

文章编号: 1000-4750(2012)08-0354-06

# 蜂窝纸板面内平台应力表征

王 军<sup>1</sup>, 卢立新<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学包装工程系, 无锡 214122; 2. 国家轻工业包装制品质量监督检测中心, 无锡 214122)

**摘 要:** 面内平台应力是评估蜂窝纸板面内承载性能的重要指标, 且蜂窝纸板性能极易受环境湿度的影响。该文试验分析蜂窝纸板厚度、芯层和面层对其面内平台应力的影响; 基于不同相对湿度条件下蜂窝原纸的纵向屈服强度, 建立了相对湿度影响的蜂窝纸板面内平台应力模型, 并与试验实测数据进行比较验证。结果表明: 纸板厚度和面纸性能对蜂窝纸板面内平台应力有较大影响, 芯层性能对其影响较小; 所建立模型能较准确地反映环境相对湿度对蜂窝结构材料面内平台应力的影响。借助该模型, 无需大量的试验, 即可估算其考虑相对湿度的面内平台应力, 为蜂窝纸板的配纸和合理选用提供理论依据。

**关键词:** 蜂窝纸板; 面内平台应力; 模型; 相对湿度; 屈服强度

中图分类号: TB485.1; TB487 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.11.0816

## CHARACTERIZATION OF IN-PLANE PLATEAU STRESS FOR HONEYCOMB PAPERBOARD

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

(1. Department of Packaging Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China ;

2. China National Light Industry Package Quality Supervising &amp; Testing Center, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In-plane plateau stress is an important index to evaluate the in-plane yield strength of honeycomb paperboards, which is sensitive to relative humidity. The effects of thicknesses, core layers, and liners on the in-plane plateau stress of honeycomb paperboard were investigated by experiments. The in-plane bearing capacity is undertaken by both liners and core layers of honeycomb paperboards. The in-plane plateau stress model of honeycomb paperboard considering the effect of relative humidity was proposed based on the longitudinal yield strength of honeycomb paper under different humidity conditions, which was compared with the experimental data. The results show that the thickness and liner materials of honeycomb paperboard have great influence on the in-plane plateau stress, on which the core layers has little influence; The model can effectively reflects the influence of relative humidity conditions on the plateau stress of honeycomb paperboards.

**Key words:** honeycomb paperboard; in-plane plateau stress; model; relative humidity; yield strength

蜂窝纸板<sup>[1]</sup>作为一种结构新颖、承载性能好、重量轻且具有良好缓冲性能的绿色包装材料受到工业界特别是包装界的广泛关注, 并已应用于包装、建筑、农业等诸多领域。

在运输过程中, 蜂窝材料作为产品的承载体, 主要通过抵抗外界冲击和振动所引起的载荷进而保护产品。目前对其面内承载性能的研究主要集中

于金属材料, Timoshenko<sup>[2]</sup>最早对弹性蜂窝体的共面临界屈曲载荷进行研究, 得到其弹性坍塌应力模型, 之后 Warren<sup>[3]</sup>通过考虑金属蜂窝共面压缩时孔壁的轴向及弯曲刚性的变化, 计算得到蜂窝材料共面的 4 个独立弹性模量; Papka<sup>[4-5]</sup>进一步研究了铝蜂窝共面单向加载过程中应变增加时蜂窝体的变形; Zhang<sup>[6]</sup>运用弹性模量理论方法研究铝蜂窝材料

收稿日期: 2010-11-09; 修改日期: 2011-04-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划课题项目(2006BAD30B02); 江南大学创新团队发展计划课题项目(2009CXTD01)

通讯作者: 卢立新(1966—), 男, 江苏宜兴人, 教授, 博士, 博导, 主要从事包装动力学与运输包装、包装材料等研究(E-mail: lulx@jiangnan.edu.cn).

作者简介: 王 军(1985—), 男, 山东泰安人, 硕士生, 从事产品运输包装研究(E-mail: wangjun-stu@163.com).

面内塑性坍塌刚度；直到 Gibson<sup>[7]</sup>对六边形金属蜂窝体的塑性坍塌行为进行了试验和理论探索，初步得到金属蜂窝体的面内平台应力理论模型；基于上述试验及理论研究，Wang<sup>[8]</sup>建立了七种规则胞形结构蜂窝材料弹性模量和屈服强度与相对密度之间的关系函数。国内刘颖<sup>[9]</sup>基于试验，采用有限元分析方法建立了四种蜂窝体结构与动态性能之间的关系；王博<sup>[10]</sup>对不同结构高聚物蜂窝体面内准静态压缩力学行为进行了实验研究；张新春<sup>[11]</sup>基于三角形和六边形蜂窝结构面内冲击性能的研究，探讨了面内冲击荷载作用下组合 Kagome 蜂窝结构的变形机制和能量吸收特性。但上述研究都是针对没有覆盖面板的金属蜂窝结构体，相应研究成果对覆盖面板的蜂窝纸板不能完全适用。

目前，国内外对蜂窝纸板承载性能的研究主要集中于面外方向，卢立新<sup>[12]</sup>运用薄板理论，构建了以粘结强度为控制的纸蜂窝平压临界载荷；王冬梅<sup>[13-15]</sup>对纸蜂窝承载性能进行了评估，得到了纸蜂窝面外压缩临界应力与纸蜂窝相对密度之间的关系；鄂玉萍<sup>[16]</sup>考虑孔壁粘结处的塑性夹角，推导了预测纸蜂窝材料面外平台应力模型，对蜂窝纸板的应用奠定了理论基础。对蜂窝纸板面内承载性能的研究，目前主要是基于试验所进行的探讨<sup>[17-18]</sup>，缺乏必要的理论研究。

蜂窝纸板因其良好的面内承载性能在产品防护包装、建筑等领域中应用越来越广泛，但目前还缺乏一种评估蜂窝纸板面内承载性能系统有效的理论方法，使得在蜂窝纸板作为面内承载件的设计与选材时主要是靠经验来完成，设计的准确性不高。本文以金属蜂窝材料面外承载理论为基础，建立蜂窝纸板面内平台应力模型，并考虑相对湿度的影响，无需大量的试验，即可估算其考虑相对湿度的面内平台应力，最终实现针对具体产品的缓冲包装设计需求，给出优化蜂窝纸板结构及选材并提高单位成本材料的包装效率。

## 1 基础理论

### 1.1 蜂窝结构体材料面内平台应力模型

Gibson<sup>[7]</sup>研究发现，对于金属和许多聚合物等弹塑性蜂窝结构体，当孔壁弯曲达到完全的塑性矩时，会发生塑性坍塌，且在塑性坍塌应力处出现平台，其平台应力模型可表示为：

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_c}{\sigma_{ys}} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2\cos^2\theta} \quad (1)$$

式中： $(\sigma_{pl}^*)_c$ 为蜂窝结构体面内纵向平台应力； $\sigma_{ys}$ 为蜂窝芯层胞壁材料的屈服应力； $t$ 为蜂窝芯层胞壁的厚度； $l$ 为蜂窝芯层胞壁的边长； $\theta$ 为蜂窝芯层孔壁夹角。

对正六边形蜂窝孔穴( $\theta = 120^\circ$ )，式(1)可写为：

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

### 1.2 蜂窝纸板面内压缩机理

蜂窝纸板是由上下两层面纸和中间蜂窝芯纸复合而成，见图 1，与纯蜂窝结构体存在很大差异。

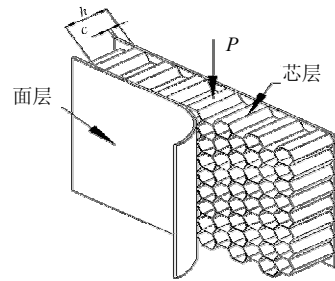


图 1 蜂窝纸板结构图

Fig.1 Chart of honeycomb paperboard

蜂窝纸板面内压缩应力-应变的典型特征曲线如图 2 所示，其变形过程可分为三个阶段：线弹性阶段(OA 段)、塑性坍塌阶段(AB 段)、密实化阶段(BC 段)。从图 2 中看出，蜂窝纸板在经受面内加载的变形过程中，出现一段变形较长虽有上下波动但可近似看作平台的区域(AB 段)，其平台应力值的读取以下屈服点为准，在此塑性坍塌阶段孔壁按波长  $2l$  渐进折叠，由于此阶段为蜂窝纸板能量吸收最主要的阶段，预测该区域的平台应力对于蜂窝纸板承载和缓冲包装设计具有重要的工程价值。为建立蜂窝纸板平台应力模型，可将其应力-应变曲线进行近似处理，见图 3。

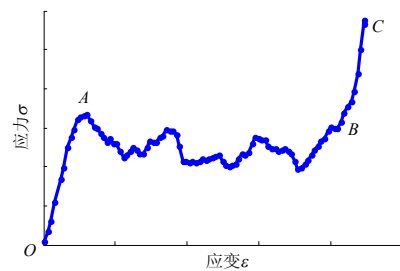


图 2 蜂窝纸板面内压缩应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of in-plane compression for honeycomb paperboard

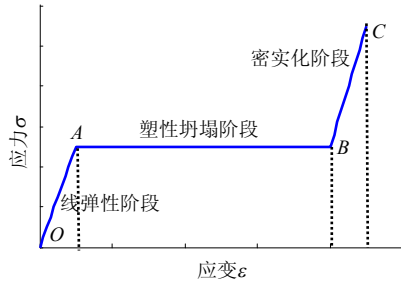


图3 蜂窝纸板面内压缩理论曲线

Fig.3 Theoretical curve of in-plane compression for honeycomb paperboard

### 1.3 蜂窝纸板面内平台应力模型

蜂窝纸板的面内承载由面层和芯层共同承担,其平台应力模型可表示为:

$$(\sigma_{pl}^*)_{in} = (\sigma_{pl}^*)_c + (\sigma_{pl}^*)_l \quad (3)$$

式中:  $(\sigma_{pl}^*)_{in}$  为蜂窝纸板面内纵向平台应力;

$(\sigma_{pl}^*)_c$ 、 $(\sigma_{pl}^*)_l$  分别为蜂窝纸板芯层、面层结构体面内纵向平台应力。

蜂窝纸板芯层结构体面内纵向平台应力为<sup>[7]</sup>:

$$(\sigma_{pl}^*)_c = 2 \left( \frac{t}{l} \right)^2 \sigma_{ysc} \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{ysc}$  为蜂窝芯层原纸纵向屈服强度。

金属蜂窝结构体研究表明,蜂窝体面外坍塌平台应力线性地依赖于相对密度<sup>[19-21]</sup>,故蜂窝纸板面层结构体面内纵向平台应力与蜂窝纸板面层结构体相对密度也存在正比关系:

$$(\sigma_{pl}^*)_l = \sigma_{ysl} \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{ysl}$  为蜂窝面层原纸纵向屈服强度;  $\rho^* / \rho_s$  为蜂窝纸板面层结构体相对密度,其中  $\rho^*$  为蜂窝纸板面层结构体密度,  $\rho_s$  为制造其固体原纸密度。

蜂窝纸板面层结构体相对密度可表示为:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2c}{2c+h} \quad (6)$$

式中:  $c$  为蜂窝纸板面纸厚度;  $h$  为蜂窝纸板芯层厚度。

由式(5)与式(6)得:

$$(\sigma_{pl}^*)_l = \frac{2c}{2c+h} \sigma_{ysl} \quad (7)$$

故蜂窝纸板面内平台应力可进一步表征为:

$$(\sigma_{pl}^*)_{in} = 2 \left( \frac{t}{l} \right)^2 \sigma_{ysc} + \frac{2c}{2c+h} \sigma_{ysl} \quad (8)$$

蜂窝纸板的面内承载性能为各向异性,由于纸类材料的纵向强度要大于横向强度,实际中常将纵向作为面内承载方向,本文所研究内容均为蜂窝纸板面内纵向承载性能。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

蜂窝纸板样品为青岛某公司提供,见表1。

蜂窝原纸样品定量分别为 120g/m<sup>2</sup>、150g/m<sup>2</sup>、170g/m<sup>2</sup>、200g/m<sup>2</sup>、280g/m<sup>2</sup>、420g/m<sup>2</sup>,对应厚度分别为 0.246mm、0.257mm、0.275mm、0.260mm、0.313mm、0.526mm。

表1 试验样品特征参数

Table 1 Experiment sample specifications

样品	面层定量/ (g/m <sup>2</sup> )	芯层定量/ (g/m <sup>2</sup> )	纸板厚度/ mm	芯层胞壁 边长/mm	厚跨比/ (t/l)
200/120/200-10	200	120	10	8.5	0.0289
200/120/200-25	200	120	25	8.5	0.0289
200/120/200-35	200	120	35	8.5	0.0289
200/120/200-50	200	120	50	8.5	0.0289
200/150/200-25	200	150	25	8.5	0.0302
200/170/200-25	200	170	25	8.5	0.0323
280/170/280-25	280	170	25	8.5	0.0323
420/170/420-25	420	170	25	8.5	0.0323

### 2.2 试验方法

#### 1) 蜂窝原纸纵向屈服强度测试。

将蜂窝原纸试样在温度为 23℃±2℃,相对湿度为 RH50%, RH65%, RH80%, RH90%下分别预处理 24h 后,参照 JB/T6544-93<sup>[22]</sup>塑料拉伸和弯曲弹性模量试验方法,在电子材料试验机(英国 LLOYD INSTRUMENTS,型号 01/2962,最大量程为 5kN)测量不同相对湿度条件下蜂窝原纸的纵向屈服强度,每个试样从恒温恒湿箱(THS-AOC-100AS)取出后 5min 内完成测试,试样尺寸为 125mm×12.7mm,电子材料试验机的拉伸标距是 65mm,应变速率为 1mm/min,进行 10 次重复试验,取平均值。

#### 2) 蜂窝纸板面内压缩试验。

将蜂窝纸板试样在温度为 23℃±2℃,湿度为 RH50%, RH65%, RH80%, RH90%下分别预处理 24h 后,参照 GB/T 1454-2005<sup>[23]</sup>在 LRXPlus 电子料试验机上进行侧压试验,每个试样从恒温恒湿箱取出后 5min 内完成测试,对蜂窝纸板施加恒定加载速度 12mm/min±2mm/min,试样宽度和高度均为 100mm,以保证试样的宽度和高度方向都至少含 4 个完整的蜂窝孔穴,每个试样进行 5 次重复试验。

### 3 结果与讨论

基于标准环境条件(23℃, RH50%)下对不同厚度、不同芯层、不同面层蜂窝纸板面内压缩试验,并与式(8)计算得出的蜂窝纸板面内平台应力理论值进行比较。

#### 3.1 蜂窝纸板厚度对面内平台应力的影响

基于标准环境条件研究不同蜂窝纸板厚度对面内平台应力的影响。采用相同定量的面层(200g/m<sup>2</sup>)和芯层(120g/m<sup>2</sup>),厚度分别为 10mm、25mm、35mm 和 50mm,试验样品和结果见表 2。

表 2 不同厚度蜂窝纸板面内平台应力实验与理论值结果  
Table 2 Testing results and theoretical data of in-plane plateau stress of honeycomb paperboard with different thicknesses

样品	厚度/mm	实验值/MPa	理论值/MPa	相对误差/(%)
200/120/200-10	10	105.733	113.942	7.205
200/120/200-25	25	46.449	49.852	6.826
200/120/200-35	35	34.966	37.195	5.993
200/120/200-50	50	26.449	27.606	4.191

从表 2 看出,蜂窝纸板厚度对其面内平台应力的影响非常显著,随着厚度的增加,面内平台应力逐渐变小,通过计算理论值并与实验值进行比较,误差均小于 8%,试验值与理论值吻合度高,模型适用性较好。试验结果与模型预测对比情况见图 4。

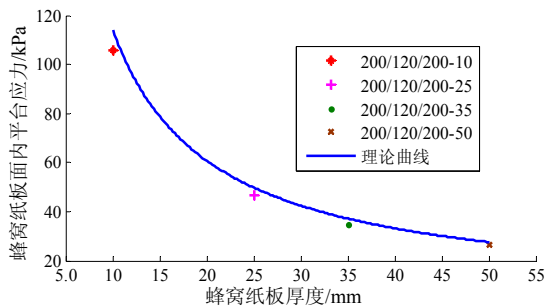


图 4 不同厚度蜂窝纸板面内平台应力试验值与理论曲线  
Fig.4 Testing results and theoretical curve of in-plane plateau stress of honeycomb paperboard with different thicknesses

#### 3.2 蜂窝纸板芯层对面内平台应力的影响

基于标准环境条件,研究不同蜂窝纸板芯层对面内平台应力的影响。采用相同定量的面层(200g/m<sup>2</sup>)和厚度(25mm),芯层定量分别为 120g/m<sup>2</sup>、150g/m<sup>2</sup> 和 170g/m<sup>2</sup>,试验样品和实验结果见表 3。

从表 3 看出,蜂窝纸板芯层对其面内平台应力的影响很小,随着芯层定量的增加,面内平台应力逐渐增大,通过计算理论值并与实验值进行比较,误差均小于 7%,试验值与理论值吻合度高,模型适用性较好。

表 3 不同芯层蜂窝纸板面内平台应力实验与理论值结果  
Table 3 Testing results and theoretical data of in-plane plateau stress of honeycomb paperboard with different core layers

样品	芯层定量/(g/m <sup>2</sup> )	实验值/MPa	理论值/MPa	相对误差/(%)
200/120/200-25	120	46.449	49.852	6.826
200/150/200-25	150	47.707	51.052	6.552
200/170/200-25	170	48.456	52.052	6.908

试验结果与模型预测对比见图 5。

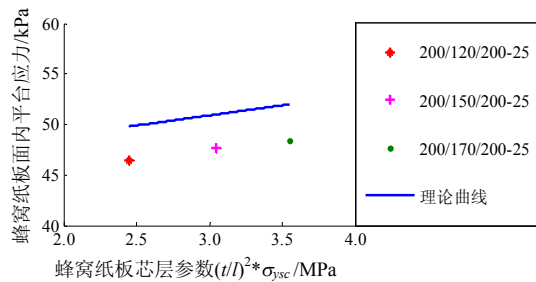


图 5 不同芯层蜂窝纸板面内平台应力试验值与理论曲线  
Fig.5 Testing results and theoretical curve of in-plane plateau stress of honeycomb paperboard with different core layers

#### 3.3 蜂窝纸板面层对面内平台应力的影响

基于标准环境条件,研究不同蜂窝纸板面层对面内平台应力的影响。采用相同定量的芯层(170g/m<sup>2</sup>)和厚度(25mm),面层定量分别为 200g/m<sup>2</sup>、280g/m<sup>2</sup> 和 420g/m<sup>2</sup>,试验样品和实验结果见表 4。

表 4 不同芯层蜂窝纸板面内平台应力实验与理论值结果  
Table 4 Testing results and theoretical data of in-plane plateau stress of honeycomb paperboard with different liners

样品	面层定量/(g/m <sup>2</sup> )	实验值/MPa	理论值/MPa	相对误差/(%)
200/170/200-25	200	48.456	52.052	6.908
280/170/280-25	280	84.371	88.312	4.463
420/170/420-25	420	118.808	124.913	4.887

从表 4 看出,面层对蜂窝纸板面内平台应力影响很大,随着面层定量的增加,面内平台应力逐渐增大,通过计算理论值并与实验值进行比较,误差均小于 7%,试验值与理论值吻合度较高,模型适用性较好。试验结果与模型预测对比情况见图 6。

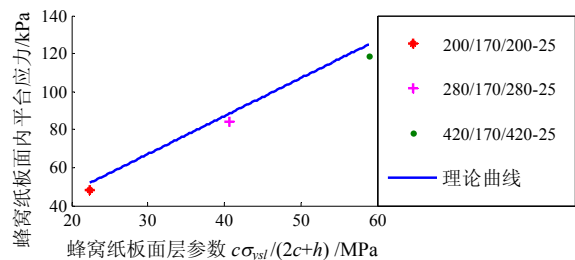


图 6 不同面层蜂窝纸板面内平台应力试验值与理论曲线  
Fig.6 Testing results and theoretical curve of in-plane plateau stress of honeycomb paperboard with different liners

3.4 基于相对湿度的蜂窝原纸纵向屈服强度

对经过预处理的蜂窝原纸进行拉伸试验，测试并计算4个相对湿度条件下蜂窝原纸的纵向屈服强度，实测数据见表5。结果表明，相同环境条件下，

蜂窝原纸纵向屈服强度与定量没有直接关系，其大小取决于材料本身性能；但蜂窝原纸纵向屈服强度随环境湿度的增大而减小，且随着相对湿度的增大，其纵向屈服强度的下降幅度随之增大。

表5 不同相对湿度下的蜂窝原纸纵向屈服强度

Table 5 Longitudinal yield strength of honeycomb paper under different relative humidity

相对湿度/(%)	屈服强度/MPa					
	蜂窝原纸定量 120g/m <sup>2</sup>	蜂窝原纸定量 150g/m <sup>2</sup>	蜂窝原纸定量 170g/m <sup>2</sup>	蜂窝原纸定量 200g/m <sup>2</sup>	蜂窝原纸定量 280g/m <sup>2</sup>	蜂窝原纸定量 420g/m <sup>2</sup>
50	2.912±0.052	3.336±0.060	3.411±0.049	2.206±0.037	3.324±0.041	2.917±0.035
65	2.634±0.038	3.012±0.033	3.119±0.030	2.063±0.033	2.957±0.036	2.773±0.030
80	2.351±0.025	2.586±0.026	2.621±0.021	1.786±0.025	2.391±0.029	2.528±0.025
90	1.792±0.022	1.996±0.018	2.102±0.022	1.315±0.020	1.942±0.024	2.054±0.022

3.5 基于相对湿度的蜂窝原纸纵向屈服强度变化率

将六种定量蜂窝原纸纵向屈服强度随湿度变化率进行指数方程拟合，得到：

$$\begin{cases} \alpha = -0.00098 \exp(6.602 \cdot RH + 0.0926) \\ R^2 = 0.9676 \end{cases} \quad (9)$$

式中：RH 为相对湿度； $\alpha$ /(%)为蜂窝原纸纵向屈服强度随湿度变化率。试验与模型对比情况见图7。

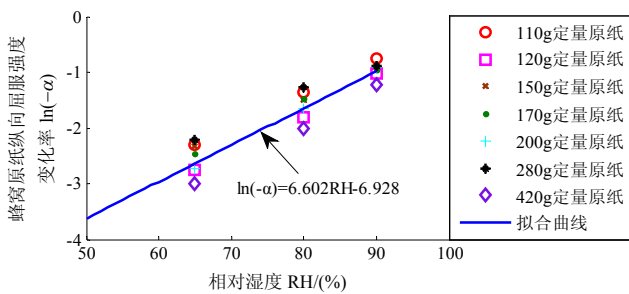


图7 相对湿度与蜂窝原纸纵向屈服强度变化率的关系

Fig.7 Relationship between relative humidity and the change rates of longitudinal yield strength of honeycomb paper

3.6 基于相对湿度的蜂窝纸板面内平台应力模型

将标准环境条件下的蜂窝芯层和面层原纸纵向屈服强度作为基准值，由式(6)与式(7)得到基于湿度的蜂窝纸板面内平台应力模型：

$$(\sigma_{pl}^*)_{in} = 2(1-\alpha) \left( \left( \frac{t}{l} \right)^2 \sigma_{ysc(0)} + \frac{c}{2c+h} \sigma_{ysl(0)} \right) \quad (10)$$

式中， $\sigma_{ysc(0)}$ 、 $\sigma_{ysl(0)}$  分别为标准环境条件(23℃，RH50%)下蜂窝芯层原纸和面层原纸纵向屈服强度。

由式(9)与式(10)得：

$$(\sigma_{pl}^*)_{in} = 2(1 - 0.00098 \exp(6.602 \cdot RH + 0.0926)) \cdot \left( \left( \frac{t}{l} \right)^2 \sigma_{ysc(0)} + \frac{c}{2c+h} \sigma_{ysl(0)} \right) \quad (11)$$

将4种相对湿度条件下的各规格蜂窝纸板平台应力实验值与模型预测结果进行对比，见表6。结果表明，试验值与理论值的平均误差均低于8%，试验值与理论值吻合度较高，模型适用性较好。

表6 不同相对湿度下蜂窝纸板面内平台应力实验值与理论值结果

Table 6 Testing results and theoretical data of in-plane plateau stress of honeycomb paperboard under different relative humidity

样品	蜂窝纸板面内平台应力/MPa								平均误差/(%)
	RH50%		RH65%		RH80%		RH90%		
	实验值	理论值	实验值	理论值	实验值	理论值	实验值	理论值	
200/120/200-10	105.733	113.942	96.349	104.992	83.640	89.849	60.839	67.317	7.993
200/120/200-25	46.449	49.852	41.354	45.936	36.351	39.311	27.786	29.453	7.497
200/120/200-35	34.966	37.195	32.816	34.273	27.303	29.330	19.794	21.975	6.770
200/120/200-50	26.449	27.606	24.354	25.438	20.351	21.769	15.786	16.310	4.542
200/150/200-25	47.707	51.052	42.813	47.042	38.120	40.257	27.514	30.162	7.407
200/170/200-25	48.456	52.052	44.362	47.963	38.193	41.046	28.487	30.752	7.183
280/170/280-25	84.371	88.312	76.650	81.375	65.348	69.638	48.370	52.175	5.931
420/170/420-25	118.808	124.913	109.375	115.101	93.369	98.500	69.210	73.799	5.322

4 结论

本文基于蜂窝原纸的纵向屈服强度随湿度变化率的关系，建立了相对湿度影响的蜂窝纸板面内

平台应力模型，并与试验实测数据进行比较验证。

(1) 蜂窝纸板面内承载能力由纸板厚度、芯层和面层共同决定，其中纸板厚度和面层性能对面内平台应力有较大影响，芯层性能对其影响较小。

(2) 通过三种因素影响的蜂窝纸板面内平台应力实验值和理论值的比较, 其误差均在 8% 以下, 且实验值均小于所对应的理论值, 这是因为蜂窝纸板在面内压缩变形过程中, 经常会出现整体失稳、剪切皱损、界面脱胶等情况, 其中界面脱胶出现概率较大, 一旦脱胶面纸就极易弯曲, 抗压能力降低, 致使实验数据与理论值相比而偏低。

(3) 建立基于相对湿度的蜂窝纸板面内平台应力模型。

由于蜂窝纸板面内压缩过程中容易发生界面脱胶等情况, 其面内抗压承载能力有所降低。在面层附加纤维板等加强板很好地解决了这一问题, 因此在面内加强方面, 尚有大量工作可以深入。此外, 对蜂窝纸板面内能量吸收性能的研究也将陆续展开。

#### 参考文献:

- [1] 余同希, 卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 231—233.  
Yu Tongxi, Lu Guoxing. Energy asorption of structures and materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 231—233. (in Chinese)
- [2] Timoshenko S P, Gere G M. Theory of elastic stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [3] Warren W E, Kraynik A M. Foam mechanics: The linear elastic response of two-dimensional spatially periodic cellular materials [J]. Mechanics of Materials, 1987, 6(1): 27—37.
- [4] 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.
- [5] Papka S D, Kyriakides S. In-plane crushing of a polycarbonate honeycomb [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(3/4): 239—267.
- [6] Zhang J, Ashby M F. Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stresses [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1992, 34(6): 491—509.
- [7] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 96—99.
- [8] Wang A J, McDowell D L. In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(2): 137—156.
- [9] Liu Ying, Zhang Xinchun. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 98—109.
- [10] 王博, 张雄, 徐胜利. 2D 周期蜂窝结构面内静动态压缩力学行为研究[J]. 力学学报, 2009, 41(2): 274—281.  
Wang Bo, Zhang Xiong, Xu Shengli. Echanical beahavior of 2D periodic honeycombs under in-plane uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(2): 274—281. (in Chinese)
- [11] 张新春, 刘颖, 章梓茂. 组合蜂窝材料面内冲击性能的研究[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 220—225.  
Zhang Xinchun, Liu Ying, Zhang Zimao. Research on dynamic properties of supercell honeycomb stuctures under in-plane impact loading [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 220—225. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 王冬梅. 纸蜂窝压缩临界应力经验评估[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 14—15.  
Wang Dongmei. Critical compression stress evaluation for paper honeycombs [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 14—15. (in Chinese)
- [14] Wang Dongmei. Out-of-plane compressive properties of hexagonal paper honeycombs [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115—119.
- [15] 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 Dongmei, Wang Zhiwei. Evaluation of compressive densification strain of paper honeycombs [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 285—289. (in Chinese)
- [16] E Yuping, Wang Zhiwei. Plateau stress of paper honeycomb as response to various relative humidities [J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(4): 203—216.
- [17] 计宏伟, 徐革玲, 李俊超, 邵文泉, 王怀文. 蜂窝纸板侧压强度实验研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 90—92.  
Ji Hongwei, Xu Geling, Li Junchao, Shao Wenquan, Wang Huaiwen. Experimental research on the edgewise compressive strength of honeycomb paperboard [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 90—92. (in Chinese)
- [18] 邵文全, 李砚明, 孟宪文, 计宏伟. 脱胶缺陷对蜂窝纸板侧压强度的影响[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 59—61.  
Shao Wenquan, Li Yanming, Meng Xianwen, Ji Hongwei. Influence of the unglued defect on edgewise compressive strength of honeycomb paperboard [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 59—61. (in Chinese)
- [19] McFarland R K. Hexagonal cell structures under post-buckling axial load [J]. AIAA Journal, 1963, 1(6): 1380—1385.

(参考文献[20]—[23]转第 365 页)

(3) VG 的安装位置和安装角度对后体的流动分离控制的影响较大, 在机身上 VG 安装角度为负时实验效果为减阻, 而 VG 安装角为正时效果均为增阻。

(4) VG 布置在 II 号和 III 号剖面后体底部机身对称线两侧的减阻作用较明显, 说明 VG 的布置位置不能距离后体分离区太远, 否则对后体的流动不能起到控制作用。

#### 参考文献:

- [1] Hahn M, Brune G W, Rubbert P E, Narkt C. Drag measurements of upswept after bodies and analytical study on axisymmetric separation [R]. Technical Report, AFFDL-TR-73-153, 1974.
- [2] 孔繁美, 华俊, 冯亚南. 大上翘角机身后体流动机理研究[J]. 空气动力学学报, 2002, 20(3): 326—331.  
Kong Fanmei, Hua Jun, Feng Ya'nan. Investigation of the flow mechanism on the aft-body with larger upswept angle [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2002, 20(3): 326—331. (in Chinese)
- [3] 孔繁美, 华俊, 冯亚南. 几何和流动参数对上翘后体阻力的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(1): 19—24.  
Kong Fanmei, Hua Jun, Feng Ya'nan. Effects of geometry parameters and flow parameters on drag coefficient of upswept aft-body [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(1): 19—24. (in Chinese)
- [4] 黄涛, 邓学莹, 王延奎. 尾翼等对民机后体流动特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6): 645—648.  
Huang Tao, Deng Xueying, Wang Yankui. Influence of empennage on flow over up swept aft-body [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 645—648. (in Chinese)
- [5] 郝卫东, 司永昌, 李彤. 民机后体试验技术研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(2): 45—48.  
Hao Weidong, Si Yongchang, Li Tong. The research of civil aircraft after-body test technique [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2003, 17(2): 45—48. (in Chinese)
- [6] Su Wenhan, Bo Tao, Li Xu. Three-dimensional separated flow over a prorated spheroid [J]. AIAA Journal, 1993, 31(11): 2175—2178.
- [7] Lockheed Martin. Future aircraft technology enhancement [R]. FATE 1 Phase 1, Final Report, 1997-09.
- [8] Martin P B, Tung C. Active flow control measurements and CFD on a transport helicopter fuselage [R]. Rotorcraft Technology Department, Aerodynamics the Boeing Company Mesa, AZ 85215, 2004.
- [9] Ronald D Joslin, Lucas G Horta, Chen Fang-Jenq. Transitioning active flow control to applications [J]. AIAA-99-3575, 1999.
- [10] 张进, 张彬乾, 阎文成, 等. 微型涡流发生器控制超临界翼型边界层分离实验研究[J]. 实验流体力学, 2005, 19(3): 58—60, 84.  
Zhang Jin, Zhang Binqian, Yan Wencheng, et al. Investigation of boundary layer separation control for supercritical airfoil using micro vortex generator [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(3): 58—60, 84. (in Chinese)
- [11] 蒋增葵, 杜希奇, 黄丹. 应用涡流发生器控制大型飞机后体流动分离与减阻试验研究[C]. 空气动力学研究文集, 2009, 19: 407—411.  
Jiang Zengyan, Du Xiqi, Huang Dan. Drag reduction test study and separated flow control to transport aircraft aft-body by using vortex generator [C]. Aerodynamics Corpus, 2009, 19: 407—411. (in Chinese)

(上接第 359 页)

- [20] Wierzbicki T. Crushing analysis of metal honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(2): 157—174.
- [21] Wierzbicki T, Abramowitz W. On the crushing mechanism of thin-walled structures [J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(4a): 727—734.
- [22] 中华人民共和国机械行业标准. JB/T6544-93 塑料拉伸和弯曲弹性模量试验方法[S]. 北京: 机械工业出版社, 1993.  
Mechanical industry standard of the People's Republic of China. JB/T6544-93 Test method of elastic modulus of drawing and buckling for plastics [S]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国国家标准. GB 1454-2005 夹层结构侧压性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.  
National Standard of the People's Republic of China. GB 1454-2005 Test method for edgewise compressive properties of sandwich constructions [S]. Beijing: China Standard Press, 2005. (in Chinese)