

基于长周期光纤光栅横向负载特性的混凝土结构 钢筋锈蚀监测

刘宏月^{1,2} 梁大开³ 韩晓林^{1,2}

¹ 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096

² 东南大学江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏 南京 210096

³ 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要 在研究长周期光纤光栅(LPFG)谐振透射光谱对横向负载变化的敏感特性的基础上,提出了将锈蚀过程中钢筋体积膨胀状态与LPFG光谱特性相结合的传感理论,设计了一种基于LPFG横向负载测量的钢筋锈蚀监测传感器。利用LPFG透射光谱检测技术,对钢筋锈蚀过程中不同锈蚀状态所对应的LPFG透射光谱曲线族进行分析,得到LPFG透射光谱随钢筋锈蚀量的变化关系,进而获得LPFG谐振峰幅值变化量与钢筋锈蚀程度之间的对应关系。该方法通过对钢筋锈蚀状态进行直接监测,可实现对钢筋结构的全体积精确监测。

关键词 传感器;长周期光纤光栅;钢筋锈蚀;光谱分析;横向负载;体积膨胀

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0406003

Long-Period Fiber Grating Transverse Load Effect-Based Sensors for Rebar Corrosion in Concrete

Liu Hongyue^{1,2} Liang Dakai³ Han Xiaolin^{1,2}

¹ School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

² Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

³ State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Based on the sensitivity of long-period fiber grating (LPFG) resonant transmission spectrum to transverse load change, a sensing theory which combines volume expansion status and LPFG spectral characteristics is proposed. The design of a miniaturized resonant peak modulation-based LPFG rebar corrosion sensor is described by combining the spectral characteristics of LPFG with the expansion state monitoring of rebar corrosion. LPFG spectral curves corresponded with different rebar corrosion states under the environment test are captured by the monitoring technique of LPFG transmission spectra. The relation between the resonance peak amplitude change and the state of rebar corrosion is obtained, which shows that the variation of LPFG resonance peak amplitude increases with the intensifying of the degree of rebar corrosion. The method can be used to achieve the accurate monitoring of full volumes of rebars by directly monitoring rebar corrosion states.

Key words sensors; long-period fiber grating; rebar corrosion; spectral analysis; transverse load; volume expansion

OCIS codes 060.2370; 050.2770; 060.2310; 060.2430

1 引言

根据近年来的工程调查可知,钢筋锈蚀问题已成为威胁全世界钢筋混凝土结构耐久性的最主要因

素^[1]。在沿海、近海及特种桥梁等使用环境中,钢筋锈蚀可能使得钢筋混凝土结构丧失其耐久性,并导致钢筋混凝土构件承载能力和延展性的降低,最终

收稿日期: 2012-10-26; **收到修改稿日期**: 2012-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(10902024, 51275239)、国家自然科学基金国际交流项目(51161120326)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0086)、江苏省自然科学基金(BK2010397)、江苏省科技支撑项目(BE2011181)、航空科学基金(20090869009)和东南大学博士后重点科研资助计划资助课题。

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

E-mail: lhy320208@seu.edu.cn

造成结构不能达到预定的服役年限而提前失效^[2]。因此,及时了解钢筋锈蚀情况,防止锈蚀的进一步加剧,对延长混凝土结构的服役寿命,减少经济损失,具有非常现实的意义。

目前对于钢筋腐蚀的检测办法主要包括直接观测法、电化学检测法及埋入式传感器监测法等^[3~6]。目测法、机械试验和钻孔取样等直观观测法只能实现局部区域钢筋腐蚀状况的定性分析,但其以破坏结构为代价,对于一些水下位置及难以到达的位置而言是不现实的。电化学检测法测试速度快,但工作量巨大,且易受外界因素干扰。理想的埋入式传感器应该是可以有效地抵抗环境变化,长期工作,且在施工过程中不易受损害。因此必须研制出一种能够埋入混凝土内部且满足长期监测需要的混凝土内钢筋锈蚀监测传感器。

由于光纤传感系统具有很多独特的优点,使得基于光纤传感的钢筋混凝土结构健康监测技术与应用也成为当前国内外土木工程领域的热点论题^[7]。Bennett等^[8]提出了基于光纤微弯效应的“腐蚀保险丝”传感方案,但此方法不能给出多种腐蚀状态的信息,难以反映腐蚀过程。Casas等^[9]通过在光栅表面涂覆两种不同涂层来实现温度和应变的同时测量。Aesushi等^[10]研制的光纤pH值传感器能够满足钢筋钝化膜破坏的pH值监测,但此种传感器仅在溶液中进行了测试,对于埋入混凝土中以及实现长期监测,还需要进一步研究。李俊等^[11]研制了基于光纤布拉格光栅(FBG)应变传感的钢筋锈蚀传感器,并对其进行了混凝土埋入实验,但其无法实现钢筋的全体积监测。

本文提出将长周期光纤光栅(LPFG)横向负载敏感特性引入到混凝土内钢筋锈蚀监测领域。利用LPFG对其横向负载的高度敏感特性,设计了基于LPFG横向负载特性的钢筋锈蚀传感器,使其在具有对钢筋锈蚀状态高度灵敏性特点的同时,实现对钢筋结构的全体积监测。该传感器能够更好地适用于混凝土内部钢筋锈蚀状态监测,具有良好的工程应用前景。

2 监测原理

2.1 LPFG 横向负载敏感特性

LPFG的传感原理为:当外部介质参量使光纤满足相位匹配条件时,光纤内传输的同向模式之间将产生谐振耦合,使得某频带的光耦合到包层中而损耗掉^[12~15]。

激光写入的LPFG横截面折射率分布的不均匀性使其具有一定的原始双折射,从而导致其谐振峰幅值具有一定的偏振相关性^[16~18]。设对应双折射的光学主轴的折射率分别为 n_1 和 n_2 ,因此其对应的相互正交的偏振光传播常数分别为

$$\beta_1 = 2\lambda\pi n_1, \quad (1)$$

$$\beta_2 = 2\lambda\pi n_2. \quad (2)$$

纤芯基模 LP_{01} 经过双折射LPFG后形成两个相互正交的偏振模式 LP_{01-1} 和 LP_{01-2} ,因此光栅中偏振模式 LP_{01-1} 和 LP_{01-2} 的传输能力合成了 LP_{01} 的传输能力,即 β_1 和 β_2 的合成决定了 β_{01} 。所以偏振光传输常数 β_1 和 β_2 的变化即折射率 n_1 和 n_2 的变化将导致LPFG模式耦合的变化,从而使谐振波长和谐振峰幅值发生变化。

当横向负载使LPFG的双折射发生变化时,设横向负载后新光学主轴方向的折射率分别为 n'_1 和 n'_2 ,其对应的偏振光传输常数分别为

$$\beta'_1 = 2\lambda\pi n'_1, \quad (3)$$

$$\beta'_2 = 2\lambda\pi n'_2. \quad (4)$$

由于 $n'_1 \neq n_1$ 和 $n'_2 \neq n_2$,所以通常情况下 $\beta'_{01} \neq \beta_{01}$,进而导致LPFG纤芯基模与包层模之间的耦合发生变化,对LPFG施加横向负载时其谐振峰波长和谐振峰幅值将发生变化。由于 n'_1 和 n'_2 与压力 F 密切相关,因此横向负载 F 的大小决定了谐振峰波长和谐振峰幅值变化的大小。

2.2 LPFG 横向负载方向敏感特性

当光纤上施加横向载荷时,由于弹光效应的存在,双折射现象使得光纤的光学主轴发生旋转。光纤原始光学主轴坐标系为 $f-s-z$,光纤横截面上所受压力 F 方向对应的坐标系为 $x-y-z$ 。因为原始双折射确定的光学主轴未知,所以负载 F 方向对应的坐标系 $x-y-z$ 与光纤主轴存在一个夹角 α ^[16]。

在坐标系 $f-s-z$ 中,由于横向负载 F 的存在,光纤的折射率椭球为

$$\left(\frac{1}{n_1^2} + \Delta K_{ff}\right)f^2 + \left(\frac{1}{n_2^2} + \Delta K_{ss}\right)s^2 + \Delta K_{fs}fs = 1, \quad (5)$$

\mathbf{K} 为介电不渗透性张量, ΔK_{ff} 、 ΔK_{ss} 、 ΔK_{fs} 为张量元,式中 ΔK_{fs} 为光纤原始光学主轴的旋转,是由横向负载作用下的剪应力 $e_{sf} = -(e_{xx} - e_{yy}) \sin 2\alpha$ 产生的。设旋转 $\Delta\alpha$ 角度后新的光学主轴坐标系为 $f'-s'-z$ 。定义

$$a = \frac{1}{n_1^2} + \Delta K_{ff}, \quad b = \frac{1}{2} \Delta K_{sf}, \quad c = \frac{1}{n_2^2} + \Delta K_{ss},$$

$$d = \frac{a-c}{2}$$

在坐标系 $f'-s'-z$ 中有

$$K_{f'f'} = \frac{1}{(n'_1)^2} = \frac{a+c}{2} + \sqrt{d^2 + b^2}, \quad (6)$$

$$K_{s's'} = \frac{1}{(n'_2)^2} = \frac{a+c}{2} - \sqrt{d^2 + b^2}. \quad (7)$$

受横向负载 F 后旋转角 $\Delta\alpha$ 为

$$\tan \Delta\alpha = \frac{b}{d + \sqrt{d^2 + b^2}}. \quad (8)$$

由(6)式和(7)式可分别求出光学主轴方向上光纤受压后的折射率 n'_1, n'_2 。

通过上述研究可知,当压力 F 与原始光学主轴间的夹角 α 固定时,光纤的原始双折射与光学主轴旋转灵敏度成反比。此外,压力作用方向和原始光学主轴间的夹角 α 也会对压力引起的光纤光学主轴旋转灵敏度产生影响。当压力作用方向平行或垂直于原始光学主轴时,光纤光学主轴不发生旋转;当 $|\alpha|$ 越接近 45° 时,由压力引起的光纤光学主轴旋转灵敏度越大。因此,横向负载将会改变光栅中的双折射(即光学主轴发生旋转),且横向负载方向和光学主轴间的夹角决定了其响应灵敏度,即 LPFG 谐振峰幅值的响应灵敏度与负载的圆周方向有关。

2.3 钢筋锈蚀原理

钢筋腐蚀、冻害和物理化学影响通常是环境条件作用下混凝土的 3 大破坏原因,其中钢筋腐蚀为最主要原因。大量研究表明,混凝土微孔结构内部在服役过程中含有大量易于与水反应生成强碱性氢氧化物的可溶性碱金属和碱土金属氧化物,进而在混凝土内部的钢筋周围形成了一个 pH 值为 12~13 的高碱性环境条件^[19]。

在这样的高碱性环境条件下,溶液中 OH^{-1} 的失去电子,发生氧化反应,生成水和活性氧原子。反应生成的活性氧原子与金属反应形成金属氧化物,在阳极区域发生电化学反应:



通过上述反应,钢筋表面生成一层致密的、令分子及离子难以透过的“钝化膜”,从而防止钢筋进一步的氧化和腐蚀。钝化膜是在混凝土内部高碱性环境条件下在钢筋表面自发生成的保护膜,且只要环境条件不变,这层“钝化膜”就能在其破损之处再次生成,即具有“自修复”功能。然而,一旦钢筋周围的高碱性环境由于混凝土碳酸化、氯化物侵蚀等因素发生变化时,钢筋锈蚀将以各种不同的方式不断发生。

随着铁的氧化程度不断增加,钢筋体积发生相当大的膨胀,且不同锈蚀产物使得锈蚀后钢筋的体积膨胀率有所不同,即红锈为 4 倍,黑锈为 2 倍。当体积膨胀带给混凝土结构的压力达到一定程度时,混凝土结构出现沿钢筋方向开裂、保护层大面积脱落等现象,导致钢筋锈蚀的进一步加剧,如图 1 所示。



图 1 钢筋混凝土结构的损坏

Fig. 1 Damage of rebar concrete structure

2.4 LPFG 钢筋锈蚀传感器原理

将 LPFG 横向负载特性与钢筋锈蚀过程中的体积膨胀监测相结合,通过设计相应的传感装置,研制了一种基于 LPFG 横向负载特性的钢筋锈蚀传感器及相应系统。随着锈蚀程度的不断增加,钢筋体积不断膨胀,体积膨胀率不断加大。整个过程中,锈蚀导致的钢筋体积变化将通过传感装置作用在 LPFG 传感探头上的横向负载的变化而被捕获。通过检测谐振峰幅值的变化情况实现对钢筋锈蚀状况的实时在线监测。

3 监测原理实验

3.1 LPFG 横向负载敏感特性实验

采用如图 2 所示的实验装置。实验中将紫外光写入的待测 LPFG 和同直径的匹配光纤平行地放置于底座和薄平板之间。在薄平板上通过逐渐添加砝码的方式向 LPFG 施加横向负载,砝码每次增加 200 g,总计施加 3600 g。为测试不同圆周方向上的 LPFG 横向负载特性,将 LPFG 两端分别粘贴在左

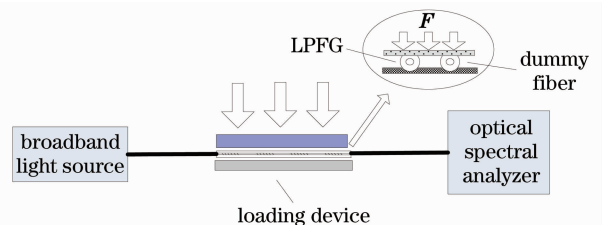


图 2 LPFG 横向负载特性实验装置

Fig. 2 Experimental setup of characteristics of transverse load of LPFG

右两个转盘的轴线上,同步转动两转盘,使 LPFG 绕轴线发生旋转。

由图 2 可知,入射光由宽带光源(安捷伦 83437 A,波段为 600~1700 nm)产生,通过 LPFG 传感后的透射光谱变化情况由光谱仪(AQ6317C)采集。系统中采用的 LPFG 中心波长为 1550.225 nm,损耗峰幅值为 -16.581 dB,栅区长度为 3.75 cm。测量时,将无横向负载状态下检测的 LPFG 透射光谱信号作为基准信号记录,再将不同横向载荷下得到的光谱信号与基准信号相比较,得到横向负载与 LPFG 透射

光谱谐振峰幅值变化量 ΔA 的关系。旋转 LPFG 一周,每隔 10°重复进行实验。实验中,设定对横向负载最敏感方向为负载 0°。

3.2 实验结果与分析

图 3 为不同圆周方向 0°,20°及 40°施加横向负载时谐振峰幅值的变化量曲线图。随着横向负载载荷由 0 增加到 3600 g,LPFG 的谐振透射光谱的透射率不断增加,即谐振峰幅值逐渐减小,且不同圆周方向下 LPFG 谐振峰幅值随横向负载的灵敏性不同。

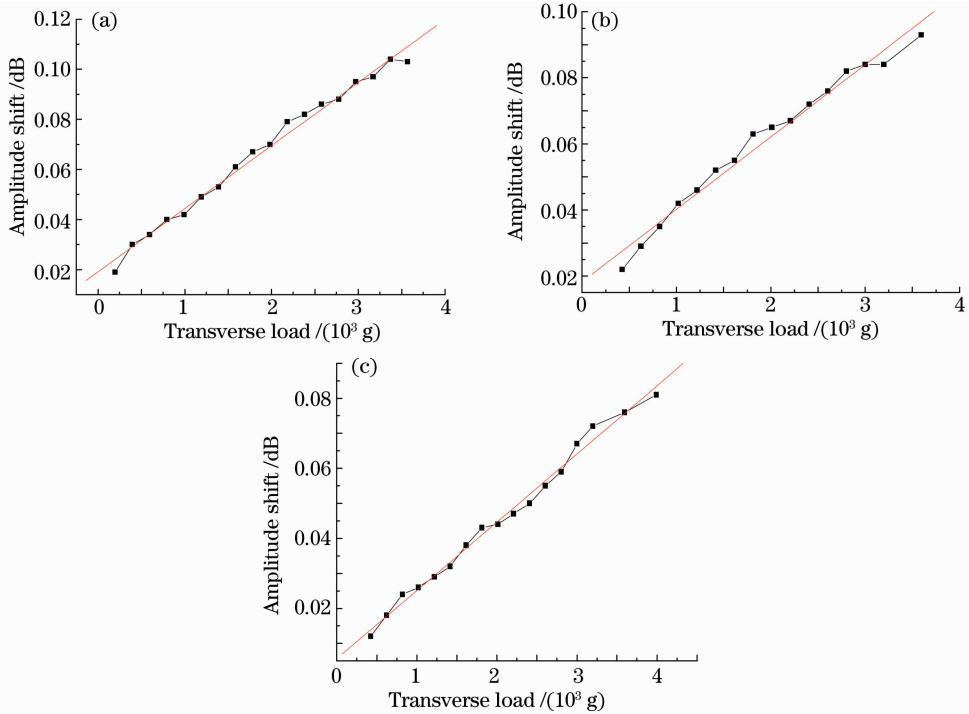


图 3 不同圆周方向上施加横向负载时谐振峰幅值的变化量曲线图。(a) 0°; (b) 20°; (c) 40°

Fig. 3 Variation curves of resonance amplitude caused by transverse loads at different directions. (a) 0°; (b) 20°; (c) 40°

通过对 LPFG 横向负载方向特性的研究,了解 LPFG 对横向负载的分散性,通过实验标定确定其不同方向的敏感系数,根据不同的使用环境选择不同传感方向,为 LPFG 横向负载方向特性的工程应用提供基础。

4 LPFG 钢筋锈蚀监测实验

4.1 传感装置设计

利用 LPFG 传感栅区对横向负载变化的敏感特性,通过测量待测钢筋锈蚀过程中由于体积膨胀变化而引起的 LPFG 横向负载变化,实现对钢筋混凝土结构服役过程中钢筋锈蚀状态的监测。选定对横向负载最敏感方向作为载荷施加方向。LPFG 钢筋锈蚀传感器的传感机理如图 4 所示。

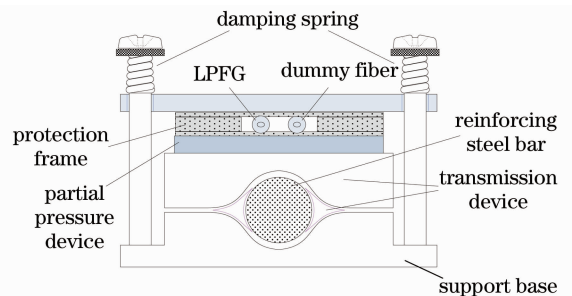


图 4 LPFG 钢筋锈蚀传感器传感机理图

Fig. 4 Mechanism map of LPFG steel corrosion sensor

由图 4 可知,为了能够实现 LPFG 对钢筋锈蚀过程中钢筋体积变化的监测,需将锈蚀后钢筋的体积变化转化为横向施加在 LPFG 探头上的负载。设计的钢筋锈蚀传感器主要包括圆周体积膨胀转动

装置、减压弹簧以及自由且平直的安置于光纤保护架上的 LPFG 传感探头。上述传动装置采用 1:1 的体积膨胀转换率,进而实现对钢筋锈蚀的 360°全体积监测;利用减压弹簧缓冲作用在 LPFG 传感探头上的横向负载,对传感探头进行保护。为避免钢筋锈蚀过程中其他环境因素对 LPFG 的影响,将 LPFG 两端进行带有一定预拉伸力的固定。实验中选用直径为 25 mm 的钢筋。

测量时,钢筋锈蚀带给膨胀传动装置所受的压力通过分力装置分解后施加在 LPFG 传感探头上,使得 LPFG 透射光谱的波形发生变化,谐振峰幅值改变。设计的分力装置是基于杠杆原理实现的,且分压比例为 1/30。

4.2 钢筋锈蚀监测实验

实验过程中,为加快钢筋的锈蚀速度,对 LPFG 钢筋锈蚀传感器通以 40 mA 的电流,并浸入在 5% 的盐水中,LPFG 传感实验现场如图 5 所示。当待测钢筋由于锈蚀发生体积变化时,LPFG 透射谱的透射率逐渐增加,即谐振峰幅值变化量逐渐增加。

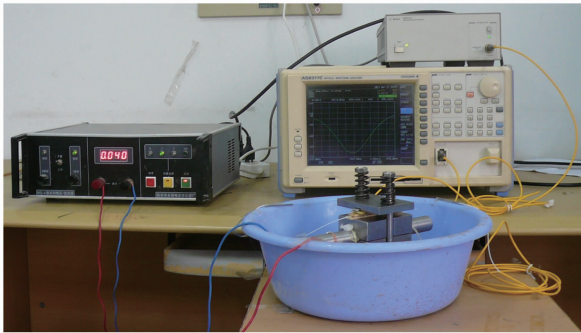


图 5 钢筋锈蚀传感实验现场图

Fig. 5 Experimental worksite of steel corrosion sensors

由图 5 可知,入射光由 83437 A 宽带光源产生,通过 LPFG 传感后的透射光谱变化情况由 AQ6317C 光谱仪(分辨率为 0.02 nm,采用 3 点平均法优化)采集。实验中采用的 LPFG 初始谐振峰波长为 1550.390 nm,且谐振波长处的损耗峰幅值为 -29.319 dB。整个实验过程历经 120 d,通过观察 LPFG 透射光谱的变化情况,获取钢筋锈蚀的状态信息。

图 6 给出了锈蚀过程中 LPFG 谐振峰幅值变化量的变化曲线图,与图 3 所示的 LPFG 的谐振峰幅值变化量与横向负载的关系趋势相一致。由图 6 可见,随着钢筋锈蚀的不断进行,LPFG 谐振峰幅值变化量从 0 dB 增加到 20.122 dB,该变化过程具有良好的规律性。LPFG 谐振峰透射光谱随锈蚀天数的变化图如图 7 所示。

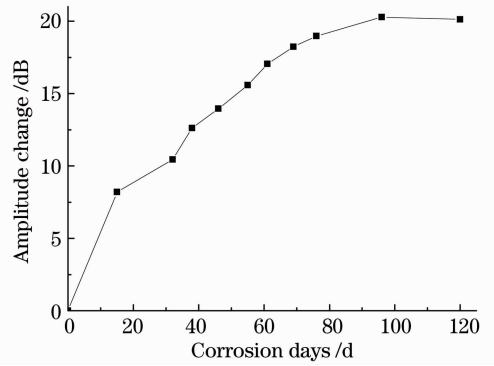


图 6 LPFG 谐振峰幅值变化量随锈蚀天数变化的曲线图

Fig. 6 Relation between LPFG resonant amplitude change and corrosion days

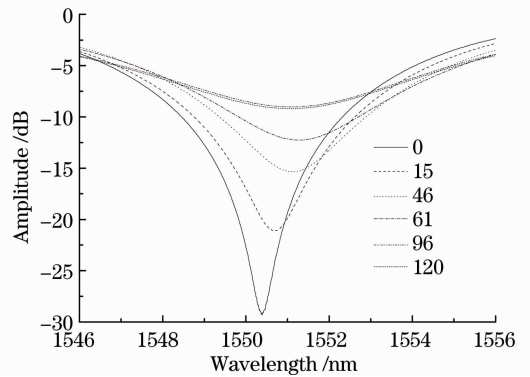


图 7 LPFG 谐振峰透射光谱随锈蚀天数的变化图

Fig. 7 Relation between LPFG transmission spectra and corrosion days

4.3 钢筋锈蚀标定实验

实验过程中,每隔一段时间在同时通电的一组钢筋中取出 1 块,其他继续通电。用浓度(质量分数)为 12% 的盐酸溶液将所取钢筋上的锈迹清洗干净,通过计算,建立 LPFG 谐振峰幅值变化量与钢筋锈蚀程度之间的关系。图 8 为实验进行第 32 d 和 120 d 时锈蚀后钢筋的实物图,锈蚀率分别为 6.46% 和 27.974%,此时钢筋锈蚀已非常严重。

图 9 为实验过程中钢筋锈蚀率随锈蚀天数的变

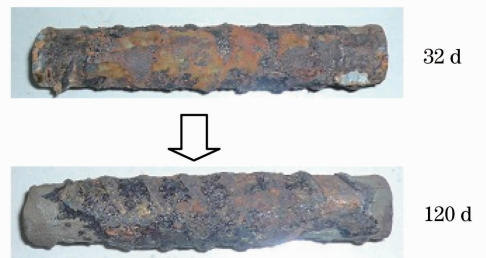


图 8 实验进行第 32 d 和 120 d 时锈蚀后钢筋的实物图

Fig. 8 Physical pictures of corroded steel in the 32th d and 120th d

化曲线图,横坐标为钢筋锈蚀天数,纵坐标为钢筋锈蚀率。结合图 6 可以看出,随着钢筋锈蚀率的增加,LPFG 谐振峰幅值变化量不断增加,且趋势明显,与方案设计的预期目标相符合,由此验证了所设计的基于 LPFG 横向负载敏感特性的钢筋锈蚀传感器在不同环境下钢筋锈蚀监测领域中的可行性。

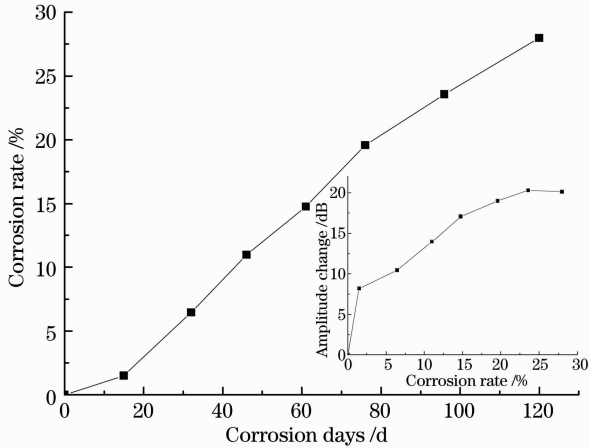


图 9 钢筋锈蚀率随锈蚀天数的变化曲线图

Fig. 9 Relation between rebar corrosion rate and corrosion days

4.4 传感系统温度补偿问题

由于温度因素对 LPFG 传感探头和金属材料本身的影响非常明显,因此在传感器设计之初需考虑该因素的影响。提出的基于 LPFG 横向负载特性的钢筋锈蚀传感器的温度补偿问题主要包括两个方面,LPFG 传感探头本身的温度补偿问题和由于材料热膨胀系数引起的传感装置的温度补偿问题。

1) LPFG 传感探头本身的温度补偿问题

温度变化对 LPFG 传感探头的影响主要反映在 LPFG 透射谱的谐振峰波长的变化,对谐振峰幅值影响较小^[20],即温度的变化不影响 LPFG 谐振峰波长处的幅值。由于提出的 LPFG 钢筋锈蚀传感器是基于谐振峰幅值调制原理,可避免温度、应变等环境因素对其造成的影响,即 LPFG 传感探头本身的温度补偿问题可以被忽略。

2) 材料热膨胀引起的传感装置的温度补偿问题

由于传感装置材料的热膨胀效应的存在,环境温度的变化会导致传感装置的热膨胀形变,即传感装置的温度补偿问题。环境温度下,用于传感装置的不锈钢材料的线性热膨胀系数为 $16 \times 10^{-6} \text{ mm}/^\circ\text{C}$,高于传感装置中其他材料的热膨胀系数。由于实验过程中的最大温差为 15°C ,传感装置材料的热膨胀效应导致的传感方向线膨胀量小于 0.024 mm 。锈蚀发生的前 15 d,钢筋的锈蚀率就已达 1.497% ,锈蚀

在传感方向上引起的位移量高达 0.561 mm 。与钢筋锈蚀导致的传感结果的变化相比,传感装置热膨胀效应对传感结果的影响较小,且随着锈蚀率的增加而不断减小,可忽略不计。

5 结 论

通过研究长周期光纤光栅谐振峰幅值随横向负载变化的敏感特性,将 LPFG 横向负载敏感特性与钢筋锈蚀膨胀状态监测相结合,提出了一种基于 LPFG 横向负载敏感特性的钢筋锈蚀传感器,通过测量由于待测钢筋锈蚀后体积膨胀而引起的 LPFG 谐振峰幅值的变化,实现对钢筋锈蚀状态的监测。通过理论分析和实验验证表明,设计的钢筋锈蚀传感方案中 LPFG 透射光谱的谐振峰幅值变化量与钢筋锈蚀率之间具有较好的对应关系。该方法结构简单,准确可靠,可更好地适用于多种钢筋锈蚀环境。

参 考 文 献

- P. K. Mehta, R. W. Burrous. Building durable structures in the 21st century[J]. *Concrete International*, 2001, **23**(3): 57~63
- C. Leonid, V. V. Dimitri, Y. V. Konstantin. Analytical modelling of concrete cover cracking caused by corrosion of reinforcement[J]. *Materi. Struct.*, 2010, **43**(4): 543~556
- T. Parthiban, R. Ravi. Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete[J]. *Adv. Engng. Software*, 2006, **37**(6): 375~381
- R. B. Podel. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation[J]. *Constuction and Building Materials*, 2001, **15**(2-3): 125~134
- M. Raupach, P. Schiebl. Macrocell sensor systems for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures[J]. *NDT&E International*, 2001, **34**(6): 435~442
- Liu Hongyue, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Long period fiber grating refractive index sensitivity-based reinforcing bar corrosion sensor in concrete [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806009
刘宏月, 梁大开, 曾捷等. 基于 LPFG 折射率敏感特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806009
- S. K. T. Grattan, P. Basheer, S. E. Taylor *et al.*. Fibre Bragg grating sensors for reinforcement corrosion monitoring in civil engineering structures[J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2007, **76**(1): 012018
- K. D. Bennett, L. R. McLaughlin. Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors[C]. *SPIE*, 1995, **2446**: 48~59
- J. R. Casas, P. Cruz. Fiber optic sensors for bridge monitoring [J]. *J. Bridge Engineering*, 2003, **8**(6): 362~373
- S. Aesushi, K. Hisakazu. A hetero-core structured fiber optic pH sensor [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, **582**(1): 154~257
- 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
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

- 12 H. Jeong, K. Oh. Theoretical analysis of cladding-mode waveguide dispersion and its effects on the spectra of long-period fiber grating[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(8): 1838
- 13 Zijia Zhang, Wenkang Shi. Characteristics of the transmission spectrum of the long period fiber gratings based on the coupling of core mode to the higher order cladding modes[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 573~575
- 14 W. Y. Su, G. W. Chern, L. A. Wang. Analysis of cladding-mode couplings for a lensed fiber integrated with a long-period fiber grating by use of the beam propagation method[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(31): 6576~6584
- 15 Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0405003
曹莹, 顾铮. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0405003
- 16 Yiping Wang, Dongning Wang, Wei Jin *et al.*. Asymmetric transverse-load characteristics and polarization dependence of long-period fiber gratings written by a focused CO₂ laser[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3079~3086
- 17 B. L. Bachim, T. K. Gaylord. Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(34): 6816~6823
- 18 Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang, Liang Kuai. Characteristic analysis of LPFG resonance wavelength shift owing to transverse load[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106002
曾祥楷, 饶云江, 梁快. 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106002
- 19 A. Poursaee, C. M. Hansson. Potential pitfalls in assessing chloride-induced corrosion of steel in concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, **39**(5): 391~400
- 20 Tong Zhengrong, Guo Yang, Yang Xiufeng *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain based on a long-period fiber grating combined with a Lyot fiber filter in a linear configuration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305002
童峥嵘, 郭阳, 杨秀峰等. 基于 Lyot 滤波器和长周期光纤光栅的温度与应变的同时测量[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305002

栏目编辑: 王晓球