文章编号:1001-5078(2020)08-0914-06

·激光应用技术·

基于激光回馈效应的应力测量系统研究

孟媛媛¹,牛海莎¹,董明利¹,陈 恺²,庄 炜¹ (1.北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院,北京 100192; 2.合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥 230009)

摘 要:玻璃材料的内应力直接影响玻璃零件加工质量和光学器件使用寿命,在航空航天、精密光 学系统,精密加工等领域受到高度重视,高灵敏度,大测量范围的应力检测技术已经成为当前的研 究热点。本文提出一种基于激光回馈效应的应力测量方法。激光回馈系统由激光器和外部反射镜 构成,待测样品放置在回馈外腔中。由于应力引起的双折射效应,带有应力的样品使外腔分裂为两 个"物理长度",不同的外腔长决定了不同偏振方向的回馈光相位,通过提取相位差信息,可获得应 力的大小。从理论上分析了回馈系统中激光器的输出光在正交方向的相位与外腔应力双折射的关 系;通过傅里叶变换的方式得到双折射外腔激光回馈系统光强调谐曲线的相位信息;最后,采用激 光回馈系统对不同的飞机座舱有机玻璃样品内应力进行了测量,并给出测量结果。该方法具有结 构简单、精度高的优势,并且具有应用于玻璃材料生产线、改进制备工艺的潜力。 关键词:应力测量;激光回馈;相位差

中图分类号:0439;TH741 文献标识码:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.08.003

Study on stress measurement system based on laser feedback effect

MENG Yuan-yuan¹, NIU Hai-sha¹, DONG Ming-li¹, CHEN Kai², ZHUANG Wei¹
(1. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information
Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. School of Instrument Science and
Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract : The internal stress of the glass material directly affects the processing quality of the glass parts and the service life of the optical components, and is highly valued in the fields of aerospace, precision optical systems, precision machining, etc. High sensitivity, large measurement range of stress detection technology has become a hot research topic. In this paper, a stress measurement method based on laser feedback effect is proposed. The laser feedback system consists of a laser and an external mirror, and the sample to be tested is placed in the feedback cavity. Due to the birefringence effect caused by stress, the stressed sample splits the external cavity into two " physical lengths", and the different external cavity lengths determine the phase of the feedback light in different polarization directions. The feedback light of different phases modulates the internal gain of the laser, so that the output light of the laser produces a phase difference in the orthogonal direction. By extracting the phase difference information, the magnitude of the stress can be obtained. The relationship between the phase of the output light of the laser in the feedback direction and the stress birefringence of the external cavity is analyzed theoretically. The phase information of the intensity tuning curve of the birefringent external cavity laser feedback system is obtained by Fourier transform. Finally, the internal stress of different aircraft cockpit glass samples was measured by laser feedback system, and the measurement results were given. The method has the advantages of simple structure and high precision, and has the potential to be applied to a glass material production line and to improve the preparation process.

Keywords: stress measurement; laser feedback; phase difference

基金项目:高等学校学科创新引智计划项目(No. D17021);国家自然科学基金青年项目(No. 51675053)资助。

作者简介:孟媛媛(1994-),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器腔内回馈精密测量的研究。

通讯作者:董明利(1965-),女,教授,博士,主要研究方向为视觉测量技术,精密光电测试技术与仪器等。E-mail:lqzhu_bistu@ sina. com

1 引 言

玻璃材料的内应力直接影响玻璃零件加工质量 和光学器件使用寿命,在航空航天、精密光学系统、 精密加工等领域受到高度重视。高灵敏度,大测量 范围的应力检测技术已经成为当前的研究热点。材 料内应力的测量方法可分为两大类,即机械测量方 法和物理测量方法。机械测量方法起源于19世纪 末期提出的"钻孔法",即在应力平面钻孔,通过应 力释放过程中孔发生的形变获得应力大小。后来学 者们对这些机械测量方法进行了改进^[1],但破坏性 测量限制了该方法在许多领域的应用。物理测量方 法属于无损测量,典型的测量方法有 X 射线衍射 法^[2-3]、超声法^[4-5]、简式偏光仪^[6]、Senarmont 补 偿法^[7-8]等。X 射线衍射仪价格昂贵,多用于测定 物质的晶体结构进行物相分析;简式偏光仪结构简 单,但只能通过干涉色定性观察应力分布目无法察 觉微小应力。

超声法测量应力原理简单,设备轻便,可以实现 现场或在役检测。但是鉴于材料本身的密度变换、 尺寸测量精度等因素的干扰很大,同时由于高分子 材料的广泛应用时间不长、其物理性质与金属有明 显区别等因素,有关航空玻璃超声检测的研究、尤其 是表面波的应用研究至今仍未取得令人鼓舞的成 果。文献[9]与文献[10]曾利用超声法对透明件表 面应力进行了测量,但均未获得理想结果。综合以 上原因,超声法测定残余应力尚未在高端玻璃应力 实测方面得以推广应用。

激光回馈具有类似传统双光束干涉的特点,又 具有结构简单、自准直、灵敏度高、不受相干长度限 制等多种优点,因而获得了研究人员的关注。在激 光回馈测量技术中,激光器不仅仅是光源,同时还兼 具传感器的作用,已在速度^[11]、位移^[12]、绝对距离、 振动^[13]、形貌^[14]和相位延迟^[15-17]等多种测量领域 获得了研究和应用。本文提出一种基于激光回馈效 应的应力测量方法,激光回馈系统由激光器和外部 反射镜构成,待测样品放置在回馈外腔中。由于应 力引起的双折射效应,带有应力的样品使外腔分裂 为两个"物理长度",不同的外腔长决定了不同偏振 方向的回馈光相位,通过提取相位差信息,可获得应 力的大小。从理论上分析了回馈系统中激光器的输 出光在正交方向的相位与外腔应力双折射的关系; 通过傅里叶变换的方式得到双折射外腔激光回馈系 统光强调谐曲线的相位信息;最后,采用激光回馈系 统对不同的飞机座舱有机玻璃样品内应力进行了测 量,并给出测量结果。该方法具有结构简单、精度高 的优势,并且具有应用于玻璃材料生产线、改进制备 工艺的潜力。

2 实验设置及原理

实验设置如图 1 所示,激光器为线偏振、单纵模 输出的 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm,激光增益管 长为 145 nm。 M_1 和 M_2 构成激光器的谐振腔,腔长 为 155 nm。 M_1 为凹面输出镜,反射率为 99.5%, M_2 为平面高反镜,反射率为 98.9%。ME 为回馈镜, 反射率约为4%。增益管内充氦气和氖气的混合气 体,混合比例 He:Ne = 7:1,且 Ne20:Ne22 = 1:1, 以消除兰姆凹陷。 D_1 和 D_2 为光电探测器,输出端 的光被沃拉斯顿棱镜 W 分开,分别由 D_1 、 D_2 探测。 回馈镜与 PZT₂ 粘连,PZT₂ 在施加三角波电压后推 动回馈镜做往复运动。



图 1 实验设置 Fig. 1 Experimental setup

以激光器的传播方向为 Z 轴建立坐标系,激光 器的本征偏振态分别为 E_1 和 E_2 ,起振的偏振态为 E_1 , E_1 与 X 轴、Y 轴的夹角为 45°,沃拉斯顿棱镜的 光轴方向分别平行于 X 轴、Y 轴。首先旋转沃拉斯 顿棱镜使出射光点只有一个,此时沃拉斯顿的两个 光轴方向之一与激光器的初始偏振态平行。再将沃 拉斯顿棱镜旋转 45°,即可使激光器的光强沿着正 交方向均匀分光。当外腔未放置波片时,激光沿 X、 Y方向分光以后,得到的光强分量等幅度、等相位。

旋转波片使波片快轴方向与激光器初始偏振方 向平行,此时激光器的输出偏振态仍为单模、线偏 振,在*X*、*Y*方向的输出光强仍为等幅、等相位的类 余弦曲线。再次将波片以激光传播方向为轴心旋转 45°,假设波片的相位延迟大小为*σ*,以激光器的初 始偏振态为*X*′轴,则激光器的输出光仍表示为*E*₁, 线偏振光穿过外腔中的波片、并被反射镜反射再次 通过波片,进入内腔时的偏振态可表达为:

$$E_{f} = \begin{pmatrix} \cos\sigma & -i\sin\sigma \\ -i\sin\sigma & \cos\sigma \end{pmatrix} \quad E_{1} = \begin{pmatrix} \cos\sigma \\ -i\sin\sigma \end{pmatrix}$$
(1)

由式(1)可知,回馈光的偏振态为椭圆偏振态, 且 X' 方向的振幅为 cosσ, Y' 方向的振幅为 sinσ。 随着外腔中波片相位延迟的变化,回馈光偏振态与 激光器本征偏振态可以由图 2 表示。



Fig. 2 Feedback light polarization state and laser intrinsic polarization state

当外腔中存在椭圆偏振态的回馈光时,激光器 的输出在正交方向不再等幅、等相位。为解释该现 象,光场被分为两个部分,一部分在激光内腔中往返 一周,另一部分被外腔镜反射,在外腔中往返一周后 再次回到内腔,如图3所示。根据激光器的自洽条 件,这两部分光场叠加后应满足激光器输出稳态 方程。



Fig. 3 Three-cavity model

对各物理量的定义如下:L 为激光器谐振腔的 几何长度,l 为回馈腔的几何长度。设某时刻输出 镜 M₂ 内侧的光场为 E₀,当回馈光在外腔中往返一 周后回到内腔,引入的光场为:

 $\Delta E = t_2^2 r_e \xi \exp(i2knl) \exp(i2kn_0 L + 2gL) E_0$ (2)

其中,k 为波数; n_0 ,n 分别为激光器内与回馈外腔的 介质折射率; λ 为激光器的波长; t_2 为 M_2 的透射系 数; r_e 为回馈镜 M_E 的反射系数; ξ 为回馈光的耦合 效率^[10];g 为增益介质在单位长度的增益系数。内 腔光场在谐振腔中往返一周后可表示为:

$$E'_{0} = r_{1}r_{2}\exp(i2kn_{0}l + 2gl)E_{0}$$
(3)

其中, r_1 和 r_2 分别为 M_1 和 M_2 的反射系数,两部分 光场的叠加应与初始光场相同,则有:

$$|r_1 r_2 e^{2ikn_0 L + 2gL}| = r_1 r_2 e^{2gL} |e^{2ikn_0 L}| = 1$$
(5)

$$\texttt{f} \texttt{H} \texttt{4} \texttt{4}.$$

$$_{1}r_{2}e^{2gL} = 1 \Longrightarrow g_{0} = -\frac{1}{2l}\ln(r_{1}r_{2})$$
 (6)

且有:

$$|e^{2ikn_0L}| = 1$$
 (7)

无光回馈时激光的增益系数为 g₀,将式(7)代 入式(6)可得:

$$|r_1 r_2 e^{2gL} (1 + \rho e^{i\varphi})| = 1$$
 (8)
展开指数项可得:

$$r_1 r_2 e^{2gL} \left| 1 + \rho \cos\varphi + i\rho \sin\varphi \right| = r_1 r_2 e^{2gL} \sqrt{\left(1 + \rho \cos\varphi\right)^2 + \rho^2 \sin^2\varphi} = 1$$
(9)

由于
$$\rho$$
远小于1,上式可化简得:
 $r_1 r_2 e^{2gL} (1 + \rho \cos \varphi) = 1$ (10)

两边取对数并化简可得:

$$g = -\frac{1}{2l} [\ln(r_1 r_2) + \rho \cos\varphi]$$
(11)

比较有回馈和无回馈时的增益变化量可知,回 馈引入的增益波动为:

$$\Delta g = g - g_0 = -\frac{\rho}{2l} \cos\varphi \tag{12}$$

激光的输出强度与增益系数成正比,可得激光 回馈条件下的输出光强为:

$$I = \kappa g = I_0 (1 + \kappa \Delta g) \tag{13}$$

外腔中放入波片后,因为波片的两个光轴方向 存在相位延迟量 σ,两个光轴方向的光程差为:

 $\Delta = (2\pi m + \delta)\lambda, m = 0, 1, 2, \cdots$ (14)

因此两个光轴方向存在的光程差,由此产生的 则相位因子差异为:

$$\Delta \varphi = 2k\Delta = 2 \times \frac{1}{\lambda} \times (2m\pi + \sigma)\lambda = 4m\pi + 2\sigma$$
(15)

从以上推导可得,光强调谐曲线在X轴、Y轴方 向的分量存在相位差,且相位差与波片相位延迟 σ 有函数关系,理想情况下,相位差为波片相位延迟的 两倍。

3 实验结果及分析

随着外腔相位延迟大小的改变,激光器的输出 在正交方向的分量呈现出不同的幅值和相位特性, 实验结果如图4所示。

通过傅里叶变换的方式得到双折射外腔激光 回馈系统光强调谐曲线的相位信息,分别用0°~ 180°范围内的2组不同厂家加工的波片进行了双 折射外腔回馈实验,其中横轴的结果由线偏振光 回馈法得出,纵轴结果由相位差法得出,结果如图 5 所示。





线偏振光回馈的偏振跳变法精度优于 0.3°, 相位差法与之比对两套波片的走势一致,但相位 差法具有一定的误差。这是由于增益管本身带有 一定的各向异性,且回馈光的偏振态为椭圆偏振 态,导致回到谐振腔内的光被放大的方向并非沿 本征偏振方向,因此正交分量的相位差与 2 倍关 系有偏差,且幅值比也随回馈光椭偏度的改变而 改变。由于相位差法提取外腔应力双折射信息是 通过两束同步变换的类余弦信号,外界干扰对两 路测量信号的影响是同步的,该影响在求相位差 的时候可抵消,因此,相位差法较偏振跳变法具有 更好的重复性。将相位差法的测量结果校准到偏 振跳变系统,可得拟合如下:

 $f(x) = -2.507e^{-11}x^7 + 1.548e^{-8}x^6 - 3.861e^{-6}x^5$

+ 0. $0004976x^4$ - 0. $03496x^3$ + 1. $275x^2$ -

19. 08x + 84.52

拟合函数曲线如图 6 所示。经校准后,相位差法的精度优于 0.5°(转换为 632.8 nm 下的光程差值为 0.88 nm),重复性优于 0.1°。实验系统采用的激光器波长为 632.8 nm,根据:

$$\sigma = \frac{|n_o - n_e|d}{\lambda} \times 360^\circ$$

可得系统对应力引起光程差的测量精度为 0.879 nm。



Fig. 6 Fitting function

采用激光回馈双折射测量系统对 2 块有机玻璃 样品(清华大学航天航空学院提供)分别进行测量, 2 块样品均为 20 mm × 20 mm 的矩形,厚度分别为 4.615 mm,8.580 mm。每块样品测试 4 个角(A - D点)和中间点(E 点),环境温度为 20.2 °C,测量得 到样品内部的内应力如表 1 所示。

表1 应力测量结果/nm

Tab. 1 Stress measurement results/nm

| | 点 A | 点 <i>B</i> | 点 <i>C</i> | 点 <i>D</i> | 点 <i>E</i> |
|-----|----------|------------|------------|------------|------------|
| 样品1 | 12. 9765 | 10. 8243 | 10. 5078 | 11. 7738 | 10.0014 |
| 样品2 | 32. 4729 | 35. 3847 | 32. 8527 | 28. 6749 | 28. 1685 |

4 结 论

本文提出一种基于激光回馈效应的应力测量 方法。从理论上分析了回馈系统中激光器的输出 光在正交方向的相位与外腔应力双折射的关系; 通过傅里叶变换的方式得到双折射外腔激光回馈 系统光强调谐曲线的相位信息;最后,采用激光回 馈系统对不同的飞机座舱有机玻璃样品内应力进 行了测量,并给出测量结果。该方法重复性优于 0.1°,精度优于 0.5°,具有结构简单、精度高的 优势。

参考文献:

[1] Chupakhin S, Kashaev N, Huber N. Effect of elasto-plastic material behaviour on determination of residual stress profiles using the hole drilling method [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2016, 51 (8): 572 - 581.

- [2] Vourna P, Hervoches C, Vrúna M, et al. Correlation of magnetic properties and residual stress distribution monitored by X-ray and neutron diffraction in welded AISI 1008 steel sheets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015,51(1):1-4.
- [3] Okoro C, Levine L E, Xu R, et al. Nondestructive measurement of the residual stresses in copper through-silicon vias using synchrotron-based microbeam X-ray diffraction
 [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61 (7):2473 2479.
- [4] Wei Zhi, Zhou Xianjun, Cheng Yaodong. Surface wave acoustoelasticity of aerospace transparency[J]. Journal of Applied Acoustics, 2000, (3):35-38. (in Chinese)
 魏智,周晓军,程耀东. 航空透明件表面波声弹效应
 [J]. 应用声学, 2000, (3):35-38.
- [5] Zhou Xiaojun, Jiang Yuejuan, Wei Zhi, et al. Experimental approach to the acoustoelastic method for surface stress testing of aerospace transparency [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, (5):497 – 500. (in Chinese) 周晓军, 江月娟, 魏智, 等. 航空透明件表面应力声弹 检测方法的实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2000, (5): 497 – 500.
- [6] Montalto L, et al. Inspection of birefringent media by photoelasticity from diffuse light polariscope to laser conoscopic technique[J]. Opt. Eng. ,2015,54(8):081210.
- [7] Nagib N N, et al. Evaluation of a photometric method for retardance measurement of a quarterwave phase plate[J].
 Opt. Laser Technol. ,2015,69:77 - 79.
- [8] Mori A, Tomita R. Semi-automated Senarmont method for measurement of small retardation [J]. Instrum. Sci. Technol. ,2015,43(4):379-389.
- [9] Wei Z, Zhou X, Cheng Y. Acoustoelastic determination of local surface stresses in polymethylmethacrylate [J]. Applied Acoustics, 2000, 61(4):477-485.
- [10] Wei Zhi, Wang Wenfu. Ultrasonic measurement of high order elastic constants of aviation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, (1):1-5. (in Chinese)
 魏智,王文富. 航空有机玻璃高阶弹性常数超声测定

[J].应用力学学报,2001,(1):1-5.

- [11] Mowla A, Nikolić M, Taimre T, et al. Effect of the optical system on the Doppler spectrum in laser-feedback interferometry[J]. Applied Optics, 2015, 54(1):18-26.
- [12] Zeng, Zhaoli, Qu Xueming, Tan Yidong, et al. High-accuracy self-mixing interferometer based on single high-order orthogonally polarized feedback effects [J]. Optics Express, 2015, 23(13);16977 16983.
- [13] Otsuka K, Abe K, Ko J Y, et al. Real-time nanometer-vibration measurement with a self-mixing microchip solidstate laser [J]. Optics Letters, 2002, 27 (15): 1339-1341.
- [14] Xu C, Tan Y, Zhang S, et al. The structure measurement of

micro-electro-mechanical system devices by the optical feedback tomography technology[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(22):221902.

- [15] Chen W, Zhang S, Long X. Polarisation control through an optical feedback technique and its application in precise measurements[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1):192.
- [16] Fei L G, Zhang S L, Li Y, Zhu J. Polarization control in a He-Ne laser using birefringence feedback [J]. Opt. Express, 2005, 13(8):3117-3122.
- [17] Yanxiong Niu, Haisha Niu, Ning Liu, et al. KTP crystal thickness distribution measurements based on laser feedback interferometry [J]. Applied Optics, 2014, 53 (19): 4195-4199.