

文章编号:1007-9629(2022)04-0434-07

# 基于单模-多模-单模光纤的钢筋腐蚀监测技术

李桐, 唐福建, 李宏男\*

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**提出了一种利用单模-多模-单模(SMS)光纤进行钢筋腐蚀监测的方法.首先,采用长度分别为 2、3、4 cm 的 3 组无芯光纤(NCF)作为多模光纤,制备单模-多模-单模(SMS)光纤传感器;然后,将贴有 SMS 光纤传感器的钢筋置于质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中进行腐蚀,并用光谱仪实时监测钢筋腐蚀过程中 SMS 光纤光谱的变化,同时采用开路电位和线性极化阻抗测量钢筋腐蚀电位和腐蚀电流密度,计算钢筋累积腐蚀量.结果表明:钢筋腐蚀量与特征波长的偏移量呈 3 次函数关系, SMS 光纤监测钢筋腐蚀的灵敏度随着多模光纤长度的增加而提高,且随着腐蚀时间的增加而先增大后减小.

**关键词:**单模-多模-单模光纤;钢筋腐蚀监测;特征波长;线性极化阻抗

中图分类号:TU511.3<sup>+</sup>2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.015

## Steel Bar Corrosion Monitoring Based on Single Mode-Multimode-Single Mode Optical Fiber

LI Tong, TANG Fujian, LI Hongnan\*

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A method of steel bar corrosion monitoring used single mode-multimode-single mode optical fiber was proposed. Firstly, three lengths of non-core fiber (NCF) were used as multimode fiber to make SMS optical fiber sensor, including 2 cm, 3 cm and 4 cm. Then, the fiber was directly placed on the polished side surface of a steel bar, and immersed in 3.5% NaCl solution for corrosion test. The change of light spectra was continuously monitored with an optical spectral analyzer (OSA), and the corrosion potential and corrosion current density of steel bar was measured with open circuit potential and linear polarization resistance, respectively, based on which the accumulative corrosion-induced mass loss of steel bar was calculated. Results indicate that a cubic relationship is present between the mass loss of steel bar and the change in the characteristic wavelength of SMS optical fiber. The sensitivity of SMS optical fiber for corrosion monitoring increases with an increase of the length of the multimode fiber segment, while it first increases and then decreases with the increase of corrosion time.

**Key words:** single mode-multimode-single mode (SMS) optical fiber; steel bar corrosion monitoring; characteristic wavelength; linear polarization resistance

混凝土作为当今社会使用量大且面广的材料,在重大建设工程中发挥着至关重要的作用,钢筋混凝土结构已成为世界上应用最广泛的结构形式.然而,随着时间的推移、工程结构服役环境的变化,钢

筋混凝土结构的耐久性问题日益突出,由于钢筋腐蚀引起结构的过早破坏,已成为全世界关注的一大灾害.钢筋腐蚀是钢筋混凝土结构过早变质的主要原因之一<sup>[1-2]</sup>.中国工程院“腐蚀调查”结果显示,2014

收稿日期:2020-12-20; 修订日期:2021-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878119);创新研究群体科学基金资助项目(51421064);辽宁省自然科学基金资助项目(2020-MS-121)

第一作者:李桐(1997—),女,吉林吉林人,大连理工大学硕士生.E-mail:2740629186@qq.com

通讯作者:李宏男(1957—),男,辽宁沈阳人,大连理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:hnli@dlut.edu.cn

年中国腐蚀总成本超过2万亿元人民币,约占当年GDP的3.34%;美国标准局(NBS)的调查显示,在美国,目前整个混凝土工程的价值约为6万亿美元,而每年用于维修或重建的费用预计高达3 000亿美元。因此研究有效的钢筋腐蚀监测方法,从而提高钢筋混凝土结构的耐久性和安全性是十分必要的。

目前对于钢筋腐蚀的监测方法主要分为电化学方法和非电化学方法。根据钢筋的腐蚀机理与影响钢筋腐蚀的因素得知,自然腐蚀电位、混凝土电阻率与腐蚀电流密度3个参数的获取对预测钢筋腐蚀有很大的作用,这3个参数的获取都是通过电化学方法得到的<sup>[3]</sup>。张俊喜等<sup>[4]</sup>采用电化学阻抗谱(EIS)和极化曲线研究了供货状态钢筋和打磨光滑钢筋在模拟混凝土孔隙液中碳化渐变条件下的腐蚀行为;陈海燕等<sup>[5]</sup>通过测量钢筋在不同pH值和不同氯离子浓度的模拟混凝土孔隙液中的稳态电位、腐蚀速率和阳极极化曲线,分析了腐蚀参数的变化规律。非电化学方法主要是应用各种传感器进行钢筋腐蚀监测,例如基于声发射<sup>[6]</sup>、超声导波<sup>[7]</sup>、氯离子浓度<sup>[8-9]</sup>、氧浓度<sup>[10]</sup>和其他参数<sup>[11]</sup>等变化的监测方法。

相较于上述传统监测方法,光纤传感器具有体积小、质量轻、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀性强等优点。因此一些光纤传感器已经应用于钢筋腐蚀监测领域。由于钢筋腐蚀会引起体积膨胀,Fuhr等<sup>[12]</sup>运用布拉格光纤光栅(FBG)间接地进行钢筋腐蚀监测。Majumde等<sup>[13]</sup>提出了基于1对预应变光纤光栅的结构腐蚀监测传感器,其监测机理是被测结构发生腐蚀时,会引起结构中预加应力的释放。由于在钢筋腐蚀过程中,环境折射率会发生改变,Zhang等<sup>[14]</sup>提出在化学腐蚀后的FBG表面溅射一层Fe-C膜。Chen等<sup>[15]</sup>在长周期光纤光栅上镀一层Fe-C膜,通过光谱特征波长偏移量来监测钢筋质量损失。

与上述光纤传感器相比,单模-多模-单模(SMS)光纤传感器具有制备简单、价格便宜、灵敏度高等优点。陈耀飞等<sup>[16]</sup>提出了一种基于无芯光纤的单模-多模-单模结构的折射率光纤传感器。Villar等<sup>[17]</sup>利用基于无芯光纤的单模-多模-单模(SMS)光纤传感器来检测风力发电机齿轮箱油的降解。王迎勋等<sup>[18]</sup>提出了一种单模-多模-单模结构的干涉型光纤温度传感器。目前国内外研究中还没有利用SMS进行腐蚀监测的相关报道。因此,本文利用单模-多模-单模(SMS)光纤传感器进行钢筋腐蚀监测的试验。试验时将SMS光纤固定在打磨好的矩形钢筋表面上,浸入质量分数为3.5%的NaCl溶液中进行腐

蚀;在钢筋腐蚀过程中,通过监测光谱透射峰对应的特征波长偏移量来达到监测钢筋腐蚀量的目的。

## 1 SMS 光纤传感原理

本文研究的基于NCF的单模-多模-单模(SMS)光纤结构见图1。在2段单模光纤(SMF)中熔接1段无芯多模光纤(NCF),就构成了SMS光纤传感器。单模光纤由纤芯、包层和涂覆层构成,其直径较小,只能传播一种模式光信号;无芯多模光纤由包层和涂覆层构成,包层直径比较大,可传输多种模式光信号。由于SMF和NCF结构参数不同,SMF中的基模传输到NCF中时会激发出多模光纤中一系列高阶模式 $LP_{m,m}$ 。当光从SMF耦合进入NCF时,只有线性偏振模 $LP_{0,m}$ 存在并在NCF中传输<sup>[19]</sup>。将不同高阶模式分别记为 $LP_{0,m}$ 和 $LP_{0,n}$ ,则2种模式的相位差取决于NCF的长度 $L$ 和2种模式的纵向传播常数差 $\beta_m - \beta_n$ 。本试验采用的NCF可以看作是其包层由半径无穷大的周围环境充当、直径较大的纤芯。2种模式的纵向传播常数差由下式计算得到<sup>[18,20]</sup>:

$$\beta_m - \beta_n = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{co},m} - n_{\text{eff}}^{\text{co},n})}{\lambda} \quad (1)$$

式中: $n_{\text{eff}}^{\text{co},m}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{co},n}$ 分别为NCF包层的第 $m$ 阶和第 $n$ 阶模式的有效折射率,当满足 $(\beta_m - \beta_n)L = 2N\pi$ 时产生干涉,其中 $N$ 为正整数,透射峰对应的波长 $\lambda$ 满足:

$$\lambda = \frac{\Delta n_{\text{eff}}(\lambda, n_{\text{ext}})L}{2N + 1} \quad (2)$$

式中: $\Delta n_{\text{eff}}(\lambda, n_{\text{ext}}) = n_{\text{eff}}^{\text{co},m}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{co},n}(\lambda)$ ;  $n_{\text{ext}}$ 为外界环境折射率。

当输入平坦的宽带光时,因每个波长对应的透射强度不同,用光谱仪就会接收到一条具有一定分布的透射谱,在透射强度最大的波长处会有一个透射峰。当钢筋在质量分数为3.5%的NaCl溶液中腐蚀时,由于铁锈的生成会引起溶液中离子种类和浓度的改变,导致NCF周围折射率发生改变。若保持外界其他条件不变,仅改变NCF周围的折射率时,由式(2)可知,透射峰对应的特征波长会发生偏移,最终导致光谱仪接收到的整体响应谱线和透射峰出现移

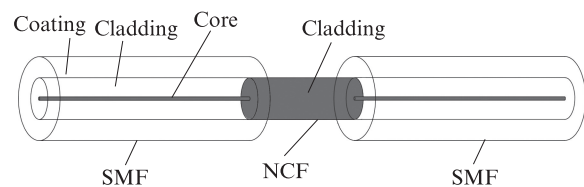


图1 基于NCF的SMS结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SMS structure based on NCF

动.由式(2)可知,特征波长取决于无芯多模光纤周围折射率的变化、无芯多模光纤长度和透射峰特性.

## 2 试验

### 2.1 单模-多模-单模(SMS)光纤和钢筋试件的制备

试验使用的单模光纤(SMF)为纤芯直径 $9\ \mu\text{m}$ 、包层直径 $125\ \mu\text{m}$ 、涂覆层直径 $250\ \mu\text{m}$ 的光纤(G652D).无芯多模光纤(NCF)为包层直径 $125\ \mu\text{m}$ 、涂覆层直径 $250\ \mu\text{m}$ 的光纤(FG125LA, Thorlabs).制备SMS光纤时,首先使用光纤剥线钳去除SMF和NCF表面涂覆层,并用光纤切割刀将SMF和NCF连接处端面切平;然后用酒精擦拭SMF与NCF的表面和端面,将SMF和NCF放入熔接机中熔接;最后用酒精擦拭光纤表面,保证其表面洁净.连接在2段SMF之间的NCF长度分别为2、3、4 cm.

试验所用钢筋为直径 $16\ \text{mm}$ 的HRB钢筋.分别截取9根长度为 $10\ \text{cm}$ 的钢筋段和3根长度为 $5\ \text{cm}$ 的钢筋段.用砂轮将所有钢筋段打磨出一个矩形平面,再用砂纸将矩形平面打磨光滑.将9根 $10\ \text{cm}$ 钢筋段按照NCF长度分为3组,每组3根.将SMS光纤贴在3组 $10\ \text{cm}$ 钢筋段表面,用于钢筋腐蚀过程中光谱的测量.在3根 $5\ \text{cm}$ 钢筋段端面距矩形平面较远处钻孔,将螺丝钉部分拧入孔中,螺丝钉露出部分缠绕铜导线;然后将这3根钢筋段置于冷镶嵌模具中,使用AB混合型水晶滴胶浇注,8 h后拆模.拆模后,用砂纸打磨钢筋的矩形平面,其余部分仍被滴胶包裹保护,进行钢筋腐蚀过程中的电化学测量.

### 2.2 光谱测量和极化曲线测量

光谱测量采用的钢筋长度为 $10\ \text{cm}$ .根据NCF长度将其分为3组,每组3根钢筋,保证试验的可重复性.使用胶带将光纤两端固定在钢筋的光滑矩形平面,保证光纤呈水平状态,然后将钢筋浸没在质量分数为 $3.5\%$ 的NaCl溶液中.在钢筋腐蚀过程中,通过光谱仪(OSA, AQ6370D)记录钢筋腐蚀过程中SMS光纤的光谱变化,记录间隔为 $5\ \text{min}$ ,光谱仪的扫描范围为 $1470\sim 1610\ \text{nm}$ .

通过极化曲线(LPR)可以计算钢筋的腐蚀电流密度,进而计算钢筋的累积腐蚀量.在每次极化曲线测试前,记录一个稳定的开路电位( $E_{\text{ocp}}$ ).极化曲线测试通过三电极装置完成,其中: $25.400\ \text{mm}\times 25.400\ \text{mm}\times 0.254\ \text{mm}$ 的铂片电极为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,准备好的 $5\ \text{cm}$ 钢筋试件为

工作电极.三电极连接到电化学工作站(Gamry, Reference 600 potentiostat/galvanostat/ZRA)进行数据采集.线性扫描的电压范围为开路电位附近的 $-20\sim 20\ \text{mV}$ ,扫描速率为 $0.125\ \text{mV/s}$ , $1\ \text{次/s}$ .

## 3 试验结果与分析

### 3.1 光谱测量结果

无芯多模光纤(NCF)长度为 $2\ \text{cm}$ 的单模-多模-单模(SMS)光纤在空气和质量分数为 $3.5\%$ 的NaCl溶液中的光谱见图2.由图2可见,SMS光纤在空气中和NaCl溶液中的光谱形状基本不变,透射峰对应的特征波长变大.这是多模光纤周围的折射率由 $1.00$ (空气)变为 $1.34$ (NaCl溶液)所致<sup>[21]</sup>.

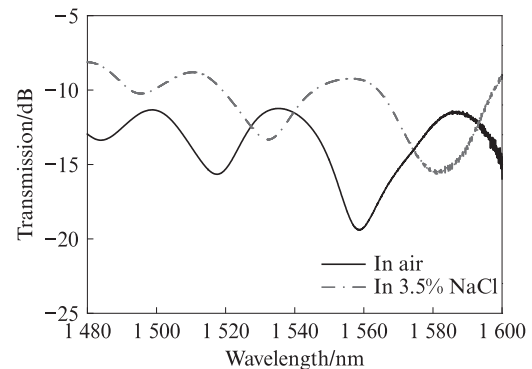
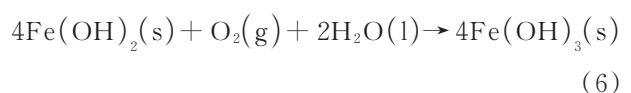
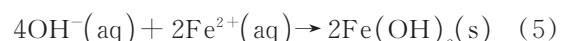
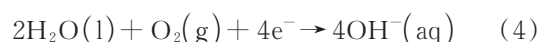
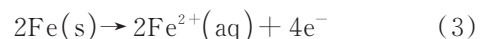


图2 SMS光纤在空气中和质量分数为 $3.5\%$ 的NaCl溶液中的光谱

Fig. 2 Spectra of SMS optical fiber in air and  $3.5\%$  (by mass) NaCl solution

图3为3种NCF长度下的SMS光纤在钢筋腐蚀过程中的光谱变化.由图3(a)可见:当NCF长度为 $2\ \text{cm}$ 时,在波长为 $1490\ \text{nm}$ 处出现了一个较为明显的波谷,波谷对应的波长为SMS光纤的特征波长;随着腐蚀的进行,光谱的形状基本不变,透射峰对应的特征波长随着腐蚀时间的增加而发生红移.由图3(b)、(c)可见,同样的规律发生在NCF长度为3、4 cm时.造成这种偏移的原因是钢筋在腐蚀过程中生成腐蚀产物铁锈,且溶液中离子的种类和浓度发生改变,造成多模光纤周围折射率发生改变.钢筋腐蚀过程中的主要化学反应如下:



上述式中的(s)、(l)、(g)、(aq)分别代表物质的

状态为固体、液体、气体和溶液.

图4为3种NCF长度下的SMS光纤特征波长的偏移量 $\Delta\lambda$ 随腐蚀时间的变化.由图4可见,随着腐蚀时间的增加,特征波长的偏移量均增加,且NCF长度越长,特征波长的最大偏移量越大:NCF长度

为2 cm时,特征波长最大偏移量为18.70 nm;NCF长度为3 cm时,特征波长最大偏移量为33.55 nm;NCF长度为4 cm时,特征波长最大偏移量为68.45 nm.由此可见,NCF长度越长,特征波长的偏移量越大,即灵敏度越高.

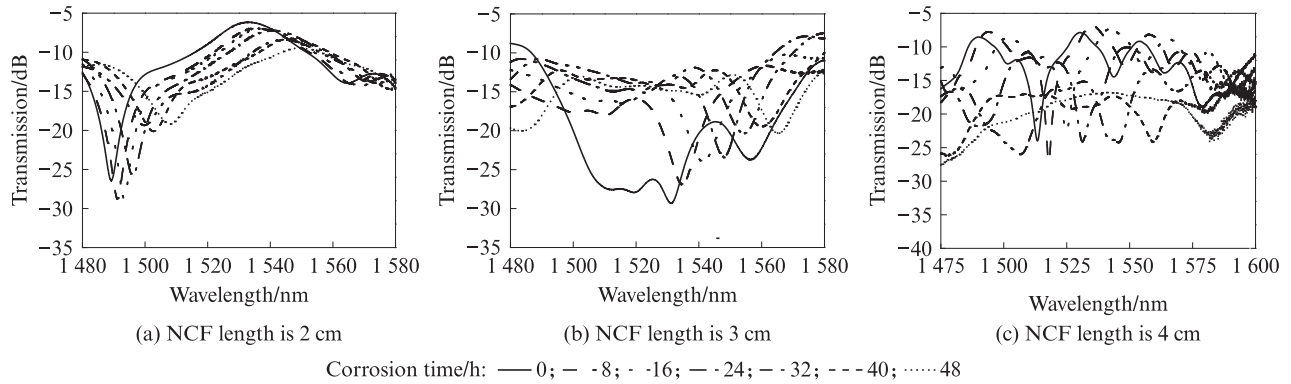


图3 3种NCF长度下的SMS光纤在钢筋腐蚀过程中的光谱变化  
Fig. 3 Spectral changes of SMS optical fiber with three NCF lengths during steel corrosion

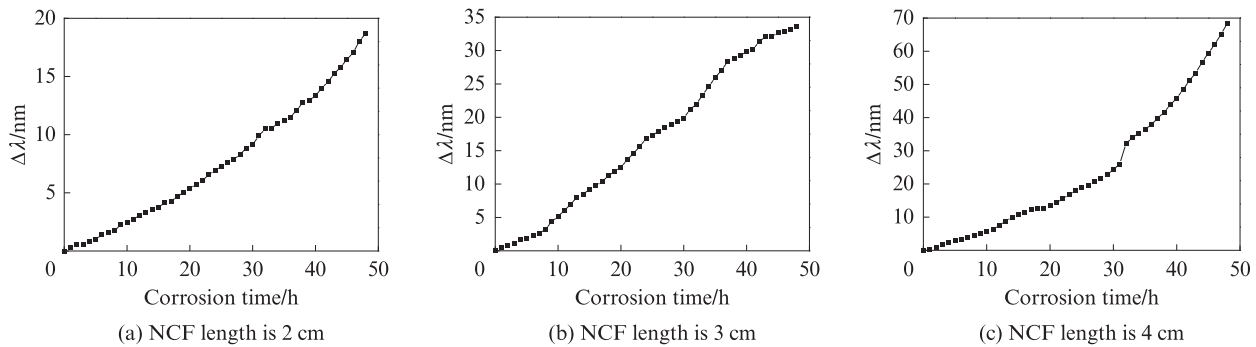


图4 3种NCF长度下的SMS光纤特征波长偏移量随腐蚀时间的变化  
Fig. 4 Characteristic wavelength changes with corrosion time of SMS optical fiber with three NCF lengths

### 3.2 电化学测量结果

将制备好的长5 cm钢筋试件浸入质量分数为3.5%的NaCl溶液中,测试其开路电位 $E_{ocf}$ 随腐蚀时间的变化,结果见图5.由图5可见,钢筋的初始开路电位为-575 mV,在腐蚀开始后迅速下降,24 h之后

趋于稳定,电位维持在-720 mV左右.图6为钢筋腐蚀的极化曲线,可以看到,随着腐蚀时间的增加,钢筋电位 $E$ 逐渐减小,在24 h之后趋于稳定.极化阻抗 $R_p$ 的计算式为:

$$R_p = \Delta V / \Delta i \tag{7}$$

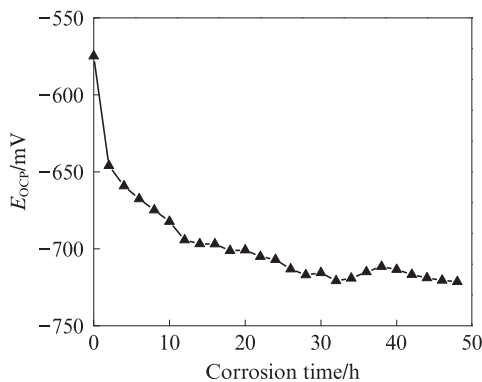


图5 开路电位随腐蚀时间的变化  
Fig. 5 Change of  $E_{ocf}$  with corrosion time

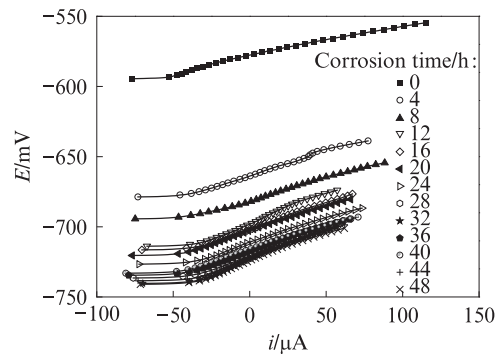


图6 钢筋腐蚀的极化曲线  
Fig. 6 LPR curve of steel bar corrosion

式中： $\Delta V$ 和 $\Delta i$ 分别表示极化曲线在 $i=0$ 处线性段的电压和电流密度增量。

对腐蚀电流密度的计算基于 Stern-Geary 方程式<sup>[22]</sup>：

$$i_{\text{corr}} = B/R_p \quad (8)$$

由于在线性极化区无法直接得到 Tafel 斜率 $\beta_a$ 和 $\beta_c$ ( $\beta_a$ 代表阳极斜率, $\beta_c$ 代表阴极斜率),所以假设这2个值均为120 mV.根据上述假设值,Stern-Geary 系数数值为：

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (9)$$

计算得到 $B$ 值为26 mV,钢筋露出的矩形截面面积为 $4.25 \text{ cm}^2$ .通过式(8)可以计算出每个 $R_p$ 值对应的腐蚀电流密度 $i_{\text{corr}}$ ,得到极化阻抗和腐蚀电流密度随腐蚀时间变化的曲线,见图7.由图7可见:极化阻抗和腐蚀电流密度均在较小范围内波动,基本稳定;极化阻抗的波动范围为 $963 \sim 2071 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,腐蚀电流密度的波动范围为 $13 \sim 27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .根据腐蚀电流密度可以计算相应时间段钢筋的腐蚀量.根据法拉第定律：

$$m = KQ = KIt \quad (10)$$

式中： $m$ 为金属质量； $t$ 为时间； $K$ 为比例常数(电化当量), $K = M/Fn$ ,其中的 $M$ 为物质的摩尔质量, $F$ 为法

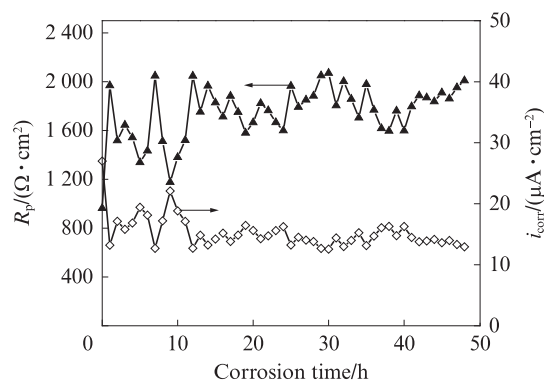


图7 极化阻抗和腐蚀电流密度随腐蚀时间的变化  
Fig.7 Change of  $R_p$  and corrosion current density with corrosion time

拉第常数(数值为 $96\,500 \text{ C/mol}$ ), $n$ 为化合物中正或负化合价总数的绝对值; $I$ 为电流强度, $I(t_k) =$

$$\sum_{j=1}^k i(t_j) \Delta t.$$

根据式(10),可以求得每个时间段对应的钢筋腐蚀量 $\Delta m$ .

### 3.3 钢筋腐蚀量与 SMS 光纤特征波长偏移量之间的关系

图8为钢筋腐蚀量 $\Delta m$ 与3种NCF长度下的SMS光纤特征波长偏移量 $\Delta\lambda$ 的关系.由图8可见,

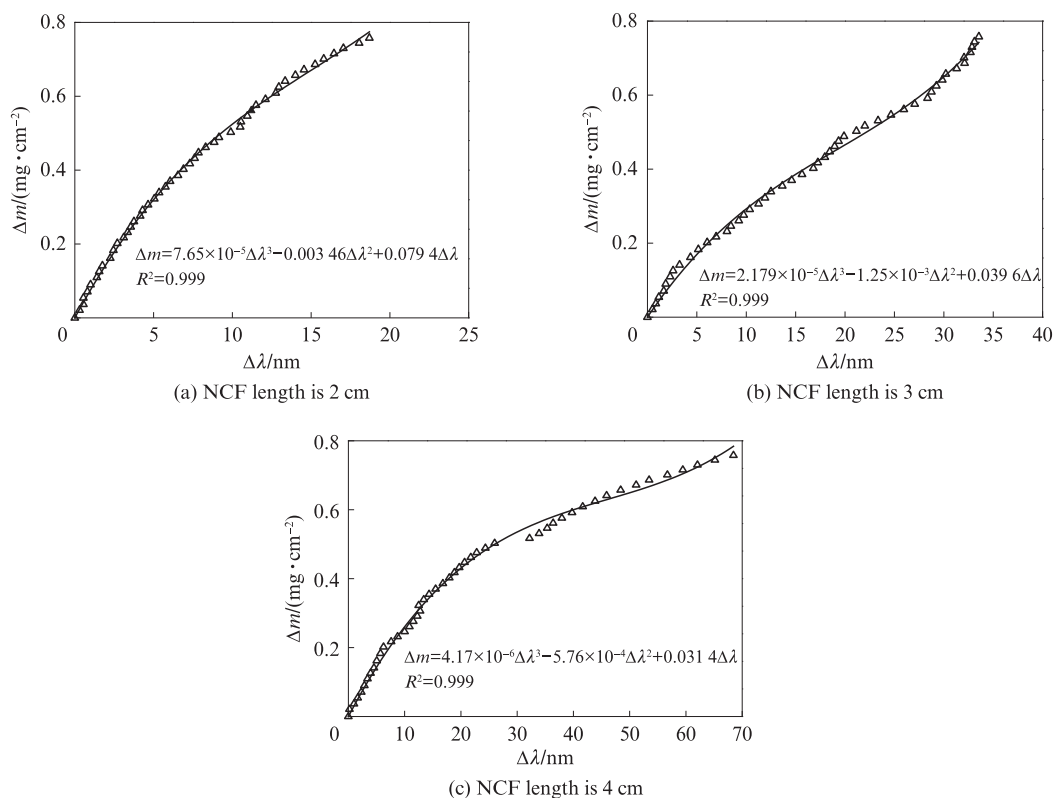


图8 钢筋腐蚀量与3种NCF长度下的SMS光纤特征波长偏移量的关系

Fig.8 Relationship of steel bar mass loss and characteristic wavelength changes of SMS optical fiber with three NCF lengths

当钢筋腐蚀量增加时,SMS光纤的特征波长偏移量随之增大,因此SMS光纤可以用来进行钢筋腐蚀的监测.但是,钢筋腐蚀量与特征波长偏移量呈现出非线性关系.本文采用3次函数对两者关系进行了拟合,发现拟合优度接近1.由此说明采用3次函数表示两者关系较合适,拟合方程关系式也列于图8.灵敏度是传感器非常重要的参数之一,SMS光纤腐蚀监测的灵敏度即为图8中拟合3次函数切线的斜率.由图8可见,采用SMS光纤进行钢筋腐蚀监测的灵敏度随着多模光纤长度的增加而提高.另外需要注意的是,在一定时间范围内,SMS光纤的灵敏度随着腐蚀时间的增加发生先增大后减小的变化.这是由于在腐蚀初期,NCF表面是NaCl溶液,当钢筋腐蚀生成 $Fe^{2+}$ 后,会使NCF周围折射率发生改变,导致多模光纤包层折射率与外界环境折射率的差值变小,SMS光纤的灵敏度增大<sup>[23]</sup>;一段时间后,NCF表面被钢筋腐蚀生成的铁锈逐渐覆盖,钢筋继续腐蚀而生成的过多 $Fe^{2+}$ 无法改变NCF附近溶液的折射率,导致SMS光纤的灵敏度下降.

#### 4 结论

(1)钢筋腐蚀引起SMS光纤透射光谱发生偏移,偏移量随着无芯多模光纤(NCF)长度的增加而增加.在钢筋腐蚀的48 h内,当NCF的长度分别为2、3、4 cm时,SMS光纤的特征波长最大偏移量分别为18.70、33.55、68.45 nm.

(2)SMS光纤的特征波长偏移量随着钢筋腐蚀量的增加呈现非线性增大趋势,回归分析发现钢筋的累积腐蚀量与SMS光纤的特征波长偏移量呈3次函数关系.

(3)采用SMS光纤进行钢筋腐蚀监测的灵敏度随着钢筋腐蚀产物生成量的增加先增大后减小,而且随着NCF长度的增加,SMS光纤腐蚀监测的敏感性提高.

#### 参考文献:

- [ 1 ] CHEEWAKET T, JATURAPITAKKUL C, CHALEE W. Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37:693-698.
- [ 2 ] YU H, SHI X M, HARTT W H., 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.
- [ 3 ] AHAMD S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—A review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(4/5):459-471.
- [ 4 ] 张俊喜,王灵芝,蒋俊,等.钢筋在模拟碳化渐变条件下的腐蚀过程研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(1):66-71.  
ZHANG Junxi, WANG Lingzhi, JIANG Jun, et al. Study on corrosion process of steel bar under simulated carbonization gradient condition[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(1):66-71.(in Chinese)
- [ 5 ] 陈海燕,李欢园,陈丕茂,等.钢筋在混凝土模拟液中的电化学腐蚀行为[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(1):131-137.  
CHEN Haiyan, LI Huanyuan, CHEN Pimao, et al. Electrochemical corrosion behavior of steel bar in simulated concrete solution[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(1):131-137. (in Chinese)
- [ 6 ] SHILPA P, BILAVARI K, SHWETA G. Acoustic emission vis-à-vis electrochemical techniques for corrosion monitoring of reinforced concrete element [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68:326-332.
- [ 7 ] ASHUTOSH S, SHRUTI S, SANDEEP S, et al. Ultrasonic guided waves for monitoring corrosion of FRP wrapped concrete structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96:690-702.
- [ 8 ] KIM H-K. Chloride penetration monitoring in reinforced concrete structure using carbon nanotube/cement composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96:29-36.
- [ 9 ] GANDÍA-ROMERO J M, BATALLER R, MONZÓN P, et al. Characterization of embeddable potentiometric thick-film sensors for monitoring chloride penetration in concrete [J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2016, 222:407-418.
- [ 10 ] CORREIA M J, PEREIRA E V, SALTA M M, et al. Sensor for oxygen evaluation in concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(3):226-232.
- [ 11 ] DONG S G, LIN C J, HU R G, et al. Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 56(4):1881-1888.
- [ 12 ] FUHR P L, HUSTON D R, MCPADDEN A P, et al. Embedded chloride detectors for roadways and bridges[C]// *Proceeding Volume 2719, Smart Structures and Materials 1996: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*. San Diego, CA, United States: University of Vermont (United States); Vermont Agency of Transportation (United States), 1996:229-237.
- [ 13 ] MAJUMDER M, GANGOPADHYAY T K, CHAKRABORTY A K. Fiber bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2008, 147(1):150-164.
- [ 14 ] ZHANG N, CHEN W, ZHENG X, et al. Optical sensor for steel corrosion monitoring based on etched fiber bragg grating sputtered with iron film[J]. *IEEE Sensors*, 2015, 15(6):3551-3556.
- [ 15 ] CHEN Y Z, TANG F J, TANG Y, et al. Mechanism and sensitivity of Fe-C coated long period fiber grating sensors for steel corrosion monitoring of RC structures [J]. *Corrosion Science*, 2017, 127:70-81.

- [16] 陈耀飞, 韩群, 何洋, 等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9):108-113.  
CHEN Yaofei, HAN Qun, HE Yang, et al. Research on single mode-multi-mode-single mode refractive index sensor based on non-core fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 108-113.(in Chinese)
- [17] VILLAR I D, GOÑI J, VICENTE A, et al. Etched and nanocoated single-mode multimode single-mode (SMS) fibers for detection of wind turbine gearbox oil degradation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18):4665-4673.
- [18] 王迎勋, 王彩峰, 王香, 等. 一种单模-多模-单模结构的干涉型光纤温度传感器[J]. 低温物理学报, 2019, 41(4):290-296.  
WANG Yingxun, WANG Caifeng, WANG Xiang, et al. A single mode-multi-mode-single mode interferometric fiber temperature sensor[J]. Low Temperature Physical Letters, 2019, 41(4):290-296.(in Chinese)
- [19] MOHAMMED W S, METHA A, JOHNSON E G. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference[J]. Journal of Lightwave Technology: A Joint IEEE/OSA Publication, 2004, 22(2):469.
- [20] 杨娇. 基于SMS结构的腐蚀型光纤传感器的实验研究[D]. 天津:天津理工大学, 2014.  
YANG Jiao. Experimental study on corrosion fiber sensor based on SMS structure[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2014.(in Chinese)
- [21] LAM C C C, MANDAMPARAMBIL R, SUN T, et al. Optical fiber refractive index sensor for chloride ion monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9:525-531.
- [22] STERN M, GEARY A L. Electrochemical polarization I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1957, 104(1):56-63.
- [23] 徐伟. 基于无芯光纤的多模干涉型光纤传感技术研究[D]. 天津:天津大学, 2017.  
XU Wei. Research on multi-mode interferometric fiber sensing technology based on coreless fiber [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.(in Chinese)