

文章编号 1004-924X(2026)09-1379-11

数字散斑干涉应力应变同步测量

谢翟子¹, 牛海莎^{1*}, 苏信晨¹, 冯浩博¹, 彭璐², 吴思进¹

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 102206;

2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 针对光学玻璃表面应变与内部应力难以同步全场测量的问题, 开发一种基于对向式双光路数字散斑干涉 (Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPI) 的同步测量系统, 该系统以拉伸机硬件 IO 信号实现双光路同步触发, 最大采集时延控制在 2.2 s 内, 结合有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 定量评估了其测量精度。采用反射式与透射式双光路并行架构, 分别提取表面散斑信息与内部应力双折射相位。以石英玻璃为试件进行 50~170 N 轴向拉伸实验, 同步获取全场应变与应力数据, 通过同批次样品重复性实验验证了测量结果的稳定性与普适性。建立等尺寸有限元模型, 将实验结果与仿真理论值进行逐级比对, 分析系统测量误差及偏差来源。结果显示, 实验获取的云图分布特征与仿真高度吻合。定量精度分析表明, 全量程内测量应变的平均相对误差约为 9.2%, 测量应力的相对误差控制在 7.8% 以内。分析证实测量值普遍略高于仿真值, 主要源于实验中难以避免的加载偏心、夹具预紧力以及光路斜入射引起的几何耦合误差, 此外, 系统还成功捕获仿真理想模型无法体现的附加弯曲力矩及位移场偏斜现象。该系统的应力与应变测量精度均满足工程分析要求, 其全场、同步测量的优势为光学元件在复杂力-光耦合环境下的失效分析与制造工艺优化提供了可靠的技术支撑。

关键词: 数字散斑干涉; 应力应变同步测量; 双光路系统; 光学玻璃

中图分类号: TH741 文献标识码: A

doi: 10. 37188/OPE. 20263409. 1379

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263409. 1379

Simultaneous stress-strain measurement using digital speckle pattern interferometry

XIE Zhaizi¹, NIU Haisha^{1*}, SU Xinchen¹, FENG Haobo¹, PENG Lu², WU Sijin¹

(1. College of Instrumentation Science and Opto-electronic Engineering,

Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China;

2. Highway Science Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

* Corresponding author, E-mail: niuhs@buaa.edu.cn

Abstract: Optical glass presents significant challenges for strain - stress measurement, and full-field synchronous acquisition remains difficult to achieve. An opposed dual-path measurement system based on Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI) is developed. Synchronous triggering is realized using signals from a tensile testing machine, with a maximum acquisition delay of less than 2.2 s. System accuracy is evaluated through Finite Element Analysis (FEA). Parallel reflective and transmissive optical paths are

收稿日期: 2026-01-26; 修订日期: 2026-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61805017)

employed to extract surface speckle and birefringence phase information. Axial tensile tests are conducted on quartz glass specimens under loads ranging from 50 N to 170 N, enabling synchronous acquisition of full-field strain and stress data. Repeatability tests confirm the stability and general applicability of the results. An equal-scale finite element model is established, and experimental results are systematically compared with simulations. Measurement errors and their sources are analyzed in detail. Experimental contour maps show strong agreement with simulation results. The average relative error in strain over the full range is 9.2%, while the stress measurement error is controlled within 7.8%. Measured values are slightly higher than simulated ones. The discrepancies are primarily attributed to loading eccentricity, fixture preload, and geometric coupling effects induced by oblique incidence. Additional bending moments and deflections are captured by the proposed system but are absent in idealized FEA models. The system satisfies engineering analysis requirements and demonstrates distinct advantages in full-field synchronous measurement. It provides effective support for failure analysis and optimization of optical components and exhibits strong adaptability to complex force - optical coupling environments.

Key words: digital speckle pattern interferometry; simultaneous stress and strain measurement; dual-path optical system; optical glass

1 引言

光学玻璃广泛应用于天文观测、光刻投影及航空航天等高端制造领域^[1-3]。应变和应力是表征玻璃材料力学行为,评估结构工作状态与可靠性的两个最核心参数^[4]。近年来,光学玻璃服役工况日趋极端,常需在高温、高压等恶劣环境下长时间运行^[5],这对构件的耐久性提出了极高要求,会诱发显著的内应力和形变,从而直接威胁工程安全与功能完整性^[6]。因此,发展一种能够实现光学玻璃表面应变与内部应力同步、全场测量的高精度方法,对于光学制造工艺的优化、元件服役可靠性的评估以及整个系统性能的预测与保障具有至关重要的意义。

针对光学元件力学参数的非接触测量研究,围绕应变测量、应力测量与多物理量关联测量3个方向展开。第一类为表面应变测量技术,是反射式数字散斑应变测量光路的核心理论基础。20世纪40年代,Bierman开始了电阻应变片的研制工作^[7],实现了金属薄片变形的定量检测。目前,许多应变片已经形成商业化产品,但属于接触式单点测量,难以获取全场梯度信息。针对全场测量的要求,2020年印度理工学院马德拉斯分校的K. Naresh等^[8]采用数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术实现了复合材料在

不同加载下的应变率测量,但在处理高透明、低模量光学材料时,散斑质量与光路干涉易受环境干扰。2024年,广东工业大学张展华等^[9]提出一种基于数据驱动的超分辨应变测量方法,通过神经网络重构高分辨应变场。然而,此类数据驱动方法高度依赖于特定训练集的质量,对于复杂力学环境下未知分布的适应性仍有待提升。而数字散斑干涉凭借亚微米级的测量精度,在微小形变检测中具有独特优势,但目前大多研究仍局限于单一表面形变的获取,未能兼顾材料内部的物理性能变化。第二类为内部应力测量技术,为本文透射式偏振调制应力测量模块提供了方法学参考。2024年,南京理工大学赵楠等^[10]采用光弹性法,实时测量了激光辐照下玻璃的热应力场,该方法为局部点测量,空间分辨率较低。2023年,日本爱媛大学Masaki Wada等利用激光外差干涉法^[11-12]测量了玻璃应力分布,但该无法实现全场测量。2018年,北京信息科技大学牛海莎等^[13]利用激光回馈效应产生的偏振翻转特性,结合傅里叶变换相位提取法实现了高灵敏度的微小应力测量,但该方法本质上属于单点测量,在面对大尺寸全场应力分布时需机械扫描,实时性较差。2023年,中北大学李克武等^[14]提出基于双弹光级联差频调制的二维分布测量方案,通过数字锁相技术提升了应力双折射的测量速度,然

而,该系统光路复杂且功能单一,无法同步获取表面形变信息。第三类为应力-应变关联测量技术,2025年,南京航空航天大学简增文^[15]利用荧光散斑与光弹性技术结合3CCD相机实现应力-应变同步测量,但该方法需要将被测物放在光路之间,无法实现在线测量。2023年电子科技大学喻培丰^[16]采用有限元-数字图像应变测量法(Finite Element-Digital Image Strain Measurement, FE-DIM),实现航空发动机涡轮叶片模拟件应变应力的实时监测,该方法目前仅针对特定目标和环境实现精准测量,对其他无特定特征点或复杂环境的监测适用性不足。

综上所述,现有的光学测量手段在实现“全场、原位、高精度同步”方面仍面临挑战。单一测量手段无法同时获取表面应变与内部应力信息,现有多物理量同步测量方案存在时序同步性差、光路兼容性不足、在位测量适配性差等问题,无法全面表征光学玻璃在力-光耦合环境下的力学行为。为此,本文基于激光数字散斑干涉全场测量的优势^[17],提出一种对向双干涉光路、光学玻璃应力应变同步测量的方法和系统。要使被测玻璃照明端面形成激光散斑,首先对玻璃进行单面散射物喷涂,喷涂散射物结合 DSPI 光路测量形变与应变场,利用偏振控制结合 DSPI 光路,透过玻璃厚度敏感于双折射引起的相位延迟,从而独立测量内部应力。本研究通过时序同步控制,使两套干涉仪在相同载荷下同步采集数据,首次实现了光学玻璃表面应变场与内部应力双折射的全场同步原位测量。该系统为研究力光耦合机制提供了新方法,并通过实验验证了其在光学元件制造与性能评估中的可靠性与应用价值。

2 系统构成与基本原理

2.1 实验材料与装置

本文以石英玻璃为研究对象,其弹性模量 $E=70.43\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.17$,应力光学常数 $C=4.22\times 10^{-13}\text{ Pa}^{-1}$ 。为实现内部应力与表面应变的同步测量,实验前在石英玻璃背面均匀喷涂白色哑光涂层,如图1(b)所示,以增强表面的漫反射特性。测量原理如图1(a)所示,应力测量

光束穿过玻璃基底后被背面涂层反射,携带受内应力调制的相位信息返回干涉光路;应变测量光束从涂层侧入射,携带表面形变信息返回干涉光路。

该系统可实现在同一观测区域内对应力与应变场的同步采集。实验采用步进式拉伸机进行加载,利用高精度力传感器(力传感器的最大负载为500 N,力精度为0.2%)实时记录载荷数据,试件尺寸及加载示意如图2所示。

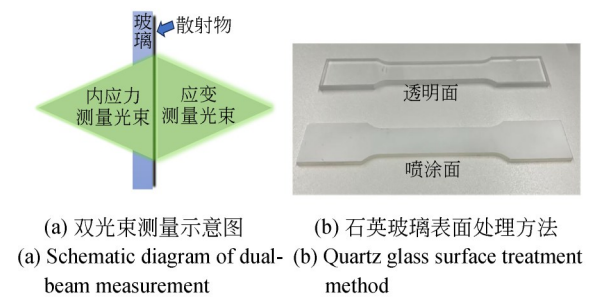


图1 对向双光路测量原理及试件表面处理
Fig. 1 Principle of opposed dual-light-path measurement and specimen surface treatment

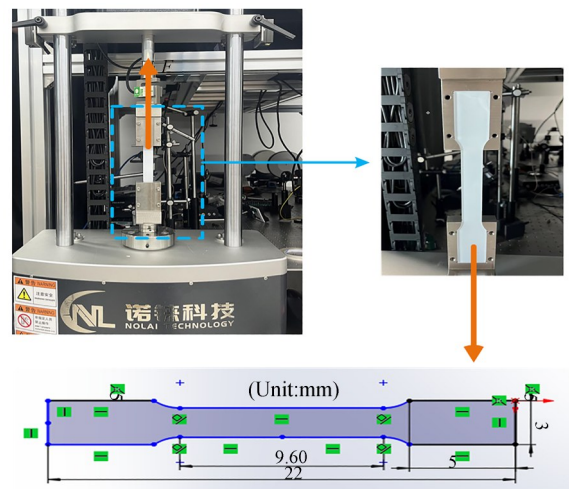


图2 被测玻璃及夹持拉伸实物
Fig. 2 Photograph of tested glass and clamping for tensile testing

2.2 测量系统

对向式数字散斑干涉同步测量实验系统如图3所示。系统以石英玻璃试件为中心,通过在B面喷涂白色弥散反射涂层,利用其正反两面的光学特性,分别实现表面应变与内部应力的同步

测量。系统采用线偏振、单纵模固体激光器作为光源,工作波长为 532 nm。

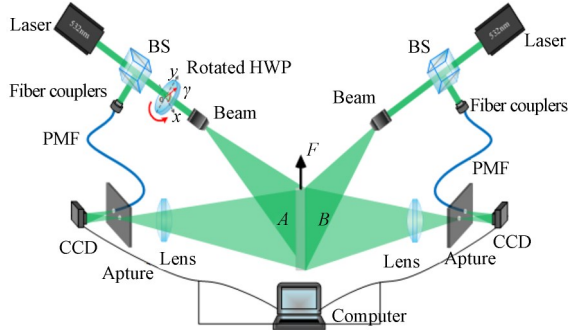


图 3 数字散斑干涉双光路测量系统

Fig. 3 Digital speckle interferometry dual-path measurement system

相机光阑用于限制成像视场、过滤环境杂散光,如图 4 所示。因此,两路相机接收到的有效光信号均来自被测面同一物理区域的散射光,不会因视角、倍率差异出现信号物理来源错位的本质性问题。

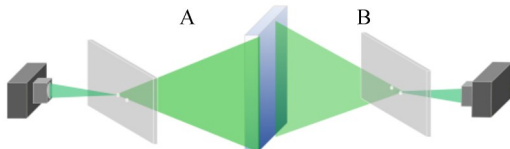


图 4 双光路相机光阑与成像视场原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of camera aperture and imaging field of view for dual-light-path

面内应变测量光路(B侧)采用典型的反射式面内位移干涉结构。线偏振激光经分光棱镜(BS)分为物光与参考光。物光照射样品B面的涂层区域,产生的漫反射散射光经透镜成像于CCD靶面;参考光则通过保偏光纤(PMF)引入,并与物光以微小夹角相遇,从而引入空间载波。通过对比加载前后的初、末态载频散斑干涉图,经傅里叶变换与相位解包裹算法,可提取出试件表面的面内应变场。内部应力测量光路(A侧)在干涉系统中集成偏振调制模块。物光束首先通过由精密步进电机驱动的半波片(HWP)进行偏振方位角调制,其偏振角的旋转范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,步进精度为 1° 。调制后的线偏振光从石英

玻璃A面(透明面)入射,穿过玻璃基底并受内部应力引起的双折射效应调制。光束到达B面涂层后发生反射,携带应力相位信息的散射光返回成像系统。参考光同样由PMF引入与之干涉。双光路共用石英玻璃B面的散射涂层作为唯一成像物平面,应变光路的物光直接由该涂层表面漫反射产生,应力光路的物光穿透玻璃基底后,同样由该涂层表面漫反射并二次穿透玻璃基底返回,两路光路的成像物光均来自该平面同一物理位置的散射光,光信号的物理来源完全统一。调整两路成像系统的镜头焦距、物距与安装位姿,测量界面如图5所示,两台相机的视场均完整覆盖石英玻璃试件的整体轮廓及有效测量区域。

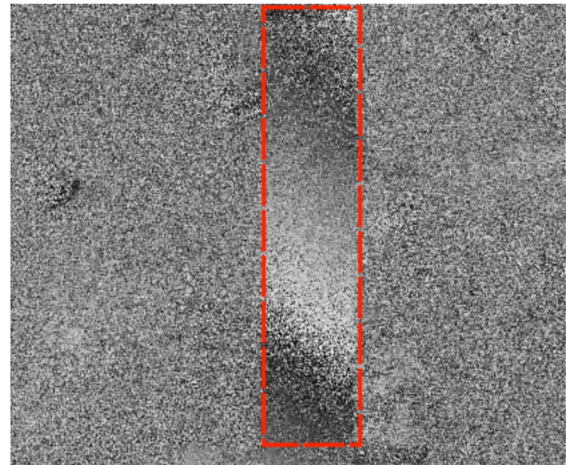


图 5 有效测量区域视场全覆盖实测结果

Fig. 5 Measured results of full field of view coverage in effective measurement area

2.3 测量流程

针对应力测量需偏振扫描定位主轴,应变测量仅需加载前后差分采集的流程差异,为保障双光路测量的时序同步性与载荷状态一致性,正式测量前先进行预加载定位主轴。单向轴向拉伸工况下,石英玻璃试件在实验测量载荷范围内处于理想线弹性阶段,主应力方向不随载荷幅值变化发生偏转,为应力主轴预定位提供了理论基础。通过预加载完成应力主轴的一次性标定。应变测量在加载前进行一次采集,并与每次加载采集到的数据做差。

系统以拉伸机载荷锁定信号为同步触发基

准,实现双光路测量的载荷状态一致性,正式测量流程如图6所示。零载荷状态下,采集应变测量的初始参考散斑干涉图,启动拉伸机以0.5 N/s速率加载至目标载荷。待载荷进入稳定保持状态,拉伸机立即通过硬件IO口发送触发信号,应变测量系统立即采集当前载荷下的散斑干涉图,与零载荷参考图差分得到形变相位,同步触发步进电机按预标定位置旋转半波片,依次采集主轴方向、正交方向的散斑干涉图,做差得到双折射相位差。其中,半波片由高精度步进电机驱动的电控旋转台控制,单次定位旋转耗时2 s,双光路所有采集操作均在同一载荷保持窗口内完成。

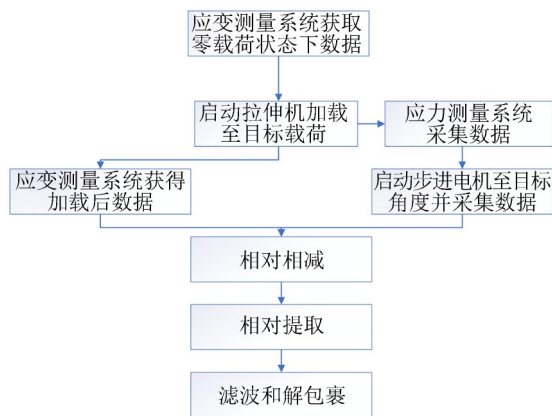


图6 应变应力同步提取流程

Fig. 6 Flowchart of stress-strain synchronous extraction

经标定,本系统双光路有效数据采集的最大时间窗口不超过2.2 s,针对该同步时间差所引入的测量误差,本文开展了定量分析。在载荷层面,2.2 s时间窗口内的载荷波动最大值不超过0.02 N,远小于力传感器0.2%的测量精度,对载荷状态的影响可完全忽略;在材料形变层面,石英玻璃在常温环境下的拉伸蠕变速率不高于 10^{-8} /s,2.2 s内产生的附加形变量不超过0.022 nm,对应的干涉相位变化量不超过 0.02π ,远低于空间载波相位提取 0.05π 的分辨率;在定量测量层面,经计算可得,该同步时间差带来的应变测量附加误差不超过0.45%,应力测量附加误差不超过0.38%,两类误差均远低于系统全量程总测量误差,对最终测量结果的影响处于工程可接

受范围,能够充分满足应力-应变同步测量的载荷一致性要求。

2.4 应变测量原理

面内应变的物理本质是位移场的空间梯度,通过对位移场进行空间梯度求导可定量解算全场应变分布,本文以位移云图作为应变场的核心表征方式,具备充分的理论与实验合理性。力学本构层面,本实验中石英玻璃在50~170 N轴向拉伸下处于理想线弹性阶段,位移与应变呈严格线性正比,二者空间分布完全一一对应,位移沿轴向的梯度变化率可直接反映轴向应变的大小。测量信噪比层面,位移场是干涉相位直接解算的原始物理量,而应变场需经微分求导得到,梯度运算会放大散斑噪声与环境扰动误差,位移云图可无失真地呈现试件形变规律、边界约束效应与加载偏心等关键力学现象;力学关联性层面,位移场分布契合胡克定律“应力-应变-位移”的内在传导关系,因此用位移场来表征应变信息。本系统采用反射式数字散斑干涉(DSPI)光路。光学粗糙表面散射的光波在CCD相机靶面上相遇并发生干涉,形成随机的、具有唯一性的散斑场。该散斑场构成了记录物体表面微观几何状态。当试件发生变形,表面各点产生位移矢量 $d=(u,v,w)$ (其中 u,v 为面内位移, w 为离面位移)时,对应于每一束入射光,其散射光的相位均会发生改变。两束光相位变化的差异,导致合成散斑场的整体变化。由于物体受到的为Y方向上的竖直拉力,故只考虑位移 v ,其面内位移 v 与干涉相位差之间存在如下线性关系:

$$\Delta\varphi(x,y) = \frac{4\pi \sin[\theta(x,y)]v(x,y)}{\lambda}, \quad (1)$$

其中: $\Delta\varphi(x,y)$ 为变形前后的干涉相位差, λ 为激光波长, $\theta(x,y)$ 为物光束相对于试件表面法线的人射角。

实际光路布局中(见图3),由于照明光束经扩束后以一定发散角斜入射至石英玻璃表面,样品表面不同坐标处的实际有效入射角并非定值。若将它视为常数处理,会导致位移场产生明显的空间非线性畸变。为了消除这一几何偏差,本文建立了基于坐标依赖的几何校正模型,激光扩束示意图如图7所示。

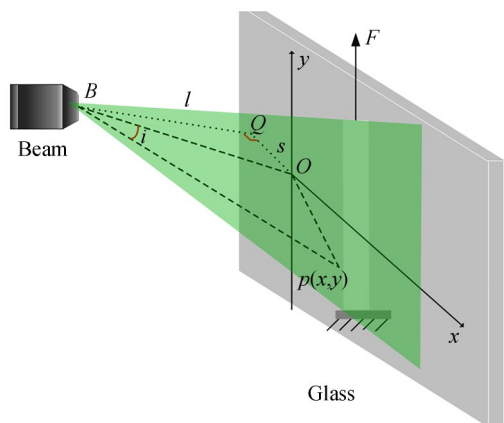


图7 激光扩束偏移

Fig. 7 Laser beam expander offset

将石英玻璃中心与扩束点 B 映射在同一高度上,以待测玻璃表面点 O 为原点建立二维平面直角坐标系,将石英玻璃上的每一个点用坐标 (x, y) 表示,并根据其与光源的距离计算点 P 处光线的入射角 i 。入射角表示为:

$$i = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{l^2 + s^2}}, \quad (2)$$

其中: l 为扩束点到石英玻璃表面平面 xoy 的垂直距离, s 为扩束点偏移距离。根据坐标位置和与扩束点的距离可以计算任意一点 $p(x, y)$ 的入射角。将该角度矩阵代入式(1)进行逐像素相位-位移转换,补偿由非平行光照明引起的场量畸变,从而确保位移场解算的准确性。实验利用空间载波技术获取变形前后的散斑干涉图,经频域滤波、相位提取、降噪处理以及解包裹后得到全场连续的相位分布。根据补偿后的位移关系式计算出全场位移场后,应变张量的法向分量可通过对位移场进行空间梯度求导获得:

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (3)$$

通过上述处理流程,系统能够有效剔除实验环境中的几何干扰,获取高信噪比的表面应变分布图。

2.5 应力测量原理

应力测量的物理基础是透明材料(如石英玻璃)在受力后产生的应力双折射效应,即光弹性效应。石英玻璃在无应力状态下呈光学各向同性,一旦受到外力作用,其内部折射率分布将发

生改变。此时,折射率椭球的主轴方向与主应力方向重合,主折射率之差与主应力之差成正比,满足应力-光学定律:

$$\Delta n = C(\sigma_1 - \sigma_2) = C\sigma, \quad (4)$$

其中: C 为材料的应力光学常数, σ_1 和 σ_2 分别为应力方向的数值, σ 为主应力。

本系统采用偏振调制结合反射式散斑干涉的光路设计。如图4所示,线偏振光从试件A侧入射,在穿透厚度为 d 的玻璃基底过程中,由于应力双折射效应,光束分解为两束分别沿主应力方向偏振且传播速度不同的分量。光束到达B侧涂层后发生漫反射并再次穿过玻璃基底返回。在该双程往返过程中,两偏振分量积累的相对相位延迟与主应力差的关系可表述为:

$$\delta = \frac{4\pi d(n_o - n_e)}{\lambda} = \frac{4\pi dC(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda}, \quad (5)$$

其中: n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率, d 为待测玻璃的厚度, λ 为入射光的波长。

根据激光扩束斜入射模型,校正后的相位延迟与应力转换关系为:

$$\sigma(x, y) = \frac{\lambda \delta(x, y) \sqrt{n_o^2 - \sin^2 i(x, y)}}{4\pi d C n_o}, \quad (6)$$

其中: $\delta(x, y)$ 为解算的双折射相位延迟, $i(x, y)$ 为该点的入射角。通过偏振调制模块控制入射光的偏振态,并利用空间载波技术提取正交偏振态下的干涉相位分布,即可解算出全场相位延迟,进而结合式(6),实现对石英玻璃内部应力场分布的定量提取。

应力测量的关键在于确定双折射效应产生的快、慢轴方向,即对应于最大与最小主应力的方位角。本系统利用集成在光路中的偏振调制模块实现主轴的精准定位。根据光弹性理论,当入射线偏振光的偏振方向与主应力方向一致时,不会产生偏振分量间的相对相位延迟。实验中,通过精密步进电机驱动半波片(HWP)在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内旋转,改变入射光的偏振方位角 β ,并同步采集一系列原始载频散斑干涉图。采集 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内的原始散斑干涉图,采样间隔为 1° ,部分偏振角度下的原始散斑干涉图如图8所示。

分析不同偏振角度下的全场干涉光强响应可知,当干涉条纹的对比度达到极值或符合特定

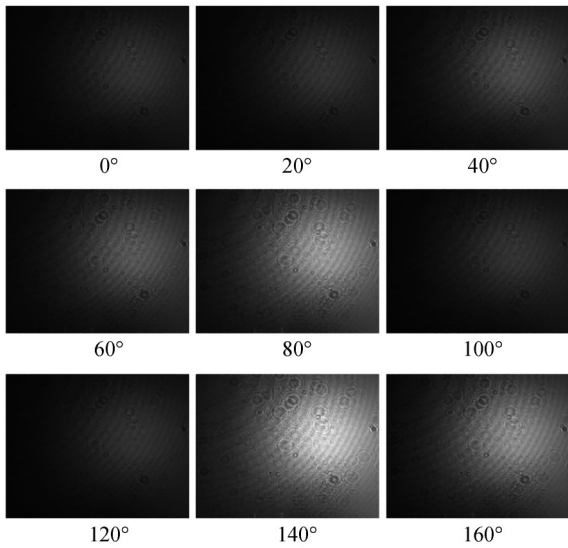


图 8 不同偏振角度下的原始散斑干涉图

Fig. 8 Original speckle interferogram at different polarization angles

消光规律时,对应于应力主轴方向。实验中,当偏振角旋转至 140°时,全场干涉光强达到极大值,由此判定该方位角为试件拉伸状态下的一个主应力方向。

2.6 空间载波相位提取技术

为了从单幅散斑干涉图中实时提取全场相位,本系统引入了空间载波相位提取技术。该技术的核心在于通过引入已知的空间高频载波,将待测相位信息在频域内与低频背景噪声分离。系统通过调节保偏光纤(PMF)的入射位置和角度,使参考光与物光在 CCD 靶面上成微小夹角相遇。这种配置在随机散斑场中植入一个特定频率的空间载波。CCD 采集到的散斑干涉图像光强分布可表示为:

$$I(x, y) = I_0(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2\pi f_x x + 2\pi f_y y], \quad (7)$$

其中: $I_0(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为调制深度, $\varphi(x, y)$ 为被包含被测形变或应力信息的待测相位, f_x 和 f_y 分别为在 x 和 y 方向引入的空间载波频率。

对采集到的干涉强度表达式进行二维傅里叶变换,可得到其空间频谱图。频谱分布由三部分组成:低频项 A 、高频项 P 和共轭项 Q 。这种频谱空间的分离特性允许通过数字滤波器提取高频项 P ,从而有效排除了环境杂散光和低频噪声

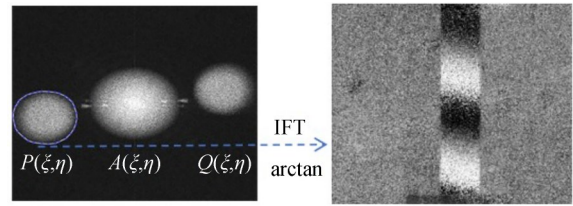


图 9 空间频谱及高频项相位分布

Fig. 9 Spatial spectrum and high-frequency component phase distribution

的干扰。如图 9 所示,通过提取频谱图中的高频项并进行傅里叶逆变换(Inverse Fourier Transform, IFT),获得对应的复信号,利用反正切函数可计算出全场包裹相位。在实际测量中,应变相位提取是通过分别计算加载前后两帧干涉图的相位;应力延迟提取是根据偏振调制结果,分别提取应力主轴方向(140°)与正交方向(95°)的相位和,通过相位相减获取相位差信息。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据分析

图 10 展示了石英玻璃试件在 50~170 N(步进 30 N)轴向拉伸载荷下,通过对向双光路 DSPI 系统获取的应变与应力相位分布对照。随着轴向载荷的增加,应变相位差条纹数目呈线性增加,条纹分布由均匀平行逐渐向夹持端弯曲,初步反映了应力集中效应。应力相位分布记录了由双折射效应引起的相位演化,证明了系统在不同偏振角度下对弱双折射信号的稳定提取能力。

为了进一步阐述所提方法对应力与应变场

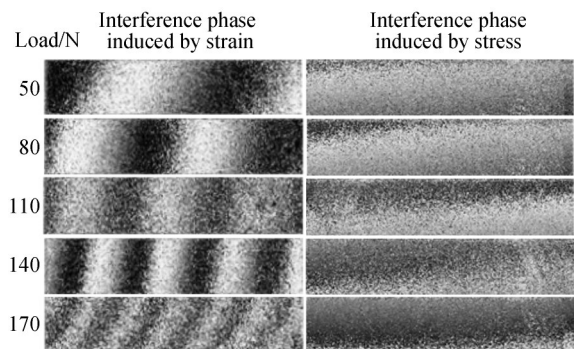


图 10 同步加载应变与内应力相位分布对照

Fig. 10 Comparison of phase distribution between synchronously loaded strain and internal stress

的提取能力,选取 80 N 轴向拉伸载荷作为典型工况,详细展示从原始干涉信号到物理量分布的完整数据处理流程。针对原始相位图中存在的随机散斑噪声,应用中值滤波与余弦滤波相结合的方法进行降噪处理。由于相位信息被包裹在 $(0, 2\pi)$ 内,利用枝切法进行区域相位解包裹,还原出全场连续的相位分布。通过解包裹相位图与物理量的映射关系,最终生成的应变位移云图与应力分布云图,如图 11 所示。图 11(a)中,位移量随颜色梯度呈现显著的定向分布规律。云图上部区域对应较高的位移幅值,随 Y 坐标沿拉伸方向(轴向)增大,位移量呈连续梯度式降低。该分布特征与试件的边界约束条件高度匹配,夹持端的刚性约束使拉伸变形向近夹持端区域集中,进而形成沿轴向的非均匀位移梯度场。如图 11(b)所示,应力场的空间分布与位移场呈显著正相关。近夹持端的上部区域对应最高应力值,随 Y 坐标沿轴向延伸,应力呈梯度衰减。这一结果契合线弹性阶段的胡克定律(应力与应变成正比),印证了位移场与应力场的力学内在一致性,也体现了散斑干涉技术对力学量场的协同表征能力。

云图显示的区域集中特征与前期相位差条纹向夹持端弯曲的现象相互印证,本质是夹持边

界约束诱发的应力集中效应。对于石英玻璃这类脆性材料,该区域通常为拉伸载荷下的损伤萌生区。综上所述,测量结果既符合轴向拉伸下脆性材料的线弹性行为规律,也准确表征了边界约束引发的力学响应特征,表明测量结果具有良好的可靠性。

3.2 仿真实验分析

为了验证实验测量结果的理论正确性,并为实验提取的物理场提供定量基准,采用有限元方法对石英玻璃试件在不同载荷下的力学响应进行了数值模拟。本研究利用 SolidWorks 软件对石英玻璃试件进行三维几何建模。随后将几何模型导入 ANSYS 进行有限元仿真。根据石英玻璃的物体特型,设定弹性模量 $E=70.43\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.17$ 。采用六面体主导的网格划分方式,对试件的有效测量区域(窄径区)进行网格加密处理,以保证计算结果的收敛性。为真实还原拉伸机的实际加载工况,将试件底端设为固定约束,顶端施加沿 y 轴正方向(轴向)的拉伸载荷 F 。载荷工况设置为以 30 N 为步进间距,拉力从 50 N 增加至 170 N。仿真结果展示加载载荷为 80 N 时的结果,如图 12 所示。试件有效测量区域的应变仿真结果中,上部区域对应较高的位移幅值,从上往下位移量呈连续梯度式降低,应力仿真结

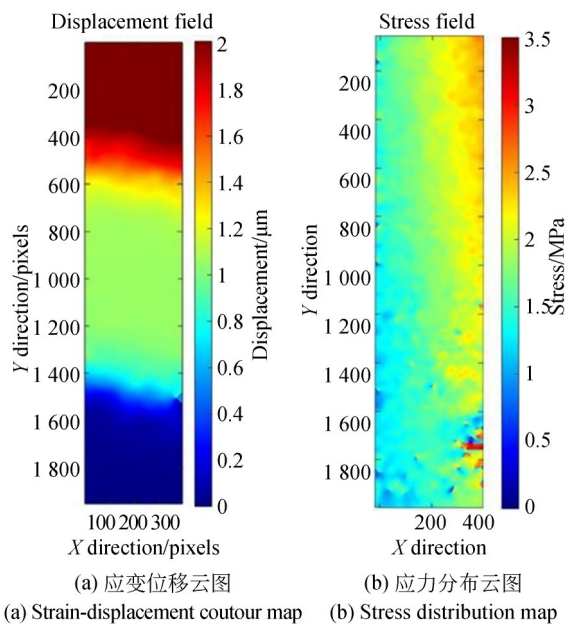


图 11 系统测量结果

Fig. 11 System measurement results

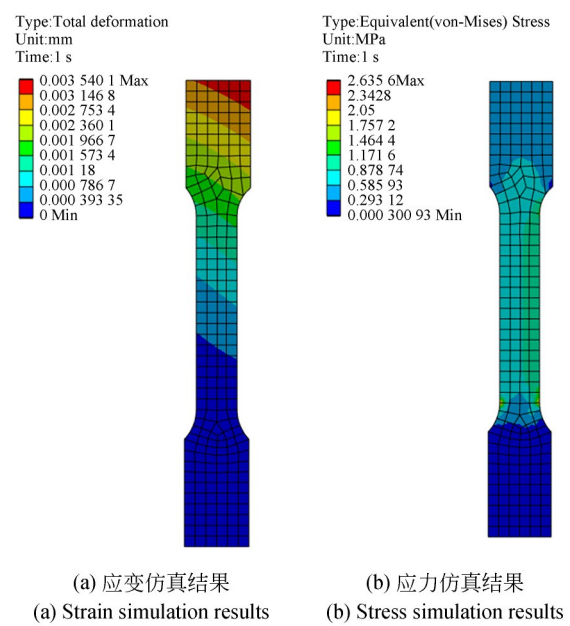


图 12 有限元分析结果

Fig. 12 Finite element analysis results

果整体趋于均匀状态,仿真结果与系统测量结果的整体趋势一致。

3.3 实验结果分析对比

为了定量评估对向双光路 DSPI 测量系统的准确性,将不同载荷下的全场测量结果与 ANSYS 有限元仿真数值进行对比分析。图 13 展示了测量应变、测量应力与对应仿真值的点线对比图。实验测得的应变与应力随载荷变化的曲线均表现出极高的线性度,这与有限元仿真结果的演化规律高度吻合。在 50~170 N 的拉伸过程中,测量得到的应力与应变始终保持同步增长关系,符合石英玻璃材料的线弹性本构特征,验证了系统对材料力学行为捕捉的准确性。

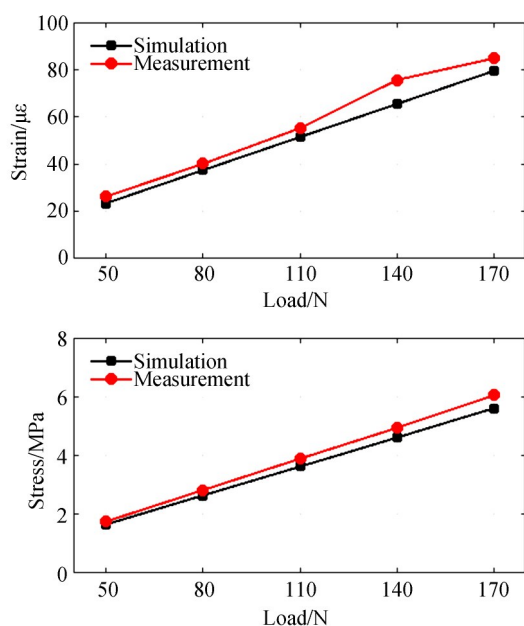


图 13 实验测量值与仿真值对比

Fig. 13 Comparison of experimental measurements and simulation values

在不同载荷下,测量应变略高于仿真应变。全量程平均相对误差约为 9.2%。测量应力的绝对数值普遍高于仿真值约 0.1~0.4 MPa,相对误差控制在 7.8% 以内。为验证实验结果并非单一样品的特例,而是具备普适性与可重复性,对同批次、同几何参数、同加工工艺的另一件石英玻璃试件进行了轴向拉伸重复性实验。相同载荷下,应变测量值的最大波动小于 1.6%,应力测量值的最大波动小于 0.8%,证明系统对石英玻璃

试件的测量具有良好的重复性与稳定性,实验结果具备普适性,并非依赖单一特殊样品。实验测量结果与仿真理论值之间的偏差主要源于物理加载环境与理想模型之间的差异。首先,加载偏心与预紧力影响是导致数值级差的关键因素。有限元模型基于理想零应力状态进行轴向拉伸,而实验中拉伸机夹具难以实现绝对中心加载,产生的附加弯曲力矩导致位移场出现向右上方的偏斜分布;同时,实验采集基准帧时夹具已存在的机械预紧力,使得实测应力/应变值普遍高于仿真结果。其次,光路系统的几何误差不可忽略。由于物光以一定角度斜入射至试件表面,轴向位移在相位提取过程中耦合了部分离面位移分量,导致测量应变值呈现系统性偏大。加上实验环境中的散斑噪声干扰,最终造成了测量结果的离散与偏差。

4 结 论

本文针对光学元件在力-光耦合场下高精度、同步测量的要求,提出了基于对向式双光路数字散斑干涉的非接触同步测量方法,构建了配套的测量系统,并介绍了该系统的并行光路架构与时序同步工作原理。通过建立斜入射几何校正模型与双光路空间配准流程,有效消除了系统几何误差带来的测量偏差。研究了反射式光路提取面内应变与透射式偏振调制光路探测内部应力的解调算法,并通过与等尺寸有限元仿真结果的逐级比对,深入分析了加载偏心、夹具预紧力及斜入射几何耦合等误差的产生机理。实验结果表明,在 50~170 N 载荷全量程内,全场应变测量的平均相对误差约为 9.2%;内部应力测量的相对误差控制在 7.8% 以内。该系统能够获得理想模型难以体现的弯曲力矩与位移场偏斜,基本满足光学玻璃全场应力应变同步测量的工程要求。

作者贡献声明:

谢翟子:实验系统设计,数据整理与分析,论文构思与初稿撰写;

牛海莎:方法提出,实验指导,论文修改;

苏信晨、冯浩博:实验及数据采集;

吴思进、彭璐:技术讨论,执行与指导。

参考文献:

- [1] 李春艳. 玻璃内应力高精度检测技术的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2014.
LI CH Y. *Study of High-Precision Glass Stress Testing Technology* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [2] 张心明, 田爽, 付为杰, 等. 光学玻璃离心熔铸过程中成型热历史对反射镜的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2475-2483.
ZHANG X M, TIAN SH, FU W J, *et al.* Effects of thermal history on reflector formation in an optical glass centrifugal casting process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2475-2483. (in Chinese)
- [3] ÇAMIÇI H C, GUÉRINEAU T, LAROCHELLE S, *et al.* Optical investigation and thermal stabilization of germanium-gallium-containing bismuthate glasses towards NIR-MIR applications[J]. *Optical Materials*, 2025, 168: 117511.
- [4] ABDULLAH M, ABEDIN M Z, BAKAUL S R. A review on synthesis and characterization of composites reinforced with nanoparticles, glass fiber, and jute fiber for aerospace applications[J]. *Results in Surfaces and Interfaces*, 2025, 19: 100492.
- [5] 蒋小为, 龙兴武, 谭中奇. 光学玻璃超精密抛光加工中材料去除机理研究综述[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401014.
JIANG X W, LONG X W, TAN ZH Q. A review of material removal mechanism in ultra-precision polishing of optical glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401014. (in Chinese)
- [6] SONG Z F, GONG K Q, SHI Z J, *et al.* Coupled *in situ* monitoring and nonlinear thermomechanical modeling of stress evolution in glass-to-metal seals [J]. *Materialia*, 2025, 44: 102615.
- [7] 周宁, 冯建民, 宋昊, 等. 多点粘贴式应变测量系统在线校准技术研究[J]. 计量学报, 2025, 46(2): 204-212.
ZHOU N, FENG J M, SONG H, *et al.* Research on metrology calibration technology for the multi-points pasted strain-gauges system on-line[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2025, 46(2): 204-212. (in Chinese)
- [8] NARESH K, SHANKAR K, VELMURUGAN R, *et al.* High strain rate studies for different laminate configurations of bi-directional glass/epoxy and carbon/epoxy composites using DIC [J]. *Structures*, 2020, 27: 2451-2465.
- [9] 张展华, 曹鑫, 詹伟浩, 等. 相衬光学相干弹性成像的超分辨应变测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(12): 1812-1823.
ZHANG ZH H, CAO X, ZHAN W H, *et al.* Super-resolution strain measurement in phase-contrast optical coherence elastography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(12): 1812-1823. (in Chinese)
- [10] ZHAO N, ZHANG H C, LU J, *et al.* Photoelasticity-based stress field analysis of glass under 1064 nm laser irradiation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 181: 108367.
- [11] TAKASAKI H, UMEDA N, TSUKIJI M. Stabilized transverse Zeeman laser as a new light source for optical measurement [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(3): 435.
- [12] MIYOSHI R, WADA M, HIJIYA H, *et al.* A comparison of photoelastic constants of disk- and square-shaped glasses using the heterodyne method: an empirical approach[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2024, 132(3): 104-108.
- [13] 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.
NIU H SH, ZHU L Q, LIU N. Laser feedback stress measurement system based on Fourier transform phase extraction method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1954-1959. (in Chinese)
- [14] 李克武, 邱元芳, 崔志英, 等. 基于双弹光级联差频调制的应力双折射二维分布测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(18): 2647-2655.
LI K W, QIU Y F, CUI ZH Y, *et al.* Measurement of two-dimensional distribution of stress birefringence based on dual photoelastic modulators cascade difference frequency modulation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(18): 2647-2655. (in Chinese)
- [15] 简增文, 李浩, Mashimango Sem Mukingilwa, 等. 光弹模型的全场应力和应变分布同步测量方法[J]. 光学学报, 2025, 45(21): 2112002.
JIAN Z W, LI H, MUKINGILWA M, *et al.* Method for synchronous measurement of full-field

- stress and strain distribution in photoelastic model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45 (21) : 2112002. (in Chinese)
- [16] 喻培丰. 特殊环境下非接触应力应变实时监测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
YU P F. *Non-Contact Stress-Strain Monitoring Research in Special Environment* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [17] 刘天承, 吴思进, 李伟仙. 大视场空间载波数字散斑干涉系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(9) : 904001.
LIU T CH, WU S J, LI W X. Spatial carrier digital speckle pattern interferometry system with large field of view[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9) : 904001. (in Chinese)

作者简介:



谢翟子(2001—),男,北京人,硕士研究生,主要从事数字散斑干涉测量方面的研究。E-mail: 2023020322@bistu.edu.cn

通讯作者:



牛海莎(1984—),女,河北石家庄人,博士,副教授,主要从事激光精密测量方面的研究。E-mail: niuhs@buaa.edu.cn