

混凝土中钢筋腐蚀临界氯离子浓度的研究方法

余志顽, 张 梅, 余冬荣

(河海大学 江苏河海工程建设监理有限公司, 江苏 南京 210098)

[摘要] 临界氯离子浓度是确定氯离子环境下钢筋混凝土结构寿命的必备参数之一,为耐久性研究中的一个重点.在综述了混凝土中钢筋腐蚀临界氯离子浓度常用的研究方法,包括失重法、半电池电位法、宏电池法、线性极化法、交流阻抗谱及其他方法,介绍了各种方法的原理、特点及应用过程中存在的问题后,得出由于各种方法判别混凝土中钢筋腐蚀的起始点,进而确定临界氯离子浓度所用的标准与原理不同,获得的临界氯离子浓度也可能并不完全一致.因此,研究方法的差异可能是致使现今临界氯离子浓度的报道值具有高离散性的一个重要原因.

[关键词] 临界氯离子浓度, 混凝土, 钢筋腐蚀, 研究方法

[中图分类号] TU 528.571 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)04-0065-07

Research Methods of Chloride Threshold Value for the Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete

Yu Zhiwan, Zhang Mei, Yu Dongrong

(Jiangsu Hohai Project Construction Supervision Company Ltd, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The chloride threshold value (CTV) is one of crucial parameters for determining the service life of reinforced concrete structure exposed to chlorides. Accordingly, it has become an emphasis of research on the durability of reinforced concrete structure. In this paper, the research methods of CTV including mass loss, half-cell potential, macro-cell, linear polarization, electrochemical impedance spectroscopy and other electrochemical methods have been reviewed. Especially, the mechanisms, some important features and existent issues in evaluation methods are introduced. The research indicates that due to the differences of mechanism and standard of identifying the corrosion initiation, the CTVs obtained by the various research methods may be different. So, the different research methods may have contributed to the scatter of CTV reported in the pervious literatures.

Key words chloride threshold value; concrete; steel corrosion; research method

混凝土是当今世界用量最大的工程材料.混凝土本身是非匀质的脆性材料,其抗拉和抗弯强度差,为了承受拉应力,需要配筋强化,其中以钢筋的使用最为广泛.通常情况下,钢筋在水泥混凝土的高碱性环境中,表面生成钝化膜,并不会发生锈蚀.但是,随着外界侵蚀性介质,如氯离子的侵入,钢筋的钝化膜会被破坏,从而发生锈蚀.现今,钢筋锈蚀已成为钢筋混凝土构筑物过早失效的一个主要原因,并已成为世界性难题.

氯离子是极强的阳极活化剂,但是只有当钢筋表面附近溶液的氯离子浓度达到一定的临界值后,混凝土中钢筋才会发生腐蚀.钢筋腐蚀的临界氯离子浓度值 CTV (Chloride Threshold Value),就是使钢筋脱钝化所必需的氯离子浓度值,对氯离子环境下的钢筋混凝土结构的耐久性和寿命预测都有十分重要的意义,为钢筋混凝土结构耐久性研究中不可缺少的一个参数.但是,由于钢筋混凝土结构的复杂性,且 CTV 同时受到众多因素,如:钢筋成份与表面状态、混凝土配合比、水泥成份、掺合料和环境温度与湿度等影响与制约,从而使对该参数的研究变得尤为复杂,直至目前,有关 CTV 的报道值并未达成一致,且离散性很大,实际也使得 CTV 成为耐久性研究中的一个难点^[1].

收稿日期: 2010-09-20
通讯联系人: 余志顽,高级工程师,研究方向: 混凝土工程. E-mail: zwyu@hhu.edu.cn

开展 CTV 研究的一个关键环节就是要对混凝土中钢筋的活性腐蚀起始点进行准确的判别. 由于混凝土中钢筋腐蚀具有很强的隐蔽性, 因此活性腐蚀起始点的准确诊断是一项非常具有挑战性的工作. 本文综述了判别混凝土中钢筋腐蚀的起始点, 进而确定临界氯离子浓度常用的研究方法, 包括失重法、半电池电位法、宏电池法、线性极化法、交流阻抗谱及其他方法, 介绍了各种方法的原理、特点及应用过程中存在的问题. 这些对混凝土中钢筋腐蚀状态的诊断与评价及临界氯离子浓度的研究均具有重要的参考价值.

1 失重法

失重法 MS(Mass loss)是一种较为传统的混凝土中钢筋腐蚀的测定和评价方法, 常被用作估计其他腐蚀评价方法准确性的参考标准. 该种方法是通过计算混凝土中钢筋腐蚀前后暴露面的失重来评价混凝土中钢筋的腐蚀状态的. 具体诊断腐蚀起始点依据是: 由于钢筋在腐蚀起始点还没有发生明显腐蚀, 因而此时的混凝土中钢筋与处于完全钝化态的、控制试件钢筋的失重率应相同, 或相对于完全钝化的控制试件中的钢筋, 当试验中的钢筋显示可察觉到的失重时, 此时所对应的钢筋腐蚀状态即为活性腐蚀的起始点.

早在 1996 年, Michael Thomas^[2]就用此种方法研究了粉煤灰掺量对海洋环境下处于潮汐区的 1 年和 4 年期限的钢筋混凝土结构的 CTV 影响规律, 研究发现对于所有配合比的混凝土中钢筋的平均失重率与氯离子含量近似存在下列线性关系:

$$m(\%) = -0.086 + 0.442C_I, \quad (1)$$

而处于钝化态的控制混凝土中钢筋在化学洗涤液中由于去除钢筋表面钝化膜产生约为 0.087% 失重率, 因此, 对于所有粉煤灰掺量的混凝土中钢筋的平均 CTV 约为 0.39% (相对于胶凝材料质量), 这个 CTV 与有关标准中对于氯离子浓度限定值有很好的一致性. 对于各种掺量的粉煤灰混凝土, 钢筋的失重率与混凝土中钢筋表面的氯离子含量之间的线性关系会有差异, Michael Thomas 用上述方法, 分别推断出具体各种掺量的粉煤灰混凝土中钢筋腐蚀的起始点, 从而确定了各种粉煤灰掺量的混凝土的 CTV. 同理, Reou 和 Ann^[3]也用失重法判定了内掺氯离子的混凝土中钢筋腐蚀的起始点, 并确定了 CTV, 并以此作为基准, 确定了半电池电位法、宏电池法与线性极化法对应于钢筋活性腐蚀起始点的相应的电化学参数值.

虽然失重法被一些研究者认为是较为准确的混凝土中钢筋腐蚀起始点判别方法, 但是, 该方法也存有较为明显的缺陷, 如: 失重法是破坏性的钢筋腐蚀状态的测定方法, 因而不大适用于现场的钢筋混凝土结构状态的评价, 同时, 只有钢筋腐蚀得较为严重时, 钢筋失重才较为明显. 因此失重法用于判别钢筋活性腐蚀起始点所需的试验周期较长, 也不太适用于实验室进行研究. 此外, 相对于电化学方法, 失重法的判别精度还是值得商榷的.

2 半电池电位法

半电池电位法 HCP(Half cell potential), 由于简单、经济、又易于操作是应用最早、最广泛的钢筋腐蚀状态的无损诊断电化学方法. 该种方法是通过测定钢筋表面的微阳极和微阴极的混合电位来判别钢筋的腐蚀状态. 具体测试装置如图 1 所示^[4]. 其中半电池电位测试过程中使用的参比电极除了可用美国 ASTM C876-91 和我国 JTJ270-98 标准中规定的饱和的 Cu/CuSO₄ 电极(CSE)外, 也可用氯化银电极和甘汞电极(SCE)等其他参比电极. 其机理是由于氯盐环境下混凝土钢筋腐蚀体系中处于钝化状态阴极的性质变化并不大, 因而混凝土中的钢筋微阴极和微阳极的混合电位取决于阳极的性质, 如: 阳极钝化, 则电位偏正; 阳极活化, 则电位偏负. 如用饱和 Cu/CuSO₄ 电极, 评价的标准为: $E > -200 \text{ mV}$, 大于 90% 概率不会发生腐蚀; $-350 \text{ mV} < E < -200 \text{ mV}$, 不确定; $E < -350 \text{ mV}$, 大于 90% 概率发生活性腐蚀.

早在 1996 年, S. E. Hussain 等人^[5]就用饱和甘汞电极为参比电极, 通过持续监控浸泡在 5% 氯化钠溶液中的不同 C₃A 含量水泥砂浆中钢筋的半电池电位值, 以钢筋电位值达 -270 mV vs SCE 作为钢筋活性腐蚀发生的依据, 确定了 CTV. 研究结果显示 CTV 与水泥 C₃A 含量无关, 游离氯离子表示的 CTV 在 0.22% ~ 0.29% (相对于水泥质量)之间, 这个范围值与标准规定值有着较好的一致性. Oh B H 和 Jang S Y^[6]通过测量相对胶凝材料质量比为 0% ~ 2% 之间的 8 个掺量氯化钠混凝土中钢筋的半电池电位和实际腐蚀面积, 试验结果发现, 随混凝土中的氯化钠掺量的增加, 钢筋的半电池电位值近似线性减小, 同时, 钢筋表面的实际腐蚀面积也会增大, 其中, 当钢筋的半电池电位值达到 -300 mV vs CSE 时, 钢筋的实际腐蚀

面积增长明显, 此时即被认为是钢筋活性腐蚀发生的起始点. 此外, Han Young Moon 和 Kook Jae Shin^[7, 8]也分别用半电池电位法诊断了水下抗分散混凝土中钢筋活性腐蚀的起始点, 并以此为标准, 推出了用钢筋腐蚀电流密度来判断水下抗分散混凝土中钢筋腐蚀发生的临界值, 而 Khatri R. P 等人^[9]也做了类似的工作, 用半电池电位法为基准确定了对应于混凝土中钢筋发生活性腐蚀所对应的临界极化电阻值.

半电池电位法测试的实际是热力学上的自腐蚀电位, 因此, 只能定性判断混凝土中钢筋腐蚀的可能性. 此外, 由于它是混合电位, 除了与钢筋表面阳极去钝化状态有关外, 其值还受到钢筋腐蚀的阴极反应的影响. 影响阴极反应的因素, 如混凝土含水量、氧含量和混凝土碱度等都会影响到钢筋的半电池电位值. 现行标准就规定半电池电位法一般不用于已饱水或接近饱水构件. 因此, 用半电池电位来识别腐蚀发生的起始点还应综合考察环境因素, 单纯从半电池电位某个值诊断钢筋活性腐蚀发生的起始点存有较大的风险. 但是, 鉴于半电池电位法的简便和易操作性, 它仍然不失为诊断钢筋腐蚀发生的起始点良好的辅助方法.

3 宏电池法

氯盐环境下钢筋混凝土结构由于钢筋/混凝土界面的非均匀性, 通常会形成分离的阳极和阴极, 从而产生所谓宏电池腐蚀. 宏电池法 MC (Macro-cell), 通过直接测定活化的阳极和钝化的阴极之间的宏电流来判断和评价钢筋的腐蚀风险. 在具体研究中, 通常采用电位较正的材料作为阴极来模拟混凝土中钢筋宏电池腐蚀, 所用的阴极材料主要有钛网、石墨或不锈钢. 此外, 钢筋的梯形系统也常被用来研究混凝土中的宏电池腐蚀. 目前, 已有美国标准 G 109-99a 规范用于评价氯盐环境下的混凝土中拌合物对钢筋腐蚀性影响的宏电池判别方法可供参考.

根据宏电池腐蚀的机理, 宏电流 I_c 可表示为:

$$I_c = \frac{U}{R_{pA} + R_{pC} + R_{el}}, \quad (2)$$

式中, U 为阴、阳极之间的驱动电位 (driving voltage); R_{pA} 、 R_{pC} 分别为阳极和阴极的极化电阻; R_{el} 为阴、阳极之间混凝土电阻. 在钢筋腐蚀起始的起始点, 钢筋表面开始去钝化, 阳极的极化电阻会突然减小, 由式 2 可知宏电流会急剧增加. 因此对同一钢筋进行持续宏电流监控, 在钢筋腐蚀起始的临界点, 宏电流会产生跳变 (或跃变), 因而通过宏电流跳变 (或跃变) 点可用来判别作为腐蚀的起始点. 如 Ryou J S 和 Ann K Y^[10] 以钛网为阴极, 通过持续监控浸泡在 4 mol/L 氯化钠溶液中的混凝土中钢筋腐蚀的宏电流, 典型的结果如图 2 所示. 从图中可以看出, 在浸泡的起始阶段, 此时钢筋处于钝化状态, 宏电流接近于 0, 但是在浸泡一段时间后, 氯离子逐步渗透进入混凝土至钢筋表面的浓度达到 CTV, 宏电流急剧增长. 用此方法, Ryou J S and Ann K. Y.^[11] 还研究了 $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ 对 CTV 提升规律. 此外, Dawin 等人^[12] 以宏电池法诊断了热浸镀锌钢筋的临界腐蚀点. 而 Hart W. H. 和 Nam J^[13] 以宏电池电流值超过 10 μA , 并结合半电池电位值判别腐蚀起始点, 从而确定 CTV.

宏电池法中测试的宏电流不能等同于混凝土中钢筋的腐蚀电流. 这是因为混凝土中钢筋腐蚀还形成了许多微电池, 这些微电池腐蚀的电流

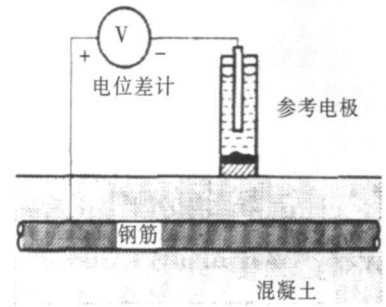


图 1 半电池电位测试方法^[9]

Fig.1 Measuring method of half-cell potential

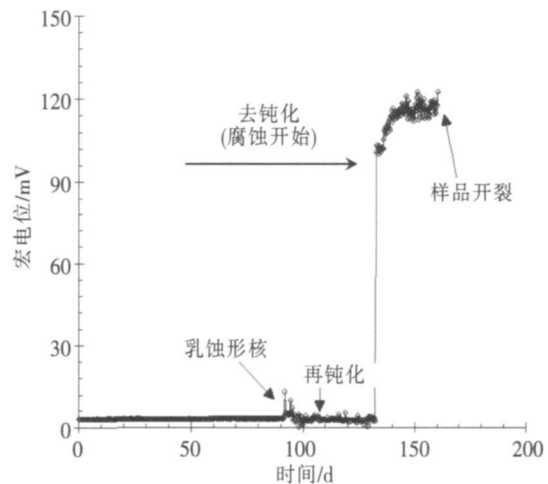


图 2 宏电池法判别腐蚀起始点的示意图^[10]

Fig.2 Schematic diagram for the detection of steel corrosion initiation by the evolution of galvanic potential

是通过混凝土形成回路而未经过测试导线,因而并没有包含在宏电流的测试值中.此外,用其他电极材料作为阴极模拟混凝土中钢筋的宏电池腐蚀与现实中的钢筋腐蚀仍然存在较大差异.因此,不宜用宏电流的测试值直接评价混凝土中的腐蚀程度,也不宜用某一个具体的宏电流值对应判别钢筋活性腐蚀的起始点.

4 线性极化法

线性极化法 LP(Linear polarization),是 Stern 和 Geary^[14]于 1957 年提出并发展起来的一种快速而有效的腐蚀速度测试方法.该方法具体通过测量钢筋通微电流时自然电位附件产生的电位变化量求得极化电阻,从而评价钢筋腐蚀速度.这一方法是以过电位很小时($\eta < 10\text{mV}$),过电位与极化电流成线性关系作为理论根据,即:

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta I} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (3)$$

式中, ΔE 为施加的极化电位值(相对于自腐蚀电位或开路电位); ΔI 为极化前后相应的电流密度变化; R_p 为极化电阻.极化电阻通过 Stern-Geary 常数 B 与腐蚀电流密度建立联系,即:

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (4)$$

式中 Stern-Geary 常数 B 与腐蚀反应的阴、阳极的过程的 tafel 常数有关:

$$B = \frac{\beta_a + \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (5)$$

具体 B 的取值已经通过失重法进行了校准,当混凝土中钢筋发生活化反应时,一般认为 $B = 26\text{mV}$; 当处于钝化态时,一般认为 $B = 52\text{mV}$.

由线性极化法测试所得的腐蚀电流密度诊断钢筋腐蚀发生的临界点,主要通过两种途径,一是通过持续监控外渗氯离子或测量不同氯盐掺量的混凝土中钢筋的腐蚀电流密度,由腐蚀电流密度的发展趋势来诊断钢筋活性腐蚀的起始点.如 Hope B B 和 Ip A K C^[15]用线性极化法测试不同掺量的氯化钙混凝土中钢筋的腐蚀电流密度,试验发现内掺 0.2~0.4% 氯化钙(相对水泥质量比)时,钢筋的腐蚀电流密度迅速增长,由此可认为钢筋活性腐蚀已起始.但是,由于混凝土中钢筋腐蚀过程的复杂性,混凝土中钢筋的腐蚀电流密度出现显著变化的增长点时常并不明显,因此这种判别钢筋活性腐蚀起始点的办法有一定的主观性.其次是将腐蚀电流密度某个值与钢筋的腐蚀状态直接对应起来,这个方法首先由 Andrade C^[16]提出,现今这个方法已得到广泛接受与应用.如 Abnso C 等人^[17]通过线性极化法测试了不同内掺量的氯化钠和氯化钙的砂浆中钢筋的腐蚀电流,并建立了腐蚀电流与氯离子含量对数之间的线性关系,并以腐蚀电流密度 $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2 < i_{\text{corr}} < 0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之间对应的氯离子浓度值为 CTV 范围,其他的研究者^[18-19]也用类似方法判别内掺和外渗氯盐两种氯离子侵入方式的混凝土中钢筋的腐蚀起始点.

线性极化法由于具有操作方便快捷、测试精度高等优点,是使用最为广泛的混凝土中钢筋活性腐蚀起始点的判别方法,同时,线性极化法还定量反应了混凝土中钢筋的腐蚀速度和腐蚀程度.通过护卫环控制技术可较准确地确定钢筋受到极化扰动的表面积,从而使之也可用于现场的钢筋混凝土结构的腐蚀速率测试.但是,线性极化法测试过程中也还存有需要进行 IR 降的补偿,以及测试结果易受扫描速度、浸泡时间和钢筋暴露面积等因素的影响等问题.

5 电化学阻抗谱法

电化学阻抗谱 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy),是以小振幅的交流信号(通常是幅度小于 20mV 正弦交流电压信号)为扰动信号的一种电化学测量方法.由于是以小振幅的电信号对体系扰动,既避免对腐蚀体系产生大的影响,同时也使扰动和体系的响应之间近似成线性关系,从而简化了测量结果的数学处理.同时,它又是一种频率域的测量方法,它以测量得到的频率范围很宽的阻抗谱来研究电极系统,因而比其他常规的电化学方法得到更多的动力学信息及电极界面结构的信息.基于上述优势,自 Dawson 课题组^[20-21]首次将电化学阻抗谱引入研究混凝土中钢筋的腐蚀行为以来,交流阻抗谱已成为试验室中研究混凝土结构中钢筋腐蚀行为的最为常用方法之一.

电化学阻抗谱测试方法中一个基本概念就是混凝土中的钢筋腐蚀系统可以视为由一系列电阻和电容组成的等效的电子电路, 而该电路中每一个电子元件与混凝土中钢筋腐蚀系统的某个特性密切相关, 因此, 对测试得到的电化学阻抗谱进行等效电路模拟获取的电子元件电阻和电容值就可推算出混凝土钢筋腐蚀系统对应的性质. 归因于混凝土系统的复杂性, 已经有多个研究者提出了各自不同的钢筋混凝土结构腐蚀系统的等效电路模型. 从纯数学角度来说, 电化学阻抗谱是可以由这些不同的等效电路进行拟合, 但是, 对电化学阻抗谱的合理解释应综合考虑混凝土钢筋腐蚀体系的结构和性能, 等效的各个电路元件应该要有明确的内涵, 同时等效的电子电路应尽可能简单些, 因为这有利于简化阻抗谱的数学拟合过程.

将混凝土钢筋腐蚀体系测试得到的阻抗谱由适宜的等效电路进行拟合, 与阻抗谱低频位置 ($1\text{ mHz} \sim 10\text{ Hz}$) 对应的电阻元件为混凝土中钢筋腐蚀的电荷转移电阻 (charge transfer resistance R_a). 电荷转移电阻一般就等于极化电阻. Olivier Poupard 等人^[22]通过持续监控外部氯离子渗透钢筋混凝土结构的电化学阻抗谱, 并对阻抗谱低频处用等效电路模拟获取了不同渗透时期的极化电阻, 并以极化电阻出现显著下降来识别钢筋腐蚀起始临界点. 此外, 也可以将阻抗谱模拟所得的极化电阻代入 Stern-Gearry 方程计算腐蚀电流密度, 通过前述的 C. Andrade 提出标准进行钢筋腐蚀起始的临界点判别. 但是, 史美伦则认为对混凝土阻抗谱的解释不应拘泥于某一个特定的测量值和模拟值, 而应着眼于整个频率范围内阻抗谱的拓扑特性, 也即图形的形状和曲线的走向^[23]. 国内外许多研究者通过试验发现, 混凝土钢筋腐蚀前后的电化学阻抗谱的图形特征有着较为明显的差异, 即相较于腐蚀前, 钢筋腐蚀后的阻抗谱低频处多出了扩散控制的线性段, 需要用不同的等效电路进行模拟. 混凝土腐蚀体系的阻抗谱的这种拓扑结构变化表明钢筋表面的钝化膜破裂, 已经从稳定的钝态转入活性腐蚀状态, 而整个电极过程的控制步骤也从电化学电荷传递过程转变为腐蚀反应物或产物的传质过程. 李岩等人^[24-25]正是依据这种阻抗谱拓扑结构的改变并结合其他的电化学判别手段识别了粉煤灰、矿渣粉混凝土中钢筋腐蚀的起始临界点, 进而确定了 CTV, 并建立了 CTV 与混凝土孔隙液 pH 值之间线性关系式.

电化学阻抗谱主要不足的是所需测试仪器复杂, 测试时间较长, 同时, 图谱往往较为复杂, 所得的结果更多依赖于提出的模拟模型, 解析也需要专业知识, 这也是它现场应用受到限制的主要原因.

6 其它方法

除了上述的比较常用的混凝土钢筋腐蚀起始点的判别方法外, 用于混凝土中钢筋腐蚀的起始点判别还有其他的电化学方法, 如早在 1967 年, Hausmann D A^[26]首次用碱性溶液模拟混凝土中孔溶液, 用自腐蚀电位变化并结合目视观察判别钢筋腐蚀的起始点, 研究发现钢筋腐蚀的 CTV 与溶液碱度有关, 在 11.60 ~ 12.40 的 pH 值范围内, $[Cl^-]/[OH^-]$ 比值约为 0.60 随后 Gouda^[27]用恒电流极化法研究了在更广 pH 值范围内的碱性模拟混凝土孔溶液中 CTV. 同样, L. Li^[28]和 Abnso C.^[29]也做了类似的工作, 分别用自腐蚀电位和恒电流极化法判别了碱性模拟溶液和砂浆中的钢筋腐蚀的起始点. 而 Izquierdo D.^[30]则用恒电位极化方法判别了砂浆中钢筋腐蚀的起始点, 并结合统计方法建立了钢筋腐蚀的 CTV 与钢筋电位之间的关系. 宋晓冰等人^[31-32]用恒电位极化法确定碱性模拟溶液的钢筋腐蚀的孔蚀电位, 并以腐蚀电位大于孔蚀电位作为腐蚀的起始点判别标准. 而刘玉和 Moreno M. 等人^[33-34]则通过测试不同氯盐含量的碱性溶液中的钢筋腐蚀的动电位极化曲线, 确定相应的孔蚀电位, 并以孔蚀电位相对于氧气的析出电位 E_{OE} 显著变化作为钢筋活性腐蚀起始点. 此外, 循环极化法也常被用作碱性模拟孔溶液和水泥提取液中钢筋腐蚀起始点判别方法. 而混凝土的电阻率也可用于判别钢筋腐蚀的起始点, 如 Morris W.^[35]建立了混凝土钢筋腐蚀的 CTV 与电阻率之间的线性关系.

7 结语

临界氯离子浓度是确定钢筋混凝土结构起始阶段寿命的必备参数之一, 为耐久性研究中的一个重点. 目前, 已有的研究存在报道的临界氯离子浓度值离散性过大的问题, 需进一步研究. 而对混凝土中钢筋的活性腐蚀起始点进行准确的判别是开展临界氯离子浓度研究的一个关键环节. 混凝土中钢筋腐蚀临界氯离子浓度的常用研究方法有多种, 包括失重法、半电池电位、宏电池法、线性极化法、电化学阻抗谱法及其他方法, 这些方法各自都有自己的优势与特点, 但是在具体应用过程也都存在一些问题. 此外, 由于这些方

法的原理不同,采用判别腐蚀起始点,进而确定临界氯离子浓度的标准也不一致,因此,获得的临界氯离子浓度也可能并不完全一致,因此,研究方法的差异可能是致使现今临界氯离子浓度的报道值具有高离散性的一个重要原因。但是,鉴于实际的混凝土钢筋腐蚀是自然状态下发生的自然腐蚀,因此,半电池电位、线性极化、电化学阻抗谱这 3 种方法由于不会对钢筋施加明显的极化,应该为首选的方法。

[参考文献](References)

- [1] Ann K Y, Song H W. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete[J]. Corrosion Science, 2007, 49(11): 4113-4133.
- [2] Thomas M. Chloride thresholds in marine concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 513-519.
- [3] Reou J S, Ann K Y. Electrochemical assessment on the corrosion risk of steel embedded in OPC concrete depending on the corrosion detection techniques[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 113(1): 78-84.
- [4] 柳俊哲, 邢锋, 张振文, 等. 混凝土中钢筋腐蚀的测定与评价方法[J]. 材料导报, 2008, 20(10): 80-83.
Liu Junzhe, Xing Feng, Zhang Zhenwen, et al. Measuring method and evaluation method of steel corrosion of reinforced concrete[J]. Materials Review, 2008, 20(10): 80-83 (in Chinese).
- [5] Hussain S E, Ahmad S A G. Rasheeduzzafar chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6): 534-538.
- [6] Oh B H, Jang S Y, Shin Y S. Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures[J]. Magazine of Concrete Research, 2003, 55(2): 117-124.
- [7] Moon H Y, Shin K J. Evaluation on steelbar corrosion embedded in antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 521-529.
- [8] Moon H Y, Shin K J. Frost attack resistance and steelbar corrosion of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(1): 98-108.
- [9] Khatri R P, Sirivatananon V, Heeley P. Critical polarization resistance in service life determination[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(5): 829-837.
- [10] Ryou J S, Ann K Y. Variation in the chloride threshold level for steel corrosion in concrete arising from different chloride sources[J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(3): 177-187.
- [11] Reou J S, Ann K Y. The electrochemical assessment of corrosion inhibition effect of calcium nitrite in blended concretes[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 109(2-3): 526-533.
- [12] David D, JoAnn B, Matthew O R, et al. Critical chloride corrosion threshold of galvanized reinforcing bars[J]. ACI Materials Journal, 2009, 106(2): 176.
- [13] Hart W H, Nam J. Effect of cement alkalinity on chloride threshold and time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete[J]. Corrosion, 2008, 64(8): 671.
- [14] 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: 56-63.
- [15] Brian B Hope, Alan K C Ip. Chloride corrosion threshold in concrete[J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(M32): 306-314.
- [16] Andrade C, Gonzalez J A. Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements[J]. Werkstoffe und Korrosion, 1978, 29: 515-519.
- [17] Alonso C, Andrade C, Castel B M, et al. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(7): 1047-1055.
- [18] Manera M, Vennesland O, Bertolini L. Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume[J]. Corrosion Science, 2008, 50(2): 554-560.
- [19] Ann K Y, Jung H S, Kim H S, et al. Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 530-535.
- [20] John D G, P C S, Dawson J L. Use of AC impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions[J]. British Corrosion Journal, 1981, 16(2): 102-106.
- [21] Montemor M F, Simos A M P, Ferreira M G S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4-5): 491-502.
- [22] Poupard O, Mokhtar A A, Dumargue A P. Corrosion by chlorides in reinforced concrete: determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(6): 991-1000.

- [23] 史美伦, 杨正宏. 混凝土阻抗谱的拓扑结构 [J]. 建筑材料学报, 2002, 5(2): 132-136
Shi Meilun, Yang Zhenghong. Topological structure of the spectroscopy of AC impedance for concrete [J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(2): 132-136 (in Chinese)
- [24] 李岩, 朱雅仙, 方景. 混凝土中钢筋腐蚀的氯离子临界浓度试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2004(1): 24-28
Li Yan, Zhu Yaxian, Fang Jing. Experimental study of chloride ions critical content causing reinforcement corrosion in concrete [J]. Hydro-science and Engineering, 2004(1): 24-28 (in Chinese)
- [25] Li Y, Zhu Y, Zhu X, et al. Chloride ion critical content in reinforced concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition, 2007, 22(4): 737-740
- [26] Hausmann D A. Steel corrosion in concrete: How does it occur? [J]. Materials Protection, 1967, 6(11): 19-23
- [27] Gouda K, Hakka V W Y. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel immersion in alkaline solution [J]. British Corrosion Journal, 1970 (5): 198-203
- [28] Li L, Sagues A A. Chloride corrosion threshold of reinforcing steel in alkaline solutions—open-circuit immersion tests [J]. Corrosion, 2001, 57(1): 19
- [29] Alonso C, Castelbote M, Andrade C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47(21): 3469-3481
- [30] Izquierdo D, Alonso C, Andrade C, et al. Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation: experimental and statistical study [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(17/18): 2731-2739
- [31] 宋晓冰, 孔启明, 刘西拉. 普通硅酸盐混凝土中临界氯离子浓度的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 59-63
Song Xiaobing, Kong Qiming, Liu Xila. Experimental study on chloride threshold levels in OPC [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(11): 59-63 (in Chinese)
- [32] 陈卿, 宋晓冰, 翟之阳. 混凝土模拟孔隙液中钢筋腐蚀临界氯离子浓度试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(6): 156-162
Chen Qing, Song Xiaobing, Zhai Zhiyang. Experimental research on chloride threshold level of steel corrosion in simulated concrete solution [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(6): 156-162 (in Chinese)
- [33] Moreno M, Morris W, Alvarez M G, et al. Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: effect of carbonation and chloride content [J]. Corrosion Science, 2004, 46(11): 2681-2699
- [34] 刘玉, 杜荣归, 林昌健. 氯离子对模拟混凝土孔隙液中钢筋腐蚀行为的影响 [J]. 电化学, 2005, 11(3): 333-336
Liu Yu, Du Ronggui, Lin Changjian. Effect of chloride ions on the corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions [J]. Electrochemistry, 2005, 11(3): 333-336 (in Chinese)
- [35] Morris W, Vico A, Vazquez M. Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(25): 4447-4453

[责任编辑: 刘 健]