

文章编号:1673-2049(2012)04-0106-06

# 基于阳极梯系统的苏通大桥锚固区腐蚀监测研究

王 霄<sup>1</sup>, 陈志坚<sup>1</sup>, 徐 钢<sup>2</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 杭州园林设计院股份有限公司, 浙江 杭州 310013)

**摘要:**对腐蚀的发生机理和影响因素进行了概括,介绍了基于宏腐蚀原理开发的阳极梯系统的工作原理和评价体系;鉴于阳极梯系统难以捕捉到腐蚀发生时的微电流,运用法拉第第二定律计算钢筋锈蚀质量损失存在较大误差,因此采用干湿循环交替试验修正了混凝土开裂后锈蚀质量损失与宏电流的函数关系;根据苏通大桥索塔锚固区的实测数据,简要评估了当前索塔塔壁混凝土碳化程度和钢筋的腐蚀状态。结果表明:索塔锚固区混凝土不同深度的电位及电阻率变化较为稳定,腐蚀宏电流曲线相对平稳,宏电流极值远小于耦合电流的临界值  $15 \mu\text{A}$ ,锚固区混凝土的碳化速度缓慢,钢筋尚未发生腐蚀。研究结果可为相关桥梁结构腐蚀监测提供一定的参考。

**关键词:**阳极梯系统;苏通大桥;干湿交替循环;锚固区;腐蚀监测;质量损失

**中图分类号:**U445.7 **文献标志码:**A

## Research on Corrosion Monitoring in Anchorage Zone for Sutong Bridge Based on Anode-ladder System

WANG Xiao<sup>1</sup>, CHEN Zhi-jian<sup>1</sup>, XU Gang<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;  
2. Hangzhou Landscape Architecture Design Institute Co. Ltd., Hangzhou 310013, Zhejiang, China)

**Abstract:** The corrosion mechanism and the influence factors were summarized, and the working principle of anode-ladder system, which was developed based on the macro corrosion, was introduced in details. The anode-ladder system could hardly catch the micro current, which resulted in large errors when the Faraday's Second Law was used, to calculate the mass loss caused by corrosion of steel bar. The functional relation between macro current and the mass loss was fixed through wet-dry cycling experiment. According to the measured data in anchorage zone for Sutong Bridge, the current carbonization degree of concrete and the corrosion state of steel bar in cable tower could be assessed. The results show that the cable tower anchorage zone concrete potential and resistivity change in different depths is relatively stable, macro corrosion current curve is relatively smooth, macro current extremum is far less than the critical value of the coupling current about  $15 \mu\text{A}$ , the rate of concrete carbonization is relatively slow in anchorage zone, and the corrosion of steel bar has not occurred. The research can provide some references for the corrosion monitoring in correlation bridge structures.

**Key words:** anode-ladder system; Sutong Bridge; wet-dry cycling; anchorage zone; corrosion monitoring; mass loss

收稿日期:2012-08-07

基金项目:江苏省交通科学研究规划课题资助项目(08Y60)

作者简介:王 霄(1987-),男,云南昭通人,工学硕士研究生,E-mail:xxx1254@126.com。

## 0 引言

随着结构力学的发展和施工技术的完善,越来越多的大跨径斜拉桥出现在各国道路工程的建设中。已经建成的苏通大桥作为大跨径斜拉桥的代表,其主跨跨度超过千米,倒 Y 型索塔高度近 300 m,受风荷载和日照辐射影响,上部结构不规则变形较大,造成拉索受力和弯曲引起的剪力和弯矩很大,同时索塔混凝土局部受拉,虽然考虑结构的加筋作用,但是当拉应力转移和集中时,易造成混凝土的开裂而加速钢筋的锈蚀。因苏通大桥靠近长江入海口,受盐雾天气影响,Cl<sup>-</sup>对钢筋锈蚀的作用明显。

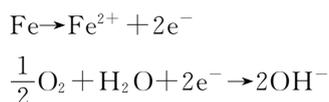
事实上,在混凝土的浇筑过程中,因为“水化热”的缘故,还会产生 2 类温度裂缝,虽然经过后期填补,但是随着混凝土的碳化,这种微创伤的存在为腐蚀的发展提供了条件。当腐蚀发展到一定程度,钢筋的力学性能急剧降低,严重影响结构安全,因此对腐蚀进行跟踪监测,对结构当前腐蚀状态进行系统评价具有非常重要的作用。

鉴于超声波法、涡流法、红外热像等无损监测方法的不足<sup>[1]</sup>,本文中笔者从分析腐蚀机理和影响因素切入,介绍了基于宏腐蚀原理开发的阳极梯系统的监测原理,总结了其在构建苏通大桥腐蚀性评价体系中的具体运用,并通过试验,对评价因子进行了修正。根据实测数据,分析了当前大桥索塔锚固区的腐蚀状态。

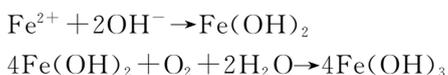
## 1 腐蚀机理和影响腐蚀的因素

### 1.1 钢筋锈蚀的电化学过程

钢筋的腐蚀是一种电化学的过程,通常情况,在 pH 值为 13 或更高的碱性环境下,在钢筋表面会形成钝化膜,阻止钢筋锈蚀的发生。在钢混结构中,当钝化膜破坏时,在金属表面形成阳极(腐蚀)和阴极(钝化)区域<sup>[2]</sup>;腐蚀区域和钝化区域间存在电势差,阴、阳两极分别出现以下反应



随后阳极发生二次化学反应



阴极产生的 OH<sup>-</sup>通过空隙间的电解质被送往阳极,从而形成一个腐蚀电流的闭合回路。

### 1.2 影响钢筋锈蚀的因素及反应机理

通过破坏钢筋锈蚀的电化学平衡和混凝土的碳

化、损伤破坏 3 个方面,综合考虑影响钢混结构钢筋锈蚀的因素,其具体内容及反应机理可以通过列表的方式给出,如表 1 所示。

表 1 影响钢筋锈蚀的因素

Tab. 1 Influence Factors on Steel Bar Corrosion

分类	影响因素	作用类型
破坏电 化学平 衡	Cl <sup>-</sup> 引起 的锈蚀	Cl <sup>-</sup> 通过吸附和酸化作用,中和高碱环境来破坏钝化膜
		在钢筋表面形成腐蚀电池,同铁离子生成易溶性氯盐,加速腐蚀产物的扩散,并使局部钢筋腐蚀具有“边缘效应”
		降低混凝土电阻率,强化离子通路,增强导电
		不断搬运阳极生成的铁离子,形成“阳极去极化作用”
环境因素	工程所处环境的干湿交替,导致局部 Cl <sup>-</sup> 的浓度增高	同水泥中的铝酸三钙生成的复盐发生分解,释放 Cl <sup>-</sup> ,形成由局部深入的锈蚀电偶
		混凝土碳化
混凝土 碳化	水化环境	周围环境的湿度和 CO <sub>2</sub> 浓度,促使混凝土发生碳水化合作用
	施工因素	搅拌、振捣和养护影响混凝土密实度,结合渗透作用进行腐蚀
	材料比例	水灰比和掺合料,影响混凝土的抗渗性能
混凝土 损伤	钢筋锈胀 导致的混 凝土开裂	锈蚀产物体积膨胀,胀裂混凝土,加速腐蚀
	结构缺陷	微裂隙和微创伤,结合虹吸现象,加速混凝土碳化和 Cl <sup>-</sup> 腐蚀
	水化热	外壳混凝土硬化,内部膨胀作用,产生温度裂隙

## 2 阳极梯监测系统原理

### 2.1 阳极梯系统

阳极梯系统是基于宏观腐蚀原理开发的,其系统主要由以下 5 个部分构成:阳极梯(AL)、钢筋连接件(CR)、阴极棒(C)、温度计(TEMP)、端子盒(TBox),阳极梯系统结构如图 1 所示。

应用于苏通大桥锚固区腐蚀监测中的阳极梯系统,由 6 个直径 10 mm、长度 50 mm 的阳极棒组成,阳极棒的材料与所监测的钢混结构中的钢筋相同。阳极棒间用 U 型不锈钢棒固定形成阳极梯,阳极梯一端连接可调节的不锈钢固定支架,用于调整阳极梯的倾斜度和固定阳极梯,不锈钢固定支架用橡胶套管绝缘。阳极管由导线引出,侧杆用环氧树脂填充,其中 1 个侧杆内装置 PT1000 温度计(铂电阻温度传感器)。苏通大桥阳极梯腐蚀监测系统如图 2 所示。

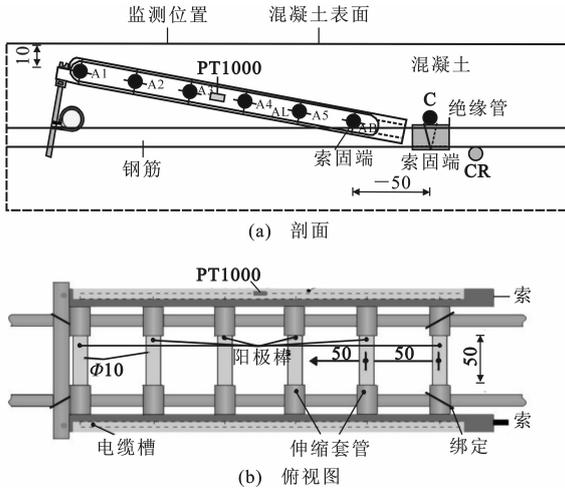


图 1 阳极梯系统结构 (单位: mm)

Fig. 1 Anode-ladder System Structures (Unit: mm)

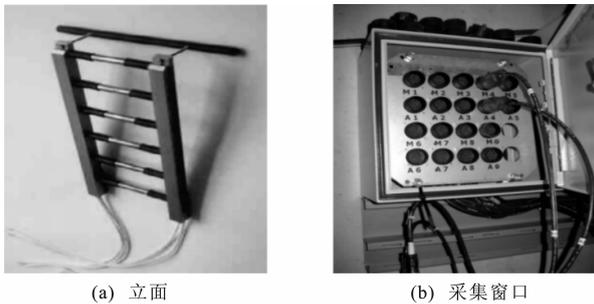


图 2 苏通大桥阳极梯腐蚀监测系统

Fig. 2 Anode-ladder Monitoring System for Sutong Bridge

2.2 基于阳极梯系统的监测体系

由表 1 可以看出,影响钢筋腐蚀的因素众多,在钢混结构中,在结构没有明显缺陷时,腐蚀是一个阶段性渐变的不可逆过程,总体上可以划分为 4 个阶段,即:①钝化膜的破坏阶段;②自由膨胀阶段;③应力产生阶段;④裂缝的产生及发展阶段。

一般认为,在阶段①,②中,钝化膜破坏,碳化深度达到钢筋表面时,钢筋开始锈蚀,此时需要对结构进行维护,在进入锈胀开裂阶段④后,钢筋的力学承载性能极速下降<sup>[3]</sup>,此时应对结构安全给予警戒,或重新认定和评估结构的使用年限。因此阳极梯系统监测的内容就是针对不同腐蚀阶段的特征,对混凝土的碳化深度进行评估,对当前钢混结构的腐蚀状态进行监控,这可以通过以下 4 个方面来实现:

(1) 阳极梯系统测量不同深度电位

试验表明<sup>[4]</sup>,处于不同电化学状态下的金属腐蚀电位明显不同。钢筋在钝化时的腐蚀电位升高,由钝化状态转入活化状态时腐蚀电位降低,其活化区和钝化区的电位差往往可达到 100~500 mV 量级。一般情况下,常用半电池电位法,通过对比标准<sup>[5-7]</sup>,来对腐蚀概率进行量化。

在苏通大桥锚固区的腐蚀监测中,主要利用阳极梯系统预埋深度及倾斜角度,计算阳极棒沿混凝土深度方向的间距,通过对不同深度下混凝土保护层同钢筋的电位值进行连续测量,对比各层电位的变化规律,来评估混凝土的碳化程度,测量原理见图 3,图 3 中 A 表示阳极梯系统中位于不同深度的阳极棒。

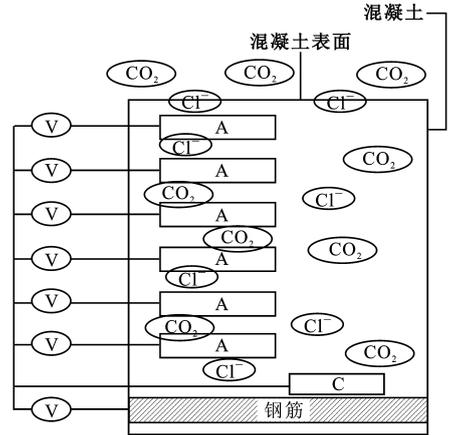


图 3 阳极梯电位测量

Fig. 3 Measurement of Anode-ladder System Electric Potential

(2) 阳极梯系统测量混凝土电阻率

考虑电化学的腐蚀过程,其实质是阳极与阴极反应区域之间电离子的流动,因此,混凝土电阻率的高低通过影响电离子的流动,直接影响电化学的速率,进而影响腐蚀的速度,根据试验研究,腐蚀速率与混凝土的电阻率的关系如表 2 所示。

表 2 钢筋腐蚀速率与混凝土电阻率的关系

Tab. 2 Relations Between Steel Bar Corrosion Speed Rates and Concrete Electric Resistivities

混凝土电阻率/(kΩ·cm <sup>-1</sup> )	钢筋腐蚀速率
<5	很高
5~10	高
10~20	中/低
>20	很低

现场一般采用 Wenner 法,即通过在混凝土表面布置 4 个等距探针,在外边 2 个触头之间通入可变电,量测里面 2 个触头之间的电位差,来对混凝土电阻率进行测量。然而,通常因为氯盐的渗入和混凝土的碳化作用,甚至在雨天时的水层覆盖,会使混凝土形成具有不同电阻率的面层,此时这种表层测量方法受环境因素影响显著。预埋式阳极梯系统的梯形传感单元位于混凝土结构内部,避免了外界因素的干扰,可以直观测量不同保护层深度下混凝土电阻的变化情况。

### (3) 阳极梯系统测量耦合电流

试验研究显示,一般环境下,以  $15 \mu\text{A}$  为临界耦合电流,通过耦合 5 s 内电流的极值,对结构腐蚀与否进行判断。然而电流极值与采用的外部混凝土类型相关,当阳极处在潮湿环境下,电流极值明显增大。通过阳极梯系统,结合各层减小的混凝土电阻与突然增大的耦合电流极值,科学地改进评判腐蚀标准。

### (4) 阳极梯系统测量宏电流

当腐蚀刚发生时,2 个区域(活化区和钝化区)之间还能形成电场和电偶电流,通过电流计可以捕捉到电流的突跃;当混凝土开裂时,腐蚀加速,腐蚀电流出现二次飞跃。因此通过测量宏电流,可以实现阳极梯系统对钢筋腐蚀的监控。根据法拉第第二定律<sup>[8]</sup>,建立腐蚀电流同钢筋锈蚀质量损失间的关系式,可以对钢筋的工作性态、结构安全冗余进行评判,关系式为

$$\Delta m = \frac{M}{nF} \int I dt \quad (1)$$

式中: $\Delta m$  为锈蚀质量损失; $M$  为铁相对原子质量, $M$  取  $55.8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $n$  为铁离子电荷数, $n$  取 2;  $F$  为法拉第常数, $F$  取 96 485.3;  $I$  为腐蚀电流; $t$  为时间。

基于阳极梯系统腐蚀监测评价体系见图 4。

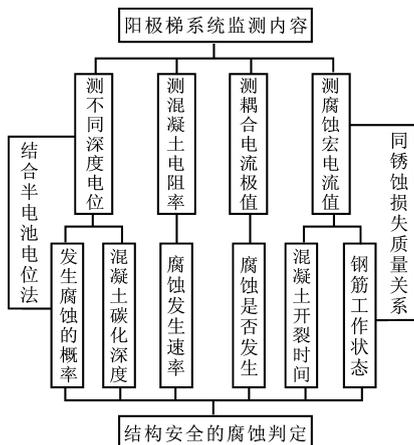


图4 基于阳极梯系统腐蚀监测评价体系

Fig. 4 Corrosion Monitoring Evaluating Principle Based on Anode-ladder System

## 3 苏通大桥锚固区腐蚀监测分析

### 3.1 锚固区测点布置

苏通大桥采用外露式的钢锚箱锚固方式,钢锚箱立体剖面如图 5(a)所示,为了加强钢锚箱侧壁与混凝土塔壁的抗剪效果,须在塔壁施加预应力,已有研究结果表明,预应力会影响腐蚀电流的密度<sup>[9]</sup>,因

此,基于阳极梯系统,针对锚固区索塔塔壁易发生腐蚀的部位,进而考虑结构的应力分布,分别在北索塔锚固区布置观测点进行腐蚀监测,监测点布置如图 5(b)所示。

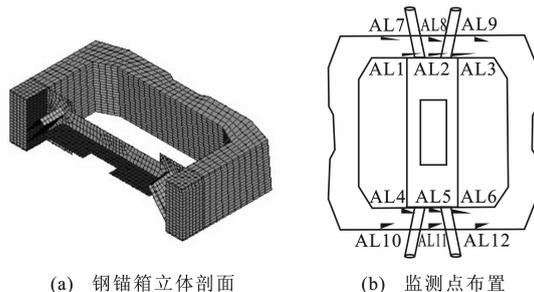


图5 钢锚箱立体剖面和锚固区腐蚀监测点布置

Fig. 5 Cross Section of Steel Anchor Box and Corrosion Monitoring Point Layout in Anchorage Zone

### 3.2 锈蚀质量损失同腐蚀电流关系的修正

基于宏腐蚀原理开发的阳极梯系统,能够比较精确地测量出腐蚀发生时的宏电流,然而在含氯盐的混凝土中,钢筋的锈蚀过程同时还产生微电流,在评估钢筋的锈蚀速率时,根据法拉第第二定律建立的宏电流同锈蚀质量损失的关系式(1),因未考虑微电流的作用而存在较大误差,此时可通过试验的方法进行修正。常规情况下,腐蚀是一个复杂缓慢的电化学过程,为了得到结果,在试验过程中需要采用一定手段加速结构的腐蚀,考虑到  $\text{Cl}^-$  在腐蚀过程中起到的作用<sup>[10]</sup>,结合苏通大桥索塔锚固区所处环境,当富含  $\text{Cl}^-$  时,结构物同水(雨和盐雾天)的交界面的  $\text{Cl}^-$  浓度较高,腐蚀严重。参考前人研究成果,采用加氯的干湿交替方法进行试验。

根据苏通大桥索塔塔壁配筋情况,截取等质量下的  $\Phi 25, \Phi 36, \Phi 40$  三种型号钢筋作为试验研究的主要钢筋,选取等长度的  $\Phi 12, \Phi 14, \Phi 16$  钢筋作为对比参照的普通钢筋;将试件以 48 h 为周期,在质量分数为 8% 的 NaCl 溶液和空气中交替放置,以加快钢筋的锈蚀速度;在试验进行 120 d 后,对试件进行除锈处理,干湿循环试验配置见图 6。根据日本规范 JCI-SCI 中的规定,腐蚀失重率计算公式为

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\omega$  为计算腐蚀失重率; $m_1$  为钢筋锈蚀前质量; $m_2$  为钢筋锈蚀后质量。

试验中,测得  $\Phi 25, \Phi 36, \Phi 40$  钢筋的平均腐蚀电流分别为 196, 173, 151  $\mu\text{A}$ ;  $\Phi 12, \Phi 14, \Phi 16$  钢筋的平均腐蚀电流则分别为 240, 272, 305  $\mu\text{A}$ 。对试件腐蚀观测结果显示,当试件浸泡在氯盐溶液中空气循环速率较慢,影响了阴极反应供氧,腐蚀电流密度

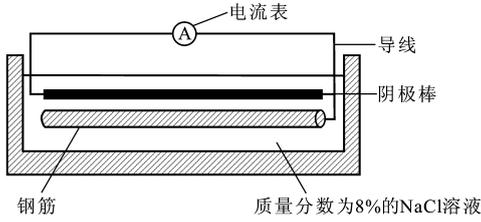


图6 干湿循环试验配置

Fig. 6 Wet-dry Cycling Experiment Device

较小,属于中等腐蚀。为了消除离散误差,对3种型号研究主筋分别制作5个试件;作为对比参照的普通型号钢筋则分别制作3个试件,在相同条件和环境下进行试验。同时对监测腐蚀电流进行积分,得到120 d后钢筋腐蚀的平均计算失重率和实测失重率之间的关系,见表3。

表3 120 d后钢筋腐蚀的失重率

Tab. 3 Weight Loss Rates of Steel Bar Corrosion After 120 d

钢筋型号	计算失重率/%	实测失重率/%
Φ25(主筋)	0.51	1.26
Φ36(主筋)	0.45	1.05
Φ40(主筋)	0.36	0.96
Φ12(普通)	1.68	4.17
Φ14(普通)	1.26	3.25
Φ16(普通)	1.08	2.61

通过拟合试验数据(图7,图7中 $R^2$ 为判定系数)修正腐蚀质量损失与实测宏电流之间的函数关系式,即

$$\Delta m = 2.4014 \int Idt + 0.2961 \quad (3)$$

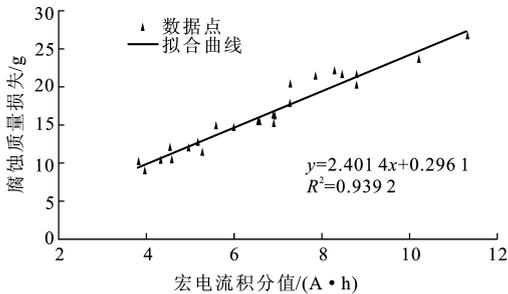


图7 试验数据拟合曲线

Fig. 7 Fitting Curve of Experiment Data

实际上,苏通大桥索塔塔壁采用C50高强混凝土,掺合定量的亚硝酸盐,具有一定的阻锈作用<sup>[11]</sup>,在没有明显缺陷的钢混结构中,腐蚀是一个非常缓慢的过程。干湿循环试验直接剥离了混凝土的保护作用,同时进行酸洗去钝,所以只能作为混凝土开裂后钢筋暴露而发生腐蚀时的修正,因此需要运用理论计算<sup>[12-13]</sup>和现场试验,结合混凝土的碳化程度,

先对混凝土的开裂时间进行判断,进而通过阳极梯系统测得宏电流对钢筋状态进行评价。

### 3.3 腐蚀监测结果

根据阳极梯系统连续监测的数据可知,苏通大桥锚固区索塔塔壁钢筋的腐蚀尚未发生,以2号测点为例,其混凝土保护层不同深度的电位测值见图8,其中,U1~U6分别为阳极梯系统在2号测点不同混凝土深度的测值。混凝土电阻率测值见图9,腐蚀宏电流变化过程见图10。

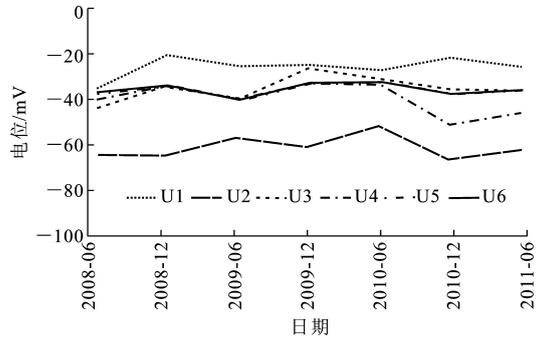


图8 2号测点不同深度的电位测值

Fig. 8 Measurement Values of Electric Potential Data in Different Depth for Monitoring Point 2

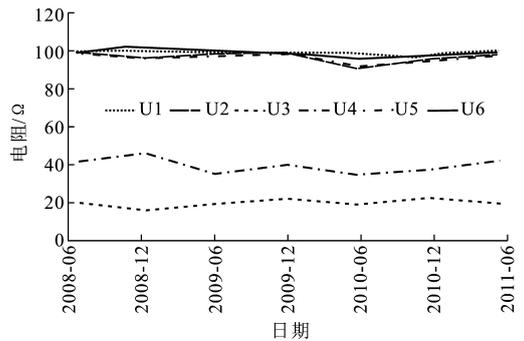


图9 2号测点混凝土的电阻率测值

Fig. 9 Measurement Values of Concrete Electric Resistivity Data for Monitoring Point 2

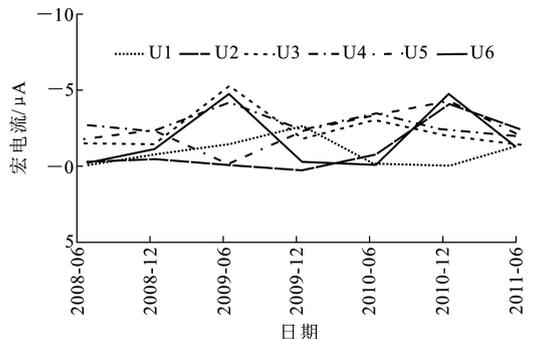


图10 2号测点混凝土的腐蚀宏电流测值

Fig. 10 Measurement Values of Concrete Corrosion Macro Current for Monitoring Point 2

从图8~10可以看出,混凝土不同深度电位及

其电阻率变化较为稳定,碳化速度较慢,测得的腐蚀宏电流曲线较为平稳,其值也远小于耦合电流的临界值  $15 \mu\text{A}$ ,据此判断2号测点各阳极棒与钢筋尚未发生腐蚀。需要指出的是,因仪器接线方向的原因,实测的宏电流存在负值。

实际上,在运用腐蚀电流密度评估钢筋的腐蚀状态时需要注意的是,相比于环境含水量较低的锚固区,其钢筋腐蚀速率由电化学极化控制,位于苏通大桥潮位区的钢筋腐蚀则受氧浓化极差控制。当腐蚀由电化学极化控制时,腐蚀电流密度不仅同能斯特扩散层以外孔隙液中的电化学产物离子浓度密切相关,还受温度和结构自身有无预应力的影响。

## 4 结 语

基于宏腐蚀原理开发的阳极梯系统,综合前人研究成果,以苏通大桥索塔锚固区为例,探讨了钢混结构的腐蚀机理,概括了影响腐蚀的主要因素,介绍了阳极梯系统在构建腐蚀评价体系中的具体运用,并采用干湿交替循环试验修正了混凝土开裂后,腐蚀宏电流同钢筋腐蚀质量损失之间的函数关系,具有一定的工程实践意义。

## 参考文献:

### References:

- [1] BA M F, QIAN C X, HUANG L. Probabilistic Method and Its Application for Evaluating Carbonation Life of Newly-built Concrete Structures[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2010, 26(4): 578-581.
- [2] GONZALEZ J A, FELIU S, RODRIGUEZ P, et al. Some Questions on the Corrosion of Steel in Concrete. Part II: Corrosion Mechanism and Monitoring, Service Life Prediction and Protection Methods[J]. Materials and Structures, 1996, 29(2): 97-104.
- [3] 邸小坛,周 燕. 旧建筑物的监测加固与维护[M]. 北京:地震出版社,1992.  
DI Xiao-tan, ZHOU Yan. Monitoring and Maintaining of the Old Building[M]. Beijing: Earthquake Press, 1992.
- [4] 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.  
GAN Wei-zhong, RAUPACH M, JIN Wei-liang, et al. In-situ Monitoring and Early Warning System for Durability of Concrete Structure of Hangzhou Bay Sea-crossing Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 30-35.
- [5] 金 晶. 腐蚀监测子系统在苏通大桥中的应用[J]. 中国科技信息, 2010(9): 53-57.
- JIN Jin. The Application of Corrosion Subsystem for Sutong Bridge[J]. China Science and Technology Information, 2010(9): 53-57.
- [6] 何谋杰, 叶跃忠, 李福海. 预埋式阳极梯监测系统研究[J]. 材料导报, 2010, 24(12): 79-82.  
HE Mou-jie, YE Yue-zhong, LI Fu-hai. Research on the Anode-ladder Monitoring System[J]. Materials Review, 2010, 24(12): 79-82.
- [7] 赵 卓, 蒋晓东. 受腐蚀混凝土结构耐久性检测诊断[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2006.  
ZHAO Zhuo, JIANG Xiao-dong. Testing and Diagnosing the Corrosion Concrete Durability[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006.
- [8] 杨绮琴, 方北龙, 童叶翔. 应用电化学[M]. 2版. 广州:中山大学出版社, 2005.  
YANG Qi-qin, FANG Bei-long, TONG Ye-xiang. Applied Electrochemistry [M]. 2nd ed. Guangzhou: Zhongshan University Press, 2005.
- [9] 李富民, 袁迎曙, 耿 欧, 等. 混凝土中钢筋腐蚀速率的理论模型[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2009, 37(8): 83-88.  
LI Fu-min, YUAN Ying-shu, GENG Ou, et al. Theoretical Models of Corrosion Rate of Steel Bars Embedded in Concrete[J]. Journal of South China University of Technology: Nature Science Edition, 2009, 37(8): 83-88.
- [10] 延永东. 氯离子在损伤及开裂混凝土内的输运机理及作用效应[D]. 杭州:浙江大学, 2011.  
YAN Yong-dong. Transportation of Chloride Ions in Damaged and Cracked Concrete and Its Action[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [11] 柳俊哲, 太星镐, 野口贵文. 掺防冻剂混凝土中亚硝酸盐的长期阻锈效果[J]. 混凝土, 2004(9): 14-17.  
LIU Jun-zhe, TAI Sun-gho, TAKAFUMI Noguchi. Study on Long Term Inhibiting Effectiveness of Nitrite Ion in Concrete Mixed with Anti-freezing Admixtures[J]. Concrete, 2004(9): 14-17.
- [12] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社, 2002: 93-96.  
JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. The Concrete Structure Durability[M]. Beijing: Science Press, 2002: 93-96.
- [13] 牛荻涛, 陈亦奇, 于 澍. 混凝土结构的碳化模式与碳化寿命分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 1995, 27(4): 365-369.  
NIU Di-tao, CHEN Yi-qi, YU Shu. Model and Reliability Analysis for Carbonation of Concrete Structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 1995, 27(4): 365-369.