

结构调制型长周期光纤光栅温度传感器研究



李媛媛¹, 田甜¹, 陈文焕¹, 马一巍¹, 赵磊², 耿涛¹

1. 哈尔滨工程大学 纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要: 燃油系统的温度监测对于飞行器的安全、性能和可靠性至关重要。本文提出并测试了一种基于激光蚀刻法在保偏光纤上制备的长周期光纤光栅温度传感器, 有望用于飞机内部液体温度监测。通过解调该种光纤光栅谐振峰的波长变化, 可以实现对环境温度的精准测量。试验结果表明, 该传感器具有 $83.1 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度和 $0.32 \text{ pm}/\mu\text{e}$ 的低应变响应。由于光纤具有耐腐蚀、抗电磁干扰, 不易产生电火花等特性, 在替代电学传感器使用时可以提升飞行器的安全性。

关键词: 光纤传感; 温度监测; 保偏光纤; 长周期光纤光栅

中图分类号: V219

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.04.009

飞行器燃油系统的温度监测非常重要^[1]。由于液体在不同温度下会发生物理性质的变化, 容易影响飞行安全。如燃料储存温度会直接影响燃料的流动性、燃烧效率以及燃烧产物的生成。过高或过低的燃料温度可能会导致燃烧不完全、发动机工作不稳定甚至故障^[2]。同时飞行器在高空条件下, 如水等液体长期在低温度下会结冰, 从而导致管道系统的变形和漏损。因此, 对飞行器内部储存的液体温度进行有效监测, 可以帮助维护人员及时发现异常情况, 采取相应的维修和保养措施, 从而延长设备寿命, 确保飞行安全。相比于传统的电学温度传感器, 光纤传感器抗电磁干扰性强, 可以在电磁环境复杂的航空器内部稳定工作^[3]。其体积小的优点适用于航空器内部有限的空间和重量要求。同时光纤传感器可以耐受液体中的化学腐蚀, 适用于存储不同类型液体的环境。此外, 光纤传感器的精度相对较高, 能实时监测被测温度的变化情况。因此, 光纤传感器作为一种可行方案, 近年来被相继提出^[4-6]。但是在光纤传感器的应用过程中, 还存在一些典型问题, 如大部分光纤传感通过波长的移动解调外界环境变化, 传感器在进行温度测量的同时, 自身还会受到其他力学参数影响, 这种干扰很难消除, 使得这些传感器在高振动环境下应用受限。

本文针对航空器内部液体温度监测的需求, 提出了一种基于激光蚀刻法在保偏光纤上制备的长周期光纤光栅传感器。保偏光纤广泛应用于航天、航空、航海、工业制造技术及通信等国民经济的各个领域。典型的保偏光纤为熊猫型保偏光纤, 其结构特点为光纤纤芯两侧存在两个对称的应力柱。由于应力柱对纤芯会产生拉应力, 导致光纤中产生双折射现象, 从而可以保持光纤内部传输光的线偏振方向。由于其预制棒尺寸大, 适合大批量生产, 成本相对较低, 所以本文中采用的保偏光纤均为熊猫型。在此基础上, 利用 CO_2 激光器在保偏光纤的单侧应力柱进行周期性的刻蚀, 制备了一种保偏光纤长周期光纤光栅 (PM-LPFG), 由于光栅传感单元的特殊结构, 使得光弹效应和光栅周期长度带来的应变影响被抵消, 导致该传感器对应变物理参数相对不敏感。

1 光纤光栅型温度传感器

在光纤光栅型温度传感器的发展过程中, 基于布拉格光纤光栅 (FBG) 的光纤温度传感器是最早被提出的传感器, 也是目前发展最为成熟的光纤光栅传感器。受限于光纤材料的热光系数和热膨胀系数, FBG 温度传感器的温度灵敏度一般较低。为此, 研究人员通过改变制备 FBG 的光

收稿日期: 2023-08-12; 退修日期: 2023-12-28; 录用日期: 2024-01-30

基金项目: 航空科学基金 (201608P6003)

引用格式: Li Yuanyuan, Tian Tian, Chen Wenhuan, et al. Study on structurally modulated long-period fiber grating temperature sensor[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(04): 67-73. 李媛媛, 田甜, 陈文焕, 等. 结构调制型长周期光纤光栅温度传感器研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(04): 67-73.

纤材料来改善其温度灵敏度。Secongmin等^[7]基于 $\text{PbO-GeO}_2\text{-SiO}_2$ 玻璃光纤研制并演示了高灵敏度FBG温度传感器。由于 $\text{PbO-GeO}_2\text{-SiO}_2$ 玻璃光纤的热膨胀率比普通 SiO_2 提高了40%左右,该传感器的温度灵敏度达到 $0.0173\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。此外,对FBG光纤传感器的测量范围的扩展也是研究的重点。Hsiao等^[8]研究了金属涂层FBG作为高温传感器的性能,在极端温度环境下评估了氮化铬(CrN)涂层FBG传感器的性能,并与裸FBG的性能进行了比较。在 $100\sim 650^\circ\text{C}$ 的温度范围内, CrN 涂层FBG传感器的温度灵敏度达到了 $14.0\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。基于长周期光纤光栅(LPFG)的光纤温度传感器发展比FBG稍晚,目前实际应用的案例还比较少,但是LPFG在制作方法上更加多样,同时温度灵敏度较FBG更高。Jiang Chen等^[9]演示了在保偏光纤中使用 CO_2 激光器制作的螺旋长周期光栅,该传感器的温度灵敏度达到了 $158.8\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。Chen Maoqing等^[10]提出一种采用级联干涉仪实现的低成本全光纤应变温度传感器,温度灵敏度达到了 $135.19\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。Wang Qi等^[11]提出了一种基于具有聚二甲硅氧烷(PDMS)涂层的LPFG温度传感器,依靠PDMS的高热光系数,该传感器在 $20\sim 80^\circ\text{C}$ 范围内具有 $255.4\text{pm}/^\circ\text{C}$ 的高温灵敏度,测量分辨率高达 0.078°C 。但是这些传感器都没有给出自身的应变响应,很难计算出由应变参量引起的温度串扰。多参量同时测量是解决这一问题有效方法之一,目前已经有许多用于多参量测量的光纤传感器被提出。但是多参量同时测量传感器的解调会更复杂。

2 保偏光纤长周期光纤光栅温度传感器的制备

光在理想的单模光纤中传输时其偏振态不会发生变化,但是单模光纤在制造的过程中,不可避免地存在结构的不对称性,因此光纤中会存在残余应力。残余应力和外部应力会使单模光纤产生双折射效应,从而导致偏振光在传输过程中相互耦合,发生偏振色散现象。所以普通单模光纤传输的偏振光无法保持原有的偏振模式。保偏光纤由于具有双侧应力柱结构,可以保持其内部的传输光线偏振方向,因此能够减少光信号传输过程中各种物理参量变化对信号的影响。保偏光纤长周期光纤光栅的结构示意图如图1所示,PM-LPFG结构的周期长度为 A 。该结构是通过在保偏光纤上用 CO_2 激光器刻蚀多个长为 L 、深度达到 $50\mu\text{m}$ 的凹槽制备。刻蚀位置的保偏光纤应力柱已经被激光完全熔化,应力柱的缺失导致纤芯的折射率发生周期性变化。

图2为实验中使用的基于 CO_2 激光器的光纤传感器制

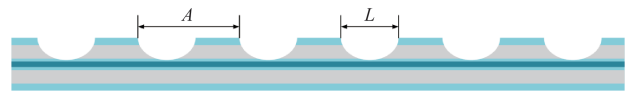


图1 PM-LPFG的基本结构

Fig.1 The scheme of PM-LPFG

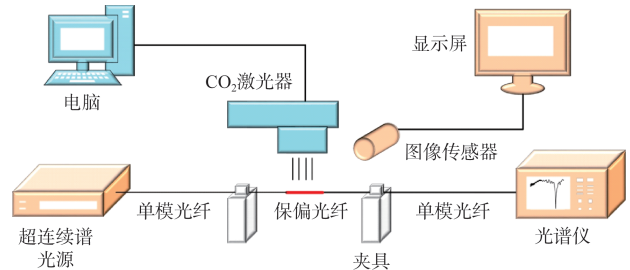


图2 基于 CO_2 激光器的光纤传感器制备系统

Fig.2 Optical fiber sensor preparation system based on CO_2 laser

备系统,该系统主要由两个部分组成。第一部分为 CO_2 激光器,该激光器发出激光脉冲的发射路径与输出功率、频率等参数都可以通过配套电脑中的软件控制,因此可以在光纤上进行精确刻蚀。第二部分为实时监测系统,主要包括用于监测光纤刻蚀情况的侧面观察系统和用于监测光纤结构光谱的光谱监测系统。侧面观察系统由电荷耦合器件(CCD)和显示屏组成,用来观察激光刻蚀过程中光纤的形态变化。光谱监测系统包括超连续谱光源和光谱仪,光源用来提供入射光,光谱仪则用于监测刻蚀过程中结构的光谱以便于实时调整激光器的输出参数。

PM-LPFG的制备过程非常简单,主要分两步进行:(1)通过光纤熔接机将一段长为 1cm 的保偏光纤与两根单模光纤熔接,然后将该SMF-PMF-SMF结构放置于相衬显微镜下观察,确定好保偏光纤应力柱的位置,并用标签纸标记。(2)将标记好的结构放置在图2所示的光纤传感器制备系统中,将应力柱朝上正对激光器,通过电脑程序控制激光器对应力柱刻蚀。刻蚀时激光器的输出功率设为 10W ,按照程序设计好的扫描轨迹重复扫描8遍。根据程序设计在保偏光纤上刻蚀出了20个宽度为 $300\mu\text{m}$ 、深度为 $50\mu\text{m}$ 的凹槽,两个凹槽的间隔为 $150\mu\text{m}$,如图3所示。因此所制备的PM-LPFG的周期 A 为 $450\mu\text{m}$,周期数 $N=20$ 。通过上述过程制备的PM-LPFG的透射光谱如图4所示。

3 保偏光纤长周期光纤光栅的原理分析

利用 CO_2 激光器对光纤进行刻蚀时,激光脉冲会导致二氧化硅的气化和熔融。这一过程中会产生热效应,并释放光纤中的残余应力,从而导致光纤折射率的变化。因此,

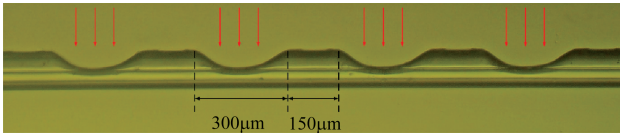


图3 PM-LPFG的相称图

Fig.3 The proportional diagram of PM-LPFG

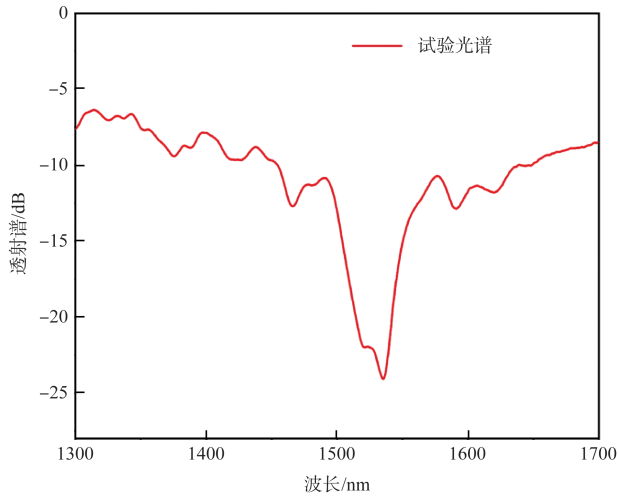


图4 PM-LPFG的透射光谱

Fig.4 Transmission spectrum of PM-LPFG

对光纤进行周期性的刻蚀会使得光纤产生周期性的折射率调制。周期性的折射率调制会导致同向传输的纤芯基模与包层模发生耦合,从而形成LPFG,这是大部分LPFG的形成机理。PM-LPFG的形成机理也是周期性的折射率调制,只是导致周期性折射率调制的产生原理稍有差异。在保偏光纤中,纤芯两侧具有对称的掺硼应力柱,这两根应力柱会对保偏光纤的纤芯和包层施加应力。PM-LPFG通过周期性地刻蚀保偏光纤的应力柱制备而成,从图1中可以看到刻蚀位置保偏光纤的应力柱已经被激光脉冲熔化,在刻蚀的位置只有一侧的应力柱对保偏光纤施加应力。刻蚀区与非刻蚀区的纤芯会受到不同的应力,从而具有不同的折射率。因此对PM-LPFG而言,除了CO₂激光脉冲导致的周期性折射率调制以外,周期性的应力柱缺失也会导致周期性的折射率调制。

由于PM-LPFG的形成机理与普通的LPFG相同,PM-LPFG的谐振波长依旧满足相位匹配条件。此外,保偏光纤中的快轴和慢轴具有不同的纤芯和包层折射率,因此PM-LPFG的透射谱中会存在两个相邻的谐振峰。但是由于LPFG的3dB带宽较大,且两个谐振峰较为接近,在透射谱中可以看到两个谐振峰几乎融合为一个峰。利用一个偏振

控制器,分别射入偏振方向与慢轴平行和与快轴平行的偏振光,获得PM-LPFG的快轴透射谱和慢轴透射谱,如图5所示。

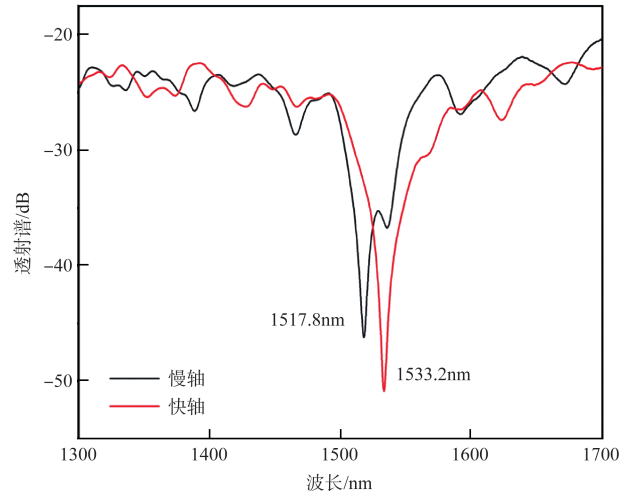


图5 PM-LPFG的慢轴透射谱和快轴透射谱

Fig.5 The transmission spectrum of slow axis and fast axis of PM-LPFG

慢轴透射谱和快轴透射谱对应的谐振波长分别为1517.8nm和1533.2nm,它们分别由慢轴和快轴方向上的芯模和包层模耦合形成,均满足相位匹配条件

$$\begin{aligned}\lambda_x &= (n_{\text{eff},x}^{\text{core}} - n_{\text{eff},x}^{\text{clad}}) \cdot \Lambda \\ \lambda_y &= (n_{\text{eff},y}^{\text{core}} - n_{\text{eff},y}^{\text{clad}}) \cdot \Lambda\end{aligned}\quad (1)$$

式中, λ_x 和 λ_y 分别为PM-LPFG慢轴透射谱和快轴透射谱的谐振波长; $n_{\text{eff},x}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff},y}^{\text{core}}$ 分别为慢轴方向和快轴方向上纤芯基模的有效折射率; $n_{\text{eff},x}^{\text{clad}}$ 和 $n_{\text{eff},y}^{\text{clad}}$ 分别为慢轴方向和快轴方向上包层模的有效折射率; Λ 为PM-LPFG的周期长度。由于周期相同,两个谐振波长的差异来自芯模和包层模有效折射率差的不同,这表明刻蚀之后的保偏光纤仍然具有较好的偏振保持特性。

4 保偏光纤长周期光纤光栅传感特性研究

4.1 温度传感特性分析

PM-LPFG的温度传感特性的试验测量装置如图6所示。在测量过程中,PM-LPFG被放置在温度控制台上,并用光纤夹具固定。输入光纤依次与偏振控制器(PC)和超连续谱光源(SC)连接,SC能提供1000~1700nm的光,PC可以控制输入光的偏振态。输出光纤与光谱仪(OSA)连接,OSA用于监测记录随温度变化的光谱。

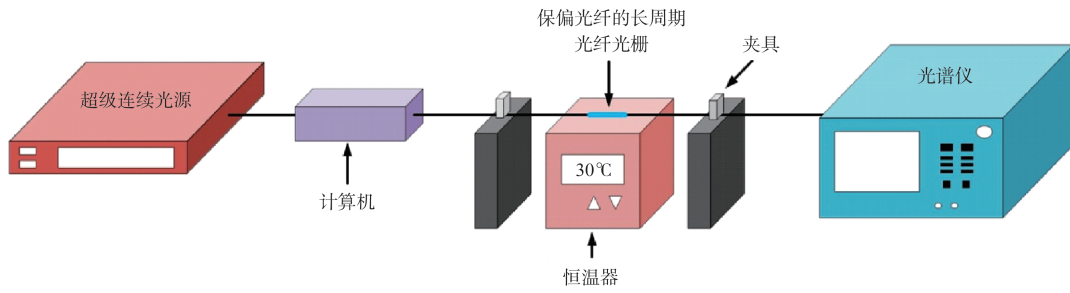


图6 温度测量的试验装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of experimental setup for temperature measurement

试验开始后,首先将温度控制台的温度设为30℃,等温度稳定后,用OSA记录下光谱数据并保存,然后将温度控制台的温度设置为40℃,等温度控制台的温度升高到40℃并稳定后,再次记录下光谱数据。重复上述操作,每隔10℃记录一次PM-LPFG的光谱,最终获得30~100℃的光谱变化。最后,将OSA中储存的光谱数据依次导出并利用数据处理软件进行处理分析。在本次试验中,通过调节PC依次对PM-LPFG的慢轴透射谱和快轴透射谱进行了温度测量。

如图7所示,随着温度的升高,PM-LPFG的快轴和慢轴透射谱的谐振波长都向长波移动,但是快轴透射谱的移动更明显。根据温度与波长变化之间的对应关系,通过线性拟合关系计算出PM-LPFG快慢轴谱线的温度灵敏度,如图8所示,PM-LPFG的慢轴透射光谱的温度灵敏度为60.7pm/℃,快轴透射光谱的温度灵敏度为83.1pm/℃,线性度为0.99。试验结果表明PM-LPFG的快轴透射谱具有更

高的温度灵敏度,而且高于大部分LPFG传感器的温度灵敏度。

LPFG的温度灵敏度表达式可表示为^[12]

$$\frac{d\lambda}{dT} = \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{core}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{clad}}}{dT} \right) \Lambda + (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}) \frac{d\Lambda}{dT} \quad (2)$$

式(2)中右侧第一项表示光纤热光效应导致的纤芯和包层有效折射率变化对温度灵敏度的影响,第二项是热膨胀效应导致的光栅周期长度改变对温度灵敏度的影响。由于光纤材质主要为二氧化硅,它的热膨胀系数远低于热光系数。因此,热光效应是影响温度灵敏度的主要因素,热膨胀效应的影响可以忽略不计。对于PM-LPFG而言,当温度升高时,基于弹光效应的作用,保偏光纤的应力柱在径向上发生膨胀,应力柱对光纤纤芯施加径向上的挤压,进一步增大纤芯的折射率变化率,纤芯和包层的折射率变化率差增大,从而获得了更高的温度敏感性。由于PM-LPFG的快轴透射谱具有更高的温度灵敏度,接下来的试验将主要研究其快轴透射谱的传感特性。

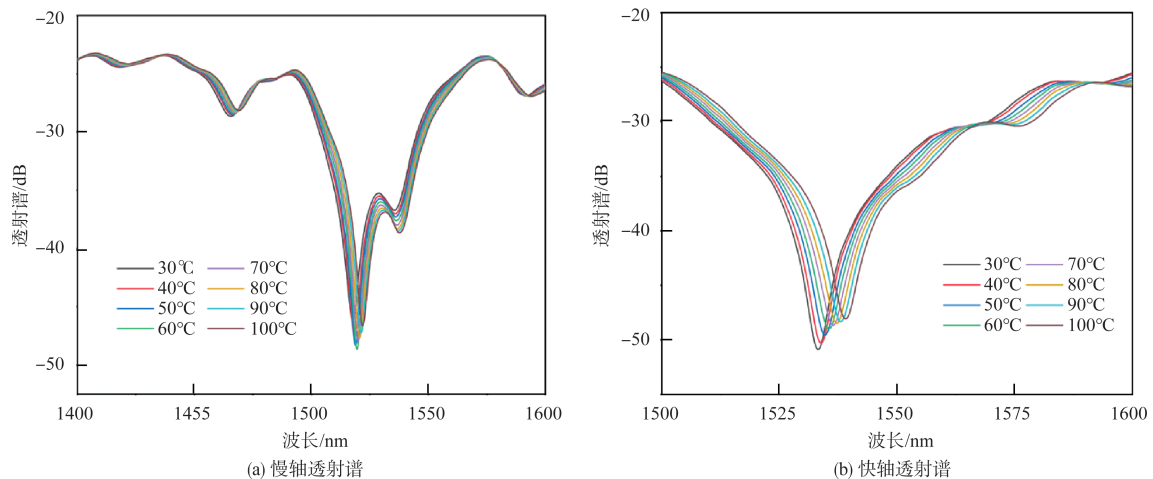


图7 PM-LPFG的温度响应

Fig.7 Temperature response of PM-LPFG

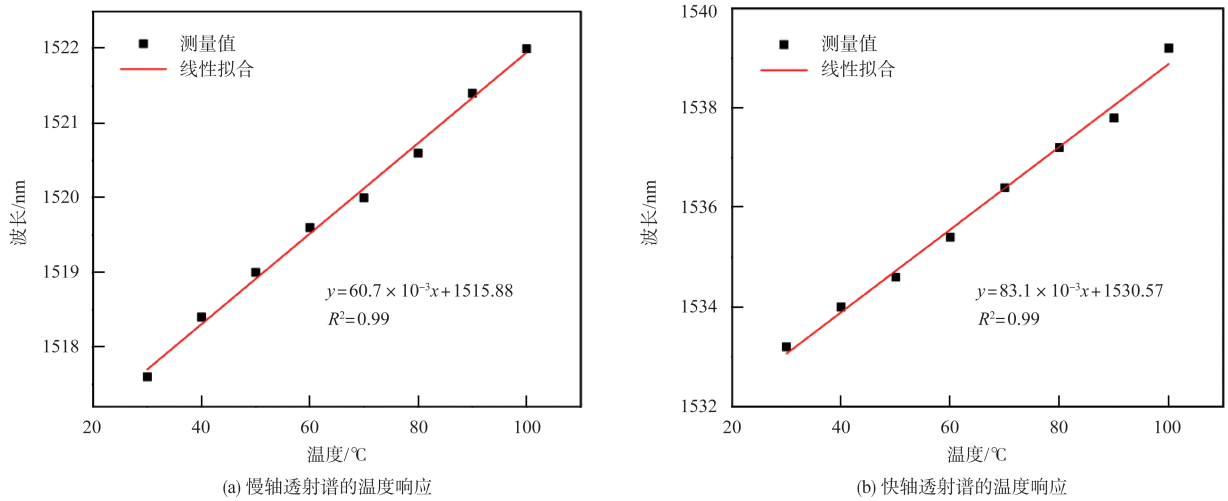


图8 PM-LPFG的谐振波长对温度变化的线性拟合

Fig.8 Linear fitting of resonant wavelength of PM-LPFG to temperature variation

4.2 应变传感特性分析

用图9所示的装置进行自动化应变测量。测量步骤如下:
(1)将传感结构用光纤夹具固定在两端,并施加一个初始的应变,使光纤保持直线状态,记录下此时的光谱作为应变为0时的初始光谱。(2)用尺子测量出两个夹具之间的距离,长度=28.65cm。然后将步进电机的步长设置为160,对应于应变位移平台的0.05mm。即应变位移平台每移动一次,光纤受到的轴向应变约为174.5 $\mu\epsilon$ 。(3)记录下每次PM-LPFG受到轴向应变后的传输光谱变化,直到光纤所受应变为1745.2 $\mu\epsilon$ 为止。在不同应变环境下PM-LPFG光谱变化如图10所示。

如图10可知,随着轴向应变的不断增大,光栅传输光谱的谐振波长几乎没有任何漂移,但是谐振峰的衬比度在逐渐减小,而在长波方向逐渐出现一个新的谐振峰,且衬比度逐渐增大,但是这个新的谐振峰衬比度不会对测量产生影响。PM-LPFG快轴透射谱对应变变化的线性拟合如图11所示。

由图11可知,PM-LPFG的应变灵敏度为0.32pm/ $\mu\epsilon$ 。LPFG的谐振波长对应变的响应可以表示为^[13]

$$\frac{d\lambda}{d\epsilon} = \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{core}}}{d\epsilon} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{clad}}}{d\epsilon} \right) \Lambda + (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}) \frac{d\Lambda}{d\epsilon} \quad (3)$$

式(3)中右边第一项表示光弹效应对应变灵敏度的作用,第二项表明轴向应力作用下,光栅周期长度变化对应变灵敏度的影响。轴向应力导致光栅周期长度的变化对灵敏度的贡献很小,一般可以忽略。由于PM-LPFG其中一侧的应力柱受到激光雕刻出现缺口并破坏了原本圆对称结构,当施加轴向应力时,如图12轴向受力结果仿真云图12可知,大部分受力区域分布在缺口附近,这导致包层折射率变化率大于纤芯折射率变化率,所以式(3)中右边第一项为负值。而当轴向拉伸时光栅周期随着拉伸强度的增加而增大,所以式(3)中右边第二项为正值。因此光弹效应和光栅周期长度带来的应变响应的影响被相互抵消,对于PM-LPFG来说表现出了低应变敏感特性。

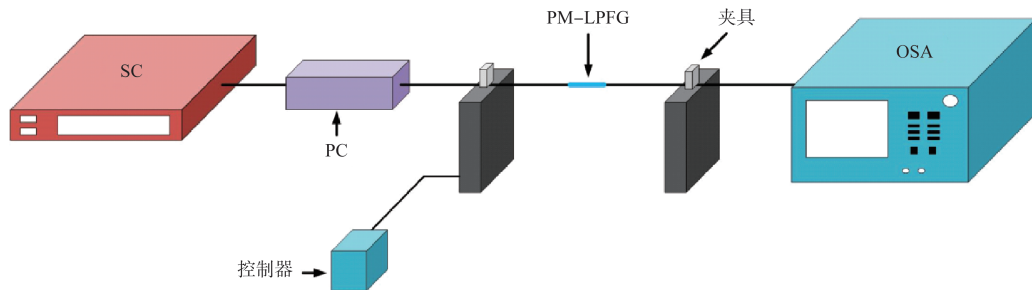


图9 应变测量试验装置

Fig.9 Experimental setup for strain measurement

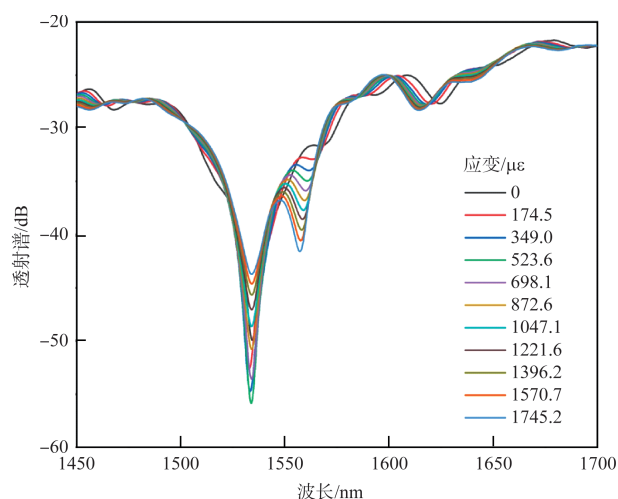


图10 PM-LPFG应变光谱变化情况图

Fig.10 Strain spectrum response of PM-LPFG

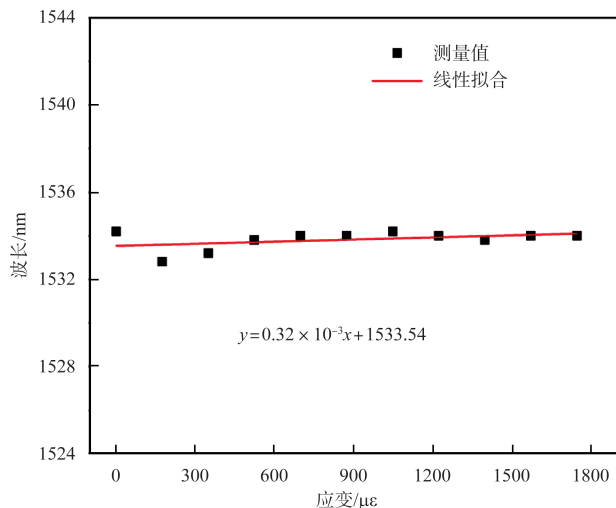


图11 PM-LPFG快轴透射谱对应变化的线性拟合

Fig.11 Linear fitting of PM-LPFG fast axis transmission spectrum to strain variation

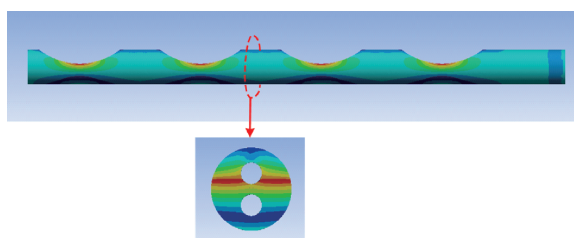


图12 PM-LPFG施加轴向应力后的受力分析

Fig.12 Force analysis of PM-LPFG after axial stress is applied

5 结束语

本文提出了一种基于激光器刻蚀法制备的PM-LPFG温度传感器,并对其传感性能进行了理论分析和试验测量。

试验结果表明,该传感器的温度灵敏度为83.1 pm/°C,应变灵敏度为0.32pm/με。由于PM-LPFG具有低应变响应的特性,有望用于飞行器内部各类液体的温度监测,同时该光纤传感器具有安装简单、安装范围小、抗电磁干扰等优点。

AST

参考文献

- [1] 王瑞卿,李栋,李运华,等.飞机燃油系统全飞行剖面热边界模拟与温度预测[J].北京航空航天大学学报,2022,48(3):369-375.
Wang Ruiqing, Li Dong, Li Yunhua, et al. Thermal boundary simulation and temperature predication for aircraft fuel system with full flight profile [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2022,48(3): 369-375. (in Chinese)
- [2] 刘铁根,王双,江俊峰,等.航空航天光纤传感技术研究进展[J].仪器仪表学报,2014,35(8):1681-1692.
Liu Tiegeng, Wang Shuang, Jiang Junfeng, et al. Research progress of optical fiber sensing technology for aerospace[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1681-1692. (in Chinese)
- [3] 韩放,廖韬,苏新明,等.用于航天环境的布拉格光栅温度传感器灵敏度与精度研究[J].计算机测量与控制,2019,27(10):289-293.
Han Fang, Liao Tao, Su Xinming, et al. Research on Sensitivity and accuracy of Bragg Grating temperature sensor used in aerospace environment[J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27(10): 289-293. (in Chinese)
- [4] Liu Qingmin, Hou Shanglin, Dong Jie, et al. D-shaped microstructure fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 62(9): 096002.
- [5] 高晓丹,刘岚,姚敏,等.薄膜干涉型光纤温度传感器的偏振特性[J].传感器与微系统,2023,42(10):13-16.
Gao Xiaodan, Liu Lan, Yao Min, et al. Polarization characteristics of thin-film interference optical fiber temperature sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(10): 13-16. (in Chinese)
- [6] 许童杰,刘振华,蒋秀丽,等.不锈钢管封装短周期光纤光栅温度传感器特性及仿真分析[J].微纳电子技术,2023,60(9):1-7.
Xu Tongjie, Liu Zhenhua, Jiang Xiuli, et al. Characteristics and

- simulation analysis of stain-less steel tube packaged short period fiber grating temperature sensor[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2023, 60(9): 1-7. (in Chinese)
- [7] Seongmin J, Pramod R W, Won-Taek H. Enhanced sensitivity of the FBG temperature sensor based on the PbO-GeO₂-SiO₂ glass optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(18): 2697-2700.
- [8] Hsiao Teching, Hsieh Tso-sheng, Chen Yichan, et al. Metal-coated fiber Bragg grating for dynamic temperature sensor[J]. *Optik*, 2016, 127(22): 10740-10745.
- [9] Jiang Chen, Liu Yunqi, Zhao Yunhe, et al. Helical long-period gratings inscribed in polarization-maintaining fibers by CO₂ laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 889-896.
- [10] Chen Maoqing, Zhao Yong, Wei Heming, et al. Cascaded FPI/LPFG interferometer for high-precision simultaneous measurement of strain and temperature[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102025.
- [11] Wang Qi, Du Chao, Zhang Jiaming, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating[J]. *Optics Communications*, 2016, 377: 89-93.
- [12] Lotfi M, Noori M. A highly-sensitive temperature sensor based on GeO₂-SiO₂ long period fiber grating[J]. *Physica Scripta*, 2020, 96(1): 015505.
- [13] James S W, Tatam R. P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application[J]. *Measurement Science & Technology*, 2003, 14(5): 49-61.

Study on Structurally Modulated Long-period Fiber Grating Temperature Sensor

Li Yuanyuan¹, Tian Tian¹, Chen Wenhuan¹, Ma Yiwei¹, Zhao Lei², Geng Tao¹

1. *Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics of Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China*

2. *AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China*

Abstract: The temperature monitoring of fuel system is very important for the safety, performance and reliability of aircraft. In this paper, a long-period fiber grating sensor based on laser etching method is proposed and tested, which can be used for temperature monitoring of aircraft fuel system. By demodulating the resonant peak wavelength variation of fiber grating, the precise measurement of ambient temperature can be realized. Experimental results show that this sensor has a temperature sensitivity of 83.1pm/°C and achieves a strain response of 0.32pm/με. Due to the characteristics of flexibility, corrosion resistance and electromagnetic interference resistance for the optical fibers, the proposed sensor can be flexibly installed in the complex structure of the aircraft, which has the ability to improve the safety and reliability of the aircraft.

Key Words: optical fiber sensing; temperature monitoring; polarization-maintaining fiber; long-period fiber grating

Received: 2023-08-12; Revised: 2023-12-28; Accepted: 2024-01-30

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(201608P6003)