

DOI: 10.3901/JME.2009.05.285

纸蜂窝压缩密实化应变评估*

王冬梅¹ 王志伟²

(1. 深圳职业技术学院媒体与传播学院 深圳 518055;

2. 暨南大学包装工程研究所 珠海 519070)

摘要: 分析纸蜂窝压缩密实化应变对纸蜂窝吸能特性评估的重要性, 引入纸蜂窝压缩瞬时相对密度的概念, 从理论上建立纸蜂窝压缩密实化应变评估方程, 并做了不同结构参数的纸蜂窝准静态压缩试验, 试验结果表明纸蜂窝胞壁厚度、边长和纸蜂窝的拉伸率等结构因素对压缩密实化应变均有一定的影响: 纸蜂窝压缩密实化应变随胞壁的厚度 δ 的增大而减小; 随蜂窝胞元边长 l 的增大而增大; 随蜂窝胞壁厚跨比 δ/l 的增大而减小; 随其拉伸率 r 的增大, 先增大后减小, 在拉伸率为 1 时, 其压缩密实化应变达最大值; 纸蜂窝结构因素对其压缩密实化应变的影响与文中的理论公式是相符的, 纸蜂窝的密实化应变与其相对密度近似呈反比例关系, 当纸蜂窝的瞬时相对密度为 0.39 左右时, 纸蜂窝压缩趋于密实化。将该评估方程用于五层瓦楞纸板的压缩密实化过程评估表明它也可用于其他结构形式纸蜂窝材料的压缩密实化应变评估, 具有一定的普适性。

关键词: 纸蜂窝 压缩 吸能 密实化应变 评估

中图分类号 TB485.1 TB332

Evaluation of Compressive Densification Strain of Paper Honeycombs

WANG Dongmei¹ WANG Zhiwei²

(1. School of Media and Communication, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055;

2. Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai 519070)

Abstract: The significance of the compressive densification strain to the evaluation of energy absorption properties is analyzed. The evaluation equation of compressive densification strain of paper honeycombs is modeled by introducing the instantaneous and relative density of paper honeycombs. The results of many experiments of paper honeycombs with different structure factors show how geometry aspects of hexagonal paper honeycombs, e.g. the thickness and length of honeycomb cell-wall and the drawing ratio of hexagonal honeycomb, affect the compressive densification strain of the paper honeycombs. With the increase of cell-wall thickness, the densification will reduce; with the increase of cell-wall length, the densification will increase; with the increase of thickness-length ratio of cell-walls, the densification will reduce; with the increase of drawing ratios, the densification will reduce; when the drawing ratio is 1, the compression densification is up to the maximum. The experiment results agree with the evaluation equation, and when the instantaneous and relative density is almost 0.39, the densification appears. The evaluation equation applied to the five-layer corrugated paperboard shows it also can be used for other structure honeycomb materials. The equation is universal.

Key words: Paper honeycombs Compression Energy absorption Densification strain Evaluation

0 前言

纸蜂窝以其质轻、环保、价廉、承载性能好、

吸能且隔音而广泛用于包装、缓冲衬垫、家具和建材等领域。纸蜂窝的形式多样, 其结构有正六边形、带加强带的六边形、矩形、棱形、瓦楞形、正方形、疏排圆形、密排圆形和三角形等^[1]。

纸蜂窝之所以广泛用于产品缓冲设计中是因为纸蜂窝具有优良的缓冲吸能特性, 了解纸蜂窝到底

* 北京市重点实验室开放课题基金(KF060402)和国家自然科学基金(50775100)资助项目。20080513 收到初稿, 20081205 收到修改稿

能吸收多少能量是缓冲设计的关键。纸蜂窝的吸能特性可以用应力应变曲线(图 1)表征^[2], 单位体积变形能大小可以用式(1)表示

$$e = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

式中 ε ——纸蜂窝压缩应变变量

σ ——纸蜂窝压缩应变为 ε 时的应力

e ——应变量为 ε 时纸蜂窝吸收的能量

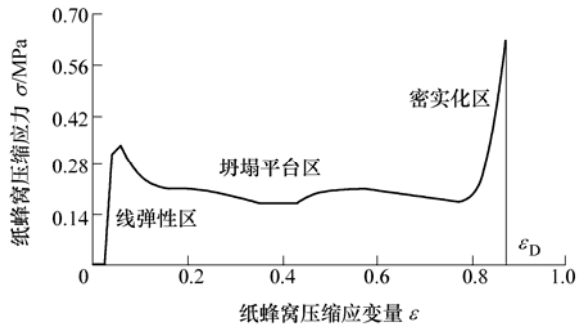


图 1 纸蜂窝压缩应力应变曲线

ε_D ——临界密实化应变

纸蜂窝受压吸能量主要与纸蜂窝的承载性能和承压变形情况有关。纸蜂窝承载性能的理论研究与试验研究较多, 如王冬梅等^[3]基于 Gibson 蜂窝力学性能的研究和纸蜂窝试验得出了纸蜂窝临界压缩应力和平台应力的评估方程; 卢立新等^[4]基于挠度理论研究了纸蜂窝压缩临界载荷的计算方法; YASUI^[5]研究了多层蜂窝材料的动态压损问题; GIBSON 等^[6]系统研究了蜂窝材料的面内面外压缩力学性能。从可以查到的文献来看, 很少有纸蜂窝承压变形极限方面的研究。

从纸蜂窝压缩试验得知, 纸蜂窝的压缩曲线呈现出四区: 线弹性区、弹塑性区、坍塌平台区和密实化区^[7-9], 纸蜂窝的缓冲吸能特性主要体现在线弹性区和坍塌区, 一旦纸蜂窝受压进入密实化区, 其应力应变曲线陡然上升, 在达到临界密实化应变 ε_D 时(注: 临界密实化应变是一个相对概念, 目前尚无其准确定义。根据纸蜂窝压缩应力应变曲线的特性, 在纸蜂窝压缩进入密实化区前, 存在着一个压缩应力峰值。为了研究方便, 定义临界密实化应变 ε_D 为纸蜂窝压缩过程中, 压缩应力为该峰应力 2 倍时所发生的应变, 如图 1 所示), 斜率趋向于蜂窝原纸本身的弹性模量 E_s (由于蜂窝原纸本身的弹性模量比纸蜂窝的弹性模量大得多, 以至于纸蜂窝的压缩应力应变曲线看起来是竖线了)。此时, 该纸蜂窝基本上不再具有缓冲吸能性能, 因此了解纸蜂窝压缩过程中进入密实化区的临界密实化应变对计算纸蜂窝的吸能量至关重要。人们可能认为压缩密实化应变是纸蜂窝完全压实, 也就是说, 纸蜂窝胞壁间没有

任何空隙时的应变, 因此其压缩密实化应变可简单地表示为 $1-\rho^*/\rho_s$ 。事实上, GIBSON 等^[6]研究得出泡沫塑料的压缩密实化应变并非 $1-\rho^*/\rho_s$, 而是 $1-1.4\rho^*/\rho_s$ 。从目前可查到的资料来看, 尚未见纸蜂窝压缩密实化应变评估方法的研究。为此, 本文采取理论和试验相结合的办法, 以六角形纸蜂窝为例, 找出了与纸蜂窝密实化有关的结构因素, 并建立了纸蜂窝压缩密实化应变的评估方程, 为纸蜂窝吸能特性的研究提供了参考依据。

1 纸蜂窝压缩密实化应变评估方程

在纸蜂窝压缩过程中, 根据质量守恒定理, 不难推出纸蜂窝压缩过程中的瞬时相对密度为

$$\frac{\rho(\varepsilon)}{\rho_s} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \frac{1}{1-\varepsilon} \quad (2)$$

式中 $\rho(\varepsilon)/\rho_s$ 表示纸蜂窝压缩应变为 ε 时的瞬时相对密度。 ρ^*/ρ 表示纸蜂窝未压缩前的初始相对密度, 对于六角形纸蜂窝, 它可以用其结构参数表示为^[6]

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\delta}{l} \frac{1 + \frac{h}{l}}{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \cos\theta} \quad (3)$$

纸蜂窝的结构如图 2。通常用的纸蜂窝的六角形为等边的, 即 $h=l$, 因此式(3)可以表示为

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\delta}{l} \frac{2}{(1 + \sin\theta) \cos\theta} \quad (4)$$

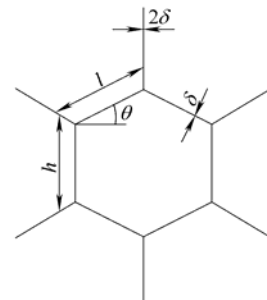


图 2 纸蜂窝的结构示意图

根据式(2)密实化应变可以表示为

$$\varepsilon_D = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \frac{1}{\rho(\varepsilon_D)} \quad (5)$$

2 纸蜂窝静态压缩试验

2.1 试样制备

试样由专业从事纸蜂窝生产的公司制作, 纸蜂

窝是靠数层蜂窝原纸按一定的规律粘贴拉伸而成(由于纸蜂窝的回弹性,使纸蜂窝试样制备比较困难,为了定型,纸蜂窝在按一定规律粘贴后,还要经过加温、蒸气固化,使其形状固定),蜂窝原纸的厚度 δ 分别为 0.20、0.22、0.25、0.29 mm。纸蜂窝按孔径大小分为 A、B、C、D 孔,所对应的纸蜂窝结构胞元的边长 l 分别为 5.8、8.7、12.1、14.4 mm,纸蜂窝的高度 h 分别为 10、20、30、40、50 mm。按照 GB/T2828-2003 进行取样。

2.2 试验方法

试验设备:恒温恒湿箱;CMT 3 微机控制电子万能试验机。

试验参照的标准:GB8168-87 包装用缓冲材料静态压缩试验方法^[10];GB1453-2005 夹层结构或芯子平压性能试验方法^[11];GB/T4857.2-2005 包装运输包装件基本试验第二部分:温湿度调节处理^[12]。

试验条件:所有的纸蜂窝测试样品制作作为 200 mm 正方形,其高度分别为 10、20、30、40、50 mm,压缩试验在标准状态下完成,样品被放在试验机的上下压块之间,测试环境的温度为(27±2) °C,相对湿度为 90%±2%,压缩位移变化率为(12±2) mm/min。

3 结果及分析

试验样品的结构特征:纸蜂窝的厚度 δ' 、蜂窝胞壁的厚度 δ 、蜂窝胞元的边长 l 、拉伸角 θ 、拉伸率 r ,相对密度 ρ^*/ρ_s 以及压缩密实化应变 ϵ_D 列于下表。根据拉伸率定义,拉伸率与拉伸角之间的关系为

$$r = \frac{\cos\theta}{\cos\frac{\pi}{6}} = \frac{2\sqrt{3}}{3}\cos\theta \tag{6}$$

表 试样结构特征及试验结果

试样	纸蜂窝厚度 δ /mm	蜂窝胞壁厚度 δ /mm	蜂窝胞壁边长 l /mm	拉伸角 θ	拉伸率 r	相对密度 ρ^*/ρ_s	密实化临界应变 ϵ_D
150D-20	20	0.25	14.4	$\pi/6$	1.0	0.026	0.91
150D-30	30	0.25	14.4	$\pi/6$	1.0	0.026	0.90
150D-40	40	0.25	14.4	$\pi/6$	1.0	0.026	0.91
150D-50	50	0.25	14.4	$\pi/6$	1.0	0.026	0.90
112B-30	30	0.20	8.7	$\pi/6$	1.0	0.035	0.93
127B-30	30	0.22	8.7	$\pi/6$	1.0	0.039	0.92
150B-30	30	0.25	8.7	$\pi/6$	1.0	0.044	0.86
180B-30	30	0.29	8.7	$\pi/6$	1.0	0.051	0.84
112D-30	30	0.20	14.4	$\pi/6$	1.0	0.021	0.93
127D-30	30	0.22	14.4	$\pi/6$	1.0	0.024	0.92
150D-30	30	0.25	14.4	$\pi/6$	1.0	0.027	0.88
180D-30	30	0.29	14.4	$\pi/6$	1.0	0.031	0.85
150A-40	40	0.25	5.8	$\pi/6$	1.0	0.066	0.83
150B-40	40	0.25	8.7	$\pi/6$	1.0	0.044	0.88
150C-40	40	0.25	12.1	$\pi/6$	1.0	0.032	0.91
127B-30-0.3	30	0.22	8.7	0.42 π	1.0	0.100	0.81
127B-30-0.5	30	0.22	8.7	0.36 π	1.0	0.062	0.83
127B-30-0.8	30	0.22	8.7	0.26 π	1.0	0.043	0.84
127B-30-1.1	30	0.22	8.7	0.1 π	1.0	0.041	0.92

纸蜂窝的压缩密实化应变受蜂窝胞壁的厚度 δ 、蜂窝胞元的边长 l 、蜂窝胞壁厚跨比 δ/l , 拉伸率 r 等因素影响分析如下(图 3~6)。

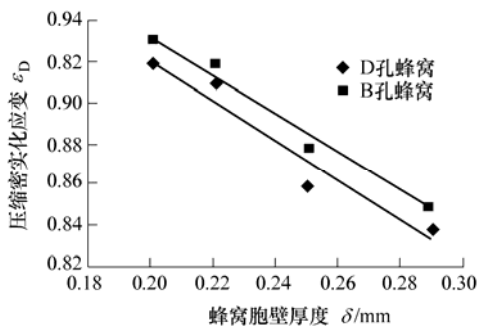


图 3 蜂窝胞壁厚度对纸蜂窝压缩密实化应变的影响

(1) 蜂窝胞壁的厚度 δ 、蜂窝胞元的边长 l 对纸蜂窝压缩密实化应变影响很大,纸蜂窝压缩密实化应变随胞壁厚度 δ 的增大而减小,随蜂窝胞元边长 l 的增大而增大,随蜂窝胞壁厚跨比 δ/l 的增大而减小,这是因为随着蜂窝胞壁厚跨比 δ/l 的增大,纸蜂窝的相对密度增大,单位面积内蜂窝胞壁的有效承载面积增大,使得纸蜂窝压缩密实化应变减小。

(2) 纸蜂窝压缩密实化应变随其拉伸率 r 的增大,先增大后减小,在拉伸率为 1 时,其压缩密实化应变达最大值。也就是说,纸蜂窝在拉伸率为 1 时,可压缩的应变范围最大。因此,缓冲用纸蜂窝的拉伸率通常为 1。

(3) 纸蜂窝结构因素对其压缩密实化应变的影

响与理论公式(5)是相符的,纸蜂窝的密实化应变与其相对密度近似呈反比例关系。

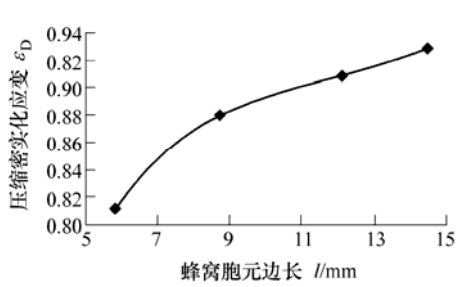


图 4 蜂窝胞元边长对纸蜂窝压缩密实化应变的影响

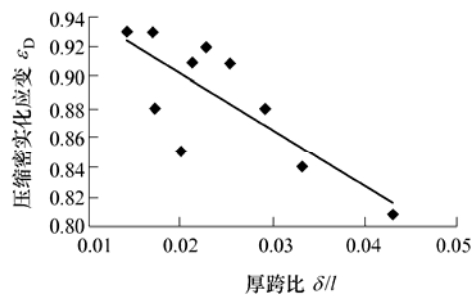


图 5 蜂窝胞壁厚跨比对纸蜂窝压缩密实化应变的影响

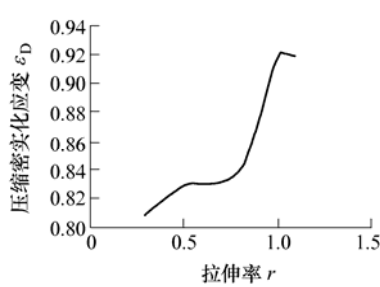


图 6 纸蜂窝拉伸率对其压缩密实化应变的影响

综合纸蜂窝的多种结构因素,考虑纸蜂窝相对密度对其压缩密实化应变的影响(图 7)。

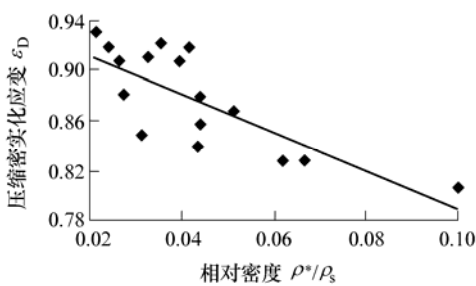


图 7 纸蜂窝相对密度对其压缩密实化应变的影响

随纸蜂窝相对密度的增大,压缩密实化应变减小。纸蜂窝的压缩破坏主要是由于蜂窝胞壁压缩过程中,在排开蜂窝内气体的同时,形成塑性较使蜂窝胞壁互相折叠挤压在一起,纸材料自身也受到压缩。人们也许预计纸蜂窝的压缩极限应变(密实化应变 ϵ_D)可能会简单地等于孔率 $(1-\rho^*/\rho_s)$,因为这是所有孔隙空间全被挤掉时的应变。但事实上,纸蜂窝

压缩过程中,其内部的空气不可能完全排出,加上纸板纤维本身的弹性作用,使纸蜂窝的压缩应变比其孔率 $(1-\rho^*/\rho_s)$ 更小时,纸材料已经挤压在一起,其压缩变形已经达到密实化状态。

根据纸蜂窝的压缩试验,得到纸蜂窝压缩达到密实化程度时的瞬时相对密度和密实化应变的关系曲线,如图 8 所示。

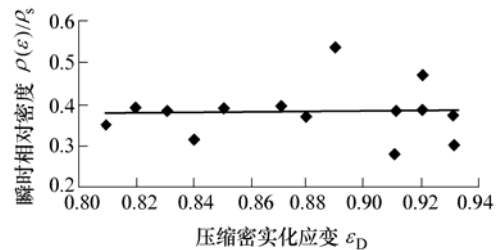


图 8 纸蜂窝压缩密实化时的相对密度

根据图 8 中的数据点,得到图中所示的趋势线,从趋势线可以看出,纸蜂窝在压缩达到密实化应变时的瞬时相对密度为 0.39 左右,根据式(5)可知

$$\epsilon_D = 1 - \frac{1}{0.39} \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (7)$$

特别对于正六角形纸蜂窝,则有

$$\epsilon_D = 1 - 3.95 \frac{\delta}{l} \quad (8)$$

4 讨论

式(7)是在理论分析纸蜂窝压缩瞬时相对密度的基础上,以六角形纸蜂窝为例用试验进行了验证总结而来。它不但适合于六角形纸蜂窝,也适合于其他结构形式的蜂窝材料压缩密实化应变评估。以 BC 瓦楞状纸蜂窝为例(BC 瓦楞形纸蜂窝是由 B 型瓦楞和 C 型瓦楞作为夹芯加工而成),BC 瓦楞形纸蜂窝的相对密度为 0.106,用式(7)评估 BC 瓦楞形纸蜂窝的压缩密实化应变,得 $\epsilon_D=0.73$,从 BC 瓦楞形纸蜂窝的压缩应力应变试验曲线(图 9)可以看出,它的密实化应变为 0.76,其误差为 4.1%,相对较小。因此,无需大量的试验,通过式(7)也可以评估出瓦楞状纸蜂窝结构的压缩密实化应变。

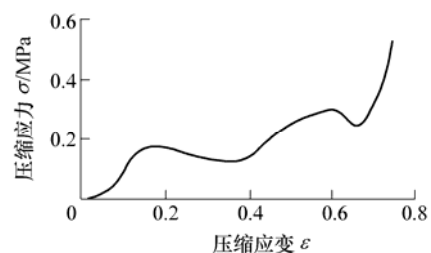


图 9 BC 瓦楞形纸蜂窝压缩应力应变曲线

5 结论

(1) 纸蜂窝的压缩密实化应变是评估纸蜂窝缓冲吸能特性的一个重要参数, 其大小主要由纸蜂窝的胞壁厚度 δ 、蜂窝胞元边长 l 、拉伸率 r 、蜂窝胞壁厚跨比 δ/l 、纸蜂窝的相对密度 ρ^*/ρ_s 决定, 纸蜂窝的压缩密实化应变与其相对密度近似呈反比例关系。

(2) 纸蜂窝压缩瞬时相对密度为 0.39 左右时, 趋于密实化状态。

(3) 用相对密度评估纸蜂窝的压缩密实化应变所得的评估方程不但适合于六角形纸蜂窝结构, 也适合于其他结构形式的纸蜂窝材料, 具有一定的普适性。

参 考 文 献

- [1] 王冬梅. 纸蜂窝芯结构的比较[J]. 包装世界, 2006, 106(4): 38-40.
WANG Dongmei. Structure comparison of paper honeycomb cores[J]. Packaging World, 2006, 106(4): 38-40.
- [2] MILTZ J, GRUENBAUM G. Evaluation of cushion properties of plastic foams compressive measurements[J]. Polymer. Eng. Sci., 1981, 21 (15): 1 010-1 014.
- [3] WANG Dongmei, WANG Zhiwei. Out-of-plane compressive properties of hexagonal paper honeycombs [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20 (2): 115-119.
- [4] LU Lixin, SUN Yaping, WANG Zhiwei. Critical buckling load of paper honeycomb under out-of-plane pressure [J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(3): 141-150.
- [5] YASUI Y. Dynamic axial crushing of multi-layer honeycomb panels and impact tensile behavior of the component members [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24 (6-7): 659-671.
- [6] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: Structure and properties [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [7] 王冬梅. 蜂窝纸板压缩破坏机理研究[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 37-39.
WANG Dongmei. Compression breakage properties research on the honeycomb paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27 (1): 37-39.
- [8] ZHANG J, ASHBY M F. The out-of-plane properties of honeycombs[J]. Int. J. Mech. Sci., 1992, 34(6): 475-489.
- [9] SHAFIZADEH J E, SEFERIS J C. Scaling of honeycomb compressive yield stresses[J]. Composites: Part A, Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(7): 681-688.
- [10] 电子工业部标准化研究所, 上海市仪表电讯工业局. GB8168-87 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
China Electronic Standardization Institute, Industry Bureau of Instrument and Telecommunication (Shanghai). GB8168-87 testing method of static compression for package cushioning materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987.
- [11] 国家建筑材料工业局上海玻璃钢研究所, 航空工业部 621 研究所. GB 1453-2005 非金属夹层结构或芯子平压性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Shanghai FRP Research Institute, Architecture and Material Administration, 621 Institute, Ministry of Aviation Industry of PRC. GB 1453-2005 test method for flat wise compression properties of non-metal sandwich constructions or cores[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [12] 机械电子工业部电子标准化研究所. GB/T4857.2-2005 包装运输包装件基本试验第 2 部分: 温湿度调节处理 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Standardization Institute, Ministry of Mechanical Electronics. GB/T4857.2-2005 packaging-transport packages experiment conditioning, Part 2: Temperature and humidity conditioning[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.

作者简介: 王冬梅, 女, 1976 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为多孔材料的力学性能、环保型缓冲材料、运输包装等, 发表论文 40 余篇。

E-mail: sxxawdm@sina.com

王志伟(通信作者), 男, 1963 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械、材料的力学性能。主持完成国家自然科学基金项目 2 项, 主持完成教育部教研项目 1 项, 主持完成省部级纵向科研项目 10 余项, 发表论文 70 余篇。

E-mail: wangzw@jnu.edu.cn