

第 17 届全国包装工程学术会议专栏

## 蜂窝芯横向面内压缩平台应力研究

郭睿<sup>1</sup>, 王军<sup>1,2</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省先进食品装备制造技术重点实验室, 无锡 214122)

**摘要:** **目的** 考虑到蜂窝芯斜向孔壁发生折叠的能量耗散机制, 建立基于孔壁折叠的平台应力表达式。**方法** 首先从理论上分析蜂窝芯变形单元水平固定塑性铰的能量耗散情况, 然后对不同厚跨比条件下的蜂窝纸芯进行横向面内压缩试验, 得到平台应力, 最后将试验结果与 Gibson & Ashby 模型以及文中模型进行对比。**结果** 蜂窝胞壁厚度与蜂窝胞元边长之比对平台应力有一定的影响, 蜂窝芯面内压缩平台应力与胞壁厚度和蜂窝胞元边长之比的平方呈正比关系。由对比结果可知, 文中模型理论值与平台应力试验值更加吻合。**结论** 揭示了蜂窝芯横向面内压缩的能量耗散机制, 平台应力表达式可用于多种材料的双壁厚蜂窝面内压缩力学性能的评估, 具有一定的普适性。

**关键词:** 纸蜂窝芯; 横向面内压缩; 平台应力

**中图分类号:** TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0001-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.001

### Plateau Stress of Crosswise In-plane Compression of Honeycomb Core

GUO Rui<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1,2</sup>, LU Li-xin<sup>1,2</sup>

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** The work aims to set up the plateau stress expression based on folding of hole wall by considering the energy dissipation mechanism for folding of slant hole wall of honeycomb core. First, the energy dissipation of horizontal fixing plastic hinge of deformed units of honeycomb core was analyzed theoretically; then, crosswise in-plane compression tests were carried out on honeycomb cores under different thickness-span ratios to acquire the plateau stress; finally, the test results were compared with Gibson & Ashby model and the proposed model. The ratio of thickness of honeycomb cell wall to side length of honeycomb cell element had certain influence on the plateau stress. The honeycomb core in-plane compression plateau stress was proportional to the square of the ratio of cell wall thickness to side length of honeycomb cell element. Based on the comparison results, the theoretical value of the proposed model and the test value of plateau stress were more identical. It reveals the energy dissipation mechanism of honeycomb core crosswise in-plane compression. The plateau stress expression can be applied in the evaluation of mechanical property of double-wall thick honeycomb in-plane compression of various materials, and thus has certain universality.

**KEY WORDS:** honeycomb core; crosswise in-plane compression; plateau stress

正六边形蜂窝材料的结构形态决定了其各方面优异的特性, 如纸蜂窝受压均匀, 抗剪强度与抗压强度高, 生产成本低且可回收再利用, 广泛应用于包装、家具以及建筑等领域<sup>[1]</sup>。蜂窝材料面内压缩应力-应变

曲线分为 3 个阶段: 线弹性变形阶段, 随着应变的增加应力不断增大, 直到出现一个峰值应力; 蜂窝材料屈服后产生塑性变形, 出现了一段很长的平台区<sup>[2]</sup>, 这一阶段随着应变的增加应力只在一定范围内波动,

收稿日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51205167); 中央高校基本科研业务费重点项目(JUSRP51403A)

作者简介: 郭睿(1990—), 男, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通信作者: 王军(1982—), 男, 江南大学教授, 主要研究方向为包装动力学。

变化较小,文中所要研究的平台应力就是该阶段应力的平均值;随着压缩量的不断增加,蜂窝芯材逐渐被压实,此时应力快速上升,标志着压缩进入密实化阶段。曲线与  $x$  轴所围成的面积就是蜂窝芯材单位体积所吸收的能量<sup>[3]</sup>,可知能量吸收主要集中在平台应力区,因此决定蜂窝面内压缩能量吸收能力的主要因素就是平台应力。

对于蜂窝结构性能的研究,国内外学者多集中在铝蜂窝以及复合蜂窝材料上<sup>[4-9]</sup>,对纸质蜂窝结构的研究较少<sup>[10]</sup>,且集中于纸蜂窝结构的平压性能<sup>[11]</sup>。Gibson 和 Ashby<sup>[12]</sup>研究了均匀壁厚蜂窝结构的基本力学性能;Zhu 等<sup>[13]</sup>研究了双壁厚蜂窝材料在共面压缩下的应力松弛问题;Papka 和 Kyriakides<sup>[14]</sup>研究了铝蜂窝材料单向和双向共面压缩时的力学性能;王军<sup>[15]</sup>研究了蜂窝纸板承载、缓冲机理及其性能表征,提出了蜂窝纸板面内承载能力是由纸板厚度、芯层和面层这3个因素共同决定的,且对面内平台应力影响较大的是纸板厚度与面层的性能。

蜂窝芯是纸蜂窝的重要组成部分,在一定程度上决定了纸蜂窝的力学性能。正六边形蜂窝孔结构的力学性能优异,孔与孔之间的相互支撑使之可以承受较大的外力。在强度不变的条件下,蜂窝材料所用的原料较少,这使得蜂窝板成为一种质量轻但承重强的包装材料,这里以蜂窝芯为研究对象。Gibson 和 Ashby 对蜂窝芯面内压缩的力学分析基于高聚物材质蜂窝,由于结构变形方式类似,其他材质(金属、纸)蜂窝的面内力学分析也多采用 Gibson 和 Ashby 提出的蜂窝芯面内压缩平台应力公式。考虑到纸蜂窝的孔壁容易发生折叠现象,现采用塑性极限分析法对已有的蜂窝芯横向面内压缩平台应力公式进行修正,建立考虑斜向孔壁发生塑性变形产生折叠的平台应力理论模型并辅以试验加以验证,修正后的平台应力模型可为纸蜂窝面内方向能量吸收的预测以及蜂窝结构优化设计提供理论依据<sup>[16]</sup>。

### 1 蜂窝芯面内压缩平台应力模型

常见的六边形蜂窝芯结构见图1,每个蜂窝孔由4条斜孔壁以及2条竖孔壁组成,斜孔壁长度为  $l$ 、厚度为  $d$ ;竖孔壁长度为  $h$ 、厚度为  $2d$ ,蜂窝孔的深度为  $b$ ,这样的蜂窝常称为双壁厚蜂窝<sup>[17]</sup>。蜂窝芯共面性能也可称为面内压缩性能,是指当作用于蜂窝芯的外力平行于  $x_1$  或  $x_2$  方向时,蜂窝芯材所表现出的力学性能。其中平行于蜂窝芯  $x_1$  方向的压缩为横向面内压缩。

Gibson 和 Ashby<sup>[12]</sup>提出的均匀壁厚蜂窝共面承载性能理论将构成蜂窝结构的原材料视为弹塑性固体,并将斜向孔壁视为梁结构进行受力分析,当斜向

孔壁梁结构所受到的弯矩大于等于材料塑性矩时,蜂窝结构发生塑性坍塌,这使得压缩和拉伸时的应力-应变曲线在塑性坍塌应力处出现平台。蜂窝芯受压变形见图2。

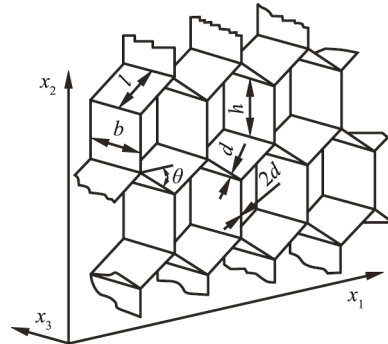


图1 双壁六边形蜂窝结构  
Fig.1 Double-wall hexagonal honeycomb structure

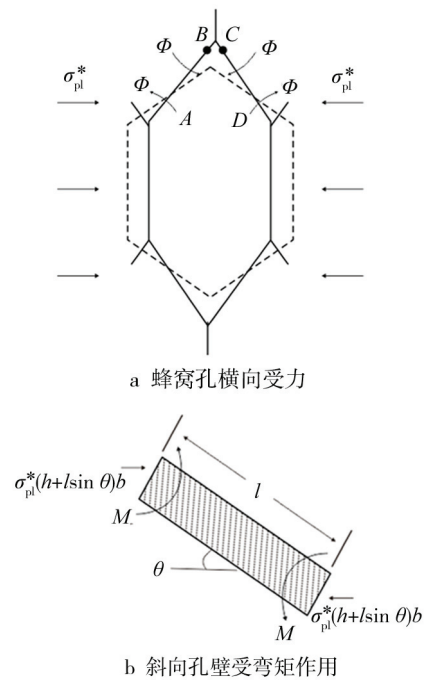


图2 蜂窝芯横向塑性坍塌  
Fig.2 The honeycomb core's lateral plastic collapses

图2中,假设  $\sigma_{pl}^*$  为蜂窝芯所受外界应力,  $b(h+l\sin\theta)$  为蜂窝芯受力截面积。根据能量守恒定律得到蜂窝芯横向面内压缩平台应力表达式为:

$$\sigma_{pl}^* = \frac{1}{2(h/l + \sin\theta)\sin\theta} \left(\frac{d}{l}\right)^2 \sigma_{ys} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{ys}$  为蜂窝基材屈服强度;  $\frac{d}{l}$  为蜂窝结构厚跨比;  $\theta$  为斜向孔壁与  $x_3-x_1$  面的夹角(正六边形孔型时  $\theta=30^\circ$ , 可视为常数)。

由式(1)可知,蜂窝面内压缩平台应力与基材屈服强度以及结构厚跨比的二次方成正比。正六边形

蜂窝材料满足  $h/l=1$ ,  $\theta=30^\circ$ , 此时蜂窝横向面内压缩平台应力表达式为:

$$\sigma_{pl}^* = \frac{2}{3} \left( \frac{d}{l} \right)^2 \sigma_{ys} \quad (2)$$

通过纸蜂窝芯横向面内压缩试验发现, 蜂窝芯在横向载荷作用下, 斜向孔壁发生塑性变形产生折叠, 见图 3。文中在考虑斜向孔壁发生塑性变形的条件下, 对蜂窝变形单元进行受力分析以及能量耗散计算, 对已有的蜂窝芯横向面内压缩平台应力表达式进行修正, 修正后的公式可作为研究蜂窝面内力学性能的参考依据。



图 3 斜向孔壁折叠

Fig.3 Folding of the slant hole wall

### 1.1 蜂窝芯变形单元

正六边形蜂窝在结构上具有周期性与对称性<sup>[18]</sup>, 现选择倒 Y 型蜂窝胞壁 (见图 4) 作为蜂窝芯变形单元, 对其进行受力分析与研究。该变形单元由 2 条厚度为  $d$ 、长度为  $l$  的斜向孔壁以及一条厚度为  $2d$ 、长度为  $h$  的竖向孔壁组成, 斜向孔壁与水平方向夹角设为  $\theta$ , 单元在  $x_3$  方向上的长度为  $b$ 。

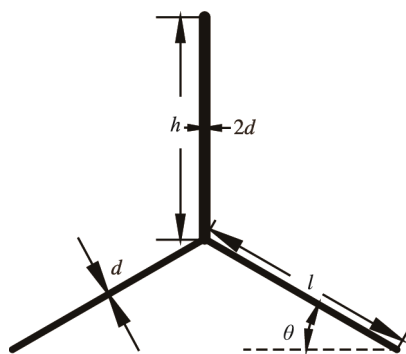


图 4 六边形蜂窝的变形单元

Fig.4 Deformed units of hexagonal honeycomb

### 1.2 变形单元横向面内压缩平台应力推导

对褶皱变形单元进行受力分析, 由能量守恒原理可知, 外力做功等于变形单元上塑性铰转动所需要的能量。通过实验观察可知, 纸蜂窝在受横向面内压缩时, 仅单层斜向孔壁发生塑性变形。假设变形单元受载应力为  $\sigma_1$ , 变形单元在受压过程中斜向孔壁出现折

叠, 在每条斜孔壁上形成 3 处长度为  $b$  的水平固定塑性铰。1~6 处塑性铰见图 5, 其对应转动角度分别为  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 。

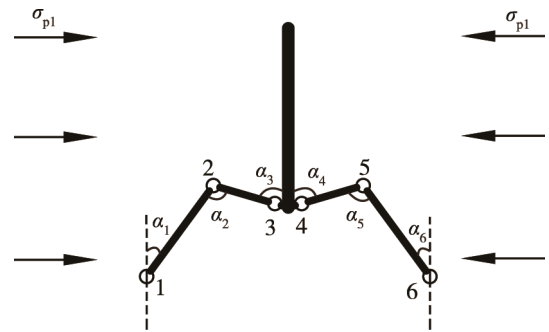


图 5 变形单元横向上加载

Fig.5 The deformed unit loaded in the horizontal direction

蜂窝芯在受到横向面内压缩时, 孔壁主要通过水平固定塑性铰的形式来耗散外力所做的功, 水平固定塑性铰耗散的能量以  $E$  表示, 其表达式为:

$$E = M_0 |\dot{\theta}| L \quad (3)$$

式中:  $L$  为水平塑性铰长度;  $\dot{\theta}$  为塑性铰转动速率;  $M_0$  为单层蜂窝胞壁单位长度塑性极限弯矩。

$$M_0 = \frac{1}{4} \sigma_{ys} d^2 \quad (4)$$

由单元结构对称性可知,  $\alpha_1 = \alpha_6, \dot{\alpha}_1 = \dot{\alpha}_6, \alpha_2 = \alpha_5, \dot{\alpha}_2 = \dot{\alpha}_5, \alpha_3 = \alpha_4, \dot{\alpha}_3 = \dot{\alpha}_4$ , 水平塑性铰长度设为  $b$ , 将水平固定塑性铰相对转动角度以及塑性铰长度代入式 (3) 得到斜向孔壁水平塑性铰的耗散能量:

$$E = M_0 (|\dot{\alpha}_1| + |\dot{\alpha}_2| + |\dot{\alpha}_3| + |\dot{\alpha}_4| + |\dot{\alpha}_5| + |\dot{\alpha}_6|) b \quad (5)$$

化简后可得:

$$E = 2M_0 b (|\dot{\alpha}_1| + |\dot{\alpha}_2| + |\dot{\alpha}_3|) \quad (6)$$

分别对  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  由  $(\pi/2 - \theta) \sim 0, 0 \sim \pi, (\pi/2 + \theta) \sim 0$  进行积分, 可以得到斜向孔壁水平塑性铰耗散能量:

$$E = 4\pi M_0 b \quad (7)$$

变形单元受力方向截面积为  $b(h + l \sin \theta)$ , 压缩全程作用力位移为  $2l \cos \theta$ , 外力做功:

$$P_1 = 2\sigma_{pl} b (h + l \sin \theta) l \cos \theta \quad (8)$$

由能量守恒原理得到:

$$4\pi M_0 b = 2\sigma_{pl} b (h + l \sin \theta) l \cos \theta \quad (9)$$

将式 (4) 代入并化解得蜂窝芯横向面内压缩塑性坍塌平台应力:

$$\sigma_{pl} = \frac{\pi}{2 \cos \theta (h/l + \sin \theta)} \left( \frac{d}{l} \right)^2 \sigma_{ys} \quad (10)$$

这里的主要研究对象为利用扩展法成型的标准正六边形蜂窝结构材料, 此时对应的  $\theta=30^\circ, h/l=1$ , 式 (10) 可化简为:

$$\sigma_{pl} = 1.209 \left( \frac{d}{l} \right)^2 \sigma_{ys} \quad (11)$$

式(3—11)为两侧孔壁均发生折叠时的平台应力表达式分析过程,若变形单元左右两侧折叠不对称,见图6,假设左侧孔壁未发生折叠而是被压展开,右侧孔壁发生折叠,下面将分析这种情况下的平台应力。

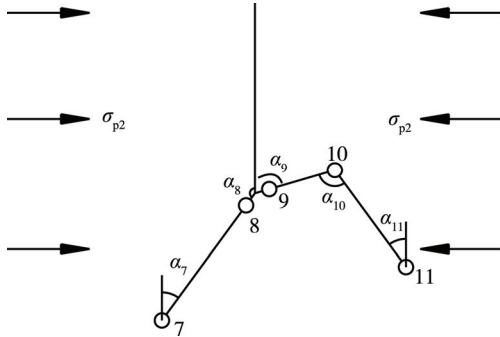


图6 变形单元一侧孔壁折叠

Fig.6 Folding of hole wall on one side of the deformed units

左侧孔壁7和8两塑性铰相对转动角度为 $\alpha_7$ 和 $\alpha_8$ ,对应塑性铰转动耗散能量 $E_f$ 为:

$$E_f = M_0 (|\dot{\alpha}_7| + |\dot{\alpha}_8|) b \quad (12)$$

根据塑性铰相对转动角度,利用式(12)分别对 $\alpha_7$ 和 $\alpha_8$ 由 $(\pi/2 - \theta) \sim 0$ ,  $(\pi/2 + \theta) \sim \pi$ 积分,得到:

$$E_f = M_0 (\pi - 2\theta) b \quad (13)$$

同理分析右侧孔壁塑性铰相对转动耗散能量,右侧孔壁9,10,11这3处塑性铰相对转动角度为 $\alpha_9$ ,  $\alpha_{10}$ ,  $\alpha_{11}$ ,对应塑性铰转动耗散能量 $E_r$ 为:

$$E_r = M_0 (|\dot{\alpha}_9| + |\dot{\alpha}_{10}| + |\dot{\alpha}_{11}|) b \quad (14)$$

分别对 $\alpha_9$ ,  $\alpha_{10}$ ,  $\alpha_{11}$ 由 $(\pi/2 + \theta) \sim 0$ ,  $0 \sim \pi$ ,  $(\pi/2 - \theta) \sim 0$ 积分得:

$$E_r = 2\pi M_0 b \quad (15)$$

根据能量守恒定理,外力做功等于塑性铰耗散能量,可得:

$$E_f + E_r = P_l \quad (16)$$

联立式(8), (13), (15), (16),可得到一侧孔壁未折叠、一侧孔壁折叠情况下的蜂窝芯横向面内压缩平台应力表达式:

$$\sigma_{p2} = \frac{3\pi - 2\theta}{8 \cos \theta (h/l + \sin \theta)} \left(\frac{d}{l}\right)^2 \sigma_{ys} \quad (17)$$

在正六边形条件下,式(17)可化简为:

$$\sigma_{p2} = 0.806 \left(\frac{d}{l}\right)^2 \sigma_{ys} \quad (18)$$

## 2 试验验证

### 2.1 样品和设备

主要样品:纸蜂窝,由常熟某公司提供。蜂窝芯所选用的试样有6种大小不同的正六边形孔型,

即对应6种不同斜向孔壁长度。由于所有试样的原纸规格一致,6种蜂窝芯单层孔壁的厚度相同,所以蜂窝芯试样对应有6种不同厚跨比。所有蜂窝纸芯原纸定量均为 $140 \text{ g/m}^2$ ,纸芯厚度为12 mm,蜂窝芯试样尺寸信息见表1。主要设备:LRXPlus型万能材料试验机、恒温恒湿箱,均由无锡江南大学国家轻工业包装制品质量监督检测中心提供。

表1 试验用纸蜂窝芯试样  
Tab.1 Test paper honeycomb core sample

试样编号	孔型	孔壁边长/mm	单层孔壁厚/mm	厚跨比
1	D	14.4	0.23	0.016
2	C	12.1	0.23	0.019
3	B	8.52	0.23	0.027
4	AB	7.22	0.23	0.032
5	A	5.77	0.23	0.040
6	AA	4.62	0.23	0.050

### 2.2 试验方法

蜂窝原纸拉伸力学性能测试依据GB/T 1040.1—2006《塑料 拉伸性能的测定 第1部分:总则》<sup>[19]</sup>中的规定进行。恒温恒湿箱的使用与温湿度设置依据GB/T 4857.2—2005《包装 运输包装件基本试验 第2部分:温湿度调节处理》<sup>[20]</sup>中的规定进行。蜂窝芯准静态面内压缩依据GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》<sup>[21]</sup>中的规定进行。

### 2.3 原纸物理性能测定

这里所要测定的原纸物理性能指标主要是屈服强度。纸是一种容易弯曲且边压强度很低的材料,很难采用压缩试验的方法得到其压缩屈服强度,一般的方法是用原纸的拉伸性能代替其压缩性能<sup>[22]</sup>。原纸试样经裁切后宽度为12.7 mm、长度为152 mm<sup>[23]</sup>。为了避免裁切造成的误差,选择形状规整、尺寸标准的试样置于温度为23℃、相对湿度为50%的恒温恒湿箱中处理48 h。试样自恒温恒湿箱中取出到拉伸试验结束,时间不超过5 min,以确保原纸含水率的稳定。原纸拉伸位移速率为0.5 mm/min,靠近试样中部断裂时的数据为有效数据。

### 2.4 蜂窝芯横向面内压缩试验

将试验用蜂窝芯裁切成长度与宽度均为100 mm的尺寸,考虑到裁切造成的尺寸误差,选择形状规整、尺寸标准的蜂窝芯进行预处理,即将蜂窝芯试样静置1 d后置于温度为23℃、相对湿度为50%的恒温恒湿箱中处理48 h。在做蜂窝芯压缩试验时,将蜂窝芯置于压头正下方,使蜂窝芯受压截面中心与上压板截面中心对齐。上压头压缩速度设置为12.0 mm/min,将

试样压缩到原始高度的 85% 时停止试验, 既保证了可以得到完整的应力-应变曲线, 又保证了压头的安全。6 种不同厚跨比的蜂窝芯各取 5 个试样进行静态压缩试验, 5 个结果进行平均化处理后得到最终的结果。为了尽量降低试验环境温湿度的影响, 需要在蜂窝试样从恒温恒湿箱取出后的 5 min 内完成试验。蜂窝芯面内横向压缩试验过程见图 7。

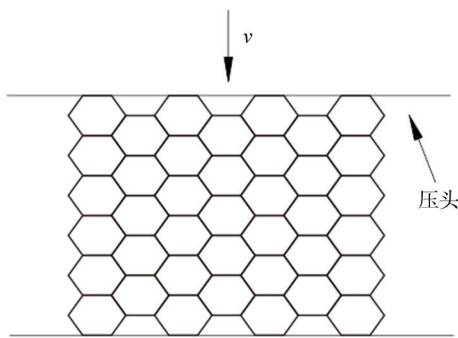


图 7 蜂窝芯面内横向压缩试验

Fig.7 Honeycomb core crosswise in-plane compression test

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 原纸拉伸试验

原纸拉伸试验可通过拉伸试验机直接得到力-位移曲线, 根据拉伸纸条长度以及纸条截面面积换算为应力-应变曲线, 见图 8。同绝大多数材料的应力-应变曲线类似, 蜂窝芯原纸拉伸应力-应变曲线分为弹性阶段、屈服阶段以及强化阶段。文中原纸拉伸屈服现象明显, 屈服强度取为屈服点的应力 (屈服值), 再对 5 个试验的拉伸结果进行平均化处理。

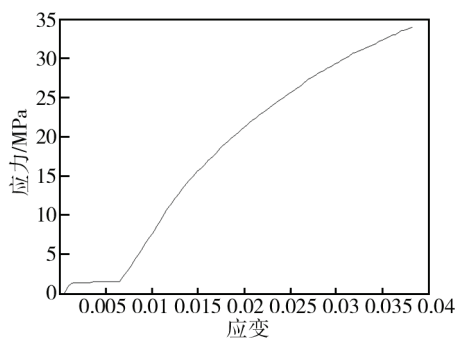


图 8 原纸拉伸试验应力应变曲线

Fig.8 Stress-strain curve of tensile test of base paper

#### 3.2 蜂窝芯横向面内压缩试验

根据上述试验数据处理的结果, 得到芯纸原纸的屈服强度  $\sigma_{ys} = 1589 \text{ kPa}$ , 试验所用蜂窝厚跨比已知, 由此可得蜂窝横向面内压缩平台应力理论值。根据蜂窝芯侧压时的截面积以及压缩位移, 将试验所得载荷-位移曲线经过计算转化为不同厚跨比条件的蜂窝芯应力-

应变曲线, 见图 9, 可知, 孔型由 D 到 AA 的厚跨比逐渐增大, 蜂窝芯应力-应变曲线上移, 平台应力也随之增大。在曲线中找到平台区以及初始应变  $\varepsilon_0$  和密实化应变  $\varepsilon_D$  后, 利用式 (19) 便可以计算得到平台应力试验值:

$$\sigma_p = \frac{1}{(\varepsilon_D - \varepsilon_0)} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (19)$$

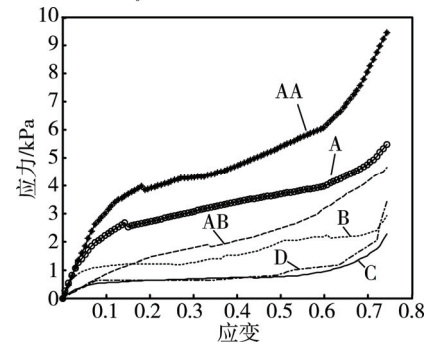


图 9 不同厚跨比纸蜂窝芯横向面内压缩应力-应变曲线

Fig.9 Crosswise in-plane compressive stress-strain curves of different thickness-span ratios of honeycomb core

将文中的两侧折叠模型理论值、一侧折叠模型理论值与 Gibson & Ashby 模型理论值以及试验值进行对比, 考虑两侧斜向孔壁均塑性变形而发生折叠的平台应力表达式较为准确, 与试验值更为吻合。4 种平台应力结果对比见图 10。

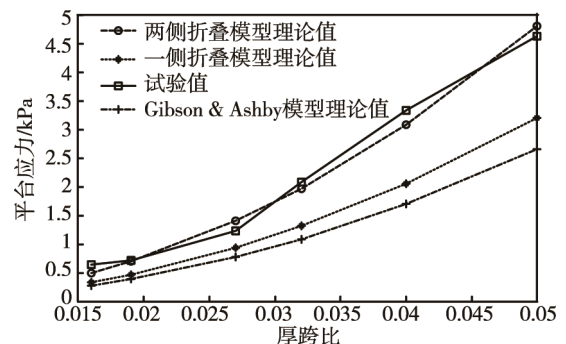


图 10 横向面内压缩平台应力结果对比

Fig.10 Comparison of plateau stress results of crosswise in-plane compression

### 4 结语

主要研究纸蜂窝横向面内压缩平台应力, 理论基础来源于 Gibson 和 Ashby 对蜂窝结构力学性能的详细研究, 选取双壁厚正六边形蜂窝特征单元作为研究对象, 简单明了地反映了蜂窝结构横向面内压缩的过程, 了解其变形机制, 从而建立力学模型对其平台应力进行估算, 并加以试验验证。

试验结果表明, 蜂窝面内压缩平台应力与其自身结构参数有关, 厚跨比以及蜂窝基材屈服强度是影响平台应力的主要因素, 蜂窝平台应力与蜂窝结构厚跨比的平方呈正比例关系。另外, 蜂窝特征单元在受到横向面内压缩过程中, 斜向单层孔壁发生弯曲, 继而

产生折叠发生塑性变形,成为吸收外界能量的主要机制;竖向双层孔壁并没有发生变形。塑性变形的过程反映到应力-应变图上则为应力平台区,即应变增大,但应力基本保持在倾斜孔壁发生塑性变形时的应力,故蜂窝芯横向面内压缩时的平台应力主要来自于倾斜孔壁上水平塑性铰的转动。文中理论公式可推广到多种材料的蜂窝横向面内压缩力学分析中,可应用于蜂窝结构优化设计,有一定的理论价值与普适性。

#### 参考文献:

- [1] 张丽,王保升,武华.基于芯纸环压强度的蜂窝纸板临界应力模型研究[J].包装工程,2012,33(7):54—57.  
ZHANG Li, WANG Bao-sheng, WU Hua. Research on Critical Stress Model of Honeycomb Paperboard Based on Ring Crush Strength[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 54—57.
- [2] 孙玉瑾.六边形金属蜂窝芯材的异面冲击性能[D].西安:西安理工大学,2009.  
SUN Yu-jin. The Out-of-plane Impact Properties of the Hexagonal Metal Honeycomb Cores[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [3] 冯俊华.正方形金属蜂窝共面力学性能的研究[D].西安:西安理工大学,2009.  
FENG Jun-hua. Analysis on In-plane Mechanical Properties of Square Metal Honeycomb[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [4] GALEHDARI S A, KADKHOYAN M, HADIDIMOUD S. Low Velocity Impact and Quasi-static In-plane Loading on a Graded Honeycomb Structure, Experimental, Analytical and Numerical Study[J]. Aerospace Science & Technology, 2015, 47: 425—433.
- [5] ALI I, YU J J. Mathematical Models for In-plane Moduli of Honeycomb Structures: A Review[J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology, 2014, 7(3): 581—592.
- [6] WANG Z, LIU J, HUI D. Mechanical Behaviors of Inclined Cell Honeycomb Structure Subjected to Compression[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 110: 307—314.
- [7] NAKAMOTO H, ADACHI T, HIGUCHI M. Approximate Analysis of Progressive Deformation in Honeycomb Structures Subjected to In-plane Loading[J]. Archive of Applied Mechanics, 2013, 83(3): 379—396.
- [8] TIWARI G, THOMAS T, KHANDELWAL R P. Influence of Reinforcement in the Honeycomb Structures under Axial Compressive Load[J]. Thin-walled Structures, 2017(6): 55—60.
- [9] UĞUR L, DUZCUKOGLU H, SAHIN O S, et al. Investigation of Impact Force on Aluminum Honeycomb Structures by Finite Element Analysis[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2017: 23.
- [10] 王志伟,姚著.蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J].机械工程学报,2012(12):49—55.  
WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012(12): 49—55.
- [11] WANG D, BAI Z. Mechanical Property of Paper Honeycomb Structure under Dynamic Compression[J]. Materials & Design, 2015, 77: 59—64.
- [12] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structures and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [13] ZHU H X, MILLS N J. The In-plane Non-linear Compression of Regular Honeycombs[J]. International Journal of Solid Structures, 2000, 37(13): 1931—1949.
- [14] PAPKA S D, KYRIAKIDES S. In-plane Compressive Response and Crushing of Honeycomb[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1994, 42(10): 1499—1532.
- [15] 王军.蜂窝纸板承载/缓冲机理及其性能表征[D].无锡:江南大学,2011.  
WANG Jun. Research on the Bearing/Cushioning Mechanism and Performance Characterization of Honeycomb Paperboards[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [16] 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(5):285—289.  
WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Evaluation of Compressive Densification Strain of Paper Honeycombs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009(5): 285—289.
- [17] 孙德强,张卫红,孙玉瑾.蜂窝铝芯的弹性模量和材料效率分析[J].力学与实践,2008(1):35—40.  
SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong, SUN Yun-jin. Elastic Moduli and Material Efficiency of Aluminum Honeycomb Cores[J]. Mechanics in Engineering, 2008(1): 35—40.
- [18] 罗昌杰,周安亮,刘荣强,等.金属蜂窝异面压缩下平均压缩应力的理论模型[J].机械工程学报,2010(18):52—59.  
LUO Chang-jie, ZHOU An-liang, LIU Rong-qiang, et al. Average Compressive Stress Constitutive Equation of Honeycomb Metal under Out-of-plane Compression[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010(18): 52—59.
- [19] GB/T 1040.1—2006, 塑料 拉伸性能的测定 第1部分:总则[S].  
GB/T 1040.1—2006, Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 1: General Principles[S].
- [20] GB/T 4857.2—2005, 包装 运输包装件基本试验 第2部分:温湿度调节处理[S].  
GB/T 4857.2—2005, Packaging-Basic Test for Transport Packages-Part 2: Temperature and Humidity Conditioning [S].
- [21] 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 Packaging Cushioning Materials[S].
- [22] 鄂玉萍.湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响[D].无锡:江南大学,2010.  
E Yu-ping. Influence of Relative Humidity and Strain Rate on the Energy Absorption Properties of Paper-based Cushioning Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [23] 马永胜.基于ANSYS的蜂窝纸板共面性能研究与应用[D].天津:天津科技大学,2013.  
MA Yong-sheng. Research and Application on In-plane Properties of Honeycomb Paperboard Based on ANSYS[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013.