第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200883

综 合 评 述

混凝土中钢筋的宏电池腐蚀研究进展与展望

李佳祺[1]，熊建波[2]，范志宏[2]，郑海兵[1]，李伟华[1]

(1. 中山大学化学工程与技术学院，广东 珠海 519082；2. 中交四航工程研究院有限公司，广州 510230)

摘 要：宏电池腐蚀普遍存在于混凝土结构中，当其与微电池腐蚀共同作用时会显著加速混凝土结构劣化。近年来随着我国工程建设的不断推进，钢筋宏电池腐蚀引起的耐久性问题愈发突出，相应的防护需求日趋迫切。钢筋宏电池腐蚀影响因素众多，成因复杂，是腐蚀领域的一项难题与挑战。本综述探讨了宏电池腐蚀的机理，详细介绍了其影响因素，概述了混凝土中钢筋宏电池腐蚀研究进展，并展望了未来宏电池腐蚀的研究方向。

关键词：混凝土；钢筋锈蚀；宏电池腐蚀；微电池腐蚀
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1631–11
网络出版时间：2021–06–17

Progress and Prospects of Macrocell Corrosion of Steel Bars in Concrete

LI Jiaqi[1], *XIONG Jianbo*[2], *FAN Zhihong*[2], *ZHENG Haibing*[1], *LI Weihua*[1]
(1. School of Chemical Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China;
2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co. Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Macrocell corrosion occurs in concrete structures universally, which accelerates the deterioration of concrete structures, when combined with microcell corrosion. In recent years, the durability problem caused by macrocell corrosion becomes more prominent with the advancement of engineering construction in China, thus demanding the corresponding protection. Nevertheless, there are many factors influencing the corrosion of microcell and their causes are relatively complicated, thus becoming a great challenge in the field of corrosion science and technology. This review offered an overview on the progress and prospects of macrocell corrosion of steel bars in concrete, including theory of the mechanism and influencing factors. In addition, the future research direction of macrocell corrosion was also discussed.

Keywords: concrete; steel corrosion; macrocell corrosion; microcell corrosion

混凝土是世界上使用最多的人造材料[1]。尽管钢筋混凝土结构耐久性良好，但我国仅在 1999～2000 年间用于维护因钢筋锈蚀而导致破坏的混凝土结构的金额高达 5 000 亿元[2]。2014 年，我国因钢筋锈蚀造成的损失超过 2 万亿元[3]。一直以来，钢筋锈蚀都是钢筋混凝土结构破坏的主要原因[4–5]。

现今，随着我国“一带一路”倡议的提出与“海洋强国”国家战略的实施，越来越多的长服役寿命混凝土主体工程结构如港珠澳大桥、青岛胶州湾隧道、深中通道等已经建成或在规划建设中，因而在工程领域愈发需要准确评估新建或在役混凝土结构的耐久性[6–8]。实际结构中钢筋之间通常以箍筋(拉结筋)或以钢筋网的形式存在电连接，因此在侵蚀介质(氯离子、二氧化碳)的存在下将产生宏电池效应，产生极高的腐蚀风险，对混凝土结构耐久性带来巨大隐患[9]。因此，从作用机理以及影响因素上全面地认识钢筋宏电池腐蚀愈发重要。

本综述涵盖了混凝土中钢筋宏电池腐蚀研究进

收稿日期：2020–11–25。　修订日期：2021–01–04。
基金项目：国家自然科学基金项目(51525903，51879292)；广东省国际科技合作项目(2019A050510020)。
第一作者：李佳祺(1997—)，男，硕士研究生。
通信作者：郑海兵(1988—)，男，博士。

Received date: 2020–11–25.　**Revised date:** 2021–01–04.
First author: LI Jiaqi (1997–), male, Master candidate.
E-mail: lijq83@mail2.sysu.edu.cn
Correspondent author: ZHENG Haibing (1988–), male, Ph. D..
E-mail: zhenghb6@mail.sysu.edu.cn

展，重点分析宏电池腐蚀的影响因素，探讨了国内外宏电池腐蚀研究中存在的问题，并对未来宏电池腐蚀研究方向进行了展望。

1 宏电池腐蚀概述

1.1 宏电池腐蚀定义

宏电池腐蚀通常由空间分隔的活化腐蚀钢筋部位(阳极)与钝化或腐蚀速率较低的钢筋部位(阴极)存在电连接而形成。钢筋成分不同或其所处环境不同可产生空间分隔的阴阳极，通过钢筋网或箍筋形成电连接，同时离子流通过混凝土基体，进而形成宏电池回路[10–11]，如图 1 所示。

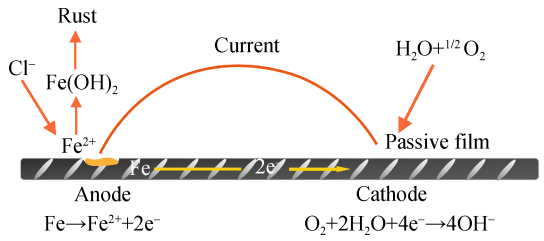


图 1 氯离子引发的宏电池腐蚀

Fig. 1 Macrocell corrosion induced by chloride

宏电池腐蚀中，电子从阳极处向阴极处传输的同时离子电流在混凝土孔隙溶液中传导[11]。活化区域比钝化区域电位更负[12]，因此一旦活化区域与钝化区域电连接，前者将经历一个从其平衡电位($E_{corr,a}$)向更高电位(E_a)发展的阳极极化，并伴随着金属消耗与电子释放，进而使活化区域产生整体为正的净电流 I_M[式(1)]，即宏电池腐蚀电流[11]；与之对应，钝化区域经历从其平衡电位($E_{corr,p}$)向更低电位(E_p)发展的阴极极化，产生与 O_2 还原相关的负电流 I_{-M}[式(2)][11]。单个电极的电化学极化行为通常用 B-V 方程(Butler–Volmer equation)描述[式(3)][11]。其中：i 是电极上的净电流密度，A/m^2；i_0 是电极平衡时候的交换电流密度，A/m^2；β_a 表示氧化反应的阳极 Tafel 斜率；β_c 表示还原反应阴极 Tafel 斜率。

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad (1)$$

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (2)$$

$$i = i_0 \left\{ \exp\left[\frac{(E_a - E_{corr,a})}{\beta_a}\right] - \exp\left[\frac{(E_p - E_{corr,p})}{\beta_c}\right] \right\} \quad (3)$$

宏电池腐蚀中，由于活化区和钝化区存在一定距离，所以需要考虑混凝土的 Ohmic 电阻(R_e)，导致 E_a 低于 E_p[11,13]。Ohmic 电势降(E_a–E_p)等于钝化区和活化区的电势差。将 E_a–E_p、R_e、I_M 代入 Ohmic 定律得出式 4[11,13]。

$$E_a - E_p = R_e \times I_M \quad (4)$$

需注意，“活化钢筋成为阳极而钝化钢筋成为阴极”的简化观点不够确切，因为无论是活化钢筋还是钝化钢筋表面都会发生阳极反应和阴极反应[10]。电连接时活性高的钢筋表面阳极反应增加，活性低或钝化的钢筋表面阳极反应减少，但通常选择忽略钝化钢筋表面的阳极反应。此外，以局部腐蚀为例，腐蚀位点表现为纯阳极而周围区域表现为纯阴极的情况极少[14–15]，通常认为阳极区也包含着阴极区[16]。

1.2 微电池腐蚀定义

与宏电池腐蚀相对应的是微电池腐蚀。两者区别在于，微电池腐蚀中钢筋的活性溶解与氧气还原这两个半电池反应发生在微观尺度上的相邻位置，离子电流路径极短[10]。阴阳极位点在空间中组合在一起，混凝土电阻可以忽略[11]。除阴、阳极空间重叠外，微电池腐蚀的腐蚀机制也发生在微观范围内[17]。阳极腐蚀产物 Fe^{2+}可与阴极腐蚀产物 OH^-直接发生进一步的反应[式(5)]。$Fe(OH)_2$ 也可被继续氧化形成各种氧化物，如 $Fe_2O_3{\cdot}H_2O$[式(6)]，$Fe_3O_4{\cdot}H_2O$ [式(7)][12,17]。因此，微电池腐蚀的腐蚀产物极易出现在腐蚀位点上，进而引起混凝土腐蚀涨裂，而宏电池腐蚀的腐蚀产物存在“迁移”的情况，存在于阴阳极之间。

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (5)$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 \cdot H_2O + 2H_2O \quad (6)$$

$$6Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 \cdot H_2O + 2H_2O \quad (7)$$

随着微电池腐蚀过程趋于稳定，阳极氧化和阴极还原将达到动态平衡，这种动态平衡伴随着阳极的不可逆消耗(腐蚀)[11]。电势场将趋于均匀状态，阳极电流 I_a 与阴极电流 I_c 相互抵消，因而混凝土内没有电流流动，也不同于宏电池腐蚀外部存在腐蚀净电流[11]。阴阳极的混合电位称为腐蚀电位 E_{corr}。此时 I_a、I_c 等于 E_{corr} 下的金属溶解速率，即腐蚀速率 I_{corr}，如式(8)[13, 17]。

$$I_{corr} = I_a = I_c \quad (8)$$

1.3 宏电池和微电池腐蚀的关系

宏电池腐蚀与微电池腐蚀密切相关。混凝土中的钢筋如果发生了宏电池腐蚀，则通常同时存在微电池腐蚀[11,17]，如图 2 所示。即使是宏电池腐蚀的活化区域也会存在微电池腐蚀[16]。

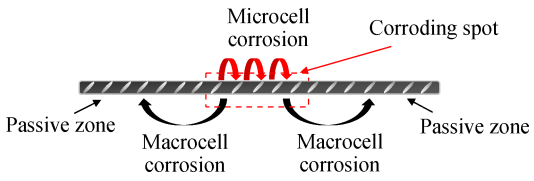


图 2　腐蚀与非腐蚀区之间的宏电池腐蚀电流和腐蚀区内的微电池腐蚀电流[16]

Fig. 2　Representation of macrocell current between non-corroding and corroding zones and microcell current produced within the corroding zone[16]

但宏电池与微电池腐蚀界定方法并不明确。微电池腐蚀发生时钢筋表面阴阳极区域极其微小，分散在钢筋表面且位置不固定，随时间随机变化。如果钢筋表面活化与钝化部位有着在几毫米到几米的距离，即“局部分离”，就会形成具有高腐蚀速率的宏电池腐蚀。因此，从混凝土内阴阳极腐蚀作用位点的距离来划分宏电池腐蚀与微电池腐蚀是较为合理的方法。需要指出的是，宏电池中阴极与阳极的位点距离的临界尺寸随混凝土或钢筋的组分、尺寸、温湿度等自身因素或环境因素而改变。

Andrade 等[18]提出宏电池与微电池腐蚀之和构成了总的腐蚀。阳极腐蚀位点除了与钝化钢筋电耦合外自身还具有微电池腐蚀活性，I_M 只是总腐蚀电流 I_{corr} 的一部分。绝大部分情况下，宏电池腐蚀作用都可添加到微电池腐蚀作用之中[10]。总腐蚀电流密度 i_{corr} 等于宏电池电流密度 i_M 和残余的微电池电流密度 i_{micro} 之和[式(9)]。其中 i_{micro} 的大小取决于耦合中活化钢筋的阳极极化程度，如果阳极钢筋发生强极化，则 i_{micro} 可忽略[13,17]。

$$i_{corr} = i_M + i_{micro} \tag{9}$$

在腐蚀电流密度的求算方面，实验室条件下通常选用线性极化法(LPR)测量单根钢筋的腐蚀电流密度，即利用钢筋腐蚀电位附近极化电位(△E)与极化电流位(△i)的线性关系，求得曲线的斜率即为线性极化电阻 R_p(Ω·cm^2)[19]，见式(10)。

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \tag{10}$$

通过 Stern-Geary 方程，由 R_p 值直接得到腐蚀电流密度 i_{corr}[20][式(11)]。

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \tag{11}$$

其中，B 通过腐蚀过程中阳极反应和阴极反应的塔菲斜率 β_a 与 β_c 求算，获得[式(12)]

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \tag{12}$$

此外，通常 R_p 的量纲为 Ω·cm^2，具有面积属性，即需要确定式(10)中腐蚀电流密度的变化值 Δi 所对应的钢筋面积。当该部分钢筋全部发生微电池腐蚀时，最终根据式(11)所求得的 i_{corr} 即为微电池腐蚀电流密度，而对于氯离子所引发的锈蚀在初期通常以大阴极小阳极的点蚀为主，这时 LPR 所得到的腐蚀电流密度实际上为全部钢筋面积的微电池腐蚀与宏电池腐蚀电流密度之和。

通常情况下，建筑内部钢筋电连接情况复杂，因此当所测量体系的面积未知时，可以不考虑极化区域的面积从而得到量纲为 Ω 的 R_p 值，这时 LPR 将求得腐蚀电流的大小而非腐蚀电流密度。

对于宏电池腐蚀的电流密度求算方法通常是采用零电阻电流表或高阻抗伏特计得到腐蚀电流值 I_M，并根据 I_M 与阳极钢筋的锈蚀面积 S 之比得到宏电池腐蚀电流密度 i_M[10, 21][式(13)]。

$$i_M = \frac{I_M}{S} \tag{13}$$

需要注意的是，阳极钢筋的锈蚀面积并非恒定，而是随着腐蚀进程的推进不断增大，故采用设置的阳极工作面积 S’来代表 S。S’通常远大于 S，故将造成宏电池腐蚀电流密度的低估。然而，在实际工程中由于钢筋间的复杂电连接，难以对宏电池腐蚀电流进行直接测量。

在进行宏电池腐蚀试验中常忽略微电池腐蚀，这导致一个普遍的假设：“只要宏电池腐蚀存在，即宏电池腐蚀在钢筋腐蚀作用中占主导。”实际上，宏电池和微电池腐蚀的腐蚀机制都起重要作用，如果忽略其中的任何一个，则总腐蚀可能会被低估。Rodríguez 等[22]认为仅通过宏电池腐蚀测量手段确定腐蚀开始与腐蚀程度是非常危险的，因为不发生宏电池腐蚀并不意味着没有微电池腐蚀，在高性能混凝土尤为如此。Andrade 等[23]通过试验得出，只有当钝化/活化区域面积之比大于 50:1 时，宏电池腐蚀才与微电池腐蚀的影响量级相同。使用无限大的阴极和无限小的阳极，即通过调整阴阳极面积比实现理论上宏电池腐蚀速率的最大值，才使钢筋的活化腐蚀速率增长至仅存在微电池腐蚀的 2～5 倍。同时，Trejo 等[24]发现重量分析法与宏电池腐蚀速率测量得出的腐蚀质量存在差别，其主要原因就在于微电池腐蚀。因此，在考虑宏电池腐蚀时也要考虑并评估微电池腐蚀的影响。

2 宏电池腐蚀的影响因素

2.1 宏电池腐蚀的钢筋因素

2.1.1 钢筋类型对宏电池腐蚀的影响 同一混凝土中不同种类钢筋的宏电池腐蚀情况不尽相同。Saraswathy 等[25]发现与冷轧钢筋相比，热机械处理钢筋的耐宏电池腐蚀性能更好。不锈钢钢筋即使在宏电池腐蚀下，经过 10 次干湿循环(3%NaCl 溶液以 15 d 为周期)暴露 1 a 也未显示出任何锈蚀迹象，显示出更为优异的抗宏电池腐蚀性能。Tae 等[26]通过试验得出，钢筋耐碳化引起的宏电池腐蚀所需的最低铬含量为 7%；混凝土中氯离子浓度不超过 3 kg/m^3 时，11%铬含量的钢筋才可保证其耐宏电池腐蚀。尤其是在混凝土保护层开裂引起的宏电池腐蚀下，钢筋耐宏电池腐蚀性能随着 Cr 含量的增加而增加。

如果钢筋上环氧涂层破损严重，腐蚀将沿着相邻涂层下的钢筋扩展。Sagues 等[27–28]发现无论是镀锌涂层还是熔融粘结的环氧涂层，二者破损后均有发生破损处钢筋作阳极、周围涂层钢筋作阴极的大阴极小阳极宏电池腐蚀的可能。氯离子环境下环氧涂层受损的钢筋宏电池腐蚀电流密度可达到了 30.4 μA/cm^2。此外，Vedalakshmi 等[29]按照 ASTM-G 109 试验方案[30]，验证了水泥浆涂层比环氧基涂料对于氯离子引发的宏电池腐蚀具有更高的破损容限。相同的破损程度下，水泥浆涂层比环氧涂层表现出更好的性能，前者局部破坏产生的宏电池腐蚀电流在 275 d 时仅为 60 μA(0.73 μA/cm^2)，且目视检查时铁锈只出现在受损区域而未扩展。

2.1.2 阴阳极面积比对宏电池腐蚀的影响 阴阳极面积比越大($S_{C/A}$)，宏电池腐蚀系统电位更正[31–32]，宏电池腐蚀电流密度 i_M 越高[23, 33–35](如图 3 所示)。需注意，阳极面积应是阳极钢筋上阳极腐蚀位点的面积之和，且其值会随着阴极钢筋与阳极钢筋间比例的增大而增大，从而使宏电池体系中实际的阴极与阳极面积比值的增加幅度下降。

Warkus 等[9]通过数值模拟发现，当阴极钢筋增加 3~4 倍时，宏电池腐蚀电流仅增加约 30%，因此阴阳极面积比对宏电池腐蚀体系的影响较弱。此外，电阻率越高，$S_{C/A}$ 的增加对宏电池腐蚀电流密度的增加作用越小，但只要 $S_{C/A}$ 增加即对宏电池体系存在促进作用。

2.2 宏电池腐蚀的钢筋–混凝土界面因素

钢筋混凝土界面(SCI)是近年来混凝土内钢筋锈蚀的研究热点，其对混凝土内钢筋腐蚀速率有着重要影响[37–39]。普遍认为多根钢筋有利于发生宏电池腐蚀，但实际上单根钢筋也能发生宏电池腐蚀。混凝土的泌水易使钢筋下部混凝土出现气孔，因此与空气接触的钢筋下半部作为阴极，钢筋上方与外界环境接触作为阳极，进而导致宏电池腐蚀出现[40]。Nasser 等[41]通过试验得出，对于碳化引起宏电池腐蚀，具有界面缺陷的钝化钢筋的自由腐蚀电位明显低于没有界面缺陷的钝化钢筋，界面缺陷试样比无界面缺陷试样的宏电池腐蚀电流高出 3 倍。

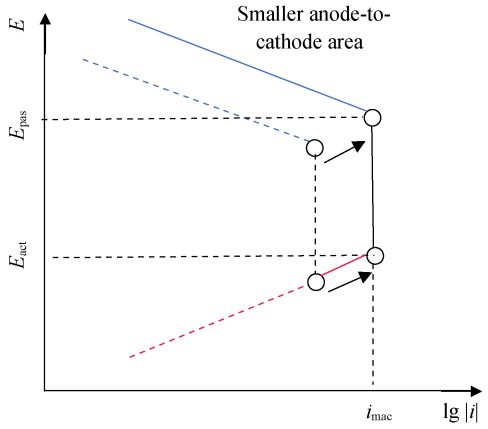


图 3 阴阳极钢筋表面积比对钝化钢筋的电位(E_{pas})和活化钢筋的腐蚀电位(E_{act})与宏电池腐蚀电流密度(i_{mac})间关系的影响[36]

Fig. 3 Effect of the anode-to-cathode surface ratio on the relationship between the potential of passivated bars (E_{pas}) and the corrosion potential of activated bars (E_{act}) and the corrosion current density of the macrocell(i_{mac})[36]

对于氯离子引发的单根钢筋宏电池腐蚀，氯离子首先在钢筋面向混凝土保护层的最薄弱点处达到临界值，钢筋下方因气孔的存在可持续获氧，形成宏电池体系[17,42]。随着腐蚀过程的进行，上层钢筋的表面形成大量腐蚀坑，腐蚀坑彼此连接，沿钢筋表面产生大量腐蚀产物。混凝土开裂前，因面向混凝土保护层一侧离外界环境中氧气和水更近，腐蚀位点仅分布在面向混凝土保护层的钢筋半周上。作为阳极腐蚀区域与同一根钢筋反向侧的阴极钝化区域间存在电位差，形成单根钢筋上的宏电池腐蚀的驱动力。该情况下腐蚀反应的阳极主要位于钢筋的上层半圆周表面。铁锈作为腐蚀产物会在面向保护层的钢筋一侧上生长，膨胀应力随着铁锈的增长而增加，最终导致混凝土保护层开裂[43–44]因此单根钢筋的宏电池腐蚀现象与微电池腐蚀较为相似。

2.3 宏电池腐蚀的混凝土内部环境因素

2.3.1 胶凝材料对宏电池腐蚀的影响　因宏电池腐蚀中阴极与阳极在空间中分隔，宏电池腐蚀中混凝土电阻率因离子流的存在而格外重要。凡是影响混凝土电阻率的因素均可对宏电池腐蚀产生影响，而钢筋混凝土结构中混凝土基体的电阻率通常与水灰比、胶凝材料种类等有关。Hansson 等[10]通过试验发现低水灰比的高性能混凝土(HPC)电阻率比高水灰比的普通混凝土(OPCC)高 5 倍以上。高电阻率代表了混凝土对离子传输具有更高的抵抗力，因而 HPC 的宏电池腐蚀和微电池腐蚀之差远大于 OPCC。OPCC 中钢筋微电池腐蚀速率是宏电池腐蚀的 2 倍，属于同一数量级；HPC 中钢筋的宏电池腐蚀电流密度(<10^{-5} A/m^2)相比于 OPCC(～10^{-2} A/m^2)小 3~4 个数量级，可忽略不计；HPC 中微电池腐蚀速率(～10^{-3} A/m^2)仅比 OPCC 中(<10^{-2} A/m^2)低大约 1 个数量级，不可忽略。上述这种差异归因于氯离子在混凝土中扩散速率的差异。尽管 HPC 中顶部钢筋与底部钢筋之间存在电连接，但顶部钢筋的腐蚀仅限于微电池腐蚀。因此，使用宏电池腐蚀测量结果时必须小心，未测出宏电池腐蚀电流并不意味着没有发生腐蚀。需要说明的是，该试验中 2 类 HPC 在接触氯离子 180 周后都没有发现明显的宏电池腐蚀迹象，因此使用高性能混凝土是防止发生宏电池腐蚀的有效手段。

电阻率通过显著影响混凝土离子电流强度，从而影响阳极钢筋的局部溶解速率[13]。电阻率高时宏电池腐蚀只能增加 10%的腐蚀速率[23]，低电阻率的海上大桥中 90%的金属损耗则由宏电池腐蚀引起[45]。Warkus 等[9]采用试验与数值模拟相结合的方法，研究了不同几何结构混凝土的宏电池腐蚀情况。当混凝土电阻率低于 1 000 Ω·m 时，宏电池腐蚀电流密度可认为高于 1 mA/cm^2，属于中等腐蚀速率或高腐蚀速率，在此电阻率区间的腐蚀是由混凝土电解质电流和阴极反应的电流消耗了大部分可用的驱动电压。Warkus 等[9]还发现腐蚀电流密度随电阻率的增加而明显减小。高宏电池腐蚀电流密度出现在 100 到 1 000 Ω·m 之间，这与宏电池腐蚀形成的高腐蚀速率通常发生在湿润混凝土结构这一现场观测结果相符。

Sohail 等[32]通过试验与数值模拟相结合手段，根据几何效应及 B-V 边界条件得出宏电池腐蚀电流与混凝土电阻率之间呈非线性近反比关系。Li 等[36]从机理上论证了混凝土电阻率与阴阳极电势差及宏电池腐蚀电流间的关系，如图 4 所示。

Warkus 等[9,46]发现高炉矿渣水泥制成的混凝土(BFSC)相比于与 OPCC，可通过增加混凝土电阻率与钢筋极化电阻值而降低宏电池腐蚀系统中阴阳极驱动电压，达到降低宏电池腐蚀速率的目的。Sirivivatnanon 等[47]通过试验得出添加各种辅助胶凝材料可有效降低混凝土的宏电池腐蚀危害。Vedalakshmi 等[48]发现分别掺加了矿渣与火山灰的混凝土中钢筋宏电池腐蚀腐蚀速率分别比 OPCC 中，钢筋的腐蚀速率低 9 倍与 10 倍。这主要是因为通过改善混凝土的微观结构而增加了混凝土电阻率，从而降低了宏电池腐蚀速率。

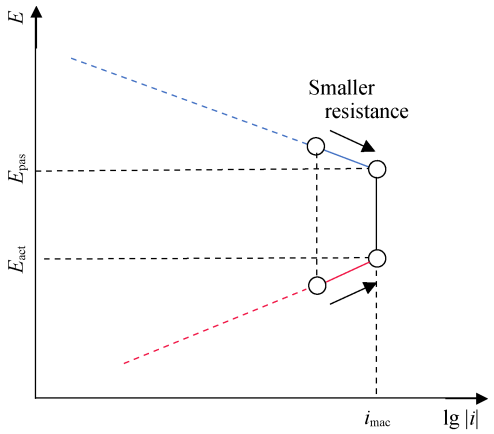


图 4　混凝土电阻率对钝化钢电位(E_{pas})和活化钢电位(E_{act})与宏电池腐蚀电流密度(i_{mac})间关系的影响[36]

Fig. 4　Effect of concrete resistivity on the relationship between passivation steel potential (E_{pas}) and activated steel potential (E_{act}) and macro cell corrosion current density (i_{mac})[36]

2.3.2 补丁修复引发的宏电池腐蚀　人为因素如“补丁修复”(Patch repair)也是引发宏电池腐蚀的重要原因之一。“补丁修补”是矫正因腐蚀引起混凝土局部损坏最常用的方法之一[49–50]。通常认为是由于包覆钢筋的修补材料与已有混凝土基体在物理、化学和电化学方面的不同将引起“电化学不相容现象”，进而引发钢筋的宏电池腐蚀[51]。上述的这种不利影响被称为“初始阳极”(incipient anode)或“环状阳极”(ring anode)，也有学者称之为“光环效应”(halo effect)[52–53]。修补处与混凝土基体中的钢筋何处作为阴极、何处作为阳极暂无定论。观点之一认为已修复区域混凝土质量高于周围区域，修补处混凝土密实度高、透气性小、含氧少所以其内的钢筋充当阳极，周围混凝土内钢筋充当阴极，从而发生氧浓差宏电池腐蚀。大部分观点认为，修复区域的钢筋

因新浇筑混凝土的高碱性而呈现出钝化状态，即成为宏电池腐蚀体系的阴极部分，而周围原混凝土区的钢筋依然处于活化状态则作为阳极，因此原混凝土区内的钢筋腐蚀加剧，而修复区内的钢筋处于钝化状态且受到阴极保护。

李果等[54]通过试验得出，采用水泥基材料局部修复会引起原混凝土区域内钢筋腐蚀加剧，掺加氯盐的试件可达 1.5～2 倍，碳化试件可达 2～2.5 倍。因此，只要修补材料与原有混凝土材料存在差异就会产生局部的宏电池效应。在氯离子污染的混凝土中进行修补时，由于修补混凝土其初始碱度高且氯离子含量极低，补丁处的钢筋腐蚀电位处于较小的负值，因此其内部钢筋将作为阴极，而原混凝土中的钢筋将作为阳极，产生补丁与原混凝土间的宏电池腐蚀，两者间的电位之差即是宏电池腐蚀的驱动力。Cusson 等[55]通过试验证明了宏电池腐蚀风险随电位差的增大而增大，随补丁处混凝土电阻的增大而减小。Hussain 等[49]通过制备不同氯离子浓度的试件，模拟氯离子污染后腐蚀钢筋混凝土的实际修补过程，观察宏电池腐蚀现象。发现即使是修复后的被认为是抗腐蚀的钢筋混凝土补丁，钢筋也会在受氯离子污染的周边区域以宏电池腐蚀的形式发生锈蚀。

为了预防修补引发的宏电池腐蚀，除了真正消除腐蚀诱因外还需选择适当的材料及适当的施工方法。此外，当更换腐蚀的钢筋时，应当避免补丁中新钢筋与原混凝土中钢筋产生电连接，可通过在新旧钢筋交接点安装绝缘垫的方法抑制宏电池腐蚀的产生。Mays 等[56]认为还可以通过在修补区插入牺牲阳极，如具有很高负电位的锌等，可以有效的防止“初始阳极”引发的腐蚀。

2.3.3 不同金属电耦合引发的宏电池腐蚀 两种不同金属间电耦合是引发金属腐蚀的原因之一[57–58]。港珠澳大桥采用双相不锈钢钢筋，是我国内地第一个大批量采用不锈钢钢筋的工程。不锈钢钢筋造价昂贵，工程中通常只将不锈钢用在腐蚀最为严重的区域，结构主体依然采用碳钢钢筋。港珠澳大桥将不锈钢钢筋用在浪溅区，且仅在结构最外层采用，因此存在由不同金属电耦合引发的宏电池腐蚀的可能[59–60]。景强等[59]通过零电阻法测得了不锈钢钢筋与碳钢钢筋在混凝土中接触所产生的宏电池腐蚀电流密度，发现当两者均钝化时宏电池腐蚀可忽略；而不锈钢钝化、碳钢处于活化状态时两者搭接产生的宏电池腐电流密度约为 10^{-1} μA/cm^2 数量级，仅占碳钢钢筋自腐蚀电流的 3%左右；宏电池腐电流密度随两者距离及碳钢钢筋与不锈钢钢筋面积比的增大分别呈线性和指数减少的趋势。Bertolini 等[61]研究了仅使用部分不锈钢钢筋用于钢筋混凝土结构时的宏电池腐蚀。结果表明，在碳化或氯离子污染的混凝土中，与不锈钢钢筋电耦合可以提高活化碳钢钢筋的腐蚀速率，但只有在特定情况下才会有明显的提高，效果甚至不如与钝化碳钢间的电耦合带来的宏电池腐蚀效应。实际上，混凝土中不锈钢钢筋与钝化的碳钢钢筋间腐蚀电位的差别并不大[62]。除了不锈钢钢筋外，作为牺牲阳极对结构进行阴极保护时所安装的活性钛网[63]也会引发特殊宏电池效应。当阴极保护系统未工作时，因于分散式阳极的存在，钢筋上的局部腐蚀略有增强，有效地缩短了混凝土中阳极与阴极之间的路径，从而进一步降低整个体系的电阻[64]。因此，碳钢与不锈钢之间的电耦合在宏电池腐蚀方面可以按照碳钢与碳钢情况加以考虑，而碳钢与其他金属的电耦合所引发的宏电池效应则在工程实践中应加以注意。

2.3.4 其他内部因素对宏电池腐蚀的影响 如混凝土试块的尺寸、温度、湿度及混凝土内钢筋附近的氧气浓度等内部因素更多的是对钢筋“腐蚀”而非“宏电池腐蚀”产生影响。

2.4 宏电池腐蚀的外部环境因素

2.4.1 常规海洋环境中的宏电池腐蚀 海洋是十分复杂的腐蚀性环境[65]。侯保荣等[66]提出，海洋环境可分为 5 个区带：海洋大气区、浪花飞溅区、潮差区、海水全浸区和海底泥土区。海洋环境下钢筋混凝土结构在浪花飞溅区的腐蚀最为严重，也是当前海洋防腐蚀中最薄弱的环节[67]。原因主要为浪溅区的钢筋混凝土结构在氯离子侵蚀的同时有充足的水和氧气供应。Böhni 等[68]认为氯离子引起的腐蚀中，局部形成具有较高腐蚀速率的宏电池体系是腐蚀的主要存在形式，因此氯离子侵蚀与宏电池腐蚀相伴相生。耿欧等[69]认为，由于缺乏氧气，钢筋在高湿度的环境中不会发生腐蚀。宏电池腐蚀主要在可接触氯离子的钢筋和可接触氧气的钝化钢筋之间形成。当形成宏电池腐蚀后，其腐蚀电流大小主要由混凝土电阻率及钝化钢筋表面氧气还原综合控制。在现有的海洋混凝土结构中存在 2 类极易发生宏电池腐蚀的典型情况：密闭式空心钢筋混凝土结构、开放式空心钢筋混凝土结构。

(1) 密闭式空心钢筋混凝土结构

密闭空心钢筋混凝土结构形式常见于离岸的空心桩、柱等浸没于海水下或海泥下结构。该类结构不同于普通的水下结构，其外侧与侵蚀性介质(海水或海泥)直接接触，氯离子会由该侧侵入，而内侧与空气接触，可为结构提供一定量的氧气。尽管外层钢筋部位的混凝土可能会处于缺氧的海水饱和状态，但内部空气可为内层钢筋提供充足的氧气。因此依靠内外层钢筋的电连接，外层钢筋作为阳极，内层钝化钢筋作为阴极，结构依然可以发生宏电池腐蚀。然而，由于结构内部空气有限且无外部供应，随着阴极区氧气的不断消耗，氧气供应成为宏电池腐蚀的控制因素；随着内部氧气的逐渐减少，内层钝化钢筋的电位将不断减小，直至接近外层阳极钢筋的腐蚀电位，整个结构的腐蚀也会随之减弱[64]；当结构内部的氧被彻底消耗完毕时，腐蚀速率仅由混凝土保护层及其周围水层的氧扩散决定，即阴极氧扩散控制[46]，阴极反应将取代阳极反应成为速率控制步骤[70−71]。

宏电池腐蚀中阴极反应耗 O_2 的过程十分缓慢。仅当钢筋周围的混凝土水饱和与阴极钢筋附近混凝土中大部分 O_2 已被阴极反应消耗时，O_2 扩散才是腐蚀速率的控制因素。因此，宏电池腐蚀速率受 O_2 扩散影响的情况仅出现在全浸没结构及暴露于长期或循环施水数周后的空心混凝土结构。封闭式空心钢筋混凝土并非在宏电池腐蚀初始时就是 O_2 扩散控制，因为只要存在中空结构则其总含氧量就会远超混凝土内部所含的溶氧量，所以在实际的海工混凝土结构中，内部中空且封闭的钢筋混凝土结构仍需考虑宏电池腐蚀带来的危害。

(2) 开放式空心钢筋混凝土结构

开放式空心混凝土结构多见于“地下隧道”或埋置于海水中的“沉管隧道”。自 1810 年 Wyatt 首次在伦敦进行了沉管隧道施工试验后，直到 19 世纪末期这种工法才被加以完善实施[72]。国内较为典型的是于 2018 年 10 月已通车的港珠澳大桥，其包含了大体积钢筋混凝土作为主要建筑材料的海底隧道段，即“沉管隧道”。其所处环境的独特之处在于外部高压海水作用，而内部空气(氧气)流通。不同于密闭式空心钢筋混凝土结构，该类结构内部有充足的氧气供应，这将使沉管隧道宏电池腐蚀更为严重[73]。在这类结构中，高压海水使水通过密实的外层混凝土大量且长时间渗透至外层钢筋(作阳极)表面，导致阳极处混凝土湿润且阳极钢筋缺氧，降低了混凝土电阻率。为保证沉管隧道混凝土结构的稳定性通常需要一定的厚度，因此内侧钢筋(作阴极)通过结构内部流通的空气持续不断获氧，阴极反应速率维持稳定。这类宏电池腐蚀又可称为“氧浓差腐蚀”。在可维修性差、维修成本高的 120 a 服役寿命的各类沉管隧道中较易出现。目前针对空心式钢筋混凝土等新型结构类型中钢筋锈蚀研究较少，且缺少相关技术标准。

2.4.2　普通大气环境中的宏电池腐蚀　　普通大气环境下与海洋大气环境下的钢筋混凝土不同之处在于无氯离子的侵蚀，通常是碳化作用引发的宏电池腐蚀。自然条件下的雾、雨以及人为喷洒水等润湿手段所供给的水几乎不能从密实的混凝土表面渗透至钢筋附近。因此，暴露于大气环境下的混凝土结构大多处于“持续干燥”或“短期湿润”情况。Raupach 等[74]认为“持续干燥”下宏电池腐蚀速率由混凝土电阻、阳极极化电阻、阴极极化电阻决定，而在“短期润湿”时钢筋表面并不缺氧因此不会降低阴极反应速率，但会降低混凝土电阻率进而增加宏电池腐蚀速率。因此，在普通大气环境中的宏电池腐蚀情况下混凝土电阻率变化对宏电池腐蚀电流的大小及其随时间的变化起决定性作用。

空气中二氧化碳气体从外部环境扩散渗透进混凝土中将引起碳化[5]，使混凝土 pH 值由 13 降低到 9 左右，进而引发钢筋锈蚀[75]。碳化是混凝土内钢筋锈蚀的又一诱因[70,76]。氯离子引发的腐蚀多是局部腐蚀[77−78]，而碳化引发的腐蚀多是均匀腐蚀[79]。Warkus 等[9]认为，长时间的锈层剥落通常是由混凝土保护层碳化所引起的微电池腐蚀，而氯离子多引发宏电池腐蚀而出现点蚀现象。Marques 等[5]认为碳化将导致均匀的微电池腐蚀。因此，普遍认为氯离子侵蚀与宏电池腐蚀相伴相生，而碳化多以均匀的微电池腐蚀为主。然而，碳化总是以缓慢且不均匀的方式持续演化推进。Sohail 等[32]认为，碳化能够引起混凝土中钢筋网的某些区域先脱钝从而引发宏电池腐蚀。尽管碳化混凝土层电阻率很高，但通过直接测量宏电池腐蚀电流发现，即使在低阴阳极面积比情况下宏电池腐蚀速率也很高，因此研究碳化混凝土中电偶联形成的宏电池腐蚀体系具有重要意义。同样地，Nasser[41]等认为在实际的钢筋混凝土结构中，由于可能存在混凝土湿度梯度、机械损伤或混凝土孔隙率、渗透性等的变化，碳化深度并不均匀。碳化混凝土中钢筋处于活化状态且电位较低，未碳化混凝土中钢筋处于钝化状态电位较高，这种

电位的“不均匀性”会导致结构中产生宏电池腐蚀。在通常情况下，碳化过程是缓慢的，且碳化会使混凝土微结构更密实，因此碳化引起的宏电池腐蚀相比于氯离子引起的宏电池腐蚀起始阶段更长，腐蚀电流更小。

2.4.3 暴露于土壤环境中的宏电池腐蚀 土壤是由固、液、气三相构成的复杂体系，当土壤中存在少量水分时，土壤即成为一个腐蚀性的多相电解质[80]。早在 1966 年 Menzies 等[81]即认识到土壤环境中的腐蚀包含宏电池腐蚀与微电池腐蚀 2 种。土壤宏电池腐蚀主要有氧浓差电池、盐浓差电池、pH 值差电池、温差电池以及与土壤中钢筋混凝土接触腐蚀等[82]。

挡水墙是一种典型的“钢筋混凝土-土壤”宏电池腐蚀体系，除冰盐带来的氯离子会引发宏电池腐蚀[83]。电子在钢筋中传递，而离子在潮湿土壤中迁移，底端土壤层较厚、氧气含量少，因此靠近土壤层的底端钢筋作为阳极；顶部土壤层疏松且湿润土壤带来水与氧气，因此这部分钢筋作阴极。在远离阳极处的土壤中发现了可溶性铁氧化物，因此证明了此种宏电池腐蚀结构中腐蚀产物已发生迁移[64]。地下隧道结构是一种特殊的腐蚀环境，内层(表层)的钢筋混凝土衬砌结构与大气环境接触，而外层(深处)钢筋混凝土处于土壤环境之中。由于隧道的排水系统或土壤中地下水渗入，氯离子会富集甚至形成氯盐结晶，引起内层钢筋活化并形成宏电池腐蚀。Li 等[36]等通过对 1980 年至 2006 年中国东部沿海地区建成的地铁隧道进行现场调查，分析了耦合的局部腐蚀以及宏电池腐蚀的影响。发现隧道各节段的纵向钢筋通过横向的箍筋形成电耦合，使用半电池电位法与电阻率法测量证明存在宏电池腐蚀的可能，因实际工程结构复杂，未能证明隧道结构的宏电池腐蚀体系中存在明显分隔的阴阳极。

2.5 宏电池腐蚀的几何结构因素

Warkus 等[9,46]设计了 6 类混凝土构件并进行宏电池腐蚀研究。试样从 2 根平行钢筋的简单几何排列到复杂的板试样或 3 层钢筋的梁，主要探究了“几何边界条件”对混凝土中钢筋的宏电池腐蚀的影响。

梁试件与板状试件的电阻率在超过 1 000 Ω·m 后，宏电池腐蚀电流均明显减小。但当梁和板试件驱动电压、极化特性和混凝土电阻率全部相同时，混凝土梁试件宏电池腐蚀电流密度比板试件低 3 倍。同种梁试件混凝土间也存在很大差异，相比于整个上层钝化，仅一个角落的钝化会导致比前者大得多的宏电池电流密度。因此，实际工程结构中评估钢筋宏电池腐蚀下的混凝土结构寿命，仅考虑如驱动电压、极化行为或混凝土电阻率等电化学边界条件是不够的，还必须考虑混凝土构件的几何形状以及阳极和阴极的布置。

3 存在的问题与建议

现阶段，国内外对混凝土内钢筋的宏电池腐蚀研究均取得了一定程度的进展，但仍需进一步完善。关于当下钢筋混凝土中宏电池腐蚀研究存在的问题主要包括以下 5 个方面：

目前，传统钢筋混凝土结构的锈蚀研究已经较为普遍，但在新型钢筋混凝土结构缺少相关技术标准。空心式钢筋混凝土等特殊结构类型的钢筋锈蚀研究较少，而这类结构的钢筋锈蚀以宏电池腐蚀为主要特征。可针对该类混凝土结构进行相关研究，填补新型结构宏电池腐蚀研究的空白。

大多数关于钢筋锈蚀的研究仅仅考虑微电池腐蚀，忽略宏电池腐蚀的作用，并且针对宏电池腐蚀的研究中也很少提及微电池腐蚀。实际上，只要发生腐蚀，微电池腐蚀就存在。因此，在研究混凝土中钢筋的锈蚀问题时，应当同时考虑微电池腐蚀和宏电池腐蚀。后期应开展对不同腐蚀条件下宏电池与微电池腐蚀间的联系与比较研究。

当下宏电池腐蚀相关研究中以多根钢筋的宏电池腐蚀为主，而针对单根钢筋的宏电池腐蚀研究较少。单根钢筋的宏电池腐蚀主要是由于钢筋混凝土界面缺陷而引起的，而考虑到界面缺陷带来的混凝土内单根钢筋的宏电池腐蚀问题的相关研究较少，应深入开展该方面的研究。

通过实验手段研究宏电池腐蚀时，在求算宏电池腐蚀电流密度时直接使用“阳极设计暴露面积”，而非“阳极活性位点面积之和”。前者的面积数值明显高于后者，进而造成对宏电池腐蚀电流密度的低估，有可能在与线性极化法得到的微电池腐蚀电流密度进行比较时得出错误结论，因此，在后期的宏电池腐蚀研究中应当注意阳极面积的准确性。

宏电池腐蚀电流的测量是钢筋混凝土结构现场调研的重要手段之一，也是得到宏电池腐蚀相关数据最直接、最基本的方法。然而，在实际工程中由于箍筋与钢筋网的存在使结构内钢筋的电连接错综复杂，难以对宏电池腐蚀电流进行直接测试。通常

是通过安装人造阳极来测量宏电池腐蚀电流，但在实际工况下并非总是能够将阳极与阴极完全分开，这将导致腐蚀速率测试结果偏小。因此，在实际工程中完善宏电池腐蚀电流的测定方法或开发新仪器也势在必行。

参考文献:

[1] FLATT R J, ROUSSEL N, CHEESEMAN C R. Concrete: An eco material that needs to be improved[J]. J Eur Ceram Soc, 2012, 32(11): 2787–2798.

[2] 徐善华, 牛荻涛, 王庆霖. 大气环境条件下混凝土中钢筋的锈蚀[J]. 建筑技术, 2003(4): 267–269.
XU Shanhua, NIU Ditao, WANG Qinglin. Architecture Technol (in Chinese), 2003(4): 267–269.

[3] 张誉. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 1–3.
ZHANG Yu. Introduction to Durability of Concrete Structures (in Chinese). Shanghai: Shanghai Scientific and Technologic Press, 2003: 1–3.

[4] SHI X, XIE N, FORTUNE K, et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview[J]. Constr Build Mater, 2012, 30: 125–138.

[5] MARQUES P F, COSTA A. Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(3): 258–265.

[6] Li Z, CHAU C K, Zhou X. Accelerated assessment and fuzzy evaluation of concrete durability[J]. J Mater Civ Eng, 2005, 17(3): 257–263.

[7] ALEXANDER M, BEUSHAUSEN H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique[J]. Cem Concr Res, 2019, 122: 17–29.

[8] DOUGLAS HOOTON R. Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures[J]. Cem Concr Res, 2019, 124: 105827.

[9] WARKUS J, RAUPACH M. Modelling of reinforcement corrosion-geometrical effects on macrocell corrosion[J]. Mater Corros, 2009, 61(6): 494–504.

[10] HANSSON C M, POURSAEE A, LAURENT A. Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(11): 2098–2102.

[11] CHALHOUB C, FRANCOIS R, GARCIA D, et al. Macrocell corrosion of steel in concrete: Characterization of anodic behavior in relation to the chloride content[J]. Mater Corros, 2020, 71(9): 1424–1441

[12] WARKUS J, RAUPACH M, GULIKERS J. Numerical modelling of corrosion-Theoretical backgrounds[J]. Mater Corros, 2006, 57(8): 614–617.

[13] LAURENS S, HÉNOCQ P, ROULEAU N, et al. Steady-state polarization response of chloride-induced macrocell corrosion systems in steel reinforced concrete-numerical and experimental investigations[J]. Cem Concr Res, 2016, 79: 272–290.

[14] MANSFELD, FLORIAN. Area relationships in galvanic corrosion[J]. Corrosion, 1971, 27(10): 436–442.

[15] BERTOLINI L, PEDEFERRI P, PASTORE T, et al. Macrocell effects on potential measurements in concrete cathodic protection systems[J]. Corrosion, 1996, 52(7): 552–557.

[16] ANDRADE C, GARCéS P, MARTíNEZ I. Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide[J]. Corros Sci, 2008, 50(10): 2959–2964.

[17] JI Y-S, ZHAO W, ZHOU M, et al. Corrosion current distribution of macrocell and microcell of steel bar in concrete exposed to chloride environments[J]. Constr Build Mater, 2013, 47: 104–110.

[18] POLDER R, ANDRADE C, ELSENER B, et al. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete[J]. Mater Struct, 2000, 33(10): 603–611.

[19] ZHENG H, DAI J-G, POON C S, et al. Influence of calcium ion in concrete pore solution on the passivation of galvanized steel bars [J]. Cem Concr Res, 2018, 108: 46–58.

[20] ANDRADE C, MARIBONA I R, FELIU S. The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements[J]. Corros Sci, 1992, 33(2): 237–249.

[21] CASTEL A, NASSER A. Microcell versus galvanic corrosion currents in carbonated concrete[J]. Mag Concr Res, 2014, 66(14): 697–707.

[22] RODRíGUEZ P, RAMíREZ E, FELIU S, et al. Significance of coplanar macrocells to corrosion in concrete-embedded steel[J]. Corrosion, 1999, 55(3): 319–325.

[23] ANDRADE C, MARIBONA I R, FELIU S. The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements[J]. Corros Sci, 1992, 33(2): 237–249.

[24] TREJO D, MONTEIRO P J. Corrosion performance of conventional (ASTM A615) and low-alloy (ASTM A706) reinforcing bars embedded in concrete and exposed to chloride environments[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(3): 562–571.

[25] SARASWATHY V, SONG H-W. Performance of galvanized and stainless steel rebars in concrete under macrocell corrosion conditions[J]. Mater Corros, 2005, 56(10): 685–691.

[26] TAE S-H, LEE H-S, NOGUCHI T, et al. Corrosion resistance of Cr-bearing rebar to macrocell corrosion caused by concrete cover crack[J]. ISIJ int, 2006, 46(7): 1086–1092.

[27] SAGUES A. Performance of galvanized rebars in marine substructure service[J]. Project-ZE-418 Part I, 1994. Sagues, A. Performance of galvanized rebars in marine substructure service, Project ZE-418, Part I, October 1994

[28] ZAYED A M, SAGUES A. Corrosion of epoxy coated reinforcing steel in concrete[J]. Corrosion, 1989, 89: 379.

[29] VEDALAKSHMI R, KUMAR K, RAJU V, et al. Effect of prior damage on the performance of cement based coatings on rebar: macrocell corrosion studies[J]. Cem Concr Compos, 2000, 22(6): 417–421.

[30] ASTM Standards. Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments: ASTM G109-07[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013

[31] SASSINE E, LAURENS S, FRANÇOIS R, et al. A critical discussion on rebar electrical continuity and usual interpretation thresholds in the field of half-cell potential measurements in steel reinforced concrete[J]. Mater Struct, 2018, 51(4): 93.

[32] SOHAIL M G, LAURENS S, DEBY F, et al. Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation[J]. Mater Struct, 2013, 48(1-2): 217–233.

[33] RAUPACH M. Chloride-induced macrocell corrosion of steel in

concrete—theoretical background and practical consequences[J]. Constr Build Mater, 1996, 10(5): 329–338.

[34] M.HANSSON C. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete[J]. Cem Concr Res, 1984, 14(4): 574–584.

[35] ELSENER B. Macrocell corrosion of steel in concrete – implications for corrosion monitoring[J]. Cem Concr Compos, 2002, 24(1): 65–72.

[36] LI C, CHEN Q, WANG R, et al. Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: Theoretical insights and practical data interpretations[J]. Cem Concr Compos, 2020, 103652.

[37] CASTEL A, VIDAL T, FRANCOIS R, et al. Influence of steel—concrete interface quality on reinforcement corrosion induced by chlorides[J]. Mag Concr Res, 2003, 55(2): 151–159.

[38] SOYLEV T A, FRANçOIS R. Quality of steel–concrete interface and corrosion of reinforcing steel[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(9): 1407–1415.

[39] ZHENG H, DAI J-G, HOU L, et al. Enhanced passivation of galvanized steel bars in nano-silica modified cement mortars [J]. Cem Concr Compos, 2020, 111: 103626.

[40] TAE S-H. Corrosion inhibition of steel in concrete with natural inorganic minerals in corrosive environments due to chloride attack[J]. Constr Build Mater, 2012, 35: 270–280.

[41] NASSER A, CLEMENT A, LAURENS S, et al. Influence of steel–concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete[J]. Corros Sci, 2010, 52(9): 2878–2890.

[42] YUAN Y, JI Y. Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(6): 2461–2466.

[43] CAO C, CHEUNG M M S, CHAN B Y B. Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate[J]. Corros Sci, 2013, 69: 97–109.

[44] CHERNIN L, VAL D V. Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(4): 1854–1869.

[45] RAUPACH M. Corrosion of Reinforcement in Concrete: Monitoring, Prevention and Rehabilitation Techniques[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014: 86–87.

[46] WARKUS J, RAUPACH M. Numerical modelling of macrocells occurring during corrosion of steel in concrete[J]. Mater Corros, 2008, 59(2): 122–130.

[47] SIRIVIVATNANON V, BUCEA L, MECK E, et al. Influence of fly ash, ground granulated blast furnace slag and silica fume on chloride induced corrosion of steel reinforcement[C]//Second International Symposium on Blended Cements : increasing its usage in concrete, Malaysia. November 10-11, 1994: 114-120

[48] VEDALAKSHMI R, RAJAGOPAL K, PALANISWAMY N. Longterm corrosion performance of rebar embedded in blended cement concrete under macro cell corrosion condition[J]. Constr Build Mater, 2008, 22(3): 186–199.

[49] HUSSAIN R, WASIM M, ISHIDA T. Induced macro-cell corrosion phenomenon in the simulated repaired reinforced concrete patch[J]. Aust J Civ Eng, 2010, 8(1): 53–60.

[50] CUSSON D, MAILVAGANAM N. Durability of repair materials[J]. Concr Int, 1996, 18(3): 34–38.

[51] GU P, BEAUDOIN J J, TUMIDAJSKI P J, et al. Electrochemical incompatibility of patches in reinforced concrete[J]. Concr Int, 1997, 19(8): 68–72.

[52] QIAN S, ZHANG J, QU D. Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures[J]. Cem Concr Compos, 2006, 28(8): 685–695.

[53] CHRISTODOULOU C, GOODIER C, AUSTIN S, et al. Diagnosing the cause of incipient anodes in repaired reinforced concrete structures[J]. Corros Sci, 2013, 69:123–129.

[54] 李果, 袁迎曙. 锈蚀钢筋混凝土局部修复电化学不相容性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 1: 47–50.
LI Guo, YUAN Yingshu. J China Univ Min Technol (in Chinese). 2003, 1: 47–50.

[55] CUSSON D, QIAN S, HOOGEVEEN T. Field performance of concrete repair systems on highway bridge[J]. ACI Mater J, 2006, 103(5): 366–373.

[56] MAYS G C, EMBERSON N K. Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete Part 1: Properties of repair systems[J]. Mag Concr Res, 1990, 42(152): 147–160.

[57] ZHAO W, ZHAO J, ZHANG S, et al. Application of electrochemical impedance spectroscopy to evaluate the corrosion behavior of 2304 duplex stainless steel reinforced rebar in concrete exposed in chloride-rich environment[J]. Int J Electrochem Sci, 2019, 14: 8039–8047.

[58] ABREU C M, CRISTóBAL M J, MONTEMOR M F, et al. Galvanic coupling between carbon steel and austenitic stainless steel in alkaline media[J]. Electrochim Acta, 2002, 47(13): 2271–2279.

[59] 景强, 方翔, 倪静姣, 等. 2304不锈钢钢筋在港珠澳大桥的应用——钢筋耐蚀性能研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(10): 51–56.
JING Qiang, FANG Xiang, NI Jingxu, et al. J Highw Transp Res Dev (in Chinese), 2017, 34(10): 51–56.

[60] 张兴志, 朴泷, 樊翔宇, 等. 不锈钢筋在跨海桥梁耐久性设计中的应用[J]. 公路交通科技, 2017, 34(S1): 28–32.
ZHANG Xingzhi, PU Long, FAN Xiangyu, et al. J Highw Transp Res Dev (in Chinese), 2017, 34(S1): 28–32.

[61] BERTOLINI L, GASTALDI M, PASTORE T, et al. Effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcement in concrete[C]//International Conference on “Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures”, Federal Highway Administration, Orlando. December. 1998: 7–11.

[62] GARCÍA-ALONSO M C, ESCUDERO M L, MIRANDA J M, et al. Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(10): 1463–1471.

[63] WILSON K, JAWED M, NGALA V. The selection and use of cathodic protection systems for the repair of reinforced concrete structures [J]. Constrn Build Mater, 2013, 39: 19-25.

[64] 李伟华, 郑海兵. 混凝土中钢筋的锈蚀—预防、诊断及修复[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 109–118.
LI Weihua, ZHENG Haibing. Corrosion of Steel Bars in Concrete—Prevention, Diagnosis and Repair (in Chinese). Beijing: China Science Publishing Media, 2020: 109–118.

[65] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 7–8.

[66] 侯保荣. 海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 3–5.

[67] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀防护技术[J]. 中国材料进展, 2014, 33(1): 26–31.
HOU Baorong. Mater China (in Chinese), 2014, 33(1): 26–31.

[68] BOHNI A. Corrosion in Reinforced Concrete Structures[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005: 30–31

[69] GENG O, YUAN Y, LI F. Study on the corrosion rate of steel bars in

concrete under high humidity conditions[J]. Int J Model Ident Control, 2009, 7(2): 155–159.

[70] ELSENER B, ANDRADE C, GULIKERS J, et al. Half-cell potential measurements–potential mapping on reinforced conrete structures. RILEM TC 154 EMC[J]. Mater Struct, 2003: 461–471.

[71] SCOTT A, ALEXANDER M G. The influence of binder type, cracking and cover on corrosion rates of steel in chloride-contaminated concrete[J]. Mag Concr Res, 2007, 59(7): 495–505.

[72] 傅琼阁. 沉管隧道的发展与展望[J]. 中国港湾建设, 2004(5): 53–58.
FU Qiongge. China Harbour Eng (in Chinese), 2004(5): 53–58.

[73] POLDER R, LARBI J. Investigation of concrete exposed to North Sea water submersion for 16 years[J]. Heron, 1995, 40(1).

[74] RAUPACH M. Investigations on the influence of oxygen on corrosion of steel in concrete—Part I[J]. Mater Struct, 1996(29): 174–184.

[75] BECKETT D. Influence of carbonation and chlorides on concrete durability[J]. Concrete, 1983, 17(2).

[76] ZHENG H, LI W, MA F, et al. The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete[J]. Constr Build Mater, 2012, 37: 36-40.

[77] ZHENG H, DAI J-G, LI W, et al. Influence of chloride ion on depassivation of passive film on galvanized steel bars in concrete pore solution [J]. Constr Build Mater, 2018, 166: 572-580.

[78] ZHANG R, CASTEL A, FRANçOIS R. The corrosion pattern of reinforcement and its influence on serviceability of reinforced concrete members in chloride environment[J]. Cem Concr Res, 2009, 39(11): 1077–1086.

[79] GONZALEZ J, FELIU S, RODRIGUEZ P, et al. Some questions on the corrosion of steel in concrete—Part I: when, how and how much steel corrodes[J]. Mater Struct, 1996, 29(1): 40–46.

[80] 孙成, 李洪锡, 张淑泉, 等. 土壤盐浓差宏电池对碳钢的腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000(2): 101–103.
SUN Cheng, LI Hongxi, ZHANG Shuquan, et al. Corros Sci Prot Technol (in Chinese), 2000(2): 101–103.

[81] Menzies, Ian A. Theory of corrosion and protection of metals[J]. Corros Sci, 1968, 8(4): 291–291.

[82] 孙成, 李洪锡, 张淑泉. 土壤宏电池腐蚀研究概述[J]. 油气田地面工程, 1999, 18(2): 44–45.
SUN Cheng, LI Hongxi, ZHANG Shuquan. Oil-Gasfield Surf Eng (in Chinese), 1999, 18(2): 44–45.

[83] LAASE H, STICHEL W. Rehabilitation of retaining walls in Berlin, special aspects of corrosion of the back side[J]. Die Bautechnik, 1983, 4: 124–129.