

文章编号:1004-4213(2010)03-0490-5

一种玻璃材料内应力精密测定的方法*

吴易明,高立民,李明,陈良益,赵军丽

(中国科学院西安光学精密机械研究所 光学定向与瞄准技术研究室,西安 710119)

摘要:针对玻璃材料内应力的测量,提出了一种采用磁光调制技术,进行高准确度的应力双折射检测的新方案.该方法原理简单、测量准确度高.采用琼斯矩阵法分析了该方案的理论推导,并提出了当被测样品较大时,提高测试效率的两种可行方法.

关键词:光学玻璃;应力测量;偏光干涉法;磁光调制技术

中图分类号:TH744.2+5

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103903.0490

0 引言

在航天、军工项目研制中,对光学玻璃、晶体的高准确度内应力检测要求越来越高.测量光学玻璃加工残余应力的大小^[1-3],判断其分布规律并保证玻璃准确度是光学系统设计中亟待解决的问题之一.目前主要通过光学的方法测定样品的应力双折射,测量准确度的核心在于消光点的辨别.传统的测量方法有偏光干涉法和KD*P晶体电光调制法.由于光程差测量准确度为 $\pm 3 \sim \pm 5$ nm,偏光干涉法主要用于观测大块玻璃的整个应力分布情况及中等准确度测量,无法满足高准确度测量的要求.国外消光点的判断通常采用KD*P晶体电光调制法^[4],其光程差测量准确度为 ± 1 nm.但是KD*P晶体电光调制法成本高、设备复杂、电子器件易受温度的影响,且KD*P晶体性能随时间退化,设备使用周期较短,性能不可靠,目前很少被采用.本文提出了采用磁光调制技术^[2]进行高准确度的应力双折射检测方案,克服了传统检测方法的缺点.

1 磁旋光调制技术应用于应力双折射测量

磁光调制法(图1),采用旋光玻璃上加载正弦调制交变磁场的方法,磁场方向与光轴一致,检偏器后为光电转换器件,检偏器、光电转换器件装配在一个精密测角转台上,可以测量检偏器绕光轴转动角度.未加样品时,调节精密测角转台,检测信号为调制信号的完全二倍频信号时,得到零位置,此后样品被放置在可以绕光轴旋转、在垂直于光轴的方向进行二维移动的载物台上.加入被测样品后,由于应力

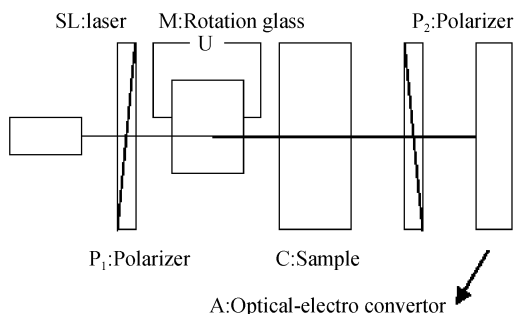


图1 基于磁光调制技术的应力检测示意图
Fig.1 Setup of stress device based on the magnetic-optic modulation technique

双折射的影响,检测信号中含有调制信号的基信号,再次调节精密测角转台,使基频信号为零,测得相对于零位置的转动角.

如图2,设起偏器所在方向为X轴方向,则与其垂直的方向为Y轴方向, θ 为磁旋光角度, δ 为光学材料双折射相位差, γ 为样品快轴相对起偏器透光轴(X轴)的旋转角, α 为出射光长轴的光矢量方位,即相对于X轴的旋转角.

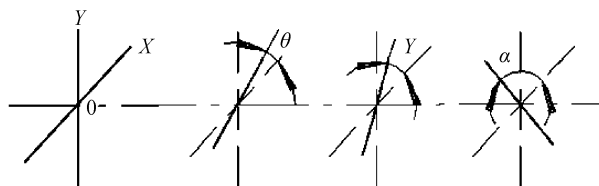


图2 参量示意图
Fig.2 Parameters scheme

磁光调制方法进行内应力检测的理论推导为旋光元件矩阵

$$X = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

被测光学材料作用矩阵

$$\mathbf{G}_c = \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\gamma & -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\gamma \\ -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\gamma & 1 + i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\gamma \end{bmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}$$

检偏器矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{out} = \mathbf{T} \mathbf{G}_c \mathbf{E}_{in} &= \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta - i \tan \frac{\delta}{2} \cos (\theta - 2\gamma) \\ \sin \theta - i \tan \frac{\delta}{2} \sin (2\gamma - \theta) \end{bmatrix} = \\ & \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos (\theta - \alpha) - i \cos \alpha \tan \frac{\delta}{2} \cos (2\gamma - \theta - \alpha) \\ \sin \alpha \cos (\theta - \alpha) - i \sin \alpha \tan \frac{\delta}{2} \cos (2\gamma - \theta - \alpha) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_{out} = |\mathbf{E}_{out}|^2 &= \cos^2 (\theta - \alpha) \cos^2 \frac{\delta}{2} + \\ & \sin^2 \frac{\delta}{2} \cos^2 (2\gamma - \theta - \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

采用磁光调制方法进行检测时,检偏器件位置应该确保磁光调制器外加正向和反向电压条件下,通过检偏器能量峰值相等。

$$\text{令 } I_{out}^- - I_{out}^+ = 0$$

求解 α 得到

$$\begin{aligned} \sin 2\alpha \sin 2\theta \cos^2 \frac{\delta}{2} + \sin^2 \frac{\delta}{2} \cdot \\ \sin 2(2\gamma - \alpha) \sin 2\theta = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $\theta \neq 0$, 得到

$$\tan 2\alpha = \frac{-\tan^2 \frac{\delta}{2} \sin 4\gamma}{1 - \tan^2 \frac{\delta}{2} \cos 4\gamma} \approx -\frac{\delta^2}{4} \sin 4\gamma \quad (4)$$

当 $4\gamma = 2\pi \pm \pi/2$ 时, $|\tan 2\alpha|$ 最大为 $\delta^2/4$ 。

由此可见,双折射的测量与 γ 相关,当 $\gamma = \pi/8$ 时,样品应力双折射测量分辨率最高,此时精密测角台有最大零位偏离角即长轴光矢量方位 α ,双折射相位差 δ 为

$$\delta \approx \sqrt{4 |\tan 2\alpha_{max}|} \approx 2 \sqrt{2} |\alpha_{max}| \quad (5)$$

应力双折射为

$$\delta_n = \delta \lambda / (2\pi l) \quad (6)$$

采用磁光调制方法进行检测时,被测样品应绕沿光束的轴进行旋转,以获得最大的 $\tan 2\alpha$ 值点,进而利用式(5)推算得到 δ 。

2 实验测量

2.1 实验装置

图3为采用磁光调制技术进行玻璃内应力检测的实验装置,主要包括激光器、起偏检偏系统、交变磁场系统、二维移动和精密测角系统。实验中使用波

长为 650 nm 的半导体激光器提供测试光束,磁旋光玻璃外绕金属线圈,利用其通交流电情况下提供交变磁场。待测样品放置在一个三维步进式精密移动平台上,移动平台为德国 PI 公司的 M 系列,在 X 和 Y 方向的步长分别为 100 nm 和 118 nm,并包含一个可在 XY 平面内的旋转平台。精密测角转台为细分多齿分度台,产品型号为 XDFT-720A,其准确度为 1",检偏器和光电转换器件固定在细分多齿分度台上,并且保证其通光轴与分度台转轴重合。本实验中由计算机控制激光器开关和二维移动平台移动,并显示光电转换器检测信号。

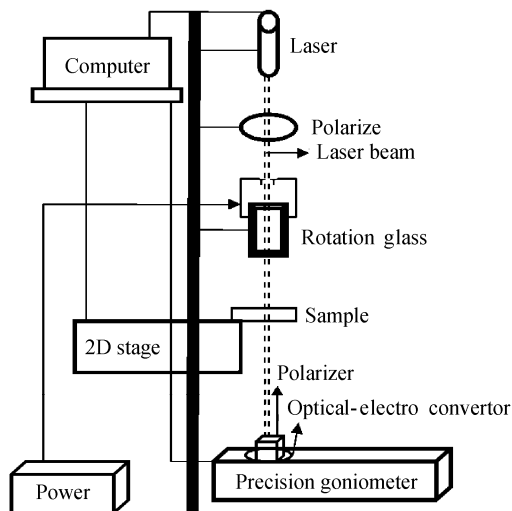


图3 磁光调制技术应力检测实验装置
Fig. 3 Setup of Stress device system based on the Magnetic-Optic Modulation technique

2.2 实验过程

实验过程中,首先调整光路中各设备水平,使之与激光光轴垂直,微调细分多齿分度台,直至光电转换器件检测信号为调制信号的完全二倍频信号时,得到零位置,记录此时分度台读数,将此时数值作为基准。然后取一玻璃样品,将其放置于位移平台的旋

转平台上,再次旋转细分多齿分度台,使基频信号为零,再次记录此时分度台数值,此后,以光轴为轴,旋转放置样品的旋转平台(可每次旋转任意角度),相应调整多齿分度台,使其出现零位置,记录每次分度台读数,取其与基准数值的最大差值的长轴光矢量方位计算玻璃样品的内应力.下表为厚度 2 cm 的普通石英玻璃内应力检测数据:

表 1 普通石英玻璃内应力检测数据

Table 1 Record of measurement common silici-glass inner-stress

Reference angle	142°15'12"	
Number of revolution (20° each time)	Angle of precision goniometer	Major axis light ector imuth(α)
1	142°14'53"	19"
2	142°14'58"	14"
3	142°15'11"	1"
4	142°15'16"	4"
5	142°15'38"	26"
6	142°14'54"	32"
7	142°14'58"	46"
8	142°15'12"	0"
9	142°15'19"	7"
10	142°15'39"	27"
11	142°14'54"	42"
12	142°14'58"	46"
13	142°15'12"	0"
14	142°15'20"	8"
15	142°15'35"	23"
16	142°14'54"	42"
17	142°14'58"	46"
18	142°15'12"	0"

由表 1 知, $\alpha_{\max} = 46''$, 根据式(5)和(6)得到此样品的应力双折射为

$$\delta n = 2.185 \text{ nm/cm}$$

3 理论分析

根据有关资料以及最近几年对于磁光调制技术的研究经验^[5-6],采用磁光调制方法, α 的测量准确度可以达到 1"之内, δ 的检测准确度可以达到 0.357°,采用 550 nm 的光源进行内应力检测时,可以达到的光程差检测准确度为 0.545 nm.采用该方案实现光学材料内应力双折射的高准确度测量是可行的.

将式(2)用第一类贝塞尔函数展开

$$I_{\text{out}} = |E_{\text{out}}|^2 = \frac{1}{2} \left[\cos^2 \frac{\delta}{2} \cos 2\alpha + \sin^2 \frac{\delta}{2} \cdot \cos 2(2\gamma - \alpha) \right] \cos 2\theta + \frac{1}{2} \left[\sin 2\alpha \cos^2 \frac{\delta}{2} + \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin(4\gamma - 2\alpha) \right] \sin 2\alpha + \frac{1}{2} = A \cos 2\theta +$$

$$B \sin 2\theta + \frac{1}{2} \approx \frac{1}{2} + A J_0(m_f) + 2B J_1(m_f) \cdot \sin \omega t + 2A J_2(m_f) \cos 2\omega t \quad (7)$$

式中

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

$$B = \frac{1}{2} \left(\sin 2\alpha \cos^2 \frac{\delta}{2} + \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin(4\gamma - 2\alpha) \right)$$

式中 $\theta = VLM_m \sin \omega t$ 为磁旋光角度, ω 为调制频率, $m_f = 2VLB_m$ 定义为调制度, V 是表征旋光玻璃特性的常量, L 是旋光玻璃有效长度, B 是穿过旋光玻璃的磁感应强度.

$$J_0(m_f) \approx 1 - m_f^2$$

$$J_1(m_f) \approx m_f/2 - m_f^3/16$$

$$J_2(m_f) \approx m_f^2/8 - m_f^4/96$$

J_0, J_1, J_2 分别是 0 阶、1 阶、2 阶第一类贝塞尔函数.采用磁光调制技术进行内应力检测时,检偏器是否处于消光态的方法是通过式(7)中 $\sin \omega t$ 系数是否等于 0 来判别的.显然,当式(4)成立时 $\sin \omega t$ 系数等于 0,对于确定的系统, $J_1(m_f)$ 是常量, $J_1(m_f)$ 越大,信号检测系统越灵敏,检测准确度越高.按照这一方法进行检测时,被测样品需要进行 360° 旋转才可以确定内应力大小和方向;根据测量需要,还可以对样品进行点阵扫描,所以测试过程是较为费时的.要提高测试仪器的效率,可以依据检测信号中 $\sin \omega t$ 信号强度的大小,得到被测光学元件内应力的方向和大小,这对内应力值较小的器件是可行的.内应力值增大时,输出信号的非线性增大,测量准确度会受到影响,需要在信号接收端增加跟踪单元,实时跟踪系统的消光态.还有一种方法就是在样品之后,检偏器之前增加一个直流磁光调制器,调制器的磁光旋光角大小与外加驱动电流成正比,以此改变通过样品后光矢量的方向,使检偏器处于消光状态.通过检测外加驱动电流的大小,即可得到被测样品的内应力.

4 结论

玻璃材料内应力的测量,主要的是消光点的辨别准确度.采用磁旋光玻璃的磁光调制技术或者采用 $KD * P$ 晶体的电光调制技术都是为了提高消光点判别准确度而提出的解决方案.但是,磁光调制和电光调制技术都向测量系统引入新的光学介质,新光光学介质引入又必然对系统准确度有所影响. $KD * P$ 晶体的稳定性较差,使用温度等因素会对应力测量带来较大的误差,按照我国目前对 $KD * P$ 晶体研究的现状,近期很难达到高的应力测量准确度.本文提出了采用磁光调制技术进行高准确度的应力双

折射检测的新方法,基于西安光机所在磁旋光玻璃材料炼制和应用方面的研究成果,能够达到很高的内用力测量准确度,为玻璃内应力高准确度测量提供一个新的途径.

参考文献

- [1] WANG Zhi-jiang. Optical technology manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1994:378-379.
王之江. 光学技术手册 [M]. 北京:机械工业出版社,1994:378-379.
- [2] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006:450,456-458.
郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2006:450,456-458.
- [3] LIAO Yan-biao. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003:49-51,55.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003:49-51,55.
- [4] BIRNBAUM G, CORY E, GOW K. Interferometric null method for measuring stress-induced birefringence [J]. *Appl Opt*, 1974, **13**(7):1660-1669.
- [5] SMITH A M. Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber[J]. *Appl Opt*, 1978, **17**(1):52-56.
- [6] ZHENG Hong-zhi, MA Cai-wen, WU Yi-ming, *et al.* Temperature adaptability of magneto-optic modulation in a disconnect mechanically azimuth measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):638-640.
郑宏志,马彩文,吴易明,等. 无机械连接方位角测量系统中磁光调制的温度适应性的研究[J]. 光子学报,2004, **33**(5):638-640.

A Precision Measurement Method of Glass Material Inner-stress

WU Yi-ming, GAO Li-min, LI Ming, CHEN Liang-yi, ZHAO Jun-li

(Optical Directional and Pointing Technique Research Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Aiming at measurements of glass material inner-stress, a new high precision measurement method is proposed using the Magnetic-Optic Modulation technique for the stress birefringence. The proposed method has the strong points that simple theory, high precision and so on. The theory derivation is also given using the Jones Matrix, and the results show that the two methods to improve measurement efficiency are feasible when the testing sample is much bigger.

Key words: Optical glass; Measurement of stress; Polarized interference method; Magnetic-optic modulation



WU Yi-ming was born in 1975. Now he is an associate professor and a Ph. D. degree candidate at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. His research interests focus on optical measurement technology of geometric sense and applied technology of polarization optics.