温湿度对瓦楞原纸弹性模量影响的研究

熊　维[1]，王家俊[1]，王冬梅[2]
(1.浙江理工大学，杭州 310018；2.深圳职业技术学院，深圳 518055)

摘要： 试验研究了温湿度条件对瓦楞原纸含水率的影响，以及瓦楞原纸含水率对其弹性模量的影响，构建了含水率与温湿度的三维关系图。试验结果表明：瓦楞原纸的含水率既受相对湿度的影响，又受温度的影响，温度对瓦楞原纸弹性模量的影响比相对湿度的影响小；瓦楞原纸含水率随温度的上升而下降，随相对湿度的上升而上升；瓦楞原纸弹性模量随含水率的上升而下降。

关键词： 瓦楞原纸；温度；相对湿度；含水率；弹性模量
中图分类号： TB484.1；TB487　**文献标识码：** A　**文章编号：** 1001-3563(2011)21-0045-04

Influence of Temperature and Relative Humidity on Elastic Modulus of Corrugated Paper

XIONG Wei[1], *WANG Jia-jun*[1], *WANG Dong-mei*[2]
(1. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Shenzhen Polytech, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The influence of temperature and relative humidity on moisture content of corrugated paper and moisture content on elastic modulus of corrugated paper were studied by experiments. The three-dimensional image among moisture content, temperature, and relative humidity was constructed. The results showed that the moisture content of corrugated paper decreases with increase of temperature and increases with increase of relative humidity; the effect of relative humidity on the moisture content of corrugate paper is greater than temperature; the elastic modulus decreases with increase of moisture content.

Key words: corrugated paper; temperature; relative humidity; moisture content; elastic modulus

纸和纸板广泛应用于包装领域，主要用于彩盒、纸箱等，因此，人们一直关注纸和纸板的定量、挺度、环压强度、耐破度等性能指标[1]，近些年也逐渐开始关注纸和纸板的弹性性能指标。随着瓦楞原纸越来越多地用于制备瓦楞夹芯、六角型纸蜂窝芯等，为了评估纸蜂窝材料的缓冲性能，人们开始关注瓦楞原纸的弹性性能指标。

纸是一种吸湿纤维材料，它的性能容易受到温湿度影响而发生变化[2]。为了评估纸或纸板在不同的温湿度条件下的力学性能，预测纸质结构材料(瓦楞纸板或蜂窝纸板等)的力学性能，有必要对瓦楞原纸的弹性模量进行温湿度效应研究，以寻求纸或纸板弹性模量与环境温湿度的关系，为纸质结构材料的工程应用提供依据。

国内外已有部分纸或纸板受温湿度影响的研究。薛叶玲等人[3]通过研究相对湿度对瓦楞原纸环压强度的影响，获得了瓦楞原纸环压强度与相对湿度呈指数关系的方程，该研究方法可以作为研究瓦楞原纸温湿度效应的参考；王冬梅[4]分析了瓦楞原纸弹性模量的重要性，参照塑料拉伸和弯曲弹性模量的测试标准，设计了瓦楞原纸弹性模量的测定方法，可为研究瓦楞原纸弹性模量温湿度效应提供依据；杨松平[5]研究了不同湿度条件下瓦楞原纸弹性模量的变化，得出了瓦楞原纸弹性模量随湿度的增大而减小，并未考虑温度对瓦楞原纸弹性模量的影响。国外对瓦楞原纸的研究比较早，Nisson[6]将纸张看成是由氢键组成的各向同

收稿日期： 2011-09-07
作者简介： 熊维(1987—)，男，福建人，硕士，浙江理工大学硕士生，主攻材料加工。
通讯作者： 王家俊(1963—)，男，杭州人，浙江理工大学教授、博士生导师，主要研究方向为包装材料与工艺、高分子复合材料、生物与仿生材料。

性多孔结构,建立了当含水率 $0\leqslant m\leqslant 1$ 时弹性模量与含水率之间的关系,它们的关系呈指数型 $E(m)=E_0\exp(a-bm)$,E_0 为标况下的弹性模量,a,b 为模型参数,但是并没有考虑温湿度对含水率的影响。Petch 等人[7]进一步考虑了温度对弹性模量的影响,将温度加入上述指数方程,得出 $E(m,T)=E_0\exp(a-bm-cT)$,T 为温度,但不足的是并没有考虑到湿度对弹性模量的影响。Allaoui[8]等人研究了瓦楞纸板的弹性模量与湿度的关系,得知弹性模量随着湿度的上升而下降,在高湿度条件下(大于 70%)下降幅度剧烈。

为了寻求纸或纸板弹性模量与环境温湿度的关系,以便预估不同温湿度条件下纸质结构材料的缓冲性能,对瓦楞原纸的弹性模量受温湿度影响进行了深入研究,研究发现环境温湿度对纸蜂窝弹性模量的影响主要是因为环境温湿度影响了瓦楞原纸的含水率,从而影响其力学性能。笔者重点讨论瓦楞原纸含水率如何受环境温湿度的影响,以及瓦楞原纸的弹性模量与其含水率的关系。

1 试验

1.1 材料

瓦楞原纸由深圳市金明德纸品厂提供:定量为 120 g/m^2,试样尺寸为 150 mm×12.5 mm,纸纹方向为横向,厚度为 0.25 mm。

1.2 设备

科明 CS/CP-KMH-1000R 恒温恒湿箱(东莞);后王 SFY20A 水分测定仪(深圳);瑞格尔 M-3050 微型电子万能试验机(深圳)。

1.3 方法

1.3.1 瓦楞原纸温湿度预处理

为了模拟瓦楞原纸在不同流通环境中的状态,参照 GB/T 4857.2—2005[9]运输包装件温湿度处理标准进行试样温湿度处理,设置试验环境温度见表 1。

表 1 预处理温湿度条件

Tab.1 Temperature and humidity conditions of pretreatment

温度 T/℃	5	20	30	40	50
相对湿度/%	30	50	70	80	90

为了避免误差,处理前必须对试样先进行干燥处理,再将试样放置在恒温恒湿箱的工作空间内,并将其架空放置,使温湿度调节处理的空气可以自由通过其顶部、四周和至少 75%的底部面积,进行 48 h 的温湿度处理。温湿度处理完成后,试样必须在离开处理条件 5 min 内进行试验测定。

1.3.2 原纸含水率试验

将经过温湿度处理后的试样放入水分测定仪,设置烘干时间为 5 min,烘干温度为 100 ℃。5 min 后,记录试样的含水率。

1.3.3 原纸弹性模量试验

原纸的弹性模量是指原纸拉伸应力应变曲线上起始一段直线部分的应力应变比值,由于目前并没有明确规定纸的弹性模量测试方法,借鉴塑料弹性模量测试方法 J/BT 6544—93[10]测试弹性模量。试验仪器为电子万能试验机,将试样用气动夹具固定夹紧,标距为 100 mm,在不影响测试条件情况下,给试验施加一个预应力,试验过程中,拉伸速度为 1 mm/min。拉伸过程中同时记录拉伸应力及相应的变形,该机器所配的软件可自动绘制拉伸应力-应变曲线。根据参考文献[5]所使用的瓦楞原纸弹性模量测定方法,确定应变为 0.07%和 0.08%所对应的载荷值,初始弹性模量 E 按下式计算:

$$E=\frac{P_2-P_1}{\left(\frac{\Delta l_2}{l_0}-\frac{\Delta l_1}{l_0}\right)S}$$

其中:E 为瓦楞原纸拉伸弹性模量(GPa);l_0 为瓦楞原纸标距长度(m),取 $l_0=0.1$ m;P_2 为 0.08%应变时的负荷(N);P_1 为 0.07%应变时的负荷(N);Δl_2 为 0.08%应变时的型变量(m);Δl_1 为 0.07%应变时的型变量(m);S 为试样原始横截面积(m^2)。

2 结果与分析

根据试验测出不同温湿度条件下的瓦楞原纸含水率和弹性模量,试验结果见表 2。

表 2 在不同温湿度条件下瓦楞原纸的含水率

Tab.2 Experimental results of moisture content of corrugated paper under different temperature and relative humidity

温度	相对湿度/%				
/℃	30	50	70	80	90
5	10.41	12.03	12.59	13.16	17
20	9.32	10.15	10.99	12.03	13.89
30	7.31	8.88	10.87	11.06	13.19
40	6.67	9.09	10.87	12.38	12.39
50	6.33	8.24	9.24	10.22	11.42

根据结果绘出瓦楞原纸含水率与温湿度的关系图，见图 1 和 2。

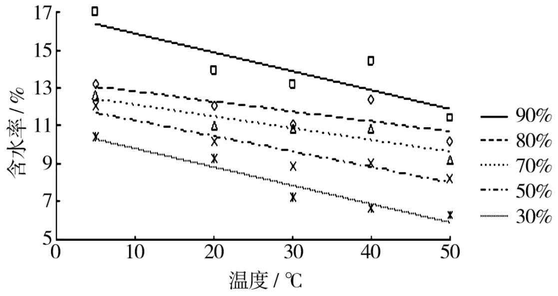

图 1　同一相对湿度条件下瓦楞原纸含水率与温度的关系

Fig. 1 Relation between the moisture content of corrugated paper and temperature under the same relative humidity condition

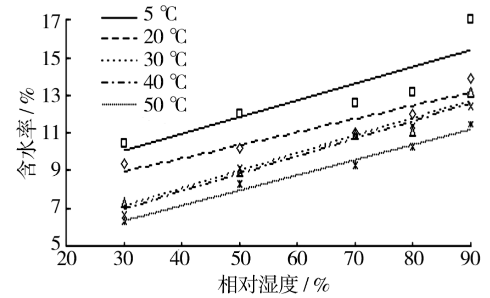

图 2　同一温度条件下瓦楞原纸含水率与相对湿度的关系

Fig. 2 Relation between moisture content of corrugated paper and relative humidity under the same temperature condition

从图 1 可以看出，当相对湿度一定时，温度越高，瓦楞原纸的平衡含水率越低，呈线性下降趋势。相对湿度为 80%时，当温度从 5 ℃上升到 50 ℃，瓦楞原纸的含水率下降了 22.34%。这和温度增高时，空气中或纤维内部的水分子热运动增大有关。在相对湿度相同的条件下，环境温度低时，水分子活动能量小，一旦水分子与纤维亲水基团(例如羟基)结合后就不易再分离；当环境温度高时，水分子活动能量大，纤维大分子的热振动能也随之增大，会削弱水分子与纤维大分子中亲水基团的结合力，使水分子更容易从纤维内部逸出，造成含水率下降。同时，存在于纤维内部空隙中的液态水蒸发的蒸气压也随温度的上升而上升，使水分子容易逸出。

值得强调的是，在所有湿度条件中，湿度为 90%时含水率受温度影响最大，其下降幅度也最大。这是因为在高温高湿条件下，纤维具有热膨胀的原因。在高湿条件下，温度升高时，原纸内部纤维膨胀，导致原纸内部水分子体积减小，含水率降低。

从图 2 可以看出，当温度一定时，相对湿度越高，瓦楞原纸的平衡含水率越高，呈线性上升趋势。温度为 30 ℃，当相对湿度从 30%上升到 90%时，瓦楞原纸的含水率上升了 44.58%。这是因为当温度相同时，相对湿度越高，空气中水汽分压力越大，单位体积空气中的水分子数目越多，瓦楞原纸的吸湿机会就越多，其含水率就越高。图 2 显示，当温度为 5 ℃时，随着相对湿度的上升，瓦楞原纸含水率上升的幅度最大。这是因为在低温时，水分子与纤维亲水基团结合后就不容易分离，随着相对湿度的上升，温度越低，与纤维亲水基团结合的水分子就越多，因此含水率就越高。

结合图 1 和 2，运用 matlab 软件绘出瓦楞原纸含水率与温湿度的三维关系图，见图 3。图 3 显示，温度降低，相对湿度升高，都能使含水率上升。与相对湿度相比，温度对原纸平衡含水率的影响较小。

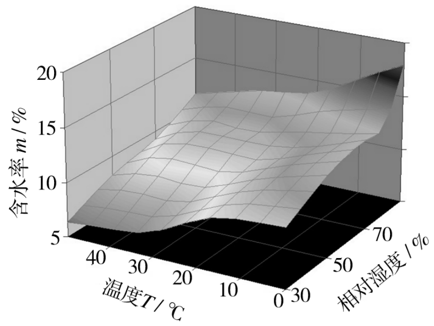

图 3　瓦楞原纸含水率与温湿度的三维关系

Fig. 3 Three-dimensional images among moisture content of corrugated paper, temperature, and relative humidity

根据试验测出不同含水率条件下的瓦楞原纸弹性模量，见表 3，结合表 2，绘出瓦楞原纸弹性模量和

表 3　在不同温湿度条件下瓦楞原纸的弹性模量

Tab.3 Experimental results of the elastic modulus of corrugated paper under different temperature and relative humidity　　GPa

温度/℃	相对湿度/% 30	50	70	80	90
5	0.587 6	0.502 1	0.483 3	0.473 5	0.331 2
20	0.621 3	0.574 6	0.515 4	0.521 1	0.453 1
30	0.733 1	0.639 8	0.521 3	0.517 9	0.469 6
40	0.760 2	0.629 9	0.523 3	0.518 5	0.484 4
50	0.778 5	0.709 7	0.630 7	0.569 1	0.521 1

含水率的关系图，见图4。图4显示，瓦楞原纸弹性模量随着含水率的上升而下降，当含水率从7%上升到13%时，其弹性模量下降了34.55%。主要原因是当瓦楞原纸含水率上升时，原纸内部水分子增多，水分子扩散到纤维内部无定形区域，减弱了其分子间的作用力，使其强度下降，降低了弹性模量。

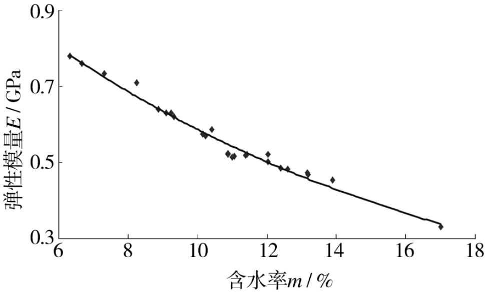

图4 瓦楞原纸弹性模量与含水率的关系

Fig.4 Relation between the elastic modulus of corrugated paper and the moisture content

3 结论

1) 瓦楞原纸的含水率既受相对湿度的影响又受温度的影响，温度对瓦楞原纸弹性模量的影响比相对湿度的影响小。

2) 随着相对湿度的降低和温度的上升，瓦楞原纸含水率呈线性下降的趋势。

3) 随着温度的降低和相对湿度的增加，瓦楞原纸含水率上升，而瓦楞原纸的弹性模量呈下降趋势。

参考文献：

[1] 彭国勋. 运输包装[M]. 北京：印刷工业出版社，1999.

[2] 于伟东，储才元. 纺织物理[M]. 上海：东华大学出版社，2009.

[3] 薛叶玲，卢立新. 基于相对湿度影响的瓦楞纸箱抗压强度表征[J]. 包装工程，2009，30(7)：13－15.

[4] 王冬梅. 原纸弹性模量测定方法[J]. 纸和造纸，2008(2)：82－84.

[5] 杨松平. 湿度对蜂窝纸板缓冲性能影响的研究[D]. 广州：暨南大学，2009.

[6] NISSAN A H. The Significance of Hydrogen Bonding at the Surfaces of Cellulose Network Structures[C]. In：Surface and Coatings Related to Paper and Wood. New York：Syacuse University Press，1967：221－268.

[7] PECHT M G，JOHNSON M. The Strain Response of Paper under Various Constant Regain States[J]. TAPPI，1985，68(1)：90－93.

[8] ALLAOUI S，ABOURA Z，BENZEGGAGH M L. Effects of the Environmental Conditions on the Mechanical Behaviour of the Corrugated Cardboard[J]. Composites Science and Technology，2009，69(1)：104－110.

[9] GB/T 4857.2－2005，包装－运输包装－温湿度处理条件[S].

[10] JB/T 6544－93，塑料拉伸和弯曲弹性模量试验方法[S].

（上接第26页）

[8] 陈旭辉，徐嵘，顾浩飞，等. 石墨炉标准加入法测定食品包装纸中镉含量的研究[J]. 中国造纸，2010，29(9)：29－31.

[9] Marcelo Enrique Conti. The Content of Heavy Metals in Food Packaging Paper Boards：an Atomic Absorption Spectroscopy Investigation[J]. Food Research International，1997，30(5)：343－348.

[10] KIM K C，PARK Y B，LEE M J，et al. Food Res Int，2008，41：411.（余不详）

[11] 李婷，钟泽辉. 载银沸石抗菌剂的研究进展[J]. 包装工程，2010，31(3)：107－109.

[12] 王志伟，黄秀玲，胡长鹰. 多类型食品包装材料的迁移研究[J]. 包装工程，2008，29(10)：1－7.

[13] 宋欢，王天娇，李波，等. 纸质食品包装材料中化学物分析检测技术研究进展[J]. 食品科学，2009，30(17)：339－344.

[14] GB/T 5009.156－2003，食品用包装材料及其制品的浸泡试验方法通则[S].