

盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀的研究进展*

林德源¹, 易博², 陈云翔¹, 张俊喜², 洪毅成¹

(1 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007; 2 上海电力学院上海高校
电厂腐蚀防护与应用电化学重点实验室, 上海 200090)

摘要 钢筋混凝土在盐渍土和盐湖环境下的腐蚀包括硫酸根离子和镁离子对混凝土的侵蚀以及氯离子对混凝土中钢筋的锈蚀。简要介绍了盐渍土环境中钢筋混凝土结构腐蚀失效原理,并综述了国内外近年来对盐渍土钢筋混凝土腐蚀机理研究的相关情况。

关键字 盐渍土 钢筋混凝土 腐蚀

中图分类号: TU528 文献标识码: A

Research Development of the Corrosion of Reinforced Concrete in Saline Soil Environment

LIN Deyuan¹, YI Bo², CHEN Yunxiang¹, ZHANG Junxi², HONG Yicheng¹

(1 Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co. Ltd., Fuzhou 350007; 2 Key Laboratory of Shanghai College and Universities for Electric Power Corrosion Control and Applied Electrochemistry, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090)

Abstract The deterioration of reinforced concrete in salt lake and saline soil environment include sulfate ions and magnesium ions attack to the concrete and chloride-induced corrosion of steel reinforcement in concrete. The basic principles of deterioration of reinforced concrete in saline environment is introduced, and the research development about the mechanism of corrosion of reinforced concrete in saline environment is reviewed.

Key words saline soil, reinforced concrete, corrosion

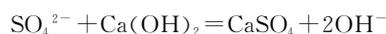
盐渍土是盐土和碱土以及各种盐化、碱化土壤的统称。碱土含有较多量的交换性钠,又称钠质土,盐土是指土壤中易溶盐的含量达到0.5%以上的土类^[1]。盐渍土广泛分布在我国东部沿海及西北盐湖地区,这类土壤中含有较高浓度的氯离子,以及一定量的硫酸根离子、镁离子等侵蚀性物种,因此对钢筋混凝土结构物常构成比较严重的腐蚀^[2-4],处于盐渍土地区的建筑物常常在远未到达设计寿命时就会出现表层混凝土粉化脱落及钢筋锈蚀等现象,给人们的生活造成巨大的损失。盐渍土环境下多种侵蚀性介质对钢筋混凝土的腐蚀问题一直是广泛关注的热点之一,人们围绕混凝土损伤失效以及钢筋锈蚀过程展开了一系列的研究。

1 盐渍土环境下钢筋混凝土结构物的腐蚀原理

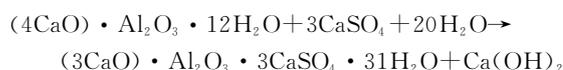
1.1 混凝土的腐蚀破坏机制

盐渍土中的盐分遇到土壤中的水分溶解后,对土壤中的混凝土结构物存在腐蚀作用。盐渍土中的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子对混凝土具有极强的侵蚀作用, Mg^{2+} 会与混凝土中胶凝性的 $Ca(OH)_2$ 发生离子交换反应,形成无胶凝性的 $Mg(OH)_2$,致使混凝土粉化,强度降低。 SO_4^{2-} 在地下水的作用

下沿着毛细孔渗透到混凝土内部时会发生反应:



若生成的硫酸钙与固态水合铝酸钙相作用,则有:



生成的硫酸铝钙较原有体积增大1.5倍以上,在混凝土内产生内应力,当膨胀内应力超过混凝土的抗拉强度时,会造成已硬化的混凝土逐渐膨胀、开裂^[5]。侵蚀性物种的侵蚀形式和作用周期的不同会影响到混凝土损伤失效过程,实际工况下,混凝土常受到物理侵蚀和化学侵蚀多种因素的影响,因此混凝土的腐蚀呈现出多因素共同作用的特点,使得混凝土腐蚀劣化的机理较为复杂。

混凝土的硫酸盐侵蚀试验过程中,根据侵蚀溶液的特点,往往需要考虑 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 的双重侵蚀作用,以及 Cl^- 对硫酸盐侵蚀的影响等^[6]。物理侵蚀方式如机械力剥落、磨损、反复加热冷却、冻融循环等会破坏混凝土层或使混凝土产生裂缝,加速混凝土的腐蚀破坏^[7]。

1.2 钢筋在混凝土中的腐蚀原理

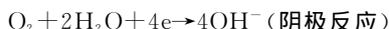
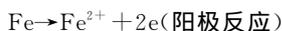
混凝土在成型之后,混凝土中的水化过程一直在持续进

* 国家电网重点科研课题(gwkj2012-010-II-2);国家自然科学基金(50771062)

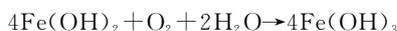
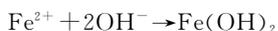
林德源:男,高级工程师,研究方向为金属材料学 张俊喜:通讯作者,男,博士,教授,主要从事材料腐蚀与防护研究 E-mail: zhangjunxi@shiep.edu.cn

行,水化形成的 OH^- 使得钢筋周围呈高碱性的环境,表层会形成钝化膜,对腐蚀的发生起到抑制作用。混凝土长期处于侵蚀性介质中时,外界的 O_2 、 Cl^- 会逐步向混凝土内部扩散传递,起初一部分游离状态的 Cl^- 会被混凝土固化,抑制腐蚀的发展。随着混凝土碳化和外界离子侵蚀过程的进一步发展,钢筋周围失去高碱性环境,表面钝化膜在侵蚀离子作用下破裂而发生点蚀。

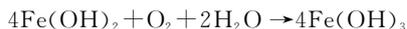
混凝土中钢筋的腐蚀是钢筋混凝土结构物失效的重要原因之一。混凝土相是多尺度的不均一体系,钢筋在混凝土中,表面会形成各种空间尺度的宏观腐蚀电池和微观腐蚀电池,其体系高阻、闭塞且复杂^[8]。混凝土中钢筋的腐蚀是一种典型“闭塞条件”下的电化学过程。电极反应由阳极反应和阴极反应共轭组成,在阳极区主要发生钢筋的溶解,在阴极区溶解氧还原成氢氧根离子。混凝土孔隙液(电解质溶液)作为离子迁移通道,与钢筋(电子导体)一起构成回路,形成完整的腐蚀电池^[9]。这些电池持续作用的结果最终会导致钢筋表面阳极区的腐蚀,腐蚀反应为:



阳极表面会继续发生反应:



氯离子一般通过扩散方式到达钢筋与混凝土的界面,随着硫酸根及氯离子的积累,界面处的混凝土孔隙液的 pH 值会逐步下降,达到一定程度后 ($[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] > 0.6$ ^[10]),钢筋表面会脱钝形成点蚀^[11]。混凝土与钢筋接触不充分的空洞处通常是腐蚀发生的主要场所^[12],空洞处钢筋表面存在许多高反应活性的位点,易形成“大阴极小阳极”的结构,从而加剧腐蚀。盐渍土中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等均对钢筋具有一定的腐蚀作用,其中的 Cl^- 是造成钢筋腐蚀的主要因素,它会与阳极区的 Fe^{2+} 反应,生成 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (绿锈),绿锈从钢筋阳极向含氧量较高的混凝土孔隙迁徙,分解为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (褐锈)。褐锈沉积于阳极周围,同时放出 H^+ 和 Cl^- ,它们又回到阳极区,使阳极区附近的孔隙液局部酸化, Cl^- 再带出更多的 Fe^{2+} 。氯离子充当了腐蚀过程的中间产物。反应的方程式为:



钢筋腐蚀后生成的氢氧化铁,其体积膨胀 3~4 倍,由于结构混凝土保护层的膨胀开裂,外部的氧气会快速进入到钢筋表面,从而导致钢筋锈蚀驱动电势大幅度提高。腐蚀进一步发生,钢筋与混凝土界面粘结性能下降,钢筋混凝土结构会迅速劣化,抗压强度、抗拉伸强度等力学指标都会出现显著的下降^[13]。

2 盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀的研究进展

2.1 混凝土腐蚀失效研究

盐渍土中侵蚀性离子种类多、浓度大,混凝土腐蚀失效

研究区别于单一的混凝土硫酸盐侵蚀实验,需考虑混凝土在双重或多重离子作用下的损伤失效过程。根据盐渍土的特征,非 Cl^- 成分(如硫酸根)对 Cl^- 在混凝土中扩散的影响机制以及 Cl^- 对混凝土硫酸盐腐蚀失效程度的影响,是盐渍土环境中混凝土腐蚀失效研究的主要着手点。

(1) 基于离子扩散方面的研究

侵蚀性的 Cl^- 在混凝土中的扩散行为一直是混凝土耐久性的研究热点之一, Cl^- 在混凝土中的扩散速率与钢筋混凝土腐蚀失效时间存在密切的关系。服役环境中的氯离子进入混凝土内部后,一部分与水泥水化产物发生化学反应,以化学结合状态存在;一部分由于物理作用,以物理结合状态存在于混凝土中;一部分为游离状态,滞留在混凝土内部孔隙溶液中,或继续向离子浓度低的方向扩散。进入混凝土内的游离氯离子,若温湿度发生变化,还会发生物理结晶。氯离子的这种物理和化学特性会引起混凝土内部结构以及性能的不同程度变化,游离氯离子还会促进混凝土内部的钢筋锈蚀等^[14]。

国内外学者基于 Cl^- 在混凝土中扩散规律,试图从不同角度阐述当侵蚀溶液含有硫酸根时 Cl^- 在混凝土中扩散特征。余红发等^[15]采用化学分析的方法探索了盐湖环境的各种离子在混凝土和钢筋混凝土结构中的扩散规律,发现 C20、C40 两种不同强度等级的混凝土内部的 SO_4^{2-} 质量分数均低于 Cl^- 质量分数,且两者在垂直于表面的径向呈现不均匀分布的特点。金祖权等^[16]研究了不同粉煤灰、矿粉、硅灰掺量的混凝土在单一氯盐、复合溶液以及青海盐湖卤水溶液中的氯离子结合规律。结果表明:混凝土在氯盐溶液中结合氯离子的产物为 Friedel's 盐(水化氯铝酸钙,分子式: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$),其在 NaCl 腐蚀溶液中的氯离子结合能力最强,复合溶液和青海盐湖卤水溶液中由于硫酸根离子的存在降低了混凝土的氯离子结合能力,且随腐蚀溶液中硫酸盐浓度的增加而降低。P. J. Tumidajski^[17]使用 W/B=0.42、含气量为 6% 的矿渣混凝土和普通混凝土浸泡到 0.5% NaCl、0.5% NaCl+2.2% Na_2SO_4 溶液中 60 个月,测定氯离子侵入深度。结果表明:相比于单一氯盐溶液腐蚀,复合溶液中硫酸盐的存在降低了普通混凝土的氯离子渗透深度,但增加了矿渣混凝土的渗透深度。Al-Amoudi^[18]比较了单独的 Cl^- 扩散以及 Cl^- 与 SO_4^{2-} 共同作用下两者的差别,发现 Cl^- 与 SO_4^{2-} 共同作用时, Cl^- 总的扩散量较 Cl^- 单独作用时略有减小,在保持 Cl^- 浓度不变的前提下增大 SO_4^{2-} 的浓度, SO_4^{2-} 的渗透量会逐渐增大。

一般认为, Cl^- 在混凝土中的扩散速率数倍于 SO_4^{2-} 在混凝土中的扩散速度^[19,20]。一些报道^[21,22]指出钢筋混凝土在氯化钠溶液中开始发生腐蚀的时间与浸泡在氯化钠、硫酸盐混合溶液中的基本一致,说明 SO_4^{2-} 对 Cl^- 在混凝土中的扩散速率影响较小。一些学者从 Cl^- 在混凝土中的扩散系数角度提出了不同的看法,认为 SO_4^{2-} 会影响 Cl^- 在混凝土中的扩散系数。张巨松等^[23]研究了冻融循环下不同掺量的 Na^+ 和 SO_4^{2-} 对混凝土中 Cl^- 扩散系数的影响,发现 Na^+ 掺量的提高会促进 Cl^- 的扩散,而 SO_4^{2-} 掺量的提高则会抑制

Cl⁻的扩散。刘荣桂等^[24]分析了混凝土中氯离子、硫酸根离子耦合扩散机理,发现受硫酸盐影响的混凝土中氯离子的扩散系数,随着时间的延长先减小后增大,随深度的增加而增大;当侵蚀时间足够长时,氯离子扩散系数随深度增加先增大后减小。针对硫酸盐对混凝土氯离子扩散的影响,Feldman^[25]将混凝土浸泡在硫酸盐和氯盐复合溶液中12个月,发现氯离子扩散系数随时间延长而降低,且小于单一氯盐下的扩散系数。

针对侵蚀性离子在钢筋混凝土中扩散的研究,旨在认识这些离子在混凝土中的传递规律,从目前的报道来看,影响侵蚀性离子在混凝土中扩散的因素很多,包括混凝土的组成结构、侵蚀性离子浓度和离子间的作用关系以及时间等因素。侵蚀性离子的扩散过程同时也是一个动态的变化过程,随着上述各因素的变化不断发生改变。总体来看,目前还没有形成一个较系统的认识,还有待进一步深入研究。

(2) 基于混凝土结构物失效方面的研究

硫酸盐对混凝土造成的侵蚀主要是由钙矾石、石膏引起的硫酸盐结晶侵蚀^[26]。硫酸盐对混凝土的腐蚀研究常见的试验方法包括连续浸泡、干湿循环以及冻融循环。连续浸泡法可以比较准确地得到混凝土的失效机制,但是耗时较长。实验室一般采用干湿循环的方法模拟混凝土硫酸盐的损伤失效过程。对于低强度的混凝土来说,干湿循环作用下,湿状态下混凝土受到钙矾石、石膏等膨胀性侵蚀产物的作用,干状态下又叠加由蒸发作用引起的盐结晶压力的损伤,干湿循环制度是缩短硫酸盐侵蚀周期的有效方法^[27]。

硫酸盐对混凝土的损伤失效机理已有较多的研究报道,硫酸盐溶液中混凝土损伤失效的过程大致包括初始劣化段、性能改善段和性能劣化段。如果溶液中含有MgSO₄,则还存在Mg²⁺对混凝土的剥蚀作用^[28]。

东南大学的金祖权对氯盐及硫酸盐共同作用侵蚀混凝土做了一系列研究,用3.5%NaCl、5%Na₂SO₄、3.5%NaCl+5%Na₂SO₄的3种溶液,分别采用浸泡机制及干湿循环机制研究普通混凝土及掺有粉煤灰的混凝土的损伤失效过程。结果表明,初期SO₄²⁻会阻碍Cl⁻的扩散,后期则会促进之,NaCl复配到Na₂SO₄溶液会相应地降低因SO₄²⁻侵蚀而造成的混凝土结构的破坏。复合溶液中氯盐的存在延长了各个腐蚀阶段的时间,延缓了混凝土的硫酸盐损伤程度^[29-31]。在相同的侵蚀条件下,关于C30、C50两种强度等级,3种大掺量掺合料混凝土在腐蚀溶液中的自由氯离子扩散规律,以及基于相对动弹性模量变化的损伤的研究结果表明:复合腐蚀下,C30的自由氯离子含量是C50的2倍左右;氯离子扩散系数为C50的1.7~1.95倍;混凝土相对动弹性模量先上升后下降。矿物掺合料提高了混凝土抗氯离子渗透和抗硫酸盐损伤能力,硫酸盐降低了混凝土抗氯离子腐蚀能力,氯盐减缓了硫酸盐对混凝土的损伤速度^[32]。Al-Amoudi和Kind^[33]通过研究指出当SO₄²⁻与高浓度的Cl⁻复合时,能够提高混凝土抗硫酸盐侵蚀性能。Kind将添加氯盐引起混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的提高归结为Cl⁻存在条件下硫酸盐侵蚀产物钙矾石量减少,并且生成的钙矾石也以不稳定非膨胀

性的状态存在。

Sotiriadis^[34]研究发现Cl⁻会阻碍SO₄²⁻对混凝土结构的破坏并对机理进行了分析,指出由于Cl⁻扩散速率较SO₄²⁻快,会优先在混凝土中形成水化氯铝酸钙(3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O),减缓SO₄²⁻的侵蚀。另一方面Cl⁻在扩散过程中会与混凝土中的Ca(OH)₂发生反应生成羟基氯化钙,抑制碳酸硅钙的形成,同时Cl⁻对SO₄²⁻的侵蚀产物钙矾石有比较强的溶解作用(溶解度为水中的3倍),在这些作用下Cl⁻减缓了SO₄²⁻对混凝土的侵蚀作用。梁永宁也对这一现象进行了研究,并指出氯离子会与混凝土中水泥水化产物发生化学反应,生成水化氯铝酸钙(3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O),减少了硫酸盐腐蚀产物钙矾石的量,是推迟混凝土出现硫酸盐损伤进程的原因^[35]。

盐渍土环境中,氯离子对混凝土硫酸盐腐蚀程度影响的想法不一^[36]。目前从混凝土在硫酸盐-氯盐溶液中的损伤过程的报道来看,混凝土的腐蚀与侵蚀性离子的类型、浓度以及混凝土的性能有关,但由于腐蚀时间过短不能形成混凝土损伤全过程是研究结果存在争议的原因,对于氯盐、硫酸盐在混凝土损伤过程中的交互作用研究尚没有整体明确的认识。

2.2 钢筋混凝土腐蚀机理研究的电化学方法

电化学方法是研究钢筋混凝土腐蚀过程和机理的重要手段之一。半电池电位^[37]、测开路电位^[11,37,38]、线性极化^[18,37,38]、极化曲线^[37-39]、电化学阻抗^[40-42]、恒电流脉冲^[37]、电化学噪声^[42]等都是常用的混凝土中钢筋腐蚀的研究方法。电化学测量是反映钢筋腐蚀本质过程的有力手段,与其他物理方法相比,它具有测试速度快、灵敏度高、可连续跟踪和原位无损等优点^[43]。

极化曲线测试方法可以及时获取钢筋混凝土腐蚀过程中的腐蚀电位、腐蚀电流等信息,一直是研究混凝土中钢筋腐蚀最重要的手段之一。Abosrra^[44]运用线性极化法研究了3%NaCl溶液浸泡下不同强度等级混凝土中钢筋腐蚀的全过程,并指出混凝土的强度会明显地影响钢筋腐蚀速率。Al-Amoudi^[16]采用普通硅酸盐水泥制作了钢筋混凝土棒,将其浸泡于质量分数为15.7%Cl⁻+0.55%SO₄²⁻(硫酸钠和硫酸镁)中500天,并运用线性极化法追踪钢筋腐蚀电位的变化,发现较之15.7%Cl⁻的溶液浸泡,钢筋的腐蚀速率明显增大,并且当SO₄²⁻的浓度增大到2.1%时,腐蚀速率增大1倍,并进一步指出对于相同氯离子和硫酸根离子浓度的溶液,采用NaCl+MgSO₄复配溶液较采用NaCl+Na₂SO₄复配溶液,腐蚀速率更大。Dehwah^[22]研究了C₃A(铝酸三钙)含量不同的3种水泥阳离子类型(Na⁺、Mg²⁺)与硫酸根共同作用时对钢筋混凝土氯致腐蚀的影响,发现阳离子的类型对钢筋的脱钝时间没有影响,SO₄²⁻浓度增大会促进腐蚀的发生,并且采用NaCl+MgSO₄复合溶液,钢筋混凝土腐蚀得更严重。Dehwah分析了腐蚀电流增大的原因:(1)复合溶液侵蚀条件下,混凝土孔隙液中自有氯离子浓度增大;(2)复合溶液侵蚀条件下,混凝土孔隙液中离子传导增强。

电化学阻抗(EIS)在钢筋混凝土腐蚀研究中正发挥着越

来越重要的作用,是表征多相、非均匀材料中电化学反应的常用有效方法。它所采用的激励信号幅度小,通常不超过 20 mV,对研究体系只产生轻微的扰动,适于对钢筋混凝土体系进行长期的追踪^[43]。混凝土中钢筋的腐蚀一般分为钝化、初锈与锈蚀发展期 3 个阶段,运用交流阻抗技术等等效电路来拟合钢筋的锈蚀行为能够较为准确地反映钢筋在混凝土中发生锈蚀的全过程^[45]。运用电化学阻抗可以获取钢筋电极双电层的电化学信息,推测可能的腐蚀机理。在钢筋混凝土的腐蚀研究中,电化学阻抗等电化学方法结合拉曼测试、扫描电镜(SEM)等表征手段能够对腐蚀机理进行比较深入的研究^[43]。

目前针对钢筋混凝土在氯盐与硫酸盐的混合溶液中的电化学腐蚀研究报道较少,Al-Amoudi 和 Dehwah 的研究^[18,22]均指出钢筋混凝土长期浸泡在氯盐及硫酸盐的复合溶液中时,硫酸根会促进腐蚀的进行。但国内有学者指出^[46],混凝土模拟孔隙液中有氯离子存在时,硫酸根具有缓蚀作用,提高了钢筋表面钝化膜的抗蚀性能,并运用 SO_4^{2-} 与 Cl^- 竞争吸附的观点作出了解释,但没有进一步表征以验证自己的解释,因此模拟孔隙液中硫酸根对钢筋的氯致腐蚀有待进一步的研究。

3 结语

目前模拟盐渍土环境下钢筋混凝土的腐蚀研究虽取得很大的进展,但是大部分研究成果还不够系统,很多试验结论的得出缺乏相应的表征手段予以佐证。下一步工作应该综合运用电化学手段及现代表征手段对盐渍土环境下钢筋混凝土的腐蚀进行进一步的深入研究。

参考文献

- 1 JTT 013-86 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1986
- 2 刘连新,等. 察尔汗盐湖及超盐渍土地区混凝土腐蚀及预防初探[J]. 建筑材料学报,2001,4(4):395
- 3 冷发光,马孝轩,丁威,等. 滨海盐渍土环境中暴露 17 年的钢筋混凝土桩耐久性分析[J]. 建筑结构,2011,41(11):148
- 4 赵天虎. 盐渍土对钢筋混凝土电杆的侵蚀[J]. 油气田地面工程,1997,16(2):38
- 5 刘晓敏,宋光铃,林海潮,等. 混凝土中钢筋腐蚀破坏的研究概况[J]. 材料保护,1996,29(6):16
- 6 吴庆,汪俊华,等. 混凝土硫酸盐侵蚀双因素影响及干湿循环与连续浸泡差异分析[J]. 四川建筑科学研究,2010,36(6):92
- 7 黄可信,吴兴祖,等编译. 钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与防护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1983
- 8 Qian S Y, Zhang J Y, Qu D Y. Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures[J]. Cem Concr Compos,2006,28(18):685
- 9 Li L Q, Dong S G, Wang W, et al. Study on interaction between macrocell and microcell in the early corrosion process

- of reinforcing steel in concrete[J]. Sci China Techn Sci, 2010,53(15):1285
- 10 Angst U, Elsener B. Chloride induced reinforcement corrosion: Rate imiting step of early pitting orrosion[J]. Electrochim Acta,2011,56(17):5877
- 11 Abd El Haleem S M, Abd El Wanees S, Abd El Aal E E, et al. Environmental factors affecting the corrosion behavior of reinforcing steel II. Role of some anions in the initiation and inhibition of pitting corrosion of steel in $Ca(OH)_2$ solutions [J]. Corros Sci,2010,52(2):292
- 12 Ryou J S, Ann K Y. Variation in the chloride threshold level for steel corrosion in concrete arising from different chloride sources[J]. Mag Concr Res,2008,60(3):177
- 13 Melchers R E, Li C Q. Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments[J]. Cem Concr Res, 2009, 39(11): 1068
- 14 Hans Bohni. Corrosion in reinforced concrete structures [M]. Boca Raton: CRC Press,2005:97
- 15 余发红,孙伟,等. 盐湖地区侵蚀性离子在混凝土中的扩散及其相互作用[J]. 东南大学学报:自然科学版,2003,33(3):156
- 16 金祖权,孙伟,赵铁军,等. 在不同溶液中混凝土对氯离子的固化程度[J]. 硅酸盐学报,2009,37(7):1068
- 17 Tumidajski P J, Chan G W. Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity[J]. Cem Concr Res,1996,26(4):551
- 18 Al-Amoudi O S B, Mohammed M. The effect of chloride and sulfate ions on reinforcement corrosion[J]. Cem Concr Res,1993,23(1):139
- 19 Obserholster R E. Pore structure, permeability and diffusivity of hardened cement paste and concrete in relation to durability: Status and prospects[C]//Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement. Rio de Janeiro, Brazil,1986
- 20 Stratful R F. Effect on reinforced concrete in sodium chloride and sodium sulfate environments[J]. Mater Protect, 1964,3(12):74
- 21 Al-Amoudi O S B, Maslehuddin M, Abdul-Al Y A B. Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments[J]. Constr Build Mater,1995,9(1):25
- 22 Dehwah H A F, Maslehuddin M, Austin S A. Long term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes[J]. Cem Concr Compos,2002,24(1):17
- 23 张巨松,韩自博,邓嫔,等. Na^+ 和 SO_4^{2-} 对混凝土 Cl^- 扩散系数的影响[J]. 混凝土,2010,244(2):10
- 24 刘荣桂,李欢,陈好,等. 海工混凝土受硫酸盐影响的氯离子扩散规律研究[J]. 混凝土,2012,268(2):18
- 25 Feldman R F, Beaudio J J, Philipose K E. Effect of cement blends on chloride and sulfate ion diffusion in concrete II

- [J]. Cemento, 1991, 8(8): 3
- 26 亢景富. 混凝土硫酸盐侵蚀研究中的几个基本问题[J]. 混凝土, 1995(3): 9
- 27 高润东, 赵顺波, 李庆斌, 等. 干湿循环作用下混凝土硫酸盐腐蚀劣化机理试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 48
- 28 金祖权, 赵铁军, 孙伟. 硫酸盐对混凝土腐蚀研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(3): 90
- 29 Jin Zuquan, Sun Wei, et al. Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash [J]. Cem Concr Res, 2007, 37(8): 1223
- 30 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 氯盐对混凝土硫酸盐损伤的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(3): 43
- 31 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 630
- 32 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 氯盐、硫酸盐作用下高性能混凝土损伤研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(1): 5
- 33 Kind V V. Effect of chloride in mix ingredients on sulphate resistance of concrete[J]. Mag Concr Res, 1990, 42(152): 113
- 34 Sotiriadis K, Nikolopoulou E, Tsvivilis S. Sulfate resistance of limestone cement concrete exposed combined chloride and sulfate environment at low temperature[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(8): 903
- 35 梁永宁, 黄君一, 林旭健, 等. 氯盐对受硫酸盐腐蚀混凝土性能的影响[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 947
- 36 Al-Amoudi O S B, Maslehuddin M, Abdul-Al Y A B. Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments [J]. Constr Build Mater, 1995, 9(1): 25
- 37 Subramaniam K V, Bi M. Investigation of steel corrosion in cracked concrete: Evaluation of macrocell and microcell rates using Tafel polarization response [J]. Corros Sci, 2010, 52(18): 2725
- 38 Yu Hui, Chiang Kuang-Tsan K, Yang Lietai. Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions [J]. Constr Build Mater, 2012, 26(1): 723
- 39 Poursaeed A. Determining the appropriate scan rate to perform cyclic polarization test on steel bars in concrete [J]. Electrochim Acta, 2010, 55(3): 1200
- 40 Chen Wen, et al. Study on the corrosion behavior of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions using in situ Raman spectroscopy assisted by electrochemical techniques [J]. Electrochim Acta, 2010, 55(20): 5677
- 41 胡融刚, 杜荣归, 林昌健. 氯离子侵蚀下钢筋在混凝土中腐蚀行为的 EIS 研究[J]. 电化学, 2003, 9(2): 189
- 42 贾丙丽, 曹发和, 陈安娜, 等. 干湿循环下混凝土中钢筋腐蚀的电化学检测[J]. 电化学, 2010, 16(4): 355
- 43 贾丙丽, 曹发和, 等. 钢筋混凝土腐蚀的电化学检测研究现状[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 28(5): 791
- 44 Abosrra L, Ashour A F, Youseffi M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths [J]. Constr Build Mater, 2011, 25(10): 3915
- 45 施锦杰, 孙伟. 等效电路拟合钢筋锈蚀行为的电化学阻抗谱研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 387
- 46 刘晓敏, 史志明, 等. 硫酸盐和温度对钢筋腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(1): 55

(责任编辑 王朝蓉)

《材料导报》特邀稿征稿

《材料导报》是以综述性、动态性为特色的综合性材料科技期刊,自 1987 年 9 月创刊以来,经过 20 多年的发展,已成为国内材料界较有影响的期刊,深受广大读者喜爱。《材料导报》始终坚持综述性、导向性的办刊宗旨,并紧跟国内外材料发展趋势,及时调整报道方向,力争更快、更准确、更深入地反映材料科技发展动态和国家宏观政策;跟踪原创性国际科研新动向;评述材料研究进展及产业化进程;探讨传统材料产业改造中的问题;展示国家相关材料计划实施及研究开发新成果。以促进高新技术新材料的发展及产业化,为我国材料科技的进步起引导作用。

《材料导报》为半月刊,分为综述篇(上半月)和研究篇(下半月)。

《材料导报》综述篇在保留《材料导报》原有综述特色的同时,更注重在材料科研、材料产业中的指导作用。为此,特设“特邀稿”栏目。

为了及时报道国内外材料科学技术的热点和动向,让广大读者及时了解国内外材料研究的前沿和方向,熟悉从事材料研究的知名学者和专家,充分地体现《材料导报》“导”向性的特色,特邀请知名学者和专家就所从事材料研究领域的最新研究热点和动向撰写综述论文。

为了引领材料科研方向,促进材料产业发展,反映材料研发动态,推动材料产研进步,敬请知名学者和专家惠赐佳作。

稿件一经采用,将优先安排发表。

稿件要求:

(1)投稿时请将稿件的电子版发送至 matreved@163.com,并注明是“特邀稿投稿”。

(2)请注明第一作者简介,包括姓名、性别、籍贯、出生年月、职称、毕业学校或学位(院士、教授、博导情况)、研究方向、研究成果(科研获奖、主持课题、专著、发表论文)。

(3)请注明电话、E-mail、通讯地址,以便联系。

《材料导报》编辑部