

文章编号 1004-924X(2014)01-0058-05

磁光调制法测量玻璃内应力

李春艳^{1,2*}, 吴易明¹, 高立民¹, 陆卫国^{1,2}, 肖茂森¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:提出了一种基于磁光调制法测量玻璃内应力方向和大小的方法,并建立了基于磁光调制的内应力测量系统。首先,采用光线追迹的方法,根据偏振光的琼斯矩阵描述方式推导了系统的测量模型;采用磁光调制器,对信号光束进行正弦交变的磁光调制,将直接测量光强信号改为测量频率信号,提高了测量准确度;采用磁旋光器,消除了人为操作引起的误差,并通过控制旋光器外加线圈驱动电流的大小,改变调制信号光偏振方向的旋转角度;最后,对待测样品进行了多次旋转测量。测量结果显示,本方法对玻璃内应力方向的测量准确度为 $5''$,对应力双折射的测量准确度为 0.3 nm/cm 。得到的结果验证了该方法的有效性和稳定性,显示系统具有稳定性高、准确度高、容易实现工程化等特点。

关键词:偏振光;磁光调制;玻璃;内应力测量;磁旋光

中图分类号: TQ171.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142201.0058

Magneto-optical modulation method for measuring glass internal stress

LI Chun-yan^{1,2*}, WU Yi-ming¹, GAO Li-min¹, LU Wei-guo^{1,2}, XIAO Mao-sen¹

(1. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yanerlcy@163.com*

Abstract: A measuring method for the internal stress magnitude and direction of glass was proposed based on the magneto-optical modulation and a stress measuring system was established. On the basis of the ray-tracing method, the system's measurement model was derived according to the Jones matrix describing manner of polarized light. Then, using a magneto-optical modulator, the signal beam was modulated with a sine alternation manner and the direct measurement of the light intensity signal in the traditional method was changed into the frequency signal measurement to improve the measurement veracity greatly. Furthermore, the human operator error was eliminated through a magneto-optical rotator, and the current for driving a coil outside the rotator was controlled to change the rotation angle of modulation signal light in the polarization direction. Finally, a number of rotating measurements to the sample were carried out. The experimental results indicate that the measurement veracities for stress direction, and the stress birefringence are $5''$ and 0.3 nm/cm , respectively. In conclusions, the system has the characteristics of high stability, high veracity and easy to be implemented in

收稿日期:2013-08-10;修订日期:2013-09-20.

基金项目:国防科研基金资助项目(No. JPPT-115-3-1360);陕西省科技计划基金资助项目(No. 2011kjxx27)

engineering applications.

Key words: polarized light; magneto-optical modulation; glass; internal stress measurement; magnetic rotation

1 引 言

玻璃存在内应力时,加工好的光学零件表面会随时间而变形,严重影响成像质量。应力分布不均匀还会引起光学均匀性质量降低,造成折射率分布不一致,从而使经过光学玻璃的波面发生变形,导致像质变坏^[1-2]。所以测量光学玻璃内应力的分布大小、判断其分布规律并保证测量结果的准确度是玻璃材料设计生产部门及光学设计者最关心的问题。应力测定工作涉及的因素较多,且容易混淆,稍不注意就会得出错误甚至相反的结果。在实际测定之前,要先分析造成玻璃制品失效的应力因素,选择合理的测定方法与步骤。测量玻璃应力双折射的方法主要有偏光干涉法、1/4 波片法、光强比值法、Tardy 定量测试法、Babinet 补偿器法、KD * P 晶体电光调制法等^[3-5]。除电光调制法外,其他测量方法的缺点均为不灵敏,不能实现较小应力双折射的精确测量,且在工业现场严酷环境下使用时设备性能不可靠,无法满足高精度测量的要求。电光调制法测量的准确度,受调制电压的稳定性、电光晶体和 1/4 波片光轴调整精度、光源波长稳定度的影响,在工程实现上有较大困难,难以发展成为实用可靠的内应力测量系统。为了实现高精度的测量,一般选择增加样品长度,基于总内应力随长度线性增加的假设,以得到单位长度的内应力值。实际上,在低应力材料内部,内应力的分布复杂,方向也变化多样,这种测量难以代表实际零件的真实情况,因此需要配置高精度的内应力检测仪器,以保证样品质量。吴易明、高立民等人^[6]提出了采用磁光调制法用于玻璃内应力测量的实现原理,并介绍了具体实现方案,在实际应用中,需要 360° 旋转被测玻璃,且每次旋转后都要精确旋转检偏器件来寻找消光位置,使得测量操作繁琐、耗时长、人工操作影响测量准确度。

本文采用光线追迹的方法,利用琼斯矩阵推导了光束入射时玻璃内应力大小和方向的精确计算公式,完成了测量方案的理论推导,并通过实验验证了该方法的有效性。该测量方法操作简单,

解决了其他方法存在的技术难点,可以实现玻璃内应力的低准确度测量,对玻璃的应用具有重要的指导意义。

2 系统的基本构成及工作原理

磁光调制法是基于磁光玻璃在外加磁场的作用下可成为和外加磁场方向有关的旋光器件,使经过其传播的线偏振光的偏振方向发生旋转,即产生法拉第效应的原理^[7-9]。本文使用带有准直透镜的激光光源发出的光束通过起偏器获得线偏振光,线偏振光通过外加正弦交变调制磁场的磁光玻璃时,其偏振方向发生了偏转角为 θ 的偏转摆动,成为调制偏振光,其中磁场方向和光轴一致;调制信号光经过待测样品、旋光器,到达检偏器和光电探测器。测量原理如图 1 所示,设起偏器的起偏方向为 x 轴。

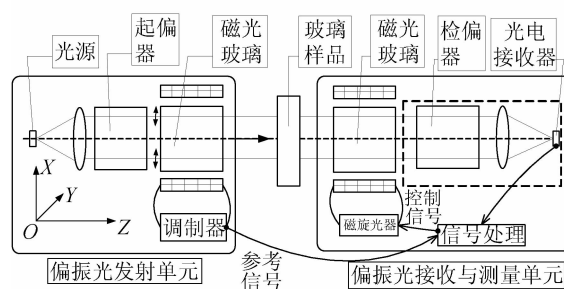


图 1 测量原理图

Fig. 1 Principle of measurement system

如图 1 所示,入射信号光 E_{in} 的矩阵为:

$$E_{in} = \begin{bmatrix} E_0 \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

设起偏器的光轴在 x 方向,起偏器琼斯矩阵 P 为:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

磁旋光调制器作用矩阵为:

$$X_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

调制器磁光玻璃外加由螺线管绕制而成的线圈,对线圈通交流电产生呈正弦规律变化的磁场,即 θ 为磁光调制角度, $\theta = V_1 B_1 L_1 = \theta_0 \sin \omega t$, V_1 为调制器磁光玻璃的维尔德常数, B_1 为磁场强度, L_1 为调制器磁光玻璃长度, θ_0 为调制角幅度, ω 为调制频率。线偏振光经过磁场强度呈正弦规律变化的调制器后,成为携带调制信号的调制偏振光,经待测玻璃样品, \mathbf{G} 为样品的作用矩阵:

$$\mathbf{G} = \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\gamma & -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\gamma \\ -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\gamma & 1 + i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\gamma \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: δ 为待测样品双折射相位差, γ 为样品快轴相对起偏器光轴的夹角, \mathbf{X}_2 为旋光器作用矩阵:

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

β 为磁旋光角度:

$$\beta = V_2 B_2 L_2 = V_2 L_2 \frac{\mu_0 n I}{2R} = kI, \quad (6)$$

其中: V_2 为旋光器磁光玻璃的维尔德常数, B_2 为外加磁场强度, L_2 为旋光器磁光玻璃长度, 旋光器磁光玻璃外加由螺线管绕制而成的线圈,对线圈通直流电产生稳定磁场, R 为线圈半径, n 为线圈匝数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率, I 为通过线圈的电流, k 为比例因子,因此通过控制电流 I ,即可改变磁旋光角度 β 。

\mathbf{T} 为检偏器矩阵:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中: α 为检偏器光轴与 x 轴的夹角。

则出射光矩阵 \mathbf{E}_{out} 为:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{T} \mathbf{X}_2 \mathbf{G} \mathbf{X}_1 \mathbf{P} \mathbf{E}_{\text{in}} = E_0 \cos \frac{\delta}{2} [\cos(\theta + \beta - \alpha) - i \cos \frac{\delta}{2} \cos(2\gamma - \theta + \beta - \alpha)] \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (8)$$

则探测器接收到的光强为:

$$\mathbf{I}_{\text{out}} = |\mathbf{E}_{\text{out}}|^2 = E_0^2 \left[\cos^2 \frac{\delta}{2} \cos^2(\theta + \beta - \alpha) + \sin^2 \frac{\delta}{2} \cos^2(2\gamma - \theta + \beta - \alpha) \right]. \quad (9)$$

对上式用贝塞尔函数展开得:

$$\mathbf{I}_{\text{out}} = \frac{1}{2} E_0^2 + A J_0(2\theta_0) + 2B J_1(2\theta_0) \sin \omega t + 2A J_2(2\theta_0) \cos 2\omega t. \quad (10)$$

其中:

$$A = \frac{1}{2} E_0^2 \left[\cos^2 \frac{\delta}{2} \cos 2(\alpha - \beta) + \sin^2 \frac{\delta}{2} \cos 2(2\gamma - \alpha + \beta) \right],$$

$$B = \frac{1}{2} E_0^2 \left[\cos^2 \frac{\delta}{2} \sin 2(\alpha - \beta) + \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 2(2\gamma - \alpha + \beta) \right].$$

采用磁旋光调制技术进行内应力检测时,检偏器是否处于消光位置是通过判别探测信号中基频分量的幅值(即 $\sin \omega t$ 系数)是否等于 0 来确定的,对于特定的调制器, $J_1(2\theta_0)$ 为常数,因此系数 $B=0$ 时,系统处于消光位置,即:

$$\cos^2 \frac{\delta}{2} \sin 2(\alpha - \beta) + \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 2(2\gamma - \alpha + \beta) = 0$$

$$\tan^2 \frac{\delta}{2} = -\frac{\sin 2(\alpha - \beta)}{\sin 2(2\gamma - \alpha + \beta)}. \quad (11)$$

当 $\alpha = 90^\circ$ 时:

$$\tan^2 \frac{\delta}{2} = \frac{\sin 2\beta}{\sin 2(2\gamma + \beta)}. \quad (12)$$

实际测量时根据起偏器的起偏方向确定待测玻璃样品上 $\gamma_0 = 0^\circ$ 时的基准位置,设实际内应力方向即样品快轴方向 $\gamma = \gamma_0 + \tau$,则此时改变旋光器驱动电流 I ,相应旋光角度 β 变化直至探测器处于消光位置,设此时 $\beta = \beta_1$, $\gamma = \gamma_1 = \gamma_0 + \tau$,则:

$$\tan^2 \frac{\delta}{2} = \frac{\sin 2\beta_1}{\sin 2(2\gamma_1 + \beta_1)} = \frac{\sin 2\beta_1}{\sin 2(2\gamma_0 + 2\tau + \beta_1)}. \quad (13)$$

旋转待测样品 Δ ,此时 $\gamma' = \gamma_2 = \gamma_1 + \Delta = \gamma_0 + \tau + \Delta$,继续改变旋光器相应旋光角度 β 直至探测器处于消光位置,此时 $\beta' = \beta_2$,则:

$$\tan^2 \frac{\delta}{2} = \frac{\sin 2\beta_2}{\sin 2(2\gamma_2 + \beta_2)} = \frac{\sin 2\beta_2}{\sin 2(2\gamma_1 + 2\Delta + \beta_2)} = \frac{\sin 2\beta_2}{\sin 2(2\gamma_0 + 2\tau + 2\Delta + \beta_2)}. \quad (14)$$

整理式(13)、(14),消去含 δ 项,且 $\gamma_0 = 0^\circ$ 得:

$$\tan 4\tau = \frac{\cos 4\Delta + \sin 4\Delta \cot 2\beta_2 - 1}{\cot 2\beta_1 - \cos 4\Delta \cot 2\beta_2 + \sin 4\Delta},$$

则内应力方向 $\gamma_1 = \tau$ 为:

$$\gamma_1 = \frac{1}{4} \arctan \left(\frac{\cos 4\Delta + \sin 4\Delta \cot 2\beta_2 - 1}{\cot 2\beta_1 - \cos 4\Delta \cot 2\beta_2 + \sin 4\Delta} \right). \quad (15)$$

双折射相位差 δ 为:

$$\delta = 2\arctan \sqrt{\frac{\sin 2\beta_1}{\sin 2(2\gamma_1 + \beta_1)}}, \quad (16)$$

则应力双折射大小为:

$$\delta_i = \frac{\delta\lambda}{2\pi l}, \quad (17)$$

其中: l 为样品长度。

3 测量实验与结果

实验装置如图 2 所示,光源为带有准直透镜的波长为 650 nm 的半导体激光器,起偏器和检偏器均为规格为 20 mm 的格兰-泰勒棱镜,其透光面积为 $\varphi 16$ mm,消光比为 10^{-5} ,被测样品为 $\varphi = 40$ mm、厚度 $l = 4$ cm 的无色特级 k9 玻璃,选用西安光机所研制生产的维尔德常数较大 $\varphi 20$ mm,厚 40 mm 的磁光玻璃,调制器磁光玻璃外绕金属线圈,对其通交流电产生正弦交变磁场,旋光器线圈通直流电产生稳恒磁场。利用光电二极管探测器,通过信号调制对探测到的信号光强进行前置放大、滤波和主放大,分离出直流分量、基频和二次谐波分量,分别通过数据采集卡输入计算机。

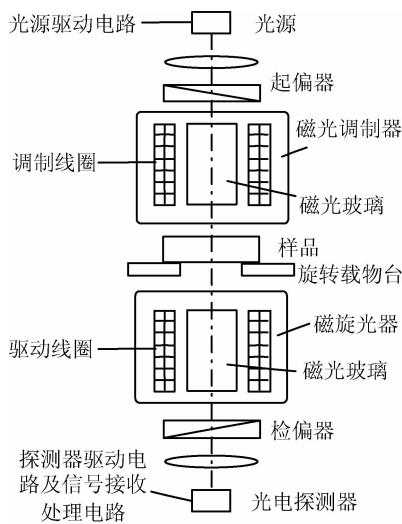


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Structure of measurement system

实验过程中,放入待测样品之前,旋转检偏器使其相对起偏器处于消光位置,此时 $\alpha = 90^\circ$,旋光器 $\beta = 0$,将待测样品放入主光路,记录此时样品所在位置 γ ;保持检偏器位置不变,调节旋光器驱

动电流 I ,根据式(6),改变旋光角度 β ,使检偏器再次处于消光位置;根据式(12)~(15),得出待测样品处于此位置时的内应力方向 γ ;多次旋转待测样品,并根据以上步骤得出待测样品的内应力方向以及应力双折射大小如表 1 所示。在基准位置 $\gamma_0 = 0^\circ$ 时,测得 $I_1 = 0.4$ A, $\beta_1 = 3^\circ 5' 46''$;转动 $\Delta = 15^\circ$ 之后,测得 $I_2 = 0.651$ A, $\beta_2 = 5^\circ 2' 25''$ 。由于玻璃内应力分布的特性,测得 $0 \sim 180^\circ$ 内的数据即可代表该样品的内应力分布特性,下表为每次旋转 15° 的测量和计算值:

$\Delta = 15^\circ$;

I 为旋光器线圈的外加驱动电流;

β 为根据式(6)得出的旋转角度;

γ 为根据式(15)得出的玻璃内应力方向;

δ_i 为样品的应力双折射。

表 1 实验数据表

Tab. 1 Experiment data

转动角度 $\times \Delta$	I/A	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	$\delta_i/$ ($\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}$)
0	0.400	$3^\circ 5' 46''$	$7^\circ 45' 16''$	20.67
1	0.651	$5^\circ 2' 25''$	$22^\circ 45' 16''$	20.65
2	0.276	$2^\circ 8' 16''$	$37^\circ 45' 19''$	20.67
3	-0.295	$-2^\circ 16' 45''$	$52^\circ 45' 17''$	20.71
4	-0.655	$-5^\circ 4' 18''$	$67^\circ 45' 17''$	20.82
5	-0.378	$-2^\circ 55' 24''$	$82^\circ 45' 19''$	20.74
6	0.400	$3^\circ 5' 46''$	$97^\circ 45' 15''$	20.75
7	0.651	$5^\circ 2' 25''$	$112^\circ 45' 18''$	20.77
8	0.276	$2^\circ 8' 16''$	$127^\circ 45' 16''$	20.92
9	-0.294	$-2^\circ 16' 45''$	$142^\circ 45' 17''$	20.65
10	-0.655	$-5^\circ 4' 18''$	$157^\circ 45' 17''$	20.65
11	-0.377	$-2^\circ 55' 24''$	$172^\circ 45' 19''$	20.77
12	0.400	$3^\circ 5' 46''$	$7^\circ 45' 16''$	20.69
13	0.651	$5^\circ 2' 25''$	—	—

由表 1 数据可知,采用磁光调制加旋光器的方法测量玻璃内应力的系统测量准确度对内应力方向可达 $5''$,应力双折射准确度高达 0.3 nm/cm。通过表 1 所示待测样品内应力数据即可判断此玻璃的质量好坏,并可进一步由此测量结果指导玻璃制品的退火及加工。考虑旋光器旋转光束在 $0 \sim 180^\circ$ 有效,则本系统可以测量的应力双折射值为 $0.01 \sim 1\ 740$ nm/cm。

4 结 论

本文提出了一种利用磁光调制法测量玻璃内应力的方法。利用磁光玻璃的磁致旋光效应,对信号光束进行正弦交变的磁光调制,将直接测量光强信号改为测量频率信号,提高了测量准确度,并采用通过调节外加电流的大小来控制磁旋光器旋转的信号光束偏振方向的角度,简化了测量操

作,有助于提高系统的可靠性,实现工程化。实验中,对玻璃内应力方向的测量准确度为 $5''$,对应力双折射的测量准确度为 0.3 nm/cm ,系统具有可靠性高、准确度高、操作方便、节省测量时间等特点。本文提出的方法对玻璃的退火和应用具有重要的指导价值。且随着该技术的继续深入与发展,测量速度和测量准确度将会进一步提升,相信该技术将会在国防和民用测量领域获得更大的应用前景。

参考文献:

- [1] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,1994:378-379.
WANG ZH J. *Optical Technology Manual* [M]. Beijing: China Machine Press, 1994:378-379. (in Chinese)
- [2] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003:49-51,55.
LIAO Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 49-51,55. (in Chinese)
- [3] 胡建明,曾爱军,王向朝. 基于光弹调制技术的波片相位延迟量测量方法[J]. 光学学报,2006,26(11):1681-1686.
HU J M, ZENG A J, WANG X ZH. Method to measure phase retardation of wave plate based on photoelastic modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11):1681-1686. (in Chinese)
- [4] WILLIAMS P A, POSE A H, WAN C M g. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36(25): 6466-6472.
- [5] CH M H, CH CH D, SU D. Method for determining the fast axis and phase retardation of a wave plate. [J]. *Opt. Soc. Am. (A)*, 1996, 13(9): 1924-1929.
- [6] 吴易明,高立民,李明,等. 一种玻璃材料内应力精密测定的方法[J]. 光子学报,2010,39(3):490-493.
WU Y M, GAO L M, LI M, *et al.*. A Precision Measurement Method of Glass Material Inner-stress [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2010, 39(3):490-493. (in Chinese)
- [7] 杨志勇,周召发,张志利. 基于正弦波磁光调制的空间方位失调角传递技术的改进[J]. 光学精密工程,2012,20(4):692-698.
YANG ZH Y, ZHOU ZH F, ZHANG ZH L. Improvement of transmitting spatial azimuth based on sine wave magneto-optic modulation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 692-698. (in Chinese)
- [8] 孟甜甜,符照森,刘辉,等. 基于磁光调制原理的高精度偏振角测量方法模拟与实验研究[J]. 西北大学学报:自然科学版,2011,41(6):964-968.
MENG T T, FU ZH S, LIU H, *et al.*. Modeling and experimental study on a high precision polarization measurement based on magneto-optical modulation [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2011, 41(6): 964-968. (in Chinese)
- [9] 陆卫国,吴易明,高立民,等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. 光学精密工程,2013,21(3):539-545.
LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. The use of polarized light to realize the rapid measurement of the spatial azimuth [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 539-545. (in Chinese)

作者简介:



李春艳(1987—),女,河南商丘人,博士研究生,2009年于西北工业大学获得学士学位,主要从事光学系统设计及偏振光学应用方面的研究。E-mail: yanerlc@163.com

导师简介:



吴易明(1975—),男,陕西乾县人,博士,研究员,博士生导师,1998年于西安交通大学获得学士学位,2009年于中科院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事偏振光信息处理方面的研究。E-mail: wym34@opt.ac.cn