

# 光学玻璃应力双折射检测方法研究

魏小红 高波 李强 徐凯源 刘昂 何宇航 柴立群

成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041

**摘要** 使用高精度数字应力仪测量光学玻璃的应力双折射, 给出整体应力分布及大小。实验表明温度及重力对材料/玻璃的应力双折射分布和大小有非常明显的影响, 相对初始测量结果, 应力双折射最大值减少了 83%, 均方根 (RMS) 值减少了 87%; 且在温度趋于稳定时, 重力的作用使得材料应力双折射的最大值增大了 68%, RMS 值增大了 90%。对光学材料/玻璃应力双折射的高精度数字化检测对于光学加工和使用具有重要的指导意义。

**关键词** 测量; 光学检测; 光学玻璃; 应力双折射

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s212002

## Study of the Stress Birefringence Measurement of Optical Glass

Wei Xiaohong Gao Bo Li Qiang Xu Kaiyuan

Liu Ang He Yuhang Chai Liqun

Chengdu Fine Optics and Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** Using the high precision digital stress measurement instrument, the distribution of stress birefringence (SBR) of optical glass is digitally measured. Experiment shows that the impact of temperature and gravity on the stress birefringence of glass cannot be neglected, compared to the first measurement result, the max value of SBR reduces 83%, and the root mean square (RMS) value reduces 87%. Also, when temperature maintains constant, the effect of gravity is still obvious, experimental result shows that the max value of SBR increases 68%, and the RMS value increases 90% in this situation. The stress birefringence of optical material/glass distribution measurement with high precision has great impact on optical machining.

**Key words** measurement; optical testing; optical glass; stress birefringence

**OCIS codes** 120.4630; 160.2750; 260.1440

## 1 引 言

光学玻璃通常是各向同性的, 即折射率在各个方向都相同。但是, 当机械应力引起材料结构变化, 导致沿着光轴方向微粒密度不同。由于光在材料中的传输速度与材料密度有关, 材料这种微结构的改变会导致光在介质中不同方向的传播速度不同, 引起不同方向的折射率不同。介质也因此有了双折射特性, 称这种效应为应力双折射。

惯性约束聚变装置中需要大量的光学元件, 用于这些元件加工的光学材料如果存在由于退火温度不均匀而导致的应力分布不均匀, 由于元件存在残余应力, 引起相位测量误差, 进而造成面形测量误差<sup>[1]</sup>; 加工过程中材料会由于应力作用发生变形降低加工精度与效率, 加工好的光学元件表面会随时间而慢慢变形<sup>[2]</sup>; 应力分布不均匀还会引起光学均匀性降低<sup>[3]</sup>、折射率分布不一致<sup>[4]</sup>、降低元件的损伤阈值<sup>[5]</sup>。

因此, 在精密光学科研与生产中对光学元件的应力指标提出更严格的要求, 进而对应力检测提出更高要求。传统的检测应力的方法有 1/4 波片法、偏光干涉法<sup>[6]</sup>等, 但其检测精度与速度已不能满足需求。本文介绍使用面成像数字应力仪<sup>[7]</sup>测量光学玻璃应力双折射的方法, 并通过实验证明重力与温度会影响材料应力双折射的大小及分布。

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02

作者简介: 魏小红(1981—), 女, 博士, 工程师, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: xhwei4@126.com

## 2 面成像数字应力仪测量原理与方法

### 2.1 测量原理

光源发出的自然光经过起偏器 P 产生线偏振光,线偏振光经过样品由于双折射效应成为椭圆偏振光,再经  $1/4$  波片  $Q_A$  变成线偏振光,最后转动检偏器 A 得到新的消光位置,通过探测器记录检偏器转过的角度得到应力的大小,如图 1 所示。

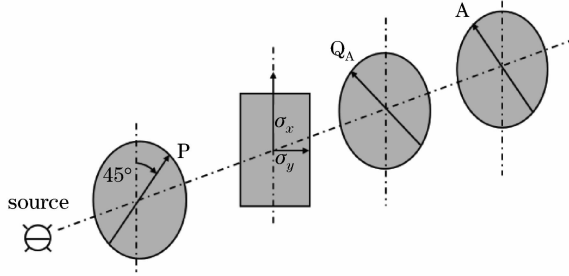


图 1 应力双折射检测原理

Fig. 1 Principle of stress birefringence measurement

选取  $x$  轴和  $y$  轴作为  $1/4$  波片快慢轴方向,放入应力样品,两个主应力方向分别与  $x, y$  轴成  $45^\circ$ 。设样品内应力产生的相位差为  $\delta$ ,经被测样品和  $1/4$  波片共同作用使起偏器出射的线偏振光的光矢量偏转了  $\alpha$  角,则出射光的琼斯矢量可由矩阵相乘得到

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{G}_{1/4} \cdot \mathbf{G}_{\text{sample}} \cdot \mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & -i \sin \frac{\delta}{2} \\ -i \sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} \\ \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  为光矢量沿  $x$  轴的琼斯矢量,  $\begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} & -i \sin \frac{\delta}{2} \\ -i \sin \frac{\delta}{2} & \cos \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}$  为快轴与  $x$  轴同方向、延迟量为  $\delta$  的光矢量的

的琼斯矩阵,  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  为快慢轴分别沿  $x, y$  轴的  $1/4$  波片的光矢量的琼斯矩阵。

可知,从  $1/4$  波片出射的为线偏振光,其光矢量与  $1/4$  波片快轴( $x$  轴)的夹角  $\alpha$  即等于  $\delta/2$ 。所以偏转角  $\alpha$  与光程差  $\Delta$  的关系为  $\alpha = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi}{\lambda} \Delta$ 。

### 2.2 测量方法

面成像数字应力仪采用宽光束光源照射到样品表面,用成像阵列 CCD 作为探测器。检偏器初始位置为其透光轴与起偏器的透光轴方向垂直,此时处于消光位置(检偏器零位), $1/4$  波片的快、慢轴与起偏器透光轴平行或垂直时(未放入被测样品),保持暗视场。检偏器应从未放样品时的零位转过  $\alpha$  角以获得新的消光位置;改变起偏器的轴向位置(以光学系统的旋转代替样品的旋转),进行多次测量,然后将分步测量得到的结果利用三步位相法解算得到完整的应力双折射分布。

## 3 实 验

实验采用德国 ILIS 面成像数字应力仪测量熔石英玻璃的应力分布,实验室环境洁净度优于 10 万等级,温度为  $22^\circ\text{C}$ ,温度漂移小于  $0.1^\circ\text{C}/\text{h}$ ,湿度为 50%。测试波长为 592 nm,通光口径为  $108\text{ mm} \times 108\text{ mm}$ ,采样间距约为 0.106 mm。

### 3.1 温度平衡与放置平衡时的应力分布

将两块外形尺寸分别为  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 、 $410\text{ mm} \times 410\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  的熔石英材料在实验室竖直放置 24 h 后,使用面成像数字应力仪分别测量其应力双折射,对于大口径光学玻璃则通过拼接测量的

方法得到其整体的应力双折射分布。测量结果如图 2 所示,其中图 2(a)所示的应力双折射大小为  $1.431 \text{ nm/cm}$ ,图 2(b)所示的应力双折射大小为  $3.201 \text{ nm/cm}$ 。

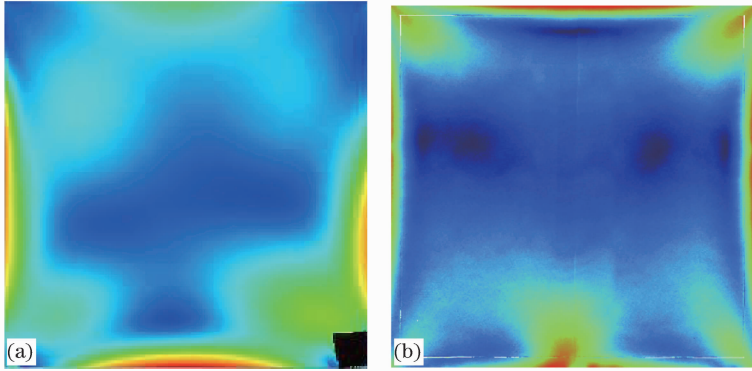


图 2 用面成像数字应力仪测量熔石英玻璃的应力分布。(a) 熔石英玻璃尺寸为  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ;

(b) 熔石英玻璃尺寸为  $410 \text{ mm} \times 410 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$

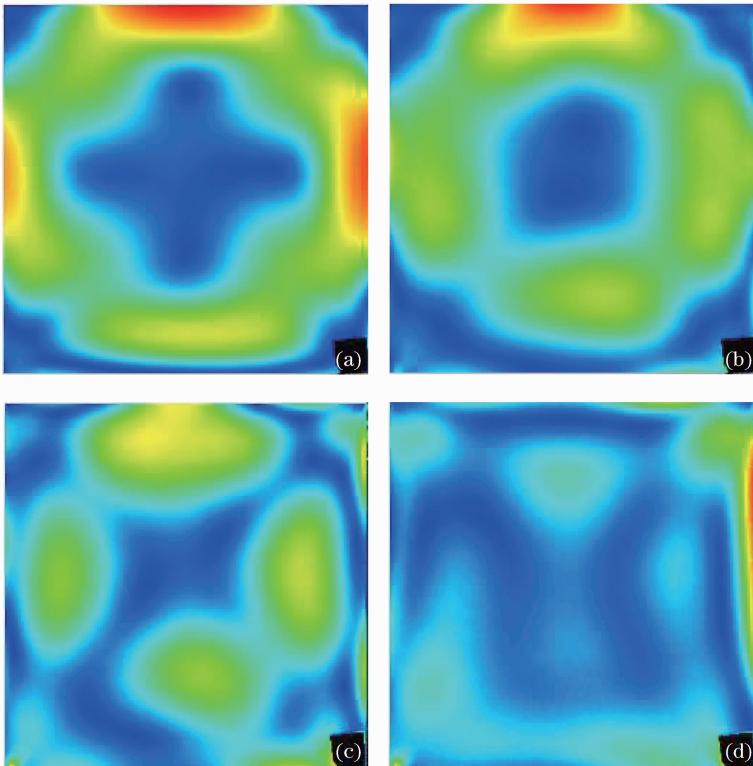
Fig. 2 Stress birefringence distribution of fused silica. (a) Size of the material is  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ;

(b) size of the material is  $410 \text{ mm} \times 410 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$

由图 2 可见,玻璃的四个边和角的应力双折射明显比中间的要大,且实验发现被测玻璃/材料体积越大,四个边和角的应力双折射就越大。为分析温度和重力对测量结果的影响,改变被测玻璃的温度和放置平衡时间,测量玻璃的应力双折射大小和分布。

### 3.2 温度与重力对玻璃应力分布的影响

将外形尺寸为  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的熔石英方砖加热,每隔  $2 \text{ min}$  测量一次应力双折射,测量结果如图 3(a)~(d)所示,间隔  $30 \text{ min}$  后的测量结果如图 3(e)所示,间隔  $2 \text{ h}$  的测量结果如图 3(f)所示。应力双折射的大小如表 1 所示,其中(a)~(f)对应的应力双折射最大值、平均值及均方根(RMS)值分别与图 3 中(a)~(f)的测量结果对应。



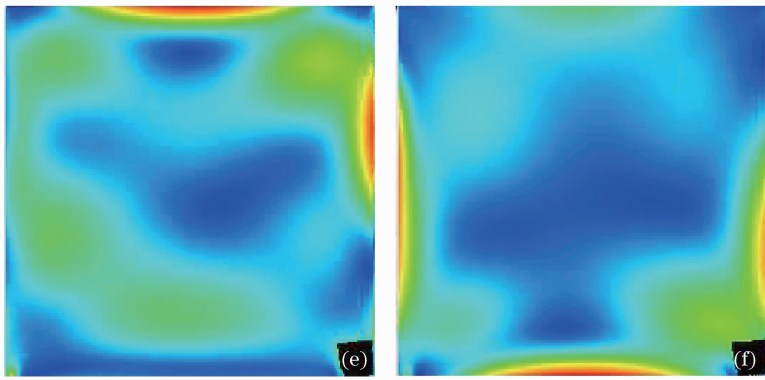


图 3 温度和重力对熔石英玻璃应力双折射分布的影响

Fig. 3 Influence of temperature and gravity on stress birefringence distribution of fused silica

表 1 用面成像数字应力仪测量熔石英玻璃 6 次的应力双折射

Table 1 Results of the stress birefringence of fused silica measured by image digital stress

Parameter	birefringence instrument						Unit: nm/cm
	Value						
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	
Max	11.617	3.717	1.038	1.193	1.431	2.005	
Average	4.587	1.397	0.488	0.316	0.480	0.592	
RMS	5.251	1.572	0.546	0.354	0.525	0.674	

测量结果显示,表 1(a)的应力双折射 RMS 值最大,分布最不均匀,且应力双折射值最大;表 1(b)、(c)对应的应力双折射值显示,随着时间的推移,玻璃的温度渐渐降低,热致应力双折射逐渐褪去,故而应力双折射分布渐趋均匀,且应力双折射最大值、平均值及 RMS 值均减小;表 1(d)对应的结果显示随着平衡时间的延长,应力双折射的平均值和 RMS 值进一步降低,但边缘应力双折射增大,导致应力双折射最大值比表 1(c)大;随着平衡时间的愈加延长,应力双折射的分布更加不均匀,且值更大,如表 1(e)、(f)所示。计算表面,表 1(f)对应的测量结果相对初始测量结果,即表 1(a)中对应的结果,应力双折射最大值减少了 83%、RMS 值均减少了 87%左右;表 1(f)对应的测量结果相对温度稳定时,即表 1(d)对应的结果,应力双折射最大值增大了 68%,RMS 值增大了 90%。

由此可见,温度和重力对测量光学玻璃/材料的应力双折射有重要影响。而通常采用的经过足够多的温度平衡和放置平衡后测量材料/玻璃的应力双折射,得到的测量结果虽然稳定,但其中已引入重力的影响,并不单纯就是材料/玻璃由于退火不均匀或者机械外力导致的应力双折射,且被测测量/玻璃的重量越大,重力对应力双折射的测量结果影响越大。

## 4 结 论

本文使用面成像数字应力仪测量熔石英玻璃的应力双折射,实验表明温度及重力对材料/玻璃的应力双折射分布和大小有非常明显的影响,相对初始测量结果,应力双折射最大值减少了 83%,RMS 值减少了 87%;且随着平衡时间的延长材料/玻璃的应力分布及大小会有较明显的变化,在温度趋于稳定时,重力的作用使得材料应力双折射的最大值增大了 68%,RMS 值增大了 90%。对更大尺寸的光学材料/玻璃而言,重力对应力双折射测量结果的影响将更显著。对光学材料/玻璃应力双折射的高精度数字化检测对于光学加工和使用具有重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Chunyu, Kang Dongyel, Burge H James. Effect of birefringence on Fizeau interferometry that uses a polarization phase-shifting technique [J]. Appl Opt, 2005, 44(35): 7548—7553.
- 2 Keith B Doyle, Victor L Genberg, Gregory J Michels. Numerical methods to compute optical errors due to stress birefringence [C]. SPIE,

- 2002, 4769: 34–42.
- 3 Wang Shenglai, Wang Bo, Zhang Guanghui, *et al.*. Study on important of the homogeneity of KDP crystals by annealing [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(4): 437–440.  
王圣来, 王 波, 张光辉, 等. 退火温度对 KDP 晶体光学均匀性的影响研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 437–440.
- 4 Schott. TIE-27: Stress in Optical Glass[OL]. fp. optics. aruzona. eda/optomch/reference/glass/Schott/tie-27\_stress\_in\_optical\_glass\_us.pdf. [2015-6-9].
- 5 B Woods, M Runkel, M Yan, *et al.*. Investigation of damage in KDP using scattering techniques [C]. 28th Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, 1996: UCRL-JC-125368.
- 6 Chiayu Ai, James C Wyant. Testing stress birefringence of an optical window [C]. SPIE, 1991, 1531:165–172.
- 7 Henning Katte. Imaging measurement of stress birefringence in optical materials and components [J]. Photonik International, 2009, 1: 39–41.

栏目编辑: 何卓铭