

# 基于长周期光纤光栅折射率敏感特性的 混凝土结构钢筋锈蚀监测

刘宏月<sup>1</sup> 梁大开<sup>1</sup> 曾捷<sup>1</sup> 金晶<sup>1</sup> 吴瑾<sup>2</sup> 耿犛<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>南京航空航天大学飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 江苏南京 210016)

<sup>2</sup>南京航空航天大学航空宇航学院土木工程系, 江苏南京 210016

**摘要** 研究了长周期光纤光栅(LPFG)谐振透射光谱对外界环境折射率变化的敏感特性,在此基础上提出了将混凝土内部钢筋周围环境折射率与LPFG光谱特性相结合的理论,设计了一种基于折射率测量的LPFG钢筋锈蚀监测传感器。采用LPFG透射光谱检测技术,获取钢筋锈蚀过程中混凝土内部不同折射率环境所对应的LPFG透射光谱曲线族,进而得到LPFG谐振峰波长与混凝土内部钢筋锈蚀程度之间的对应关系,其谐振峰波长随钢筋锈蚀量的增加而先向短波后向长波方向偏移。该方法对混凝土内部钢筋锈蚀状态进行直接监测,测量及传导光路实现全光纤化,无需化学试剂标记,可实现对钢筋锈蚀过程的在线、精确及远距离遥测。

**关键词** 光纤光学;长周期光纤光栅;钢筋锈蚀;折射率;光谱分析;混凝土

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0806009

## Long Period Fiber Grating Refractive Index Sensitivity-Based Reinforcing Rebar Corrosion Sensor in Concrete

Liu Hongyue<sup>1</sup> Liang Dakai<sup>1</sup> Zeng Jie<sup>1</sup> Jin Jing<sup>1</sup> Wu Jin<sup>2</sup> Geng Jiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ministry of Education Key Laboratory of Vehicle Structure and Control,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

**Abstract** The principle of a long-period fiber grating (LPFG) rebar corrosion sensor is discussed in detail firstly based on a sensitive characteristic that the resonance spectrum of LPFG changes with refractive index in external environment. The theory combining the refractive index around rebar in concrete and the resonance spectrum is proposed. Then, LPFG spectrum measurement technology is selected to obtain LPFG spectrum curves corresponding with different kinds of refractive index in concrete, and the relationship between the resonance peak wavelength and the state of rebar corrosion in concrete is obtained. The experimental results numerically show that the resonance peak wavelengths increase and then decrease with the increasing corrosion rates. This method which can directly monitor the state of rebar corrosion in concrete is simple and easy to operate. The measurement and transmission sections of the system are completely composed of optical fiber, which can avoid the electronic interference. There is no necessity to use chemical reagent to sign the solutions which are going to be degraded. In conclusion, the late-model LPFG rebar corrosion monitoring system can achieve a real time, rapid, accurate and long distance measurement.

**Key words** fiber optics; long-period fiber grating; rebar corrosion; refractive index; spectral analysis; concrete

**OCIS codes** 060.2370; 050.2770; 060.2310; 060.2430

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(60907038)、江苏省自然科学基金(BK2009370)、中国博士后科学基金(20090461116)和研究生创新基地(实验室)开放基金(20100102)资助课题。

作者简介: 刘宏月(1983—),女,博士研究生,主要从事光纤传感、结构健康监测和土木结构监测等方面的研究。

E-mail: lhy320208@nuaa.edu.cn

导师简介: 梁大开(1956—),男,博士,教授,主要从事光纤光栅传感技术及结构健康监测等方面的研究。

E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

## 1 引言

混凝土中的钢筋锈蚀已成为威胁全世界钢筋混凝土结构耐久性的最主要灾害<sup>[1]</sup>。特别是在沿海、近海及特种桥梁等使用环境中,钢筋混凝土结构可能因为钢筋锈蚀而丧失其耐久性,并导致钢筋混凝土构件承载能力的下降和延性的降低,最终造成结构不能达到预定的服役年限而提前失效<sup>[2]</sup>。因此及早掌握混凝土结构中钢筋的锈蚀状况,采取预防措施防止锈蚀的进一步加剧,对延长混凝土结构的使用寿命意义重大。

目前测量钢筋锈蚀的方法包括半电池电位法、线性极化法和混凝土电阻法等<sup>[3~5]</sup>。半电池电位法的优点是测试速度快,但只能定性判断钢筋腐蚀的腐蚀概率,无法直接得出钢筋的腐蚀速度。线性极化法具有简单、快速的特点,但操作时需将外部测量探头或参比电极放置于混凝土构件上,这对于测量部位较多、检测环境复杂和需要长时间监测的重要建筑而言,不仅工作量巨大,并且测量结果易受外界因素的干扰。因此必须研制出一种能够埋入混凝土内部,使之满足长期监测需要的混凝土内钢筋腐蚀监测技术。

由于光纤传感系统具有质量轻、体积小、耐腐蚀、易于远程遥测和实现分布式测量等优点,使得基于光纤传感的钢筋混凝土结构健康监测技术成为当前国内外土木工程领域研究者们重点关注的新热点<sup>[6~8]</sup>。Fuhr等<sup>[9]</sup>将分析化学中的Fajans方法与光纤传感技术相结合,定量检测氯离子浓度,但这种方法无法实现氯离子浓度的连续检测。Bennett<sup>[10]</sup>提出了一种基于光纤微弯效应的“腐蚀保险丝”传感方案,但此方法不能连续反映腐蚀的过程。英国的贝尔法斯特女王大学将光纤光栅传感和应变片分别埋入到混凝土中,进行对比实验,验证了光纤布拉格光栅用于混凝土内部钢筋腐蚀测量的可行性<sup>[6]</sup>,但未曾考虑到温度补偿等因素,而且光栅的放置方式不够合理。

为了弥补上述方法的不足,本文提出将长周期光纤光栅(LPFG)的折射率敏感特性引入到混凝土内部钢筋腐蚀监测领域,基于光纤光栅传感器灵敏度高、不受电磁干扰、体积小和耐腐蚀等优点,利用LPFG对外界环境折射率的高度敏感性,设计了LPFG钢筋锈蚀监测传感器,使其具有抗干扰及对钢筋锈蚀状态高度灵敏的特点,更好地适用于混凝土内部钢筋锈蚀监测。

## 2 监测原理

### 2.1 LPFG 折射率敏感特性

LPFG的光栅周期一般在100 μm以上,其传感原理为在外部介质参量使光纤满足相位匹配条件时,光纤内部传输的同向模式之间将产生谐振耦合,使光波中某频带的光耦合到包层中而损耗掉,从而对介质参量进行检测。

由耦合模理论可知,LPFG的谐振波长可为

$$\lambda_0 = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \cdot \Lambda, \quad (1)$$

式中 $\lambda_0$ 为LPFG谐振峰波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为光纤纤芯有效折射率和 $m$ 次包层模式的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期。对周期固定的LPFG有<sup>[11]</sup>

$$\frac{d\lambda_0}{dn_{\text{sur}}} = -\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{dn_{\text{sur}}} = -\frac{n_{\text{sur}} U_{\infty} \Lambda}{n_2 r_2^3 k^3 (n_2^2 - n_{\text{sur}}^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

式中 $U_{\infty}$ 为第一类贝塞尔函数 $J_0(x)$ 的 $m$ 阶根,阶数越高,其值越大, $n_{\text{sur}}$ 为周围环境折射率。

随着周围环境折射率 $n_{\text{sur}}$ 的变化,LPFG在 $\lambda_0$ 处的透射率 $T$ 也将发生变化,可表示为

$$T = \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n_{\text{co}} I}{\lambda}\right), \quad (3)$$

式中 $(\pi \Delta n_{\text{co}} I)/\lambda$ 为纤芯基模与包层模之间的耦合系数, $L$ 为光栅长度, $I$ 为纤芯区域内纤芯基模与包层模的电场幅值交叉积分。

由此可见,当环境折射率发生变化时, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 变化,模场分布改变,从而影响LPFG的相位匹配谐振峰波长和耦合强度,即谐振峰波长发生漂移,进而使得LPFG的整个透射谱发生变化<sup>[12~14]</sup>。LPFG的谐振峰波长变化量与环境折射率的关系如图1所示<sup>[15,16]</sup>。

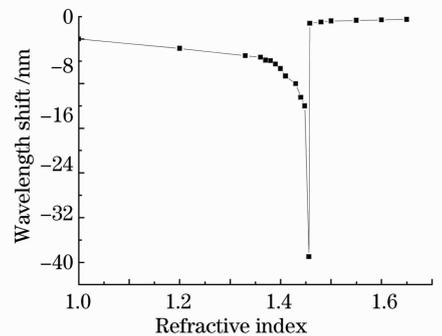


图1 LPFG谐振波长对环境折射率的敏感性  
Fig.1 Sensitivity of LPFG resonance wavelength to refractive index

### 2.2 钢筋锈蚀机理

混凝土的微孔内含有可溶性的钙、钠、钾等碱金属和碱土金属的氧化物,这些氧化物与微孔中的水

起化学反应生成碱性很强的氢氧化物,从而为其中的钢筋形成了一个高碱性的环境条件(pH 值为12~13),在这样的条件下,钢筋表面生成一层致密的、分子及离子难以穿过的“钝化膜”<sup>[3]</sup>。然而,一旦钝化环境遭到破坏,钢筋将以各种不同的方式发生锈蚀。钝化环境破坏的主要原因是混凝土的碳酸化和氯化物侵蚀,其中氯化物对钢筋锈蚀的诱发作用较强,其主要表现在局部酸化作用、形成“活化-钝化”腐蚀原电池以及催化剂作用等。

通常,钢筋腐蚀过程的全反应是阳极反应和阴极反应的组合,在钢筋表面析出氢氧化亚铁,进而生成氢氧化铁  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (红锈)及  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ (黑锈)。铁锈体积膨胀,使混凝土沿钢筋方向开裂,进而使保护层成片脱落,而裂缝及保护层的剥落又进一步导致更剧烈的腐蚀,如图2所示<sup>[17]</sup>。由于在氯化物渗透及钢筋锈蚀的整个过程中,混凝土内部钢筋周围环境的折射率在 LPFG 对周围环境折射率的敏感区间内,因此提出将混凝土内钢筋周围环境折射率与 LPFG 透射光谱特性相关联,获取混凝土内部钢筋锈蚀程度与 LPFG 谐振峰波长之间的关系。



图2 钢筋混凝土结构的损坏

Fig. 2 Schematic diagram of damage in reinforced concrete structures

将所设计的用于检测混凝土中钢筋锈蚀状态的 LPFG 钢筋锈蚀传感器埋入混凝土结构中,检测待测环境的折射率变化。随着混凝土中钢筋附近氯离子含量的不断增加,待测环境的折射率发生变化。当钢筋钝化层表面附近被局部酸化,钢筋表面阳极电解液的 pH 值被局部降低到 3.5 左右时,钢筋不断锈蚀,氯离子含量趋于稳定。此时铁锈逐渐融入钢筋周围的酚醛树脂中,待测环境的折射率继续发生变化。整个过程中,氯离子的含量变化以及整个钢筋锈蚀过程的状态将通过周围环境中折射率的变化而被捕获<sup>[18,19]</sup>。通过检测谐振峰波长的变化情况实现对混凝土结构中钢筋锈蚀状况的实时在线监测。

### 3 实验装置

为了能够实现 LPFG 对钢筋锈蚀过程中混凝土内部钢筋周围环境折射率变化的监测,需将锈蚀后钢筋周围的固态铁锈逐渐溶解,故将钢筋置于一定湿度的稀疏环境中。所设计的钢筋锈蚀传感器主要包括开有孔洞的不锈钢基座、安装于基座内的光纤支架、自由且平直的安置于光纤支架上的 LPFG 传感探头,如图3所示。上述基座内填充酚醛树脂,利用该酚醛树脂的水溶环境将钢筋锈蚀后得到的铁锈溶解到酚醛树脂中,进而实现铁锈由固态到液态的转变;光纤与支撑架轻微固定或单端固定,其两端固定端距离应大于栅区长度;LPFG 传感器探头与待测钢筋分开 4~6 mm 的距离,有效避免由于锈蚀带来的钢筋体积膨胀对 LPFG 钢筋锈蚀传感器探头的影响。为了避免钢筋锈蚀过程中周围其他环境变化对光栅的影响,将光栅两端光纤施加一定的预拉伸力使光栅保持水平伸直状态,光栅两端用环氧树脂胶与基座轻微粘贴固定。

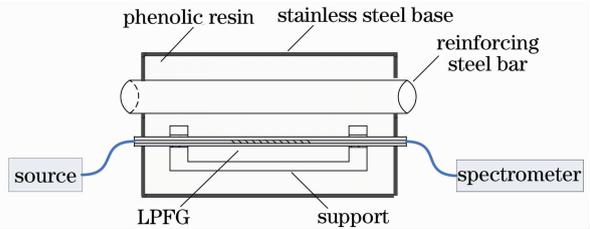


图3 钢筋锈蚀传感器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of steel corrosion sensors

### 4 实验结果与讨论

#### 4.1 钢筋锈蚀监测实验

实验中选用直径为 25 mm 的钢筋。当钢筋发生锈蚀时,钢筋周围的酚醛树脂使得铁锈由固态变为液态,致使钢筋周围环境的折射率发生变化,进而使 LPFG 钢筋锈蚀传感器的谐振峰波长发生变化。

实验过程中,为了加速钢筋的锈蚀速度,对埋入 LPFG 钢筋锈蚀传感器的试块通以 40 mA 的电流,并浸入质量分数为 5% 的盐水中。实验中采用的 LPFG 栅区长度为 3.75 cm,初始谐振峰波长为 1548.360 nm,且谐振波长处的透射率为 -2.526 dB;采用宽带光源(安捷伦 83437 A,中心波长为 1550 nm,3 dB 带宽为 52 nm)作为输入,通过 AQ6317C 光谱仪(分辨力为 0.02 nm,采用 3 点平均以减小噪声误差)采集 LPFG 传输谱的变化,实验装置如图4所示。当混凝土内部钢筋周围氯离子含量和液态铁锈含量发生变化时,LPFG 透射谱先向左后向右偏移。



图4 钢筋锈蚀传感实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of rebar corrosion sensors

整个实验过程历经 153 天,通过定时观察 LPFG 透射光谱的变化情况,获取钢筋锈蚀信息。至实验的最后阶段,LPFG 透射光谱已无明显变化,谐振峰波长始终维持在 1552.000 nm 附近,如图 5 所示。

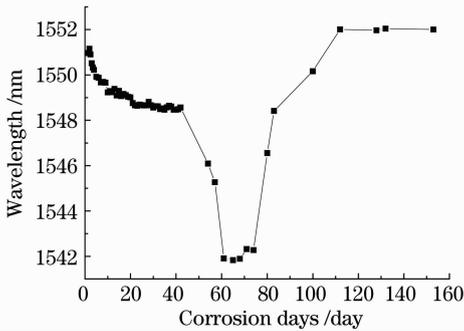


图5 LPFG 谐振峰波长随锈蚀天数变化的曲线图

Fig. 5 Relationship between wavelength and corrosion days

图 5 给出了谐振峰波长随锈蚀天数变化的曲线图,与图 1 所示的 LPFG 的谐振波长变化量与环境折射率的关系趋势相一致。由图 5 可见,随着混凝土内部钢筋锈蚀的不断进行,LPFG 谐振峰波长先从 1551.153 nm 下降至 1541.826 nm,再增加到 1552.000 nm 附近趋于稳定,该变化过程具有良好的规律性,即:当环境折射率小于包层折射率( $n_{cl}^{cl} = 1.458$  左右)时,谐振峰波长  $\lambda_0$  随环境折射率的增加而减小;接近  $n_{cl}^{cl}$  时,偏移量显著变大;当环境折射率高于  $n_{cl}^{cl}$  时,谐振峰波长重新在高于初始位置出现,且随着折射率的增加,谐振峰位置几乎不变,与图 1 所示的规律相符。

#### 4.2 钢筋锈蚀标定实验

实验过程中,每隔一段时间,从混凝土试块中取出 1 个试块,而其他试块继续通电。采用破损法将这一试块砸开,取出钢筋,用质量分数为 12% 的盐酸溶液将钢筋上的锈迹清洗干净,再用电子秤精确测出未腐蚀部分钢筋的质量,通过计算,即可得出已

锈蚀钢筋的质量,从而可以建立 LPFG 谐振峰波长与钢筋锈蚀程度之间的关系。

图 6 为钢筋锈蚀率随锈蚀天数的变化曲线图,其中钢筋锈蚀率为钢筋锈蚀前后质量的差与钢筋锈蚀前质量的比值。结合图 5 可以看出,随着钢筋锈蚀率的增加,LPFG 谐振峰波长不断变化,且趋势明显,与方案设计时的预计目标相符合,由此验证了所设计的基于 LPFG 折射率敏感特性的钢筋锈蚀传感器在混凝土结构中的可行性。

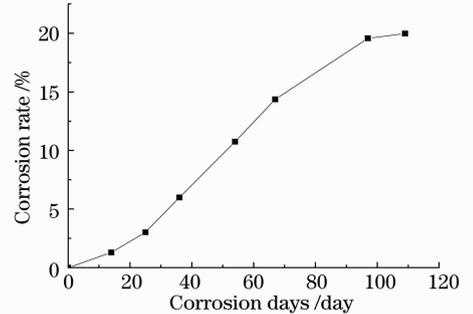


图6 钢筋锈蚀率随锈蚀天数的变化曲线图

Fig. 6 Relationship between corrosion rate and corrosion days

#### 4.3 LPFG 温度补偿方案

实验过程中,基于所选用的 LPFG 传感元件的温度灵敏度为 55.71 nm/°C,选取 25 °C 为基准温度,对不同锈蚀天数中所测量到的 LPFG 初始值进行温度补偿,可得补偿后的谐振峰波长,文中的测量数据均为补偿后数据。

## 5 结 论

利用 LPFG 传感栅区对混凝土内部钢筋周围环境折射率变化的敏感特性,提出了一种基于 LPFG 折射率敏感特性的混凝土内部钢筋锈蚀传感器,通过测量待测钢筋周围由于氯离子和液态锈含量改变而引起的谐振峰波长的变化,实现钢筋锈蚀状态的监测。理论分析和实验结果表明,LPFG 透射光谱的谐振峰波长与钢筋锈蚀率之间具有良好的对应关系。该方法结构简单,准确可靠,具有良好的应用前景。在后续的研究中,尚需完善的是对传感器及监测过程进行标定,以及通过选择不同中心波长的 LPFG 作为敏感元件,进而实现混凝土结构内部钢筋锈蚀的准分布式监测。

#### 参 考 文 献

1 P. K. Mehta, R. W. Burrous. Building durable structures in the

- 21st century[J]. *Concrete International*, 2001, **23**(3): 57~63
- 2 Leonid Chernin Dimitri V. Val, Konstantin Y. Volokh. Analytical modelling of concrete cover cracking caused by corrosion of reinforcement[J]. *Materials and Structures*, 2010, **43**(4): 543~556
- 3 Parthiban Thirumalai, Ravi R., Parthiban G. T.. Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete[J]. *Advances in Engineering Software*, 2006, **37**(6): 375~381
- 4 Zhao Yongtao, Wu Jianhua, Zhao Changjiu. The coulometric method for evaluating corrosion in reinforced concrete [J]. *Electrochemistry*, 2001, **7**(3): 22~27  
赵永涛, 吴建华, 赵常就. 评价混凝土中钢筋腐蚀的恒电量技术[J]. *电化学*, 2001, **7**(3): 22~27
- 5 Chen Bing, Yao Wu, Wu Keru. Study on the electrical conductivity of carbon fiber reinforced concrete by A. C. impedance spectroscopy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, **19**(3): 76~79  
陈冰, 姚武, 吴科如. 用交流阻抗法研究碳纤维混凝土导电性[J]. *材料工程与科学*, 2001, **19**(3): 76~79
- 6 S. K. T. Grattan, P. A. M. Basher. Fibre Bragg grating sensors for reinforcement corrosion monitoring in civil engineering structures[J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2007, **76**(1): 012018
- 7 R. Casas Joan, J. S. Cruz Panlo. Fiber optic sensors for bridge monitoring[J]. *J. Bridge Engineering*, 2003, **8**(6): 362~373
- 8 Aesushi Sehi, Hisakazu Katakura. A hetero-core structured fiber optic pH sensor[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, **582**(1): 154~157
- 9 P. L. Fuhr, D. R. Huston. Embedded fiber optic sensors for bridge deck chloride penetration measurement[J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(4): 1221~1228
- 10 K. D. Bennett, L. R. McLaughlin. Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors [C]. *SPIE*, 1995, **2446**: 48~59
- 11 Wang Yan, Liang Dakai, Ou Qibiao *et al.*. Fiber grating sensor for measurement of solution refractive index and concentration [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(7): 24~26  
王彦, 梁大开, 欧启标等. 测量液体折射率与浓度的光纤光栅传感器[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(7): 24~26
- 12 Kong Mei, Shi Bangren. Sensitivity of long-period fiber gratings to ambient refractive index[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(6): 386~388  
孔梅, 石邦任. 长周期光纤光栅对外界折射率的敏感性[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(6): 386~388
- 13 Gaspar M. Rego, Jose' L. Santos, Henrique M. Salgado. Refractive index measurement with long-period gratings arc-induced in pure-silica-core fibres [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 598~602
- 14 Joo Hin Chong, Ping Shum, H. Haryono *et al.*. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1-6): 65~69
- 15 H. J. Patrick, A. D. Kersey, F. Bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(9): 1606~1612
- 16 Zhao Hongxia, Ding Zhiqun, Wang Jinxia *et al.*. A higher sensitively concentration sensor using long-period fiber grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(6): 742~744  
赵洪霞, 丁志群, 王金霞等. 一种基于LPFG高灵敏度浓度传感器[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(6): 742~744
- 17 H. S. Wong, Y. X. Zhao, A. R. Karimi *et al.*. On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2010, **52**(7): 2469~2480
- 18 Hui Yu, Xianming Shi, William H. Hartt *et al.*. Laboratory investigation of reinforcement corrosion initiation and chloride threshold content for self-compacting concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, **40**(10): 1507~1516
- 19 A. Poursaeed, C. M. Hansson. Potential pitfalls in assessing chloride-induced corrosion of steel in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, **39**(5): 391~400