

光纤布拉格光栅钢筋腐蚀传感器^{*}

宋世德¹, 张作才¹, 王晓娜²

(1. 大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室 大连, 116023)

(2. 大连理工大学物理与光电工程学院 大连, 116023)

摘要 基于钢筋混凝土中钢筋锈胀和光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, 简称 FBG)应变、温度测量原理, 设计了一种灵敏度较高的 FBG 钢筋腐蚀传感器。传感器主要由两个 FBG(FBG-1, FBG-2)和带有轴向通孔、轴向通槽、环形槽及盲孔的钢筋件组成, FBG-1 用于监测钢筋件的锈胀应变, FBG-2 用作温度补偿器。为了提高传感器的成活率, 在 FBG-1 外紧密包裹一层滤纸, 并用水泥砂浆封装。此外, 推导了钢筋件的腐蚀率计算公式, 根据光纤解调仪采集的波长变化值可以计算得到钢筋件的腐蚀率。依据法拉第电解定律设计了电化学加速腐蚀实验, 探究传感器的工作性能。实验结果表明, 该传感器能够监测到 0.7% 以内的质量腐蚀率, 灵敏度较高, 且测量范围大于 5%。该传感器能够有效监测混凝土中钢筋的早期腐蚀过程, 准确估算保护层开裂时间, 具有实际工程应用价值。

关键词 光纤布拉格光栅; 光纤传感器; 钢筋腐蚀; 温度补偿

中图分类号 TP212; TH74

引 言

钢筋混凝土结构具有良好的耐久性、整体性和低廉的造价, 成为应用最普遍的建筑结构形式之一。但是, 当钢筋混凝土结构受到海水、除冰盐和防冻剂的侵蚀时, 钢筋混凝土结构的耐久性会因为钢筋腐蚀而大大降低^[1-2]。钢筋腐蚀是一个电化学过程^[3], 当处在高碱性的混凝土孔隙液中时, 钢筋表面会形成一层致密的水化氧化物——钝化膜^[4-5]。一旦失去钝化膜的保护, 在具备氧气和电解液条件下, 钢筋表面被氧化腐蚀。实时监测混凝土中钢筋的腐蚀程度, 并及时采取有效的预防和加固措施具有重要意义。

常用的钢筋腐蚀检测方法有剔凿检测法、钻孔取样法、半电池电位法、混凝土电阻率测量法和综合分析判断法^[6]。剔凿检测法和钻孔取样法能够准确地检测到钢筋腐蚀率, 但会破坏结构的完整性; 半电池电位法、混凝土电阻率测量法和综合分析判断法只能定性判断钢筋腐蚀程度。FBG 腐蚀传感器以新型材料 FBG 为核心组成部分, 具有抗电磁干扰、耐腐蚀、准分布式传感和长距离传感等优势^[7],

受到了国内外学者的广泛关注和研究^[8-9]。

为提高 FBG 腐蚀传感器的灵敏度和成活率, 有效监测混凝土中钢筋的早期腐蚀, 笔者提出了一种由 2 根 FBG 和 1 个钢筋件组成的 FBG 钢筋腐蚀传感器, 2 根 FBG 分别用于监测钢筋锈胀应变和温度变化。FBG-1 直接与钢筋件紧密接触, 并剥除光纤固定点处的涂覆层, 从而提高传感器灵敏度。在 FBG-1 线圈外紧密包裹一层滤纸并用水泥砂浆封装保护, 使传感器能够直接用于粗放的实际工程, 大大提高传感器的成活率。

1 FBG 传感原理

由于掺铒光纤具有较好的光敏性, 经过紫光激光器曝光处理的光纤纤芯会形成一段折射率变化周期均匀的光栅段, 即为光纤布拉格光栅(FBG)。对于宽谱入射光源, 当光波经过光栅段时, 满足一定波长条件(Bragg 衍射条件)的光将被反射回去, 其余光则继续向前传输, 因此 FBG 相当于一段光学窄带滤波器。通过采集反射光的波长就可以实现被测物理量的监测。

布拉格衍射条件为

^{*} 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT15QY36); 国家青年科学基金资助项目(11201023); 大连科技计划资助项目(2013A15GX049)

收稿日期: 2017-01-03; 修回日期: 2017-03-10

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

其中: λ 为 FBG 的反射光波长; n_{eff} 为 FBG 的纤芯有效折射率; Λ 为光栅栅距。

应变和温度是直接影响 FBG 中心波长的物理量,且应变和温度变化引起的 FBG 中心波长偏移是相互独立的,应变和温度与 FBG 中心波长偏移之间的关系^[10]可表示为

$$\Delta\lambda = [(1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T]\lambda \quad (2)$$

其中: λ 为 FBG 的初始中心波长; $\Delta\lambda$ 为中心波长偏移量; ϵ 为整个光栅段的轴向应变; P_e 为 FBG 的有效弹光系数; α 为 FBG 的热膨胀系数; ξ 为 FBG 的热光系数; ΔT 为温度变化量。

可以看出,应变和温度对波长的作用可以线性叠加^[11]。取

$$k_1 = (1 - P_e) \lambda \quad (3)$$

$$k_2 = (\alpha + \xi)\lambda \quad (4)$$

则 FBG 的中心波长偏移可简化为

$$\Delta\lambda = k_1\epsilon + k_2\Delta T \quad (5)$$

其中: k_1 为 FBG 的应变敏感系数; k_2 为 FBG 的温度敏感系数。

对于 $\lambda = 1\,550\text{ nm}$ 的常用 FBG, k_1 的取值为 $1.2\text{ pm}/\mu\epsilon$ ^[12]。

2 实验过程

2.1 FBG 钢筋腐蚀传感器的工作原理

钢筋腐蚀后体积变大,通常情况下钢筋的锈胀系数取 $2\sim 6$ ^[13]。将 FBG 在钢筋件表面紧密缠绕数圈,保持 FBG 处于张拉状态;温度补偿用 FBG 位于钢筋件的轴向通孔内,保持其处于松弛状态,如图 1 所示。当钢筋件腐蚀膨胀时,FBG 产生拉应变,进而引起中心波长偏移。由于 FBG 对应变和温度同时敏感,需在 FBG 钢筋腐蚀传感器内设置温度补偿

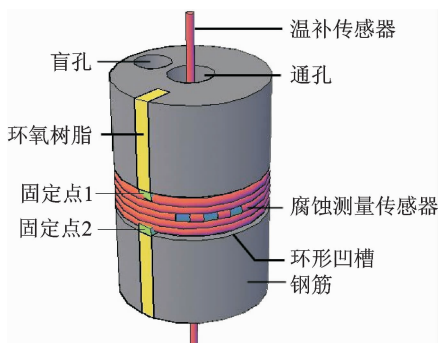


图 1 传感器的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the sensor

器,用于温度补偿的 FBG 始终处于松弛状态,只受温度影响。实验采用 FBG-SMF 型号的光纤布拉格光栅,使用 MOI 公司生产的分辨率为 1 pm 的 SM130 光纤光栅解调仪实时采集反射波长。

2.2 FBG 钢筋腐蚀传感器的制作

FBG 钢筋腐蚀传感器的制作过程如下:a. 以实际工程中所用结构钢筋为原材料加工钢筋件,钢筋件的直径为 20 mm ,高度为 30 mm ,在钢筋件的通槽内灌注环氧树脂;b. 将 FBG-1 在钢筋件表面的环形槽内紧密缠绕 4 圈,保持一定拉力的情况下依次将 FBG-1 的两端固定于固化的环氧树脂上;c. 将 FBG-2 封装在毛细金属管中,起到增敏的作用^[14],并使 FBG-2 始终处于松弛状态;d. 将封装好的温度补偿传感器放置在钢筋件的轴向通孔中,轴向通孔密封防止毛细金属管腐蚀;e. 用铠装光缆将 FBG 的尾纤引出,并将导线固定于钢筋件的盲孔。制作好的 FBG 钢筋腐蚀传感器如图 2 所示。



图 2 传感器的实物图

Fig. 2 The packaged FBG steel corrosion sensor

2.3 FBG 温度敏感系数的标定

为了标定 FBG 的温度敏感系数,笔者将 FBG 钢筋腐蚀传感器放入温控箱中,依次设定恒温箱的温度为 $25, 35$ 和 $45\text{ }^\circ\text{C}$,每个温度值恒温 30 min 后使用 SM130 光纤光栅解调仪采集两个 FBG 的中心波长,结果如表 1 所示。 $T, \lambda_1, \lambda_2, k_{T1}$ 和 k_{T2} 分别代表温度、FBG-1 波长、FBG-2 波长、FBG-1 温度敏感系数和 FBG-2 温度敏感系数。

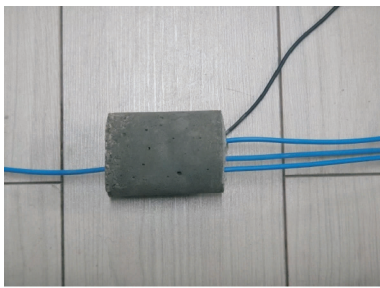
表 1 FBG 的温度敏感系数

Tab. 1 Temperature sensibility coefficient of the FBG

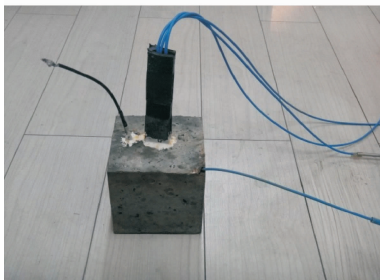
$T /$ $^\circ\text{C}$	$\lambda_1 /$ nm	$\lambda_2 /$ nm	$k_{T1} /$ $(\text{nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$k_{T2} /$ $(\text{nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
25	1 552.26	1 556.24		
35	1 552.44	1 556.40	0.017 3	0.008 0
45	1 552.60	1 556.48		

2.4 FBG 钢筋腐蚀传感器的封装

为了保护传感器,提高成活率,将 FBG 钢筋腐蚀传感器封装在水泥砂浆中,砂浆的配合比为水泥:砂:水=1:1.57:0.37,砂浆件的直径为 45 mm,高为 60 mm,如图 3(a)所示。为了确保钢筋件的保护层厚度,模拟实际工程中钢筋的腐蚀环境,将砂浆件封装在尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土试件中,混凝土的配合比为水泥:砂:石子:水=1:1.57:2.46:0.37,混凝土的极限强度为 30 MPa,如图 3(b)所示。封装完成后,将混凝土试件在标准养护条件下养护 23 天。



(a) 砂浆试件
(a) Mortar sample



(b) 混凝土试件
(b) Concrete specimen

图 3 传感器的封装

Fig. 3 The corrosion sensor package

2.5 电化学加速腐蚀实验

为了研究 FBG 钢筋腐蚀传感器的工作性能,建立了如图 4 所示的实验装置。在该系统中,钢筋件为阳极,碳棒为阴极,电解液为 5% 的氯化钠溶液。恒定电流为 20 mA,采用 SM130 光纤光栅解调系统实时采集 FBG 中心波长,采集频率为 1 Hz。

3 实验结果

3.1 试件的损伤程度

对试件通电直到 FBG 中心波长不再上升,持续通电 190.5h 后实验结束。实验结束后发现混凝土

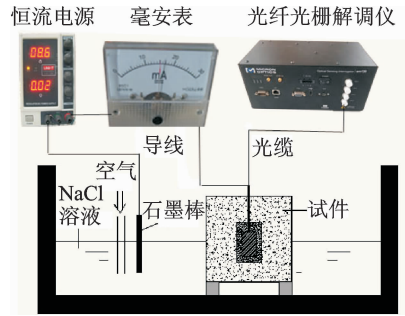


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental equipment

试件底面以及侧面有明显的贯通裂缝,且裂缝周围锈迹明显,说明钢筋件已经锈蚀严重,如图 5 所示。



图 5 混凝土试件上的裂缝

Fig. 5 Cracks on concrete specimen

破开混凝土试件后发现铁锈已经渗透到裂缝中,且钢筋件与 FBG 线圈之间充满了铁锈,FBG 能够感应到锈胀作用,如图 6 所示。取出钢筋件后发现 FBG 固定点依然牢固,钢筋件腐蚀也比较均匀。



图 6 钢筋件的腐蚀程度

Fig. 6 Corrosion of reinforcement

3.2 腐蚀率计算公式的推导

钢筋件腐蚀越严重体积膨胀越大,钢筋件表面的 FBG 拉应变也越大,笔者根据 FBG 的中心波长偏移反向估算钢筋件的质量腐蚀率。为便于公式推导,假设:a. 钢筋件腐蚀均匀,横截面始终保持为圆形截面;b. 铁锈没有流失,始终位于 FBG 线圈内侧;c. 忽略 FBG 的直径大小;d. 钢筋件的初始直径为 D_0 ,腐蚀后锈层外侧直径为 D_1 ,清洗掉锈层后钢筋

件的净直径为 D_2 , 钢筋的密度为 ρ , 钢筋的锈胀系数为 η , FBG 缠绕圈数为 n 。钢筋件的质量腐蚀率计算公式的推导过程如下。

钢筋件表面的 FBG 中心波长漂移为

$$\Delta\lambda_1 = k_1 \varepsilon + k_{T1} \Delta T \quad (6)$$

用于温度补偿的 FBG 中心波长漂移为

$$\Delta\lambda_2 = k_{T2} \Delta T \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可得钢筋表面的 FBG 拉应变与中心波长之间的关系为

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 \frac{k_{T1}}{k_{T2}}}{k_1} \quad (8)$$

钢筋件的质量腐蚀率为

$$\rho_m = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)\rho}{\pi D^2 \rho \pi} = 1 - \frac{D_2^2}{D^2} \quad (9)$$

钢筋件表面的 FBG 拉应变为

$$\varepsilon = \frac{n\pi(D_1 - D)}{n\pi D} = \frac{D_1}{D} - 1 \quad (10)$$

钢筋的锈胀系数与钢筋直径之间的关系为

$$\eta = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{\pi(D^2 - D_2^2)} \quad (11)$$

将式(10)、式(11)带入式(9), 化简得

$$\rho_m = \frac{(1 + \varepsilon)^2 - 1}{\eta - 1} \quad (12)$$

通过式(8)和式(12)就可以估算钢筋件的质量腐蚀率。加速腐蚀条件下铁锈氧化不充分, 钢筋的锈胀系数较小, 这里假设 η 恒为 1.19^[15], 则可以计算得到钢筋件的质量腐蚀率, 如图 7 所示。

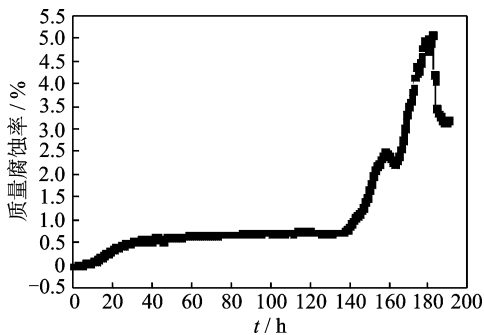


图7 钢筋件的质量腐蚀率

Fig. 7 Mass loss rate of reinforcement

从图7可以看出: 钢筋件的腐蚀率在 0~30 h 内上升至 0.7% 左右, 说明该传感器能够监测早期钢筋腐蚀, 具有较高的灵敏度; 在 30~140 h 内钢筋件的质量腐蚀率上升缓慢是因为钢筋周围的混凝土保护层出现内部裂缝, 部分铁锈不断进入到裂缝中, 通过该传感器能够估算保护层开始开裂的时间; 当保护层出现贯通裂缝, 电解液和空气直接到达钢筋

表面, 钢筋件的腐蚀速率将大大加快, 铁锈产生的速率将大大超过溢出 FBG 线圈的速率, 中心波长开始快速上升; 当通电 180 h 左右时, FBG 中心波长出现短暂波动后迅速下降, 且混凝土试件的裂缝周围出现大量铁锈, 说明保护层出现较大的裂缝。传感器测得的最大质量腐蚀率约为 5%, 由于部分铁锈溢出 FBG 线圈, 所以可以推测钢筋件的实际腐蚀率要大于 5%, 传感器的测量范围也较大。

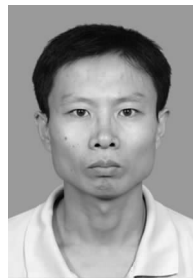
4 结束语

通过实验结果可知, 该传感器除了具有 FBG 的优点外, 还具有以下优点: a. 实现了温度自补偿, 且温度补偿器位于钢筋件内部, 受到很好的保护; b. 体积小, 结构简单, 对被测结构的影响较小; c. 由于 FBG 直接与钢筋件紧密接触, 传感器具有较高的灵敏度, 能够有效监测混凝土中钢筋的早期腐蚀; d. 得益于滤纸和水泥砂浆的保护, 传感器的成活率大大提高, 能够直接用于粗放的实际工程当中; e. 由于混凝土开裂前后 FBG 的波长变化率不同, 通过该传感器能够估算混凝土保护层开裂的时间; f. 传感器的测量范围大于 5%, 足以满足工程需求。后续工作主要是优化传感器的结构, 减少混凝土保护层开裂后的铁锈流失, 提高后期传感器测量结果的准确度, 以及开发一套自动监测和预警系统。

参 考 文 献

- [1] 肖小琼. 锈蚀钢筋混凝土粘结性能试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [2] 戴靠山, 袁迎曙, 杨广. 人工气候加速锈蚀后钢筋混凝土粘结性能试验研究[J]. 混凝土, 2004, 11: 45-48. Dai Kaoshan, Yuan Yingshu, Yang Guang. Bond behavior between concrete and steel bars corroded by the artificial climate accelerated corrosion technique[J]. Concrete, 2004, 11: 45-48. (in Chinese)
- [3] Martinez I, Andrade C. Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures[J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(8): 545-554.
- [4] Dantan N, Habel W R, Wolfbeis O S, et al. Fiber optic pH sensor for early detection of danger of corrosion in steel-reinforced concrete structures [C]// Smart Structures and Materials 2005: Smart Sensor Technology and Measurement Systems. San Diego: Proceedings of

- the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2005;274-284.
- [5] Nguyen T H, Venugopala T, Chen Shuying, et al. Fluorescence based fibre optic pH sensor for the pH 10-13 range suitable for corrosion monitoring in concrete structures [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2014, 191:498-507.
- [6] Li Weijie, Ho S C M, Song Gangbing. Corrosion detection of steel reinforced concrete using combined carbon fiber and fiber Bragg grating active thermal probe[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(4):1-9.
- [7] Zhao Xuefeng, Gong Peng, Qiao Guofu, et al. Brillouin corrosion expansion sensors for steel reinforced concrete structures using a fiber optic coil winding method [J]. *Sensors*, 2011, 11(11):10798-10819.
- [8] Zhao Xuefeng, Cui Yanjun, Wei Heming, et al. Research on corrosion detection for steel reinforced concrete structures using the fiber optical white light interferometer sensing technique [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(6):1-8.
- [9] Zhang Ning, Chen Wei, Zheng Xing, et al. Optical sensor for steel corrosion monitoring based on etched fiber Bragg grating sputtered with iron film [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(6):3551-3556.
- [10] 黄锐, 蔡海文, 瞿荣辉, 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, 32(2):232-235.
Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui, et al. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(2):232-235. (in Chinese)
- [11] 孙丽, 孙茜茜, 陈晨. 基于光纤光栅的钢筋腐蚀监测方法[J]. *沈阳建筑大学学报:自然科学版*, 2013, 29(5):919-924.
Sun Li, Sun Qianqian, Chen Chen. The preliminary study of steel corrosion monitoring based on fiber Bragg grating[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu Univer-*
- sity: Natural Science*, 2013, 29(5):919-924. (in Chinese)
- [12] 李俊, 吴瑾, 高俊启. 一种监测钢筋腐蚀的光纤光栅传感器的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(1):283-286.
Li Jun, Wu Jin, Gao Junqi. Study of an optical fiber grating sensor for monitoring corrosion of reinforcing steel[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(1):283-286. (in Chinese)
- [13] Kung P, Comanici M I. Monitoring corrosion in reinforced concrete structures [C] // *Sensors for Extreme Harsh Environments*. Baltimore: Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2014:1-8.
- [14] 闫光, 辛璟涛, 陈昊, 等. 预紧封装光纤光栅温度传感器传感特性研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(5):967-972.
Yan Guang, Xin Jingtao, Chen Hao, et al. Sensing properties of fiber grating temperature sensor package preload[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(5):967-972. (in Chinese)
- [15] Li Peng, Song Shide, Wang Xiaona, et al. Research on a new type of fiber Bragg grating based corrosion sensor [C] // *2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications*. Beijing: Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2015:1-10.



第一作者简介:宋世德,男,1974年9月生,博士、讲师。主要研究方向为新材料的应用、光纤传感器及其在结构健康监测中的应用。曾发表《一种基于光纤布拉格光栅的金属腐蚀传感器》(《光电子·激光》2015年第26卷第10期)等论文。

E-mail: peterssd@163.com