

平板玻璃中部应力的偏振移相检测法

张伟, 朱秋东, 张旭升

北京理工大学精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 基于平面偏振干涉测量原理, 提出了一种用于平板玻璃中部应力检测的偏振移相干涉测量法。通过旋转检偏器实现了偏振移相, 采用建立的数学模型得到了应力双折射数值及其分布曲线, 由玻璃的应力光学系数得到了中部应力值。对浮法平板玻璃样品的中部应力进行了实验研究, 结果表明, 所提方法的测量误差可控制在 3% 以内, 测量重复性优于 1 nm/cm, 验证了所提方法的可行性。

关键词 物理光学; 偏振光学; 平板玻璃; 中部应力; 双折射

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0426001

Polarization Phase-Shifting Detection Method for Central Stress in Flat Glass

Zhang Wei, Zhu Qiudong, Zhang Xusheng

*Beijing Key Lab for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing Institute of Technology,
Beijing 100081, China*

Abstract A polarization phase-shifting interferometric method is proposed to measure the central stress in flat glass based on the principle of plane polarization interferometry. Rotating analyzer can be used to realize polarization phase-shifting. The stress birefringence values and their distribution curves are obtained with the constructed mathematical model, and then the central stress value can be calculated from the stress-optical coefficients. The central stress of float flat glass is experimentally investigated and the experimental results show that the measurement error of this proposed method is less than 3%, and the measurement repeatability is superior to 1 nm · cm⁻¹, which can verify the feasibility of this proposed method.

Key words physical optics; polarization optics; flat glass; central stress; birefringence

OCIS codes 260.5430; 160.2750; 260.1440

1 引 言

在退火冷却过程中, 平板玻璃的厚度方向上存在温度梯度, 从而会产生中部应力。沿厚度方向不同位置的中部应力大小是不相同的, 但方向平行于玻璃表面, 并且在表面上表现为压应力, 在内部表现为拉应力^[1]。由于应力的存在, 玻璃内部结构发生变化, 变为各向异性体, 光通过玻璃时会发生双折射现象。通常通过测量应力双折射来测量玻璃应力。

常见的应力双折射测量方法有干涉色法、1/4波片法、Tardy 定量测试法、偏振透射差分法及调制

法等^[2-9], 这些方法多用于平面应力的测量, 或只能用于定性观测, 主观性大, 或测量系统较为复杂, 而在中部应力测量方面应用较少。本文提出了一种基于偏振干涉法的平板玻璃中部应力的测量方法, 通过该方法能够得到沿平板玻璃厚度方向的应力双折射分布曲线。

2 测量原理及数学模型

根据应力光学定律, 平板玻璃中部应力与应力双折射成正比, 可通过应力光学系数相互转化^[10]。通常用单位厚度玻璃板产生的应力双折射 Δ_n 表示

收稿日期: 2017-10-25; **收到修改稿日期:** 2017-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61405011)

作者简介: 张伟(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏光测量及仪器方面的研究。E-mail: 1148073026@qq.com

导师简介: 张旭升(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电仪器科学与技术方面的研究。

E-mail: zhangxs@bit.edu.cn (通信联系人)

应力大小,即

$$\Delta_n = \frac{\Delta}{a} = \frac{\delta\lambda}{2\pi a}, \quad (1)$$

式中 Δ 为o光和e光在垂直于主应力方向上的光程差, a 为玻璃板厚度, δ 为o光和e光通过待测样品的相位差, λ 为测量波长。由于中部应力平行于玻璃表面,沿板面厚度方向有不同大小的应力分布,故中部应力的测量方向(通光方向)垂直于玻璃板断面,此种情况下 a 应为通光方向的玻璃厚度。

所提出的偏振移相检测法的实验光路如图1所示,LED光源发出的光经准直镜形成准直光,经过起偏器P1形成线偏振光,通过存在应力的被测样品时发生双折射,出射的o光和e光具有稳定的光程差,再通过检偏器P2发生干涉,最后通过成像镜头和CMOS(互补金属氧化物半导体)相机采集干涉图像,并确保CMOS靶面通过成像镜头与被测样品出射面共轭。

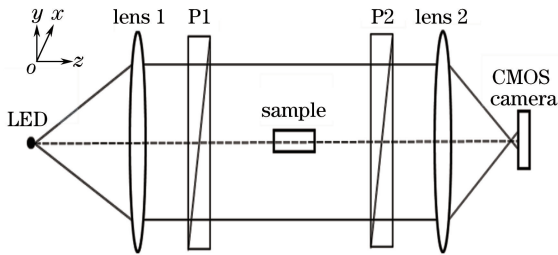


图1 实验原理光路

Fig. 1 Schematic of experimental optical path

假设起偏器P1的主方向与参考坐标系 x 轴成 45° 夹角,由于应力导致了各向异性,被测玻璃样品可视为晶片,水平放置时,其光轴方向与 x 轴平行,检偏器P2的主方向与参考坐标系 x 轴的夹角为 α 。非偏振光束经P1后转化为线偏振光,其偏振态用琼斯矢量描述为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 E_0 为入射光的复振幅。根据偏光系统的琼斯分析法,当光经过被测样品并从P2出射时,出射光琼斯矢量变为

$$\mathbf{E}' = \frac{1}{2}tE_0 \begin{pmatrix} \cos\alpha \cos\frac{\delta}{2}(\cos\alpha + \sin\alpha) + \sin\frac{\delta}{2}\cos\alpha(\cos\alpha - \sin\alpha) \\ \sin\alpha \cos\frac{\delta}{2}(\cos\alpha + \sin\alpha) + \sin\frac{\delta}{2}\sin\alpha(\cos\alpha - \sin\alpha) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 t 为被测样品对透射光的振幅透射率。被测点光强 $I(x,y)$ 为

$$I(x,y) = I_0 T [1 + \cos\delta(x,y)\sin(2\alpha)]/4, \quad (4)$$

式中 $I_0 = |E_0|^2$ 为准直光束的入射光强; $T = |t|^2$ 为平板玻璃光强透射率。出射光强 $I(x,y)$ 随转角 α 周期性变化,周期为 π ,幅度 $\cos\delta(x,y)$ 与应力大小有关, $I_0 T/4$ 为光强直流项, $I_0 T \cos\delta(x,y)\sin(2\alpha)/4$ 为光强交流项。根据正弦函数特性,可在一个或多个周期内连续旋转检偏器P2以获取多幅干涉图,当图像数量 N 足够多($N \rightarrow \infty$)时,可通过数值计算得到光强直流项 $I_d(x,y)$ 和光强交流项 $I_a(x,y)$ 。光强直流项 $I_d(x,y)$ 为

$$I_d(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(x,y) = \frac{1}{4} I_0 T, \quad (5)$$

光强交流项 $I_a(x,y)$ 为

$$I_a(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_i(x,y) - I_d(x,y)| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{1}{4} I_0 T \cos\delta(x,y)\sin(2\alpha_i) \right| = I_0 T \cos\delta(x,y)/(2\pi), \quad (6)$$

式中 i 为图片序号, $I_i(x,y)$ 为第 i 张图片被测点处的光强。联立(5)、(6)式可得

$$\cos\delta(x,y) = \frac{\pi I_a(x,y)}{2I_d(x,y)}, \quad (7)$$

令

$$K = \frac{\pi I_a(x,y)}{2I_d(x,y)}, \quad (8)$$

可得应力双折射相位差

$$\delta(x,y) = \arccos K, \quad (9)$$

再根据(1)式计算出应力双折射 Δ_n 。由(9)式及反余弦函数特性可知,该相位差的测量范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。当 K 变化相同的量 dK 时,大相位差端 δ 的变化量 $d\delta$ 较小,而小相位差端 δ 的变化量 $d\delta$ 较大,故该方法对大相位差的测量灵敏度高,而对小相位差的测量灵敏度较低。

3 实验及结果

实验所用LED光源的中心波长为633 nm,带宽为18 nm;起偏器和检偏器选用两片消光比达到 10^{-5} 量级的偏振片,偏振片和被测玻璃分别固定在三个精密电控转台上,转台重复定位精度约为 0.005° ;CMOS相机灰阶深度为10 bit。

为了减小环境杂散光的干扰,在暗室环境中进

行原理验证实验。在未放置被测玻璃的情况下,调节起偏器和检偏器,使二者的主方向正交,即发生完全消光现象;放入被测玻璃,使玻璃入射面 II 与通光方向垂直(图 2),并通过旋转转台以调节玻璃长边方向,直到再次出现消光现象,此时玻璃长边方向与起偏器(或检偏器)主方向平行;再将被测玻璃旋转 45°,即为实验的初始位置,如图 3 所示。实验时将检偏器旋转 180°,每隔 1°采集 1 幅图像,并确保光强图像不饱和。

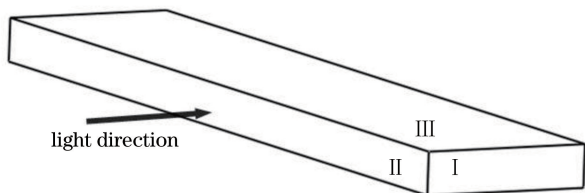


图 2 玻璃通光方向

Fig. 2 Light direction of glass

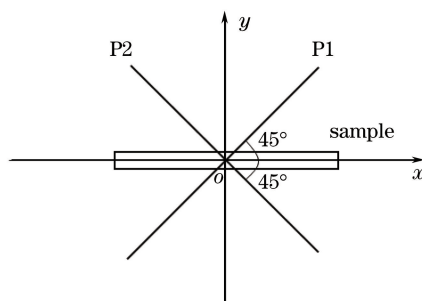


图 3 实验装置的初始位置

Fig. 3 Initial position of experimental setup

述方法对长度为 100 mm,宽度(通光方向厚度)为 22.2 mm,板面厚度分别为 11.8 mm(1#样品)和 7.6 mm(2#样品)的平板玻璃样品进行多次重复性实验,在实验前对样品通光面进行抛光处理。取图像中间位置一行像素进行数据处理,最终得到图 4 所示的被测样品应力双折射 Δ_n 在其板面厚度(d)方向上的分布曲线,其中图 4(a)~(c)是 1#样品的实验结果,图 4(d)~(f)是 2#样品的实验结果。

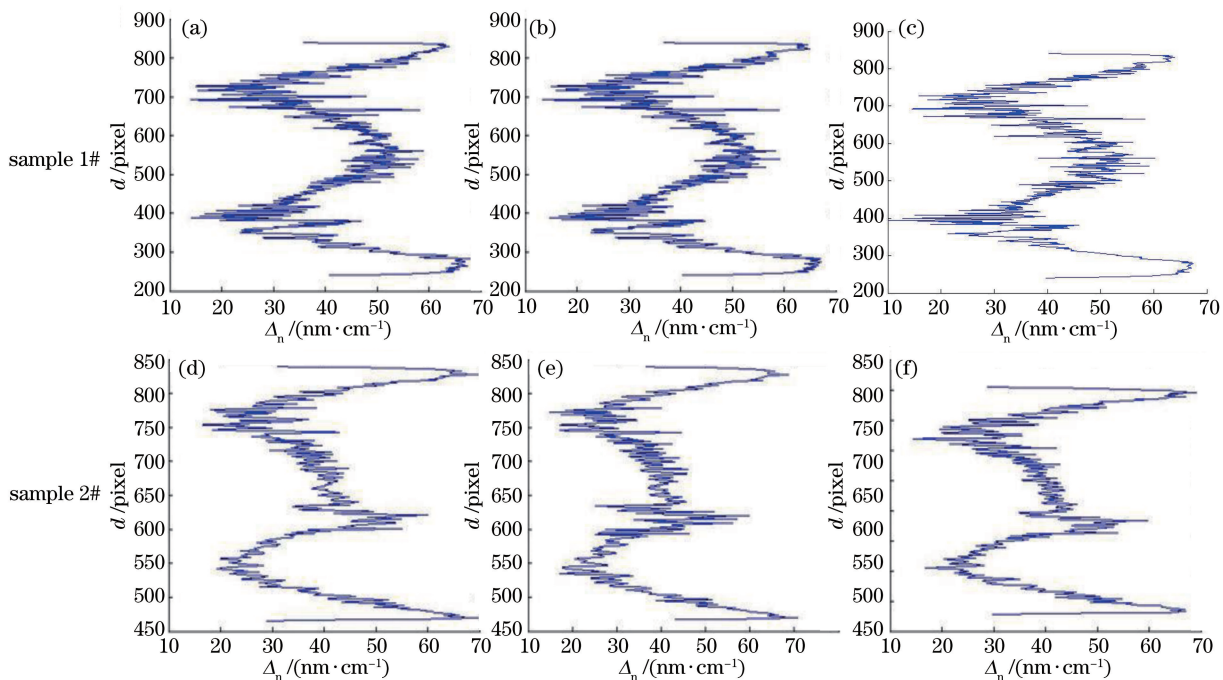


图 4 应力双折射分布曲线。(a) (d)第一次实验;(b) (e)第二次实验;(c) (f)第三次实验

Fig. 4 Distribution curves of stress birefringence. (a) (d) First test; (b) (e) second test; (c) (f) third test

由图 4 可知,被测样品中部应力主要集中在上下表面及中间位置,在平板玻璃板面厚度方向上的分布曲线大致呈 W 状,与中部应力双折射理论分布^[11]基本一致。选取中间位置应力双折射最大值为测量结果,厚度为 11.8 mm 的 1#样品中部应力双折射值的三次测量结果分别为 59.0,59.2,60.2 nm/cm;厚度为 7.6 mm 的 2#样品中部应力双折射值的三次测量结

果分别为 60.0,59.9,59.8 nm/cm。从实验数据可见,该方法的测量重复性在 1 nm/cm 以内。玻璃应力双折射最小值大约为 20 nm/cm,与文献[11]的理论值(0)相差较大,这主要是该方法对小应力的测量灵敏度较低,以及噪声、CMOS 相机探测灵敏度和量化误差等造成的。

图 5 所示为 1#样品测量实验原始图像中的一

张,是在检偏器 P2 主方向与 x 轴的夹角 α 为 -45° 条件下采集的。根据(4)式可知,图 5 中亮处表示存在应力双折射,暗处表示不存在应力双折射或应力双折射小于可探测值。

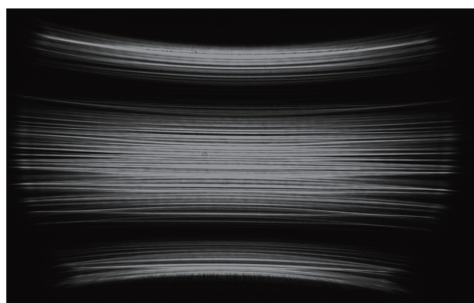


图 5 原始图像

Fig. 5 Original image

为了验证实验方案的准确性,采用经计量检定的波片(标称值 89.9°)作为标准样品,用所提方案对其双折射相位差 δ 进行多次测量。实验中应保证被测波片快轴(或慢轴)与起偏器 P1 主方向夹角为 45° ,检偏器 P2 旋转 180° ,相机每隔 1° 采集一幅图像。数据处理时,选择洁净处的 200 个像素点进行处理,取其平均值作为测量结果,结果见表 1。

表 1 波片标定实验数据

Table 1 Experimental calibration data of wave plate

Test No.	1 st	2 nd	3 rd	Average
$\delta / (^\circ)$	87.55	87.85	87.82	87.74

由表 1 可知,测量结果的平均值为 87.74° ,与标称值 89.9° 相差 2.16° ,相对误差为 2.4% 。实验所用 CMOS 相机的灰阶深度只有 10 bit,存在较大的量化误差,这会造成所采集图像数据值的偏差,影响数据处理的结果。此外,各器件初始位置是通过消光位置来确定的,光强较弱时,探测器信噪比低,对消光位置的精确性有一定影响。考虑上述误差, 2.4% 的相对误差应在合理范围内。上述实验结果表明,该方法具有较好的准确性,可用于浮法平板玻璃应力质量等级的评定。

4 结 论

提出了一种利用偏振移相测量玻璃中部应力双折射的方法,并通过实验验证了该方法的正确性和可行性。实验结果表明:偏振移相法的测量重复性在 1 nm/cm 以内,相对误差在 3% 以内。该方法测量的应力双折射相位差的检测范围可达 $0 \sim 90^\circ$,对大应力的探测灵敏度较好,能够较准确地测量出平板玻璃中部应力双折射,并得到合理的分布曲线。

由于实验装置简单,操作方便,实验误差来源较少,可通过合理的降噪手段及对实验装置进行改善,进一步提高本方法的测量精度。该测量方法对国内平板玻璃中部应力的检测具有参考意义,对平板玻璃的生产、品质分级具有重要指导意义。

参 考 文 献

- [1] Han T. Float glass stress and annealing[J]. Glass, 2011, 38(4): 11-14.
韩彤. 浮法玻璃的应力与退火[J]. 玻璃, 2011, 38(4): 11-14.
- [2] Xiao H S, Zhang Y Q, Fan Z G, *et al.* Precision analysis of polarization interference method for measuring stress birefringence of crystal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 271-276.
肖昊苏, 张运强, 范志刚, 等. 偏振干涉法测量晶体应力双折射精度分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 271-276.
- [3] Zuo F, Chen L, Xu C. Dynamic phase-shifting interferometry for full field retardation distributing of quarter wave plate[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2296-2299.
左芬, 陈磊, 徐晨. $1/4$ 波片相位延迟分布的动态测量[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2296-2299.
- [4] Li J P, Chen L, Wulan Tuya, *et al.* A method based on phase shifting algorithm for fast measurement of stress retardation of optical glass[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612005.
李金鹏, 陈磊, 乌兰图雅, 等. 基于移相算法的玻璃应力延迟量快速测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612005.
- [5] Wei X H, Gao B, Li Q, *et al.* Study of the stress birefringence measurement of optical glass[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s212002.
魏小红, 高波, 李强, 等. 光学玻璃应力双折射检测方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s212002.
- [6] Zhou T H. Measuring method of stress in glass[J]. Glass & Enamel, 2001, 29(6): 44-47.
周天辉. 玻璃应力的测定方法[J]. 玻璃与搪瓷, 2001, 29(6): 44-47.
- [7] Zhao L H, Chen Y H. A new method for testing inner strains of semiconductor substrate materials: polarization transmittance difference[J]. Journal of Semiconductors, 2007, 28(z1): 555-557.
赵玲慧, 陈涌海. 一种新型的材料内应力测试方法: 偏振透射差分法[J]. 半导体学报, 2007, 28(z1): 555-557.
- [8] Fan L, Song F J. Spectrum analysis of modulated polarized light in phase retardation measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(9):

1685-1688.

范玲, 宋菲君. 调制偏振光在光学相位延迟测量中的频谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(9): 1685-1688.

- [9] Li K W, Wang L M, Wang Z B, *et al.* Measurement of residual birefringence combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0508003.
李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 弹光调制和电光调制联合测剩余双折射[J]. 中国激光, 2016, 43(5):

0508003.

- [10] Kuske A, Robertson G. Photoelastic stress analysis[M]. Wang X S, Huang J, Pan J Y, *et al.*, Transl. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1979: 85-89.
柯斯克, 罗伯逊. 光弹性应力分析[M]. 王燮山, 黄杰, 潘金炎, 等, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1979: 85-89.
- [11] Narayanaswamy O S, Robert G. Calculation of residual stresses in glass[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1969, 52(10): 554-558.