



# 国外混凝土结构耐久性监测传感器 在国内工程中的适用性\*

汤雁冰, 王胜年, 范志宏, 黎鹏平, 杨海成

(中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510240)

**摘要:** 采用动电位极化和线性极化技术研究了国内普通钢筋、阳极梯监测传感器所用普通钢筋和 ECI-2 传感器所用普通钢筋的点蚀临界浓度和点蚀后的腐蚀速率。研究表明: ECI-2 传感器所用普通钢筋的点蚀临界氯离子浓度与国内普通钢筋相似, 点蚀速率略小于国内普通钢筋; 阳极梯传感器所用的普通钢筋的点蚀临界氯离子浓度要高于国内普通钢筋, 点蚀速率要明显低于国内普通钢筋。因此, 在用这两种传感器进行国内工程耐久性监测时应根据监测结果进行修正。

**关键词:** 阳极梯传感器; ECI-2 传感器; 临界氯离子浓度; 腐蚀速率

中图分类号: TU 528.33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0019-04

## Applicability of overseas monitoring sensors in domestic concrete structures

TANG Yan-bing, WANG Sheng-nian, FAN Zhi-hong, LI Peng-ping, YANG Hai-cheng

(Key Laboratory of Durability Technology for Harbor & Marine Structure, Ministry of Transport,  
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510240, China)

**Abstract:** The critical chloride ions concentration of pitting corrosion and pitting corrosion rate of domestic rebar, anode ladders sensor rebar, and ECI-2 sensor rebar are investigated by potentiodynamic polarization and linear polarization respectively. The results show that the domestic rebar and ECI-2 sensor rebar have a similar critical chloride ions concentration of pitting corrosion and different pitting corrosion rates. However, the critical chloride ions concentration of pitting corrosion and pitting corrosion rate for the anode ladders sensor rebar are different from that of domestic rebar. Therefore, the monitoring results for the two sensors should be modified when they are used in domestic engineering to monitor its durability.

**Keywords:** anode ladders sensor; ECI-2 sensor; critical chloride ions; pitting corrosion rate

钢筋锈蚀膨胀引起混凝土开裂, 导致混凝土结构物承载力, 是影响混凝土结构物耐久性的最主要因素之一<sup>[1-2]</sup>。为了掌握混凝土结构的耐久性状况, 就必须实时掌握混凝土中钢筋的腐蚀状态。

混凝土结构耐久性监测技术是实时、无损掌握混凝土结构耐久性健康状况的重要技术手段。目前, 用于监测混凝土中钢筋腐蚀的传感器有很多, 主要有基于电化学原理的传感器<sup>[3-4]</sup>、基于光

纤传感技术的传感器<sup>[5-7]</sup>、基于 LC 振荡回路原理的传感器<sup>[8-9]</sup>等, 但是, 较为成熟且已经在工程中得到广泛应用的主要有两类: 1) 基于宏观电池原理的传感器, 较为著名的是德国亚琛工业大学研制开发的阳极梯传感器和丹麦 Force 公司生产的 CorroWatch 传感器<sup>[3]</sup>, 这类传感器主要由钢筋阳极和惰性阴极组成, 通过测量钢筋阳极和惰性阴极之间的电偶腐蚀电流密度来判断钢筋的腐蚀状

收稿日期: 2015-08-16

\*基金项目: 中国交建科技研发项目 (2012ZJKJ14)

作者简介: 汤雁冰 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事海港工程腐蚀与防护及腐蚀监测的研究工作。

态; 2) 基于线性极化原理的传感器, 较为著名的是美国 VTI 公司生产的 ECI 传感器, 这种传感器主要通过构建一个 3 电极测试体系 (工作电极、参比电极和辅助电极), 利用线性极化技术测量钢筋的腐蚀速率和腐蚀电位, 判断钢筋的腐蚀状态。

这两类传感器均在我国许多重大工程中得以应用, 用于监测混凝土中钢筋的腐蚀状态, 判断混凝土结构物的耐久性状况, 如杭州湾跨海大桥<sup>[10-11]</sup>、苏通大桥<sup>[11]</sup>和在建的港珠澳大桥<sup>[12]</sup>等。但是, 这两种传感器都是从国外进口, 传感器中所用的钢筋均为国外的钢筋, 其腐蚀行为 (点蚀临界氯离子浓度和点蚀速率) 与我国工程所用的普通钢筋存在差异, 监测结果并不能真实反映我国工程的耐久性状况。为了使采用这两类传感器的监测结果能够真实反映我国工程的耐久性状况, 就必须了解这两类传感器中所用的普通钢筋与我国工程所用的普通钢筋的腐蚀行为的差异, 对这种差异进行修正, 从而真实反映我国工程的耐久性状况。

因此, 本文选择这两类传感器中最常用的阳极梯传感器和 ECI-2 传感器, 对这两种传感器所用的普通钢筋的点蚀临界氯离子浓度和点蚀后的腐蚀速率进行研究, 并与国内的普通钢筋进行对比, 掌握 3 种钢筋之间的差异, 为采用这两种传感器监测我国钢筋混凝土结构的耐久性状态提供数据支撑。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

试验材料为阳极梯所用普通钢筋、ECI-2 所用普通钢筋和国内 Q235 光圆钢筋, 加工成直径为 1 cm、高度为 1 cm 的圆柱试样, 以一个端面为工作面, 另一个端面焊接引出铜导线, 除工作端以外其余部分用环氧树脂进行密封。试验前用 1 000# 砂纸对试样工作面进行打磨, 用丙酮和酒精清洗后吹干存放于干燥器中待用。所有电化学测试采用三电极体系进行测试, 辅助电极为钛基复合氧化物电极 (MMO), 参比电极为饱和甘汞电极 (SCE)。电解液的 pH 值为 13.5。试验温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 试验测试

所有电化学测试采用 EG&G 公司的 PAR2273

电化学测试系统进行测量, 动电位极化曲线测试以 0.5 mV 扫描速度从阴极向阳极区进行扫描, 试验用电解液为含不同浓度 NaCl 的饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液, 电解液的 pH 值为 13.5。线性极化的电位扫描范围为开路电位  $\pm 10$  mV, 扫描速度为 0.166 mV/s, 试验用电解液为含 1 mol/L NaCl 的饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液 (氯离子浓度均高于 3 种钢筋发生点蚀的临界氯离子浓度)。为加速钢筋发生点蚀, 在进行线性极化前将试样在 0 mV 的电位下恒电位极化 15 s。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 点蚀临界氯离子浓度差异研究

由于混凝土内部是高碱性环境, 混凝土中的钢筋处于钝化状态, 钢筋不会发生严重腐蚀, 但是当外部环境中的氯离子通过混凝土保护层扩散到钢筋表面, 达到钢筋点蚀的临界浓度时, 钝化膜被破坏, 钢筋发生腐蚀, 因此, 钢筋的抗点蚀能力 (钢筋发生点蚀的临界氯离子浓度) 对混凝土结构的耐久性至关重要。图 1 给出了国内普通钢筋、阳极梯传感器钢筋阳极和 ECI-2 传感器钢筋电极在含不同氯离子浓度的饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  中的动电位极化曲线。从图 1a) 可以看出: 当氯离子浓度低于 0.05 mol/L 时, 极化电位高于 0.6 V, 电流密度随电位的升高急剧增大。由铁-水体系的 Pourbaix 图可知: 此时, 电流密度的急剧增大, 不是因国内普通钢筋发生点蚀引起的, 而是其表面发生吸氧反应的结果<sup>[13]</sup>。因此, 在氯离子浓度低于 0.05 mol/L 时, 钢筋表面的钝化膜具有很好的稳定性, 钢筋不会发生点蚀; 但是, 当氯离子浓度高于 0.06 mol/L 时, 极化电位远低于 0.6 V, 电流密度急剧增加, 表明钢筋表面的钝化膜被击破, 钢筋发生点蚀。因此, 国内普通钢筋在混凝土模拟孔液中的点蚀临界氯离子浓度介于 0.05 ~ 0.06 mol/L。同样, 阳极梯传感器钢筋阳极在混凝土模拟孔液中的点蚀临界氯离子浓度介于 0.06 ~ 0.08 mol/L (图 2b)), ECI-2 传感器钢筋阳极在混凝土模拟孔液中的点蚀临界氯离子浓度介于 0.05 ~ 0.06 mol/L (图 1c))。3 种钢筋的点蚀临界氯离子浓度见表 1。从表 1 可以看出: 国内普通钢筋和 ECI-2 传感器的

钢筋的点蚀临界氯离子浓度相差不大, 而阳极梯传感器的钢筋的临界氯离子浓度要高于国内普通钢筋。

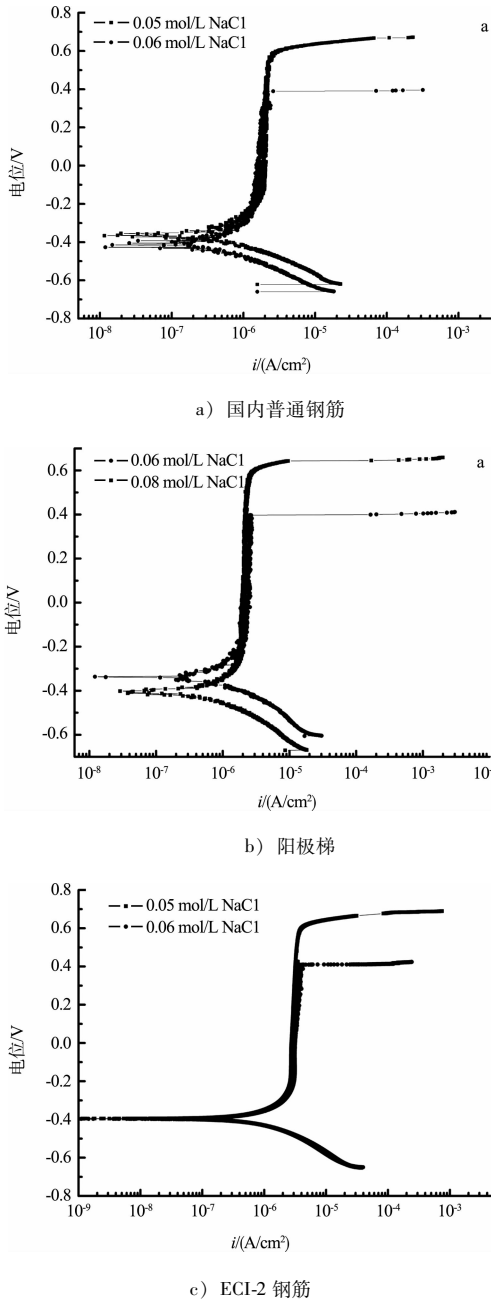


图 1 钢筋动电位极化曲线

表 1 不同钢筋的点蚀临界氯离子浓度

钢筋	临界氯离子浓度/(mol/L)
国内普通钢筋	0.05 ~ 0.06
阳极梯钢筋阳极	0.06 ~ 0.08
ECI-2 普通钢筋	0.05 ~ 0.06

传感器所用钢筋与国内普通钢筋的点蚀临界氯离子浓度差异会引起两方面的问题:

1) 从混凝土结构耐久性寿命评估来说, 目

前, 混凝土结构的耐久性寿命计算均是基于 Fick 第二定律来进行的, Fick 第二定律可以表示为<sup>[14]</sup>:

$$t_0 = \frac{c^2}{4D_t \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{cr} - C_0}{C_s - C_0} \right) \right]^2} \quad (1)$$

式中:  $t_0$  为从混凝土浇筑到钢筋开始锈蚀所经历的时间(a);  $c$  为混凝土保护层厚度(mm);  $D_t$  为混凝土有效扩散系数;  $\operatorname{erf}$  为误差函数;  $C_{cr}$  为引起混凝土中钢筋发生腐蚀的临界氯离子浓度(%);  $C_s$  为混凝土表面氯离子浓度(%);  $C_0$  为混凝土中的初始氯离子浓度(%)。

钢筋点蚀临界氯离子浓度的差异会影响混凝土结构物的耐久性寿命评估结果的准确性。

2) 传感器所用普通钢筋点蚀临界氯离子浓度的差异会影响判断混凝土中钢筋的腐蚀状态, 从而影响对混凝土结构耐久性健康状况的判断, 威胁结构物的安全服役。

利用 ECI-2 传感器监测混凝土结构的耐久性时, CEI-2 传感器监测到的钢筋腐蚀信息可近似反映出混凝土中钢筋的腐蚀状态(活化状态或钝化状态), 但是在用阳极梯传感器监测混凝土结构的耐久性时, 当监测到阳极梯的钢筋阳极发生腐蚀时处于相同保护层厚度的钢筋已先发生腐蚀, 因此, 需要对阳极梯传感器的监测结果进行修订, 以真实反映我国工程实际的耐久性状况。

## 2.2 钢筋发生点蚀后的腐蚀速率差异研究

当钢筋表面的氯离子浓度达到钢筋点蚀的氯离子浓度阈值时, 钢筋发生腐蚀, 钢筋腐蚀膨胀引起混凝土开裂, 导致结构物承载力下降。钢筋腐蚀至混凝土开裂所经历的时间可按下式计算<sup>[14]</sup>:

$$t_1 = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_1} \quad (6)$$

式中:  $t_1$  为钢筋开始锈蚀至混凝土开裂的时间(a);  $\delta_{cr}$  为保护层开裂时钢筋临界锈蚀深度(mm);  $\lambda_1$  为保护层开裂前钢筋平均腐蚀速率(mm/a)。可见, 钢筋的腐蚀速率直接影响着混凝土开裂时间, 从而影响着混凝土结构的耐久性寿命。

ECI-2 传感器是采用线性极化直接测量钢筋的腐蚀速率; 阳极梯传感器测量的是电偶腐蚀电流, 不是腐蚀速率, 本文研究了 3 种钢筋发生点蚀后的

腐蚀速率的差异。图2为钢筋发生点蚀后的形貌。图3为国内普通钢筋、阳极梯所用钢筋和 ECI-2 所用钢筋在 0.5 mol/L NaCl 的饱和Ca(OH)<sub>2</sub>溶液中线性极化曲线,对极化曲线进行拟合,拟合结果见表2,国内普通钢筋的腐蚀速率为 174.95 Ω·cm<sup>2</sup>,阳极梯传感器钢筋的腐蚀速率为 263.32 Ω·cm<sup>2</sup>,ECI-2 传感器钢筋的腐蚀速率为 191.35 Ω·cm<sup>2</sup>。阳极梯传感器钢筋的腐蚀速率最小,ECI-2 传感器钢筋次之,国内普通钢筋的腐蚀速率最大。在用这两种传感器监测混凝土结构耐久性、评估计算混凝土结构的锈蚀开裂时间时,要对传感器测得的钢筋腐蚀速率进行修正,以准确反映我国工程实际的钢筋的腐蚀速率,评估混凝土开裂时间,保证混凝土结构物的耐久性和服役安全性。

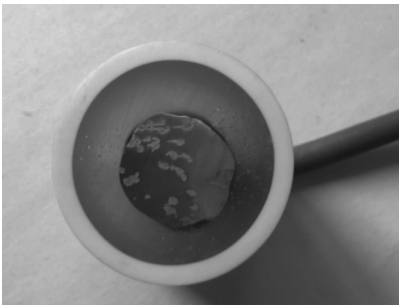


图2 钢筋发生点蚀的形貌

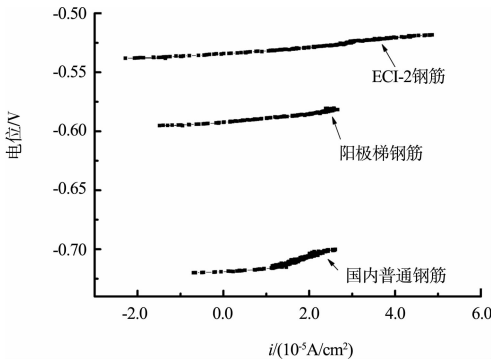


图3 不同钢筋的线性极化曲线

表2 不同钢筋的线性极化电阻

钢筋种类	钢筋腐蚀速率/(Ω·cm <sup>2</sup> )
国内普通钢筋	174.95
阳极梯	263.32
ECI-2	191.35

### 3 结论

1) ECI-2 传感器所用的普通钢筋的点蚀临界氯离子浓度与国内普通钢筋相似,而阳极梯传感

器所用的普通钢筋的点蚀临界氯离子浓度要高于国内普通钢筋。

2) 阳极梯传感器和 ECI-2 传感器所用的普通钢筋与国内普通钢筋点蚀后的腐蚀速率不同,阳极梯传感器所用的普通钢筋的腐蚀速率最小,ECI-2 次之,国内普通钢筋的腐蚀速率最大。

### 参考文献:

- [1] 潘德强,洪定海,郭飞骐. 华南沿海部份码头调查情况介绍[J]. 水运工程,1982(2): 1-7.
- [2] 王胜年,黄君哲,张举连,等. 华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J]. 水运工程,2000(6): 8-12.
- [3] 干伟忠, Raupach M, 金伟良. 欧洲混凝土结构耐久性监测系统的研究与应用[C]//第14届全国结构工程学术会议论文集(第2册). 北京:中国腐蚀与防护学会建筑工程专业委员会,2005: 32-35.
- [4] Virginia Technologies Inc. Embedded corrosion instrument model ECI-2 [R]. USA: Virginia Technologies Inc, 2010.
- [5] Fuhr P L, Huston D R. Corrosion detection in reinforced concrete roadways and bridges via embedded fiber optic sensors [J]. Smart Mater Struct, 1998(7): 217.
- [6] Fuhr P L, Huston D R, Mcpadden A J. Embedded chloride detectors for roadways and bridges [C]//Proceeding of SPIE, 1996: 219-229.
- [7] 黎学明,朱永,陈伟民. 一种监测钢筋腐蚀的光波导传感方法[J]. 四川激光,1999,20(6): 44-46.
- [8] Simonen J T, Andringa M M, Grizzleet K M, et al. Wireless sensors for monitoring corrosion in reinforced concrete members[C]//Proceeding of SPIE, 2004 : 587-596.
- [9] 杨桂新,吴瑾,吴文操. 混凝土结构中钢筋腐蚀监测无线传感器[J]. 仪器仪表学报,2009,30(6): 1 152-1 157.
- [10] 干伟忠, Raupach M, 金伟良,等. 杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性原位监测预警系统[J]. 中国公路学报, 2010,23(2): 30-35.
- [11] 丁万平,胡治平,陈志坚. Canin-LTM 钢筋锈蚀监测技术在苏通大桥中的应[J]. 江西科学,2005,23(5): 567-568.
- [12] 汤雁冰,熊建波,方翔,等. 港珠澳大桥主体混凝土结构耐久性实时监测设计[J]. 中国港湾建设,2014(2): 29-32.
- [13] 汤雁冰,陈龙,王迎飞. 不同浓度氯离子对钢筋钝化行为的影响[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京:海洋出版社,2011.
- [14] JTJ 320—2006 港口水工建筑物检测与评估技术规范[S].