引用本文:翟传伟,郭永兴. 硅质封装的飞秒光纤光栅倾角传感器技术[J]. 光通信技术,2026,50(5):8-14.

硅质封装的飞秒光纤光栅倾角传感器技术

翟传伟[1],郭永兴[2,3*]

(1.中国安全生产科学研究院,北京 100012;2. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室,武汉 430081;
3. 武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室,武汉 430081;)

摘要:为突破传统胶黏剂封装工艺制备的光纤布拉格光栅(FBG)传感器在长期服役过程中普遍面临粘接界面老化失效的技术瓶颈,提出了一种无胶化硅质封装的飞秒FBG倾角传感器。该传感器采用高温硅质粉末烧结工艺实现光栅与基底的稳固耦合,并设计了工字梁-惯性质量块敏化结构;通过配置双FBG进行波长差分解算以消除温度交叉干扰,并结合有限元仿真优化了工字梁几何参数。实验结果表明:传感器经过50万次疲劳加载后封装界面依然牢固无裂纹;在±12°测量范围内表现出32.6 pm/(°)的高灵敏度和优异的线性响应。

关键词:倾角传感器;硅质封装;飞秒光纤光栅;结构健康监测;温度补偿

中图分类号:TN253　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0008-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.002

Silicon-packaged femtosecond fiber grating tilt sensor technology

ZHAI Chuanwei[1],GUO Yongxing[2,3*]

(1. China Academy of Safety Science and Technology,Beijing 100012,China;2. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology,Ministry of Education,Wuhan University of Science and Technology,Wuhan 430081,China;3. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering,Wuhan University of Science and Technology,Wuhan 430081,China)

Abstract: To overcome the technical bottleneck that Fiber Bragg grating(FBG) sensors fabricated by traditional adhesive packaging processes generally face aging and failure of the bonding interface during long-term service, a glue-free silicon-packaged femtosecond FBG tilt sensor is proposed. The sensor utilizes a high-temperature silica powder sintering process to achieve stable coupling between the grating and the substrate, and a mechanical sensitization structure of an I-beam and inertial mass block is designed. By configuring dual FBGs for differential wavelength calculation to eliminate temperature cross-interference, the geometric parameters of the I-beam are optimized through finite element simulation. Experimental results show that after 500 000 fatigue loading cycles, the packaging interface remains firm without cracks. Within a measurement range of ±12°, the sensor exhibits high sensitivity of 32.6 pm/(°) and an excellent linear response.

Key words:tilt sensor,silicon package,femtosecond fiber grating,structural health monitoring,temperature compensation

0 引言

倾角监测作为土木工程结构健康监测的重要组成部分,在评估边坡、桥梁、挡土墙等基础设施的稳定性和安全性方面发挥着关键作用。高精度倾角变形监测数据能够有效反映工程结构的早期微变形特征,为预防灾难性失稳破坏、保障生命财产安全提供重要的技术支撑。尽管倾角测量技术在工程监测领域已获得广泛应用,但面向复杂恶劣环境的高精度、长期稳定性要求,倾角传感器技术仍存在显著的技术挑战。

传统倾角传感器主要基于电磁感应、电容变化等物理机制构建传感原理,通过机-电转换实现倾角量的电信号输出。Xu Yuanping等人[1]通过抗磁悬浮技术结合光学位移检测,开发了一种无控制系统的超高分辨率倾角传感器,但是这种传感器难以控制非线性误差,且测量范围受限。喻峻等人[2]结合软磁金属的磁化效应与非磁性金属的涡流效应开发了倾角传感器,

收稿日期:2025-06-06。

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3017100)资助。

作者简介:翟传伟(1989—),男,应急管理部中国安全生产科学研究院工程师,主要从事光纤传感、光纤光栅、安全监测等相关领域的研发和应用工作。

***通信作者:**郭永兴(1986—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤布拉格光栅传感技术在机械设备和土木工程中的应用。



该传感器灵敏度达5 mV/(°),但线性度仍需进一步优化。Schwenck A等人[3]基于流体电容原理设计倾角传感器,其温度稳定性存在局限。这些传统倾角测量技术普遍面临电磁、湿气和腐蚀干扰等问题。

相比之下,光纤布拉格光栅(FBG)传感技术因其抗电磁干扰、耐恶劣环境、体积小、高灵敏度等优势,已成为倾角测量领域的重要替代技术。邢心魁等人[4]和Kinjalk K等人[5]通过设计敏化结构来提升传感器的灵敏度和分辨率,但所设计的传感器监测范围有限,且对外部振动敏感。Cao Yujia等人[6]提出了采用基于悬臂摆支撑结构不仅提升了传感器的监测范围(±9°),而且还保持了较高灵敏度,达305.2 pm/(°),但传感器的制作复杂、体积较大,不利于大批量使用。在此基础上,Xu Hongbin等人[7]、李瀚等人[8]、Sun Li等人[9]提出用于斜坡监测的高精度、小型化FBG倾角传感器,但是传感器温度补偿性能还需要进一步验证。此外,Zhang Ruilei等人[10]、杨建宇等人[11]、Li Kuo等人[12]、Yuan Bo等人[13]提出的双轴FBG倾角传感器,在双轴测量上保持高灵敏度的同时具备温度自补偿能力。但以上设计大多停留在实验阶段,难以应用于工程实际。

另外,现有相关设计多采用环氧树脂或有机聚合物材料封装FBG,在长期服役过程中普遍面临粘接界面蠕变失效、湿热环境下老化降解、紫外辐射诱发性能退化等关键技术问题,受温度的影响也难以控制。基于此,本文提出并构建一种基于无胶化硅质封装的温度自补偿飞秒FBG倾角传感器。

1 结构设计与传感原理

1.1 传感器结构设计

本文设计的FBG倾角传感器结构图如图1所示。传感器结构主要由六部分组成:保护外壳(长×宽为115 mm×94 mm)、温度补偿梁、工字梁、配重块、飞秒FBG和连接固定件。金属件通过螺钉固定在一起,外壳采用6061铝合金铸造,下侧开有漏水槽,使传感器能够抵御外部冲击风险的同时保证壳体内外气密相通。传感器的核心部件是工字梁、配重块、飞秒FBG,其中工字梁由1 023碳钢板精密铣削而成,配重块采用不锈钢制作,其余金属件采用铝合金制成。飞秒FBG的制作方法与普通二氧化硅FBG的制作不同,飞秒FBG采用聚酰亚胺涂覆的纯硅纤芯光纤,在无需剥去涂覆层的情况下,可以通过飞秒激光器直接刻写,这种设计保证了FBG的耐拉强度,而且具有良好的耐高温性能,更能够适用于硅基的高温热熔封装。

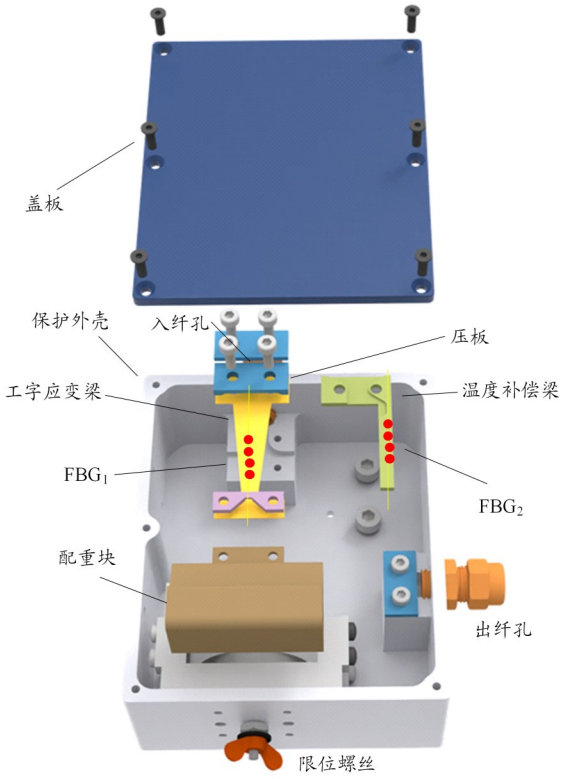


图1 传感器结构图

在金属壳体上侧,通过入纤孔引入2根飞秒FBG。其中,FBG_1贴于工字梁表面用于感知基底应变,采用硅质粉将光纤栅区封装于合金基底表面,硅质封装提升了光纤与基底的结合强度。FBG_2采用硅质封装固定于温补梁表面监测壳体内的温度变化。当安装了传感器的建筑墙体发生倾斜时,配重块在壳体限位装置内实现前后摆动,与配重块连接的工字梁发生弹性形变,导致FBG波长发生漂移。墙体倾斜角度可根据观察到的中心波长漂移计算得出。

1.2 倾角测量模型

传感器的倾角测量模块主要由配重质量块、工字应变梁和温度补偿梁组成。当传感器发生倾斜角θ时,配重块(质量为m)沿工字梁法向的分重力产生弯矩,驱使工字梁发生弹性弯曲形变。在小角度倾角范围内,轴向力引起的微弱变形可忽略。根据弹性力学等截面悬臂梁纯弯曲理论,工字梁表面贴片区域的弯曲应变$\Delta\varepsilon$可简化表示为

$$\Delta\varepsilon = \frac{6mgL\sin\theta}{Ebh^2} \tag{1}$$

式中:g为重力加速度,E为工字梁弹性模量,b和h分别为工字梁的有效宽度与厚度,L为配重块质心至悬臂梁固定端的有效距离。

根据FBG传感理论,FBG中心波长λ的相对漂移量$\Delta\lambda$受$\Delta\varepsilon$和环境温度变化ΔT的共同调制[14-15],可表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=(1-P_e)\Delta\varepsilon+(\alpha+\xi)\Delta T \tag{2}$$

式中:P_e为光纤的有效光弹系数,α和ξ分别为光纤的热膨胀系数与热光系数。

为消除环境温度对倾角测量的交叉干扰,传感器在温补梁上封装了FBG_2,其两端悬空不受外力作用,仅感知温度扰动;而工字梁上的FBG_1同时感知应变与温度。鉴于两光栅空间距离极近且封装工艺一致,可认为两者环境温度变化相同。采用波长相对漂移差分处理,可完全抵消温度项,表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_{FBG_1}}{\lambda_{FBG_1}}-\frac{\Delta\lambda_{FBG_2}}{\lambda_{FBG_2}}=(1-P_e)\Delta\varepsilon_{FBG_1} \tag{3}$$

式中:$\frac{\Delta\lambda_{FBG_1}}{\lambda_{FBG_1}}-\frac{\Delta\lambda_{FBG_2}}{\lambda_{FBG_2}}$为2个FBG的中心波长比之差。

联立工字梁应变响应模型与式(2),可得传感器倾角变化量$\Delta\theta$与2个FBG归一化中心波长漂移差的最终解析关系式为

$$\Delta\theta=\arcsin\left[\frac{Ebh^2}{6mgL(1-P_e)}\left(\frac{\Delta\lambda_{FBG_1}}{\lambda_{FBG_1}}-\frac{\Delta\lambda_{FBG_2}}{\lambda_{FBG_2}}\right)\right] \tag{4}$$

式(4)建立了倾斜角θ和波长比差之间的相关性。由此可知,被测建筑的倾斜角度可以根据安装在倾斜传感器内的2个FBG的波长偏移来计算。

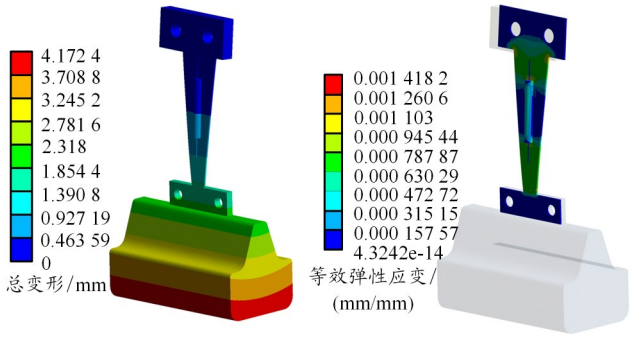
1.3 仿真分析与结构优化

为了验证所设计的倾角传感器结构的可行性和应变传递特性,对FBG倾角模型进行了有限元分析。利用ANSYS软件对倾角模型进行网格划分,传感器参数定义如表1所示。根据结构特性对螺钉孔进行固定约束,给配重块施加垂直于工字梁方向的载荷。当传感器发生倾斜,配重块受重力影响推动工字梁,从而在等强度悬臂梁表面产生弯曲应变。图2(a)为施加0.8 N载荷时的结构位移云图。可以看出,工字型弹片的表面存在明显的变形梯度分布。压力测量是通过在膜片和悬臂梁表面粘合FBG来实现的,这表明压力测量的理论方法和传感器的结构是可行的。图2(b)展示了0.8 N载荷下倾角模型的光纤应变分布,可以看出,工字梁对于质量块传递的应变具有明显的放大作用,这对提高传感器灵敏度至关重要。

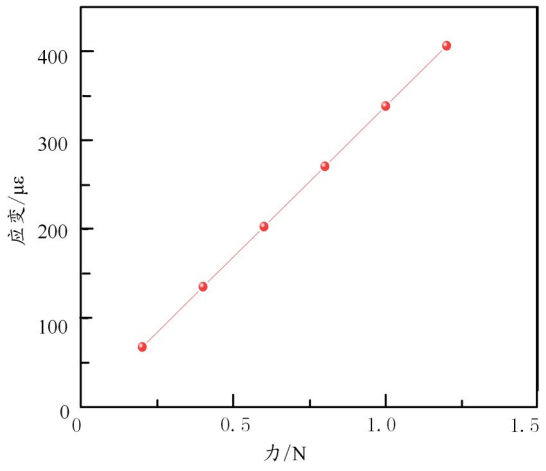
表1 FBG倾角传感器参数

组件	材料	杨氏模/Gpa	泊松比	密度/(kg/m³)
工字梁	碳钢	212.4	0.29	7 850
质量块	不锈钢	193	0.3	7 930
壳体	铝合金	71	0.3	2 810
光纤	玻璃纤维	73	0.22	2 600
硅质粉	二氧化硅	80	0.3	2 500

在理论分析中,工字梁的长度与表面产生的应变存在直接关系,基片表面长度会显著影响光纤感受的应变变化。为了验证理论分析和结构设计的合理性,本文对不同长度的工字梁进行了系统性仿真分析,得到了工字梁表面产生的应变分布情况。进一步对工字梁施加不同大小的力,得到梁表面光纤应变与力的关系曲线如图2(c)所示,可以看出,应变与施加力之间呈现良好的线性关系。



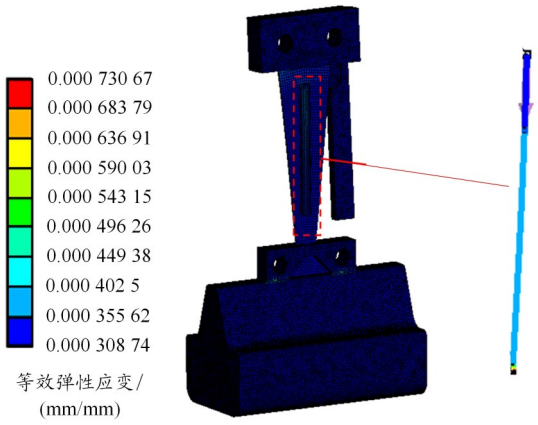
(a) 0.8 N载荷下工字梁位移云图　　(b) 应变云图



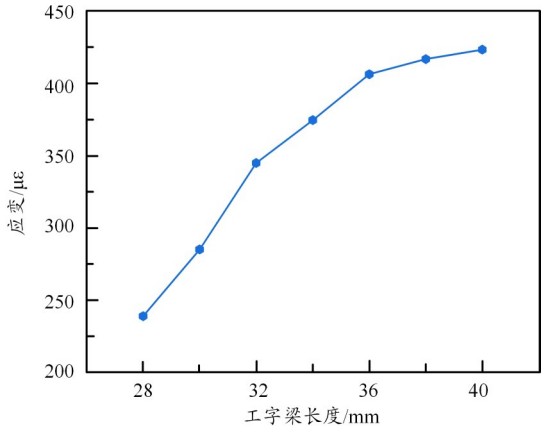
(c) 工字梁表面光纤应变与力的关系曲线

图2 工字梁应变分析

为了进一步分析光纤应变情况,提取光纤路径上的应变分布,如图3(a)所示,可以看出,在靠近配重块的光纤部分产生的应变分布较为均匀,而靠近固定端的光纤应变相对较小。这种应变分布特性有利于确保飞秒FBG感受到稳定且可预测的应变变化。图3(b)展示了光纤所受的平均应变随工字梁长度变化的关系曲线,可以看出,光纤产生的应变随工字梁长度的增加而



(a) 0.8 N载荷下光纤路径应变分析



(b) 光纤应变随工字梁长度变化的关系曲线

图3 有限元分析结果

递增,但增长率并非恒定。当长度位于28~40 mm时,应变值随基片长度增加而递增,当长度达到36 mm时,梁表面应变变化出现明显拐点,表明此时结构可能进入非线性变形区域,不利于传感器的稳定性和精确性。综合考虑工字梁长度对传感器整体尺寸、灵敏度、线性度以及结构稳定性的影响,最终将工字梁的长度优化设定为34 mm,这一选择在保证传感器紧凑性的同时,也确保了足够的测量灵敏度和优异的线性响应特性。

2 传感器制备与基片测试

2.1 传感器制备

传感器制备过程主要包括机械结构加工、飞秒FBG封装、组装与调试3个阶段。机械结构加工阶段,采用精密数控加工设备制作工字梁、温补梁、配重块和外壳等部件。工字梁采用1023碳钢板经精密铣削加工而成,表面经过抛光处理以确保与光纤良好接触;配重块采用不锈钢材料加工,其质量经精确控制以确保传感器灵敏度;外壳及其他连接件采用6061铝合金制作,具有良好的耐腐蚀性和机械强度。

飞秒FBG封装是传感器制作的关键环节。首先,选用中心波长分别为1 550 nm和1 570 nm的2个FBG。FBG封装采用无胶化硅质封装技术,具体步骤如下:1)清洁工字梁和温补梁表面,确保无油污和杂质;2)将FBG_1定位于工字梁上表面预设位置并且两端通过夹具固定,FBG_2定位于温补梁表面;3)采用高纯度二氧化硅粉末(纯度>99.9%)覆盖FBG区域;4)使用专用工装对硅质粉末施加预设压力(约0.1 MPa),确保封装密实;5)在控制温度(约400 ℃)条件下进行热处理2 h,使硅质粉末与基底形成稳固结合,加热结束冷却后2个FBG波长分别稳定在1 547.412、1 567.125 nm。此时,FBG中心波长相比初始波长出现偏移,原因在于封装前后大温差变化,封接的熔融玻璃粉发生固化体积收缩,对FBG产生了轴向负应力,冷却后的整体封装件应力稳定。最后,进行传感器组装与调试。按照设计图纸将各部件通过螺钉连接固定,确保工字梁与配重块的连接牢固,同时保证配重块在限位装置内可自由摆动。

2.2 基片疲劳测试

为全面评估所设计倾角传感器在长期使用条件下的可靠性,本文对传感器的关键部件——合金基底与飞秒FBG的硅质封装界面进行了系统的疲劳性能测试。测试采用MTS-810液压伺服疲劳测试系统进行。

在实验准备阶段,本文制备了与实际传感器结构相同的合金基底试样,并使用相同工艺将飞秒FBG通过高纯度硅质材料封装于合金基底表面。疲劳测试采用正弦波循环加载模式,应力比维持在0.1,加载频率为5 Hz,在恒定温度为(25±2) ℃和相对湿度为(45±5)%环境下累计加载50万次。测试结束后,通过高精度光谱分析仪(分辨率为0.1 pm)对传感器性能参数进行检测,并通过扫描电镜(ZEISS MA10)对基底表面进行微观结构分析,评估可能出现的界面脱裂现象。

图4展示了基片截面的扫描电镜结果,经过50万次循环应力加载后,合金基底结构保持完整,传感器仍能保持稳定高效测量状态。从图4可以清晰观察到在最易裂开失效的硅质封装层和梁合金基底的封装界面处,经过大量循环加载后,界面微观结构保持稳定,未出现脱粘或分层现象。同时,工字梁与玻璃粉的结合界面紧密,表面光洁度良好,FBG紧密贴合于基板表面,封装结构无明显的裂纹或分层现象,仅在

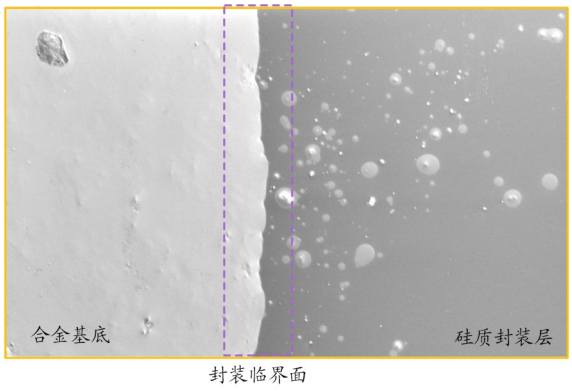


图4 传感基片疲劳测试中基片硅质粘合界面扫描电镜图

应力集中区域可见轻微塑性变形痕迹,但未检测到材料失效迹象。综上所述,所开发的硅质封装飞秒FBG倾角传感器具备优异的耐疲劳特性,能够满足严苛工程应用环境下的长期监测需求。

3 传感器性能实验

3.1 灵敏度标定实验

为评估所开发传感器的倾角测量性能,本文搭建了灵敏度标定实验平台,如图5所示。整体测量装置由倾角传感器、数字量角器、FBG解调器和计算机组成。双轴数字量角器(量程为±100°,精度为0.001°,分辨率为0.001°)垂直固定于光学平台上,数字量角器两侧设有夹紧槽,倾角传感器通过紧定螺钉固定在夹紧槽内,数字量角器可实时反馈传感器摆动角度。传感器内的飞秒FBG通过光纤跳线与FBG解调器(带宽范围为1 520~1 600 nm,精度为3 pm,分辨率为0.1 pm)相连,FBG解调器以5 Hz的频率实时记录FBG的波长偏移变化,并通过网线将数据传输至计算机进行处理与分析。

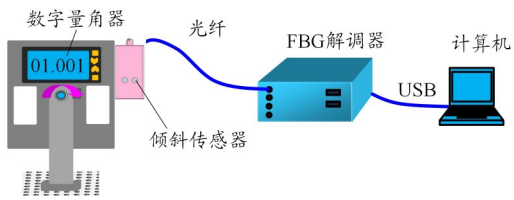
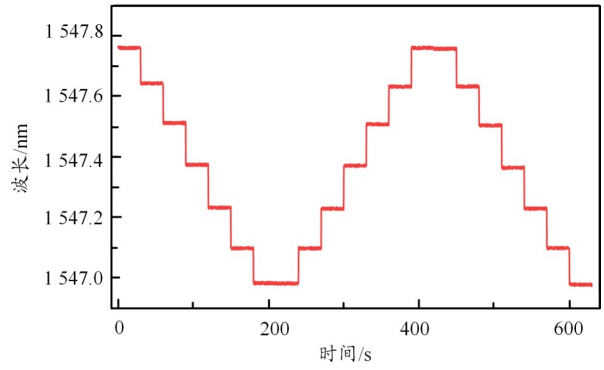


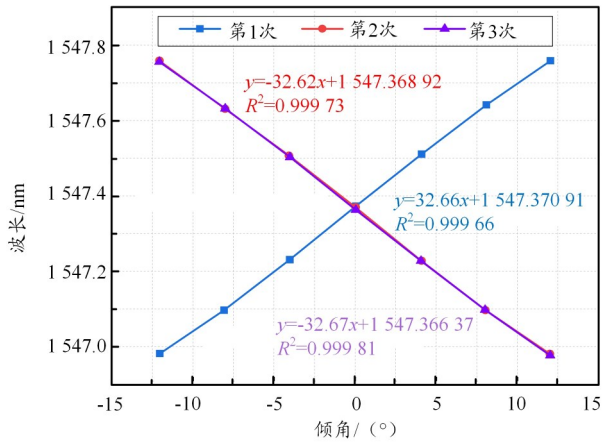
图5 灵敏度标定实验平台

实验在室内恒温条件(25 ℃左右)下进行,传感器倾角测试范围控制在±12°内。测试流程如下:首先,将校准平台调整到+12°倾斜角下的稳定状态,待传感器波长稳定后记录对应的波长数据;然后,以4°的间隔依次调整倾角至+8°、+4°、0°、−4°、−8°、−12°,每个角度位置保持30 s以确保数据稳定;最后,再按相反顺序返回至+12°。为确保测试数据的可靠性,对倾角传感器进行了往复3次测试。

图6(a)展示了传感器在不同倾角下FBG波长随时间变化的曲线图,可以观察到3次测量得到的曲线呈现清晰的阶梯状变化,表明传感器具有良好的倾角动态响应特性和重复性。图6(b)显示了3个测试周期FBG中心波长的线性拟合曲线,可以看出,传感器在测试范围内表现出优异的波长随角度变化而漂移的线性响应,拟合得到的倾角灵敏度达到32.62 pm/(°),决定系数R^2高达99.97%。这一结果验证了传感器设计的有效性和测量的高精度性,满足工程应用对倾角测量的精度要求。



(a) 中心波长随时间变化曲线



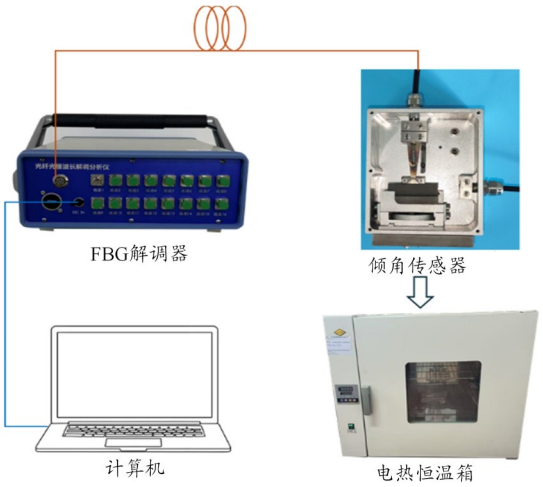
(b) FBG灵敏度曲线

图6 倾角传感器灵敏度标定实验

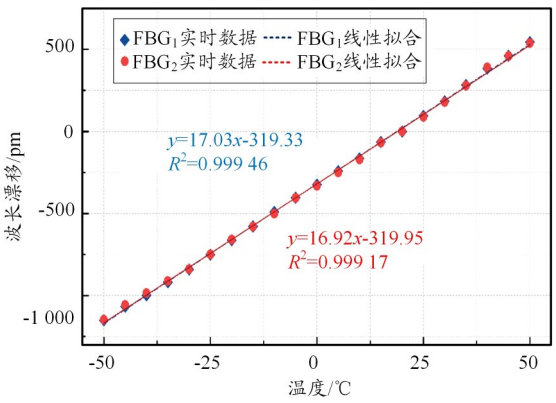
3.2 温度补偿实验

温度补偿性能是保证传感器在户外环境长期监测中维持高精度的关键指标。为评估所开发倾角传感器的温度补偿性能,本文建立了温度特性测试系统,如图7(a)所示。该系统主要由倾角传感器、电热恒温箱、FBG解调器和计算机组成。温度控制采用高精度温度试验箱,其温度控制范围为−80~80 ℃,分辨率达0.01 ℃,测量精度为±0.05 ℃,能够提供稳定可控的温度环境。

温度灵敏度测试过程中,将倾角传感器固定在0°位置并放置于温度试验箱中,温度设置范围为-50~50 ℃,采样间隔为5 ℃。在每个温度点,系统保持恒温110 min以确保传感器充分达到热平衡,实时记录FBG_1和FBG_2的波长数据。图7(b)展示了FBG_1和FBG_2的实时波长漂移数据与温度的关系及其线性拟合结果(即温度灵敏度曲线)。从图7(b)可以观察到,传感器的温度灵敏度曲线呈现良好的线性特性,FBG_1和FBG_2拟合后得到的温度灵敏度分别为17.03 pm/℃和16.92 pm/℃,决定系数R^2分别为99.94%和99.91%,2个FBG的温度灵敏度基本一致,这表明所设计的双FBG温度补偿方案能够有效区分温度引起的波长偏移,实现准确的温度补偿。



(a) 测试系统



(b) 温度灵敏度曲线

图7 倾角传感器温度特性测试系统及测试结果

3.3 蠕变实验

在工程实践中,要求倾角传感器执行长期监测任务,并具有抗蠕变性。本文对传感器进行满量程(12°)抗蠕变试验。首先,将传感器以0°倾斜角保持稳定5 min,记录FBG的波长漂移。然后,将传感器保持倾斜12°并固定约120 min。最后,将倾角传感器调整回初始位置并保持5 min。在整个实验中传感器的波长数据变化如图8所示,可以看出,倾角传感器在满量程测试下表现出良好的抗蠕变性能。为了更直观地表示传感器的蠕变特性,图8中插图放大了5 min时间范围内的数据,可以看出传感器输出波长在8 pm内轻微波动,数据波动在波长测量精度的误差范围内,进一步证实了该传感器具有良好的抗蠕变性能,适合长期监测应用。

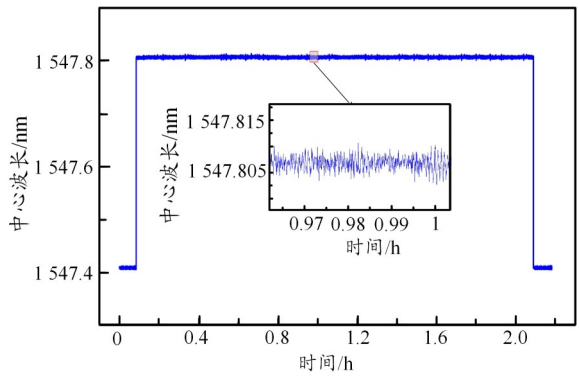


图8 倾角传感器抗蠕变试验结果

4 结束语

本文提出了一种硅质封装的飞秒FBG倾角传感器,通过理论分析、结构设计、有限元仿真和实验验证其性能。该封装技术解决了传统胶装方式的湿热膨胀、紫外老化和蠕变失效问题,硅质材料与光纤的相似物理特性提供了卓越的热机械稳定性。传感器采用双FBG配置实现了高效温度补偿,使传感器在-50~50 ℃范围内表现出稳定灵敏度(16.57 pm/℃)和优异线性度。另外,传感器在±12°倾角范围内展现出32.6 pm/(°)的高灵敏度和优异线性响应,经50万次循环应力测试后,使用扫描电镜得出的基底表面微观结构,可以看出传感器封装结构完整、封装界面耦合牢固,具备长期监测的稳定性。同时,传感器具备良好的抗蠕变性能。本文的研究为恶劣环境下的基础设施倾角长期监测提供了高精度、高可靠性的解决方案,并为FBG传感器封装技术提供了新方向。

参考文献:

[1] Xu Yuanping, Jiang Qiqi, Yang Ke, et al. A novel ultra-high-resolution inclination sensor based on diamagnetic levitation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 343: 113686.

[2] 喻峻,李德才,王德义,等. 基于磁化-涡流效应的磁性液体倾角传感器研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(12):55-62.

[3] Schwenck A,Guenther T,Zimmermann A. Characterization and benchmark of a novel capacitive and fluidic inclination sensor[J]. Sensors,2021,21(23):8030.

[4] 邢心魁,邝卡斌,覃荷瑛. 一种高灵敏度的新型光纤光栅倾角传感器[J]. 光学学报,2022,42(7):0706004.

[5] Kinjalk K,Kumar A,Gautam A. High-resolution FBG-based inclination sensor using eigen decomposition of reflection spectrum[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2020,69(9):6169-6177.

[6] Cao Yujia,Wu Xi,Teng Yuntian,et al. High-accuracy fiber Bragg grating inclinometer[J]. Applied Optics,2024,63(16):4321-4327.

[7] Xu Hongbin,Li Feng,Zhao Weigang,et al. A high precision fiber Bragg grating inclination sensor for slope monitoring[J]. Journal of Sensors,2019(a2):1354029.

[8] 李瀚,丁文超,肖伟,等. 一种基于摆锤结构的紧凑型光纤布拉格光栅倾角传感器[J]. 光学学报,2025,45(3):1658.

[9] Sun Li,Liang Tianqi,Sun Xinxin,et al. Temperature self-compensating and high-sensitivity FBG inclination sensor based on the sliding mass principle[J]. Optical Fiber Technology,2025,81:103539.

[10] Zhang Ruilei,Dou Hongguang,Zhang Peng,et al. Dual-axis fiber Bragg grating tilt sensor based on universal joint structure[J]. Optical Fiber Technology,2024,87,103898.

[11] 杨建宇,梁磊,唐浩冕,等. 一种温度自补偿的高灵敏度FBG双向倾角传感器[J]. 光电子·激光,2020,31(4):351-356.

[12] Li Kuo,Zhao Yihu,Li Yuqing,et al. Fiber Bragg grating biaxial tilt sensor using one optical fiber[J]. Optik,2020,218:164973.

[13] Yuan Bo,Zhao Zhangyan,Yuan Yinquan. Two-dimensional inclinometer based on an elastic cylinder cantilever and eight FBGs[J]. IEEE Sensors Journal,2022,22(3):2422-2429.

[14] Martinez A,Dubov M,Khrushchev I,et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser[J]. Electronics Letters,2004,40:1170-1172.

[15] Othonos A,Kalli K,Kohnke G E. Fiber Bragg gratings:Fundamentals and applications in telecommunications and sensing[J]. Physics Today,2000,53:61-62.