

散斑打印技术及其在纸弹性模量测试中的应用

贾佩星, 崔春丽, 宋展宏, 侯雅宁, 滕立军, 张晓川
(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 基于数字图像相关方法和可控散斑打印技术实现纸弹性模量的非接触测试。**方法** 由于纸是可打印材料, 可利用打印机将设计制作的高质量散斑图打印在纸试样的标距两端, 在单轴拉伸过程中, 利用数字图像相关方法测试标距线应变, 将应变值与拉伸机得到的应力值进行线性拟合, 即可计算得到纸的弹性模量。**结果** 利用文中方法测试定量为 80 g/m^2 牛皮纸的纵向弹性模量 3 个试件平均值为 1900 MPa。**结论** 通过对模拟图像参数的合理设计, 使纸张具有高质量的散斑图, 并且印刷油墨对纸张力学性能的影响最小。将提出的方法用于测量牛皮纸的弹性模量, 3 个试样的测量结果偏差很小, 在一定程度上证明了该方法具有良好的可靠性。

关键词: 散斑; 数字图像; 相关法; 弹性模量

中图分类号: TB484.1; TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0199-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.034

Speckle Printing Technology and Its Application in Elastic Modulus Measurement of Paper

JIA Pei-xing, CUI Chun-li, SONG Zhan-hong, HOU Ya-ning, TENG Li-jun, ZHANG Xiao-chuan
(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The work aims to realize the non-contact testing of paper elastic modulus based on digital image correlation method and controlled speckle printing technology. Because the paper was a printable material, the high quality speckle pattern designed and fabricated could be printed on both ends of the gauge distance of the sample paper by the printer. In the uniaxial tension process, the linear strain of the gauge was measured by digital image correlation method, and the elastic modulus of the paper could be calculated by linearly fitting the strain value with the stress value obtained by the stretcher. In the proposed method, three samples with longitudinal modulus of elasticity of 80 g/m^2 kraft paper was tested, and the average test value was 1900 MPa. Based on the reasonable design of the simulated image parameters, the paper possesses high quality speckle pattern and the effect of the print ink on the mechanical property of the paper is the least. The proposed method is applied to measure elastic modulus of the kraft paper. The deviation of the measured results of three samples is small, which proves the good reliability of the proposed method to some extent.

KEY WORDS: speckle; digital image correlation; elastic modulus

纸是包装工程中广泛使用的重要材料^[1], 测量纸的力学参数如纸的弹性模量和泊松比对于纸基包装设计具有重要的意义^[2]。目前有很多方法可以测量纸的弹性模量, 大致可以分为接触测量和非接触测量 2 类。接触传感器, 如电阻应变片和引伸计, 由于其精度高的优点已被广泛用于测量金属材料的弹性

模量^[3]。但是, 由于纸张既薄又柔软, 接触式传感器会严重影响纸张的力学性能, 传统的拉伸试验利用目前位移传感器, 在没有接触式传感器的情况下虽然能记录纸张的伸长率, 但在加载的过程中试样与夹具之间会不可避免地产生滑移, 使得测量的弹性模量并不可信, 因此用非接触技术来测量纸张的弹性模量是非

收稿日期: 2017-11-28

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划 (201610069039)

作者简介: 贾佩星 (1992—), 女, 天津商业大学硕士生, 主攻复合材料力学性能。

通信作者: 张晓川 (1985—), 男, 博士, 天津商业大学讲师, 主要研究方向为光测力学。

常有必要的。非接触式超声技术已成功用于测量纸张的弹性模量^[4],但是这种方法由于测试系统和计算理论的复杂性而没有得到广泛的应用。光学引伸计是一种非接触式传感器,可用于测量拉伸试验中标距长度的平均应变^[5-6],因此,可以通过光学引伸计和拉伸机的结合来测量材料的弹性模量,但变形标记的质量和算法会影响这种技术的准确性。

数字图像相关是一种非接触式全场变形测量技术,由于其实验过程简单、精度高,广泛用于材料的多尺度变形分析^[7-9]。基于数字图像相关光学引伸计已被开发并用于测量标距长度的平均应变^[10-11],因此这种技术非常适用于测量材料的弹性模量^[12-13]。数字图像相关的测量精度与样品表面散斑图案的质量密切相关^[14-15],由于纸非常薄,纸张表面的人工散斑制作会影响纸张的力学性能,因此,数字图像相关技术还没有广泛地用于测量纸张的弹性模量。

目前,有很多高质量散斑图的多尺度制作技术^[16-19],显然,由于纸可打印且模拟散斑图参数可控,通过打印机打印出的散斑图案是比较理想的^[20]。文中首先提出一种用于散斑制作的模拟图像设计方法;然后,将制备的牛皮纸试件进行拉伸试验;最后,利用该方法计算出牛皮纸的弹性模量。

1 可控散斑的数字图像相关原理

1.1 模拟图像设计

计算机图像模拟可以很好地控制散斑质量,已经广泛用于验证改进数字图像相关算法的性能^[21-23]。模拟散斑图可以通过式(1)来生成:

$$I(x, y) = \sum_{k=1}^s I_0 \exp \left[-\frac{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}{a^2} \right] \quad (1)$$

式中: I 为像素点 (x, y) 的灰度值; I_0 为每个斑点的最大灰度值,通常设置为 255,用来提高模拟图像的对比度; s 为散斑的总个数; a 为散斑大小; (x_k, y_k) 为每个斑点随机分布的位置。为了在纸张上制作最佳散斑图样,需要设计 3 个关键参数(即图像大小、散斑尺寸和散斑总数)。

大多数打印机都可以打印 A4 纸,因此,用 A4 纸在纸的两端以一定的标距打印出模拟散斑图。然后用切纸机将 A4 纸切割成标准试件,并进行拉伸试验。根据试样的制备过程,可以确定模拟图像的宽度为 A4 纸的宽度。模拟图像的分辨率为 96 dpi,可以计算出模拟图像的宽度大约为 794 像素。显然,印刷油墨对纸张试样的力学性能影响可以通过印刷区域的减少而减少,因此,应该设计出一个最佳高度的模拟图像来减少印刷区域。在拉伸试验中,常用 CCD 相机获取试样的图像,获得的图像中的打印区域的高度

与模拟图像的高度之间的关系可以表示为:

$$h' = h \times \frac{r'}{r} \quad (2)$$

式中: h' 为所获取的图像中以像素为单位的打印区域的高度; h 为以像素为单位的模拟图像的高度; r 为像素/毫米为单位的模拟图像的分辨率, r' 是获得图像的实际像素大小与毫米之间的比值。文中所获取的图像大小为 1024 像素×1024 像素,标距长度为 100 mm,为了减小光学变形对测量精度的影响,在图像中心尺寸为 3/4 的图像高度处来获取其标准长度, r' 就等于 1024 像素×3/4/100 mm,即 7.68 像素/mm。通过计算机制作的模拟图像的分辨率为 96 dpi,相当于 r 大约为 3.78 像素/mm,一般情况下,子区尺寸达到 71 像素×71 像素时,数字图像相关方法即可获得较高的测量精度^[24-25],因此, h' 可以选择 71 的像素值,可通过式(2)计算得出 h 为 35 像素。

Hua 等^[25]研究了散斑大小和密度对模拟图像散斑质量的影响,结果表明,2~4 像素的散斑尺寸和较大的散斑密度对应着高测量精度。文中采用了数字图像相关来处理图像中的散斑图,因此,模拟图像的散斑尺寸仍可依据式(3)中 r 和 r' 来设定:

$$a' = a \times \frac{r'}{r} \quad (3)$$

式中: a' 为获得图像的散斑大小; a 为模拟图像的散斑大小。文中选择 2 像素为最佳散斑尺寸,模拟图像 a 的散斑大小可以用式(3)来计算,大约为 1 像素。

根据上述分析可以得到,模拟图像的大小可以选择 794 像素×35 像素,散斑大小为 1 像素值。从模拟图像到获取图像的整个过程见图 1,为了使散斑图样在水平和垂直方向上随机而均匀地分布,首先应根据式(1)来制作像素为 794 像素×794 像素的原始模拟图像,斑点数目为 40 000,该斑点密度大,测量精度较高。然后从原始模拟图像中复制一个像素大小为 794×35 的图像区域,并用打印机打印在大小为 A4 纸的牛皮纸材料的标距两端上。为了精确定位散斑图位置,在牛皮纸标距两端同时打印了 2 条白色标记线。最后,通过 CCD 相机来获取从 A4 纸上切割的试样图像,测量长度在采集图像的中心,图像高度为 3/4。

1.2 数字图像相关算法

数字图像相关的基本原理是比较变形前后的 2 幅数字图像。首先,在参考图像中选择感兴趣区域;然后,再对该区域内每个测试点进行相关计算。通常,以每个测试的像素点为中心,选取大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 个像素(其中 M 为整数)的子区。该子区的灰度值分布用来追踪变形图像的位置信息:

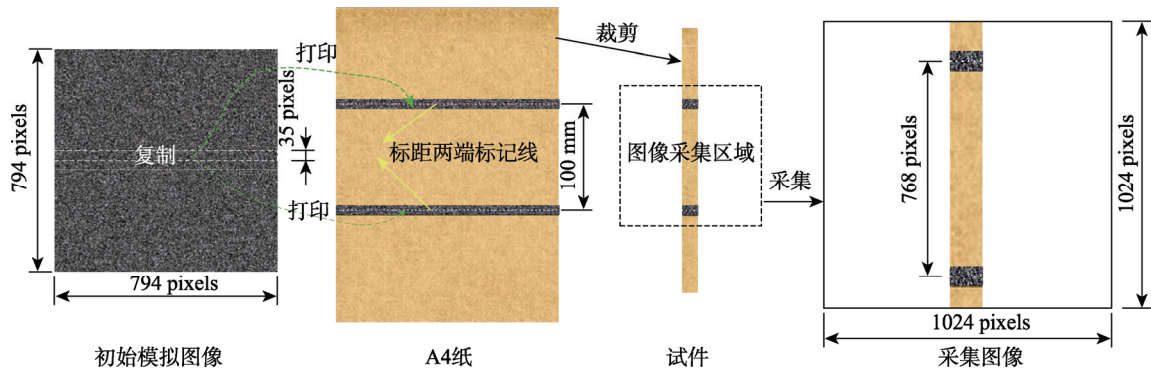


图 1 模拟图像到获取图像试件的过程

Fig.1 Process from image simulation to acquisition of image test sample

$$C(u, v) = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f(x, y) \times g[x+u(x, y), y+v(x, y)]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f^2(x, y)} \times \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M g^2[x+u(x, y), y+v(x, y)]}} \quad (4)$$

式中: x 和 y 是以测试点为原点的局部坐标; f 为参考子区的灰度值分布函数; g 为变形子区的灰度值分布函数, u 和 v 分别为 x 方向和 y 方向的位移函数, 可以用测试点的位移和位移导数表示; C 为相关系数, 范围从 0 到 1, 参考子区和变形子区的最佳匹配时 C 取最大值。有多种方法可以通过求解 C 的极值来寻求与参考子区最为匹配的变形后子区, 如 N-R 方法、拟合法、迭代法等。其中 N-R 方法精度较高, 文中也采用了这一算法^[26]。测试点的位移可以通过求解 C 的最大值来获得, 在测量了 ROI 中各测试点的位移后, 利用插值法得到 ROI 的位移场。最后, 利用拟合方法可进一步计算出感兴趣区域的应变场。

1.3 弹性模量的测量

利用打印散斑图的标距端部位移值来测量材料的弹性模量, 参考图像和变形后的图像之间的标距相对平均应变可以通过式 (5) 计算。

$$\Delta \varepsilon_y = \frac{|\Delta d_1 - \Delta d_2|}{l} \quad (5)$$

式中: Δd_1 和 Δd_2 为参考图像和变形后图像标距两端的拉伸方向位移; l 为标距长度。实际上, 可以认为将虚拟引伸计安装在试样上, 数字图像相关协助其测量平均应变。如图 2 所示, 标距长度的相对平均应变可以选择 3 个或者更多的虚拟引伸计, 测量出的相对平均应变的平均值即可用来计算试样的弹性模量, 这在一定程度上可以减少数字图像相关测量的随机误差。

在拉伸试验中, 应采用弹性阶段的应力-应变关系来计算试样的弹性模量, DIC 测量弹性模量的一般步骤为: 首先, 从弹性拉伸阶段选择数个图像并按照时间顺序进行编号; 然后, 将第 1 张图像设定为参考图像, 数字图像相关将会测量出其他图像和参考图像之间的 $\Delta \varepsilon_y$, 通过万能材料试验机记录的力增量和试样的

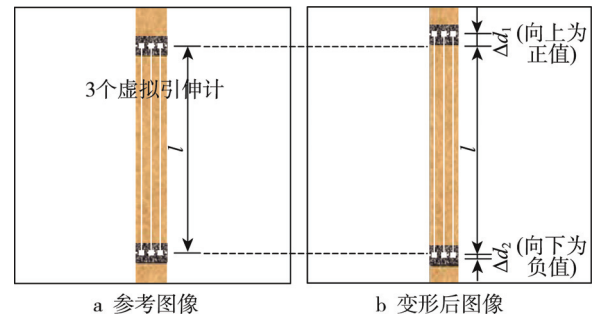


图 2 参考图像和变形后图像的虚拟引伸计

Fig.2 Virtual extensometers of the reference image and deformed image

横截面积, 可以计算出选定图像之间的应力增量; 最后, 用线性拟合法画出平均应力-平均应变曲线, 曲线斜率即为材料的弹性模量。

2 应用实例

2.1 试样制备

以定量 80 g/m² 的牛皮纸 (天津市华海纸业有限公司) 作为试验材料, 首先, 用切纸机 (FQ-QZD15, 四川长江造纸仪器有限公司) 将试验材料切成 A4 纸大小; 然后, 用打印机 (HP LaserJet Pro M1139) 打印出 2.1 中设计的具有一定标距模拟图像的试样; 最后, 将打印出的 A4 纸切割成尺寸为 250 mm×15 mm 的样品。用纸张高精度电动厚度测试仪 (J-HDY25, 四川长江造纸仪器有限公司) 来测量其厚度, 每个样品选择 3 个不同位置, 用其测量出的平均值来计算试样的横截面积。需要注意, 纸张的弹性模量与其方向密切相关, 文中测试的为其纵向弹性模量。

Hua 等^[25]提出了一个评估图像斑点质量的参数, 所谓的高质量散斑图应该是具有较大的平均子区波动 (mean subset fluctuation)。拉伸试验中的一组试样

见图3, 2个散斑图的灰度直方图基本上呈正态分布, 灰度级从50~200, 由于试样的颜色并非白色, 通过调整试验系统很难使灰度分布从0到255, 由此计算出了2个散斑图的平均子区波动分别为63.51(上散斑图)和68(下散斑图), 使用这种散斑, 测量的位移平均偏差小于0.03像素^[25]。显然, 虽然试样的颜色、打印机的印刷分辨率以及其他许多因素都会影响散斑的质量, 但利用可控散斑的方法可以得到相对较好的散斑图。

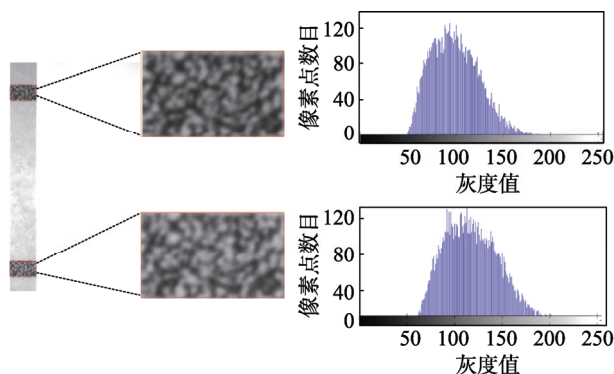


图3 试样上的散斑图及其灰度直方图

Fig.3 Speckle pattern on the test sample and its grey level histogram

2.2 试验过程

试验系统见图4。首先用2个夹具将试样固定在日本岛津AG-5TA型自动控制电子万能材料试验机上, 在开始拉伸之前需对试样施加一定的预应力; 然后进行拉伸试验, 加载速率为5 mm/min, 采用8位CCD相机同时采集试样图像, 图像帧频为1帧/s; 最后, 利用数字图像相关对采集的图像进行处理。环境温度为16℃, 相对湿度为45%, 结合试验机测得的力学数据可计算出试样的弹性模量。

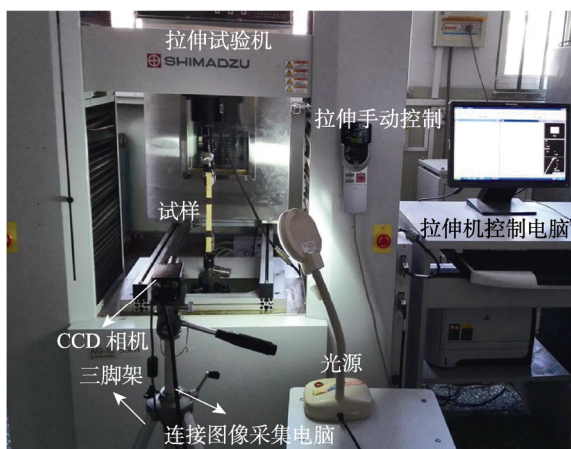


图4 纸张弹性模量测试系统

Fig.4 The system for elastic modulus measurement of paper

2.3 结果和讨论

从弹性拉伸阶段中选取了18张图像, 用数字图

像相关中的3个虚拟引伸计测量出这些图像的 $\overline{\Delta\epsilon_y}$, 在使用数字图像相关过程中, 设置的子区大小为41像素×41像素; 用拉伸试验机测得力增量, 试样横截面积已知, 可计算出试样的 $\Delta\sigma_y$ 。最终得到的线性拟合曲线见图5, 这些拟合曲线的斜率就是每个试样的弹性模量, 见表1。可以看出, 测量结果的偏差很小, 在一定程度上证明了可控散斑DIC技术良好的稳定性。测量结果的平均值为1900 MPa。

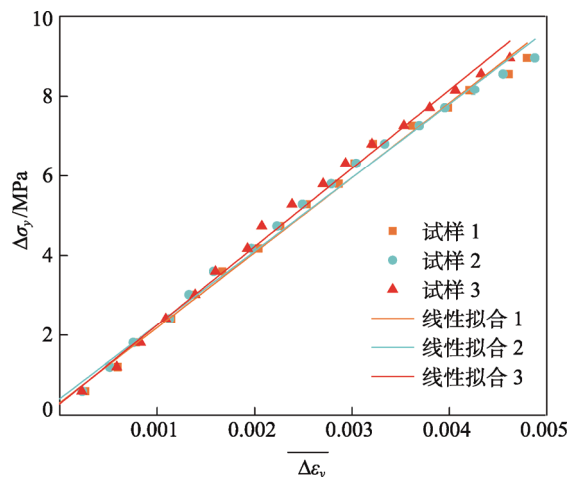


图5 3种试样的 $\Delta\sigma_y$ - $\Delta\epsilon_y$ 线性拟合曲线

Fig.5 The $\Delta\sigma_y$ - $\Delta\epsilon_y$ linear fitting curves of three samples

表1 纸的参数及弹性模量

Tab.1 Parameters and elastic modulus of the paper

试样编号	厚度 <i>d</i> /mm	宽度 <i>b</i> /mm	横截面积 /mm ²	弹性模量 /MPa
1	0.118	14.57	1.719	1891
2	0.119	14.64	1.742	1898
3	0.120	14.60	1.752	1912
平均值	0.119	14.60	1.738	1900

3 结语

基于模拟散斑图制作方法, 提出一种可控散斑打印的数字图像相关方法, 用于测量纸张材料的弹性模量, 通过对模拟图像参数的合理设计, 使纸张具有高质量的散斑图并且印刷油墨对纸张力学性能的影响最小。与拉伸试验机相结合, 将文中方法用于测量牛皮纸的弹性模量, 3个试样的测量结果偏差很小, 在一定程度上证明了该方法良好的稳定性, 测量出牛皮纸的弹性模量为1900 MPa。实际上, 可控散斑DIC技术不仅适用于测量纸张的弹性模量, 而且在各种印刷材料的变形材料中也有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] ANDERSSON C. New Ways to Enhance the Functionality

- of Paperboard by Surface Treatment-a Review[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(6): 339—373.
- [2] SZEWCZYK W, MARYNOWSKI K, TARNAWSKI W. An Analysis of Young's Modulus Distribution in the Paper Plane[J]. Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2006, 14(4): 91—94.
 - [3] E8/E8M-09: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards[S].
 - [4] KHOURY M, TOURTOLLET G E A. Schroder, Contactless Measurement of the Elastic Young's Modulus of Paper by an Ultrasonic Technique[J]. Ultrasonics, 1999, 37(2): 133—139.
 - [5] BAI P X, ZHU F P, HE X Y. Optical Extensometer and Elimination of the Effect of Out-of-plane Motions[J]. Opt Lasers Eng, 2015, 65: 28—37.
 - [6] SALBUT L A, KUJAWINSKA M, SITNIK R, et al. Long-base Optical Extensometer for Tensile Testing Machines[J]. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001, 4398: 45—49.
 - [7] PAN B, QIAN K M, XIE H M, et al. Two-dimensional Digital Image Correlation for in-plane Displacement and Strain Measurement: a Review[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(6): 152—154.
 - [8] 杨勇, 王琰蕾, 李明, 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 197—201.
YANG Yong, WANG Yan-lei, LI Ming, et al. High Precision Digital Image Correlation Measurement System and Its Technology[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 197—201.
 - [9] LIANG Z N, YIN B, LIU H T, et al. Displacement Measurement of Specimen Surfaces with Damaged Areas by Digital Image Correlation[J]. Measurement, 2015, 76: 183—188.
 - [10] ZHANG D, AROLA D, CHARALAMBIDES P G, et al. On the Mechanical Behavior of Carbon-carbon Optic Grids Determined Using a Bi-axial Optical Extensometer[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(14): 4495—4505.
 - [11] ZHANG S Q, MAO S S, AROLA D, et al. Characterization of the Strain-life Fatigue Properties of Thin Sheet Metal Using an Optical Extensometer[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 60(3): 44—48.
 - [12] XU L, HOU Z, QIN Y. The Measurement of the Young's Modulus of Thin or Flexible Specimen with Digital-image Correlation Method[J]. Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng., 2002, 4537: 406—409.
 - [13] 储信庆, 计宏伟. 灰底白板纸与白卡纸的弹性常数对比[J]. 包装工程, 2015(23): 48—52.
CHU Xin-qing, JI Hong-wei. Comparison of Elastic Constants Between White Paperboard and White Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 48—52.
 - [14] 孔玲君, 刘真, 姜中敏. 基于 CCD 的数字印刷质量检测与分析技术[J]. 包装工程, 2010, 31(3): 92—95.
KONG Ling-jun, LIU Zhen, JIANG Zhong-min. Quality Inspection and Analysis Technology of Digital Printing Based on CCD Technology[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3): 92—95.
 - [15] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2): 120—129.
PAN Bing, WU Da-fang, XIA Yong. Quality Evaluation of Speckle Pattern in Digital Image Correlation Method[J]. Experimental Mechanics, 2010, 25(2): 120—129.
 - [16] LIONELLO G, CRISTOFOLINI L. A Practical Approach to Optimizing the Preparation of Speckle Patterns for Digital-image Correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(10): 107001.
 - [17] LIONELLO G, SIRIEIX C, BALEANI M. An Effective Procedure to Create a Speckle Pattern on Biological Soft Tissue for Digital Image Correlation Measurements[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2014, 39: 1—8.
 - [18] 赵玮, 周萍, 成燕归, 等. 散斑面内形变场检测系统设计[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 271—273.
ZHAO Wei, ZHOU Ping, CHENG Yan-gui, et al. Design of Speckle Field Deformation Field Detection System[J]. Optical Technology, 2006, 32(S1): 271—273.
 - [19] ZHU J G, YAN G S, HE G L, et al. Fabrication and Optimization of Micro-scale Speckle Patterns for Digital Image Correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(1): 015203.
 - [20] ASHRAFI M, TUTTLE M E. Measurement of Strain Gradients Using Digital Image Correlation by Applying Printed-speckle Patterns[J]. Experimental Techniques, 2016, 40(2): 891—897.
 - [21] 胡秋实. 数字图像相关法的改进算法及其在实验力学中的应用[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2011.
HU Qiu-shi. Improved Algorithm of Digital Image Correlation and Its Application in Experimental Mechanics[D]. Beijing: University of Science & Technology China, 2011.
 - [22] PAN B, ASUNDI A, XIE H, et al. Digital Image Correlation using Iterative Least Squares and Pointwise Least Squares for Displacement Field and Strain Field Measurements[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2009, 47(7): 865—874.
 - [23] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel Displacement and Deformation Gradient Measurement using Digital Image/Speckle Correlation (DISC)[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1613—1620.
 - [24] 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 Materials under Various Loading Conditions[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 10—13.
 - [25] HUA T, XIE H M, WANG S M, 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.
 - [26] 潘兵, 谢惠民, 戴福隆. 数字图像相关中亚像素位移测量算法的研究[J]. 力学学报, 2007, 23(2): 245—252.
PAN Bing, XIE Hui-min, DAI Fu-long. Research on Subpixel Displacement Measurement Algorithm in Digital Image Correlation[J]. Journal of Mechanics, 2007, 23(2): 245—252.