

夹持式温度自补偿光纤布拉格光栅应变传感测试技术

王永洪^{1,2}, 张明义^{1,2}, 张春巍^{1,2}, 白晓宇^{1,2}, 桑松魁¹¹青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033;²青岛理工大学蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033

摘要 鉴于光纤布拉格光栅(FBG)应变测试时对应变和温度交叉敏感的特性,将温度补偿 FBG 结构与应变 FBG 结构串联,采用夹持式封装方式,根据温度 FBG 和应变 FBG 相对波长的变化确定被测结构的应变。实验结果表明:温度 FBG 和应变 FBG 相对波长变化对温度的灵敏度仅为 $0.12 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$,为温度 FBG 和应变 FBG 温度灵敏度的 1.14% 和 1.15%;并实现了应变 FBG 测量的温度自补偿。夹持式温度自补偿 FBG 应变传感测试技术原理简单,实用性强,可被广泛应用于实际工程中。

关键词 光纤光学; 夹持式; 温度自补偿; 光纤布拉格光栅; 传感测试技术

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050605

Strain Sensing Measurement Technology for Fiber Bragg Grating with Holder Type Temperature Self-Compensation

Wang Yonghong^{1,2}, Zhang Mingyi^{1,2}, Zhang Chunwei^{1,2}, Bai Xiaoyu^{1,2}, Sang Songkui¹¹School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;²Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China

Abstract In view of the characteristics of cross-sensitivity between strain and temperature of fiber Bragg grating (FBG), the temperature-compensation FBG structure is in series with strain FBG structure based on holder type packaging. The structure strain can be acquired by the relative wavelength shift between temperature FBG and strain FBG. The experimental results indicate that temperature sensitivity induced by relative wavelength shift is only $0.12 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$, which is 1.14% and 1.15% of temperature sensitivity of temperature FBG and strain FBG. The FBG strain measurement possesses good performances on temperature compensation. The principle of FBG strain sensing measurement technology with holder type temperature compensation is simple, and the operation is convenient. It can be applied widely to practical engineering.

Key words fiber optics; holder type; temperature self-compensation; fiber Bragg grating; sensing measurement technology

OCIS codes 060.3735; 060.2370; 120.6780

1 引言

随着光纤布拉格光栅(FBG)传感技术在实际工

程中的广泛应用^[1-6],对于 FBG 的研究越来越深入。温度和应变的变化都会引起 FBG 波长的变化,剔除温度变化引起的 FBG 波长的变化,准确得到应变变

收稿日期: 2017-09-22; 收到修改稿日期: 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51778312)、山东省重点研发计划(2017GSF16107)、山东省自然科学基金项目(ZR2016EEP06)

作者简介: 王永洪(1984—),男,博士研究生,讲师,主要从事岩土工程测试技术方面的研究。

E-mail: hong7986@163.com

导师简介: 张明义(1958—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事地基基础与岩土工程测试技术方面的研究。

E-mail: zmy58@163.com

化对应的波长变化至关重要^[7-8]。该问题的典型解决方案是温度补偿法,杜彦良等^[9]封装 FBG 时选用负热膨胀系数材料,薛俊华等^[10]利用不同热膨胀系数的内外管封装方式,降低了 FBG 温度响应,但由于没有与 FBG 材料完全匹配的热膨胀系数材料,温度补偿精度受到影响。郑建邦等^[11-12]分别设计了不受温度影响的菱形框架双 FBG 传感结构和圆环式 FBG 结构,实现了温度自补偿。FBG 的交叉敏感也可以采用应变和温度同时测量的方法,郭团等^[13]在光纤同一位置重叠写入不同栅距的 FBG,利用双 FBG 矩阵运算法分别量测出温度和应变的变化,但该方法需要两个性能参数相同的 FBG,成本高但存活率不高。万里冰等^[14]采用温度 FBG 与应变 FBG 串联,得到了只影响波长变化的应变值,但不能完全保证温度 FBG 和应变 FBG 受温度影响一致。本文提出了一种夹持式封装的 FBG 温度自补偿传感器,温度补偿 FBG 与应变 FBG 串联在一起,形成一个 FBG 应变传感结构,采用双层钢管夹持式封装方式,不但实现了温度补偿,而且实现了应变增敏;同时采用封装细管悬空装置使封装内管悬空,解决了

采用不同热膨胀系数和负温度系数材料温度补偿方法稳定性较差的问题。

2 FBG 交叉敏感原理

光纤光栅是基于掺锗、磷等光纤材料非线性吸收效应,利用紫外全息曝光法制成的一种折射率发生周期性变化纤芯内光栅。不同中心波长的光通过 FBG 反射或射出^[6],FBG 工作原理如图 1 所示。反射 FBG 中心波长 λ_B 及其变化量 $\Delta\lambda_B$ 可分别表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}}, \quad (2)$$

式中: n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期; Δn_{eff} 为有效折射率的变化量; $\Delta\Lambda$ 为光栅周期的变化量。

FBG 对应变和温度交叉敏感,当外界应变和温度发生变化时,引起 FBG 中心波长的变化量 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - p_e)\Delta\epsilon + (\alpha_f + \xi)\Delta T], \quad (3)$$

式中: $\Delta\epsilon$ 为应变变化值; ΔT 为温度变化值; p_e 为光栅有效弹光系数; α_f 和 ξ 分别为光栅热膨胀系数和光栅热光系数。

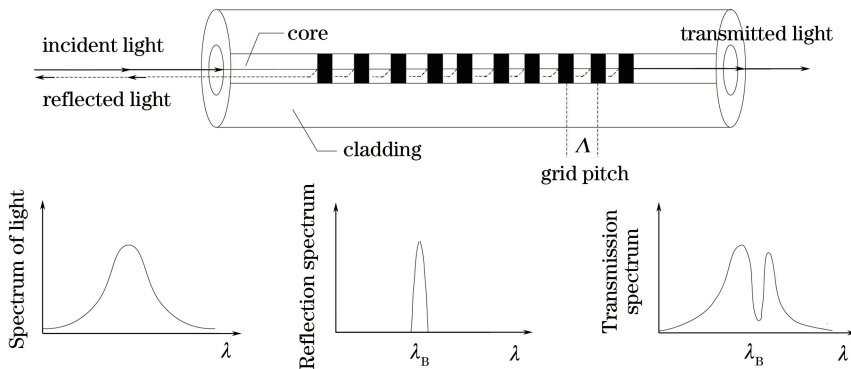


图 1 光纤布拉格光栅工作原理

Fig. 1 Working principle of FBG

3 FBG 温度自补偿原理及结构设计

3.1 FBG 温度自补偿原理

为了解决 FBG 同时受温度与应变影响的问题,将温度补偿 FBG 与应变 FBG 串联在一起,应变 FBG 测量应变,但其同时还受到温度的影响,而温度 FBG 只受温度的影响。根据(3)式,不考虑温度和应变对 FBG 的耦合效应时,FBG 中心波长变化可表示为

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\epsilon \Delta\epsilon + \alpha_T \Delta T, \quad (4)$$

式中: α_ϵ 为 FBG 应变灵敏度系数; α_T 为 FBG 温度灵敏度系数。

由(4)式可知,两根 FBG 的波长变化分别为

$$\Delta\lambda_{B_1} = \alpha_{\epsilon_1} \Delta\epsilon + \alpha_{T_1} \Delta T, \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_{B_2} = \alpha_{T_2} \Delta T. \quad (6)$$

由(5)式和(6)式可以得到引起 FBG 波长变化的应变为

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\lambda_{B_1} - \psi \Delta\lambda_{B_2}}{\alpha_{\epsilon_1}}, \quad (7)$$

式中: $\psi = \alpha_{T_1} / \alpha_{T_2}$ 。

3.2 夹持式 FBG 温度自补偿结构设计

夹持式 FBG 温度自补偿结构示意图如图 2 所示。夹持式 FBG 温度自补偿结构由温度 FBG 结构和应变 FBG 结构串联而成。其中,温度补偿 FBG

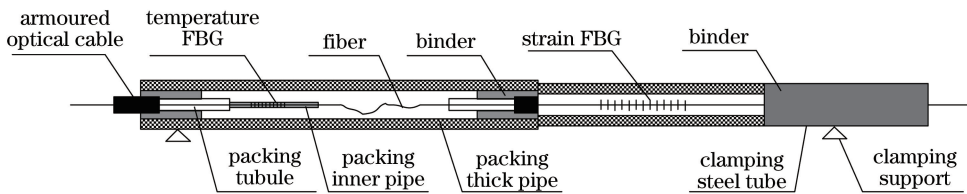


图2 夹持式FBG温度自补偿结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of holder-type FBG with temperature compensation

结构采用双层钢管,其主要结构由封装粗管、封装细管、封装内管、温度FBG、黏结剂及铠装光缆组成。封装粗管主要起保护温度FBG的作用,也可以保证温度FBG与被测结构没有温差。该夹持式温度自补偿传感器是将温度补偿FBG和应变测量FBG同时封装在钢管内部,并且光栅两端都用黏结剂固定,把传感器固定在被测结构上,当被测结构受到外力作用时,整个钢管也受到力的作用。温度补偿FBG两端固定于钢管内部,为了避免补偿光栅因受到力的作用而导致测量结果出现偏差,将封装细管悬空并将封装内管悬空,保证补充光栅不会受到力的作用,封装细管悬空装置如图3所示。封装内管主要起封装裸FBG的作用,提高了FBG的温度灵敏性。应变FBG结构主要由夹持支座、夹持钢管、应变FBG和黏结剂组成,一端与温度补偿FBG结构连接,另一端通过黏结剂把FBG封装在钢管内。夹持式FBG温度自补偿结构两端可以通过夹持支座固定

在被测构件上,构成夹持式传感器。在未知温度变化方向和应变变化方向的实际应用场合下,为了避免温度补偿FBG和应变FBG的反射谱混淆,温度补偿FBG和应变FBG采用不同初始波长,温度补偿FBG初始波长设定为1544.384 nm,应变FBG初始波长设定为1541.031 nm,保证测试前和测试过程中两波长不混淆。温度补偿FBG左端铠装光缆采用橙色,应变FBG右端铠装光缆采用蓝色,从而进一步对温度和应变FBG进行区分。夹持式FBG温度自补偿传感器实物图如图4所示。

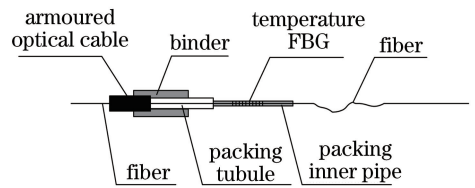


图3 封装细管悬空装置

Fig. 3 Packing-tubule hanging device

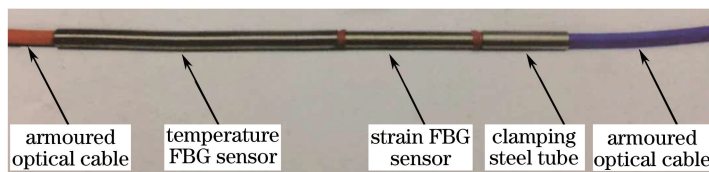


图4 夹持式FBG温度自补偿传感器实物图

Fig. 4 Photo of holder-type FBG sensor with temperature compensation

4 标定实验与结果分析

对FBG温度自补偿传感器加热,测试温度FBG结构和应变FBG结构的温度响应。单独测试温度改变导致传感器中温度FBG和应变FBG的波长变化,温度FBG和应变FBG的标定结果如图5所示,拟合系数 R^2 均为0.9999,线性度较好。温度改变时传感器中FBG串联后相对波长的变化如图6所示。

由实验结果可知,温度FBG和应变FBG受温度变化影响系数分别为 $0.01052 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 和

$0.01046 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,与裸FBG的理论影响系数 $0.0105 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 符合得非常好。温度FBG和应变FBG受温度变化影响系数非常接近,说明该结构满足实验要求。两者串联后,在 $10 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,相对波长产生的变化只有 $0.006 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,即两者的相对波长变化受温度的影响仅为 $0.12 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,远小于其单独测试下的变化值,仅为温度FBG和应变FBG受温度变化影响系数的1.14%和1.15%。应变FBG结构受到外力时,应变FBG和温度FBG波长的不同是由应变引起的。

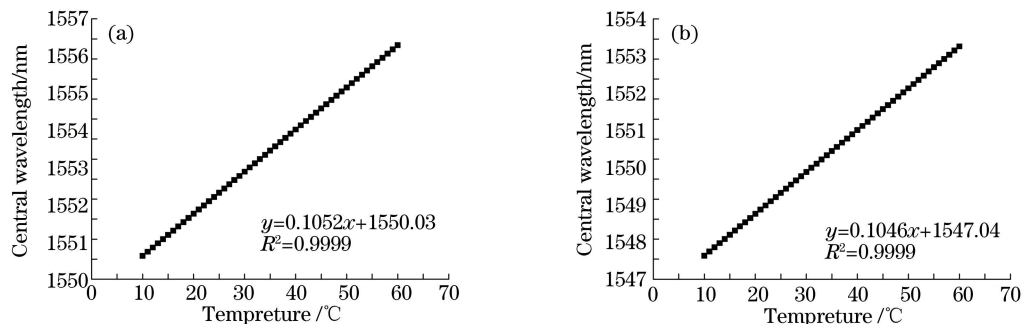


图5 (a)温度FBG标定;(b)应变FBG标定

Fig. 5 (a) Calibration results of temperature FBG; (b) calibration results of strain FBG

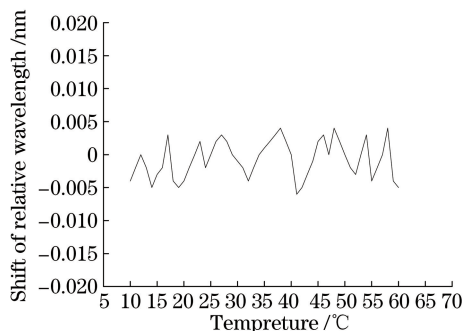


图6 温度FBG和应变FBG串联后相对波长的变化

Fig. 6 Shift of relative wavelength after connecting temperature FBG and strain FBG

5 结 论

将温度补偿FBG结构和应变FBG结构串联,形成一个FBG应变传感结构,根据两者的相对波长的变化,确定出应变FBG的实际变化,从而实现温度自补偿。采用双层钢管夹持式封装方式,不但实现了温度补偿,而且可以实现应变增敏。利用封装细管使温度FBG封装内管悬空,避免了温度FBG波长受外力作用的影响。FBG两端通过夹持支座固定在被测构件上,温度标定实验下的夹持式FBG温度自补偿结构受温度变化的影响系数仅为 $0.12 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$,实现了FBG测量的温度自补偿技术。装置在实际工程中安装方便,提高了存活率和测量精度,降低了成本。

参 考 文 献

[1] Wei G Q, Shi B, Hu S, *et al.* Several key problems in tunnel construction monitoring with FBG [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 571-576.
魏广庆, 施斌, 胡盛, 等. FBG在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, 31

(4): 571-576.

- [2] Zhu H H, Yin J H, Jin W, *et al.* Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 109-115.
朱鸿鹄, 殷建华, 靳伟, 等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 109-115.
- [3] Zhang W H, Jiang J F, Wang S, *et al.* Fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206001.
张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206001.
- [4] Guo Y X, Zhang D S, Zhou Z D, *et al.* A novel surface-mounted FBG strain sensor and its application in highway bridge engineering [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(3): 309-314.
郭永兴, 张东生, 周祖德, 等. 表面式FBG应变传感器及其在高速公路桥梁工程中的应用[J]. 光电子·激光, 2015, 26(2): 309-314.
- [5] Sun S H, Yu Y L, Li H, *et al.* Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505002.
孙诗惠, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505002.
- [6] Yang M, Liu X H, Liu W, *et al.* Applied research of optical fiber sensor in oil and gas pipe corrosion monitoring [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020604.
杨牧, 刘秀红, 刘伟, 等. 光纤光栅传感网络在油气出地管内腐蚀监测的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020604.
- [7] Du Y, Si J H, Chen T, *et al.* Quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating [J].

- Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 100606.
- 杜勇, 司金海, 陈涛, 等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 100606.
- [8] Ren L. The application of fiber Bragg grating technology in structure health monitoring [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- 任亮. 光纤光栅传感技术在结构健康监测中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [9] Du Y L, Liu C X, Li J Z. Investigation into new optical-fiber-grating strain sensors based on temperature compensation [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6(1): 19-22.
- 杜彦良, 刘晨曦, 李剑芝. 具有温度自补偿功能的新颖光纤光栅应变传感器的研究[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(1): 19-22.
- [10] Xue J H, Li C, Chen F Y, *et al.* Research of double metal tube type fiber Bragg grating strain sensor with low temperature sensitivity [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10): 1387-1391.
- 薛俊华, 李川, 陈富云, 等. 低温敏的双管式光纤Bragg光栅应变传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1387-1391.
- [11] Zheng J B, Liu J, Ren J, *et al.* A novel temperature-independent double fiber Bragg grating strain sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6): 2411-2413.
- 郑建邦, 刘嘉, 任驹, 等. 一种免受温度影响的双光纤光栅应变传感器[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2411-2413.
- [12] Liang L, Cao S, Qiu L, *et al.* High sensitivity FBG strain sensor with temperature compensation [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, 28(7): 695-699.
- 梁磊, 曹珊, 仇磊, 等. 一种温度自补偿的高灵敏度光纤光栅应变传感器[J]. 光电子·激光, 2017, 28(7): 695-699.
- [13] Guo T, Qiao X G, Jia Z A, *et al.* Technology of fiber gratings sensing and its applications in petroleum industry [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18(3): 208-213.
- 郭团, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤光栅传感技术及其在石油工业中的应用[J]. 测试技术学报, 2004, 18(3): 208-213.
- [14] Wan L B, Wang D F. Research on temperature compensation of fiber Bragg grating strain sensor based on reference grating [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2006, 17(1): 51-52.
- 万里冰, 王殿富. 基于参考光栅的光纤光栅应变传感器温度补偿[J]. 光电子·激光, 2006, 17(1): 51-52.