

基于光纤光栅光谱分析的混凝土结构钢筋锈蚀监测

王彦^{1,2}, 梁大开^{1*}, 周兵¹

1. 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016

2. 安徽工业大学电气信息学院, 安徽 马鞍山 243000

摘要 混凝土中钢筋发生锈蚀会严重影响混凝土结构的使用功能, 文章提出了通过观察长周期光纤光栅(LPFG)的透射谱变化对混凝土结构中的钢筋锈蚀进行监测。这种方法基于长周期光纤光栅的微弯特性, 利用其透射光谱随弯曲度增加逐渐变浅、谐振波长处的光功率与 LPFG 的弯曲度成线性这一特性, 将钢筋锈蚀引起的钢筋径向膨胀转化为光栅的弯曲, 通过监测光栅的光谱变化获知光栅的弯曲度进而判断钢筋的锈蚀程度, 该方法对钢筋直接进行监测, 简单易行, 并利用光栅的光谱特性从而避免了环境温度、应变、折射率的影响, 实验将光栅埋入到混凝土构件中, 从已取得的实验结果来看, 这种方法测量钢筋锈蚀厚度的准确度可达 $1.2 \mu\text{m}$, 可监测到的锈蚀厚度达 3 mm, 完全能够实现混凝土结构中钢筋锈蚀的早期至中期监测。

关键词 长周期光纤光栅(LPFG); 光谱分析; 锈蚀; 微弯

中图分类号: TN247 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)11-2660-05

引言

钢筋混凝土是最重要的一种基本建筑材料, 它是结合了混凝土的高抗压强度和钢筋的高抗折强度的特性制成的一种复合材料。从大量工程结构的病害研究发现, 当钢筋混凝土处于有氯离子存在的环境时, 钢筋混凝土中钢筋的锈蚀问题是最重要的耐久性问题之一。因此及早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, 也是混凝土耐久性研究中的热点^[1,2]。目前测量钢筋锈蚀的研究手段中较成熟的都是使用电化学的方法, 如测量偏置电阻、电化学阻抗、半电位等方法, 这些方法都是通过测定钢筋混凝土锈蚀体系的电化学特性来确定混凝土中钢筋的锈蚀程度或速度的化学检测法, 工作量大, 检测结果容易受到外界因素影响, 对难以到达的结构表面(如大跨桥梁、海港码头的梁板底面等)无法检测, 因此应用可靠性较差, 受外界干扰大, 难以直接反应钢筋锈蚀情况。

光纤光栅传感器具有灵敏度高、动态范围宽、不受电磁干扰、本质防爆、耐锈蚀、质量轻、体积小, 易于埋入材料中构成智能材料与结构等一系列优点, 而长周期光纤光栅更具

有易于制作、附加损耗小、无后向反射和与偏振无关等独特优点, 并由于其对弯曲的高度敏感性, 可以弥补电化学和其他锈蚀监测方法上的不足。

目前已有采用光纤光栅实现钢筋锈蚀监测的方法, 如利用长周期光纤光栅对折射率的高度敏感性而对锈蚀环境参数的监测^[3], 利用电化学镀 Fe-C 合金敏感膜方法获取金属腐蚀信息的光纤传感技术^[4-6], 但是环境参数监测对于钢筋锈蚀状态的判断来说, 实际是一种间接的测试方法, 其缺陷在于: 引起钢筋锈蚀的环境参数很多, 如钢筋表面湿度, O_2 , CO_2 , Cl^- 浓度及 pH 值等, 这些因素相互影响, 与钢筋锈蚀不能建立单一的数学关系, 因此必须综合监测这些参数的变化, 建立专家系统, 才能比较合理地判断钢筋锈蚀情况, 这种方法属于间接监测钢筋锈蚀, 并不能准确地判断钢筋的锈蚀状态。另外, 也有利用布拉格光栅对应变的高度敏感性来对钢筋锈蚀进行监测的方法^[7], 但是这一方法的缺点在于布拉格光纤光栅对温度的敏感特性使得其在监测过程中不可避免的存在温度和应变的交叉传感, 因此在监测过程中必须进行温度补偿, 并且传感器制作过程中需要将光栅用胶粘于钢筋棒上, 这对于光栅的寿命也是不利的。

由于混凝土结构中钢筋锈蚀后体积将发生径向膨胀, 因此如果能够测量混凝土结构中钢筋因锈蚀而发生体积膨胀的

收稿日期: 2007-08-02, 修订日期: 2007-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60477031), 国家自然科学基金重点项目(60535020)和江苏省汽车工程重点实验室开放基金项目(QC200502)资助

作者简介: 王彦, 女, 1975年生, 南京航空航天大学航空宇航学院讲师 e-mail: yanwxyz@sina.com

* 通讯联系人 e-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

直径变化量,就可以实时地监测混凝土结构中钢筋的锈蚀状况。到目前为止,还没有人提出利用长周期光纤光栅的弯曲特性实现钢筋混凝土构件中的钢筋锈蚀监测。本文通过观察长周期光纤光栅的透射光谱变化实行监测,避免了环境温度、应变的交叉影响,实验在实际的混凝土环境中已取得初步成功。

1 监测原理

1.1 LPFG 弯曲与温度特性

长周期光纤光栅(long-period-fiber grating, LPFG)的光栅周期一般在 $100\ \mu\text{m}$ 以上,它基于光纤内满足相位匹配条件的同向模式之间的谐振耦合,是将前向传输的导模与其他前向导模或前向辐射模之间耦合,将光波中某频带的光耦合到包层中去而损耗掉,因此无后向反射。

长周期光纤光栅的谐振波长满足表达式:

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

其中: λ_L 为谐振波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 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, Λ 为光栅周期。

当在光纤内引入某种微扰时,会引起不同传播模式间的耦合。当 LPFG 弯曲时,光纤变成了弯曲波导,同时 LPFG 中每一个被调制折射率的横截面发生倾斜(相对于第一个周期中被调制的折射率横截面而言),因此弯曲的 LPFG 可以等效为直的倾斜光纤光栅。当弯曲度变大(曲率半径减小)时,纤芯与包层模式之间的耦合系数降低,谐振峰的幅值减小。

图 1 和图 2 分别为 LPFG 的弯曲特性与温度特性,由图 1 可见,当 LPFG 发生弯曲时,其透射谱将随着弯曲度的增加而发生右移,并且谐振波长处的透射率也将增大,即整个谱形右移且谱形变浅。而从图 2 中的温度特性可见,当温度变化时,LPFG 的透射谱发生漂移,但透射谱谱形基本不变,谐振波长处的透射率几乎不变,同样的,发生应变时,LPFG 的透射谱也有相同的特性^[8]。由此可见,若当 LPFG 同时受到温度、应变和弯曲的共同作用时,完全可以通过观察其透射谱来判断是否发生了弯曲,即通过观察谐振波长处透射率的变化进行判断,由此避免了周围环境温度、应变的影响。

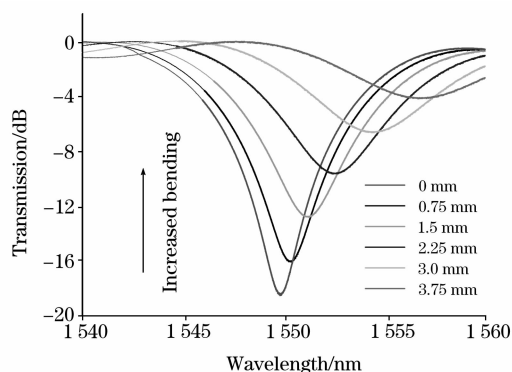


Fig. 1 Overall transmission spectra of LPFG at different curvature

通过研究谐振波长处的透射率与弯曲度的关系发现, LPFG 谐振波长处的透射率与光栅弯曲度成线性变化,如图 3 所示。

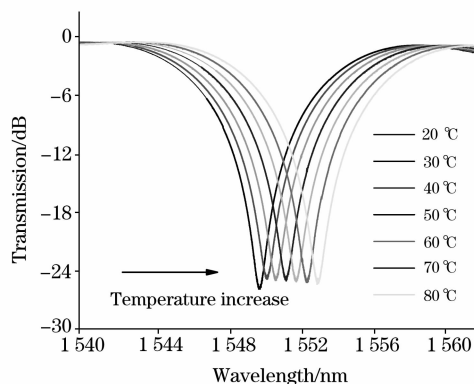


Fig. 2 Overall transmission spectra of LPFG at different temperature

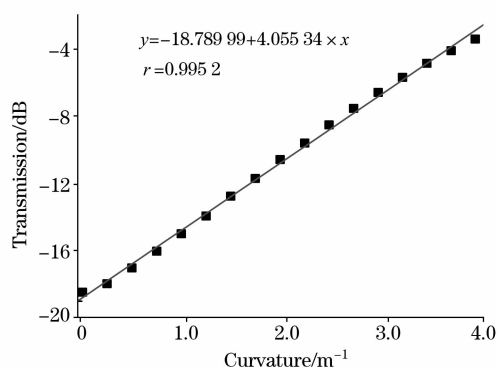


Fig. 3 The relationship between transmission and curvature

由图 3, LPFG 的谐振波长处的透射率与弯曲度的关系成线性,有

$$\Delta C = \frac{P_{L2} - P_{L1}}{K_c} \quad (2)$$

其中 P_{L1} 为长周期光纤光栅在初始状态下谐振波长的透射率值, P_{L2} 为监测过程中测得的长周期光纤光栅谐振波长处的透射率值, ΔC 为钢筋膨胀导致的光栅弯曲度变化量, K_c 为光栅弯曲时谐振波长处的透射率与弯曲度的比例系数,在图 3 中其值为 4.055 34。

因此,通过观察 LPFG 的透射谱是否变浅即谐振波长处透射率是否变化可获知光栅是否发生了弯曲,而由此处透射率的变化量可获知光栅的弯曲程度,从而判断混凝土结构内的钢筋棒锈蚀造成的直径变化量。

1.2 实验装置

为了能够实现光栅对钢筋锈蚀后体积膨胀直径增加的监测,将钢筋放入一凹槽形的不锈钢基座内并用胶将其与基座固定,以防整个实验过程中钢筋发生移动,基座高度与钢筋直径相同,为了避免钢筋锈蚀过程中周围介质折射率发生的变化对光栅的影响并保护光栅,将光栅段外套保护管后平放于钢筋表面,对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,光栅两端搭在基座两端,一端光纤用环氧

树脂胶与基座粘贴固定,并且此端的光纤也与保护管粘贴固定。如图 4 所示。

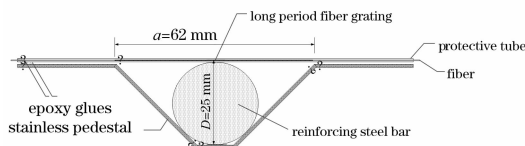


Fig. 4 The position and setting of LPFG

此时光栅弯曲度变化量与钢筋膨胀的直径变化量关系为:

$$\Delta C = \frac{2\Delta D}{(a/2)^2 + (\Delta D)^2} \quad (3)$$

其中 ΔD 为钢筋的直径变化量, a 为不锈钢基座上部两端之间的距离。

由上述(2), (3)两式可定义钢筋锈蚀时光栅敏感系数 K_L , 其满足式: $\Delta D = K_L(P_{L2} - P_{L1})$, 并与 K_c , a 有关。

2 实验结果

实验选用的是直径为 25 mm 的钢筋, 基座与钢筋的具体尺寸如图 4 所示。当钢筋发生锈蚀体积膨胀直径增加时, 致使光栅向上移动, 由于光栅一端固定另一端可自由移动, 因此随着钢筋锈蚀体积发生膨胀后光栅弯曲度将发生变化。

为了加速钢筋的锈蚀速度, 对制作的试块进行通电, 并相隔一段时间喷洒 5% 的盐水。实验中的长周期光纤光栅是用相位掩模板在普通单模光纤上采用准分子激光的方法制备, 并用 HF 酸溶液锈蚀, 以提高其敏感特性, 长度为 70 mm, 周期为 $460 \mu\text{m}$, 最初的谐振波长位于 1551.060 nm 处, 且谐振波长处的透射率为 -26.299 dB 。若钢筋未受到侵蚀介质的影响, 锈蚀尚未发生时, 谱形不移动; 一旦锈蚀开始, 随着时间的推移, 透射谱逐渐右移, 且谱形逐渐变浅。

选用宽带光源 Agilent83437A 中心波长为 1550 nm , 3 dB 带宽为 52 nm , 光谱仪为 AQ6317C, 选取 OSA 分辨率 0.02 nm , 每次扫描执行 2 点平均以减小噪声误差。在整个实验过程中, 每天定时通过光谱仪观察光纤光栅的透射谱变化, 整个实验过程历经 27 天。至实验的第 27 天时, 光栅光谱已变至很浅, 谐振波长处的透射率已达 -5.698 dB , 如图 5 所示。

由实验结果可知, LPFG 的透射谱谐振波长处的透射率共增加了 20.601 dB , 对应于(2)式, 有:

$$\Delta C = \frac{P_{L2} - P_{L1}}{K_c} = \frac{20.601}{4.05534} = 5.08 \text{ m}^{-1}$$

则由(3)式可得: $\Delta D = 2.456 \text{ mm}$ 。

即至第 27 天时, 钢筋表面约有 2.5 mm 厚度的锈蚀, 这与实际钢筋的锈蚀状况相符。因此, 若能通过光栅光谱变化监测出谐振波长处透射率 1 dB 的变化量, 则相应地, 对应的光栅弯曲度变化量为 0.25 m^{-1} , 锈蚀钢筋的直径变化量为 0.12 mm 。通常, 光谱仪可以监测出 0.01 dB 的透射率变化量, 则相对应应的锈蚀钢筋直径变化量可达 $1.2 \mu\text{m}$ 。同时,

采用此方法对锈蚀钢筋进行监测, 能监测到的锈蚀厚度可达 3 mm 。由此可见, 钢筋的锈蚀程度完全可通过长周期光纤光栅的弯曲程度来判断, 即根据光栅的谱形变化来监测钢筋的锈蚀。

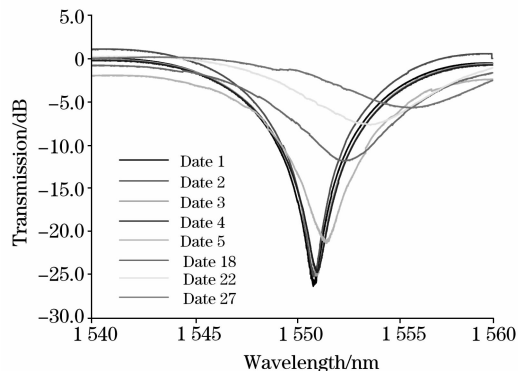


Fig. 5 The spectrum variation of LPFG on the surface of steel bar with corrosion time

3 讨论

由于长周期光纤光栅对温度、应变、弯曲等环境因素均非常敏感, 因此, 传感器的制作也必须考虑到这些环境因素的交叉影响。但是, 利用 LPFG 的弯曲特性进行混凝土钢筋锈蚀程度监测的优势也正在于此。

由于温度的变化, 会造成长周期光纤光栅的波长漂移, 温度升高, 谐振波长右移; 温度降低, 谐振波长左移。但是, 温度造成的 LPFG 透射谱的漂移并不影响透射谱的谱形, 即温度的变化不影响谐振波长处的透射率值。同样地, 对于应变也是如此, 应变的变化不影响谐振波长处的透射率值而只改变谐振波长的位置; 另外, 由于光栅被热缩管保护, 与环境因素中的折射率变化隔绝, 也避免了折射率的影响。因此, 采用观察 LPFG 透射谱的谐振波长处的透射率值, 可以避免环境因素温度、应变、折射率造成的影响, 保证了监测过程的可靠性。当发现谐振波长处的透射率发生变化时, 即是光栅发生了弯曲, 而此弯曲则是由钢筋棒体积增大、直径增加引起的。实验过程中透射谱谐振波长处的透射率变化大说明锈蚀程度大, 变化快则说明锈蚀速率快, 由此可以推断出构件钢筋开始锈蚀的时间, 以确定最佳的维修处理时间。

在实际的工程应用过程中, 需要另外制作不锈钢封壳, 盖上不锈钢封壳后封壳与钢筋之间留有一定的空间以便有足够的高度使得钢筋能够径向膨胀、光栅弯曲, 固定好基座与封壳后再在外面包裹水泥砂浆, 同时, 整个基座外壳上预先留有許多小孔, 且包裹被测钢筋棒的水泥砂浆与现场混凝土也取为同一标号, 以保证被测钢筋的内部锈蚀环境与现场混凝土内部的锈蚀环境相同。采用这种监测方法的传感器结构简单, 加工方便, 在光栅段无需用胶, 保证了光栅的使用寿命, 采用的钢筋就地取材, 或选取与工程所用钢筋材质相同的钢筋, 测试环境与实际构件环境相同, 测量简单且直观、准确, 很容易判断钢筋的锈蚀状态, 可以在不损伤混凝土表

面的前提下,准确方便地确定钢筋锈蚀程度及速率。

4 结束语^[9-13]

本文提出的钢筋锈蚀的监测方法是直接针对锈蚀发生的载体——钢筋进行监测的,钢筋是事先埋至于混凝土内部可由现场取样得到,通过将长周期光纤光栅放置在被测钢筋棒上,将钢筋锈蚀体积径向膨胀的变化量转化为光栅的弯曲

度,通过监测光栅的透射谱谱形,实现对被测钢筋的锈蚀状态进行判断,进而获得钢筋锈蚀程度及速率。通过初步的实验证明,采用长周期光纤光栅光谱分析的方法对混凝土构件中的钢筋锈蚀监测,结构简单,简便易行,方法准确可靠,能够监测出钢筋直径 $1.2\ \mu\text{m}$ 的变化量,可监测的锈蚀厚度达 $3\ \text{mm}$,完全能够实现混凝土结构中钢筋锈蚀的早期至中期监测。在后续的研究中,尚需完善的是实际应用中由于土木工程的环境恶劣必须解决的光栅保护等问题。

参 考 文 献

- [1] DONG Sa-ying, LIAO Yan-biao, TIAN Qian, et al(董飒英,廖延彪,田 芊,等). Journal of Analytical Science(分析科学学报), 2004, 20(5): 546.
- [2] CAO Chu-nan, LIN Hai-chao, SONG Guang-ling, et al(曹楚南,林海潮,宋光铃,等). Corrosion Science and Protection Technology(腐蚀科学与防护技术), 1999, 11(3): 161.
- [3] Elster J L, Greene J A, Jones M E. Proc. SPIE, 1999, 3540: 251.
- [4] LI Xue-ming, CHEN Wei-min, HUANG Zong-qing, et al(黎学明,陈伟民,黄宗卿,等). Piezoelectrics & Acoustooptics(压电与声光), 1999, 21(1): 12.
- [5] CHEN Wei-min, LI Xue-ming, HUANG Zong-qing, et al(陈伟民,黎学明,黄宗卿,等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 1999, 28(2): 129.
- [6] LI Xue-ming, CHEN Wei-min, HUANG Zong-qing, et al(黎学明,陈伟民,黄宗卿,等). Journal of Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 2001, 12(10): 1037.
- [7] JIANG Yi, YAN Yun, Christopher K Y Leung(江 毅,严 云,Christopher K Y Leung). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2006, 35(1): 96.
- [8] WANG Yan, LIANG Da-kai, ZHOU Bing(王 彦,梁大开,周 兵). Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(南京航空航天大学学报), 2007, 39(5): 655.
- [9] Li X M, Chen W M, Huang S L. Proc. SPIE, 2000, 3986: 25.
- [10] Fuhr P L, Huston D R. Smart Materials and Structures, 1998, 7(2): 217.
- [11] Montemor M F, Simoes A M P, Ferreira M G S. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4-5): 491.
- [12] WEN Zhi-yu, CHEN Gang, WANG Jian-guo(温志渝,陈 刚,王建国). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1955.
- [13] XIONG Yu-hong, WEN Zhi-yu, WANG Ming-yan, et al(熊宇虹,温志渝,王命延,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(1): 139.

Measurement of Steel Corrosion in Concrete Structures by Analyzing Long-Period Fiber Grating Spectrum Character

WANG Yan^{1,2}, LIANG Da-kai^{1*}, ZHOU Bing¹

1. The Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Material and Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China

2. School of Electrical & Information, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China

Abstract The consideration on the durability of concrete structures with reinforcement corrosion has become a most urgent problem. A new technique to measure the corrosion of steel in concrete structures was proposed in the present paper. It is based on the microbending characteristic of long period optical grating (LPFG). The temperature spectrum character and curvature spectrum character of long period optical fiber grating were studied first. It was shown that the transmission spectrum of long period optical fiber grating shifted right and the transmission of the resonance wavelength was invariable when the temperature increased, while the transmission spectrum of long period optical fiber grating became shallow when the curvature increased, the transmission of the resonance wavelength would increase and it was linear with the curvature. On the basis of the characteristic, a notch shaped pedestal was designed and a long period optical fiber grating was laid on the steel surface. With this method the radial expansion of the steel resulting from the steel corrosion would translate into the curvature of the long period optical fiber grating. The curvature of long period optical fiber grating could be obtained by analyzing the change of spectrum, and then the steel corrosion depth could be measured. This method is simple and immediate and is independent of the variety in temperature, strain and refractive index owing to the inimitable spectrum characteristic of long period optical fiber grating. From the experiment it was found that the precision of the corrosion depth was better than $1.2 \mu\text{m}$, and the corrosion depth of 3 mm could be achieved. This measurement could be used to monitor the early to metaphase corrosion of reinforcing steel in concrete structures.

Keywords Long period fiber grating(LPFG); Spectral analysis; Corrosion; Microbending

(Received Aug. 2, 2007; accepted Nov. 8, 2007)

* Corresponding author