

光纤光栅腐蚀传感器*

江 毅¹ 严 云² Christopher K. Y. Leung³

(1 北京理工大学信息学院光电子研究所, 北京 100081)

(2 西南科技大学材料科学与工程学院, 绵阳 621010)

(3 香港科技大学土木工程系, 九龙, 香港)

摘 要 提出了一种测量钢筋腐蚀的新型传感器. 这种传感器将光纤光栅拉伸后固定在圆形钢筋的表面, 在钢筋被腐蚀后, 光纤光栅所受到的拉伸应变将被释放, 光纤光栅的反射光波长发生变化, 通过测量光纤光栅的波长就可以测得钢筋腐蚀程度. 这种传感器测量准确度优于 $\pm 0.1 \mu\text{m}$, 测量范围约 $12 \mu\text{m}$, 可用于混凝土结构中钢筋腐蚀的早期监测.

关键词 光纤光栅; 光纤传感器; 腐蚀

中图分类号 TN253; TP212 **文献标识码** A

0 引言

混凝土是土木工程结构中使用最多的材料. 混凝土结构损坏的最主要的原因是内部钢筋的腐蚀. 钢筋腐蚀会导致昂贵的维护费用, 甚至结构坍塌. 造成钢筋腐蚀的原因主要有 2 个: 氯离子的进入和酸化. 测量钢筋腐蚀的技术传统上都是使用电化学的方法^[1], 如测量偏置电阻, 电化学阻抗, 电位等方法. 但这些方法对测量结果的解释还存在一些困难, 且是间接测量法, 不能直接描述钢筋的腐蚀程度.

本文提出了一种用光纤光栅^[2]测量应变的方法, 来直接测量钢筋的腐蚀程度, 它除了具有抗干扰强, 可在线测量的优点外, 还可以直接描述出腐蚀的程度, 如腐蚀厚度. 在实验室中还可以直接用来测试各种材料的抗腐蚀能力.

光纤光栅所具有的本征和波长调制的特点使它具有很强的抗干扰能力. 而波长编码的特点使之便于复用, 在一根光纤上可以同时完成几十个点的腐蚀测量, 而且能够实现绝对测量, 即测量不必连续进行, 因为光纤光栅本身具有“记忆”能力. 光纤所具有的耐酸碱、抗腐蚀的性能也使之便于室外长期连续工作, 而电类传感器经过一段时间腐蚀后则可能失效. 光纤光栅的失效除了被拉断外, 主要是强烈的紫外光照射或高温引起光栅的“漂白”, 因为这两种情况都会抹去光纤中的光栅. 但用在土木结构的健康监测时不会有这种工作环境, 因此适合用于对钢筋的腐蚀进行长期测量.

1 光纤光栅应变传感器原理

光纤光栅是使光纤纤芯的一小段(约 10~20 mm)的折射率产生周期性扰动而形成的一种芯内体光栅, 它的形成是由于掺锗光纤具有紫外光敏特性的缘故. 光纤光栅由于只反射导模中满足 Bragg 衍射条件的光, 因此其波长移动就反映了外界的物理扰动.

由 Bragg 衍射条件

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中 λ 是反射光波长, Λ 是光栅栅距, n 是纤芯有效折射率. 当光纤产生应变时, 光纤光栅的栅距和折射率发生变化, 引起后向反射光波长移动, 因此有

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n}{n} \quad (2)$$

式中 Δn 是折射率的变化, $\Delta\Lambda$ 是栅距的变化.

光纤产生应变时折射率的变化

$$\Delta n/n = -\frac{1}{2}n^2[(1-\mu)P_{12} - \mu P_{11}]\epsilon = -P\epsilon \quad (3)$$

式中: $P = \frac{1}{2}n^2[(1-\mu)P_{12} - \mu P_{11}]$, ϵ 是光纤轴向应变, μ 是泊松比. 对于典型的石英光纤: $n = 1.46$, $\mu = 0.16$, $P_{11} = 0.12$, $P_{12} = 0.27$, 则 $P = 0.22$.

由于 $\Delta\Lambda/\Lambda = \Delta L/L = \epsilon$, 所以式(2)可写为

$$\Delta\lambda/\lambda = (1-P)\epsilon = 0.78\epsilon \quad (4)$$

对于 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的光纤光栅, 应变灵敏度

$$\kappa = \Delta\lambda/\epsilon = 0.78 \times \lambda = 1.2 (\text{pm}/\mu\epsilon) \quad (5)$$

因此光纤光栅的波长与应变 S 的关系可以写为

$$\Delta\lambda = \kappa \times S \quad (6)$$

用光纤光栅来实现的腐蚀传感器是将光纤拉伸后紧紧地绕在钢筋上, 并用胶粘住起始和终止 2 点. 在粘贴过程中始终保持对光栅的拉伸, 这样给光栅预先施加了一个应力. 当钢筋受到腐蚀后, 钢筋的直径会减小, 相应光纤受到的拉伸应变就会减

* 国家 863 资助项目(2004AA616020)

Tel: 010-68913586 Email: bitjy@bit.edu.cn

收稿日期: 2004-10-11

小,直到应力被完全释放,传感器失效.

设钢筋的直径为 D ,半径为 r ,则光纤应变的变化量 S 为

$$S = -\frac{\Delta D}{D} \times 10^6 = -\frac{\Delta r}{r} \times 10^6 (\mu\epsilon) \quad (7)$$

因此,在钢筋腐蚀过程中的光纤光栅波长的降低对应钢筋的直径减小量

$$\Delta D = -D \times \frac{\Delta \lambda}{\kappa} \times 10^{-6} \quad (8)$$

定义腐蚀深度为 $\Delta r = \Delta D/2$.

2 实验结果

实验使用直径为 38.09 mm 的钢棒. 将光纤紧紧在钢棒上绕 2 匝,并施加一个预拉伸力,用环氧树脂胶粘牢,如图 1. 光纤光栅位于粘固点的中心,用于测量光纤所受拉伸应变. 为了加快钢筋的腐蚀速度,将钢筋完全浸入浓度为 5% 的盐水中. 因此,为了避免被盐水浸泡后,粘贴点发生松动,需要在粘贴点上多次涂胶,每一次胶固化后再涂下一次,并且面积比上一次大,以保护内层的胶不受盐水浸泡. 光纤光栅的波长是 1549.10 nm,粘贴在钢筋上后,拉伸后的波长是 1549.260,放入盐水中稳定后的波长是 1549.224 nm. 实验每隔 12 h 测量一次,测量仪器 FBG-IS 的分辨率是 1 pm,但测量准确度只有 10 pm. 测量结果如图 2. 随着腐蚀时间的增加,光纤光栅的波长逐渐减小,即光纤的应变逐渐降低,最后光纤所

受拉伸应力完全释放,光纤光栅的波长趋于一个稳定值,不能再测量出钢棒直径的变化,传感器失效.

在钢棒的腐蚀过程中,光纤光栅的波长从初始的 1549.230 nm 下降到 1549.150 nm,波长变化了 80 pm,在 1550 nm 波长上对应光纤的应变变化为 66.6 $\mu\epsilon$. 对直径为 38.09 mm 的圆柱钢棒,直径减小了 2.54 μm .

在图 2 的线性下降的区间,光纤光栅波长从 1549.24 下降到 1549.12 所用的时间约 120 h,因此可以计算出 5% 浓度的盐水在 25℃ 的环境温度下,对钢棒径向的腐蚀速度约为 0.016 $\mu\text{m}/\text{h}$.

用这种腐蚀传感器对钢筋进行了腐蚀测量实验. 由于钢筋表面的两侧有脊梁,使光纤不便于缠绕在钢筋上,也容易引起光纤折断. 因此仅仅是将光纤光栅拉紧后粘贴在钢筋 1/3 圆周长的位置,位于两侧脊梁间,如图 3. 钢筋直径为 24.3 mm,两粘贴点间光纤的间距为 15.41 mm,与光纤光栅的长度相当. 光纤光栅的波长为 1552.02 nm,拉伸粘贴到钢筋表面后,放入 5% 的盐水中稳定后的波长是 1552.165 nm. 光纤光栅腐蚀传感器的波长从初始的 1552.165 nm 下降到 1552.075 nm,波长变化了 90 pm,光纤光栅的波长随腐蚀时间的变化如图 4. 在 1550 nm 波长上对应光纤的应变变化为 75 $\mu\epsilon$. 对直径为 24.3 mm 的钢筋,直径减小了 1.82 μm .

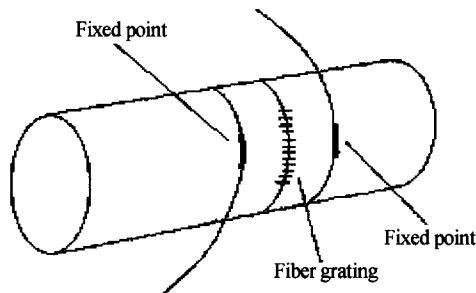


图 1 光纤光栅绕在钢棒上
Fig. 1 Fiber grating is wrapped on the steel bar

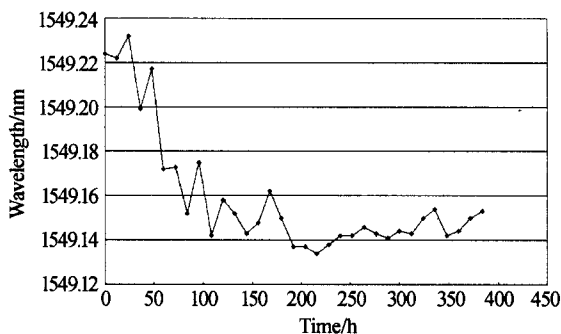


图 2 钢棒表面光纤光栅波长随时间变化曲线
Fig. 2 The wavelength variation of FBG on the surface of steel bar with corrosion time

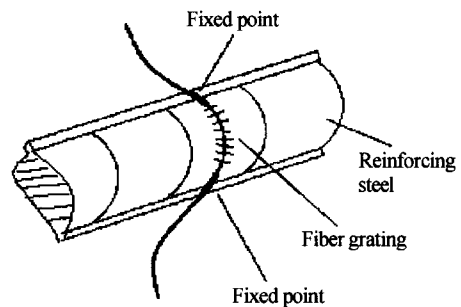


图 3 光纤光栅粘贴在钢筋上
Fig. 3 Fiber grating is fixed on the surface of reinforcing steel

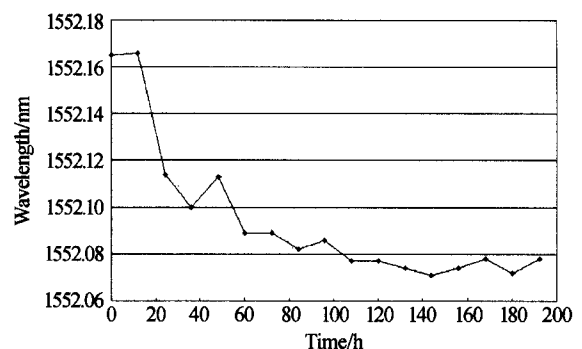


图 4 钢筋表面光纤光栅波长随时间变化曲线
Fig. 4 The wavelength variation of FBG on the surface of reinforcing steel with corrosion time

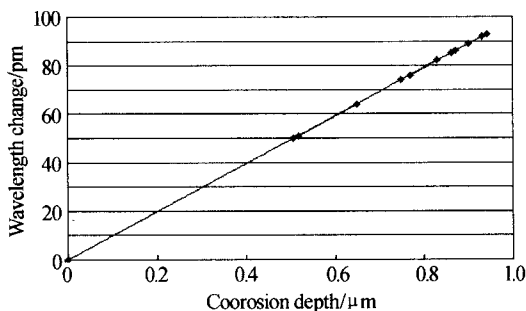


图5 波长移动与腐蚀深度的关系

Fig. 5 The relationship between wavelength variation and corrosion depth

在光纤光栅的波长线性下降段,从 1552.18 nm 下降到 1552.06 nm 所用的时间约 60 h,因此可以计算出 5%浓度的盐水在 25℃的环境温度下,对钢筋径向的腐蚀速度约为 0.02 $\mu\text{m}/\text{h}$. 图 5 还给出了光纤光栅的波长变化量与腐蚀深度的关系,斜率为 100 pm/ μm ,即钢筋腐蚀深度(或半径)每增加 1 μm 将引起光栅波长移动 100 pm.

由于这一传感器需要预先拉伸光纤,然后通过钢筋腐蚀后释放应力,因此传感器的测量范围就受到初始应变的限制. 初始应变越大,传感器能够测量的腐蚀深度就越大. 光纤的极限拉伸应变大约 10000 $\mu\epsilon$,实际可测量的腐蚀深度远大于本文实验中的结果. 但实际光纤的拉伸应变不宜超过 1000 $\mu\epsilon$,因为光纤拉伸量太大后,就不容易固定在钢筋的表面,或者光纤和固化粘胶间容易产生滑动.

光纤光栅测量仪的波长测量准确度优于 ± 0.5 pm,对应测量 24.3 mm 的钢筋腐蚀深度优于 ± 0.1 μm . 若初始拉伸应变为 1000 $\mu\epsilon$,对于直径为 24.3 mm 的钢筋,光纤光栅在 1550 nm 上波长变化范围为 1.2 nm,因此可以测量钢筋腐蚀的深度为 12 μm .

图 2 和图 4 两条曲线实际上是同时进行测量的. 2 支波长分别为 1549.1 nm 和 1552.02 nm 的光纤光栅串联后通过一根光纤接到测量仪. 实际上对于腐蚀传感器,一般可以在一根光纤上实现 30 个点的同时监测. 但实验中,在约 200 h 后,第 2 支光栅损坏,只有第一支光栅还有读数.

3 温度影响的讨论

光纤光栅的波长变化还受环境温度的影响,因此在实验中,实验环境基本保持不变. 但在实际工程中,环境温度变化很大,因此有必要专门讨论温度对腐蚀测量的影响. 由于本文提出的测量钢筋腐蚀是通过测量光纤光栅应变实现的,因此这一问题实际上是区分应变与温度交叉敏感的问题. 考虑温度和应变同时作用在光纤光栅上,光纤光栅波长的变化可以写为

$$\Delta\lambda = k_e \cdot \Delta\epsilon + k_T \cdot \Delta T \quad (9)$$

k_e 和 k_T 分别是光纤光栅的应变灵敏度和温度灵敏度,对于 1.55 nm 波长, $k_e = 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $k_T = 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. 式(9)中,应变和温度分别对光纤光栅的波长产生影响,没有交叉项,因此可以从被测结果中将温度和应变的影响区分开. 区分交叉敏感的技术有采用双光栅矩阵算法^[4];使用啁啾布喇格光栅法^[5];长周期光栅(LPG)^[6](LPG 具有远大于 FBG 的温度灵敏度和远小于 FBG 的应力灵敏度);另一种是采用布喇格光栅和光纤 Fabry-Perot 腔的传感器^[7]. 由于光纤光栅的复用数目可以较多,因此专门用一支光纤光栅来测量环境温度,不感受应变. 测量出 ΔT ,再从式(9)中减去温度的影响 $k_T \cdot \Delta T$,就可以得到应变引起光纤光栅波长的变化量(在这里反映了腐蚀程度),因而去除了温度的影响.

4 结论

这种光纤光栅腐蚀传感器是将光纤光栅预拉伸后绕在钢筋表面,由于腐蚀,将使钢筋的直径减小,使得拉伸光纤的应力得以释放. 通过光纤光栅来测得光纤的应变变化,就可以获得钢筋直径的变化.

这种腐蚀传感器测量的腐蚀深度较浅,它适合钢筋早期腐蚀过程的测量. 而传统电化学的方法测量腐蚀则刚好相反,它适合测量腐蚀严重的情况. 而对早期的轻微腐蚀则很难做出反映.

参考文献

- Montemor M F, Simoes A M P, Ferreira M G S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques, cement & Concrete Composites, 2003, 25: 491~502
- 江毅,李建蜀,陈伟民,等. 光纤布喇格光栅传感器. 压电与声光, 1995, 17(2): 9~13
Jiang Y, Li J S, Chen W M, et al. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1995, 17(2): 9~13
- 江毅,陈伟民,杨礼成,等. 光纤光栅用于应变/温度传感初探. 传感技术学报, 1997, (3): 43~47
Jiang Y, Chen W M, Yang L C, et al. Journal of Sensing Technology, 1997, (3): 43~47
- Xu M G, Dong L. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors. Electronics Letters, 1994, 30(13): 1085~1087
- 董新永,赵春柳,宁鼎,等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的弯曲传感. 光子学报, 2001, 30(4): 425~428
Dong X Y, Zhao C L, Ning D, et al. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(4): 425~428
- 贾宏志,李育林,忽满利. 长周期光纤光栅传感器温度和应变灵敏度分析. 光子学报, 1999, 28(8): 711~714

Jia H Z, Li Y L, Hu M L. *Acta Photonica Sinica*, 1999,
28(8):711~714
7 曾祥楷, 饶云江, 余般梅, 等. 光纤应变、温度、振动同时

测量新技术的研究. *光子学报*, 2001, 30(10):1254~1258
Zeng X K, Rao Y J, Yu B M, *et al.* *Acta Photonica
Sinica*, 2001, 30(10):1254~1258

Optical Fiber Grating Corrosion Sensors

Jiang Yi¹, Yan Yun², Christopher K. Y. Leung³

¹ *Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*

² *Institute of Material Science and Engineering, South-West University of Science and Technology, Mianyang 621010*

³ *Department of Civil Engineering, Hongkong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hongkong*

Received date: 2004-10-11

Abstract A new type of corrosion sensor for reinforcing steel was developed in this paper. The optical fiber grating was pre-strained when it was fixed on the surface of cylindrate steel bar. The strain would be released when the steel was eroded, the wavelength of FBG will be changed accordingly. The corrosion depth could be measured by detecting the wavelength of fiber grating. The precision was better than $0.1 \mu\text{m}$ and the measuring depth scope of $12 \mu\text{m}$ could be obtained. The sensor could be used to monitor the early corrosion of reinforcing steel in concrete structure.

Keywords Fiber grating; Fiber Optical Sensor; Corrosion



Jiang Yi received M. S. degree in 1993 and Ph. D. in 1996 from Chongqing University. Now he is an associate professor in Beijing Institute of Technology. He has published more than 40 research papers. His research interests include fiber optical sensors and smart structure.