

文章编号:1004-4213(2011)05-0690-4

光纤光栅锈蚀传感器在不同湿度下的特性研究

蔡汉莉^a, 胡文彬^a, 张艳晓^a, 丁莉芸^a, 陈伟^b

(武汉理工大学 a. 光纤传感技术国家工程实验室; b. 材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 钢结构的锈蚀监测对于钢结构安全的早期预警非常重要. 本文提出了一种制备布喇格光纤光栅锈蚀传感器的方法, 并研究了该传感器在不同湿度环境下的传感规律. 结合磁控溅射和电镀的方法在光栅侧表面制备了 Fe-C 合金传感膜; 利用扫描电子显微镜观察其侧表面形貌; 检测在相对湿度 60% 和 99% 下中心波长的变化, 进而分析该光纤光栅探头在不同湿度下的传感规律. 实验和数据分析结果表明: 在相对湿度为 60% 时, 锈蚀进程缓慢, 随着时间的推移波长呈线性化增加; 相对湿度达到 99% 时光栅光谱出现多峰现象. 据此得出: 一定湿度条件下, 该传感器可监测锈蚀进展; 当环境湿度较高(达到 99%) 时, 该传感器可用于锈蚀出现的早期预警.

关键词: 光纤光栅; 锈蚀传感器; 湿度条件; 波长调制

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114005.0690

0 引言

钢筋混凝土是一种重要的基本建筑材料, 它广泛应用于结构工程、桥梁、港口、铁路、水利等基本建设工程. 其中, 水下混凝土构件由于长期处于潮湿的环境下, 钢筋容易发生锈蚀从而过早出现剥蚀、损坏, 严重影响混凝土的耐久性. 因此, 掌握混凝土结构中钢筋的锈蚀状况, 以便及时采取预防措施, 对延长混凝土结构的使用寿命非常有意义.

传统的锈蚀监测方法包括目测法、机械试验、钻孔取样法^[1], 以及电化学方法. 由于混凝土结构内部钢筋所处环境特殊, 使传统腐蚀监测方法的应用存在较大局限性^[2]. 光纤传感器以其抗电磁干扰、防爆绝缘、体积小等特点^[3], 日益受到重视. Christopher K. Y. Leung^[4]、S. A. Wade^[5]、董飒英^[6] 等都对光纤锈蚀传感器做了大量研究. 光纤的输出光能量或偏振态与该点局部工况条件有依赖关系, 从理论上可以弥补一些传统监测方法所存在的缺点, 但目前为止, 只能定性判断腐蚀情况.

与普通光纤传感技术相比, 光纤光栅传感技术具有波长调制、分辨率高、可进行分布式测量、易于施工布设等特点. 严云^[7]、阳莎^[8] 等人利用光纤光栅传感技术进行了相关研究, 且均取得一定成果, 但也有其自身的不足. 本文着重研究光纤光栅锈蚀传感

器在不同湿度环境下的传感规律.

1 实验原理

1.1 光纤光栅的传感机理

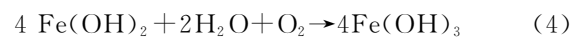
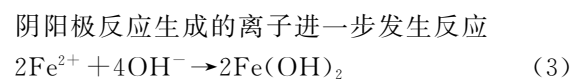
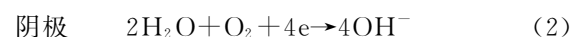
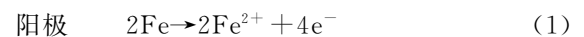
光纤光栅反射的中心波长即布喇格波长, 由光栅的条纹周期和有效折射率决定. 满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

式中 n_{eff} 是光芯的有效折射率, Λ 为光栅栅距, 所有引起光栅布喇格波长漂移的外界因素都能使用光纤光栅进行检测.

1.2 光纤光栅锈蚀传感器的原理

钢铁在潮湿空气里, 表面因吸附作用会覆盖一层极薄的水膜, 水微弱电离产生少量 H^+ 和 OH^- , 空气中还溶解少量 CO_2 . 若表面形成的电解质膜呈弱酸性或中性时, 则发生如下吸氧腐蚀.



阳极生成的 Fe^{2+} 向混凝土内扩散遇到氢氧根离子, 立即生成沉淀 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 又进一步氧化成“铁锈”. 这是一种完全丧失钢材原有力学性能的分化物, 造成结构钢筋断面面积的减损, 其体积

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50802069, No. 50802067)资助

第一作者: 蔡汉莉(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤敏感传感材料. Email: caihanli1987@163.com

通讯作者: 胡文彬(1975-), 女, 助理研究员, 主要研究方向为光纤传感敏感材料和微加工. Email: w. hu. whut@gmail.com

收稿日期: 2010-11-15; **修回日期:** 2011-02-21

为铁体积的 2~6 倍,产生后会导致混凝土保护层开裂、剥落,同时促使腐蚀加快发展^[9].

基于锈蚀引起的体积膨胀,本文提出一种表面镀铁的光纤光栅,将其用于锈蚀监测.文中将该传感器置于模拟锈蚀环境下加速锈蚀,通过分析数据揭示该传感器与混凝土结构中钢筋锈蚀程度间定量或定性的关系.

光纤光栅的波长同时受温度影响,因此采用参考光纤光栅进行温度补偿的方法消除温度的干扰.当温度和应变同时作用在光纤光栅上时,波长变化相对于光纤光栅波长可表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon + [(1 - P_e)\alpha + \xi]\Delta T \quad (5)$$

式中: P_e 为光纤有效弹光系数, ϵ 为光纤应变系数, α 为光纤布喇格光栅的热膨胀系数, ξ 为光纤热光系数, ΔT 为温度差;第一部分表示光纤光栅的轴向压力效应,第二部分表示光纤光栅的热效应(包括材料的热膨胀和热光效应).

假设光纤光栅的压力效应只受锈蚀力影响,则 ϵ_{corr} 表示由锈蚀力引起的应变系数,则式(5)变为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_{\text{corr}} + (1 - P_e)\epsilon_T + \xi\Delta T \quad (6)$$

为了消除光纤光栅的热光效应,假设参考光纤光栅的波长 λ_{ref} 只受温度影响,则式(6)变为

$$\Delta\lambda_{\text{ref}}/\lambda_{\text{ref}} = (1 - P_e)\epsilon_T + \xi\Delta T \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得到温度补偿后由锈蚀力引起的光纤光栅的波长漂移为

$$\Delta\lambda_{\text{corr}} = \Delta\lambda_B - \Delta\lambda_{\text{ref}}\lambda_B/\lambda_{\text{ref}} \quad (8)$$

2 实验

2.1 光纤光栅表面预处理

光纤光栅外面包有一层保护层,利用手工刀具除去该保护层.在镀膜之前,采用酒精棉球小心擦拭裸纤数次,增强光纤光栅与膜层间的结合力.

2.2 光纤光栅表面金属化

铁材质疏松,并且与石英玻璃亲和力和力差,因此在光纤光栅上制备铁膜并不容易.本实验先用真空磁控溅射法在已去涂覆层的光纤光栅表面沉积一层 Ag 膜(100~150 nm),控制其厚度小于光波波长,作为导电层,再于 Ag 膜上电镀铁膜^[10].

实验采用的是 ION'X-3_902X 型号的真空磁控溅射设备,靶材为银靶,靶材与光纤光栅距离为 15 cm,当真空度为 1×10^3 Pa 时充入氩气,氩气压为 0.5 Pa,溅射功率为 100 W,沉积速率为 0.24 nm/s.

2.3 光纤光栅表面电镀

采用的电镀装置是普通直流电源,阳极为石墨电极,阴极为已金属化的光纤光栅,电镀液的组成

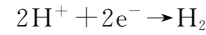
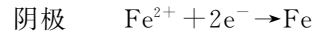
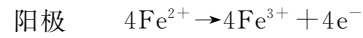
如表 1.

表 1 电镀液的成分

Table 1 Composition of electroplating solution of Fe-C film

FeSO ₄ · 7H ₂ O/ (g · L ⁻¹)	Citric acid/ (g · L ⁻¹)	Ascorbic acid/ (g · L ⁻¹)	pH	I/ (mA · cm ⁻²)
40	1.2	3.0	2.5	30

电镀过程中的化学反应



电镀 30 min 后,铁膜的厚度为 15~23 μm . 电镀需在较强的酸性环境下发生反应. Fe^{3+} 在 $\text{pH} > 3$ 时几乎完全水解,阳极反应化学平衡右移,导致电镀速度过快出现镀层不均匀等问题.经上述过程后,光纤光栅侧表面有一层银膜及在其上电镀的铁膜.

2.4 参考光纤光栅

取普通光纤光栅,不对其做任何处理,与镀铁光纤光栅放置于相同的实验环境中,同时监测参考光纤光栅与镀铁光纤光栅的波长.

2.5 光纤光栅铁膜的加速锈蚀实验

本实验的模拟锈蚀环境是相对湿度分别为 60% 和 99%、温度均为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的养护室,对比不同湿度对镀铁光纤光栅波长的影响,实验周期 27 天.

选取中心波长分别为 1 294 nm、1 301 nm、1 309 nm 的光纤光栅各 4 根,将三根不同中心波长的光纤光栅熔接在一起,共 4 组样品,以 2 组为单位均匀、无重叠地平摊在两个塑料托盘内,使彼此不受影响,再将托盘分别放入两个湿度环境下(如图 1).

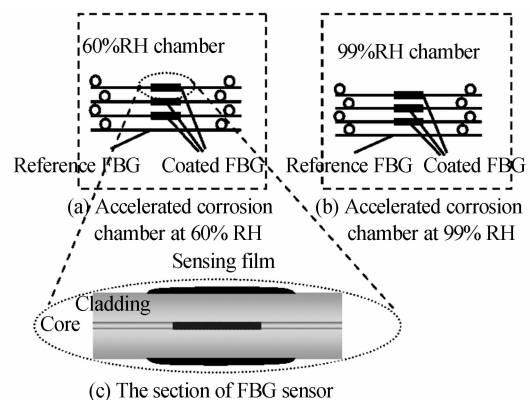


图 1 两种湿度下的实验图和光纤光栅锈蚀传感器的剖面图

Fig. 1 Accelerated corrosion chamber at different humidities and FBG sensor

实验用于检测光纤光栅中心波长的仪器是 AQ6370B 光谱分析仪,其可测的中心波长范围是 600~1 700 nm.

3 实验结果与讨论

3.1 镀铁光纤光栅的表面特征

用扫描电子显微镜(JSM-5610LV)观察光纤光栅镀铁后、在60%RH和99%RH环境下锈蚀27天后的表面形貌(如图2)。

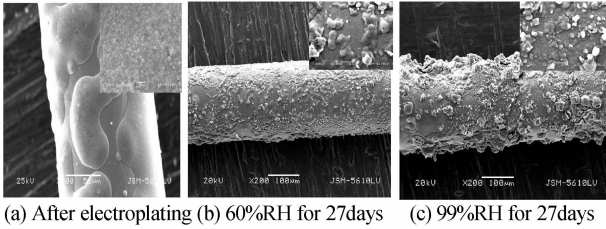


图2 光纤光栅所镀铁膜表面形貌图
Fig. 2 The micro-structures of Fe-C film imaged by SEM before the corrosion (×500, ×5000)

光纤光栅镀铁后的膜层较均匀、致密,局部有鼓胀(图2a)。锈蚀27天后,在60%RH中,光栅表面锈蚀均匀(图2b);在99%RH中,光栅表面布满松脆多孔的铁锈,体积膨胀,锈蚀严重(图2c)。

3.2 实验结果

光纤光栅的波长变化曲线中,部分样品出现了波长的多峰和展宽现象。为比较各样品在两种湿度下的啁啾变化趋势,综合分析了温度补偿后各光纤光栅的波长漂移量、啁啾持续时间和啁啾开始时间等数据。结果表明,在湿度为60%的环境下光纤光栅没有出现啁啾,在湿度为99%的环境下6个样品中有4个发生啁啾,2个无啁啾现象。4个发生啁啾的光栅中,3个样品啁啾时间在10天以内,1个样品啁啾时间长达26天。在两种相对湿度环境下,光纤光栅的波长最大漂移量的范围是0.8~1.37 nm。

图3反映了温度补偿后,两种湿度环境下,样品的中心波长数值的变化趋势。当相对湿度为60%时,波长漂移几乎呈线性增加,线性拟合函数为 $y = 0.0254x + 0.2731$, 波长漂移率为0.0254 nm/day。当相对湿度为99%时,无啁啾的样品在锈蚀初

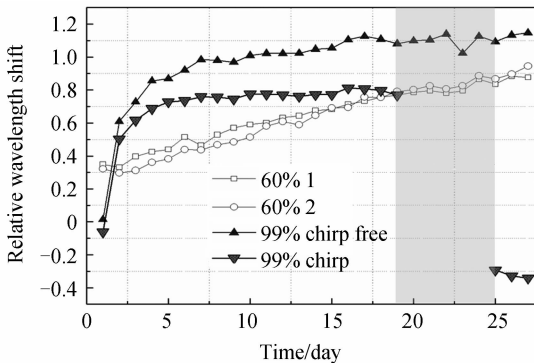


图3 两种湿度环境下相对波长漂移与时间的关系
Fig. 3 Relative wavelength Clad sensing film at different humidities

期波长迅速增加,之后逐渐稳定;出现啁啾的样品在19天后呈现啁啾(图中阴影部分),5天后啁啾消失,消失后波长减小(图中右下角的三个点),此时表面锈蚀应力释放。

图4和图5分别是两种湿度环境下,串接的三种中心波长的光纤光栅串在铁膜锈蚀过程中波谱漂移。在相对湿度为60%的环境下,波长增加均匀,无啁啾。在相对湿度为99%的环境下,中心波长为1294 nm和1301 nm的光纤光栅分别在第22天和第20天出现啁啾,2天和5天后啁啾消失,波长减小;中心波长为1309 nm的光纤光栅在实验期内未出现啁啾,实验初期波长增加,后期波长稳定。

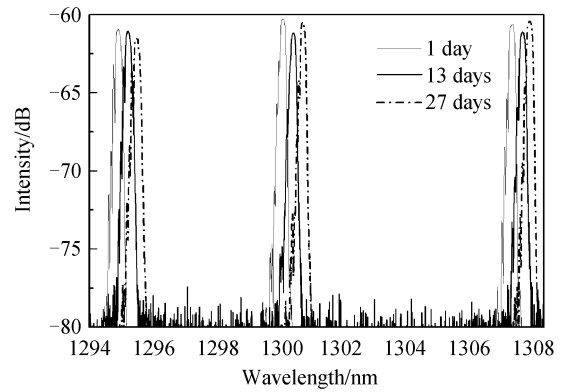


图4 在相对湿度为60%的环境下,1天、13天和27天后一组样品的光谱图
Fig. 4 Spectrum of sensors after 1 day, 13 days and 27 days in 60%RH

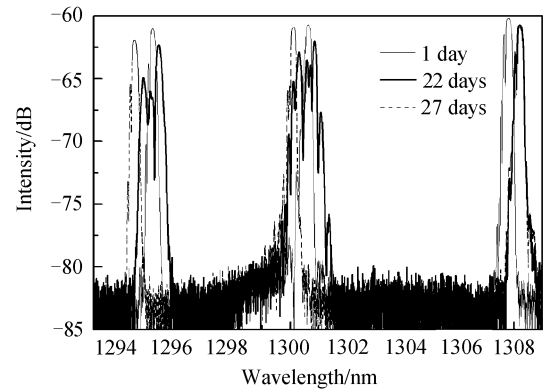


图5 在相对湿度为99%的环境下,1天、22天和27天后一组样品的光谱图,其中两个样品有啁啾现象
Fig. 5 Spectrum of sensors after 1 day, 22 days and 27 days in 99%RH, and two of them appear chirping

在湿度环境下空气中的水分能加速锈蚀,铁和溶解在水里的氧结合时形成铁锈。初期铁膜锈蚀比较均匀,铁膜体积膨胀,光纤光栅轴向受锈蚀应力作用逐渐拉伸,栅距均匀增大;当铁锈在轴向受到的挤压达到饱和后,开始“寻找”突破口转向光栅径向锈蚀。结合扫描电镜图片及光栅波长的变化规律可知,线性增加的中心波长由铁锈的均匀膨胀所致;而啁啾的出现,是不均匀膨胀的锈蚀导致。比较上述两种

湿度下的光栅传感器表现,当相对湿度为 60%时,光栅中心波长稳步增加.当相对湿度为 99%时,光栅多数出现啁啾现象,未出现啁啾的光栅波长增幅也明显大于 60%湿度环境下的波长增幅.

一个实验周期内,出现啁啾的样品在啁啾结束后波长趋于稳定,这是因为轴向锈蚀力达到极限时,便以劈裂或脱落的方式释放,此时传感器将失效^[11].

4 结论

本文光纤光栅锈蚀传感器在(20±2)℃、相对湿度为 60%的环境下,锈蚀进程缓慢,随着时间的推移波长逐渐增加,偏移呈线性,无啁啾,波长漂移率约为 0.025 4 nm/day;在(20±2)℃、相对湿度为 99%的环境下,锈蚀初期波长迅速增大,最大波长漂移率为 0.6 nm/day,波长在一周后即趋于稳定或者在实验后期出现啁啾,啁啾消失后,波长减小.

综合本文研究结果,本传感器在一定湿度条件下可以表征锈蚀进展.当湿度较高,达到 99%RH 时,可作为早期预警.基于本文的研究成果,未来将进行更多锈蚀环境下的特性比较研究,传感器的封装研究,以及在混凝土试件中的实验研究等.

参考文献

- [1] FUHR P L, HUSTON D R. Corrosion detection in reinforced concrete roadways and bridges via embedded fiber optic sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 1998, **7**(2): 217-228.
- [2] MONTEMOR M F, SIMÕES A M P, FERREIRA M G S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, **25**(4-5): 491-502.
- [3] 姜德生, CLAUD R O. 智能材料-器件-结构与应用[M]. 武汉:武汉工业大学出版社, 1999.
- [4] LEUNG C K Y, WAN K T, CHEN Li-quan. A novel optical fiber sensor for steel corrosion in concrete structures [J]. *Sensors*, 2008, **8**(3): 1960-1976.
- [5] WADE S A, WALLBRINK C D. A fibre optic corrosion fuse sensor using stressed metal-coated optical fibres [J]. *Sensors and Actuators B*, 2008, **131**(2): 602-608.
- [6] DONG Sa-ying. Optical and electrochemical measurements for optical fibre corrosion sensing techniques [J]. *Corrosion Science*, 2006, **48**(7): 1746-1756.
- [7] YAN Yun, JIANG Yi, LENG C K Y. To measure the corrosion of the rebar embedded in concrete structures by optical fiber grating [J]. *Sichuan Building Science*, 2005, **31**(6): 148-151.
严云,江毅,LENG C K Y. 用光纤光栅测量混凝土中钢筋的腐蚀 [J]. 四川建筑科学研究, 2005, **31**(6): 148-151.
- [8] YANG Sha, GENG Jian-xin, YE Qing, et al. Application of fiber bragg gratings in monitoring metal corrosion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **533**(5): 641-644.
阳莎,耿建新,叶青,等. 光纤光栅在金属锈蚀传感中的应用 [J]. 中国激光, 2006, **533**(5): 641-644.
- [9] LIU Qiao-ling. The Electrochemical mechanism of the corrosion of the rebar embedded in concrete and monitoring technology [J]. *Construction Safety*, 2009, **24**(3): 59-60.
刘巧玲. 混凝土中钢筋腐蚀的电化学机理及监测技术研究 [J]. 建筑安全, 2009, **24**(3): 59-60.
- [10] LI Xue-ming, CHEN Wei-min, HUANG Zong-qin, et al. Experimental research of fiber optic corrosion sensor in reinforced concrete [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(10): 1037-1040.
黎学明,陈伟民,黄宗卿,等. 光纤传感器对混凝土结构钢筋腐蚀监测的研究 [J]. 光电子·激光, 2001, **12**(10): 1037-1040.
- [11] HU W, CAI H, YANG M, et al. Fe-C-coated fibre Bragg grating sensor for steel corrosion monitoring [J]. *Corrosion Science*, 2011, **53**(5): 1933-1938.

A Fiber Bragg Grating Sensor of Steel Corrosion at Different Humidities

CAI Han-li^a, HU Wen-bin^a, ZHANG Yan-xiao^a, DING Li-yun^a, CHEN Wei^b

(a. National Engineering Laboratory of FOS Technology; b. College of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A prototype Fiber Bragg Gratings (FBG) sensor for monitoring corrosion of steel structures was presented and the performances were characterized at different humidities. The sensor was fabricated by sputtering and electroplating a sensitive metal film on FBG side-face. The surface micro-structures of sensor at different humidities were investigated by Scanning Electron Microscope during a 27-day experimental cycle. The shifting of wavelength was recorded by Optical Spectrometer Analyzer in two environments with humidity of 60% and 99% RH. The wavelength of FBG sensor at 60% RH increased linearly with an increment of 0.025 nm per day. For sensors at 99% RH, the chirping appears, which implies more serious corrosion occurs than that at 60% RH. The experimental results show that the proposed FBG corrosion sensor is applicable for corrosion monitoring at a humidity of lower than 60% RH, and applicable for early alert of corrosion at a higher humidity.

Key words: Fiber Bragg Grating (FBG); Corrosion sensor; Humidity; Wavelength modulated