



# 温度对埋入式混凝土结构耐久性 监测传感器监测结果的影响\*

汤雁冰<sup>1,2</sup>, 倪静姁<sup>1</sup>, 李萌虎<sup>1</sup>, 王胜年<sup>1</sup>, 范志宏<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 江苏科技大学, 海洋装备研究院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 针对当前混凝土结构耐久性监测常用的 ECI-2 传感器和阳极梯传感器, 研究温度变化对两种传感器监测结果的影响。研究表明: 温度对 ECI-2 传感器的氯离子探针电位和线性极化电阻影响较大, 尤其是线性极化电阻, 但对钢筋的自腐蚀电位影响不大; 对阳极梯传感器的自腐蚀电位和电偶腐蚀电流影响不大, 但对混凝土电阻的监测结果影响较大。在实际工程中采用这两种传感器监测混凝土结构的耐久性健康状况时, 必须对受温度影响大的监测参数进行修正。

**关键词:** 阳极梯传感器; ECI-2 传感器; 温度效应; 耐久性监测

中图分类号: TP 73; TU 528; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0013-05

## Influence of temperature on monitoring results of embedded durability monitoring sensor in concrete structure

TANG Yan-bing<sup>1,2</sup>, NI Jing-xu<sup>1</sup>, LI Meng-hu<sup>1</sup>, WANG Sheng-nian<sup>1</sup>, FAN Zhi-hong<sup>1</sup>

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

2. Marine Equipment Research Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** The influences of temperature on the monitoring results of two commonly used durability monitoring sensors, ECI-2 sensor and anode-ladder sensor, are investigated. The results show that for ECI-2 sensor, the temperature could affect the potential of the  $\text{Cl}^-$  probe and the linear polarization resistance dramatically, especially the linear polarization resistance, but the influence of temperature on the corrosion potential of rebar is tiny. For the anode-ladder sensor, the temperature could affect the resistance of concrete significantly. However, the influences of temperature on the corrosion potential and galvanic corrosion current are tiny. While both durability monitoring sensors are used to monitor the durability status of concrete structure, the monitoring results affected by temperature should be compensated dramatically.

**Keywords:** anode-ladder sensor; ECI-2 sensor; temperature effect; durability monitoring

钢筋锈蚀膨胀引起混凝土开裂, 导致混凝土结构承载力下降是影响混凝土结构耐久性的最主要因素<sup>[1]</sup>。为了保证混凝土结构物的服役安全性, 必须掌握混凝土结构物的耐久性健康状况。混

凝土结构耐久性监测技术是实时了解和掌握混凝土结构耐久性健康状况的关键技术, 通过在混凝土中预埋耐久性监测传感器, 对影响混凝土结构耐久性的关键参数进行实时监测, 以掌握混凝土结

收稿日期: 2016-03-11

\*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, 从事海洋工程装备腐蚀与防护及腐蚀监测研究工作。

构的耐久性健康状况。

目前,成熟的用于混凝土结构耐久性监测的传感器均是基于电化学原理制成的。在实际工程应用过程中,环境因素的变化,特别是温度的变化可能会影响传感器的监测结果,但是,目前关于温度变化对监测结果影响的研究较少。ECI 耐久性监测系统的生产厂家 VTI 公司在实验室内测试了温度变化对 ECI-1 传感器监测结果的影响。从测试数据可以看出,温度会对 ECI-1 的监测结果产生影响。除此之外,尚未见其他相关研究报告。何谋杰等<sup>[2]</sup>研究了温度变化对阳极梯传感器监测结果的影响。结果表明,温度变化时会对传感器的电偶腐蚀电流产生较大的影响,但是,没有研究对其他监测参量的影响,且实验在烤箱中进行,因设置的温度过高,对传感器自身造成一定的损害。

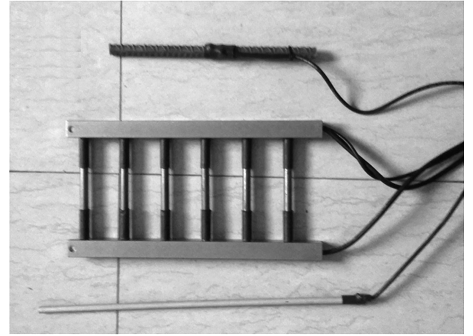
本文选用目前混凝土结构耐久性监测常用的两种传感器,研究温度变化对耐久性监测传感器监测结果的影响,为使用耐久性监测传感器进行耐久性监测时,准确获得混凝土结构的耐久性健康状况提供数据支撑。

### 1 试验方法

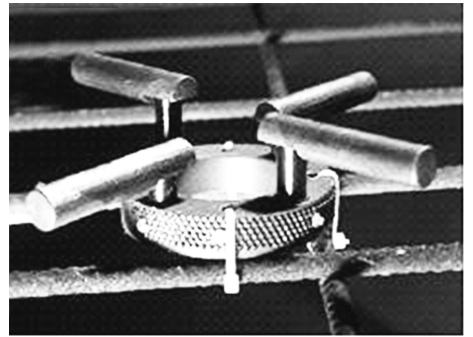
#### 1.1 传感器的选用

目前,用于混凝土结构耐久性监测的成熟的市售传感器主要有两类:1) 基于宏观电池原理的传感器,这类传感器中最著名的德国亚琛工业大学发明的 anode-ladder 传感器(阳极梯传感器),其由 6 根钢筋阳极(A1、A2、A3、A4、A5 和 A6)、1 根钛阴极(C)和 1 根钢筋连接(CR)组成(图 1a)),通过监测钢筋阳极的腐蚀电位、混凝土电阻以及钢筋阳极和钛阴极之间的电偶腐蚀电流的变化来判断钢筋的腐蚀状态。基于相同原理的还有丹麦 Force 公司生产的 CorroWatch 传感器,它由 4 根钢筋阳极和 1 条 MMO 阳极网组成(图 1b))。2) 美国 VTI 公司生产的 ECI-2 传感器(图 2),该传感器集成了氯离子探针、电阻率探针、钢筋电极、参比电极和辅助电极,能够实时监测混凝土的氯离子浓度、混凝土电阻率、钢筋腐蚀速率和

腐蚀电位。本研究中选择阳极梯传感器和 ECI-2 传感器作为研究对象。



a) 阳极梯



b) CorroWatch

图 1 基于宏观电池原理的耐久性监测传感器



图 2 ECI-2 耐久性监测传感器

#### 1.2 混凝土试件制作

在混凝土试件制作时,需保证传感器的监测点距混凝土表面的距离与实际工程监测时相近,消除尺寸因素对监测结果的影响。混凝土试件的尺寸为 500 mm×350 mm×250 mm(图 3)。成型时将传感器置于制作的模具中,采用钢筋支架进行固定。ECI-2 传感器的监测面距混凝土表面的距离

为 6 cm, 阳极梯传感器不同钢筋阳极距混凝土表面的距离分别为 2.3、3.5、4.7、5.9、7.1、8.3 cm, 然后浇筑混凝土, 标准养护 28 d 后, 进行相关试验。试验用的混凝土配合比如表 1 所示。



图 3 预埋有传感器的混凝土试件

表 1 混凝土配合比  $\text{kg/m}^3$

水胶比	水	水泥	粉煤灰	矿粉	石(大)	石(小)	砂	外加剂
0.33	145	254	132	53	778	333	710	4.39

### 1.3 实验测试

将成型好的混凝土试件放置于实验室内 2 a, 使混凝土内部的水化反应完全, 内部湿度达到相对稳定, 消除试验过程中因混凝土水化或内部湿度的变化对监测结果造成影响。试验在温湿度交变试验箱中进行, 在试验温度达到设定温度后, 将试件放入试验箱内, 恒温保持 10 h, 以确保混凝土试件内部的温度达到设定的试验温度。试验时, 控制试验箱内的相对湿度恒定(80%)。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 温度变化对 ECI-2 传感器监测结果的影响

#### 2.1.1 温度变化对氯离子浓度监测结果的影响

ECI-2 传感器中集成了 Ag/AgCl 氯离子探针, 用于监测混凝土中的氯离子浓度变化, 其监测原理是通过测量氯离子探针的电极电位, 再根据能斯特方程计算出混凝土中的氯离子浓度。因此, 温度的变化会影响氯离子探针的电极电位, 从而影响混凝土中的氯离子浓度监测结果。图 4 为 ECI-2 传感器中氯离子探针的电极电位随温度的变化曲线。从图 4 可以看出: 氯离子探针电极电位的变化与温度的变化近似成线性关系, 当温度从 0 °C 升高到 30 °C 时, 氯离子探针的电极电位从 -0.26 V 升高到 -0.20 V, 氯离子探针的电位升高了 60 mV。

氯离子探针电极电位的温度系数为 2.1 mV/°C, 即温度每升高 1 °C, 氯离子探针的电极电位会升高 2.1 mV。可见, 温度对氯离子探针的电极电位影响较大, 因此, 在用 ECI-2 传感器监测混凝土中的氯离子浓度变化时, 需考虑环境温度变化给监测结果带来的影响, 并应根据该温度系数对氯离子探针的电极电位进行补偿。

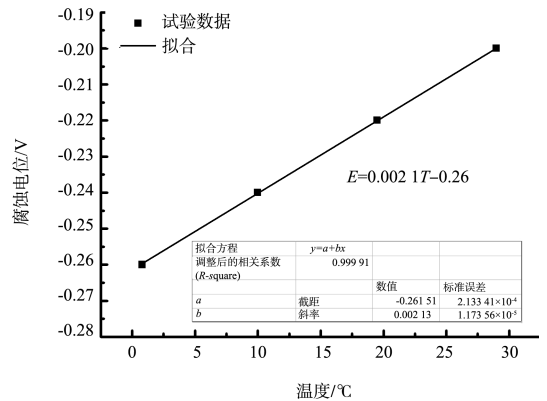


图 4 氯离子探针电位随温度的变化

#### 2.1.2 温度变化对钢筋自腐蚀电位监测结果的影响

钢筋自腐蚀电位也是判断钢筋腐蚀状态的重要参数, 钢筋的自腐蚀电位虽然不能直接判断钢筋的腐蚀状态, 但是, 可以反映出钢筋发生腐蚀的可能性, ASTM 标准<sup>[3]</sup>给出了不同的腐蚀电位对应的钢筋发生腐蚀的概率。图 5 是 ECI-2 传感器钢筋自腐蚀电位随温度变化的关系曲线。可以看出: 温度从 0 °C 升高到 30 °C, 钢筋的自腐蚀电位从 -210 mV 升高到 -200 mV, 自腐蚀电位增加了 10 mV。可见, 温度变化对自腐蚀电位的监测结果影响不大, 在实际监测时, 可以不考虑温度变化对自腐蚀电位监测结果的影响。

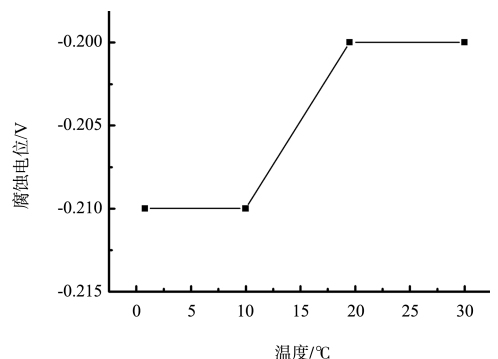


图 5 钢筋自腐蚀电位随温度的变化

### 2.1.3 温度变化对钢筋腐蚀速率监测结果的影响

钢筋腐蚀速率与钢筋自腐蚀电位不同，其属于动力学范畴，可以判定钢筋的腐蚀状态。有研究表明：温度每升高 1℃，钢筋的腐蚀速率提高 1 倍<sup>[4]</sup>。可见，温度对钢筋的腐蚀影响较大，因此，采用 ECI-2 传感器监测钢筋腐蚀速率时，温度的变化可能会影响监测结果，从而对钢筋的腐蚀状态(钝化或活化)做出错误的判断。图 6 是温度从 0℃ 升高到 30℃ 时，传感器监测到的钢筋的腐蚀速率(线性极化电阻)从 390 kΩ·cm<sup>2</sup> 降低到 195.4 kΩ·cm<sup>2</sup>，钢筋腐蚀速率的温度系数为 -6.5 kΩ·cm<sup>2</sup>/℃，即温度每升高 1℃，钢筋的腐蚀速率降低 6.5 kΩ·cm<sup>2</sup>。可见，温度的变化对钢筋的腐蚀速率影响较大。因此，在采用 ECI-2 传感器监测钢筋的腐蚀速率时，当混凝土内部的温度发生变化时，应根据该温度系数对监测到的腐蚀速率进行补偿，以准确判断钢筋的腐蚀状态。

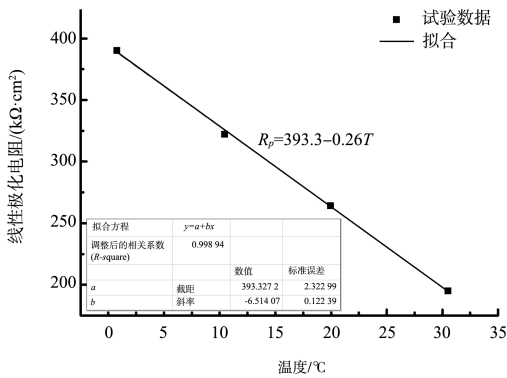


图 6 钢筋腐蚀速率随温度的变化

## 2.2 温度对阳极梯传感器监测结果的影响

### 2.2.1 温度变化对自腐蚀电位的影响

在 ECI-2 传感器中，钢筋的腐蚀电位是相对于 MnO<sub>2</sub> 参比电极，而阳极梯传感器的自腐蚀电位测量是以金属钛(钛阴极)作为参比电极。图 7 给出了阳极梯的 6 根钢筋阳极和钢筋连接相对于钛阴极的自腐蚀电位。可以看出：当温度从 10℃ 升高到 30℃ 时，钢筋的自腐蚀电位正移，但是正移的幅度都不大，正移最大的 A1 钢筋阳极也不超过 30 mV。因此，在利用阳极梯传感器进行实体工程耐久性监测时，可忽略温度变化给腐蚀电位测量带来的影响。

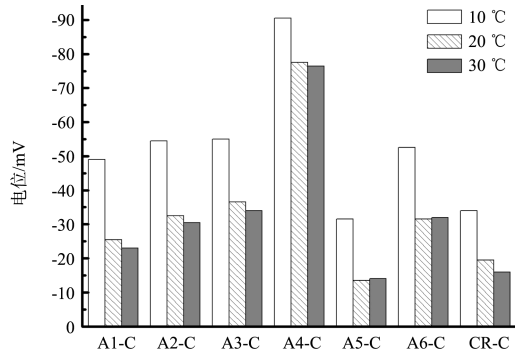


图 7 钢筋自腐蚀电位随温度的变化

### 2.2.2 温度变化对混凝土电阻监测结果的影响

混凝土电阻率与钢筋腐蚀程度一定的对应关系。研究<sup>[5]</sup>给出了不同的混凝土电阻率的大小对应着钢筋的腐蚀程度，通过监测混凝土的电阻变化也可判断钢筋腐蚀程度。混凝土中含有大量的连通或不连通的毛细孔，毛细孔中充有大量的毛细孔液，孔液主要以饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 为主并含有其他的离子，如 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup><sup>[6]</sup>。温度越高，孔隙溶液中这些导电离子活性增强，混凝土的导电性增强，混凝土的电阻率减小<sup>[7]</sup>。图 8 为阳极梯传感器测得的混凝土电阻随温度的变化。可见，当温度升高时，混凝土的电阻显著降低。因混凝土电阻的大小与混凝土的配合比息息相关，混凝土配合比不同，对应的混凝土的电阻亦不同。在实际的工程监测中，因混凝土配合比的不同，温度变化对混凝土电阻影响的变化幅度不同，不能按本试验的研究结果去补偿实际工程的监测结果。但是，当采用阳极梯传感器监测混凝土的电阻时，应考虑温度变化给监测结果带来的影响，从而准确判断钢筋的腐蚀状况。

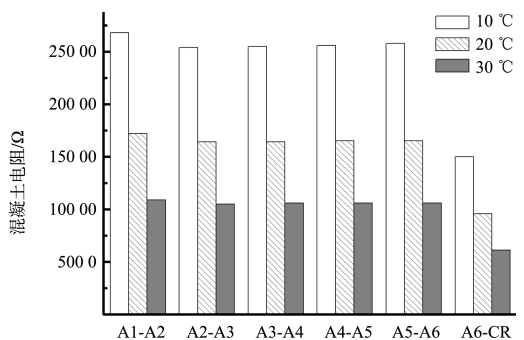


图 8 钢筋自腐蚀电位随温度的变化

### 2.2.3 温度变化对电偶腐蚀电流的影响

阳极梯传感器主要是通过钢筋阳极和钢筋连接与钛阴极之间的电偶腐蚀电流来判断钢筋的腐蚀状态。电偶腐蚀的基本关系可根据克希霍夫(Kirchhoff)第二定律来表示<sup>[8]</sup>:

$$E_c - E_a = I \times (R_e + R_m) \quad (1)$$

式中:  $E_c$ 为偶对阴极组元的有效(极化)电位,  $E_a$ 为阳极组元的有效(极化)电位,  $R_e$ 为电偶回路中电解质部分的电阻,  $R_m$ 为金属部分的电阻(一般可以忽略)。可见,影响阳极梯传感器的电偶腐蚀电流主要是阴极组元的极化电位与阳极组元的极化电位的差值以及混凝土电阻。温度的变化会影响极化电位的差值和混凝土的电阻,从而影响电偶腐蚀电流的大小。图9为阳极梯传感器的电偶腐蚀电流与温度的关系。可以看出:温度的变化对电偶腐蚀电流的监测结果影响不大。在实际的工程监测中,可以忽略温度变化对电偶腐蚀电流的影响。

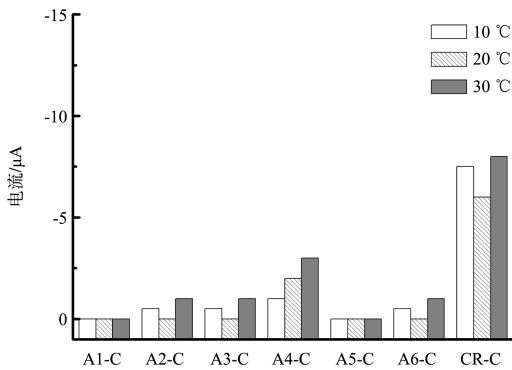


图9 钢筋自腐蚀电流随温度的变化

## 3 结论

1) 温度变化会对 ECI-2 和阳极梯监测传感器的监测结果产生影响,但是有些监测参量的影响

不是很大,如 ECI-2 传感器的自腐蚀电位、阳极梯传感器的自腐蚀电位和电偶腐蚀电流等。在实体工程监测时,可以忽略温度变化对这3个监测参量的影响。

2) 但是,温度变化对 ECI-2 传感器的氯离子探针电位和线性极化电阻以及阳极梯传感器的混凝土电阻的监测结果影响较大。在实体工程监测时,需对这3个监测参量进行修正,以保证监测结果的准确性,准确判断混凝土结构的耐久性健康状况。

## 参考文献:

- [1] Mehta P K. Durability of concrete—fifty years of progress [J]. American Concrete Institute, 1991, 126: 1-32.
- [2] 何谋杰. 腐蚀环境下混凝土桥耐久性监测系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] ASTM C876-91 Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete[S].
- [4] 蒋晓静, 宋晓冰, 王维. 温度对钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀的影响[J]. 工业建筑, 2004, 34(5): 11-14.
- [5] Browne R D. Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environments, Electrical resistivity of concrete [J]. Durability of Building Materials, 1982(1): 113-125.
- [6] 史美伦. 交流阻抗谱原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [7] 李化建, 谢永江, 易忠来, 等. 混凝土电阻率的研究进展[J]. 混凝土, 2011(6): 35-40.
- [8] Winston Revie R. 尤利格腐蚀手册[M]. 杨武, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.

(本文编辑 郭雪珍)