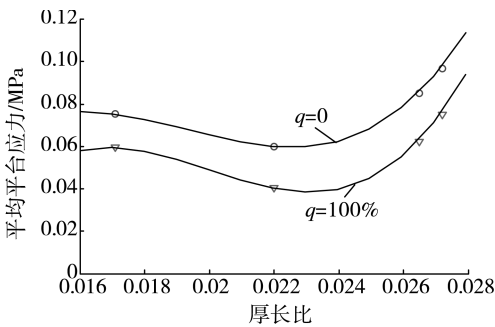


图 3 蜂窝纸板样品平均平台应力与厚长比的拟合曲线
Fig.3 The fitting curves of the mean plateau stress and thickness to length ratio of honeycomb paperboard

从图3可以看出,孔隙率为0的拟合曲线与孔隙率为100%的拟合曲线不完全一致,表明了随着孔隙率越大,其平台应力就越小,因此在静态压缩过程中,蜂窝纸板内的气体对蜂窝纸板缓冲性能具有一定的影响。

在考虑蜂窝纸板内部气体影响的情况下,根据Zhang等^[16]的论证,忽略在压缩过程中由于屈曲造成的体积变化,并假定在实验过程中温度是恒定的。用 β 表示气体渗透系数,则其可以被确定为:

$$\beta = 1 - \frac{PV}{P_0V_0} \quad (3)$$

式中: P_0 为蜂窝内气体的初始压强,即大气压; P 为当位移为 x 时蜂窝内气体的压强; V_0 为蜂窝纸板初始体积; V 为位移量为 x 时蜂窝纸板的体积。 $V_0 = L_0A_0$; $V = L_xA_0 = L_0A_0(1-\varepsilon)$ 。其中 L_0 为蜂窝纸板试样的原始长度; A_0 为试样的横截面积; L_x 为压缩位移量为 x 时试样的长度; ε 为位移量为 x 时试样的应变。可根据式(3)计算出当位移为 x 时气体的压强 P 为:

$$P = \frac{P_0V_0}{V}(1-\beta) = P_0 \cdot \frac{1-\beta}{1-\varepsilon} \quad (4)$$

因为在整个静态压缩过程中,蜂窝内气压的变化量为 $\Delta P = P - P_0$, 则可以计算得:

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{1-\beta}{1-\varepsilon} - 1 \right) \quad (5)$$

从而根据式(2)和式(5)可以得出蜂窝纸板在静态压缩过程中,其内含气体影响下的静态峰应力 σ_p 为:

$$\sigma_p = \sigma_{pl} + \Delta P = C_0 \sigma_{ys} (\delta/l)^k + P_0 \left(\frac{1-\beta}{1-\varepsilon} - 1 \right) \quad (6)$$

通过式(6)可以计算出蜂窝纸板在静态压缩过程中,内含气体影响下平台区的应力,也是体现蜂窝纸板具有良好的缓冲性能的阶段。同样的方法,在静态压缩过程中,其他阶段的应力公式也能够推导出来。通过蜂窝纸板的静态压缩实验,以厚度为30 mm,孔隙率为0的蜂窝纸板为例,可以得到其整个变形过程,见图4。

由图4可知,除了静态峰应力以外,由蜂窝纸板静态压缩本构模型加上气体压强的影响因素 ΔP , 便可以得到内含气体影响下蜂窝纸板静态压缩过程中各个阶段的应力公式:

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon + \Delta P, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \sigma_{pl} + \Delta P \leq \sigma \leq \sigma_0 + \Delta P, & \varepsilon = \varepsilon_0 \\ \sigma = \sigma_{pl} + \Delta P, & \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ \sigma = \sigma_{pl} + E_s(\varepsilon - \varepsilon_s) + \Delta P, & \varepsilon_s < \varepsilon < 1 \end{cases} \quad (7)$$

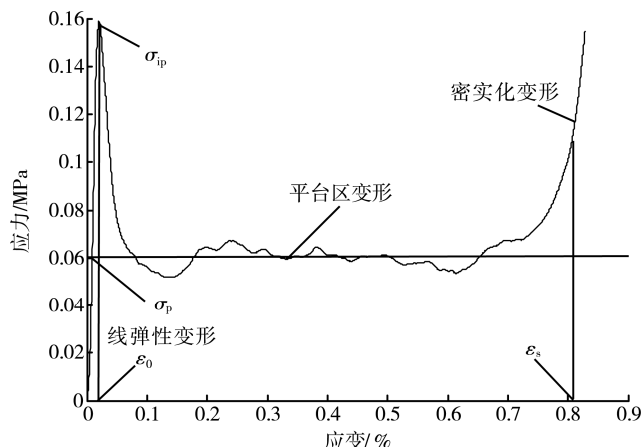


图4 蜂窝纸板的静态压缩应力-应变曲线

Fig.4 Stress strain curves of honeycomb paperboard under static compression

式中: E 为材料线弹性阶段的弹性模量; E_s 为密实化阶段的弹性模量; ε_0 为初始应变; ε_s 为密实化应变。根据式(7)可以计算出,在内含气体影响下蜂窝纸板静态压缩整个过程的应力值,相比以前不考虑气体时的结果更准确、更实际,为该类型材料的研究提供了方法。

3 结语

文中主要研究内含气体对蜂窝纸板缓冲性能的影响,通过对蜂窝纸板进行了静态压缩实验,得到了不同厚度的蜂窝纸板,在不同孔隙率条件下的应力-应变曲线。对结果进行了分析,发现内含气体对不同厚度的蜂窝纸板静态缓冲性能具有明显影响。随着孔隙率的增加,应力-应变曲线逐渐降低,表明了蜂窝纸板孔隙率越高,材料的承载能力越差,蜂窝纸板就越容易达到屈服阶段,越容易被压变形,并且形成的密实层越薄,压溃应力越小。从而进一步针对气体对蜂窝纸板静态缓冲性能的影响进行了理论推导,并且得到了气体影响下蜂窝纸板静态压缩过程中各个阶段的应力公式,为缓冲性能的研究提供了一定的理论方法。所有理论的推导和公式的体现,充分说明了气体对蜂窝纸板静态缓冲性能具有明显的影响,在对此类材料缓冲性能的研究中应该加以考虑,可以进一步保证研究结果的准确性。

参考文献:

- [1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出

- 版社, 2013.
- PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2013.
- [2] 郭彦峰, 许文才, 王梅. 蜂窝纸板缓冲性能的实验研究[J]. 包装工程, 1999, 20(2): 12—15.
- GUO Yan-feng, XU Wen-cai, WANG Mei. Experimental Study of Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 1999, 20(2): 12—15.
- [3] 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. Static Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 56—58.
- [4] 孙德强, 刘志鹏. 包装中蜂窝纸板的应用[J]. 中国包装工业, 2000, 71(5): 39—41.
- SUN De-qiang, LIU Zhi-peng. The Application of Honeycomb Cardboard Packaging[J]. China Packaging Industry, 2000, 71(5): 39—41.
- [5] 张改梅. 蜂窝纸板缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2001, 22(5): 7—9.
- ZHANG Gai-mei. The Research of the Honeycomb Paperboard Cushioning Performance[J]. Packaging Engineering, 2001, 22(5): 7—9.
- [6] 张改梅, 胡玉玲. 不同规格蜂窝纸板缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 77—79.
- ZHANG Gai-mei, HU Yu-ling. Study on the Performance of Honeycomb Paperboard with the Different Size[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 77—79.
- [7] 张丽, 武华, 王保升. 蜂窝纸板静态缓冲性能的影响因素分析[J]. 包装工程, 2010, 31(23): 7—9.
- ZHANG Li, WU Hua, WANG Bao-sheng. Analysis of the Influencing Factors on Static Cushioning Performance of Honeycomb Type Board[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(23): 7—9.
- [8] 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—9.
- WANG Mei. The Research of the Honeycomb Fibre-board Cushioning Performance and the Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4): 5—9.
- [9] WANG D M, BAI Z Y. Mechanical Property of Paper Honeycomb Structure under Dynamic Compression[J]. Materials and Design, 2015(7): 59—64.
- [10] XU S, BEYNON J H, RUAN D, et al. Strength Enhancement of Aluminium Honeycombs Caused by Entrapped Air under Dynamic Out-of-plane Compression[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012(7): 1—13.
- [11] XU S Q, RUAN D, LU G X. Strength Enhancement of Aluminium Foams and Honeycombs by Entrapped Air under Dynamic Loadings[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014(4): 120—125.
- [12] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料动态压缩实验方法[S].
- GB/T 8168—2008, Testing Method of Static Compression for Package Cushioning Package Materials[S].
- [13] GB/T 4857.2—2005, 包装 运输包装件基本试验[S].
- GB/T 4857.2—2005, Packaging: Basic Tests for Transport Packages[S].
- [14] LI Q M, MAGKIRIADIS I, HARRIGAN J J. Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids[J]. Cell Plast, 2006, 42(3): 71—92.
- [15] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [16] ZHANG X W, YU T X. Energy Absorption of Pressurized Thin-walled Circular Tubes under Axial Crushing [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2009, 51(5): 335—349.