

文章编号:1673-2049(2012)03-0018-06

有腹筋混凝土构件的再碱化试验研究

屈文俊¹, 刘扬明¹, 温华杰²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092;

2. 科罗拉多州立大学 土木与环境工程系, 科罗拉多 科林斯堡 CO80523)

摘要:通过对有腹筋混凝土构件的再碱化试验,从钢筋配置方式、钢筋类别差异等角度对再碱化过程及碱化效果进行了分析研究。结果表明:再碱化过程中,电源从钢筋笼的任何位置接入试件对再碱化效果的影响基本没有区别;再碱化过程是电化学、电渗以及扩散相结合、共同作用的过程;再碱化对纵筋和箍筋都具有良好的修复效果,而且不因钢筋所处位置、钢筋尺寸以及钢材种类等因素不同而改变。

关键词:碳化混凝土;再碱化技术;有腹筋混凝土构件;电化学修复;使用寿命

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

Experiment Research on Realkalization Technique for Carbonated Concrete Members with Stirrups

QU Wen-jun¹, LIU Yang-ming¹, WEN Hua-jie²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, Fort Collins CO80523, Colorado, USA)

Abstract: A series of realkalization experiments were carried out on carbonated concrete members with stirrups. In these experiments, the locations and types of rebars were taken into consideration to evaluate the realkalization effects. Results show that during the realkalitation process, it makes no difference in realkalization effects whether the direct current is applied to rebar cage through longitudinal reinforcements or stirrups; realkalization process is the cooperation among electrolysis, electroosmosis and diffusion; excellent realkalization effects are achieved both in longitudinal reinforcements and stirrups no matter the location, dimension or types of rebar are embedded.

Key words: carbonated concrete; realkalization technique; concrete member with stirrup; electro-chemical repair; service life

0 引言

延长碳化混凝土构件使用寿命的关键是要恢复钢筋周围混凝土的碱性环境^[1],电化学再碱化技术作为一种有效手段受到了各国学者的关注和重视。

虽然碳化混凝土电化学再碱化技术已经有较大的发展,但目前各国对再碱化的研究基本上是基于单根钢筋或者平行纵筋的试验或者模型进行的,而且主要控制参数为再碱化设备可调节的参数,如溶液浓度、电压和电流大小、再碱化时间等。本文中笔者将

收稿日期:2012-06-07

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A07-04);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2009CB623200);国家自然科学基金项目(50178050)

作者简介:屈文俊(1958-),男,河南辉县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:quwenjun. tj@tongji. edu. cn。

通过有腹筋构件的再碱化试验,从钢筋配置方式、钢筋类别差异等角度对再碱化过程及碱化效果进行分析研究。

1 再碱化试验

1.1 试件设计与制备

本文中设计了再碱化试验半梁试件,仅取梁(柱)的一侧作为试件,试件简化如图 1 所示。纵筋采用Ⅱ级螺纹钢,直径 20 mm;箍筋采用Ⅰ级光圆钢筋,直径 8 mm。试验共制作 5 组试件,Ⅰ~Ⅳ组每组 2 个试件,Ⅰ组不配置箍筋;Ⅱ~Ⅳ组配置箍筋,箍筋间距依次为 200,150,100 mm,其中,Ⅲ组试件构造尺寸如图 2 所示。第 V 组 4 个试件,分别为 V1,V2,V3,V4,其尺寸和钢筋配置情况依次与Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ组完全相同。另制作相同几何尺寸的素混凝土试件 3 个,用来测试在碳化过程中试件的碳化情况。该试验所有试件均一次浇筑制作完成,同时制作 3 个 100 mm×100 mm×100 mm 的试块,用来测混凝土立方体抗压强度。

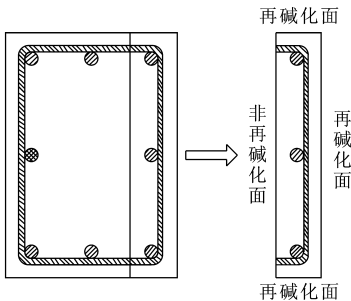


图 1 半梁试件
Fig. 1 Semi-beam Specimen

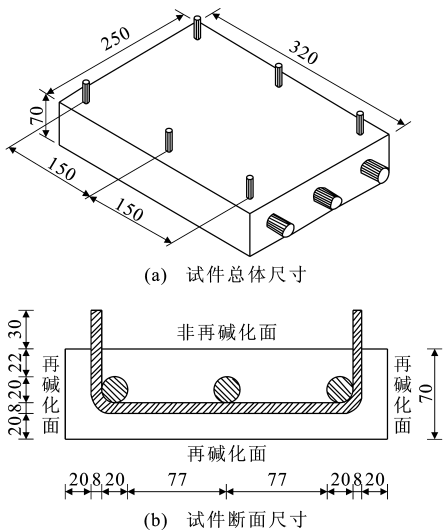


图 2 Ⅲ组试件构造尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Structural Dimensions of Specimen Group III

混凝土的配合比:水泥、水、砂、石的质量比为 1 : 0.65 : 2.25 : 3.68;采用 425 级普通硅酸盐水泥,标准养护 28 d,测定试块强度,得到混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu,k}=26.7$ MPa。所有试件标准养护好后放在烘箱中 60 ℃ 温度下烘 48 h,然后将以上 5 组试件和 3 个辅助试件放入碳化箱中进行加速碳化,碳化箱内二氧化碳的质量分数保持在 (20 ± 3)%。当碳化进行到 60 d 时,取出一个辅助试件用切割机从中间切开,用质量分数为 60% 的酒精酚酞试剂测试断面碳化效果,发现试件有 40% 面积未碳化;当碳化进行到 75 d,取另一个辅助试件切开,测试发现试件正中间仍有小块未碳化;直至碳化进行到 90 d 时,测试发现试件已经完全碳化。

再碱化试验装置如图 3 所示,其中本试验采用直流电源为 20 V 的恒压电源,碳酸钠溶液浓度为 1 mol · L⁻¹。

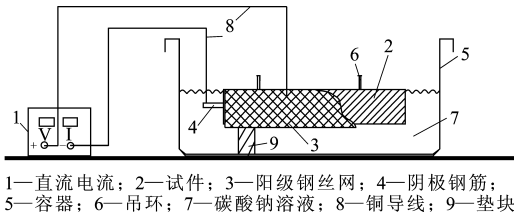


图 3 再碱化试验装置
Fig. 3 Realkalization Experiment Device

1.2 试验步骤

试验分为以下 4 个步骤:

(1)测定不同配筋试件再碱化过程中电流变化:对 4 组 8 个试件进行再碱化。试验在 20 V 恒压条件下进行,试验时间为 14 d,外界温度约为 10 ℃。试验中,在再碱化的前 24 h,每隔 8 h 记录一次电流;在 24~48 h,每 12 h 记录一次;之后每 24 h 记录一次,同时测定各箍筋之间的电压和电流。再碱化过程中,试件外露箍筋用导线两两相连,模拟钢筋笼箍筋的连接。

(2)试件切割后的酚酞测试:再碱化结束后,将各试件分别沿短边方向切割为 2 个小试块,分别编号 XA,XB(X 取Ⅰ1,Ⅰ2,...,Ⅳ2);把小试块 XA,XB 分别沿短边方向切割成 3 个更小的试块,依次编号 X-1,X-2,X-3,X-4,X-5,X-6,如图 4 所示。切割完毕后,对小试块 X-1,X-2,X-3 用质量分数为 60% 的酒精酚酞试剂对试件断面进行再碱化测试,小试块 X-4,X-5,X-6 留作测量钢筋极化曲线用。

(3)再碱化后钢筋周围混凝土 pH 值测定:本研究采用取出固液萃取的方法来制备溶液,具体步骤

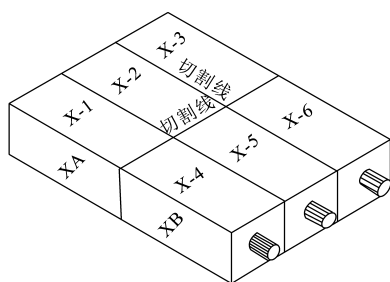


图4 试件切割示意

Fig. 4 Schematic Diagram of Segmented Specimens

如下:在步骤(2)中切割的小试块 X-1, X-2, X-3 (X 取 I 1, I 2, ..., IV 2) 钢筋周围混凝土钻多个小孔 (直径约为 5 mm, 孔深为 5 mm), 将孔中的混凝土粉末去除, 再继续在原位置钻孔 (孔深为 15 mm), 取出粉末, 充分研磨, 然后过筛 (0.08 mm 方孔筛), 称取 5 g 溶入 10 倍质量的蒸馏水中, 用橡皮塞塞紧以防碳化, 每隔 15 min 振动均匀, 2 h 后静置, 24 h 后过滤, 使用 PHS-25 数显式酸度计测定溶液的 pH 值。

(4) 再碱化后钢筋极化曲线和腐蚀电流: 采用电化学测试系统 Potential/Galvanostat Model 283 结合相关的测量和分析软件进行测定, 极化曲线测量扫描速度为 $0.01 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 。测试前试件外露钢筋全部用绝缘胶封涂, 放置 14 d, 然后在溶液中浸泡 1 d。

2 试验结果分析

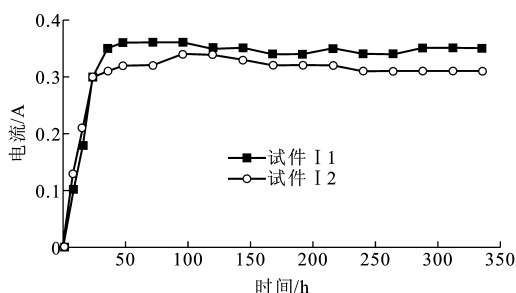
2.1 再碱化过程中不同配筋试件的电流变化

各试件在再碱化过程中电流随时间变化的关系见图 5, 其平均电流-时间曲线见图 6。

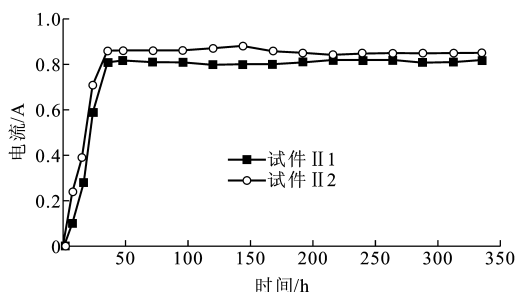
由图 5, 6 可知, 在再碱化刚开始时, 电流相对较小, 随着时间的推移, 电流增大。再碱化时间超过 50 h 后, 电流呈微小的波动趋势。这是由于开始时混凝土孔隙水不饱和, 混凝土电阻较大, 随着再碱化的进行, 电渗路径上的孔隙水逐渐饱和, 电阻变小, 导致回路电流增大^[2]。

从图 6 还可以看出, I ~ IV 组试件平均电流随着配箍率的增加而增加, 从完全不配箍试件到配有箍筋试件增加幅度最大。这是因为箍筋配置越多, 钢筋到试件表面的电阻就越小, 同时, 配箍较密的试件其浇筑质量难以得到保证, 试件中大孔隙较多, 所以配箍率越高, 试件电阻越小, 回路电流也就越大。

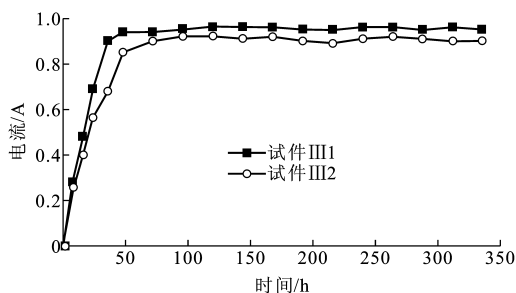
试验中, 从再碱化开始至 100 h, 通过纵筋作为阴极连入电路; 在 100 ~ 150 h, 由箍筋作为阴极连入电路。由图 5, 6 还可知, 改变阴极接入位置时, 电流几乎不发生改变。通过测量外露箍筋、纵筋之间的电压和电流, 结果几乎为 0, 表明钢筋笼各处电势



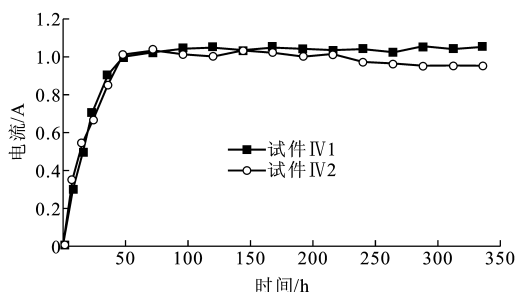
(a) I 组试件



(b) II 组试件



(c) III 组试件



(d) IV 组试件

图5 再碱化过程中各试件的电流-时间曲线

Fig. 5 Electric Current-time Curves of Each Specimen During Realkalization Process

相同, 电源从钢筋笼的任何位置接入, 对其再碱化效果基本没有区别。因此在实际工程中, 在保证钢筋笼导电良好的情况下, 电源与钢筋笼的连接可以结合工程实际, 因地制宜, 根据有利于施工的原则进行连接。

2.2 再碱化后混凝土截面的酚酞测试

假设再碱化是由阴极钢筋处电化学反应所致: 在电位差的作用下, 阴极产物 OH^- 由钢筋向混凝土表面迁移, 还有一部分滞留在钢筋周围的混凝土, 使

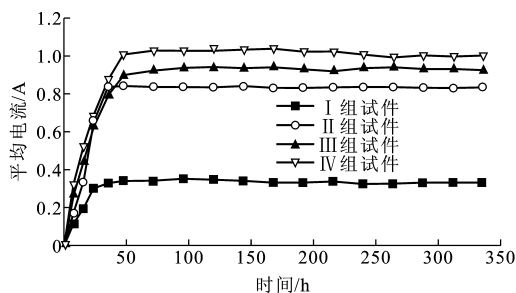


图 6 I ~ IV 组试件平均电流-时间曲线

Fig. 6 Mean Electric Current-time Curves of Specimen Groups I - IV

得该区域碳化混凝土的 pH 值升高,达到再碱化的目的。若没有电渗和扩散作用的共同参与,那么再碱化后酚酞测试则只可能出现图 7(a)所示的以钢筋为圆心的同心圆形状的再碱化效果区域。然而通过试验的再碱化效果剖切图(图 8)可以看出,再碱化后混凝土进行酚酞测试后,变色区域基本如图 7(b)~(d)所示,必然存在一种作用使钢筋到混凝土表面的路径区域碱性恢复,电渗和扩散作用在试验现象中得以验证。因此,再碱化过程是阴极钢筋处发生电化学反应、碱性溶液通过电渗作用从混凝土表面渗透到混凝土内部以及浓度差产生的扩散作用的共同结果。

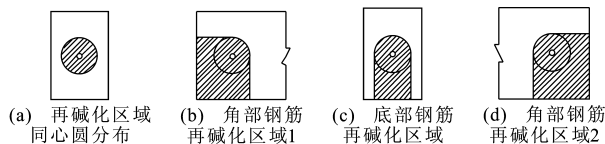


图 7 I 1~IV 2 组试件再碱化效果剖切图

Fig. 7 Section-tangential Drawings of Specimen Groups I 1-IV 2 of Realkalization Effects

从图 8 还可以看出,再碱化过程中的电渗路径并不一定是钢筋到混凝土表面的最短路径,而是存在少许偏差。这是因为混凝土浇筑质量的差异,可能由于最短路径区域混凝土浇筑质量较好,孔隙率较低,电渗较难进行所致。

2.3 再碱化后钢筋周围混凝土孔隙液相碱度测定

表 1 中给出了各试件在再碱化进行前后,试件纵筋与箍筋周围混凝土孔隙液相 pH 值平均值的测定结果。

从表 1 可知,在再碱化前,试件的 pH 值都在 9 以下;在再碱化 14 d 后,纵筋和箍筋周围混凝土的 pH 值都有非常大的提升,基本达到 11.6,而且各纵筋之间、箍筋之间、纵筋和箍筋之间 pH 值没有明显的区别。因此,再碱化对纵筋和箍筋都有良好的修

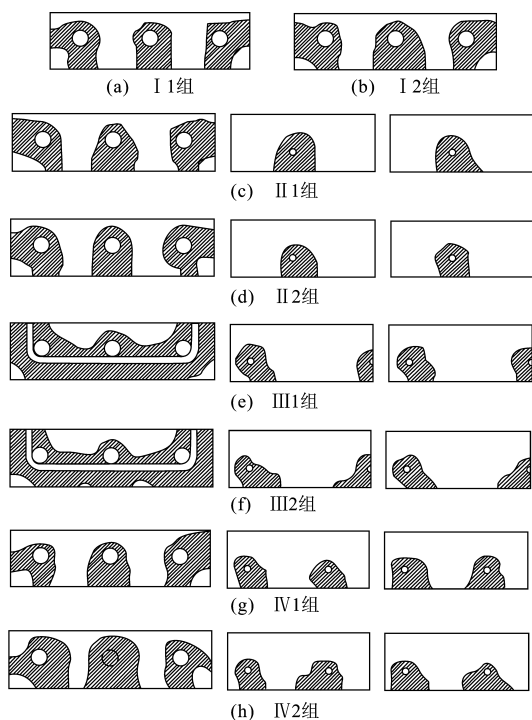


图 8 再碱化效果示意

Fig. 8 Schematic Diagrams of Realkalization Effects

复效果,而且不因钢筋所处位置、钢筋尺寸及钢材类型等因素不同而改变。

2.4 再碱化后钢筋极化曲线和腐蚀电流测定

在再碱化前,分别对 V 组试件切割来的小试件 V1-5, V2-5, V3-5, V4-5 测试试件的极化曲线;在再碱化后,分别对小试块 I 1-5, II 1-5, III 1-5, IV 1-5 测量试件的极化曲线。可以得到再碱化前后的各组不同配筋试件的钢筋腐蚀电位和腐蚀电流大小。

由于再碱化后,阴极还原使得钢筋电极表面形成疏松的金属单质,具有较高活性,所以再碱化刚结束,钢筋的腐蚀电位负移,腐蚀电流增大^[3]。但随着时间的推移,在空气中放置一段时间后,活性金属表面会形成氧化层,起到保护作用,此时腐蚀电位会正移,腐蚀电流减小。故试验在再碱化结束 14 d 后再对试件测量极化曲线,测得的钢筋腐蚀电流密度与腐蚀电位见表 2。I ~ IV 组试件钢筋极化曲线见图 9,其中, E 为腐蚀电位, i 为腐蚀电流密度。

文献[4]中规定:钢筋腐蚀电位大于或等于 -200 mV 时,钢筋发生锈蚀的概率为 5%;钢筋腐蚀电位在 $-350\sim-200\text{ mV}$ 之间时,钢筋发生锈蚀的概率为 50%;钢筋腐蚀电位小于 -350 mV 时,钢筋发生锈蚀的概率为 95%。线性极化法测量的腐蚀电流密度与腐蚀状态的关系见表 3^[5-6]。

由图 9 和表 2 可知, I ~ IV 组试件在再碱化放

表 1 各试件钢筋周围混凝土孔隙液相 pH 值平均值

Tab. 1 Mean pH Values of Concrete Pore Solution Around Rebars in Each Specimen			
试验阶段	试件编号	纵筋处 pH 值	箍筋处 pH 值
再碱化前	V 1-1	8.4	
	V 1-3	8.3	
	V 2-4	8.5	8.4
	V 2-6	8.5	8.4
	V 3-1	8.4	8.5
	V 3-3	8.2	8.3
	V 4-4	8.3	8.3
	V 4-6	8.4	8.5
再碱化后	I 1-1	11.8	
	I 1-2	11.8	
	I 1-3	11.7	
	I 2-1	12.1	
	I 2-2	11.7	
	I 2-3	12.0	
	II 1-1	11.8	11.7
	II 1-2	11.7	11.7
	II 1-3	11.8	11.7
	II 2-1	12.0	11.7
	II 2-2	11.9	12.1
	II 2-3	12.0	11.8
	III 1-1	11.6	11.7
	III 1-2	11.7	12.0
	III 1-3	11.8	11.7
	III 2-1	11.5	11.6
	III 2-2	11.8	11.7
	III 2-3	11.9	11.8
	IV 1-1	11.8	11.9
	IV 1-2	11.9	11.9
	IV 1-3	12.0	11.8
	IV 2-1	11.6	11.9
	IV 2-2	11.6	11.5
	IV 2-3	11.7	11.7

表 2 钢筋再碱化前后腐蚀电流密度与腐蚀电位

Tab. 2 Corrosion Current Densities and Corrosion Potential of Rebar Before and After Realkalization				
试件组 编号	再碱化前		再碱化后	
	腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	腐蚀电位/ mV	腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	腐蚀电位/ mV
I	14.91	−525.0	0.001 058	−297.0
II	12.21	−534.5	0.029 100	−334.0
III	11.72	−539.0	0.448 600	−329.7
IV	11.19	−583.5	0.437 900	−299.0

置 14 d 后,钢筋自腐蚀电位正移,腐蚀电流明显减小。各组试件再碱化后腐蚀电位均处于-350~

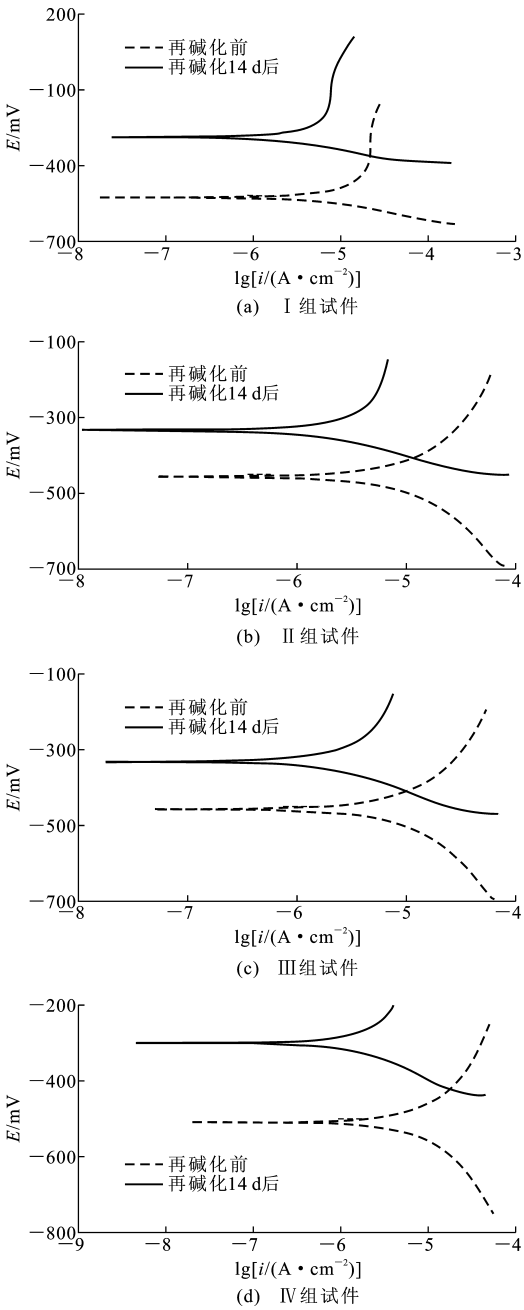


图 9 I~IV 组试件钢筋极化曲线

Fig. 9 Polarization Curves of Rebar in Specimen Groups I-IV

表 3 腐蚀电流密度与腐蚀状态的关系

Tab. 3 Relations Between Corrosion Current Densities and Corrosion States				
腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	<0.1	0.1~0.5	0.5~1.0	>1.0
钢筋腐蚀程度	无锈蚀	轻度锈蚀	中度锈蚀	严重锈蚀

-200 mV 之间,钢筋有 50% 的可能性锈蚀。钢筋自腐蚀电位对于钢筋锈蚀状况仅是一个推断性的判断,真正判定钢筋稳定状态的重要参数是腐蚀电流的大小。第 I, II 组试件腐蚀电流满足钢筋钝化所

需要的腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}} < 0.1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 可以认为钢筋进入钝化状态;第Ⅲ、Ⅳ组试件腐蚀电流密度处于 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间,属于轻度腐蚀。虽然钢筋没有满足进入钝化状态所需要的腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}} < 0.1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,但相比再碱化前已经有了很大的改善,且随着时间推移,钢筋腐蚀电流会进一步减小。总体而言,再碱化取得了良好的效果。

3 结 语

(1)在本文试验条件下,再碱化过程中回路电流轻微波动,且电流随着试件配箍率的增加而增加。同时,电源从钢筋笼的任何位置接入试件对再碱化效果的影响基本没区别。

(2)再碱化后混凝土截面酚酞测试结果说明:再碱化过程是阴极钢筋处电化学反应、碱性溶液在电势差下的电渗作用以及浓度差下扩散作用相互结合、共同作用的过程。

(3)再碱化后纵筋和箍筋周围混凝土的 pH 值有了较大提升,且各纵筋与箍筋之间没有明显区别。说明再碱化对纵筋和箍筋都有良好的修复效果,并且不因钢筋所处位置、钢筋尺寸及钢材种类等因素不同而改变。

(4)再碱化后钢筋自腐蚀电位正移,腐蚀电流明显减小。虽然由于测试时间过早,再碱化后钢筋腐蚀电位和 2 组试件腐蚀电流未达到钢筋钝化的要求,但总体而言,再碱化还是取得了良好的效果。

参考文献:

References:

[1] 屈文俊,熊 炎,张 翔. 碳化混凝土再碱化试验效果

的机理分析[J]. 材料导报,2007,21(5):141-144.

QU Wen-jun, XIONG Yan, ZHANG Xiang. Mechanism Analysis of Experimental Effect of Realkalization Technique for Carbonated Concrete[J]. Materials Review, 2007, 21(5): 141-144.

[2] 屈文俊,熊 炎,郭 莉. 碳化混凝土再碱化影响因素及其耐久性研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(1):21-27.

QU Wen-jun, XIONG Yan, GUO Li. Influencing Factor of Realkalization Technique for Carbonated Concrete and Study of Its Durability[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(1): 21-27.

[3] 王 昆,屈文俊,温华杰,等. 再碱化后碳化混凝土电化学研究[J]. 建筑材料学报,2011,14(1):119-123.

WANG Kun, QU Wen-jun, WEN Hua-jie, et al. Electrochemical Study on Carbonated Reinforced Concrete After Electrochemical Realkalization Treatment [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(1): 119-123.

[4] GB 50344/T—2004, 建筑结构检测技术标准[S]. GB 50344/T—2004, Technical Standard for Inspection of Building Structures[S].

[5] 罗 刚,施养杭. 钢筋混凝土构件中钢筋锈蚀量的无损检测方法[J]. 福建建筑,2002(4):55-57.

LUO Gang, SHI Yang-hang. Review of Non-destructive Methods in Assessment Corrosion in Reinforced Concrete Member[J]. Fujian Architecture & Construction, 2002(4): 55-57.

[6] MILLARD S G, LAW D, BUNGEY J H, et al. Environmental Influences on Linear Polarization Corrosion Rate Measurement in Reinforced Concrete[J]. NDT & E International, 2001, 34(6): 409-417.

《岩土力学》2013 年征订通知

《岩土力学》是全国中文核心期刊、美国《工程索引》(Ei)收录期刊,同时也是中国科学引文数据库、中国科技论文统计源期刊,且被中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)、万方数据库、重庆维普数据库全文收录,欢迎读者通过各期刊网查阅本刊内容;本刊主要报道岩土力学与工程研究和工程获得的新理论、新成果、新方法,主要栏目有:基础理论和实验研究、岩土工程研究、数值分析、测试技术、学术讨论、学术与工程动态、学术讲座等。

《岩土力学》为月刊,大 16 开本,304 页,每月 10 日出版,国内外公开发行人,每期定价 40 元,全年共 480 元。国内邮发代号:38-383,同时自办发行,国外订户可通过中国国际图书贸易总公司订阅。

开户行:中国建设银行武汉市科学院支行

账 号:42001237053050000260

账 户:中国科学院武汉岩土力学研究所

电 话:(027)87198484

地 址:湖北武汉市小洪山中国科学院武汉岩土力学研究所《岩土力学》编辑部

邮 编:430071

E-mail: ytlx@whrsm. ac. cn