

# 激光与光电子学进展

## 纤维封装长标距应变传感器的温度灵敏系数 实验研究

吴必涛<sup>1,2\*</sup>, 林泽方<sup>1,2</sup>, 曾远来<sup>1,2</sup>, 林祖才<sup>1,2</sup>, 卢华喜<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013;

<sup>2</sup>华东交通大学土木工程国家实验教学示范中心, 江西 南昌 330013

**摘要** 为了研究玄武岩纤维(BFRP)封装长标距光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器的温度灵敏度系数,首先介绍了长标距BFRP封装长标距FBG应变传感器的传感原理,然后选取了10个具有不同中心反射波长的BFRP封装长标距FBG应变传感器进行环境温度实验,通过传感器的中心波长变化值与温度变化值拟合分析得出BFRP封装长标距FBG应变传感器的温度灵敏度系数。实验结果表明,BFRP封装长标距FBG应变传感器的中心反射波长与温度呈现出较好的线性拟合关系,BFRP封装长标距FBG传感器温度灵敏度比裸FBG传感器的温度灵敏度高出20%~50%左右,它得到的温度灵敏度系数可以直接对BFRP封装长标距应变传感器进行温度补偿修正。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 长标距传感器; 玄武岩纤维; 温度灵敏系数; 温度补偿

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0106005

### Experimental Study on Temperature Sensitivity Coefficient of Long-Gauge Strain Sensor Encapsulated with Fiber

Wu Bitao<sup>1,2\*</sup>, Lin Zefang<sup>1,2</sup>, Zeng Yuanlai<sup>1,2</sup>, Lin Zucan<sup>1,2</sup>, Lu Huaxi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University,  
Nanchang, Jiangxi 330013, China;*

<sup>2</sup>*National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering,  
East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China*

**Abstract** To study the temperature sensitivity coefficient of the basalt fiber (BFRP) encapsulated long-gauge fiber Bragg grating (FBG) strain sensor, this paper first introduces the temperature sensing principle of the long-gauge FBG strain sensor, and then selects ten fiber packages with different central reflection wavelengths long-gauge FBG strain sensors for ambient temperature test. The temperature sensitivity coefficient of the fiber-encapsulated long-gauge FBG strain sensor is obtained by fitting analysis of the center wavelength change value of the sensor and the temperature change value. The results show that the central reflection wavelength of the long-gauge FBG strain sensor has a better linear fitting relationship with temperature, and the temperature sensitivity of the BFRP packaged long-gauge FBG sensor is about 20% to 50%, which is higher than that of the bare fiber grating sensor. The temperature sensitivity coefficient measured can directly compensate for the temperature of the BFRP packaged long-gauge strain sensor.

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-01; 录用日期: 2021-04-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51808219)、江西省自然科学基金青年基金(20202BAB214024)、江西省交通运输厅科技项目(2020H0009)

通信作者: \*wubitao@ecjtu.edu.cn

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; long-gauge sensors; basalt fiber; temperature sensitivity factor; temperature compensation

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器具有高精度、耐腐蚀和抗电磁干扰等优点,在高耸结构健康监测<sup>[1]</sup>、地铁基坑施工监测<sup>[2]</sup>、桥梁隧道施工监测<sup>[3-5]</sup>、光电复合缆绳应变测量<sup>[6]</sup>等领域有较多的应用。FBG应变传感器对温度和应变交叉敏感,在长期监测过程中,由于时间跨度大、环境温度变化幅度明显,对测量结果有较大影响,因而在进行监测时需要进行温度补偿。FBG应变传感器温度补偿的原理大多基于测量过程补偿和测量结果补偿,前者是通过传感器本身进行设计,使其对温度不敏感从而达到温度补偿的目的,后者是指在测量后经过运算和处理把温度效应剥离。由于基于测量过程补偿的光纤光栅传感器制作工艺复杂,国内的传感器大多是基于测量结果补偿的方法。对于FBG传感器的温度灵敏和温度补偿问题,许多学者都对此进行了研究,贾振安等<sup>[7]</sup>通过实验的方法研究了裸FBG传感器的温度灵敏度系数,发现FBG传感器的温度灵敏度系数不是常数,而是会随测量温度的增大而缓慢增大。李阔等<sup>[8]</sup>利用FBG传感器温度和应变的交叉敏感特性,设计了一款灵敏度系数可调的高灵敏度FBG温度传感器。为了适应各种恶劣复杂的监测环境,研究者往往通过对FBG进行二次封装,以提高FBG传感器抵抗外部侵害的能力,常用的有金属封装和复合纤维材料封装。丁旭东等<sup>[9]</sup>研究了全金属化封装结构的FBG温度传感器的超低温传感特性,实验结果表明,该封装形式的FBG传感器的线性度较好,温度灵敏度也得到了提高。张自嘉等<sup>[10]</sup>利用受温度影响的光纤本征方程和相位匹配条件,从理论上研究了长周期FBG传感器的温度响应特性,给出了长周期FBG传感器的温度灵敏度的解析表达式。郭永兴等<sup>[11]</sup>研究发现同种封装方式下的两个光栅自差分温度补偿的效果明显优于参考裸栅的差分补偿结果。闫维明等<sup>[12]</sup>从传感器的微观结果及其与混凝土的作用机理出发,提出了一种对钢套筒封装FBG传感器的测量结果进行温度补偿的算法,由温度灵敏系数及环境温度即可通过算法进行温度补偿。陈剑等<sup>[13]</sup>研究了一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光

栅应变传感器的温补特性,所设计的传感器具有优越的测量性能,应变灵敏度一致性高,还具有良好的抗蠕变能力。

FBG应变传感器根据标距长度可分为长标距和短标距应变传感器两种,短标距应变传感器一般指的是传统的“点式”应变计,标距长度为3~10 cm,而长标距应变传感器指的是通过二次封装达到更大标距的应变传感器<sup>[14]</sup>,标距长度可达1 m。本文对一种新型的玄武岩纤维(BFRP)纤维套管封装的长标距应变传感器进行了环境温度作用下的监测实验研究,研究了基于BFRP材料封装和增敏封装技术的长标距FBG应变传感器的温度敏感特性,为纤维封装的长标距应变传感器在监测中的温度补偿提供参考。

## 2 光纤光栅的温度传感原理

将通信用光纤的一部分,利用掺锗光纤非线性吸收效应的紫外全息曝光法在光纤纤芯上形成空间相位光栅,即布拉格光栅<sup>[15]</sup>,这种空间相位光栅可以控制和改变光波的传输<sup>[16]</sup>,而使纤芯的折射率呈周期性变化,其本质相当于在光纤内部刻制了可精确控制的反射镜或滤光器。光波通过光纤光栅时,当入射光波长等于光栅中心波长时,将会反射回来形成反射光束,而不等于光栅中心波长的光,由于相位不匹配而不受影响继续向前传递,如图1所示。

由文献[17]可知,结合光纤耦合模理论,布拉格光栅反射光的波长( $\lambda_b$ )与光栅周期( $\Lambda$ )以及纤芯有效折射率( $n_{\text{eff}}$ )之间满足如下关系,即布拉格光栅方程为

$$\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Lambda。 \quad (1)$$

在实际工程运用中,除了应变之外,温度同样是引起 $\Lambda$ 以及 $n_{\text{eff}}$ 改变而使光纤布拉格光栅中心反射波长发生漂移的原因,温度引起中心波长发生漂移的原因主要有两个方面,即光纤材料的热光效应和热膨胀效应<sup>[18]</sup>。

对(1)式两边进一步取微分,得到光纤布拉格光栅中心反射波长漂移量的表达式为<sup>[19]</sup>

$$d\lambda_b = 2\Lambda dn_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}d\Lambda。 \quad (2)$$

假设光纤光栅处在恒定的应力场中,当其周围环境温度变化,且温度沿着光纤光栅均匀分布时,

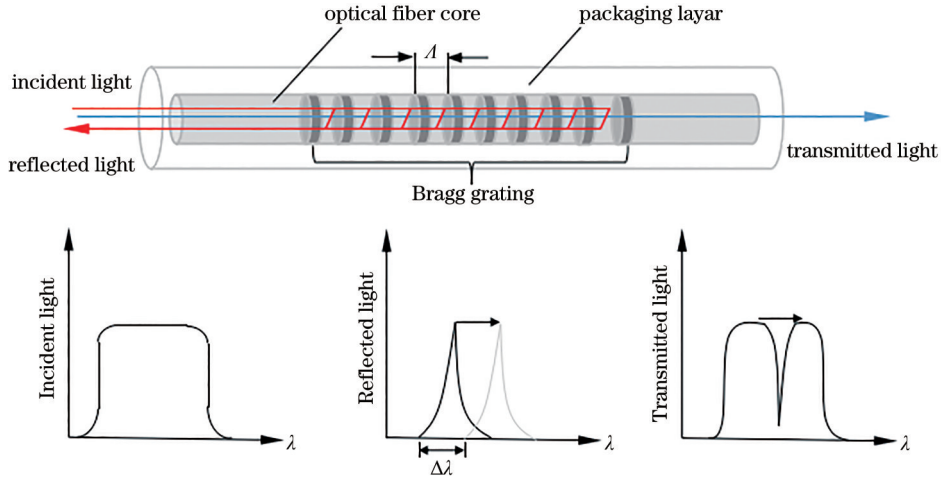


图 1 光纤光栅构造及传感示意图

Fig. 1 Schematic of fiber grating structure and sensing

忽略光纤光栅不同位置之间的温差效应,建立光纤光栅的温度传感模型。得到温度对光纤布拉格光栅中心波长的影响方程为<sup>[20]</sup>

$$K_{B.T} = \frac{d\lambda_b}{dT} = \lambda_b \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dT} \right) = \lambda_b (\zeta + \alpha) = \lambda_b K_T, \quad (3)$$

式中:  $K_{B.T}$  为温度变化带来的影响值;  $K_T$  为光纤光栅的灵敏度系数;  $K_T = \zeta + \alpha$ ;  $T$  为温度;  $\zeta$  是热光系数;  $\alpha$  是热膨胀系数。可以看出, 仅受温度作用时, 光纤光栅中心波长的漂移变化与温度变化呈线性相关。对于掺锗普通石英光纤,  $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $\zeta = 6.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ , 则光纤光栅温度灵敏度系数<sup>[21]</sup>为  $K_T = 6.95 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ , (3)式可简化为

$$K_{B.T} = 6.95 \times 10^{-6} \lambda_b. \quad (4)$$

为了应对复杂的测试环境, 提高传感器的存活率, 通常对裸光纤进行二次封装, 不同的封装材料会影响传感器的温度灵敏度系数, 本文主要测试玄武岩纤维套管封装长标距 FBG 传感器对温度的灵敏度系数。

### 3 BFRP 封装长标距 FBG 传感器环境温度实验

为研究温度变化引起长标距 FBG 传感器的中心波长漂移的问题, 进行了长标距 FBG 传感器的环境温度实验。本次实验测试的传感器采用长标距 FBG 应变传感器, 该应变传感器用 BFRP 纤维套管进行了二次封装与增敏<sup>[22]</sup>, 玄武岩纤维是一种新型无机环保绿色高性能纤维材料, 不仅强度高, 还具有电绝缘、耐腐蚀、耐高温等多种优异性能, 线膨胀

系数与混凝土接近, 非常适合于土木工程结构传感器的封装保护。该传感器在土木工程结构健康监测领域<sup>[23-25]</sup>运用广泛, 其构造及实物图如图 2 所示。传感器主要由锚固段和传感段组成, 传感段和锚固段分别采用塑料软管封装, 塑料软管的最外层采用 BFRP 纤维套管封装并用环氧树脂固化。其中光纤在锚固段中被改性环氧树脂固化, 传感段中光纤光栅可以随着受力情况自由伸缩, 从而实现监测的目的。

如图 2(a) 所示, 假设传感器标距两端与被测结构物粘结良好, 无相对位移, 套管内的光纤采用两种不同的封装材料。  $\delta_1$ 、 $\delta_0$  为两部分的位移,  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_0$  为相应的应变,  $\epsilon_0$  为 FBG 测量的应变,  $E_1$ 、 $E_0$  为相应的弹性模量。标距两端的总位移表示为

$$\delta = \delta_1 + \delta_0 = \epsilon_1 L_1 + \epsilon_0 L_0, \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\delta}{L} = \frac{L_0 + \frac{E_0 A_0}{E_1 A_1} (L - L_0)}{L} \epsilon_0 = \left[ \left( 1 - \frac{E_0 A_0}{E_1 A_1} \right) \frac{L_0}{L} + \frac{E_0 A_0}{E_1 A_1} \right] \cdot \epsilon_0, \quad (6)$$

式中:  $\bar{\epsilon}$  为被测结构物外荷载引起的整个标距段内的平均应变, 包括温度作用在内;  $A_0$ 、 $A_1$  为不同封装材料相应的横截面积。

$$\text{令 } \alpha_E = \frac{E_0 A_0}{E_1 A_1}, \alpha_L = \frac{L_0}{L} \text{ 则有,} \\ \bar{\epsilon} = (\alpha_L + \alpha_E - \alpha_L \alpha_E) \cdot \epsilon_0. \quad (7)$$

整理(7)式得  $\epsilon_0 = \eta \cdot \bar{\epsilon}$ , 其中放大系数为

$$\eta = \frac{1}{\alpha_L + \alpha_E - \alpha_L \alpha_E}. \quad (8)$$

由上式可见, 只要选择合适的  $\alpha_E$ 、 $\alpha_L$ , 即选择合

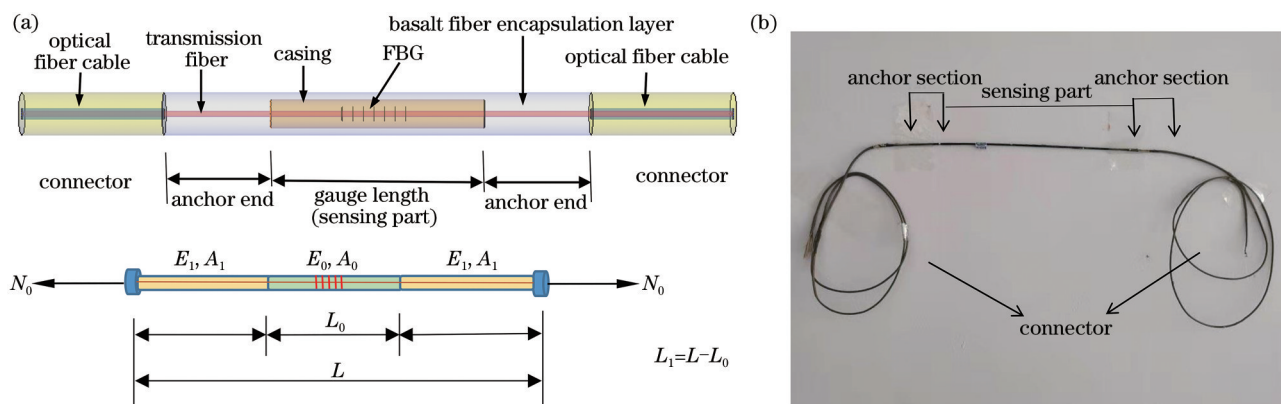


图 2 基于 BFRP 纤维封装和增敏的长标距 FBG 传感器构造及实物图。(a) 结构图; (b) 物理图

Fig. 2 Structure and physical image of long-gauge distance FBG sensor based on BFRP material packaging and sensitivity enhancement. (a) Structure drawing; (b) physical drawing

适的封装材料和长度,就可以放大 FBG 传感器测到的应变,这极大缓解了环境振动下结构物的应变测量值过小会被噪声淹没的不利状态。在长标距 FBG 传感器构造中,裸光纤表面分层涂有不同类型的环氧树脂,通过此方法可调整 FBG 的温度敏感性。标距段(传感部分)里的光纤光栅外有一层嵌入式套管,套管的作用是保证光纤光栅处于自由状态,以使传感部分的光纤每一点的受力完全相同,且套管具有良好的耐高温、耐久性能,使传感器具备长期监测的特性。锚固段的光纤则直接与套管、BFRP 纤维套管粘接为一体,且在封装锚固前,需对光纤光栅进行一定的预张拉,保证传感器拉压应变的测量准确性。通过现有文献对纤维封装长标距传感器的受力性能的研究,传感器在外力荷载下的应变灵敏度系数为  $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$  左右,关于环境温度的灵敏度系数尚不明确。

为了研究环境温度下 BFRP 纤维封装长标距应变传感器的温度灵敏度系数,本次实验选取了 10 组不同中心波长的长标距 FBG 传感器,依次为 1520, 1524, 1528, 1532, 1536, 1540, 1544, 1548, 1552, 1556 nm, 传感器标距均为 1.0 m。为使传感器所监测到的温度范围更广,本次分为室内实验和户外实验两部分,并选择温差较大的晴天天气进行多天连续监测。实验温度的采集则用 WST 数字温度计,其量程为  $-50 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,精度为  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,可满足监测需要,且温度计的温度感应端放置于传感器处,目的是使温度计采集的温度为传感器周围的温度值。光信号采集仪器用 MOIsi-155 光纤解调仪,该仪器兼具有静态和动态全光谱分析功能,可进行长期可靠的高精度测量。经光纤解调仪将传感器传递的光信号解调滤波后,进行数据分析,实验记录如图 3 所示。

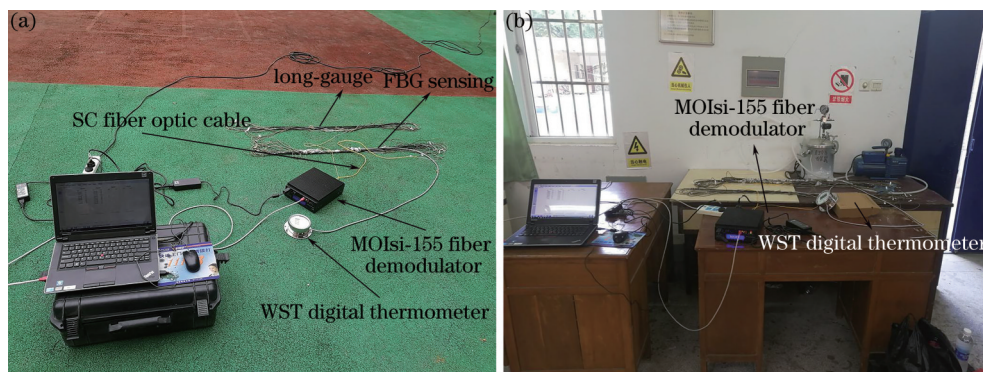


图 3 长标距 FBG 传感器温度实验照片。(a) 户外温度实验; (b) 室内温度实验

Fig. 3 Long-gauge length FBG sensor temperature test photos. (a) Outdoor temperature test; (b) indoor temperature test

#### 4 实验结果分析

对采集的长标距 FBG 传感器中心反射波长信

号按照温度的变化大小进行依次排序,数字温度计采集到的环境温度范围值为  $16 \sim 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ,即当天昼夜温度差值为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,各个传感器的中心反射波长和温

度的变化值如图 4 所示,图中横坐标为温度变化值,纵坐标为传感器中心波长变化值,测点数为 200 个。选取的 10 个不同中心反射波长的长标距 FBG 传感器的波长差值与温度差值的线性拟合优度  $R^2$  分别为 0.99、0.98、0.98、0.98、0.99、0.97、0.98、0.99、0.98、0.98,可知其值均大于 0.95,即传感器反射波长差值与温度变化有较强的线性相关。线性拟合

的斜率为长标距 FBG 传感器随温度变化的影响值  $K_{B,T}$ , 分别为 13.82、14.44、12.57、14.93、14.44、12.08、14.3、15.61、13.74、15.88  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。少数传感器的温度灵敏度相差较大,这主要是由传感器自身的制作工艺误差引起的,不同的传感器的标距长度和锚固长度会有差异,导致温度灵敏度有差异,这种问题可以通过优化制作工艺来改善。通过(4)式

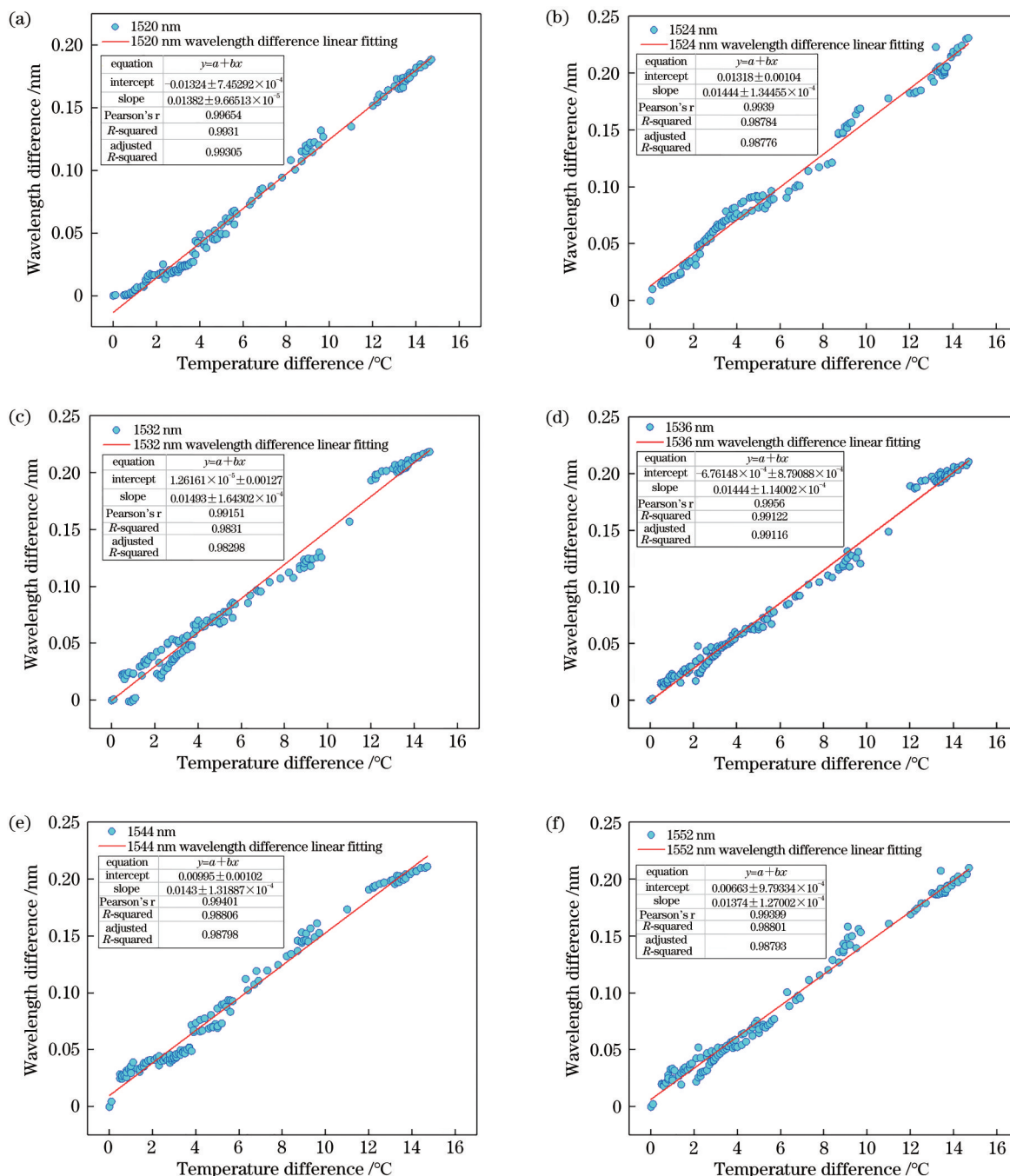


图 4 长标距 FBG 传感器不同波长下的温度差值线性拟合。(a) 1520 nm;(b) 1524 nm;(c) 1532 nm;(d) 1536 nm;(e) 1544 nm;(f) 1552 nm

Fig. 4 Linear fitting of temperature difference of long-gauge FBG sensor at different wavelengths. (a) 1520 nm; (b) 1524 nm; (c) 1532 nm; (d) 1536 nm; (e) 1544 nm; (f) 1552 nm

计算同等中心反射波长的裸光纤光栅传感器的随温度变化的理论影响值  $K_{B,T}$ , 可知其值在 10.5~10.81 范围内, 并与纤维封装长标距 FBG 传感器的温度影响值对比分析, 结果如图 5 所示。

分析图 5(a) 和 (b) 可知, 长标距 FBG 传感器环境温度实测结果线性拟合得出的温度影响值  $R^2$  普遍比通过 (4) 式得出的裸 FBG 传感器温度影响值大, 理论计算得到的裸 FBG 传感器温度影响值为 10.56~10.81 pm/°C, 而实测 BFRP 纤维封装的长标距 FBG 传感器拟合得出的结果为 12.08~15.88 pm/°C, 比裸 FBG 传感器高出 20%~50% 左右。故在传感器的中心反射波长一定的情况下, 长标距 FBG 传感器温度灵敏度要比裸 FBG 传感器的灵敏度高, 对温度更为敏感。如果直接采用裸光纤温度灵敏度系

数直接进行温度修正会导致测试值偏大, 因此在实际工程运用中, 尤其是长期的结构健康监测中, BFRP 纤维封装长标距 FBG 传感器所处的环境的温差大, 对其进行温度补偿及灵敏度标定是非常有必要的, 实际中土木结构的温度监测也是一项重要的监测内容, 有很多专门测试温度的表面温度传感器, 一般采用在测试位置安装表面温度传感器来获取结构表面的温度, 可获取温度数据的表面安装的传感器有振弦式应变计和光纤温度传感器。通过测量关键区域温度进行温度补偿, 该长标距应变传感器的温度灵敏系数测定以后, 可结合其他表面温度传感器进行温度补偿。本文推荐采用平均值进行温度修正, 即考虑温度变化对传感器的影响值  $K_{B,T}=14.18$  pm/°C。

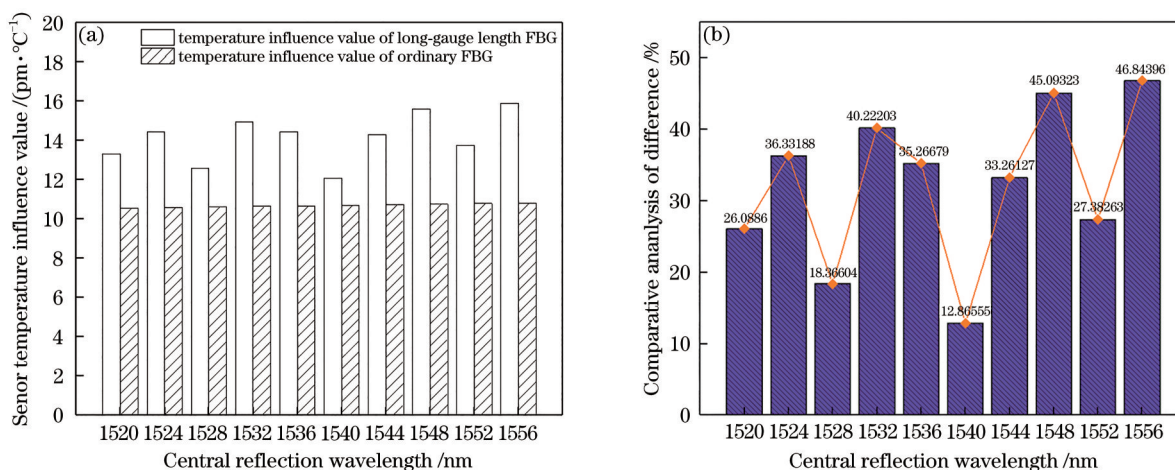


图 5 纤维封装 FBG 传感器与裸 FBG 传感器对比。(a) 温度影响值; (b) 差异比较

Fig. 5 Comparison of long-gauge FBG sensor and ordinary FBG sensor. (a) Temperature influence value; (b) difference comparison

## 5 结 论

本文对用新型 BFRP 纤维材料封装与增敏后的长标距 FBG 应变传感器进行了自然环境温度实验, 并进行了传感器中心反射波长与温度的差值拟合线性分析, 研究了长标距 FBG 应变传感器在被纤维二次封装后的温度灵敏度特性, 研究发现 BFRP 封装长标距 FBG 传感器温度灵敏度比普通光纤光栅传感器灵敏度高很多, 这是由于传感器采用增敏封装技术及玄武岩纤维材料进行封装, 传感部分受温度的接触面变大, 进而对温度更敏感。当采用 BFRP 纤维封装长标距 FBG 应变传感器进行监测时, 如继续使用裸光纤的温度灵敏度系数来计算影响值, 会导致监测值偏大, 因此可以直接采用本文测试出的

温度影响值来进行修正。本文采用 10 组不同中心波长的纤维封装长标距传感器的监测数据, 得到平均修正值为 14.18 pm/°C。测试值可以直接用于纤维封装长标距 FBG 传感器在监测中的温度补偿, 补偿效果要优于参考裸光纤的温度补偿。研究结果可为 BFRP 纤维封装长标距 FBG 传感器在长期的结构健康监测等温度变化剧烈的应用场所下的温度补偿提供参考, 其补偿效果更好, 监测结果更准确。

## 参 考 文 献

- [1] Huang L. High-rise structure health monitoring study based on distributed long-gauge FBG sensing technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2012. 黄磊. 基于分布式长标距 FBG 传感的高耸结构健康监测研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.

- [2] Guo Y G. Monitoring of subway deep foundation pit construction based on long gauge distributed FBG sensing technique[J]. *Urban Mass Transit*, 2013, 16(7): 26-29, 34.  
郭余根. 基于长标距分布式布拉格光纤光栅(FBG)传感的地铁基坑施工监测[J]. *城市轨道交通研究*, 2013, 16(7): 26-29, 34.
- [3] Shen S, Lv H, Ma S L. Damage detection and evaluation for an in-service shield tunnel based on the monitored increment of neutral axis depth using long-gauge fiber Bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1840.
- [4] Zhang J, Tian Y D, Yang C Q, et al. Vibration and deformation monitoring of a long-span rigid-frame bridge with distributed long-gauge sensors[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(2): 678.
- [5] Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jingxiong high-speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210603.  
吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210603.
- [6] Tao Y, Zhang S X. Strain measurement of photoelectric composite cable based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1010004.  
陶冶, 张素侠. 基于光纤布拉格光栅传感器的光电复合缆绳应变测量[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1010004.
- [7] Jia Z A, Qiao X G, Fu H W. Study on temperature sensitivity coefficient of fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2003, 14(5): 453-456.  
贾振安, 乔学光, 傅海威. 光纤光栅温度灵敏度系数研究[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(5): 453-456.
- [8] Li K, Zhou Z A. A fiber Bragg grating temperature sensor with adjustable sensitivity[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(1): 144-147.  
李阔, 周振安. 一种灵敏度系数可调的光纤光栅温度传感器[J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(1): 144-147.
- [9] Ding X D, Zhang Y M, Xia J B, et al. Study on ultralow temperature characteristics of metallic packaging FBG sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 773-777.  
丁旭东, 张钰民, 夏嘉斌, 等. 金属化封装光纤光栅传感器超低温特性研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 773-777.
- [10] Zhang Z J, Shi W K, Gao K, et al. Thermo-optic coefficient and temperature sensitivity of long-period fiber gratings[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 525-528.  
张自嘉, 施文康, 高侃, 等. 热光系数与长周期光纤光栅的温度灵敏度研究[J]. *光学技术*, 2004, 30(5): 525-528.
- [11] Guo Y X, Kuang Y, Xiong L, et al. Sensing and temperature-compensation characteristics of fiber Bragg gratings under different packaging ways[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110601.  
郭永兴, 匡毅, 熊丽, 等. 不同封装方式的光纤光栅传感与温补特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110601.
- [12] Yan W M, Wang J, Chen Y J, et al. Temperature compensation of fiber grating strain sensor and its engineering application[J]. *Railway Standard Design*, 2010, 54(4): 65-67.  
闫维明, 王进, 陈彦江, 等. 光纤光栅应变传感器的温度补偿及其工程应用[J]. *铁道标准设计*, 2010, 54(4): 65-67.
- [13] Chen J, Guo Y X, Zhang L P. A glass-fiber packaged fiber Bragg grating strain sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090601.  
陈剑, 郭永兴, 张礼朋. 一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光栅应变传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090601.
- [14] Wu B T, Wu G, Yang C Q. Parametric study of a rapid bridge assessment method using distributed macro-strain influence envelope line[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 642-663.
- [15] Ren L, Li H N, Hu Z Q, et al. Development and application of FBG strain sensor with enhanced sensitivity in the model vibration experiment[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2008, 19(11): 1437-1441.  
任亮, 李宏男, 胡志强, 等. 一种增敏型光纤光栅应变传感器的开发及应用[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(11): 1437-1441.
- [16] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [17] Li H M. Study on extended application of fiber Bragg grating sensor[D]. Tianjin: Nankai University, 2006.  
李红民. 光纤光栅传感器拓展应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2006.
- [18] Wu C X, Wu F. Principle and application of fiber

- grating sensing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- 吴朝霞, 吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [19] Zhang Z J. Theoretical basis of fiber grating and sensing technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [20] Liu T G, Jiang J F, Liu K. Discrete optical fiber sensing technology and systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2012.
- 刘铁根, 江俊峰, 刘琨. 分立式光纤传感技术与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [21] Xie J F, Zhang H, Zhang G P, et al. Analysis on influence of clad materials on temperature sensitivity of fiber Bragg grating[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2008, 19(9): 1158-1162.
- 谢剑锋, 张华, 张国平, 等. 封装材料性能对光纤布拉格光栅温度灵敏度影响分析[J]. 光电子·激光, 2008, 19(9): 1158-1162.
- [22] Li S Z, Wu Z S. Development of distributed long-gage fiber optic sensing system for structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(2): 133-143.
- [23] Tian S Z, Wen K, Wang D P. Study on damage detection based on long-gage fiber Bragg grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010604.
- 田石柱, 温科, 王大鹏. 基于长标距FBG传感器宏应变技术的损伤识别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010604.
- [24] Wang D P, Pang X R, Tian S Z. Parametric identification of dynamic response based on long-gauge fiber Bragg grating arrays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070602.
- 王大鹏, 庞香润, 田石柱. 基于长标距光纤布拉格光栅阵列动态响应的参数识别[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070602.
- [25] Wei Y, Lu H P, Liu X M, et al. Monitoring technology of continuous girder bridge based on long-gauge fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(10): 2231-2238.
- 魏洋, 卢海鹏, 刘小明, 等. 基于长标距光纤光栅传感器的连续梁桥监测技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2231-2238.