2011 年第 69 卷 化 学 学 报 Vol. 69, 2011
第 20 期, 2347～2352 ACTA CHIMICA SINICA No. 20, 2347～2352

• 研究论文 •

钢筋在再碱化过程中的电化学行为研究

蒋 俊[a] 张俊喜*,[a] 鲁进亮[a] 钱胜杰[a]
邬永成[b] 王 昆[c] 屈文俊[c]
([a]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)
([b]大唐长春第二热电有限责任公司化学分场 长春 130031)
([c]同济大学土木工程学院 上海 200090)

摘要 采用循环伏安方法研究了钢筋在两种常用电解液中再碱化过程中的电化学反应. 考察了钢筋在两种不同溶液中的电极反应, 分析了 Li^+离子和 Ca^{2+}离子对电极反应的影响. 并针对上述过程, 实验研究了钢筋电极在两种溶液中电极反应动力学. 结果表明: 由于 Li^+离子的存在, 使得钢筋表面的单质铁与不同价态的铁氧化物或氢化合物之间的转化过程与饱和氢氧化钙溶液中转化过程不同; 同时也发现, 由于 Ca^{2+}离子的吸附作用, 使得 Fe^{3+}离子的扩散系数低于在氢氧化锂溶液中的扩散系数. 研究结果可为电化学再碱化技术的应用提供理论依据.

关键词 电极过程; 扩散系数; 再碱化; 碳化混凝土; 钢筋

Electrochemical Behavior of the Rebar during Re-alkalization Treatment

Jiang, Jun[a] Zhang, Junxi*,[a] Lu, Jinliang[a] Qian, Shengjie[a]
Wu, Yongcheng[b] Wang, Kun[c] Qu, Wenjun[c]
([a] *Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090*)
([b] *Datang Changchun Second Thermal Power Co. Ltd., Changchun 130031*)
([c] *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200090*)

Abstract In this paper, the electrochemical reactions on the rebar during re-alkalization treatment were investigated in two common electrolytes by cyclic voltammetry. According to the electrode reaction of rebar in two different solutions, the influence of Li^+ and Ca^{2+} on the electrode reaction was analyzed. Regard to the above process, the reaction kinetics of the rebar electrode in the two solutions was studied by experiment. The results showed that the conversion process between iron of the rebar substrate and different valence of iron oxides or hydroxides was different from that in the saturated calcium hydroxide solution due to the presence of Li^+. Since the adsorption of Ca^{2+}, the diffusion coefficient of ferric ion was lower than that in Lithium hydroxide. The results could provide theoretical support for the application of the electrochemical re-alkalization technology.

Keywords electrode process; diffusion coefficient; re-alkalization; carbonated concrete; rebar

钢筋混凝土结构在长期服役过程中, 由于外界酸性物质的侵入发生碳化, 使得钢筋周围的 pH 值降低, 破坏了钢筋稳定存在的环境而使得钢筋脱钝锈蚀. 钢筋的锈蚀使得混凝土胀裂, 导致钢筋混凝土结构功能退化,

* E-mail: zhangjunxi@shiep.edu.cn
Received April 27, 2011; revised May 30, 2011; accepted June 16, 2011.
国家自然科学基金(Nos. 50771602, 50678127)资助项目.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结构失效. 要延长混凝土构筑物的使用寿命, 就需要对其进行修复. 碳化混凝土电化学再碱化技术就是一项近几年发展起来的针对钢筋混凝土结构因为碳化而失效的修复技术[1]. 近几年, 在电化学再碱化技术的研究上, 多数学者对再碱化过程中钢筋周围的 pH 值的变化、再碱化工艺、再碱化影响因素以及控制理论进行了大量研究[2~5].

但是, 对钢筋在再碱化过程中的电化学行为的研究却鲜有报道. 虽然, 在 20 世纪 80 年代, 有较多关于铁在碱性环境下的电化学行为的研究报道[6~12]. 但是这些研究主要针对铁碱性电池体系中, 纯铁在高浓度碱性环境下的充放电过程中铁的电化学行为以及物质的变化研究. 而钢筋在再碱化过程中的碱性环境下的电化学过程与纯铁在碱性体系下的电化学过程有着较大的差异. 而且, 在再碱化技术中, 钢筋表面的电化学过程对混凝土的再碱化效果以及钢筋的再钝化都有着重要的作用. 认识钢筋在再碱化过程中的电极过程有助于推动再碱化技术工艺优化和拓展其应用范围, 具有较重要的学术意义和应用价值.

同时, 已有的研究[15]表明使用饱和氢氧化钙作为电化学再碱化修复技术的电解液对碳化混凝土的修复具有较好的效果, 可以补充混凝土中钙的流失, 对混凝土的修复起到促进作用. 锂离子对混凝土在强碱性环境下发生的碱骨料反应具有抑制效应[13,14], 从而降低了再碱化对混凝土结构力学性能不良影响的风险. 同时有报道[7,15]表明, 锂离子能改善铁电极在碱性溶液里氧化还原反应的可逆性, 促进铁氧化物的还原, 消除由于氧化物的体积增加而造成的混凝土应力破坏, 可提高混凝土结构的强度. 本文在这样的背景下, 研究了钢筋在饱和氢氧化钙溶液以及氢氧化锂溶液中的电化学行为, 重点考察两种金属离子对钢筋在碱性体系中电极过程动力学的影响, 为再碱化技术的应用提供理论支持和技术指导.

1 实验材料及方法

1.1 工作电极的制备

钢筋采用直径为 10 mm 的二级钢筋, 组成为(ω): 0.25C, 0.80Si, 1.60Mn, 0.045P, 0.045S, 其余 Fe. 将钢筋加工为 Φ 10 mm×5 mm 的圆柱形试样, 背面焊接导线, 用环氧树脂将焊接点以及非工作面包封, 露出工作面积为 0.785 cm^2. 将电极用金相砂纸逐级打磨至镜面光亮, 然后依次用去离子水, 无水乙醇清洗电极表面, 吹干待用.

1.2 电解液制备

配制浓度为 0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液, 饱和氢氧化钙溶液. 在电解液中通入纯氮, 除去溶液中的溶解氧, 通气时间 1 h.

1.3 电化学测试

电化学测试采用三电极体系, 参比电极为饱和甘汞电极, 辅助电极为 Pt 电极. 在 PARSTAT 2273 电化学测试仪上进行循环伏安测试, 测试电压范围为－1.4～－0.3 V. 在进行循环伏安测试前, 将电极在－1.4 V 下极化 5 min, 对电极表面进行电化学还原, 除去在打磨过程中电极表面生成的氧化物, 增强电化学响应的重现性. 所有电化学测试均在 25 ℃下进行.

2 实验结果与讨论

2.1 钢筋在饱和氢氧化钙溶液和 0.5 mol/L 氢氧化锂溶液中的电极过程分析

已有的研究[9,11]表明, 铁在碱性环境中会发生如表 1 所示的电化学反应.

0.5 mol/L 的氢氧化锂的 pH 值为 13.70, 饱和氢氧化钙的 pH 值为 12.65. 则通过计算得到的铁在这两种溶液里的各电极反应的平衡电位如表 1 所示.

表 1 铁在饱和氢氧化钙以及 0.5 mol/L 氢氧化锂溶液中所存在电极反应的平衡电极电位

Table 1 The equilibrium electrode potential of the existing electrode reaction of the iron in saturated calcium hydroxide and 0.5 mol/L lithium hydroxide solution

No.	Electrode reaction	Saturated calcium hydroxide solution vs. SCE (V)	0.5 mol/L lithium hydroxide solution vs. SCE (V)
1	$3Fe+4H_2O=Fe_3O_4+8H^++8e^-$ $Ee=-0.085-0.0591\times pH-0.244$	−1.0766	−1.13867
2	$Fe+2H_2O=Fe(OH)_2+2H^++2e^-$ $Ee=-0.047-0.0591\times pH-0.244$	−1.0386	−1.10067
3	$Fe+2H_2O=FeOOH+3H^++3e^-$ $Ee=0.059-0.0591\times pH-0.244$	−0.9326	−0.99467
4	$Fe(OH)_2=FeOOH+H^++e^-$ $Ee=0.271-0.0591\times pH-0.244$	−0.7206	−0.7837
5	$Fe_3O_4+2H_2O=3FeOOH+H^++e^-$ $Ee=1.208-0.0591\times pH-0.244$	0.2164	0.1543
6	$3Fe(OH)_2=Fe_3O_4+2H_2O+2H^++2e^-$ $Ee=-0.202+0.0591\times pH-0.244$	0.3016	0.36367

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据反应的平衡电位，通过比较循环伏安峰电位与平衡电位的关系可以确定可能存在的电化学反应. 这种方法有利于分析钢筋在不同电位下的电极反应，对于一个氧化反应其发生的必要条件是 Ep＞Ee，类似的，一个还原反应的发生，其电极电位应该比其平衡电位更负.

图 1～3 是钢筋电极在 0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液、饱和氢氧化钙溶液和饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液中扫描 50 次的循环伏安曲线. 从图 1 可以看出，钢筋在氢氧化锂溶液存在四个峰，其峰电位分别为(相对于 SCE): 峰 I: －0.9 V，峰 II: －0.7 V，峰 III: －1.12 V，峰 IV: －1.3 V. 随着扫描次数的增加，峰 I 与峰 IV 向内部收缩，峰 II 与峰 III 向外部扩张，这表明峰 I 与峰 IV 紧密相关，而峰 II 与峰 III 为一组共轭峰. 峰 I 对应的峰电位略高于表 1 中电极反应(1)和(2)的平衡电位，也就是说峰 I 处可能存在 $Fe \rightarrow Fe(OH)_2$ 和 $Fe \rightarrow Fe_3O_4$ 的转变. 从表 1 中看出，反应(1)的平衡电位低于反应(2). 从热力学角度来说相对于反应(2)，反应(1)的趋势更大. 然而在碱性环境中，铁失去两个电子转变为 $Fe(OH)_2$ 比生成 Fe_3O_4 更加容易. 因此峰 I 处可能反应(2)占主导地位. 通过 XRD 以及 SEM 原位分析[10]证实了峰 I 处反应产物 $Fe(OH)_2$，Fe_3O_4 的存在，而且反应的主要产物为 $Fe(OH)_2$. 大多数研究者[12]认为峰 II 对应着 $Fe(OH)_2$ 向 FeOOH 的转变，通过表 1 可以发现峰 II 的电极电位比反应(3)、反应(4)的平衡电位都正，这说明在峰 II 的电位下可以同时存在这两个反应[9,10]. 如果峰 II 处只存在 $Fe(OH)_2$ 向 FeOOH 转变，那么峰 II 会随着峰 I 的减小而减小，事实上随着循环次数的增加，峰 II 是逐渐增长，这就证实了在峰 II 的电位下共同存在着反应(3)和反应(4). 图 1 中，峰 I 所对应的电位随循环次数的增加而负移，这是因为随着循环次数的增加，钢筋表面由于氧化溶解覆盖了一层铁的化合物，它抑制了钢筋表面单质铁的反应. 在负向扫描过程中，一部分铁的化合物被还原为单质铁镶嵌在钢筋表面的铁化合物中，这部分单质铁相对于基体表面的单质铁具有更高的活性，所以在更低的电位下就检测到了电化学响应.

图 2 中钢筋电极在饱和氢氧化钙溶液中的循环伏安曲线也存在四个峰: 峰 I: －0.86 V、峰 II: －0.595 V、峰 III: －1.027 V、峰 IV: －1.29 V (均相对于 SCE). 由于溶液 pH 和过电位的影响，峰 I、峰 II、峰 III、峰 IV 的位置与氢氧化锂溶液存在差异. 类似的，在峰 I 处发生 $Fe \rightarrow Fe(OH)_2$ 和 $Fe \rightarrow Fe_3O_4$ 的转变，在峰 II 处发生 $Fe \rightarrow FeOOH$ 和 $Fe(OH)_2 \rightarrow FeOOH$ 的反应，峰 III 是 FeOOH 的还原峰，峰 IV 是 $Fe(OH)_2$ 的还原峰. 与氢氧化锂溶液不同的是，在饱和氢氧化钙溶液中四个峰都向外扩张，且在氢氧化钙溶液中峰 I 不明显. 从图 3 中得到，钢筋电极在饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液中的电化学行为与前面两种电解质溶液一致. 与饱和氢氧化钙

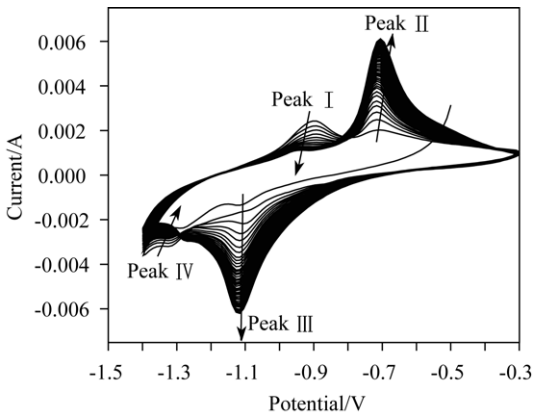


图 1　钢筋在氢氧化锂溶液中循环伏安曲线(50 mV/s)

Figure 1　Cyclic voltammograms of rebar in the lithium hydroxide solution (sweep rate 50 mV/s)

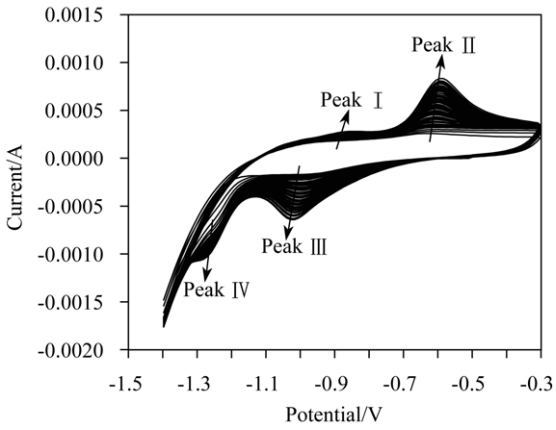


图 2　钢筋在饱和氢氧化钙溶液中循环伏安曲线(50 mV/s)

Figure 2　Cyclic voltammograms of rebar in the saturated calcium hydroxide solution (sweep rate 50 mV/s)

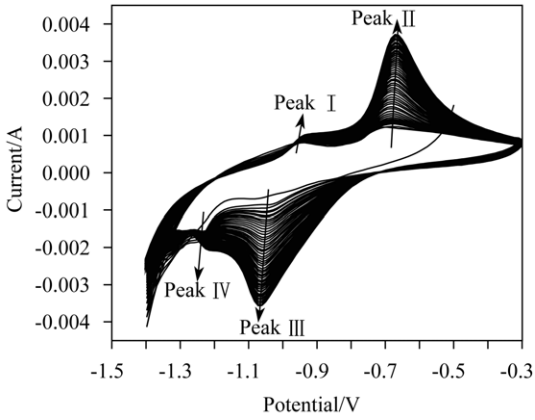


图 3　钢筋在饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L LiOH 溶液中循环伏安曲线(50 mV/s)

Figure 3　Cyclic voltammograms of rebar in the saturated calcium hydroxide and lithium hydroxide solution (sweep rate 50 mV/s)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

相似, 在饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液中, 峰 I、峰 II、峰 III、峰 IV 都向外扩张. 而从峰电流大小来看, 钢筋在饱和 $Ca(OH)_2$ 溶液中的峰电流值比含有 LiOH 的溶液中的峰电流低的多.

图 4 是钢筋在饱和氢氧化钙溶液、0.5 mol/L 氢氧化锂溶液和饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液中多次循环伏安第 1、50 圈叠加曲线, 表 2 给出了钢筋在这三种电解液中第 50 圈循环伏安峰 II、峰 III 的峰电位以及峰电量. 从图 4 以及表 2 可以看出, 钢筋电极在 50 次循环后, 饱和氢氧化钙溶液中电荷积累小于饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液而饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液中电荷积累小于 0.5 mol/L 的氢氧化锂溶液. 这除了与溶液的 pH 值、电导率有关外, 还与溶液中的阳离子有关[6,7]. 阳离子对循环伏安电量积累的影响主要与两个因素有关[6], 一个是阳离子本身所带电荷的大小, 另外一个就是阳离子半径的大小. 钢筋在碱性环境中, 通过溶解沉积作用在钢筋的表面生成一层钝化膜. 这层膜在内层由 Fe_3O_4 膜组成, 外层是相对较厚的水合 $FeOOH/Fe(OH)_2$ 层. 在循环伏安扫描电位范围内, 内部钝化层生成, 这层膜的外部对二价阳离子的吸附远远大于对一价阳离子的吸附作用[6]. 相对于一价的锂离子, 二价的钙离子被吸附在钝化膜内层的可能更大. 在碱性环境下, 铁氧化物的还原过程有两种机理[15], 一种是质子传递机理, 另外一种为“溶解-沉积”机制. 普遍认为峰 III、峰 IV 分别对应于 $FeOOH \rightarrow Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_2 \rightarrow Fe$ 的还原反应. 对于饱和氢氧化钙溶液, 这种看法具有一定的合理性. 但对于氢氧化锂溶液, 则不能解释. 因为图 1 中得到, 峰III随着循环次数的增加而增大, 峰IV随着循环次数的增加而减少, 这表明在氢氧化锂溶液中峰 III、峰 IV 不仅仅是 $FeOOH \rightarrow Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_2 \rightarrow Fe$ 的连续还原反应. 先前的研究表明[16], 在还原体系中加入 Li^+离子可以改善氧化铁的可逆性, Li^+离子的介入改变氧化物的晶格结构, 便于还原反应的进行. 已有研究表明[7], 在阴极还原过程中, Li^+离子能够嵌入铁氧化物的晶格中, 形成 $Li_xFe_2O_3$ 或者 $Li_xFe_3O_4$, 这就是锂化过程. 在锂离子的催化作用下, 铁氧化物能够被彻底的还原, 发生如下反应:

$$6Li^+ + 6e^- + 2FeOOH(Fe_2O_3 \cdot H_2O) \rightarrow 3Li_2O + 2Fe + H_2O \quad (7)$$

$$8Li^+ + 8e^- + Fe_3O_4 \rightarrow 3Li_2O + 3Fe \quad (8)$$

因为钙离子在钝化膜内层的吸附以及锂离子对铁氧化物还原的催化作用, 使得钢筋电极在 50 次循环后, 氢氧化钙溶液中电荷积累明显小于氢氧化锂溶液. 而且在锂离子的作用下, 反应(1)也变得较为容易[7], 这就解释了为什么在氢氧化锂溶液中存在明显的峰 I.

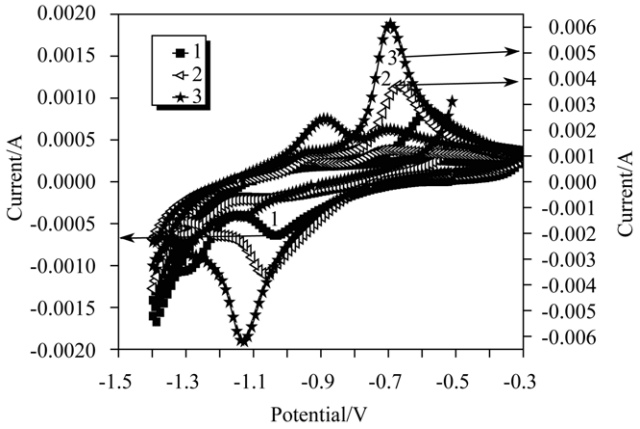


图 4 钢筋在饱和氢氧化钙溶液、0.5 mol/L 氢氧化锂溶液以及饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 氢氧化锂溶液中多次循环伏安第 1 和 50 圈曲线

Figure 4 The 1st and 50th cyclic voltammograms of rebar in the saturated calcium hydroxide solution, the 0.5 mol/L lithium hydroxide solution and the saturated calcium hydroxide＋the 0.5 mol/L lithium hydroxide solution

1: saturated calcium hydroxide solution; 2: saturated calcium hydroxide＋0.5 mol/L lithium hydroxide solution; 3: 0.5 mol/L lithium hydroxide solution

表 2 钢筋在饱和氢氧化钙溶液、0.5 mol/L 氢氧化锂溶液以及饱和氢氧化钙＋0.5 mol/L 氢氧化锂溶液 50 圈循环后的峰电流与峰面积(峰 II、峰 III)

Table 2 The peak current and peak aera of 50th cyclic voltammograms of rebar in the saturated calcium hydroxide solution, the 0.5 mol/L lithium hydroxide solution and the saturated calcium hydroxide＋the 0.5 mol/L lithium hydroxide solution

		Peak current/ μA	Peak aera/ μC
0.5 mol/L lithium hydroxide solution	Peak II	5809.36	30485.68
	Peak III	－4656.62	23100.76
Saturated calcium hydroxide solution＋0.5 mol/L lithium hydroxide solution	Peak II	3531.77	20790.48
	Peak III	－3034.54	13465.79
Saturated calcium hydroxide solution	Peak II	883.13	4268.45
	Peak III	－609.41	2714.52

2.2 钢筋在饱和氢氧化钙溶液和 0.5 mol/L 氢氧化锂溶液中的电极过程动力学

从图 1、图 2 中可以看出, 钢筋在饱和氢氧化钙溶液和 0.5 mol/L 氢氧化锂溶液中各价态物质相对应的氧化峰与还原峰电位差远大于 100 mV, 也就是说钢筋在这两种电解液的氧化还原反应是非可逆过程.

对于一个非可逆反应过程, 其动力学关系式可以描述为[17]:

$$I_{pa} = K_1 v + K_2 v^{1/2} \quad (9)$$

$$I_{K_1} = K_1 v \quad (10)$$

$$I_{K_2} = K_2 v^{1/2} \quad (11)$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中 I_{pa} 表示氧化峰峰电流(A), K_1 是动力学电流常数($A•V^{-1}•s$), I_{K_1} 表示动力学电流(A); K_2 是扩散电流常数($A•V^{-1/2}•s^{1/2}$), I_{K_2} 表示扩散电流(A), 其值可近似为完全不可逆峰电流, v 是扫描速度.

把(9)式两边同时除以 v 得到:

$$\frac{I_{pa}}{v}=K_1+K_2v^{-1/2} \tag{12}$$

以 $\frac{I_{pa}}{v}$ 对 $v^{-1/2}$ 作图就可以得到一条直线, 根据直线的截距和斜率便可以求出反应的动力学电流常数 K_1 以及扩散电流常数 K_2.

图 5, 图 6 是钢筋在饱和氢氧化钙溶液和 0.5 mol/L LiOH 溶液中不同扫描速度下峰 II 循环伏安曲线.

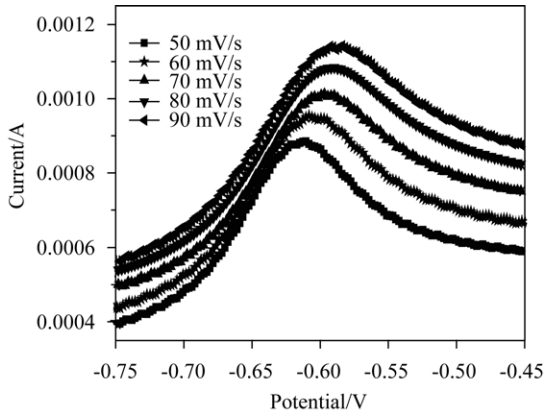


图 5　钢筋在饱和氢氧化钙溶液不同扫描速度下循环伏安曲线(II)

Figure 5　Cyclic voltammograms of rebar in the saturated calcium hydroxide solution at different scan rate (peak II)

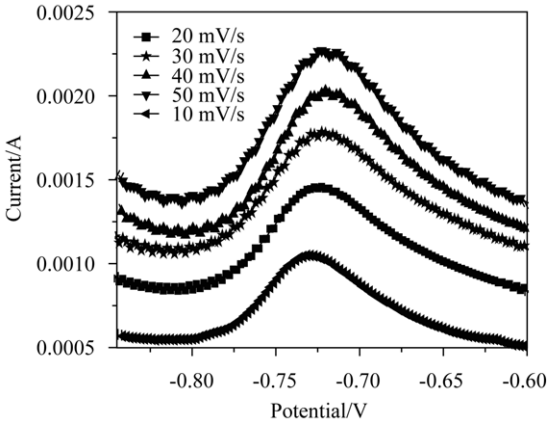


图 6　钢筋在 0.5 mol/L LiOH 溶液不同扫描速度下循环伏安曲线(峰 II)

Figure 6　Cyclic voltammograms of rebar in the 0.5 mol/L lithium hydroxide solution at different scan rate (peak II)

通过对循环伏安曲线的峰进行分析, 拟合得到了氢氧化钙溶液中, 0.5 mol/L LiOH 溶液中峰 II 在各种扫描速度下的峰电流. 以 $\frac{I_{pa}}{v}$ 对 $v^{-1/2}$ 作图得到了图 7、图 8.

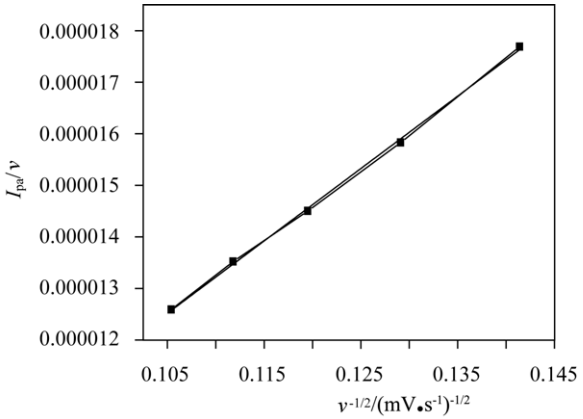


图 7　钢筋在氢氧化钙溶液中峰 II 的 $\frac{I_{pa}}{v}$ 对 $v^{-1/2}$ 关系曲线

Figure 7　The $\frac{I_{pa}}{v}$-$v^{-1/2}$ curve of the rebar in the saturated calcium hydroxide solution (peak II)

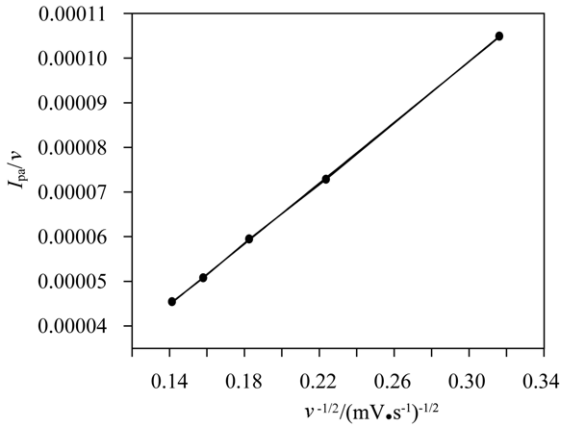


图 8　钢筋在 0.5 mol/L LiOH 溶液中峰 II 的 $\frac{I_{pa}}{v}$ 对 $v^{-1/2}$ 关系曲线

Figure 8　The $\frac{I_{pa}}{v}$-$v^{-1/2}$ curve of the rebar in the 0.5 mol/L lithium hydroxide solution (peak II)

通过分析图 6、图 7 的直线, 获得直线的截距和斜率得到反应的动力学电流常数 K_1 以及扩散电流常数 K_2. K_1 反映了电荷传递的速度、K_2 反映了反应产物的扩散速度. 具体在表 2 中给出.

从表3可以看出无论是饱和氢氧化钙溶液, 还是0.5 mol/L 氢氧化锂溶液, 峰 II 的 $K_2>>K_1$, 这说明钢筋在这两种电解液中的阳极过程的决速步骤为电荷转移步骤, 这与文献[9]通过计算$(\delta\log ip/\delta\log v)_{OH^-}$所获得的结果一致. 饱和氢氧化钙溶液峰II的$K_1$与氢氧化锂溶液大致相当, 这说明了在这两种溶液中峰 II 处所发生的电化学相同. 饱和氢氧化钙溶液的扩散系数比氢氧化锂溶液中的小 3 倍, 这是因为钙离子的吸附阻止了钝化膜铁离子通过内层向外层区域的置换[6], 从而使得铁离子扩散速度降低.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 钢筋在饱和氢氧化钙溶液和 0.5 mol/L 氢氧化锂溶液中峰 II 动力学参数

Table 3 The kinetic parameters of the peak II of the steel in saturated calcium hydroxide solution and 0.5 mol/L lithium hydroxide solution

Peak II	10^7K_1	10^4K_2
Saturated calcium hydroxide solution	22.326	1.405
0.5 mol/L lithium hydroxide solution	20.094	3.404

3 结论

钢筋在饱和氢氧化钙溶液和 0.5 mol/L 氢氧化锂溶液中电化学行为相似, 都存在四个峰. 峰 I、峰 II 对应着 Fe→$Fe(OH)_2$, Fe_3O_4 和 $Fe(OH)_2$→FeOOH, Fe→FeOOH 的反应. 在饱和氢氧化钙溶液中峰 III、峰 IV 对应着 FeOOH→$Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_2$→Fe 的连续还原过程, 而在氢氧化锂溶液中, 由于锂离子的催化作用, 峰 III 也存在 FeOOH 直接还原为 Fe 的反应, 锂离子对铁氧化物的还原有较强的促进作用. 由于钙离子在钢筋表面内层膜的吸附, 使得在饱和氢氧化钙溶液中钢筋铁离子通过置换向外层空间扩散的速率降低, 从而使得饱和氢氧化钙溶液峰 II 铁离子扩散系数低于钢筋在氢氧化锂溶液氧化峰的扩散系数.

References

1 Jiang, Z.-W. *Mater. Rev*. **2008**, *22*, 78 (in Chinese).
(蒋正武, 材料导报, **2008**, *22*, 78.)

2 Zhu, Y.-X. *Port & Waterway Engin*. **2001**, *6*, 12 (in Chinese).
(朱雅仙, 水运工程, **2001**, *6*, 12.)

3 Qu, W.-J.; Xiong, Y.; Guo, L. *J. Buil. Mater.* **2008**, *11*, 21 (in Chinese).
(屈文俊, 熊焱, 郭莉, 建筑材料学报, **2008**, *11*, 21.)

4 Zhu, P.; Qu, W.-J. *Mater. Rev*. **2006**, *20*, 101 (in Chinese).
(朱鹏, 屈文俊, 材料导报, **2006**, *20*, 101.)

5 Miranda, J. M.; Gonzalez, J. A.; Cobo, A.; Otero, E. *Corros. Sci.* **2006**, *48*, 2172.

6 Juanto, S.; Schrebler, R. S. *Electrochim. Acta* **1991**, *36*, 1143.

7 Casellato, U.; Comisso, N.; Mengoli, G. *Electrochim. Acta* **2006**, 5669.

8 Cerny, J.; Micka, K. *J. Power Sources* **1989**, *25*, 111.

9 Muralidharan, V. S.; Veerashannmugamani, M. *J. Appl. Electrochem*. **1986**, *15*, 675.

10 Ojefors, L. *Electrochem. Sci. Technol.* **1976**, *123*, 1691.

11 Andersson, B.; Ojefors, L. *Electrochem. Sci. Technol.* **1976**, *123*, 824.

12 Niu, L.; Chen, S.-H. *J. Shangdong Univ*. **1990**, *26*, 494 (in Chinese).
(牛林, 陈慎豪, 山东大学学报, **1990**, *26*, 494.)

13 Yu, S.-J.; Mo, X.-Y.; Deng, M.; Tang, M.-S.; Shen, J. *J. Southeast Univ*. **2009**, *39*, 127 (in Chinese).
(俞琛捷, 莫祥银, 邓敏, 唐明述, 沈健, 东南大学学报, **2009**, *39*, 127.)

14 Matsumoto, K. I.; Ueda, T. *Int. J. Mod. Phys. B* **2003**, *17*, 1446.

15 Zhang, J.-X.; Zhang, Y.; Xia, K.; Zhou, L.; Qu, W.-J. *Corros. Sci. Prot. Technol*. **2009**, *21*, 263 (in Chinese).
(张俊喜, 张羽, 夏凯, 周稜, 屈文俊, 腐蚀与防护, **2009**, *21*, 263.)

16 Wen, G.-G. *Chemical Power Technology*, Publishing House of Electronics Industry, Beijing, **1994**, p. 401 (in Chinese).
(文国光, 化学电源工艺学, 电子工业出版社, 北京, **1994**, p. 401.)

17 Yue, L.; Lü, D.-S.; Li, W.-S.; Lei, J.-S.; Zhao, L.-Z. *Acta Phys.-Chim. Sin*. **2009**, *25*, 1972 (in Chinese).
(岳鹿, 吕东生, 李伟善, 雷建飞, 赵灵智, 物理化学学报, **2009**, *25*, 1972).

(A1104272 Cheng, F.)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net