

应用数字图像相关法测定瓦楞原纸的泊松比

曹小龙, 谢 勇, 毕中臣, 言丽容

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对瓦楞原纸泊松比的测定存在许多困难, 传统的接触式方法难以满足测定要求, 还没有一种简单高效的方法能解决这个问题。针对传统位移测量方法的不足, 提出以数字图像相关法测定瓦楞原纸的泊松比。通过对试样变形前后的图像进行相关性位移分析, 将试验所得的实测位移与已标定位移进行对比, 所得结果具高度的一致性, 相对误差范围为 1%~3%。试验测定面纸 MD (machine direction) 方向和 CD (cross-machine direction) 方向的泊松比分别为 0.175 和 0.073, 芯纸 MD 方向和 CD 方向的泊松比分别为 0.275 和 0.119。测试及分析结果表明, 应用数字图像相关法测定瓦楞原纸的方法是可行的, 具有较佳的应用价值, 能为研究纸张的泊松比提供一个新途径。

关键词: 数字图像相关法; 瓦楞原纸; 泊松比; 标定

中图分类号: TB487; TB484.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2011)03-0031-05

Use of Digital Image Correlation Method for Poisson's Ratio of Corrugated Paper

Cao Xiaolong, Xie Yong, Bi Zhongchen, Yan Lirong

(School of packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: There were many difficulties for measuring Poisson's ratio of corrugated paper. It was hard to satisfy the determination of requirements with the traditional contract method. A simple and efficient way had not been proposed to solve this problem. For disadvantages of the traditional method to measure displacements, digital image correlation method was proposed to measure Poisson's ratio of corrugated paper. The images taken before and after samples deformed were analyzed about related displacements. Composing measured displacements in the experiment with calibration ones led to highly coincident result. The relative error was from 1%~3%. The Poisson's ratio of corrugated facing paper in MD and CD were 0.175 and 0.073, respectively. The one of corrugated medium in MD and CD were 0.275 and 0.119, respectively. Test and analytic results showed that DIC was feasible, and had actual using value, and was a new approach to test and investigate Poisson's ratio of paper.

Key words: digital image correlation method; corrugated paper; poisson's ratio; calibration

1 研究背景

泊松比是材料的一个固有属性, 它能反映材料在伸缩变形时的变化情况, 因而是材料形变性能的一项

重要指标, 在理论研究和工程设计中有着广泛的应用。目前, 研究者们对于材料泊松比的测定, 常采用传统的接触式方法。如对于金属材料, 可参照国家标准 GB/T 22315—2008^[1]对其泊松比进行测定, 试验

收稿日期: 20101-03-13

基金项目: 中央财经资助包装行业高新技术研发基金资助项目(湘财企指[2008]115号)

作者简介: 曹小龙(1986-), 男, 湖南长沙人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为产品包装安全与环境,

E-mail: xiaolong_0731@qq.com

时通过横向引伸计和纵向引伸计自动记录方法绘制横向-纵向应变曲线,得到材料的泊松比。另外,电测法也属于接触式方法,该法在试样上附加电阻应变片,通过收集其测量形变位移数据而得到材料的泊松比^[2]。

由于纸张的弹性性能小,因而其横向变化非常微小,导致材料的横向应变测量比较困难。加上纸张非常薄,质地柔软,受力非常敏感,以借助夹具的接触式方法测量其横向应变的传统方法显然不合适。若在纸张上附加电阻应变片,则测量的准确性会受其刚度影响,将引起较大的误差,可见,电测法也不适合测量纸张的横向应变。徐莹等人根据数字全息干涉技术的基本原理,通过测量干涉条纹图样中相同相位条纹的渐近线之间的夹角确定材料的泊松比。但数字全息干涉技术对实验仪器的要求非常高,实验难度较大^[3]。显然,目前还没有一种简单有效测定纸张泊松比的方法。然而,纸制包装已广泛应用于各类产品包装上,且产品对包装材料的力学性能要求越来越高,全面了解材料的各项性能显得尤为重要。因此,对纸张泊松比的研究是必要的、非常有价值的。

数字图像相关法(digital image correlation method, 简称 DIC)为测量材料的位移和形变提供了一种新的非接触式方法。如 Ulrich Eitner 等人运用 DIC 检测了由温度引起的材料细微位移形变^[4]; J. R. Yates 等人通过 DIC 研究了塑料受力破损时,裂缝的变化及其位移增长趋势^[5]。F. M. Sánchez-Arévalo 等人以金属铝作为测试材料之一,通过 DIC 获得了其位移形变场^[6]。孙伟等人利用 DIC 在双轴拉伸试验条件下,对优质膜材的荷载伸长力学特性及徐变特性进行了试验研究^[7]。所有的研究结果均表明, DIC 具全场、高效、准确、操作相对简单等优点^[8-9]。因此,笔者拟采用 DIC 对瓦楞纸张在拉伸试验下的横向与纵向位移进行检测,并通过所测得的位移形变求出材料的泊松比。

2 数字图像相关原理

DIC 是一种基于物体表面图像灰度分析从而获得物体形变和位移的方法,其基本原理是统计学中的相关性原理,如图 1 所示。

图 1 中的图像 I 和 J 分别为形变前后的灰度图像。对图像 I 中的子区域 f 与图像 J 中相应子区域进行相关性运算,若以点 $P(x, y)$ 为中心的子区域 f 与以点 $Q(x', y')$ 为中心的子区域 g 匹配成功,则说明点 $P(x, y)$

所在位置经过形变运动到了点 $Q(x', y')$ 所在位置, \vec{R} 就是两子区域的位移向量。 P 点的横向位移量 $\Delta x = x' - x$, 纵向位移量 $\Delta y = y' - y$ 。

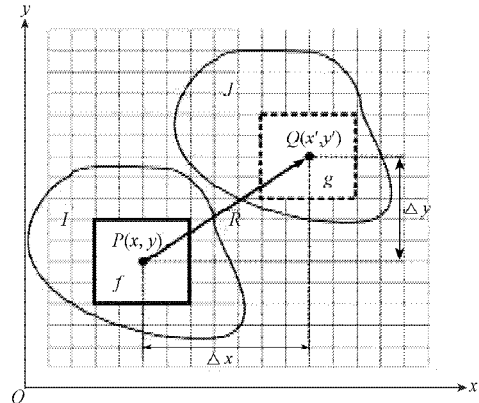


图 1 DIC 原理

Fig. 1 Principle of DIC

相关性运算需要选取一个合适的相关度量函数,其定义如下:

$$C(x, y) = \frac{\sum \sum [f(x, y) - \bar{f}] \cdot [g(x', y') - \bar{g}]}{\sqrt{\sum \sum [f(x, y) - \bar{f}]^2 \cdot \sum \sum [g(x', y') - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中:

$f(x, y)$ 和 $g(x', y')$ 为图像 I 和图像 J 各子区域中像素的灰度值, \bar{f} 和 \bar{g} 为子区域像素的灰度平均值。

一般情况下,若 $C(x, y)$ 中的最大值越接近 1,表明匹配程度越高,反之则越低。

3 试验

3.1 试样的制备及试验描述

试验过程中所使用的瓦楞面纸和芯纸的具体参数如表 1 所示。

表 1 试样参数

Table 1 Parameters of samples

编组	方向	面积/mm ²	克重/(g·m ⁻²)	厚度/mm
A	面纸 CD	100 × 25	274	0.367 5
B	面纸 MD			
C	芯纸 CD		118	0.201 4
D	芯纸 MD			

试验中,每组各取 5 个试样,共计 20 个试样。试验时先将所有试样置于温度为 23 ℃、湿度为 50% 的恒温恒湿箱中处理 24 h。然后在 SANS 电子万能试验机上进行拉伸试验。拉伸试验时采用 100 N 的引伸计传感器,设定加载速率为 5 mm/min,且沿其长度方向

拉伸试样。

3.2 图像的采集

纸张是由细微的植物纤维通过相互交织等一系列造纸工艺而形成的一种薄膜型物质。通过拉伸实验可得瓦楞原纸的力与位移曲线如图2所示。

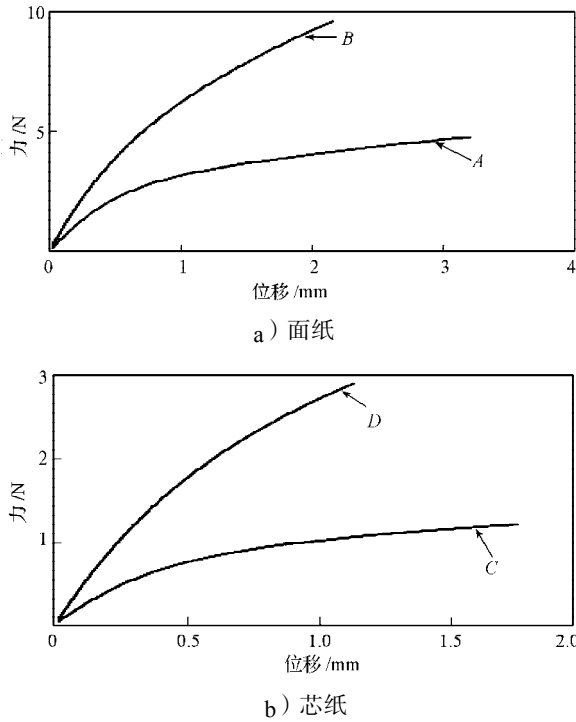


图2 瓦楞原纸的力与位移曲线

Fig. 2 Force-displacement curve of corrugated paper

从图2中可以看出,瓦楞原纸的拉伸表现出弹性与非弹性2种状态,并且这2种状态没有明显的区分界限。弹性阶段的曲线应近似于一条直线,因此可得试样A,B,C和D分别在[0, 1.5],[0, 3],[0, 0.5],[0, 1.2]的受力区间下为弹性状态,所采集的图像I和图像J即为瓦楞原纸弹性阶段的受力等于区间两端点力值时的图像。

将A,B,C和D 4组试样分别按所受力区间进行试验,所得瓦楞原纸在弹性阶段的力与位移曲线如图3所示。

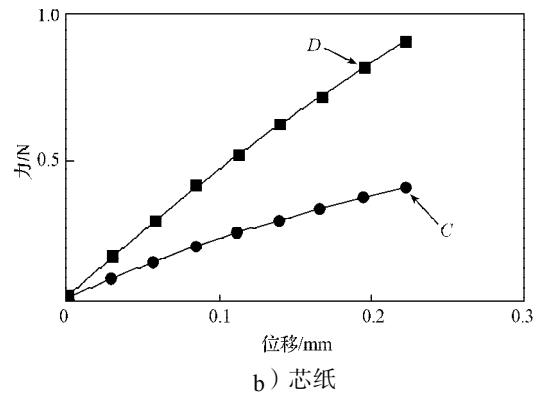
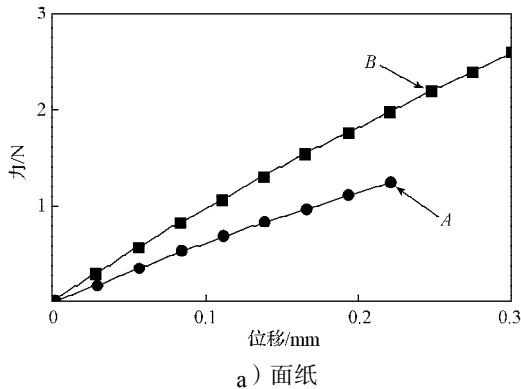


图3 瓦楞原纸弹性阶段的力与位移曲线

Fig. 3 Force-displacement curve of corrugated paper during elastic stage

从图3中可以看出,所选受力区间下的曲线图均近似为一条直线,这证明试样在该拉伸过程中均是处于弹性阶段下的。

4 结果与讨论

4.1 位移场分析

实验所得试样的拉伸位移场如图4所示,其中的图a)为拉伸后试样各部分位置的整体位移形变状况,图b)为试样顶部的局部放大位移形变状况,图c)为试样底部的局部放大位移形变状况。从图a)中可以看出,试样的拉伸是一个非均匀的形变过程,从下到上拉伸的程度是逐渐增大的。而图b)和c)中反映出试样靠近底部夹具的部分被拉伸的程度很小,其纵向位移量非常小;而靠近顶部夹具的部分相对底部被拉伸的程度很大,纵向位移量很大,而这两部分在横向上都发生了很微小的位移形变。

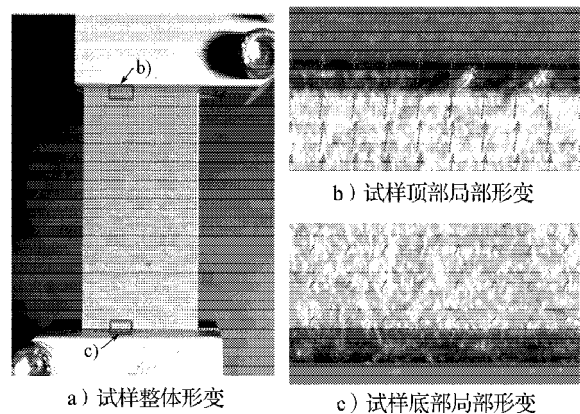


图4 拉伸位移场

Fig. 4 Displacement field of stretching

4.2 标定

为了检验采用数字图像相关方法的试验准确性,笔者将所测得的位移像素转变为实际的空间距离

(标定位移), 并与电子拉力机实测所得数据(实测位移)进行比较。依据数码相机标定技术^[9-10], 两夹具间的试样长度为 50 mm, 宽为 25 mm, 图像分辨率为 1 944 pixel × 2 592 pixel 时, 试样在长度方向上的平均像素个数为 1 685 个, 每个像素的实际距离等于 0.029 7 mm; 所测宽度方向像素个数平均为 854 个, 每个像素的实际距离等于 0.029 3 mm, 综合所得 2 个方向的实际距离, 取 0.029 5 mm/pixel 作为本实验测定标准, 该误差为 0.5%。

4.3 试验数据处理

运用数字图像相关法进行两图像间的相关性运算, 计算出横向与纵向位移像素, 以标定的方式转换为实际空间位移, 并将其与实测位移进行比较, 各组试样的试验数据如表 2 所示。

表 2 试样的试验数据

Table 2 The experimental data of the sample

组别	编号	横向位移/ pixel	纵向位移/ pixel	标定位移/ mm	实测位移/ mm	相对误差/ %
A	1	0.390	9.438	0.278	0.278	0.153
	2	0.291	8.591	0.253	0.259	2.152
	3	0.298	9.381	0.277	0.282	1.861
	4	0.371	9.427	0.278	0.286	2.765
	5	0.340	9.349	0.276	0.281	1.854
B	1	0.949	11.405	0.336	0.347	3.044
	2	1.092	12.500	0.369	0.378	2.447
	3	1.207	13.009	0.384	0.392	2.099
	4	1.112	12.393	0.366	0.383	4.547
	5	1.007	11.986	0.354	0.358	1.232
C	1	0.708	11.236	0.331	0.339	2.226
	2	0.702	11.593	0.342	0.340	0.587
	3	0.681	11.438	0.337	0.334	1.025
	4	0.679	11.450	0.338	0.344	1.809
	5	0.658	12.026	0.355	0.364	2.535
D	1	1.563	11.738	0.346	0.354	2.183
	2	1.507	11.229	0.331	0.336	1.410
	3	1.588	11.237	0.331	0.334	0.749
	4	1.521	10.914	0.322	0.328	1.838
	5	1.475	10.481	0.309	0.320	3.374

表 2 中的横向位移和纵向位移是通过 DIC 得到的位移像素点个数。标定位移则是纵向位移和标定的单位像素长度的乘积, 再由图像距离转变为实际空间距离。从表 2 中可以看出, 通过 DIC 得到的标定位移与 SANS 电子万能试验机所得实测位移的相对误差范围为 1%~3%, 这表明 DIC 得到的结果与实测结果具有高度的一致性。

4.4 泊松比

泊松比即弹性状态拉伸时横向应变与纵向应变

之比的绝对值, 可用下式表示:

$$\mu = \left| \left(\frac{\Delta d}{d} \right) / \left(\frac{\Delta l}{l} \right) \right| = \left| \frac{\Delta d}{\Delta l} \right| \cdot \frac{l}{d} \quad (2)$$

式(2)中: μ 为泊松比;

Δd 为横向位移量;

Δl 为纵向位移量;

d 为瓦楞原纸试样宽度;

l 为瓦楞原纸试样长度。

运用公式(2)计算瓦楞原纸试样的泊松比, 可得如表 3 所示结果。

表 3 泊松比

Table 3 Poisson's ratio

组别	试样泊松比					平均值
	1	2	3	4	5	
A	0.083	0.068	0.064	0.079	0.073	0.073
B	0.166	0.175	0.186	0.179	0.168	0.175
C	0.126	0.121	0.119	0.119	0.109	0.119
D	0.266	0.268	0.283	0.279	0.281	0.275

从表 3 中可看出, 瓦楞面纸沿 CD 方向和 MD 方向的泊松比均值分别为 0.073 和 0.175; 芯纸沿 CD 方向和 MD 方向的泊松比均值分别为 0.119 和 0.275。

5 结论

1) 采用数字图像相关法可方便地测定纸张等薄形材料的泊松比, 本研究测得瓦楞面纸 MD 和 CD 方向的泊松比分别为 0.175 和 0.073, 芯纸为 0.275 和 0.119。

2) 通过 DIC 以标定方式所得位移与试验仪器得到的实测位移是一致的, 总体相对误差约为 3%。

3) 为进一步提高测量的精准度, 可增加图像上的有效像素, 使单位像素实测距离提高, 在算法上可运用亚像素灰度插值等提高位移测量精度^[11]。

由以上结论可看出, 数字图像相关法能够很好地克服传统接触式方法所带来的困难, 达到所需测量的要求, 为研究纸张的泊松比提供了一条新的测试途径。

参考文献:

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22315—2008 金属材料 弹性模量和泊松比实验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-25.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 22315—2008 Metallic Materials Determination of Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-25.

- [2] 邵显智, 邵敏华, 毕玉峰, 等. 沥青混合料泊松比的测试方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 1470-1474.
Shao Xianzhi, Shao Minhua, Bi Yufeng, et al. Testing Method of Asphalt Mixture Poisson Ratio[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(11): 1470-1474.
- [3] 徐莹, 赵建林, 范琦, 等. 利用数字全息干涉术测定材料的泊松比[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 787-790.
Xu Ying, Zhao Jianlin, Fan Qi, et al. Determination of the Poisson's Ratio of Material by Digital Holographic Interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(6): 787-790.
- [4] Ulrich Eitner, Marc Kontges, Rolf Brendel. Use of Digital Image Correlation Technique to Determine Thermomechanical Deformations in Photovoltaic Laminates: Measurements and Accuracy[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2010, 94: 1346-1351.
- [5] Yates J R, Zanganeh M, Tai Y H. Quantifying Crack Tip Displacement Fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77: 2063-2076.
- [6] Sánchez-Arévalo F M, Pulos G. Use of Digital Image Correlation to Determine the Mechanical Behavior of Materials[J]. Materials Characterization, 2008, 59: 1572-1579.
- [7] 孙伟, 何小元, 胥明, 等. 数字图像相关方法在膜材拉伸试验中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 34-38.
Sun Wei, He Xiaoyuan, Xu Ming, et al. Study on the Tension Test of Membrane Materials Using Digital Image Correlation Method[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 34-38.
- [8] 陈荣华, 王路珍, 孔海陵. 数字图像相关法在相似材料模拟试验中的应用[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 605-611.
Chen Ronghua, Wang Luzhen, Kong Hailing. Application of Similar Material Simulating Experiment Based on DICM[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6): 605-611.
- [9] 姜大志, 孙闵, 刘森, 等. 数码相机标定方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(1): 55-59.
Jiang Dazhi, Sun Min, Liu Miao, et al. Research on Digital Camera Calibration Method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(1): 55-59.
- [10] 张健新, 段发阶, 叶声华. 简便的高精度摄像机标定技术[J]. 仪表仪器学报, 1999, 20(2): 193-196.
Zhang Jianxin, Duan Fajie, Ye Shenghua. An Easy Accurate Calibration Technique for Camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(2): 193-196.
- [11] Li Fuwen, Xu Chao, Jin Weiqi, et al. Research of Sub-Pixel Location Algorithm Based on Image Correlation[J]. Proc. of SPIE, 2007, 6835: 410-416.

(责任编辑: 廖友媛)

(上接第30页)

- Li Ting, Zhong Zehui, Shao Jie, et al. Development of Food Packaging Materials[J]. Packaging Journal, 2011, 3(2): 34-36.
- [5] 张丽, 董占华, 唐亚丽, 等. 酸性浸泡液种类对于釉中彩陶瓷盘有害物质溶出量的影响研究[J]. 包装工程, 2010, 31(23): 47-49.
Zhang Li, Dong Zhanhua, Tang Yali, et al. Effect of Acidic Leachates on Release of Hazardous Substances from In-Glaze Colored Pottery Ceramic Disc[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(23): 47-49.
- [6] 陶溶溶, 余定学, 王亮, 等. 砷形态水样贮存方法及稳定性研究[J]. 干旱环境监测, 2000(4): 193-196.
Tao Rongrong, Yu Dingxue, Wang Liang, et al. Study on the Reserving Methods and Stability of Arsenic Species Water Sample[J]. Arid Environmental Monitoring, 2000(4): 193-196.
- [7] John R M. Sampling and Storage of Materials for Trace Element Analysis[J]. Int. J. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1983, 2(5): 116-118.
- [8] John R M, Richard M L. Selection and Cleaning of Plastic Containers for Storage of Trace Element Samples[J]. Int. J. Anal. Chem., 1977, 49(14): 2264-2267.
- [9] Duncan P H L, Roy M H. Cleaning Methods for Polythene Containers Prior to the Determination of Trace Metals in Freshwater Samples[J]. Int. J. Anal. Chem., 1981, 53(2): 345-350.
- [10] Cyrus F. Preservation of Dilute Mercury Solutions[J]. Int. J. Anal. Chem., 1974, 46(1): 99-102.
- [11] Subramanian K S, Chakrabarti C L, Sueiras J E. Preservation of Some Trace Metals in Samples of Natural Waters[J]. Int. J. Anal. Chem., 1978, 50(3): 444-448.

(责任编辑: 徐海燕)