

灰底白板纸与白卡纸的弹性常数对比

储信庆, 计宏伟

(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 为了更加精确地测量灰底白板纸和白卡纸的泊松比和弹性模量。 **方法** 将数字图像相关方法与单向拉伸实验相结合。通过对灰底白板纸和白卡纸试样拉伸变形前后的图像进行分析, 测量其泊松比; 通过对灰底白板纸和白卡纸的力-位移曲线进行分析, 测量其弹性模量。 **结果** 测得了定量为 300, 400 g/m² 的灰底白板纸的泊松比分别为 0.281 和 0.245, 其弹性模量分别为 154.47, 226.06 MPa; 300, 400 g/m² 的白卡纸的泊松比分别为 0.312 和 0.276, 其弹性模量分别为 209.09, 297.79 MPa。 **结论** 同种类别的纸张中, 定量越高, 其弹性模量越大, 而泊松比越小; 在定量相同的情况下, 白卡纸的泊松比和弹性模量都比灰底白板纸的大。

关键词: 数字图像相关方法; 灰底白板纸; 白卡纸; 泊松比; 弹性模量

中图分类号: TB484.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)23-0048-05

Comparison of the Elastic Constants between the Gray Manila Board and Ivory Board

CHU Xin-qing, JI Hong-wei

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to accurately measure the Poisson's ratio and Young's modulus of gray manila board and ivory board. The combination of digital image correlation method (DICM) and tensile test was used in this paper. The Poisson's ratio was measured by analyzing the images of the gray manila board and ivory board specimens before and after tensile deformation. And the Young's modulus was measured by analyzing the force-displacement curves of gray manila board and ivory board. The Poisson's ratio for gray manila board with ration of 300 and 400 g/m² was 0.281 and 0.245, respectively, and the Young's modulus was 154.47 and 226.06 MPa, respectively. The Poisson's ratio for ivory board with ration of 300 and 400 g/m² was 0.312 and 0.276, respectively, and the Young's modulus was 209.09 and 297.79 MPa, respectively. The higher ration corresponded to the higher Young's modulus and the lower Poisson's ratio for the same category of board. In the case of the same ration, the Young's modulus and Poisson's ratio of ivory board were higher than those of the gray manila board.

KEY WORDS: digital image correlation method; gray manila board; ivory board; Poisson's ratio; Young's modulus

白板纸是一种具有质地坚硬、耐折、耐冲击、表面洁白光滑等优点的包装用纸, 在包装装潢领域应用非常广泛。白卡纸是一种较厚实坚挺的白色卡纸, 由纯优质木浆制成, 并经压光或压纹处理^[1]。在我国市场

上, 包装用灰底白板纸和白卡纸的需求量非常大, 并且广泛应用于各类产品的包装上。随着社会的发展, 包装产品对于灰底白板纸和白卡纸的要求越来越高, 因此全面了解其各项性能显得尤为重要。

收稿日期: 2015-07-20

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(14JJCZDJC34600)

作者简介: 储信庆(1989—), 男, 天津人, 天津商业大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 计宏伟(1964—), 男, 辽宁人, 博士, 天津商业大学教授, 主要研究方向为运输包装。

目前对白板纸和白卡纸的研究主要集中在如下几个方面:王金林研究了纸盒抗压强度与白板纸挺度的关系^[2];苗根等指出了白卡纸在水性上光后的尺寸变化规律^[3];冷彩凤等研究了白卡纸印刷中的光泽度处理技术^[4];张雪梅等成功开发出了高松厚度的白卡纸^[5];李晓峰等提出了基于切线模量理论的白卡纸受压杆件稳定计算的方法^[6];可以看出,关于灰底白板纸和白卡纸的研究主要是生产工艺和外观质量的改进。目前对于灰底白板纸和白卡纸力学特性(如弹性模量、泊松比等)的研究少之又少,但在纸张力学性能(如抗张强度、耐破度、伸长率等)的评价标准中又时常需要应用其力学特性,所以,对灰底白板纸和白卡纸的力学特性的研究具有重要的意义。

数字图像相关方法(digital image correlation method, DIC)是目前应用最为广泛的光测力学方法之一,为测量材料的变形和位移提供了一种新的非接触式方法^[7-10]。如J.R.Yates等通过DIC方法量化了裂纹尖端的变形场^[11];U.Eitner等运用DIC方法检测了由温度引起的材料细微位移变形^[12]。M.C.Casperson等应用了多尺度DIC方法研究了疲劳裂纹闭合的热效应^[13]。计宏伟等应用DIC测量方法研究了纸浆模塑材料拉伸

时的力学性能^[14-15]。所有的研究结果均表明,DIC具有全场、高效、准确、操作相对简单并且可以对误差进行评估等优点^[16]。

1 数字图像相关方法

数字图像相关方法通过处理试件表面变形前后的数字图像,从而直接获取试件的位移和应变信息。试件表面可以进行人工喷涂散斑,也可以采用被测物体自身的纹理作为试件变形信息的载体。假设试件变形前任意一像素点的位置坐标为 (x, y) ,变形后该点位置移至 (x^*, y^*) ,则这一位置变化可由该点的水平位移分量 $u(x, y)$ 和竖直位移分量 $v(x, y)$ 表示:

$$\begin{cases} x^* = x + u(x, y) \\ y^* = y + v(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

如图1所示,在参考图像中选取尺寸为 $m \times n$ 的参考子区,设参考子区灰度分布函数为 $f(x, y)$,目标子区灰度函数为 $g(x^*, y^*)$,以子区灰度函数的相关性为标准来测试子区的位移信息。相关系数定义如式(2)所示:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) \cdot g[x_i + u(x_i, y_j), y_j + v(x_i, y_j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f^2(x_i, y_j) \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g^2[x_i + u(x_i, y_j), y_j + v(x_i, y_j)]}} \quad (2)$$

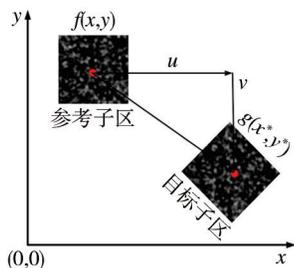


图1 数字图像相关方法原理

Fig.1 A schematic diagram for the principle of DICM

式中参考子区内任意点位移 $u(x_i, y_j)$ 和 $v(x_i, y_j)$ 的表达式称为形函数,依据连续介质力学,选择形函数如式(3)所示。式中: u 和 v 表示子区中心位移, Δx 和 Δy 表示 (x_i, y_j) 点与子区中心点的坐标差值, $\frac{\partial u}{\partial x}$,

$\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 表示子区中心点的一阶位移梯度。

$$\begin{cases} u(x_i, y_j) = u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ v(x_i, y_j) = v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (3)$$

将子区位移假设代入式(2),则相关系数成为以向量 $\mathbf{P}=[u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}]$ 为自变量的函数。由相关系数表达式可知,相关系数的取值范围为 $[0, 1]$ 。相关系数的极大值表示目标子区与参考子区最为匹配。利用各种最优化方法求解相关系数极值,此时对应的向量 \mathbf{P} 的值即为待求子区中心点的变形信息。目前,已有多款DICM方法的商业软件供用户使用。文中采用VIC-2D软件(Vic-2D 2009, Correlated Solutions, Columbia, SC, USA)实现试件全场变形测试。

2 实验

2.1 材料

1) 白卡纸,广州市至大纸业有限公司,定量为 300 g/m^2 时的含水率为 $(7.5 \pm 1.0)\%$,横向挺度为 $6.2 \text{ mN} \cdot \text{m}$,层间结合强度为 115 J/m^2 ;定量为 400 g/m^2 时的含水率为 $(8.0 \pm 1.0)\%$,横向挺度为 $12.0 \text{ mN} \cdot \text{m}$,层间结合强度为 125 J/m^2 。

2) 灰底白板纸,广州市至大纸业有限公司,定量为 300 g/m^2 时的含水率为 $(7.5 \pm 1.0)\%$, 横向挺度为 $6.2 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 层间结合强度为 115 J/m^2 ; 定量为 400 g/m^2 时的含水率为 $(8.0 \pm 1.0)\%$, 横向挺度为 $12.0 \text{ mN}\cdot\text{m}$, 层间结合强度为 125 J/m^2 。

2.2 试件处理和尺寸测量

为了测得上述材料在拉伸时的弹性模量和泊松比,进行了拉伸实验。试件的尺寸参考 ISO 1924—2 设计,试件形状见图 2a。由于要使用数字图像相关方法计算纸张的泊松比,所以要对灰底白板纸和白卡纸进行喷斑处理,喷斑后的试件见图 2b。

试件制作时,采用专用的可调距切纸刀进行切割。试件的厚度采用电动厚度测定仪测量,在一个试件上的 3 个不同位置分别测量其厚度值,然后取 3 个

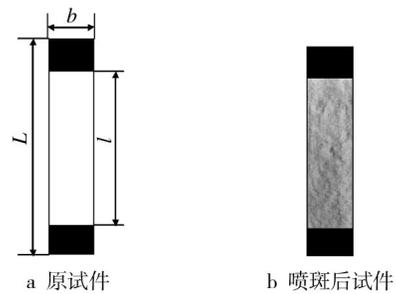


图2 拉伸试件

Fig.2 Tensile test specimen

厚度的平均值作为最终厚度的计算值。试件的长度、宽度和夹钳距离(试件受拉伸部分的距离)采用游标卡尺测量,试件的尺寸见表 1。

表1 试件尺寸

Tab.1 Specimen dimensions

试件材料	试件编号	厚度 t/mm	紧度 $(\times 10^5)/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	宽度 b/mm	横截面 mm^2	试件长度 L/mm	夹钳距离 l/mm
灰底白板纸 (300 g/m^2)	A1	0.356	8.43	15.50	5.518	70.18	50.14
	A2	0.358	8.38	15.48	5.542	70.48	50.04
	A3	0.359	8.36	15.48	5.557	70.54	50.08
灰底白板纸 (400 g/m^2)	B4	0.486	8.23	14.98	7.280	70.60	50.04
	B5	0.474	8.44	15.20	7.205	70.72	49.96
	B6	0.470	8.51	15.62	7.341	70.48	50.02
白卡纸 (300 g/m^2)	C7	0.413	7.26	15.16	6.261	70.68	49.98
	C8	0.414	7.25	15.48	6.409	70.80	50.04
	C9	0.415	7.23	15.30	6.350	70.70	50.06
白卡纸 (400 g/m^2)	D10	0.551	7.26	15.32	8.441	70.52	50.02
	D11	0.556	7.19	15.46	8.596	70.54	50.12
	D12	0.552	7.25	15.48	8.545	70.48	50.08

2.3 拉伸试验

拉伸试验在岛津 AG-5TA 型自动控制电子万能材料试验机上进行,加载方式为单向拉伸,试验过程参考 ISO 1924—2,加载速率设置为 12 mm/min 。试验采用的数字图像采集系统见图 3,选择合适倍率的镜头连接到 CCD 相机上,并且将 CCD 相机与装有图像采集软件的电脑相连。之后,调整光源及 CCD 镜头的位置,使计算机采集到的图像达到清晰的效果。同时设置好岛津 AG-5TA 型自动控制电子万能材料试验机加载参数,然后便可进行拉伸实验。

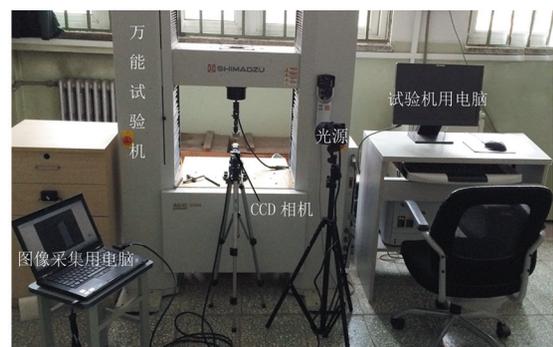


图3 数字图像相关方法测试系统

Fig.3 The experimental system of DICM

3 结果与讨论

试验应用岛津 AG-5TA 型自动控制电子万能材料

试验机,可以输出试件在单向拉伸过程中的力-位移曲线,不同定量的灰底白板纸和白卡纸的力-位移曲线见图 4。

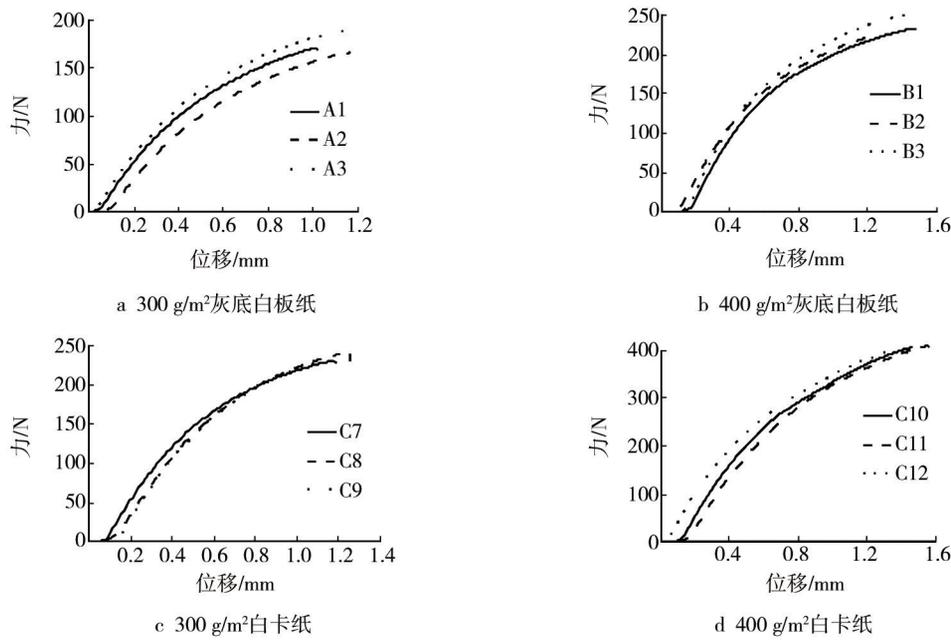


图4 不同定量的灰底白板纸和白卡纸的力-位移曲线

Fig.4 Force-displacement curves of gray manila board and ivory board with different ration

试验过程中,通过数字图像采集系统记录了加载前后的2幅散斑图像,以这2幅散斑图作为测量灰底白板纸和白卡纸变形的原始数据,应用VIC-2D软件计算出试件的位移场和应变场,由此可以得出试件的横向应变和纵向应变。本次试验分别计算了每个试件上3个不同位置的横向应变和纵向应变,每个试样对应的3个横向应变值如下:A1(0.001 08,0.000 99,0.001 11),A2(0.001 81,0.002 09,0.001 72),A3(0.002 44,0.001 72,0.002 16);B4(0.001 37,0.001 49,0.001 41),B5(0.001 14,0.001 03,0.001 09),B6(0.001 21,0.001 28,0.001 29);C7(0.001 71,0.001 32,0.001 34),C8(0.001 46,0.001 74,0.001 35),C9(0.001 13,0.001 49,0.001 27);D10(0.002 04,0.002 38,0.002 06),D11(0.002 01,0.002 01,0.002 37),D12(0.001 16,0.001 08,0.001 41);每个试样对应的3个纵向应变值如下:A1(0.004 41,0.003 21,0.003 56),A2(0.007 02,0.007 05,0.007 09),A3(0.007 18,0.006 97,0.007 73);B4(0.005 12,0.005 61,0.005 24),B5(0.004 93,0.004 63,0.004 93),B6(0.005 21,0.005 13,0.005 25);C7(0.004 73,0.004 01,0.004 27),C8(0.004 89,0.004 87,0.004 20),C9(0.004 66,0.004 95,0.004 53);D10(0.007 22,0.007 19,0.007 67),D11(0.007 98,0.007 64,0.008 42),D12(0.004 53,0.004 29,0.004 79)。

由图4所得力-位移曲线,可以计算出试件的弹性模量,由计算所得的横向应变和纵向应变,可以计算出试件的泊松比。综合上述计算结果,灰底白板纸和

白卡纸的弹性模量和泊松比见表2。通过标准差的数值可以计算出标准差对结果的影响都在10%以内,即实验结果比较集中。

表2 弹性模量和泊松比计算结果

Tab.2 Calculation results of Poisson's ratio, Young's modulus

试件编号	弹性模量/MPa	弹性模量平均 值/MPa	弹性模量标准 差/MPa	泊松比	泊松比 平均值	泊松比 标准差
A1	157.89			0.288		
A2	139.79	154.47	13.3	0.266	0.281	0.013
A3	165.72			0.289		
B4	214.81			0.267		
B5	237.72	226.06	11.5	0.225	0.245	0.021
B6	225.65			0.245		
C7	212.04			0.335		
C8	201.46	209.09	6.67	0.326	0.312	0.031
C9	213.78			0.275		
D10	322.05			0.294		
D11	285.87	297.79	21.0	0.265	0.276	0.016
D12	285.45			0.267		

4 结语

灰底白板纸和白卡纸广泛应用于各种包装产品的包装,全面了解其各项性能是非常有必要的。从灰

底白板纸和白卡纸的单向拉伸试验入手,测量了灰底白板纸和白卡纸的弹性模量和泊松比,具体试验与分析结果如下所述。

1) 通过对试样进行单向拉伸实验测定了其弹性模量,测得 300,400 g/m²的灰底白板纸的弹性模量分别为 154.47,226.06 MPa;300,400 g/m²的白卡纸的弹性模量分别为 209.09,297.79 MPa。

2) 通过对试样变形前后的图像进行分析,测得 300,400 g/m²的灰底白板纸的泊松比分别为 0.281 和 0.245;300,400 g/m²的白卡纸的泊松比分别为 0.312 和 0.276。

3) 同种类别纸板定量越高,弹性模量就会越高,而泊松比会越低。在定量相同的情况下,白卡纸的弹性模量和泊松比都大于灰底白板纸的弹性模量和泊松比。

参考文献:

- [1] 吕勇,崔鹏坤,方伟,等.灰底白板纸与白卡纸色彩再现性能比较[J].包装工程,2008,29(1):71—74.
LYU Yong, CUI Peng-kun, FANG Wei, et al. Contrast on Color Reappearance between Grey Manila Board and Ivory Board[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 71—74.
- [2] 王金林.纸盒抗压强度与白板纸挺度[J].包装工程,1989,10(1):49—51.
WANG Jin-lin. The Relationship between the Compression Resistance of Folding Box and the Stiffness of the Boxboard[J]. Packaging Engineering, 1989, 10(1): 49—51.
- [3] 苗根.白卡纸水性上光工艺的纸张变形测试与研究[J].印刷杂志,2011(9):64—66.
MIAO Gen. Measurement and Research of Deformation of Ivory Board after Water-based Varnishing[J]. Print Magazine, 2011(9): 64—66.
- [4] 冷彩凤,郭凌华,刘国栋,等.纸包装印刷中的光泽度处理技术研究[J].包装工程,2012,33(11):112—114.
LENG Cai-feng, GUO Ling-hua, LIU Guo-dong, et al. Research of Gloss Enhancing Treatment Technology in Paper Packaging and Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 112—114.
- [5] 张雪梅.晨鸣集团成功开发高松厚度白卡纸[J].纸和造纸,2011(12):42—42.
ZHANG Xue-mei. High Bulk of Ivory Board Is Successfully Developed by Group of ChenMing[J]. Paper and Paper Making, 2011(12): 42—42.
- [6] 李晓锋.基于切线模量理论的白卡纸受压杆件稳定计算[J].门窗,2012(8):373—376.
LI Xiao-feng. Calculation of Compression Bar of Ivory Board Based on the Tangent Modulus Theory[J]. Doors and Windows, 2012(8): 373—376.
- [7] HUA T, XIE H, WANG S, et al. Evaluation of the Quality of a Speckle Pattern in the Digital Image Correlation Method by Mean Subset Fluctuation[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 9—13.
- [8] PAN B. Recent Progress in Digital Image Correlation[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(7): 1223—1235.
- [9] KROTTENTHALER M, SCHMID C, SCHAUFLE J, et al. A Simple Method for Residual Stress Measurements in Thin Films by Means of Focused Ion Beam Milling and Digital Image Correlation[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 215: 247—252.
- [10] YA' AKOBOVITZ A, KRYLOV S, HANEIN Y. Nanoscale Displacement Measurement of Electrostatically Actuated Micro-devices Using Optical Microscopy and Digital Image Correlation[J]. Sensor Actuat A-Phys, 2010, 162(1): 1—7.
- [11] YATES J R, ZANGANEH M, TAI Y H. Quantifying Crack Tip Displacement Fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(11): 2063—2076.
- [12] EITNER U, K NTGES M, BRENDEL R. Use of Digital Image Correlation Technique to Determine Thermomechanical Deformations in Photovoltaic Laminates: Measurements and Accuracy[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(8): 1346—1351.
- [13] CASPERSON M C, CARROLL J D, LAMBROS J, et al. Investigation of Thermal Effects on Fatigue Crack Closure Using Multiscale Digital Image Correlation Experiments[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 61: 10—20.
- [14] 计宏伟,余本农,平幼妹,等.用数字相关测量方法研究纸浆模塑材料拉伸时的力学性能[J].包装工程,2004,25(4):168—170.
JI Hong-wei, YU Ben-nong, PING You-mei, et al. Investigation of the Mechanical Properties of Molded Pulp with DICM[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 168—170.
- [15] 计宏伟,邵文泉,王和敏,等.纸浆模塑材料在不同加载条件下的力学特性[J].包装工程,2007,28(8):10—13.
JI Hong-wei, SHAO Wen-quan, WANG He-min, et al. Mechanical Properties of Molded Pulp under Various Loading Conditions[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 10—13.
- [16] 张晓川,陈金龙,赵钊,等.基于双线性位移模式数字图像相关方法的误差分析及应用[J].实验力学,2013,28(6):683—691.
ZHANG Xiao-chuan, CHEN Jin-long, ZHAO Zhao, et al. Error Analysis and Application of Digital Image Correlation Based on Bilinear Displacement Approximation[J]. Experimental Mechanics, 2013, 28(6): 683—691.