

文章编号: 1002-1582(2025)06-0736-07

内嵌 SMF 复合材料形变应力诱导双折射分布式测量

张志武¹, 马明磊¹, 常文慧¹, 杜冬生¹, 唐智超¹, 方汀¹, 周俊楠^{3,4}, 姚鹏辉^{2,3,4,5*}

(1. 张家口卷烟厂有限责任公司, 河北 张家口 075000)

(2. 河北省科学院, 河北 石家庄 050000)

(3. 河北省机电一体化中试基地有限公司, 河北 石家庄 050000)

(4. 河北省智能测控技术创新中心, 河北 石家庄 050000)

(5. 河北大学光信息技术创新中心, 河北 保定 071000)

摘 要: 光纤中的双折射作为表征多种物理量的敏感载体, 为了验证双折射可以表征横向应力, 文章基于偏振态分析技术, 将二元磁光 PSG 和 PSA 融入 OFDR 技术中组成双折射测量系统, 首先对比分析了 PSG 和 PSA 在双折射测量中的原理和优势, 然后通过施加压力的方式引入压力诱导线双折射, 测量值与理论值平均误差为 6.20%, 验证了测量系统的准确性。基于此将 SMF 嵌入到不同制作工艺缺陷的 GFRP 内, 在弯曲形变半径为 6cm 时内部 SMF 受横向应力诱导双折射的多次测量平均值为 4.91×10^{-6} , 排除了制作工艺缺陷对测量的影响, 验证了双折射表征横向应力的能力, 这对从事 GFRP 材料弯曲形变以及弯曲形变引入横向应力的研究人员和科学家提供了新的思路。

关 键 词: 偏振分析技术; 光频域反射技术; 单模光纤双折射; 横向应力

中图分类号: TN29

文献标识码: A

Distributed measurement of stress-induced birefringence in SMF embedded within composites

ZHANG Zhiwu¹, MA Minglei¹, CHANG Wenhui¹, DU Dongsheng¹, TANG Zhichao¹,

FANG Ting¹, ZHOU Junnan^{3,4}, YAO Penghui^{2,3,4,5*}

(1. Zhangjiakou Cigarette Factory Co., Ltd, Zhangjiakou 075000, China)

(2. Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050000, China)

(3. Hebei Mechatronics Intermediate Pilot Base Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, China)

(4. Hebei Province Intelligent Measurement and Control Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050000, China)

(5. Hebei University Optical Information Technology Innovation Center, Baoding 071000, China)

Abstract: Optical fiber birefringence serves as a sensitive probe for characterizing various physical quantities. To validate its capability in characterizing transverse stress, A binary magneto-optic Polarization State Generator (PSG) and Polarization State Analyzer (PSA) are integrated into Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) to form a birefringence measurement system based on polarization state analysis technology. First, the principles and advantages of PSG and PSA in birefringence measurement are comparatively analyzed. Transverse stress is then experimentally induced through applied pressure, generating stress-induced linear birefringence in a Single-Mode Fiber (SMF). The measured birefringence values exhibited a mean error of 6.20% compared to theoretical predictions, confirming the system's measurement accuracy. Build-

收稿日期: 2025-06-27; 收到修改稿日期: 2025-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61975147); 河北省京津冀协同创新专项 (25241801D); 河北中烟工业有限责任公司科技项目 (HBZY2024A057); 河北省科学院高端人才引进项目 (25B901)

作者简介: 张志武 (1988—), 男, 工程师, 硕士, 从事机械工程技术研究。15030395986@163.com

姚鹏辉 (1989—), 男, 副研究员, 博士, 从事偏振分析技术、光纤电流传感和分布式光纤传感研究。

* 通讯作者: penghuiyao1989@163.com

ing upon this foundation, a SMF is embedded within Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) composites containing intentional fabrication defects. Under a bending deformation radius of 6 cm, the average value of transverse stress-induced birefringence measured multiple times within the embedded SMF is 4.91×10^{-6} . This result effectively excludes the influence of manufacturing defects on the measurement, thereby validating the capability of birefringence to characterize transverse stress. This work provides a new insight for researchers and scientists studying bending deformation in GFRP materials and the transverse stresses introduced by such deformation.

Keywords: polarization analysis technology; optical frequency domain reflection technology; single-mode fiber birefringence; transverse stress

0 引言

光纤因损耗低、抗电磁干扰和带宽大等特性,已成为现代光通信与传感系统的核心传输介质。然而,理想圆对称的光纤结构在实际制造和应用中难以完美实现,纤芯的轻微椭圆度、内部残余应力以及外部机械作用等因素会导致光纤产生双折射效应——即传输光中两个正交偏振模式的传播常数存在差异,这种双折射效应虽然对通信系统产生不利影响,却在光纤传感领域展现出独特的应用价值^[1-4]。双折射的定量表征能够实现对温度、应变、压力等多种物理参量的高灵敏度、分布式感知,为结构健康监测、工业过程控制及生物医学检测等提供新的技术手段^[5-11]。

横向应力传感是双折射应用的重要方向之一。光纤的横向应力会通过弹光效应影响偏振态传播特性,进而改变其局部双折射。比如,长周期光纤光栅虽然因双折射效应具有比传统光纤布拉格光栅更高的横向应力响应灵敏度,能实现高精度应力传感,但也存在温度交叉敏感、对解调系统要求高、复用困难等缺点^[12]。基于高双折射的光子晶体光纤、掺杂型双芯光子晶体光纤横向应力传感结构,应力灵敏度高且对方向敏感,但结构复杂、成本昂贵^[13,14]。基于偏振串扰分析技术的保偏光纤应力传感系统,可实现高灵敏度分布式应力传感。但需要特制的角度基带及复杂的双折射对轴工作^[15]。

单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)因其复用方便、结构简单、成本低等特性逐渐受到光纤传感研究学者的青睐,但目前针对其双折射效应在横向应力方面的研究相对较少,传统双折射测量技术虽可实现点式或准分布式测量,但存在空间分辨率低、测量速度慢或系统复杂等局限。光时域反射技术大多通过分析后向散射光偏振态的演变来间接估计推断局部或平均双折射,测量准确度较低。虽然可以测量几十公里的范围内的双折射分布^[16],但是这只能通过牺牲空间分辨率来实现,并且需要大量重复测量和复杂的平均程序,导致单次测量时间较长^[17]。近年来,光频域反射技术(Optical Fre-

quency Domain Reflectometry, OFDR)因其毫米级空间分辨率和微应变级灵敏度受到广泛重视。将偏振敏感机制引入OFDR形成的偏振敏感光频域反射技术(Polarimetric-Optical Frequency Domain Reflectometry, P-OFDR),通过分析后向瑞利散射光的偏振态随光纤位置的演变,可得到整根光纤的双折射高空间分辨率的分布信息^[18-21]。

本文基于偏振态分析技术的双折射测量系统,将二元磁光(Magneto-optic, MO)偏振态发生器(Polarization State Generator, PSG)、二元MO偏振态分析器(Polarization State Analyzer, PSA)与OFDR技术相结合。首先对比分析了PSG和PSA在双折射特性测量中的原理和优势。然后实验利用砒码和载玻片在SMF上设置三个受力区域,测量其双折射大小,与压力诱导双折射理论值进行对比,平均误差为6.20%,验证了该系统双折射测量的准确性。另外通过将SMF以平行往返、交叉铺设的形式嵌入到玻璃纤维复合材料(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)内,利用GFRP在固化、弯曲形变过程中产生的应力施加于内部SMF和引入的额外受力点,测量内部SMF受形变横向应力引起的双折射。固化过程中应力释放作用于引入的额外受力点,使其双折射的局部增大。GFRP板弯曲形变半径6cm时产生内部横向应力作用于SMF,多次测量双折射的平均值为 4.91×10^{-6} ,揭示了该弯曲半径情况下GFRP材料自身制作缺陷对测量的影响可忽略不计。实验验证了双折射表征复合材料形变横向应力的能力,也为检测GFRP其固化过程应力释放大小、受力形变程度提供了新思路方法。

1 基本原理

1.1 偏振测量原理

在早期的研究^[22-24]中,光纤双折射特性的测量系统通常包括光源(Laser)、四分之一波片、偏振器(Polarizer)、准直透镜、Babinet-Soleil补偿器(BSC)、分析器(Analyzer)和光电探测器(Photodetector, PD),如图1(a)所示。通过仔细调

整补偿器的位置和方向,从而获得光纤的双折射^[23,25]。但被测光纤的长度被限制在2~3米,且必须保持笔直,以使光纤中受应力引起的双折射最小。该方法调节起来繁琐且耗时,在测量过程中会受到温度变化和光纤运动引起的波动和漂移影响。因此本文采用自校准的基于二元MO偏振测量系统进行双折射的测量。

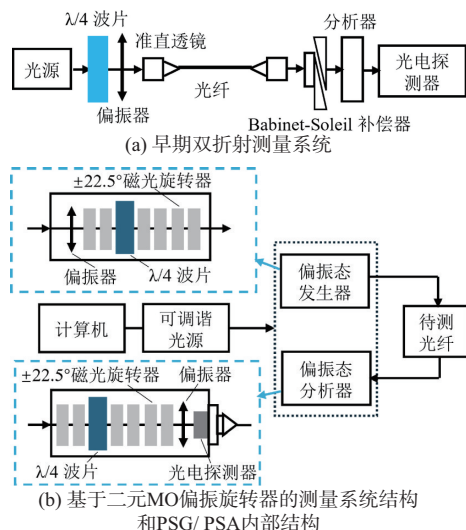


图1 双折射测量系统示意图

二元MO偏振测量系统^[25,26]的基本结构如图1(b)所示。它由可调谐激光器(Tunable Laser Source, TLS)、二元PSG、二元PSA和计算机(Personal Computer, PC)组成。待测光纤(Fiber Under Test, FUT)放置在PSG和PSA之间。二元PSG和PSA均由一个四分之一波片、六个 $\pm 22.5^\circ$ 二元MO偏振旋转器和一个偏振器组成。二元PSA还包括信号处理电路和光电探测器。

PSG和PSA中每个二元MO旋转器被施加超过饱和水平的正/负磁场时,能够将偏振态(State Of Polarization, SOP)精确旋转 $\pm 22.5^\circ$ 。PSG可产生6种不同SOP,PSA可以通过分析PD产生电压值的大小来精确测量SOP,其输出功率可表示为

$$I_i = f[S_0, S_1, S_2, S_3, \alpha_1, \alpha_2, \Theta(\lambda), \theta_p] \quad (1)$$

$S = (S_0, S_1, S_2, S_3)$ 为输入偏振态的四维斯托克斯(Stokes)矢量; $\Theta(\lambda)$ 为 $\lambda/4$ 波片在某一波长下的相位延迟差; θ_p 为 $\lambda/4$ 波片光轴与偏振片光轴间的夹角; α_1 位于 $\lambda/4$ 波片前面的2个磁光晶体的旋转角度,存在三种不同的可能,分别为 0° 、 $\pm 45^\circ$; α_2 位于 $\lambda/4$ 波片后面的4个磁光晶体的旋转角度,存在五种不同的可能,分别为 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$,因此 I_{out} 存在 $3 \times 5 = 15$ 种可能情况。PSA采用自校准的方法,在无需知道波长和温度的情况下,通过15种不同输出情况,也能足够列出解调式(1)

中8个未知参量的数学方程组来进行各自数值的准确求解。

PSG和PSA一起能够获得FUT的完整Muller矩阵 M 并分析其双折射特性^[26,27]。

假设PSG第 i 个输出的Stokes矢量为

$$S_i^{PSG} = \begin{pmatrix} S_{0i}^{PSG} \\ S_{1i}^{PSG} \\ S_{2i}^{PSG} \\ S_{3i}^{PSG} \end{pmatrix} \quad (2)$$

PSA测量当光经过FUT后对应Stokes矢量与 M 的关系为

$$S_i^{PSA} = \begin{pmatrix} S_{0i}^{PSA} \\ S_{1i}^{PSA} \\ S_{2i}^{PSA} \\ S_{3i}^{PSA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{0i}^{PSG} \\ S_{1i}^{PSG} \\ S_{2i}^{PSG} \\ S_{3i}^{PSG} \end{pmatrix} = M \cdot S_i^{PSG} \quad (3)$$

PSA至少分析PSG产生的四种不同的已知偏振态,通过上式计算得到FUT完整的Mueller矩阵 M ^[28-30]。

1.2 偏振分析OFDR系统的测量原理

本文基于偏振态分析技术和OFDR技术的双折射测量系统,是将二元MO的PSG和PSA融合进OFDR技术中,通过检测外界物理量引起光纤瑞利散射光偏振态的变化,来获取沿光纤的双折射分布,实现精确传感外界物理量。实验室已经得到了该系统的分布式横向应力空间分辨率为3.7mm,最小可测横向应力0.661N/m,传感距离为103.5m。

偏振分析双折射测量系统的结构示意图如图2所示,TLS发出的光经耦合器1(Coupler1)后分为两路,一路进入由环形器1(Circulator1)、耦合器3(Coupler3)、延迟光纤(Delay)、两个法拉第反射镜(Faraday Rotating Mirror, FRM)以及平衡光电探测器1(Balanced Photodetector 1, BPD1)组成的辅助干涉仪,考虑到辅助干涉仪Delay长度至少为系统传感距离的2倍,选择Delay为250m延迟光纤,确保系统最大传感距离 >100 m。

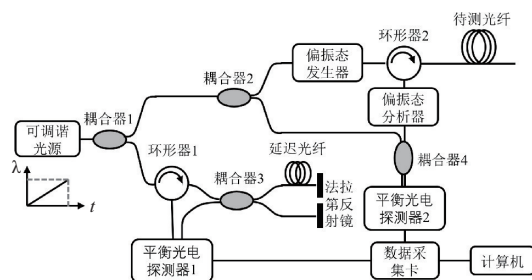


图2 偏振分析双折射测量系统结构示意图

另一路经耦合器2(Coupler2)后分为测试光和参考光,测试光经PSG和环形器2(Circulator2)进入FUT,FUT的背向瑞利散射光经PSA后与参

考光在耦合器4 (Coupler4) 耦合产生拍频干涉, 由平衡光电探测器2 (BPD2) 检测和放大后被送到数据采集卡 (Data Acquisition, DAQ)。BPD1检测到来自辅助干涉仪的干涉信号过零点作为DAQ的触发信号, 使得来自BPD2的信号以相等的频率间隔采集, 以消除光源的非线性影响。PC进行快速傅立叶变换处理可得到FUT中背向瑞利散射光的空间距离分布信息。

系统中TLS每进行一次扫频, PSG生成一种已知SOP, 多次扫频后, PSA通过分析多个FUT中背向瑞利散射光的SOP, 从而得到FUT的Mueller矩阵。若将光纤分为若干个 Δz 长度的光纤段, $z+\Delta z$ 处的Mueller矩阵 $M(z+\Delta z)$ 与 z 处的Mueller矩阵 $M(z)$ 存在 $M(z+\Delta z)=M(\Delta z)M(z)$ 的关系。

分析获得 $M(z+\Delta z)$ 和 $M(z)$ 后, 延迟角 θ 可表示为^[20,27,31-32]

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\text{Tr}[M(\Delta z)] - 1}{2} \right] \quad (4)$$

式中, $\text{Tr}[M(\Delta z)]$ 为矩阵 $M(\Delta z)$ 的迹, 则 Δz 处的线双折射 $\Delta n(\Delta z)$ 可以通过 θ 计算获得

$$\Delta n(\Delta z) = \frac{\theta \lambda}{4\pi \Delta z} \quad (5)$$

式中, λ 为激光器扫描的中心波长。

2 实验分析与讨论

在进行双折射表征复合材料形变横向应力实验之前, 有必要验证系统双折射测量的准确性, 通过在SMF上选择三个不同区域利用砝码施加不同压力进行实验, 测量由压力诱导的双折射大小。压力诱导双折射是光纤的一种双折射特性, 通过光弹效应改变光纤的双折射。当压力作用到单模光纤时, 其诱导双折射为^[27,31-32]

$$\Delta n = \left(\frac{4n^3}{\pi E} \right) (1 + \mu) (p_{12} - p_{11}) \left(\frac{f}{d} \right) = pf \quad (6)$$

式中 n 为折射率; E 为杨氏弹性模量; μ 为泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为光纤的弹光系数; d 为光纤包层直径, 从式(6)可以看出, SMF的应力诱导产生的双折射与压力 f 呈正比, 定义 p 为应力诱导双折射系数。对于普通SMF, $n=1.46$, $E=6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $P_{11}=0.12$, $P_{12}=0.27$, $\mu=0.17$, $d=125 \mu\text{m}$, 将已知参量代入式(6)可得 $p=8.559 \times 10^{-8} \text{ m/N}$ 。

为了降低温度变化对双折射测量的影响, 实验室超净间温度控制在 $25^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$ 。根据文献[33]、[34]中单模光纤双折射温度系数约为 $10^{-9} \sim 10^{-8}/^\circ\text{C}$, 当温

度变化 10°C 时引起的双折射变化基本与光纤固有双折射持平 (10^{-7}), 即本实验中温度的影响可忽略不计。实验中将SMF固定在特制表面平整度达 μm 级的大理石平面上。为了避免多个砝码堆叠对实验造成影响, 选择单个质量均为500g的砝码放置在宽度2.5cm、厚度3mm的载玻片上, 通过调整砝码与载玻片周围间隔对称保证砝码位于载玻片正中心; 载玻片长度分别为8cm、9cm、10cm, 使其在SMF上设置3个不同长度的受力区域。为了消除光纤涂覆层对实验的影响, 利用丙酮试剂去除受力区域内光纤的涂覆层; 为避免载玻片滑动损伤或扭转光纤, 保持受力平衡, 选用无涂覆光纤与待测光纤间隔1cm, 距载玻片上下边间距相等且平行放置作为支撑共同受力, 如图3所示。

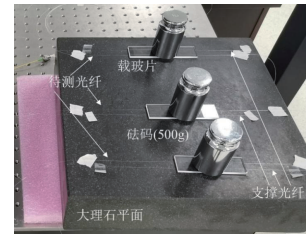


图3 SMF上设置8cm、9cm、10cm长的受力区域

SMF上受力区域的受力大小按 $f=(m_G+m_w)g/2l$ 计算, 其中 m_G 为载玻片质量, m_w 为砝码质量, 重力加速度 $g=9.8 \text{ N/kg}$, l 为载玻片长度。利用精密电子秤得到长度8cm、9cm、10cm载玻片的质量分别为13.35g、15.12g、16.23g, 经过计算得到3个受力区域的双折射大小分别为 31.44 N/m 、 28.05 N/m 、 25.30 N/m 。

实验中TLS的线宽约500KHz, 设置扫描速度为 20 nm/s , 起始波长1510nm、终止波长1590nm, 光功率1.6mW, 双折射空间分辨率0.25mm, 测量SMF沿线的双折射分布, 3个受力区域的双折射大小如图4所示, 图4结果为重复测量10次的平均值。

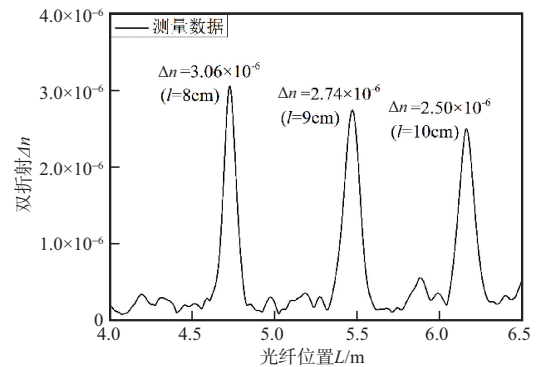


图4 SMF受力区域为8cm、9cm、10cm的双折射测量平均值

从图4中可以看出SMF在受力长度为8cm、9cm、10cm时的双折射平均值分别为 3.06×10^{-6} 、 2.74×10^{-6} 、 2.50×10^{-6} , 标准差分别为 3.37×10^{-8} 、

3.43×10^{-8} 、 3.03×10^{-8} 。根据压力诱导双折射公式^[27]可以算出其双折射理论值分别为 2.90×10^{-6} 、 2.59×10^{-6} 、 2.33×10^{-6} ，测量值与理论值相对误差为 5.52%、5.93%、7.16%。

实验中继续选择多个不同质量砝码进行双折射测量。在 500g 砝码基础上中心处叠加 100g、200g 砝码计算 600g 时 3 个受力区域的受力大小分别为 37.57N/m、33.49N/m、30.20N/m；700g 时 3 个受力区域的受力大小分别为 43.69N/m、38.93N/m、35.10N/m。相同实验设置条件下重复测量 10 次平均值及误差见表 1。

表 1 砝码质量 600g、700g 时 SMF 不同受力区域的双折射 10 次测量结果及误差

砝码质量/g	受力大小/(N/m)	双折射平均值/ 10^{-6}	理论值/ 10^{-6}	相对误差/%
600	37.57	3.66	3.46	5.53
600	33.49	3.27	3.09	5.97
600	30.20	2.96	2.78	6.29
700	43.69	4.26	4.03	5.75
700	38.93	3.76	3.59	4.66
700	35.10	3.42	3.24	5.64

分析其可能造成误差的原因如下：(1) 丙酮试剂去除受力区域内光纤的涂覆层时对光纤造成损伤，影响本征双折射大小；(2) 系统噪声和处理算法影响；(3) 载玻片与砝码位置、载玻片与光纤接触长度的不确定性，影响受力准确性。同时实验结果说明将 PSG、PSA 融入到 OFDR 中，系统可准确测量光纤沿线的双折射分布。

经上述的实验验证，基于偏振分析的 OFDR 系统能够实现光纤双折射的准确高分辨率测量。相比基于光时域反射技术 (Optical Time-Domain Reflectometer, OTDR) 技术的横向应力传感其分辨率可提高 3 个数量级，相较于基于 P-OFDR 技术横向应力传感可直接表征横向应力大小。而在一些实际应用中想要利用单模光纤实现横向应力的直接测量是非常困难的，通常需要特殊的结构或方法来转换横向应力，例如使用波纹管结构实现应变与应力的转换，这使得传感系统复杂且影响精度。因此很难获得复合材料形变引起横向应力诱导双折射的理论支撑，但可以利用偏振分析 OFDR 测量系统的优势，在获得形变横向应力诱导双折射的基础上，反向表征复合材料形变横向应力的甚至是准确测量。接下来详细讨论如何通过双折射的测量来表征形变横向应力。

考虑到复合材料在固化、使用过程中可能会因内部应力出现分层损伤、内微裂纹等现象，且

内部应力难以直接测量。本文为了验证双折射表征复合材料形变横向应力的能力，实验中将 SMF 嵌入到 GFRP 内，利用 GFRP 形变过程中产生的应力施加于内部 SMF，测量内部 SMF 的双折射分布情况。实验中的 GFRP 是利用双层玻璃纤维预浸布 (斜纹编织、一平米纤维质量为 220g、厚度为 0.15mm、环氧树脂含量为 40g) 经高温 120℃ 持续 60min 固化制作而成。内部光纤的铺设方式如图 5 所示。

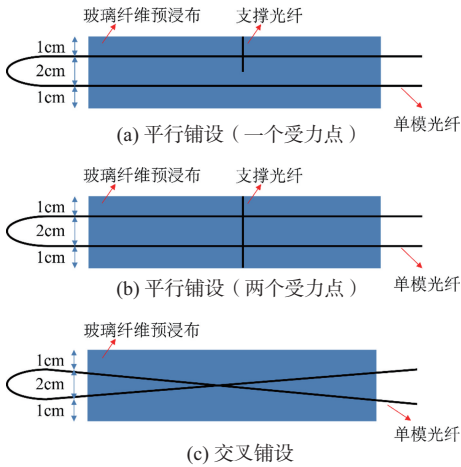


图 5 内部光纤的铺设方式示意图

图 5 (a)、(b) 中 SMF 平行往返铺设在宽为 4cm 的双层玻璃纤维预浸布之间，其中用相同光纤做支撑人为分别引入一个、两个受力点；图 5 (c) 中 SMF 交叉铺设于双层玻璃纤维预浸布之间，中心位置处引入一个受力点。固化完成的 GFRP 长度为 40cm，不同光纤铺设方式的 GFRP 分别制作 5 块。

系统测量 GFRP 中内嵌 SMF 双折射的实验系统如图 6 所示，将固化完全且在实验室超净间恒温环境中放置足够时间的内嵌 SMF 的 GFRP 尾纤熔接跳线连接双折射测量系统。为了保证不同 GFRP 板的形变相同，将 GFRP 板放入特殊制作的亚克力模具 (Acrylic mold) 中，模具具有 1~15cm 半径的凹槽 (间隔为 1cm)，如图 7 (a)；GFRP 板中心位置与模具凹槽顶点接触，其他部分与模具凹槽下表面接触，如图 7 (c)。为保证 GFRP 板形变产生最大应力，同时排除 SMF 弯曲诱导产生的双折射影响，值得注意的是该双折射是弯曲光纤本身具有的特性，并非本文讨论的光纤置于 GFRP 中，弯曲形变引入的横向应力诱导双折射。根据弯曲诱导双折射理论^[20]，双折射大小与光纤弯曲半径的平方呈反比，经计算 SMF 弯曲 6cm 时产生的双折射为 1.48×10^{-7} ，已然小于光纤本征双折射 2.5×10^{-7} ，故选择将 GFRP 板置于半径为 6cm 的模具凹槽中进行弯曲形变引起横向应力诱导双折射的测量。

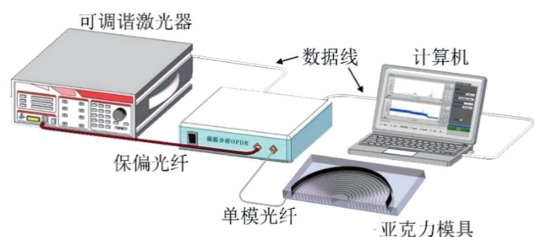


图6 系统测量GFRP中内嵌SMF双折射的实验系统

实验中系统设置保持不变,分别将平行(图7(b),实验完成后破坏一部分玻璃纤维预浸布以展示内部光纤铺设情况)、交叉铺设光纤的GFRP板放入6cm凹槽中进行弯曲形变,测量SMF双折射。

图8分别显示了平行铺设、交叉铺设光纤的GFRP板在未进行弯曲、放入弯曲半径6cm凹槽时,系统测量的SMF受应力引起的双折射变化分布。GFRP板未弯曲时,由于内部SMF引入了受

力点,其在固化过程中释放的应力作用于SMF,引起了双折射的局部增大。GFRP板放入半径6cm凹槽时,其在形变过程中产生内部应力作用于SMF,引起了双折射的局部增大。每个GFRP板在是否形变的情况下分别进行了5次重复实验,以保证双折射测量的准确性。

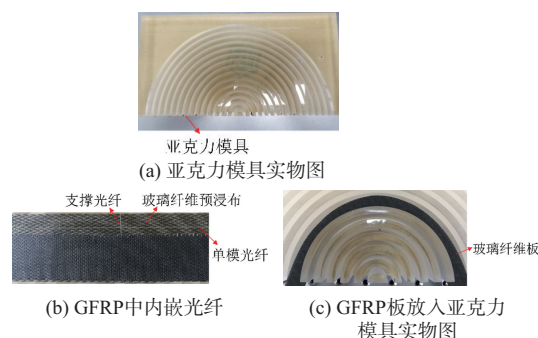


图7 实验模具及GFRP板

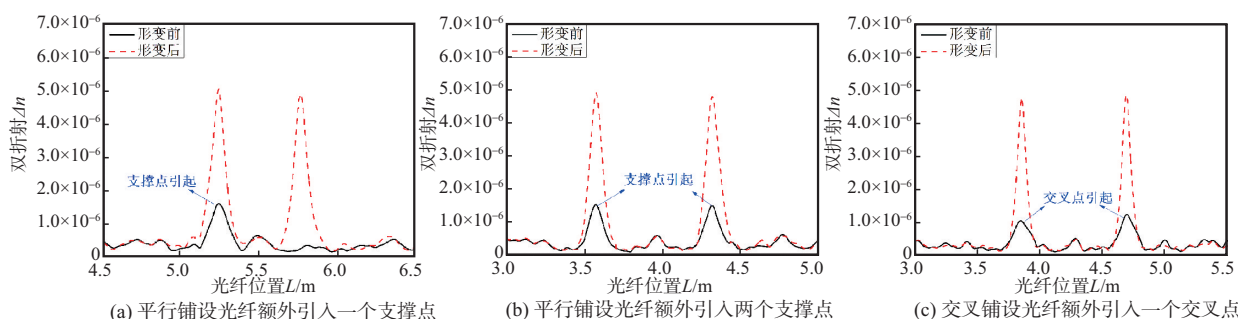


图8 GFRP板在形变前后的双折射分布

通过对多个GFRP板形变前的双折射峰值提取分析,其GFRP板固化过程中释放的应力直接作用于铺设的光纤(非引入受力点)时,上下两层预浸布对光纤的合力为零,不会引起双折射的变化;当作用于额外引入的受力点或交叉点时,此时光纤受应力作用引起双折射变化。GFRP板在进行半径6cm的形变后,其内部产生的横向应力作用到SMF时,引起的双折射平均值为 4.91×10^{-6} ,变化范围为 $4.78 \times 10^{-6} \sim 5.09 \times 10^{-6}$,该波动可能是制作GFRP板的重复一致性不足导致,而且从多组实验中可以看出形变过程中受力点、交叉点对双折射测量产生额外的影响较小,可排除制作工艺缺陷对双折射测量的影响。实验验证了双折射表征横向应力的能力,同时也为检测GFRP其固化过程应力释放大小、受力形变程度监测提供了新方法。

3 结论

本文基于偏振态分析技术和OFDR技术的双折射测量系统,结合二元PSG、PSA的双折射解析原理和压力诱导双折射理论,首先利用砝码和载玻片在SMF上设置三个受力区域,测量其双折

射大小,与理论值平均误差为6.20%,验证了该系统测量双折射的准确性。另外通过将SMF嵌入到GFRP内,利用GFRP在固化、形变过程中产生的应力施加于内部SMF和引入的额外受力点,测量内部SMF的受应力引起双折射分布情况,揭示了6cm弯曲半径情况下GFRP材料自身制作缺陷对测量的影响可忽略不计,验证了双折射表征横向应力的能力。同时为检测GFRP其固化过程应力释放大小、受力形变程度提供了新思路方法。

致谢: 本文的工作内容得到姚晓天教授和河北大学信息技术创新中心的帮助,特此感谢!

参考文献:

- [1] Yu Z J, Yang J, Lin C F, et al. Distributed polarization measurement for fiber sensing coils: a review[J]. Journal of Light-wave Technology, 2021, 39(12):3699—3710.
- [2] Costa L, Magalhães R, Palmieri L, et al. Fast and direct measurement of the linear birefringence profile in standard single-mode optical fibers[J]. Optics Letters, 2020, 45(3):623-626.
- [3] 邵帆, 孙春然, 王目光, 等. 基于光电振荡器和高双折射光纤的应变测量[J]. 光通信技术, 2022, 46(3):43—46. Bing Fan, Sun Chunran, Wang Guangdian, et al. Strain measurement based on photoelectric oscillator and high birefringence optical fiber[J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(3):43—46.
- [4] Zhang H X, Wang Y Y, Wen G Q, et al. Frequency measure-

- ment of dynamic stress in polarization maintaining fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3):1—11.
- [5] 付彩玲, 彭振威, 李朋飞, 等. OFDR分布式光纤温度/应变/形状传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11):1106007. Fu Cailing, Peng Zhenwei, Li Pengfei, et al. Research progress of OFDR distributed fiber temperature/strain/shape sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11):1106007.
- [6] Chen Z, Wang C, Ding Z, et al. Demonstration of large curvature radius shape sensing using optical frequency domain reflectometry in multi-core fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4):1—9.
- [7] 刘柯, 周雪芳, 周豫. 一种基于光子晶体光纤的高灵敏度温度传感器[J]. 杭州电子科技大学学报, 2020, 040(002):40—44. Liu Ke, Zhou Xuefang, Zhou Yu. A highly sensitive temperature sensor based on photonic crystal Fiber[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2020, 040(002):40—44.
- [8] 李芳, 冯亭, 郭纪琛, 等. 基于分布式偏振分析的侧抛磨光纤液压传感[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(21):2106006. Li Fang, Feng Ting, Guo Jichen, et al. Side-polished Fiber-based hydraulic sensing with distributed polarization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(21):2106006.
- [9] 毕付, 张东亮, 鹿利单, 等. 基于全保偏光纤的反射式双折射干涉温度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(08):120—128. Bi Fu, Zhang Dongliang, Lu Lidan, et al. Reflective birefringence interference temperature sensor based on full polarization-maintaining optical Fiber[J]. Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(08):120—128.
- [10] 赵丽娟, 吴雨静, 徐志钊, 等. 一种基于光子晶体光纤的高灵敏度 Sagnac 型温度传感器建模研究[J]. 光子学报, 2023, 52(02):119—131. Zhao Lijuan, Wu Yujing, Xu Zhiniu, et al. Modeling research of a High-sensitivity sagnac type temperature sensor based on photonic crystal fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(02):119—131.
- [11] 廖振鑫, 刘理, 毛莉莉, 等. 高双折射光子晶体光纤的设计与传感特性分析[J]. 光学技术, 2024, 50(04):448—452. Liao Zhenxin, Liu Li, Mao Lili, et al. Design and sensing characteristics analysis of high birefringence photonic crystal fiber[J]. Optical Technology, 2024, 50(04):448—452.
- [12] 何伟, 王昌, 李捷, 等. 长周期光纤光栅横向压力传感特性的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(8):4. He Wei, Wang Chang, Li Jie, et al. Research on the lateral pressure sensing characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(8):4.
- [13] 陈纯. 高双折射光子晶体光纤特性及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. Chen Chun. Research on the characteristics and applications of high birefringence photonic crystal fibers[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [14] 马小翠, 钱诗婷, 柳淘, 等. 双芯光子晶体光纤横向压力特性分析[J]. 光通信技术, 2020, 44(08):18—21. Ma Xiaocui, Qian Shiting, Liu Tao, et al. Analysis of lateral pressure characteristics of dual-core photonic crystal fibers[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(08):18—21.
- [15] Zhang Z, Feng T, Li Z, et al. Experimental study of transversal-stress-induced polarization crosstalk behaviors in polarization maintaining fibers[C]//Advanced Sensor Systems and Applications IX. SPIE, 2019, 11191:112—118.
- [16] Costa L, Magalhaes R, Palmieri L, et al. Fast and direct measurement of the linear birefringence profile in standard single-mode optical fibers[J]. Optics Letters, 2020, 45(3):623—626.
- [17] Soto M A, Lu X, Martins H F, et al. Distributed phase birefringence measurements based on polarization correlation in phase-sensitive optical time-domain reflectometers[J]. Optics Express, 2015, 23(19):24923—24936.
- [18] 齐青云, 徐航, 白清, 等. 基于互相关谱滑动平均的 OFDR 应变传感精度提升研究[J]. 光学技术, 2025, 51(01):94—100. Qi Qingyun, Xu Hang, Bai Qing, et al. Research on improvement of OFDR strain sensing accuracy based on cross correlation spectrum moving average[J]. Optical Technology, 2025, 51(01):94—100.
- [19] Ding Z, Wang C, Liu K, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: a review[J]. Sensors, 2018, 18(4):1072.
- [20] Ding Z, Sun K, Liu K, et al. Distributed refractive index sensing based on tapered fibers in optical frequency domain reflectometry[J]. Optics Express, 2018, 26(10):13042—13054.
- [21] Feng T, Shang Y, Wang X, et al. Distributed polarization analysis with binary polarization rotators for the accurate measurement of distance-resolved birefringence along a single-mode fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(20):25989—26002.
- [22] Ding Z, Yao X S, Liu T, et al. Long measurement range OFDR beyond laser coherence length[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 25(2):202—205.
- [23] Smith A M. Polarization and magneto-optic properties of single-mode optical fiber[J]. Applied Optics, 1978, 17(1):52—56.
- [24] Rogers A J. Polarization in optical fibers[M]. Artech House, 2008.
- [25] Kapron F, Borrelli N, Keck D. Birefringence in dielectric optical waveguides[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, 8(2):222—225.
- [26] Yao P, Chen X, Hao P, et al. Introduction and measurement of the effective Verdet constant of spun optical fibers[J]. Optics Express, 2021, 29(15):23315—23330.
- [27] Xu Z X, Yao X S, Ding Z Y, et al. Accurate measurements of circular and residual linear birefringences of spun fibers using binary polarization rotators[J]. Opt. Express, 2017, 25(24):30780—30792.
- [28] Yao X S, Chen X, Liu T. High accuracy polarization measurements using binary polarization rotators[J]. Optics Express, 2010, 18(7):6667—6685.
- [29] Yao X S, Chen X, Yan L. Self-calibrating binary polarization analyzer[J]. Optics Letters, 2006, 31(13):1948—1950.
- [30] 姚鹏辉. 保圆光纤双折射特性及偏振型光纤电流传感器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2022. Yao Penghui. Research on birefringence characteristics of circular fiber and polarization type fiber current sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [31] Feng T, Zhou J N, Shang Y L, et al. Distributed transverse-force sensing along a single-mode fiber using polarization-analyzing OFDR[J]. Optics Express, 2020, 28(21):31253—31271.
- [32] 周俊楠. PA-OFDR 分布式光纤横向压力与应变传感及复合材料弯曲检测应用探索[D]. 保定: 河北大学, 2021. Zhou Junnan. Distributed transverse-stress and strain fiber optic sensing and application exploration of composite material bending measurement using PA-OFDR[D]. Baoding Hebei University, 2021.
- [33] Marcuse D. Theory of dielectric optical waveguides[M]. Baoding: Elsevier, 2013.
- [34] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]//Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000:195—2111.