

激光回馈玻璃材料微小内应力检测技术

陆龙启, 邓 勇

(南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要:平板玻璃广泛应用于建筑、交通、航天等领域,其应力大小是衡量产品质量的重要指标,为快速准确地检测退火后玻璃中的微小应力,本文基于激光回馈效应研究平板玻璃应力测量技术。通过论述激光回馈理论中的偏振跳变现象,分析系统中存在的测量锁区问题,并采用增加偏置波片的方法,间接扩大了系统测量范围。对样品的测量结果进行误差分析,排除外界温度引起的误差后,检测技术的精确性与重复性得到提高。实验结果表明:平板玻璃样品的应力测量结果中最大值为 0.65 Mpa,标准差低于 0.15 Mpa,属于产品的标准应力范围,此外测试系统具有结构简单、精确度高、稳定性强等特点,为实现在线无损检测平板玻璃应力提供重要方法。

关键词:激光回馈;偏振跳变;平板玻璃;应力分析

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.004

Technology for testing stress of flat glass based on laser feedback effect

LU Long-qi, DENG Yong

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Flat glass is widely used in construction, transportation, aerospace and other fields, and its stress is an important index to measure product quality. In order to detect the small stress in glass quickly and accurately, this paper studies the technology for testing stress of flat glass based on laser feedback effect. By discussing the phenomenon of polarization flipping in laser feedback theory, the problem of measuring lock area in the system is analyzed, and the method of adding offset wave plate is adopted to expand the measuring range of the system. The accuracy and repeatability of the detection technology are improved after excluding the errors caused by external temperature by analyzing the error of the measurement results of the sample. The experimental results show that the maximum value of the sample of flat glass is 0.65 Mpa, and the standard deviation is less than 0.15 Mpa, which belongs to the standard stress range of the product. In addition, the testing system has the characteristics of simple structure, high accuracy and strong stability, which provides an important method for on-line nondestructive testing the stress in flat glass.

Keywords: laser feedback; polarization flipping; flat glass; stress analysis

1 引 言

平板玻璃因具有耐热性强、透光率高、易加工等特点而被广泛应用于各类工业制造领域,影响平板

玻璃质量的诸多因素中,应力大小是关键的一项指标。一般情况下经过工艺处理后玻璃中的应力较小,若内部应力过大会降低玻璃的稳定性和机械强

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61775118)资助。

作者简介:陆龙启(1994-),男,硕士,主要从事激光技术及精密仪器方向的研究工作。

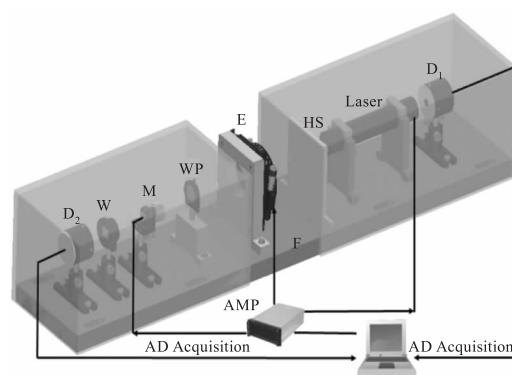
通讯作者:邓 勇(1965-),男,教授,主要从事测试技术及仪器方向的研究工作。E-mail:dengy@ntu.edu.cn

收稿日期:2020-10-09;修订日期:2020-11-11

度,甚至引起玻璃热炸裂或自爆的情况发生,因此控制消除内应力,提高其品质具有重要意义。玻璃的应力一般分为热应力、机械应力和结构应力,在生产过程中玻璃各部分温度分布不均匀会出现温度梯度^[1],继而产生热应力,热应力是由自身特性决定,对玻璃质量的影响较大。为指导检验玻璃的平板质量,国内外专家对玻璃应力检测技术进行深入研究,主要检测方法包括 Senarmont 补偿法、Tardy 测量法、筒式偏光仪法、X 射线法等^[2],上述测量方法各有优劣,适用于不同应用场合。目前应用较广泛的是筒式偏光仪法和 Senarmont 补偿法,偏光法核心思想是具有双折射的玻璃产生光程差时,由检偏器上得到的干涉色判定光程差^[3],从而确定双折射大小,该方法结构简单,测量精度约为 100 nm,灵敏度较低且存在主观误差,只适合定性测量的场合;Senarmont 补偿法主要是将起偏器、检偏器与四分之一波片配合使用,调节元件旋转方向,由检偏器的旋转角计算应力双折射大小^[4],该方法结构简单,测量可靠性较高,但四分之一波片严重影响测量精度,且操作步骤较复杂。上述两种常用的测量方法仍存在较多问题,相关研究人员纷纷提出不同解决方案,其中清华大学张书练课题组深入研究激光回馈效应并加以应用,基于激光回馈效应的光学系统具有易准直、成本低、结构紧凑和精度高等特点,所以广泛应用于速度测量、位移测量、成像等领域^[5-6]。故本文提出一种基于激光回馈效应的玻璃应力检测技术,其核心思想是玻璃的反射光与腔内光场相互作用进行调制,玻璃的双折射效应会产生 o 光和 e 光的相位差,并以此表征玻璃中的应力大小。但经过标准的平板玻璃退火操作后,玻璃中的残余应力较小甚至被完全消除^[7],由于测量系统存在测量锁区的现象,不能直接检测其中微小的应力,因此本文选择稳定的全内腔激光器作为光源,并配合稳频电路保证光学测量系统的稳定性。为解决测量锁区的问题,进一步扩大测量范围,理论分析附加偏置波片方法的测量原理,详细分析玻璃厚度、玻璃与偏置波片对轴精度对测量过程的影响,为证明方案的可行性提供基础。对平板玻璃样品的测量结果进行误差分析,确定误差的主要来源,并通过减小外界温度、振动等因素干扰后,系统的稳定性与重复性得到整体提高,最终获得较好的测量结果。

2 系统的结构设计

激光回馈玻璃应力检测系统结构如图 1 所示,采用波长 632.8 nm 全内腔氦氖激光器作为系统光源,激光管长 135 mm,腔镜是透射率为 1.1% 和 0.5% 的高反镜,对激光器的主要要求是输出单纵模线偏振光^[8]。反射率为 10% 的回馈镜 M 与压电陶瓷粘接,压电陶瓷是 PI 公司耐压 1 kV 的筒状压电陶瓷。计算机通过控制数据采集卡输出三角波电压,经过放大电路后驱动压电陶瓷前后往复运动,调节回馈外腔腔长。偏置波片 BW 为标准 45° 波片,用于扩大系统测量范围,检测微小应力。渥拉斯顿棱镜与光电探测器 D2 组合使用,采集 o 光和 e 光的偏振态信号输入计算机,另一光电探测器 D1 采集的光强信号由采集卡输入计算机,用于后续的程序处理。电动控制台的工作电流在 1.5A 以内,步距角为 1.8°,主要用于承载玻璃样品,配合自动控制程序自动定位玻璃主应力方向,具有持续高效的工作能力。系统中多功能电箱的主要包括采集光强信号、放大驱动电压、稳频信号处理等模块,集成度高且性能稳定。



D1、D2 - 光电探测器; W - 渥拉斯顿棱镜; M - 外腔回馈镜; WP - 偏置波片; E - 电动控制台; HS - 隔热板; Laser - 全内腔激光器; AMP - 多功能电箱; S - 隔离罩; F - 系统底座

图 1 激光回馈平板玻璃应力自动测量系统

Fig. 1 Laser feedback flat glass stress automatic measurement system

3 系统的测量方法

平板玻璃中的应力会引起双折射现象,振动面相互垂直的偏振光在玻璃中传播速度不同,继而产生光程差,一般情况下难以对光程差进行直接测量,总是由偏振光之间的相位差计算,即:

$$\Delta = \delta\lambda/2\pi \quad (1)$$

国家标准(GB903-87)中规定玻璃的应力可由

单位厚度的光程差表示:

$$\sigma = \delta\lambda / (2\pi d) \quad (2)$$

系统将三腔镜理论与半经典理论相结合,分析得 o 光和 e 光的有效增益受到回馈外腔腔长的影响,当压电陶瓷扫描外腔时激光器的偏振态会从一种模式转换成另一种模式,即偏振跳变现象^[9],如图 2 所示。图 2 中偏振态信号、光强信号分别由探测器 D2、D1 采集,在一个完整调谐周期内,几个特征点, a_1 点、 a_2 点为光强最小点, b_1 点为偏振跳变点, b_1 点、 b_2 点为等光强点,分别与光强信号曲线上的 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 点对应。由图可知, B_1 点至 B_2 点的相位差是样品相位差的两倍, A_1 点至 A_2 点为一个间隔为 2π 的调谐周期。由上可得公式(3),即相位差与偏振跳变点的关系式^[10]:

$$\delta = \pi l_{b_1 b_2} / l_{a_1 a_2} \quad (3)$$

结合式(1)样品的应力双折射可表示为:

$$\sigma = \delta\lambda / (2\pi d) = \lambda l_{b_1 b_2} / (2d l_{a_1 a_2}) \quad (4)$$

式中, σ 为样品引起的双折射光程差; λ 为波长; d 为玻璃厚度; $l_{b_1 b_2}$ 为 b_1 、 b_2 间的长度; $l_{a_1 a_2}$ 为 a_1 、 a_2 间的长度。但当回馈外腔各项异性较小时,偏振光的有效增益小于 0,偏振跳变现象消失即为系统的测量锁区^[11]。此时利用附加的偏置波片与待测玻璃进行组合测量,以组合测量值与偏置波片测量值的差表征由玻璃应力引起的相位延迟大小。

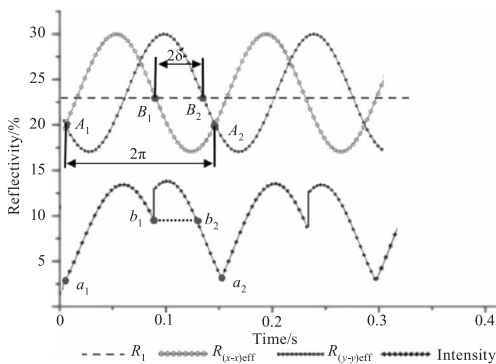


图2 激光器调制曲线

Fig. 2 Laser modulation curve

下面从理论验证该方案的可行性,设偏置波片与被测玻璃的相位延迟分别为 δ' 、 δ ,快轴与 x 轴的夹角分别为 θ' 、 θ ,于是得到其琼斯矩阵为:

$$G = \cos \frac{\delta}{2} \begin{pmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ -i \tan \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & 1 + i \tan \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$G' = \cos \frac{\delta'}{2} \begin{pmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta'}{2} \cos 2\theta' & -i \tan \frac{\delta'}{2} \sin 2\theta' \\ -i \tan \frac{\delta'}{2} \sin 2\theta' & 1 + i \tan \frac{\delta'}{2} \cos 2\theta' \end{pmatrix} \quad (6)$$

任何一个酉矩阵可以由一个酉矩阵与一个旋转矩阵的乘积表示,在该偏振光系统中,波片和旋光器的琼斯矩阵属于酉矩阵,此时可以将偏置波片与玻璃的组合视为一组等效波片与旋光器,即为:

$$G \cdot G' = G_e \cdot G_r \quad (7)$$

式中:

$$G_e = \cos \frac{\delta_e}{2} \begin{pmatrix} 1 - i \tan \frac{\delta_e}{2} \cos 2\theta_e & -i \tan \frac{\delta_e}{2} \sin 2\theta_e \\ -i \tan \frac{\delta_e}{2} \sin 2\theta_e & 1 + i \tan \frac{\delta_e}{2} \cos 2\theta_e \end{pmatrix}$$

$$G_r = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

对于本文设计的光学回馈系统,激光分别正向、反向经过组合部分,而等效旋光器属于自然旋光器,在系统中无作用效果^[12]。由上式可得:

$$\cos \delta_e = \cos \delta \cdot \cos \delta' - \sin \delta \cdot \sin \delta' \cdot \cos [2(\theta - \theta')] \quad (8)$$

当偏置波片与待测玻璃的快轴与 x 轴夹角为 0° 时,由上式可得:

$$\delta_e = \delta + \delta' \quad (9)$$

因此等效波片的相位延迟是偏置波片与待测玻璃相位延迟之和。使用式(9)在调节过程中偏置波片的快轴方向与玻璃的应力轴方向往往不能保持一致,设 $\theta' = 0^\circ$, θ 偏离范围为 $\pm \alpha^\circ$,组合部分的等效应力轴方向 θ_e 偏离 0° ,此时引起测量误差。当偏置波片相位延迟 δ' 为 45° , α 为 5° ,使用 Matlab 仿真待测玻璃相位延迟分别为 1° 、 5° 、 10° 、 15° 时的测量结果,如图 3 所示。由图 3 可知当待测玻璃偏离角度在 $\pm 5^\circ$ 时,随着玻璃相位延迟的增大,测量误差逐渐增大,而平板玻璃经过退火处理后应力减小甚至消失^[13],此时引起的测量误差较小。为进一步提高测量精度,设待测玻璃的相位延迟 $\delta = 1^\circ$,偏置波片相位延迟 $\delta' = 45^\circ$,模拟分析在玻璃偏离角度为 1° 、 5° 、 10° 、 15° 四种不同条件下的测量误差,如图 4 所示。

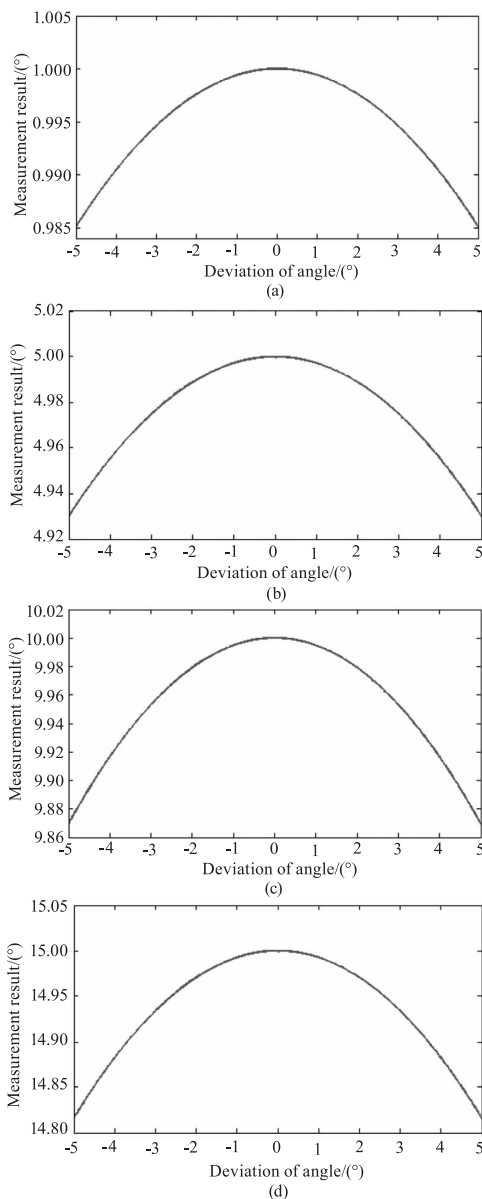


图3 玻璃相位延迟与测量误差的关系

Fig. 3 The relationship between glass phase delay and measurement error

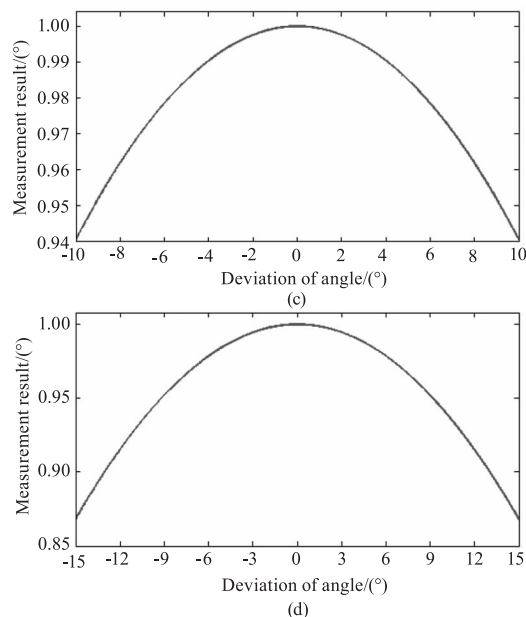
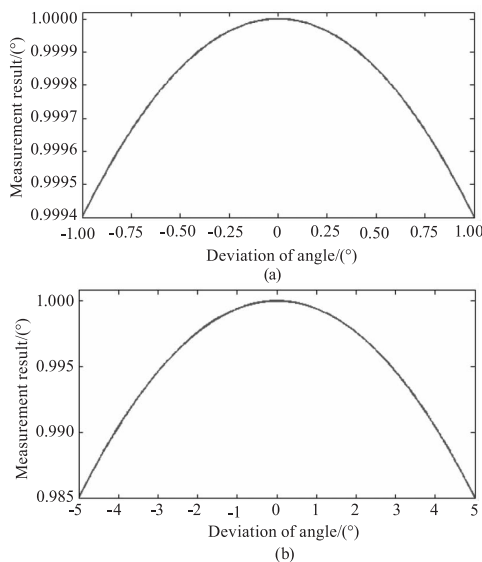


图4 玻璃偏离角度与测量误差的关系

Fig. 4 The relationship between glass deviation angle and measurement error

由模拟结果可知,随着待测玻璃的偏离角度增大,测量误差随之增大,当偏离角度达到 15°时,相位延迟偏差最大为 0.13°,当偏离角度在 1°以内时,引起的相位延迟误差极小。在调整玻璃的过程中,将偏离角度控制在 ±1°时可以忽略该项误差。

本文采用附加的偏置波片与待测玻璃进行组合测量的测量方案,理论上可以实现极小应力的测量。但由于系统误差的存在,在实际测量中当应力双折射低于 30 nm/cm 时,易出现图 5 中微弱的偏振跳变现象,此时两个偏振态强度跳变不明显,无法精确测量。平板玻璃的应力双折射允许范围在 30 ~ 90 nm/cm,因此附加偏置波片的方法适用于测量平板玻璃微小应力的场合。

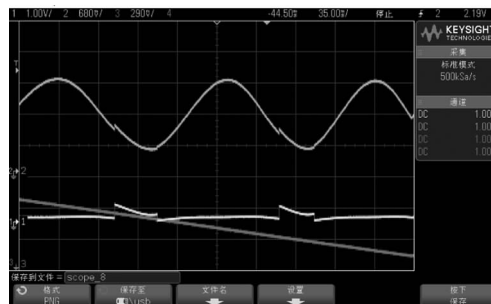


图5 微弱的偏振跳变现象

Fig. 5 Weak polarization jump phenomenon

4 实验及结果分析

选用长 300 mm × 80 mm × 4 mm 的平板玻璃作

为测试样品,标准 1/4 波片作为偏置波片,参考国家标准^[14]在短边长度不足 300 mm 时,在短边 100 mm 的距离上作两条平行线与中心线相交于 a 、 b 两点,如图 6 所示,另选择样品几何中心点作为第三测量点 c 。

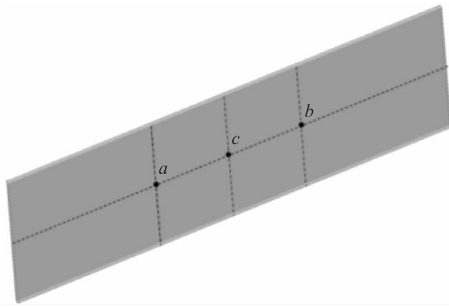


图 6 平板玻璃样品
Fig. 6 Flat glass samples

为检验系统测量结果的重复性,同时降低随机误差,每隔 10 min 对 1/4 波片进行一次测量,共测量 10 次,并与偏置波片的理论值进行比较,如表 1 所示。

表 1 偏置波片的相位延迟

Tab. 1 The phase delay of the bias wave plate

Measurement times	Phase retardation/(°)	Measurement times	Phase retardation/(°)
1	46.35	6	43.75
2	46.27	7	44.87
3	46.08	8	43.26
4	45.36	9	43.37
5	44.86	10	44.16

偏置波片的最大值 46.35°, 最小值 43.26°, 标准差为 1.20°, 从偏置波片的测量结果可得,基于激光回馈效应的平板玻璃应力检测系统的测量重复性较低。经详细分析实验过程后认为温度变化是误差的主要来源,由于外界温度变化时波片的厚度和折射率会相应发生改变^[15],偏置波片相位延迟的测量值受外界温度影响较大。

实验测试中,将温度从 22 °C 开始,缓慢升温到 40 °C,偏置波片相位延迟随温度变化曲线如图 7 所示。相位延迟随温度变化并非线性,在 22 ~ 27 °C 范围内,温度系数约为 1.9°/°C,而在 27 ~ 40 °C 范围内,温度系数约为 0.96°/°C。所以外界温度变化对波片的影响无法进行线性补偿。

为了解决温度变化对偏置波片的影响,在偏

置波片与激光器之间增加隔热板以及隔离罩,一方面排除外界温度、振动、噪声等影响,保证激光器稳定工作,另一方面实现隔离杂散光以及防尘等^[16]辅助作用。继而重复上述测量,结果如表 2 所示。

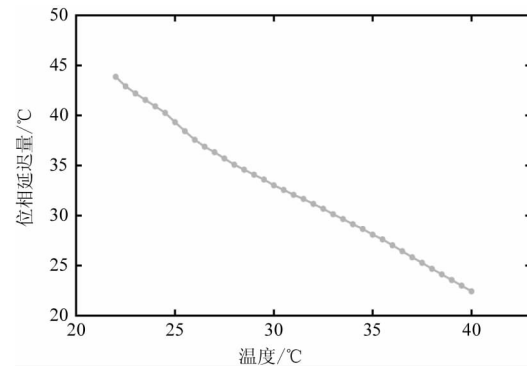


图 7 温度对偏置波片相位延迟影响曲线
Fig. 7 The influence curve of temperature on the phase delay of the bias wave plate

表 2 系统优化后偏置波片的相位延迟

Tab. 2 The phase delay of the bias wave plate after system optimization

Measurement times	Phase retardation/(°)	Measurement times	Phase retardation/(°)
1	45.87	6	44.73
2	44.75	7	45.56
3	45.90	8	44.81
4	45.88	9	45.49
5	44.07	10	44.24

十次测量结果中的最大值 45.9°, 最小值 44.07°, 标准差为 0.69°, 在不受激光管温度影响的情况下,测量结果准确性和稳定性均得到明显提高。在偏置波片的基础上对玻璃的 a 、 b 、 c 三点进行组合测量,在实际调节过程中,系统增加了自动对轴程序^[17],能够保证待测玻璃的对轴精度达到 1°,因此此类误差可忽略不计。 a 、 b 、 c 测量结果如表 3 所示,平均值分别为 0.60 MPa, 0.56 MPa, 0.39 MPa, 参考国家标准中平板玻璃应力值与双折射光程差的关系为^[18]:

$$\sigma_p = \frac{\Delta}{Cd \times 10^6} \quad (10)$$

式中, σ_p 为被测玻璃的应力值, c 为被测玻璃的应力光学常数,取 $2.6 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, d 为光在被测玻璃中的传播距离, Δ 为被测样品的双折射光程差,

结合式(1)将相位延迟转换成应力大小,如表3所示。

三处测试点中,于c点两侧对称位置的a点和b点应力大小较为接近,c点应力最小,而三者的应力值均不超过1 Mpa,这与玻璃制造过程中的退火操作相关,不同部位的退火效果各不相同,由于本文使用的平板玻璃应力要求在0.77 Mpa及以下,测量结果分别为:均符合生产质量指标。a点、b点、c点测量结果中相位延迟最大偏差分别为 1.18° 、 0.99° 、 1.52° ,相应的应力标准差分别为 0.48° (0.11 Mpa), 0.45° (0.10 Mpa), 0.65° (0.15 Mpa),故基于激光回馈的玻璃应力检测技术测量重复性较好,能够较准确地反映玻璃内部应力的大小。

表3 三处测试点的应力测量结果

Tab.3 Stress measurement results at three test points

Measurement times	Phase retardation/($^\circ$)			
	Biased wave plate	Point a	Point b	Point c
1	45.83	48.12	47.85	46.25
2	43.87	47.86	47.63	47.37
3	44.65	47.23	46.97	47.26
4	44.30	46.94	46.86	45.85
5	45.92	47.65	47.69	46.69
Mean	44.914	47.56	47.4	46.684
Relative increment		2.646	2.486	1.77
The value of stress/Mpa		0.60	0.56	0.39

5 结论

为检测平板玻璃经退火后存在的微小应力,提高玻璃产品的生产质量,本文提出一种基于激光回馈效应的平板玻璃应力检测技术,以激光器内部偏振态直接反映玻璃应力引起的相位延迟,具有较高的测量精度。该技术的核心思想是采用偏置波片的方法,间接弥补偏振跳变现象中测量锁区的缺点,扩大了应力双折射的测量范围,为检测微小应力奠定理论基础。深入分析偏置波片与玻璃对轴精度引起的测量误差,根据其变化趋势表明偏离角度小于 1° 时,引起的相位延迟误差可以忽略不计,而在测试过程中使用隔热板及隔离罩减小外界因素对测量环境的影响,在一定程度上提高了偏置玻璃的测量精度,进一步保证该技术的测量可靠性。平板玻璃三处测

量点应力测量结果均符合平板玻璃退火后的质量要求,标准差低于0.15 Mpa,表明附加偏置波片的方法具有较高的测量重复性,适用于测量平板玻璃中微小应力的场合,该技术的测试系统具有结构简单,成本低等优点,为检测工业生产线上玻璃应力,实时控制生产质量提供一定思路。

参考文献:

- [1] Lin Pingzhou, Wu Zhenhua, Guan Jianqiang. Temperature stress of float glass[J]. Glass, 2018, 45(3): 18-23. (in Chinese)
林平洲, 吴振华, 关建强. 浮法玻璃温度应力[J]. 玻璃, 2018, 45(3): 18-23.
- [2] Zhou Tianhui. Measuring method of stress in glass[J]. Glass & Enamel, 2001(6), 29(6): 44-47, 57. (in Chinese)
周天辉. 玻璃应力的测定方法[J]. 玻璃与搪瓷, 2001, 29(6): 44-47, 57.
- [3] Ji Shuwei, Huang Jianbin, Zhang Zhemin. Methods for testing stress of flat glass based on digital image process technology[J]. Glass, 2017, 44(5): 8-14. (in Chinese)
嵇书伟, 黄建斌, 张喆民. 基于数字图像处理技术的平板玻璃应力检测方法[J]. 玻璃, 2017, 44(5): 8-14.
- [4] Wang Guiying. Float glass stress detection system and its application[J]. Glass, 2011, 38(5): 25-27. (in Chinese)
王桂英. 浮法玻璃应力检测系统及其应用[J]. 玻璃, 2011, 38(5): 25-27.
- [5] Zhang P, Tan Y D, Liu W X, et al. Methods for optical phase retardation measurement: A review [J]. Science China Technological Sciences, 2013, (5): 1155-1163.
- [6] Meng Yuanyuan, Niu Haisha, Dong Mingli, et al. Study on stress measurement system based on laser feedback effect [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(8): 914-919. (in Chinese)
孟媛媛, 牛海莎, 董明利, 等. 基于激光回馈效应的应力测量系统研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(8): 914-919.
- [7] Aben H, Ainola L, Anton J. Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2000, 33(1): 49-64.
- [8] Chen W, Li H, Zhang S, et al. Measurement of phase retardation of waveplate online based on laser feedback[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(1): 013101-

- 1 - 013101 - 3.
- [9] Niu Haisha, Zhu Lianqing, Liu Ning. Laser feedback stress measurement system based on fourier transform phase extraction method[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1954 - 1959. (in Chinese)
牛海莎, 祝连庆, 刘宁. 基于傅里叶变换相位提取法的激光回馈应力测量系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1954 - 1959.
- [10] Chen W, Zhang S, Long X. Internal stress measurement by laser feedback method[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2433 - 2435.
- [11] Chen W, Zhang S, Long X. Locking phenomenon of polarization flipping in He-Ne laser with a phase anisotropy feedback cavity [J]. Applied Optics, 2012, 51(7): 888 - 893.
- [12] Haisha N, Yanxiong N, Jiyang L. Measurement of stress-induced birefringence in glasses based on reflective laser feedback effect [J]. Optical Engineering, 2017, 56(2): 024104.
- [13] Cannon B D, Shepard C L, Khaleel M A. System and method for glass processing and stress measurement[P]. US, US 20030076487, A1, 2003.
- [14] GB/T36405 - 2018. National Standard of the People's Republic of china-stress detection method for flat glass [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [15] Liu Ming, Zhang Shulian, Liu Weixin. Error source and its elimination in phase retardation measurement of wave plate based on laser feedback[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(6): 961 - 966. (in Chinese)
刘名, 张书练, 刘维新. 激光回馈波片位相延迟测量的误差源及消除方法[J]. 应用光学, 2008, 29(6): 961 - 966.
- [16] Zhang P, Zhang S L, Tan Y D, et al. Output response in orthogonal directions of a He- Ne laser caused by birefringent-external-cavity feedback[J]. Applied physics. B, Lasers and Optics, 2012, 106(3): 657 - 662.
- [17] Deng Yong, Ma Xiang. Automatic positioning of optical axis of wave plate in a laser feedback birefringence measurement system[J]. Laser Technology, 2019, 43(2): 75 - 79. (in Chinese)
邓勇, 马响. 激光回馈双折射测量系统波片光轴的自动定位[J]. 激光技术, 2019, 43(2): 75 - 79.
- [18] GB/T11614 - 2009. National standard of the people's republic of china-flat glass[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
GB/T11614 - 2009. 中华人民共和国国家标准—平板玻璃[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.