

缓冲与隔振

湿度对瓦楞纸板纵向压缩承载性能的影响

孙爽¹, 王军^{1,2}

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

摘要: **目的** 瓦楞纸板由于其材料的特殊性, 在运输过程中会受到环境湿度的影响, 因此, 首先研究标准环境下的平台应力模型, 然后引入湿度因素对模型进行修正。**方法** 采用试验及理论建模的方法建立基于环境湿度的纵向压缩平台应力理论模型。通过实验手段探讨瓦楞原纸极限应力随环境湿度的变化规律, 建立其随环境湿度的特征曲线, 然后引入标准环境下的平台应力理论模型中, 建立任意环境湿度下的平台应力理论模型。**结果** 与未考虑湿度建立的瓦楞纸板平台应力相比, 考虑湿度建立的理论模型与实验结果有较好的一致性, 验证了模型的准确性。**结论** 建立任意湿度下的理论模型对于平台应力有很好的预测作用, 在实际应用中对瓦楞纸板的选择以及包装设计有很大的指导作用。

关键词: 瓦楞纸板; 环境湿度; 纵向压缩; 平台应力; 极限应力

中图分类号: TB484.1; O241.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)19-0178-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.19.024

Influence of Humidity on Corrugated Board's Longitudinal Compression Bearing Performance

SUN Shuang¹, WANG Jun^{1,2}

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: Due to the particularity of its material, corrugated cardboard will be affected by environmental humidity during transportation. Therefore, the model of plateau stress in standard environment is studied firstly, and then the humidity factor is introduced to modify the model. The method of experiment and theoretical modeling is used to establish the theoretical model of the longitudinal compression plateau stress based on the environmental humidity. Through experimental methods, the ultimate stress of corrugated paper is discussed with the environmental humidity, and its characteristic curve with environmental humidity is established. Then it is introduced into the theoretical model of plateau stress under standard environment, and the theoretical model of plateau stress under arbitrary environmental humidity is established. Compared with the corrugated cardboard plateau stress established without considering the humidity, the theoretical model established with the humidity considered has a better consistency with the tested results, which verifies the accuracy of the model. The established theoretical model under any humidity has a good predictive effect on the plateau stress, and at the same time has a great guiding effect on the selection of corrugated cardboard and packaging design.

KEY WORDS: corrugated cardboard; environmental humidity; longitudinal compression; plateau stress; ultimate stress

收稿日期: 2021-03-15

基金项目: 国家一流学科建设轻工技术与工程 (LITE 2018-29); 国家自然科学基金 (51205167); 江苏省自然科学基金 (BK20151128)

作者简介: 孙爽 (1995—), 女, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通信作者: 王军 (1982—), 男, 博士, 江南大学教授、博导, 主要研究方向为运输包装。

单瓦楞纸板由 2 层面纸和 1 层瓦楞芯纸组成, 由于其结构的特殊性, 具有很高的比强度、比刚度以及良好的能量吸收能力, 被广泛应用于包装领域。对于瓦楞纸板力学性能的研究, 国内外学者主要集中在其不同方向的承载性能以及动静态缓冲特性。孟超莹等^[1]研究了瓦楞形状对瓦楞纸板力学性能的影响, 首先理论计算出单双层瓦楞纸板对应的 U 形、V 型以及 UV 型纸板的各等效弹性模量, 然后通过有限元仿真的方法进行仿真分析, 结果表明仿真与理论模型有很高的吻合度, 基本可达到实际工程设计的要求。Aboura 等^[2]研究几何参数对瓦楞纸板面内弹性常数的影响规律。宋卫生等^[3]研究瓦楞纸板楞形参数对力学性能的影响规律, 研究结果表明瓦楞几何参数对瓦楞纸板的边压强度和压缩比系数均有明显的影响。Gu 等^[4]研究了蜂窝纸板面层和芯层不同的变形机制以及对于不同变形平台应力的理论模型, 引入了面纸和芯纸的相互作用参数对模型进行了修改, 理论与实验结果吻合度极高。Bai^[5]研究了单层瓦楞纸板在静态压缩下的平台应力和能量吸收, 同时考虑了面纸和芯纸的影响, 并选择了一个新的变形单元。吉美娟等^[6]研究了纸瓦楞与纸蜂窝的复合夹层结构在跌落冲击动态压缩条件下的缓冲防护性能, 结果发现较低厚度的纸蜂窝更有利于复合夹层结构的缓冲吸能。此外, 还有很多学者研究了外部因素对瓦楞纸板的力学性能的影响。M A Sek 等^[7]研究了多层瓦楞纸板在冲击载荷下的行为, 研究发现, 经过预压缩处理的瓦楞纸板和原始瓦楞纸板结合使用, 增强了对于产品的保护功效。Sek 等^[8]基于实验数据, 研究了瓦楞纸板静态和动态压缩的缓冲特性数学模型。汪苗苗^[9]研究了瓦楞纸板强度指标和缓冲性能对环境温湿度的响应, 通过实验发现强度指标和缓冲性能的变化规律。黄剑宗^[10]模拟了流通环境中温湿度对三层 UV 型瓦楞纸板力学性能的影响。结果表明, 在相对湿度不超过 70% 的情况下, 瓦楞纸板能很好地保护产品。Wang^[11]考虑多层瓦楞纸板的结构因素, 通过静态压缩实验, 获得了能量吸收模型。

上述瓦楞夹层结构的实验或理论研究中, 关于瓦楞纸板平台应力的较少。在考虑外部因素对瓦楞纸板性能影响时, 对于湿度的研究也不够深入, 平台应力的预测以及环境湿度对其的影响是研究瓦楞纸板缓冲性能的一个重要参数, 因此, 文中将重点研究瓦楞纸板的平台应力模型以及环境湿度对其的影响。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料: 实验所用材料由昆山造纸公司提供, 文中选用 A 型瓦楞纸板, 面层和芯层的定量分别为 230 g/m^2 和 170 g/m^2 , 瓦楞的厚度为 5.02 mm 。对于

瓦楞原纸, 面纸定量分别为 $130, 170, 190, 230 \text{ g/m}^2$, 芯纸定量为 170 g/m^2 。

主要仪器: MTS 万能材料试验机、恒温恒湿箱。

1.2 方法

1.2.1 预处理

研究针对不同湿度的瓦楞纸板和瓦楞原纸, 因此, 实验前需要将试样放入相对湿度分别为 50%, 65%, 75%, 85% 和 95% 的恒温恒湿箱中进行预处理 48 h。

1.2.2 原纸拉伸实验

使用纸张取样仪将原纸裁切为 $12.7 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$, 由于纵向压缩时瓦楞纤维处于横向受压状态, 取样时要将纤维方向垂直于试样长边的方向, 见图 1a, 然后对试样进行预处理。参照标准, 通过拉伸实验得到瓦楞原纸的力学性能参数见图 1b, 夹具间的距离为 60 mm , 拉伸速率为 $(1 \pm 0.2) \text{ mm/min}$, 需进行 10 次重复实验^[12]

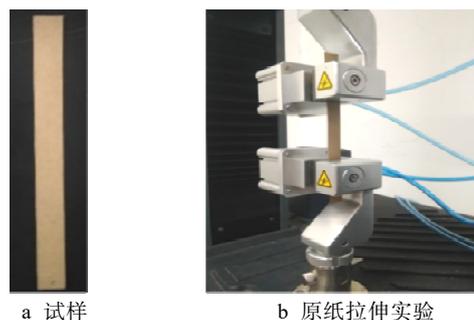


图 1 瓦楞原纸试样及拉伸实验
Fig.1 Corrugated medium sample and tensile test

1.2.3 瓦楞纸板纵向压缩实验

使用边压取样仪将瓦楞纸板裁切为 $H \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, H 代表瓦楞纸板的厚度, 同样在预处理后, 参照标准, 使试样处于并垂直于万能材料试验机的压板之间, 压缩速率设置为 12 mm/min , 压缩至瓦楞纸板厚度的 85% 时停止实验, 需重复实验 5 次^[13], 见图 2。

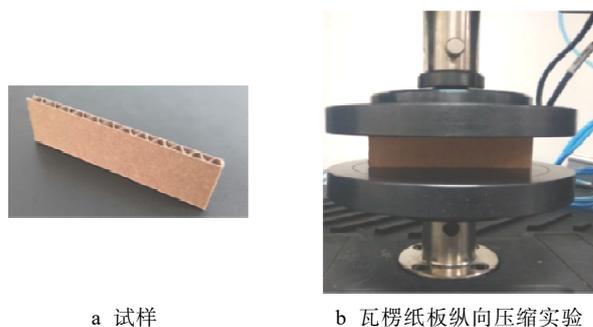


图 2 瓦楞纸板试样及压缩实验
Fig.2 Corrugated cardboard sample and compression test

2 瓦楞纸板平台应力理论模型

2.1 瓦楞纸板纵向压缩变形机制

瓦楞纸板从开始压缩到完全压溃,反映在应力应变上大致可分为4个阶段,其中每个阶段对应的变化过程及应力-应变曲线见图3。

1) 线弹性阶段。当瓦楞芯纸垂直边缘和面纸开始发生屈服时,纸板被压溃并且达到了承压极限,此处的应力为初始峰应力。

2) 屈服阶段。由于面纸和芯纸屈曲失稳,应力开始急剧下降,在此阶段,瓦楞芯纸和面纸完成了一次折叠。

3) 平台阶段。面纸和芯纸开始发生周期性折叠,反映在应力应变曲线上是平台区。

4) 密实化阶段。应力发生迅速升高,瓦楞纸板被压实。

2.2 瓦楞纸板纵向压缩平台应力理论模型

以鄂玉萍^[14]建立的纸蜂窝平台应力理论模型为基础,建立瓦楞纸板结构的纵向压缩平台应力理论模型。瓦楞纸板在纵压缩载荷作用下产生渐进折叠,每

折叠一次,芯纸和面纸在该折叠处就会产生分离现象(局部开裂);随着纸板被压扁,芯纸和面纸完全分离。为了便于研究,可将纸板分成3部分(2层面纸和1层芯纸),基于这3部分的能量守恒来构建瓦楞纸板的平台应力模型^[15]。

当瓦楞芯纸的单元受到纵向压力时,单元将以固定的 $2H$ 长度发生渐进折叠(图4);芯纸的初始高度为 W ,皱褶数目为 n ,波长 $2H=W/n$, $2l$ 为单元的弧长。

首先选取瓦楞纸板的折叠变形单元,见图5,图5中 B 、 E 为 midpoint。在此过程中,能量主要通过以下3种形式耗散。

2.2.1 水平塑性铰移动形成塑形区所耗散的能量

水平塑性铰能量耗散率的计算通式为^[14]:

$$\dot{E}_1 = M \dot{\theta} L \tag{1}$$

式中: L 和 $\dot{\theta}$ 分别为水平塑性铰的长度和转动速率; M 为原纸单位长度完全塑性弯矩。

$$M = \frac{1}{4} \sigma_{ys} d^2 \tag{2}$$

式中: σ_{ys} 为原纸的屈服强度; d 为原纸的厚度。在一个变形单元中,面层上有8条长度为

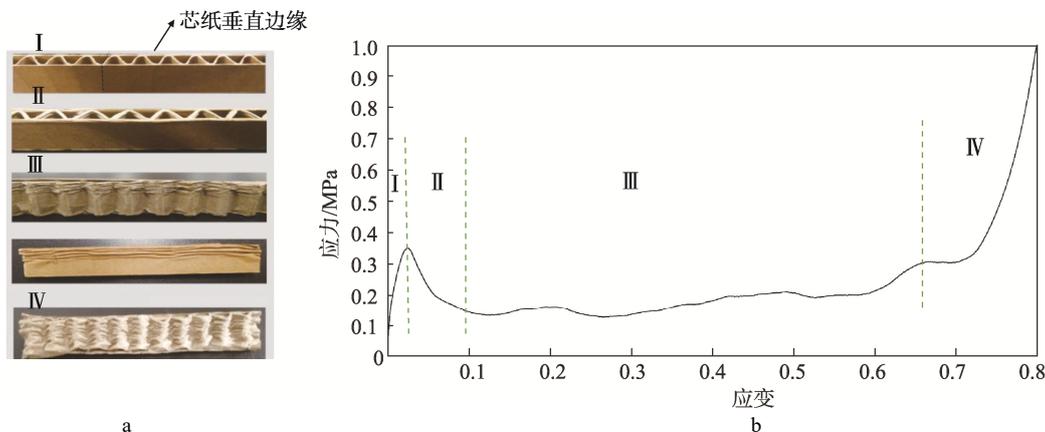


图3 瓦楞纸板纵向压缩变形过程及应力-应变曲线
Fig.3 Corrugated cardboard longitudinal compression deformation process and stress-strain curve

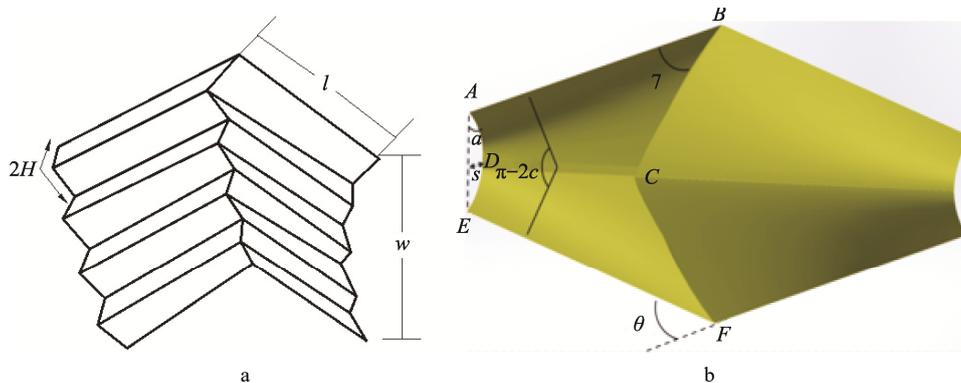


图4 瓦楞芯纸的规律折叠
Fig.4 Regular folding of corrugated medium

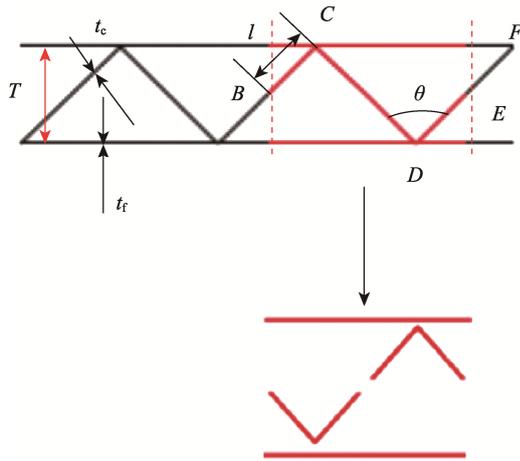


图 5 瓦楞纸板典型折叠单元

Fig.5 Typical folding element of corrugated cardboard

$4l\sin \theta/2$ 的水平固定塑性铰线，厚度为 d_r 。芯层上有 16 条厚度为 d_c ，长度为 l 的水平固定塑性铰线，则式 (1) 可以写为：

$$\dot{E}_1 = 8M_f \times 4l\sin(\theta/2) \times \dot{\varphi}_f + 16M_c \times l \times \dot{\varphi}_c \quad (3)$$

式中： $\dot{\varphi}_f$ 、 $\dot{\varphi}_c$ 分别为面纸和芯纸的转动速率； M_f 和 M_c 分别为面纸和芯纸的塑性弯矩。

水平塑性铰线的转动速率范围都是 $[0, \pi/2+\omega]$ ，对式 (3) 积分得到水平塑性铰耗散的能量：

$$E_1 = 16\pi M_f l \sin(\theta/2) + 8\pi M_c l \quad (4)$$

2.2.2 倾斜移行铰偏移形成的塑形区所耗散的能量

倾斜塑性铰能量耗散率的计算通式为^[14]：

$$\dot{E}_2 = M \dot{\theta}_m L_m \quad (5)$$

式中： L_m 和 $\dot{\theta}_m$ 分别为倾斜塑性铰的长度和曲率变化率。根据相关文献^[14]，曲率变化率的表达式为：

$$\dot{\theta}_m = \frac{H \cos a}{r \tan(\theta/2)} \dot{a} \quad (6)$$

$$L_m = \frac{2H}{\sin \gamma} \quad (7)$$

$$\sin \gamma = \sqrt{\frac{\tan^2(\theta/2)}{\tan^2(\theta/2) + \sin^2 a}} \quad (8)$$

式中： r 为环形曲面的半径； H 为折叠半波长； γ 为面板 ABC 的一个夹角； a 为侧面的旋转角度，见图 5。

将式 (6—8) 代入式 (5) 得：

$$\dot{E}_2 = 4M_c \times \frac{H \cos a}{r \tan(\theta/2)} \times \frac{2H}{\sqrt{\frac{\tan^2(\theta/2)}{\tan^2(\theta/2) + \sin^2 a}}} \dot{a} \quad (9)$$

对式 (9) a 在 $[0, \pi/2+\omega]$ 上积分得到倾斜塑性铰耗散的能量：

$$E_2 = \frac{2M_c H^2}{r} \left[\frac{\sec(\theta/2)}{\tan^2(\theta/2)} + \ln \frac{1 + \sec(\theta/2)}{\tan(\theta/2)} \right] \quad (10)$$

$$\text{令 } F_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{\sec(\theta/2)}{\tan^2(\theta/2)} + \ln \frac{1 + \sec(\theta/2)}{\tan(\theta/2)} \right], \text{ 则式}$$

(10) 为：

$$E_2 = \frac{4M_c H^2 F_1}{r} \quad (11)$$

2.2.3 环形曲面塑性流动耗散的能量

环形曲面上任何一点都可以表示为^[14] (β_m, Φ) ，且

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} - \omega \leq \beta_m \leq \frac{\pi}{2} + \omega \\ -c \leq \Phi \leq c \end{cases} \quad (12)$$

$$c = \arctan \frac{\tan a}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (13)$$

式中： c 为上下板弯曲过程中的角度^[14]，见图 4； β_m 、 Φ 分别为子午线和环形坐标。

假设 ω 从 $\theta/2$ 变化到 $\pi/2$ 是随着坐标 Φ 线性变化的，因此：

$$\omega = \theta/2 + \frac{\pi - \theta}{\pi} \Phi \quad (14)$$

由流动规律^[15]可知，环形区域内塑性流动以 $\dot{\epsilon}_\phi$ 的形式出现，并认为对应的弯曲能量为零，因此，环形曲面上的塑性能量耗散为：

$$\dot{E}_3 = \int_s N_0 \dot{\epsilon}_\phi ds \quad (15)$$

式中： N_0 为全塑性膜力。

$$\dot{\epsilon}_\phi = \frac{H \sin \beta_m \cos a}{d \tan(\theta/2)} \dot{a} \quad (16)$$

$$N_0 = \frac{1}{4} \sigma_{ys} t \quad (17)$$

$$ds = d\Phi r d\beta_m \quad (18)$$

式中： d 为环壳子午线方向上任意点到环壳对称轴之间的距离。

将式 (13—18) 代入 (15) 得：

$$\dot{E}_3 = \int_{-c}^c d\Phi \int_{\pi/2 - \theta/2 - (\pi - \theta)\Phi/\pi}^{\pi/2 + \theta/2 + (\pi - \theta)\Phi/\pi} N_0 \times \frac{rH}{\tan(\theta/2)} \times \frac{\sin \beta_m \cos a \dot{a} d\beta_m}{d} \quad (19)$$

对式 (19) 整理得：

$$E_3 = 4N_0 rH \times \frac{\pi}{(\pi - \theta) \tan(\theta/2)} \times \left(\int_0^{\pi/2} \left[\cos(\theta/2) - \cos\left(\theta/2 + \frac{\pi - \theta}{\pi} c\right) \right] \right) \times \cos a da \quad (20)$$

令：

$$F_2 = \frac{\pi}{(\pi - \theta) \tan(\theta/2)} \times \left(\int_0^{\pi/2} \left[\cos(\theta/2) - \cos\left(\theta/2 + \frac{\pi - \theta}{\pi} c\right) \right] \right) \times \cos a da \quad (21)$$

环形曲面的能量耗散表达式为:

$$E_3 = \frac{32M_c r H}{t_c} F_2 \quad (22)$$

将式(4, 11, 22)整合, 得到模式1中一个折叠单元的能量耗散:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (23)$$

$$E = 16\pi M_f l \sin(\theta/2) + 8\pi M_c l + \frac{4M_c H^2 F_1}{r} + \frac{32M_c r H}{t_c} F_2 \quad (24)$$

瓦楞纸板纵向压缩过程中, 外力所做的功都以塑性变形能的形式耗散, 所以, 能量耗散方式包括3种^[12]: 瓦楞纸板2层面纸和芯纸的水平塑性绞线耗散的能量, 芯纸倾斜塑性绞线耗散的能量以及芯纸环形曲面塑性流动耗散的能量, 因此有:

$$P_m \times 2H = E \quad (25)$$

将式(24)代入得:

$$P_m \times 2H = 16\pi M_f l \sin(\theta/2) + 8\pi M_c l + \frac{4M_c H^2 F_1}{r} + \frac{32M_c r H}{t_c} F_2 \quad (26)$$

式中: P_m 为外力; E_1 为内部能量耗散。

$$P_m = \sigma_p A \quad (27)$$

$$A = 4lT \sin(\theta/2) \quad (28)$$

$$M_c = \frac{1}{4} \sigma_{scCD} d_c^2 \quad (29)$$

$$M_f = \frac{1}{4} \sigma_{sfCD} d_f^2 \quad (30)$$

式中: σ_p 为平台应力; A 为选取单元的面积; σ_{scCD} , σ_{sfCD} 分别为芯纸和面纸在横向的屈服强度; d_c 和 d_f 分别为芯纸和面纸的厚度; T 为瓦楞纸板的宽度, 见图5。

由 $\frac{\partial p_m}{\partial r} = 0, \frac{\partial p_m}{\partial H} = 0$, 得:

$$H = \frac{l^{\frac{2}{3}} (A_1 M_f + A_2 M_c)^{\frac{2}{3}} d_f^{\frac{1}{3}} d_c^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{5}{3}} F_2^{\frac{1}{3}} (M_f d_c + M_c d_f)^{\frac{1}{3}} (M_f + M_c)^{\frac{1}{3}} F_1^{\frac{1}{3}}} \quad (31)$$

$$r = \frac{l^{\frac{1}{3}} (A_1 M_f + A_2 M_c)^{\frac{1}{3}} (M_f + M_c)^{\frac{1}{3}} d_f^{\frac{2}{3}} d_c^{\frac{2}{3}} F_1^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{7}{3}} F_2^{\frac{2}{3}} (M_f d_c + M_c d_f)^{\frac{2}{3}}} \quad (32)$$

式中: $A_1 = 8\pi \sin(\theta/2)$, $A_2 = 4\pi$ 。

将式(27—32)代入(26), 得:

$$\sigma_p = \frac{3F_1^{\frac{1}{3}} F_2^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{7}{3}} \sin(\theta/2)} [A_2 \sigma_{scCD}^3 (\frac{d_c}{T})^3 (\frac{d_c}{l})^2 + A_1 \sigma_{sfCD} \sigma_{scCD}^2 \frac{d_c}{T} (\frac{d_c d_f}{Tl})^{\frac{1}{3}}] \quad (33)$$

3 结果与讨论

3.1 相对湿度对原纸拉伸性能的影响规律

将不同定量瓦楞原纸试样进行5种不同相对湿度(50%, 65%, 75%, 85%, 95%)下的拉伸实验, 经过数据处理, 得到了瓦楞原纸极限应力, 见图6。

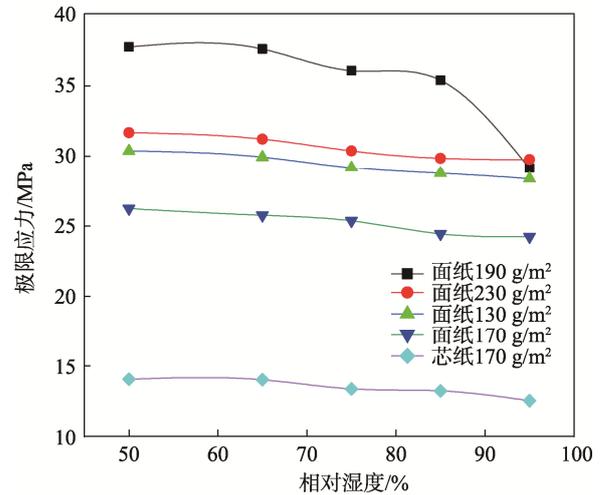


图6 不同定量的瓦楞原纸在不同湿度下的极限应力
Fig.6 Ultimate stress of corrugated medium of different basis weight under different humidities

由图6可知, 随着原纸定量的增加, 原纸的极限应力不会随着其规律性地增大或者减小。表明, 原纸的极限应力与其定量没有明显的关系, 与其本身的性能有关, 但是, 随着相对湿度的增大, 原纸的极限应力呈现出相同的变化规律, 逐渐降低。由图6可以看出, 当相对湿度为50%~75%时, 原纸的极限应力变化不显著, 但是总体处于下降状态; 当相对湿度上升到85%和95%时, 原纸的极限应力下降更为明显。

为了更为直观地表述瓦楞原纸极限应力与相对应力的响应特征曲线, 引入相对拉伸极限应力的概念^[14]。相对极限应力即任意环境湿度下原纸极限应力与标准环境(相对湿度为50%)下原纸拉伸极限应力之比。绘制了不同定量瓦楞原纸的相对极限应力随湿度变化的曲线见图7。

由图7可知, 不同定量的原纸相对应应力随环境湿度的变化规律基本一致, 可以用一条函数曲线表示, 通过对环境湿度与相对极限应力值进行数据拟合, 可以得到:

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_u^0} = \frac{1.096}{e^{0.001742RH}}, R^2=0.9274 \quad (34)$$

在研究中, 面纸和芯纸的屈服强度与极限应力有关^[16]:

$$\sigma_s = 0.92\sigma_u \quad (35)$$

即:

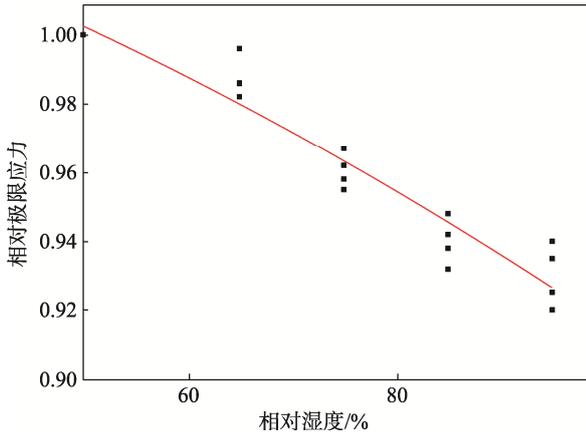


图 7 原纸极限应力与相对湿度关系
Fig.7 Relationship between ultimate stress of medium and relative humidity

$$\sigma_s = \frac{1.00832}{e^{0.001742RH}} \sigma_u^0 \quad (36)$$

式中： σ_s 为面纸或芯纸的屈服强度； σ_u 为任意环境湿度下原纸的拉伸极限应力； σ_u^0 为标准环境（23 °C，50%）下原纸的拉伸极限应力。

3.2 考虑湿度影响的瓦楞纸板纵向压缩平台应力理论模型

将原纸拉伸极限应力与相对湿度的响应函数模型（式（36））带入标准湿度下瓦楞纸板（式（33））中，得到任意环境湿度下瓦楞纸板纵向压缩平台应力预测模型。

$$\sigma_p = \frac{3F_1^{\frac{1}{3}} F_2^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{7}{3}} \sin \frac{\theta}{2}} \left[A_2 \left(\frac{1.00832}{e^{0.001742RH}} \sigma_{uf}^0 \right)^3 \left(\frac{d_c}{T} \right)^3 \left(\frac{d_c}{l} \right)^2 + A_1 \frac{1.00832}{e^{0.001742RH}} \sigma_{uf}^0 \left(\frac{1.00832}{e^{0.001742RH}} \sigma_{uc}^0 \right)^2 \frac{d_c}{T} \left(\frac{d_c d_f}{l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (37)$$

式中： σ_{uf}^0 为面纸在标准环境湿度下的极限应力； σ_{uc}^0 为芯纸在标准环境湿度下原纸的拉伸极限应力。

3.3 模型的实验验证

分别对式（33），式（37）进行计算，可以得到根据鄂玉萍^[14]的方法计算的不考虑相对湿度的瓦楞纸板平台应力数值、考虑相对湿度的瓦楞纸板纵向压缩平台应力以及实验数值，3 种平台应力的结果对比见图 8。

根据图 8 可知，同一湿度下的不同厚度的瓦楞纸板的平台应力随着厚度的增加，平台应力呈现下降趋势。这是由于厚度的增加，瓦楞纸板受到压缩时不稳定性增加，导致出现了不同情况的变形，使得平台应力出现下降趋势；不同厚度的瓦楞纸板在考虑湿度效应下的平台应力实验值呈下降趋势，这表明根据鄂玉萍理论得出的数值与实际情况不符，而考虑湿度效应的理论模型预测值与实验一致性很高，说明相对湿度对平台应力的影响很大。

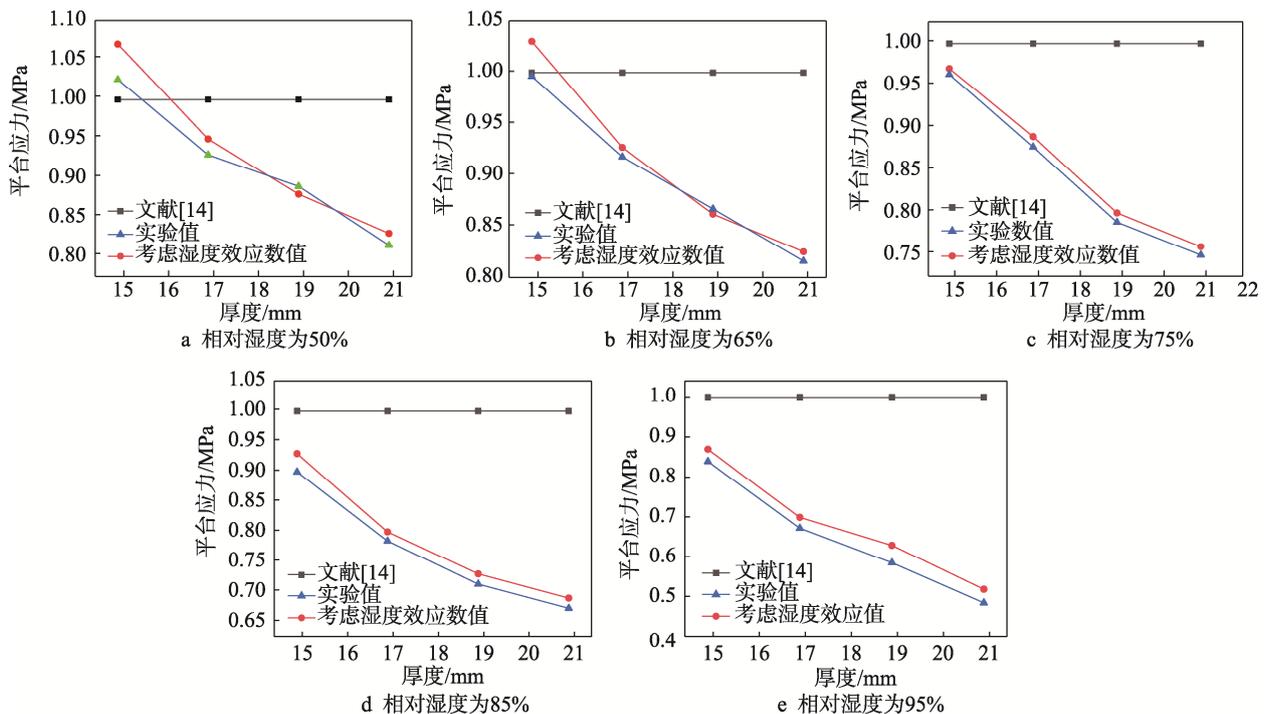


图 8 不同厚度瓦楞纸板平台应力理论值与实验值对比

Fig.8 Comparison of theoretical results with test data of plateau stress of corrugated cardboard with different thickness

4 结语

研究了相对湿度对瓦楞纸板纵向压缩承载性能的影响,建立了标准环境下瓦楞纸板平台应力模型。实验发现,随着相对湿度的升高,瓦楞原纸的极限应力呈现下降的趋势,通过数据拟合,建立了相对湿度与瓦楞原纸极限应力的函数关系式,然后对标准环境下的瓦楞纸板纵向压缩平台应力的理论模型进行了修正,得到了考虑环境湿度的平台应力理论模型,实验结果与理论值有很高的吻合度。该理论模型对于运输过程中的瓦楞纸板平台应力有很好的预估作用,对于瓦楞纸板缓冲材料的尺寸选取以及包装设计有很好的指导作用。

参考文献:

- [1] 孟超莹. 瓦楞形状对瓦楞纸板力学性能的影响分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 5—58.
MENG Chao-ying. Analysis of the Influence of Corrugated Shape on the Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 5—58.
- [2] ABOURAZ, TALBI N, ALLAOUI S, et al. Elastic Behavior of Corrugated Cardboard: Experiments and Modeling[J]. Composite Structures, 2004, 63(1): 53—62.
- [3] 宋卫生, 薛阳, 边文慧, 等. 瓦楞纸板楞形参数对力学性能的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 147—151.
SONG Wei-sheng, XUE Yang, BIAN Wen-hui, et al. The Influence of Corrugated Board Shape Parameters on Mechanical Properties[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 147—151.
- [4] GU Xiao-jie, WANG Jun, LU Guo-Xing, et al. Modeling for the In-Plane Plateau Stress of Honeycomb Paperboard Based on the Induce Effect of Face Paper with Honeycomb Core[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 168(S1): 5—20.
- [5] BAI Jing, WANG Jun, PAN Liao, et al. Quasi-Static Axial Crushing of Single Wall Corrugated Paperboard[J]. Composite Structures, 2019, 226: 1879—1085.
- [6] 吉美娟, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的跌落冲击缓冲性能研究[J]. 工程力学, 2020(10): 1—10.
JI Mei-juan, GUO Yan-feng, FU Yun-gang, et al. Research on Drop Impact Cushioning Performance of Corrugated-Honeycomb Composite Sandwich Structure[J]. Engineering Mechanics, 2020(10): 1—10.
- [7] ROUILLARD V, SEK M A. Behaviour of Multi-Layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads[J]. Strain, 2007, 43(4): 345—347.
- [8] SEK M A, KIRKPATRICK J. Prediction of the Cushioning Properties of Corrugated Fibreboard from Static and Quasi-Dynamic Compression Data[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 10(2): 87—94.
- [9] 汪苗苗. 瓦楞纸板强度指标和缓冲性能对环境湿度的响应[J]. 上海包装, 2019(4): 26—29.
WANG Miao-miao. Corrugated Board Strength Index and Cushioning Performance Response to Ambient Temperature and Humidity[J]. Shanghai Packaging, 2019(4): 26—29.
- [10] 黄剑宗. 模拟流通环境下温湿度对三层 UV 型瓦楞纸板力学性能的影响[J]. 轻工科技, 2015(6): 22—23.
HUANG Jian-zong. The Influence of Temperature and Humidity on the Mechanical Properties of Three-Layer UV Corrugated Cardboard in a Simulated Circulation Environment[J]. Light Industry Science and Technology, 2015(6): 22—23.
- [11] WANG Dong-mei. Energy Absorption Diagrams of Multi-layer Corrugated Boards[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2010, 25(1): 58—61.
- [12] ISO 1924—2:2008, Paper and Board-Determination of Tensile Properties[S].
- [13] ISO 3037: 2013, Corrugated Fiberboard-Determination of Edgewise Crush Resistance[S].
- [14] 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: 27—38.
E Yu-ping. The Influence of Humidity and Strain Rate on the Energy Absorption Characteristics of Paper Cushioning Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010: 27—38.
- [15] 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 Tong-xi, LU Guo-xing. Energy Absorption of Materials and Structures[M]. Beijing: Materials Science and Engineering Publishing Center, 2006: 231—233.
- [16] 白婧. 瓦楞结构的轴向压溃响应研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 24—32.
BAI Jing. Research on the Axial Collapse Response of Corrugated Structures[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 24—32.