

文章编号:1673-2049(2013)01-0055-05

火灾受损混凝土再碱化修复过程中的 导电原理分析

熊焱¹, 屈文俊², 张翔³

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:将电化学再碱化应用于火灾受损后的混凝土结构, 全面、深入地分析了再碱化对火灾受损后中性化混凝土碱性环境修复的机理; 在此基础上对再碱化修复过程中各离子的迁移状况进行了研究; 推导了各离子迁移数的理论模型, 得到了再碱化过程中 OH^- 和 Na^+ 浓度比与其迁移数的关系, 并对再碱化修复过程中的导电原理做了分析研究。结果表明: 电化学再碱化对中性化混凝土碱性环境的修复机理是电解、电渗、扩散和毛细管虹吸等共同作用的结果。该研究为实现电化学再碱化的控制提供了基础性理论依据。

关键词:再碱化修复; 火灾; 混凝土; 离子迁移; 导电原理

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A

Analysis of Conductivity Mechanism of Realkalization Repair on Fire Damaged Concrete

XIONG Yan¹, QU Wen-jun², ZHANG Xiang³

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Architectural Design and Research Institute of Tongji University (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Electrochemical realkalization was introduced and applied in fire damaged concrete structure. Based on an in-depth analysis of repair mechanism of restoring alkaline environment of fire damaged neutral concrete by realkalization technique, the behaviors of ionic transfer in the process of realkalization repair were studied. The theoretical model of ionic transfer quantity was derived, and the relations between concentration ratio and transference numbers of OH^- and Na^+ during the realkalization were obtained. Moreover, the conductivity mechanism of realkalization repair was initially explored. The results show that the repair mechanisms of electrochemical realkalization for neutral concrete alkaline environment include electrochemistry, electroosmosis, diffusion and siphonage, etc. The research provides theoretical basis for the control theory of electrochemical realkalization.

Key words: realkalization repair; fire; concrete; ionic transfer; conductivity mechanism

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(50908088); 广州市珠江科技新星专项项目(2012J2200027); 亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题资助项目(2012ZC26)

作者简介: 熊焱(1978-), 女, 江西南昌人, 讲师, 工学博士, 博士后, E-mail: xyan@scut.edu.cn.

0 引言

近年来,许多学者对高温后混凝土材料的性能损伤机理及其宏观力学性能变化规律做了大量的试验研究。李国华等^[1]、王春华等^[2]对高温后影响混凝土力学性能的原因进行了试验研究,得出粗骨料和水泥胶体在高温后抗折强度、抗压强度降幅都远小于混凝土,在 20℃~300℃之间,水泥胶体强度甚至略有上升,水泥胶体同粗骨料之间存在着热变形不协调。吴波等^[3]利用扫描电子显微镜对不同温度作用后的 C70 和 C85 两种高强混凝土的微观结构进行了观察分析,总结了高强混凝土内部结构随温度的变化规律,分析了高温后高强混凝土宏观力学性能的变化原因。吕天启等^[4]通过 X 射线衍射分析及扫描电镜观测,研究了经过高温、冷却并静置若干时间后混凝土的物相及微观形貌,从化学成分的变化上分析了混凝土强度降低的原因。冯竟竟等^[5]的研究表明,随着温度升高,水泥基材料内部致密的水泥浆体结构逐渐被破坏,300℃后尤为严重,并由表及里逐步深化,孔隙率明显增加,阈值孔径不断增大,“孔粗大化”严重。柳献等^[6]认为,升温至 400℃之前,混凝土材料的质量损失主要来自于内部水分的散失,400℃后氢氧化钙开始分解,石灰石不参与自密实混凝土的水化反应。Papayianni 等^[7]对 3 种成分不同的火山灰或煤灰掺和料混凝土的受火后残余性能进行了研究。Chiang 等^[8]进行了高温后钢筋、混凝土粘结滑移性能的拔出试验,并建立了在混凝土热传导的动态过程中钢筋与混凝土之间的粘结滑移性能数值模型。

高温下的快速中性化使混凝土内部碱性环境降低,钢筋表面的钝化膜被破坏,钢筋将受到锈蚀^[9];同时,高温下混凝土微观结构变差,即孔隙率增大、内部贯通裂缝增多。由此可见,火灾对混凝土耐久性有很大的影响。再碱化主要应用电解、电渗、扩散等多重电化学原理,在钢筋与混凝土之间施加一个电场,在直流电的作用下,高碱性的电解质溶液向钢筋周围的混凝土渗透,恢复钢筋周围混凝土的高 pH 值,使钢筋表面恢复钝化,以减缓或阻止钢筋的继续腐蚀,从而达到修复损伤结构耐久性能的目的。本文中笔者在分析再碱化修复机理的基础上,对再碱化过程中混凝土内部的导电原理进行了研究,为火灾损失后混凝土再碱化修复技术的控制提供了基础性理论依据。

1 再碱化机理分析

电化学再碱化机理如图 1 所示,可以看出,电极处发生电化学反应^[10-11]。再碱化过程中的主要反应和作用如下:

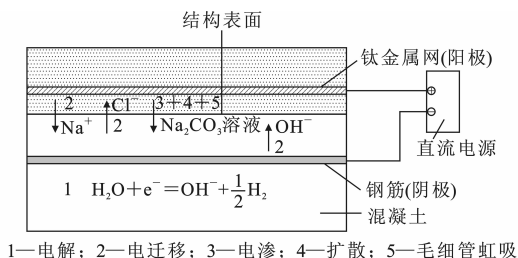
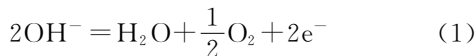


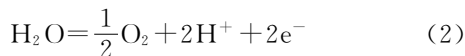
图 1 电化学再碱化机理

Fig. 1 Electrochemical Realkalization Principle

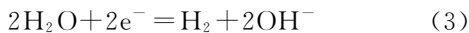
一方面,在阳极碳酸钠(Na_2CO_3)溶液中的阴离子有碳酸根离子(CO_3^{2-})和氢氧根离子(OH^-),而 CO_3^{2-} 不易氧化,不会在阳极放电,而溶液中的 OH^- 将优先在阳极放电且析出氧气,即



另外,在阳极还伴随着电解水反应,即



另一方面,通入的直流电迫使钢筋表面的阳极反应完全停止,因 Na_2CO_3 溶液中只有电极电位代数值小的活泼金属阳离子(Na^+),则水溶液中 H^+ 优先得到电子,在钢筋表面发生如下的阴极反应



式(3)中所产生的 OH^- 一部分向阳极发生电迁移,另一部分滞留在钢筋周围,滞留的那部分 OH^- 会提高钢筋周围混凝土的碱性。

同时,在外加电场作用下,高碱性电解质溶液会透过混凝土多孔的基体,电渗到已经碳化的混凝土基体中,以达到使混凝土碱性恢复的目的。另外,由于电解质溶液浓度差的存在,高碱性 Na_2CO_3 溶液也会通过扩散作用和毛细管虹吸作用进入到混凝土基体内。

综上所述,电化学再碱化修复技术主要是基于钢筋作为阴极的电化学反应产生 OH^- 和高碱性电解质溶液,并通过电渗、扩散和毛细管虹吸作用进入混凝土基体内,从而实现钢筋周围混凝土碱性的恢复。

2 再碱化过程中的导电原理

在实际应用中,一般采用 Na_2CO_3 溶液作为电

解质溶液。 Na_2CO_3 溶液是第二类导体,其中电流是由离子输送的。因此, Na_2CO_3 溶液的电导是离子电荷、离子速度等的函数。再碱化过程中电流在电解质溶液中通过的示意图如图 2 所示。设界面 A 为碳化混凝土的表面,在界面 A 的左侧为 Na_2CO_3 溶液,在界面 A 的右侧为碳化混凝土的孔隙水溶液,电极表面的 2 点之间距离为 d ,其间电位差为 $\Delta\Psi$ 。因此在 Na_2CO_3 溶液中就必然有一个电位梯度 Ψ' ,即

$$\Psi' = -\frac{d\Psi}{dx} \quad (4)$$

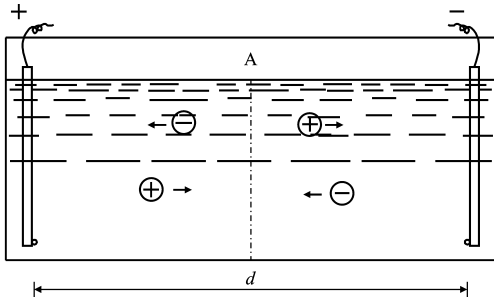


图 2 电流在电解质溶液中通过的示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Currents in Electrolyte Solution

在实际的再碱化装置中,其电力线分布如图 3 所示。为分析方便,近似地取电位梯度 Ψ' 为

$$\Psi' = -\frac{d\Psi}{dx} = \frac{\Delta\Psi}{d} \quad (5)$$

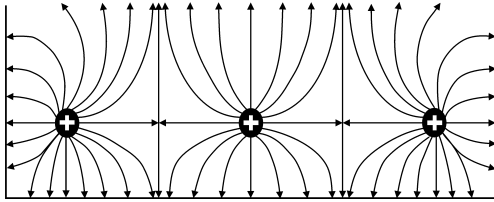


图 3 再碱化装置中性化混凝土内部的电力线分布

Fig. 3 Power Line Powerline Distributions in Neutral Concrete in Realkalization Device

若第 i 种离子的电荷为 q_i ,那么这个离子将受到一个电力 y_{ei} 的作用,即

$$y_{ei} = q_i \Psi' \quad (6)$$

由于离子在有限粘度的介质中移动,所以还受到一个方向相反摩擦力 y_{fi} 的作用,即

$$y_{fi} = k_{fi} v_i \quad (7)$$

式中: k_{fi} 摩擦因数,在这里假定等号左、右两边溶液中的摩擦因数相同; v_i 为速度。

在上述 2 个力的联合作用下,离子将以依赖于其质量 m_i 的某一加速度 a_i 运动,即

$$m_i a_i = q_i \Psi' - k_{fi} v_i \quad (8)$$

$$a_i = \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

式中: t 为时间。

将式(9)中的 a_i 代入式(8)并积分,得到离子在电场中移动的方程式,即

$$v_i = \frac{q_i \Psi'}{k_{fi}} (1 - e^{-\frac{k_{fi} t}{m_i}}) \quad (10)$$

由于内摩擦因数的绝对值比离子的质量大得多 ($k_{fi} t \gg m_i$),所以经过很短的时间后, $e^{-\frac{k_{fi} t}{m_i}}$ 将变得比 1 小得多,因此可以略去。此时,离子将以均匀的速度移动,则式(10)可变为

$$v_i = \frac{q_i \Psi'}{k_{fi}} = \frac{q_i}{k_{fi}} \frac{d\Psi}{dx} = v_i^0 \frac{d\Psi}{dx} = v_i^0 \frac{\Delta\Psi}{d} \quad (11)$$

式中: v_i^0 为给定介质中在单位电位梯度下的离子绝对速度, $v_i^0 = \frac{q_i}{k_{fi}}$ 。

忽略碳化混凝土孔隙水溶液中的其他离子,则溶液中主要有 Na^+ , OH^- , CO_3^{2-} 三种离子存在。因为正离子和负离子是以相反的方向移动,故

$$I = I_{\text{Na}^+} + I_{\text{OH}^-} + I_{\text{CO}_3^{2-}} \quad (12)$$

式中: I 为通过的总电流; I_{Na^+} , I_{OH^-} , $I_{\text{CO}_3^{2-}}$ 分别为与 Na^+ , OH^- , CO_3^{2-} 有关的电流。

若在电解质溶液中选择某一想像的横截面面积为 S_A 的界面,则电流将等于单位时间内通过此界面的正、负电荷数,即

$$I = S_A e (n_{\text{Na}^+} v_{\text{Na}^+}^0 + n_{\text{OH}^-} v_{\text{OH}^-}^0 + 2n_{\text{CO}_3^{2-}} v_{\text{CO}_3^{2-}}^0) \frac{\Delta\Psi}{d} \quad (13)$$

式中: n_{Na^+} , n_{OH^-} , $n_{\text{CO}_3^{2-}}$ 分别为每 1 mL 溶液中 Na^+ , OH^- , CO_3^{2-} 的粒子数; e 为元电荷。

将式(13)等号右边乘以和除以阿伏加德罗常量 N_A ,可得

$$I = S_A (c_{\text{Na}^+} \lambda_{\text{Na}^+}^0 + c_{\text{OH}^-} \lambda_{\text{OH}^-}^0 + 2c_{\text{CO}_3^{2-}} \lambda_{\text{CO}_3^{2-}}^0) \frac{\Delta\Psi}{d} \quad (14)$$

式中: $\lambda_{\text{OH}^-}^0$, $\lambda_{\text{Na}^+}^0$, $\lambda_{\text{CO}_3^{2-}}^0$ 分别为 Na^+ , OH^- , CO_3^{2-} 的离子迁移率, $\lambda_{\text{OH}^-}^0 = F v_{\text{OH}^-}^0$, $\lambda_{\text{Na}^+}^0 = F v_{\text{Na}^+}^0$, $\lambda_{\text{CO}_3^{2-}}^0 = F v_{\text{CO}_3^{2-}}^0$, F 为法拉第常量; c_{Na^+} , c_{OH^-} , $c_{\text{CO}_3^{2-}}$ 分别为 Na^+ , OH^- , CO_3^{2-} 通过界面 A 时的浓度, $c_{\text{Na}^+} = \frac{n_{\text{Na}^+}}{N_A}$, $c_{\text{OH}^-} = \frac{n_{\text{OH}^-}}{N_A}$, $c_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{n_{\text{CO}_3^{2-}}}{N_A}$ 。

在一系列等价离子中,电迁移率随着离子半径的增加而变大。各离子的迁移率彼此差别不大,但 OH^- ,特别是 H^+ 则具有异常高的迁移率,其迁移率比其他离子大 3~8 倍^[12]。因为 CO_3^{2-} 的迁移率

与 Na^+ 的迁移率相差不大, 所以为了简化分析, 把 CO_3^{2-} 的迁移率近似等于 Na^+ 的迁移率, 即 $\lambda_{\text{CO}_3^{2-}}^0 = \lambda_{\text{Na}^+}^0$, 则式(14)可变为

$$I = S_A (c_{\text{Na}^+} \lambda_{\text{Na}^+}^0 + c_{\text{OH}^-} \lambda_{\text{OH}^-}^0 + 2c_{\text{CO}_3^{2-}} \lambda_{\text{Na}^+}^0) \frac{\Delta\Psi}{d} \quad (15)$$

虽然 $\lambda_{\text{Na}^+}^0$ 和 $\lambda_{\text{OH}^-}^0$ 随浓度的变化不大, 随温度的变化比较大, 但是二者的比值 $\frac{\lambda_{\text{OH}^-}^0}{\lambda_{\text{Na}^+}^0}$ 变化不大, 稳定在 4 左右, 因此, 式(15)可变为

$$I = S_A \lambda_{\text{Na}^+}^0 (c_{\text{Na}^+} + 4c_{\text{OH}^-} + 2c_{\text{CO}_3^{2-}}) \frac{\Delta\Psi}{d} \quad (16)$$

Na_2CO_3 是强电解质, c_{Na^+} 等于 2 倍的 $c_{\text{CO}_3^{2-}}$, 而 c_{OH^-} 显然与阴极钢筋表面产生的 OH^- 的数量有关, 因此

$$I = 2S_A \lambda_{\text{Na}^+}^0 (c_{\text{Na}^+} + 2c_{\text{OH}^-}) \frac{\Delta\Psi}{d} \quad (17)$$

又因某种离子迁移数与其迁移速度 v_i^0 、化合价数 z_i 及浓度 c_i 成正比^[13], 即 $t_i = v_i^0 z_i c_i / \sum_i v_i^0 z_i c_i$, 所以

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{Na}^+} &= \frac{v_{\text{Na}^+}^0 z_{\text{Na}^+} c_{\text{Na}^+}}{v_{\text{Na}^+}^0 z_{\text{Na}^+} c_{\text{Na}^+} + v_{\text{OH}^-}^0 z_{\text{OH}^-} c_{\text{OH}^-} + v_{\text{CO}_3^{2-}}^0 z_{\text{CO}_3^{2-}} c_{\text{CO}_3^{2-}}} \\ t_{\text{OH}^-} &= \frac{v_{\text{OH}^-}^0 z_{\text{OH}^-} c_{\text{OH}^-}}{v_{\text{Na}^+}^0 z_{\text{Na}^+} c_{\text{Na}^+} + v_{\text{OH}^-}^0 z_{\text{OH}^-} c_{\text{OH}^-} + v_{\text{CO}_3^{2-}}^0 z_{\text{CO}_3^{2-}} c_{\text{CO}_3^{2-}}} \\ t_{\text{CO}_3^{2-}} &= \frac{v_{\text{CO}_3^{2-}}^0 z_{\text{CO}_3^{2-}} c_{\text{CO}_3^{2-}}}{v_{\text{Na}^+}^0 z_{\text{Na}^+} c_{\text{Na}^+} + v_{\text{OH}^-}^0 z_{\text{OH}^-} c_{\text{OH}^-} + v_{\text{CO}_3^{2-}}^0 z_{\text{CO}_3^{2-}} c_{\text{CO}_3^{2-}}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: t_{Na^+} , t_{OH^-} , $t_{\text{CO}_3^{2-}}$ 分别为 Na^+ , OH^- , CO_3^{2-} 的离子迁移数。

由前面的推导可得, $v_{\text{OH}^-}^0 = \frac{\lambda_{\text{OH}^-}^0}{F}$, $v_{\text{Na}^+}^0 = \frac{\lambda_{\text{Na}^+}^0}{F}$, $v_{\text{CO}_3^{2-}}^0 = \frac{\lambda_{\text{CO}_3^{2-}}^0}{F}$, $\lambda_{\text{CO}_3^{2-}}^0 = \lambda_{\text{Na}^+}^0$, $\lambda_{\text{OH}^-}^0 = 4\lambda_{\text{Na}^+}^0$, $c_{\text{Na}^+} = 2c_{\text{CO}_3^{2-}}$, $z_{\text{Na}^+} = 1$, $z_{\text{OH}^-} = 1$, $z_{\text{CO}_3^{2-}} = 2$, 因此式(18)可变为

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{Na}^+} &= \frac{c_{\text{Na}^+}}{2(c_{\text{Na}^+} + 2c_{\text{OH}^-})} = [2(1 + 2 \frac{c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Na}^+}})]^{-1} \\ t_{\text{OH}^-} &= \frac{2c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Na}^+} + 2c_{\text{OH}^-}} = \frac{2c_{\text{OH}^-}/c_{\text{Na}^+}}{1 + 2c_{\text{OH}^-}/c_{\text{Na}^+}} \\ t_{\text{CO}_3^{2-}} &= \frac{c_{\text{Na}^+}}{2(c_{\text{Na}^+} + 2c_{\text{OH}^-})} = [2(1 + 2 \frac{c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Na}^+}})]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

由式(19)可得 Na^+ 和 OH^- 的浓度比与其迁移数的关系, 见表 1。由表 1 可以看出: t_{Na^+} , t_{OH^-} , $t_{\text{CO}_3^{2-}}$ 随着 $\frac{c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Na}^+}}$ 的变化变动很大, $\frac{c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Na}^+}}$ 越大, 则 t_{OH^-} 越大, t_{Na^+} 和 $t_{\text{CO}_3^{2-}}$ 越小; 反之, $\frac{c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Na}^+}}$ 越小, 则 t_{OH^-} 越

表 1 $c_{\text{OH}^-} (c_{\text{Na}^+})^{-1}$ 与离子迁移数的关系

Tab. 1 Relations Between $c_{\text{OH}^-} (c_{\text{Na}^+})^{-1}$ and Ionic Transfer Quantities

$c_{\text{OH}^-} (c_{\text{Na}^+})^{-1}$	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
t_{Na^+}	0.417	0.250	0.167	0.100	0.071	0.045
t_{OH^-}	0.166	0.500	0.666	0.800	0.858	0.910
$t_{\text{CO}_3^{2-}}$	0.417	0.250	0.167	0.100	0.071	0.045

小, t_{Na^+} 和 $t_{\text{CO}_3^{2-}}$ 越大。在碳化混凝土再碱化刚开始时, 钢筋周围混凝土孔隙内没有 Na^+ 和 CO_3^{2-} (忽略混凝土内部原有的 Na^+ , K^+ , Ca^+ , CO_3^{2-} 等离子), 此时在钢筋阴极处的由阴极反应和电解水反应产生的 OH^- 几乎全部向阳极迁移; 当钢筋周围混凝土孔隙内 Na^+ 逐渐增多时, 就会有一部分 OH^- 滞留在钢筋周围的混凝土孔隙中。但是由于产生的 OH^- 在钢筋表面的局部浓度很高, 因此, 在混凝土再碱化的整个过程中, OH^- 都一直具有很大的迁移数。

实际上, 在进行混凝土再碱化的过程中, 各构件的电阻电压不同, 电流也必定不同, 这样就导致各构件阴极钢筋处 OH^- 的迁移数有一定差异, 但在进行混凝土再碱化的各构件中 OH^- 都一直具有很大的迁移数, 因此假定不论电流大小如何, 各构件中 OH^- 的迁移数 t_{OH^-} 都相同。同时, OH^- 的迁移数 t_{OH^-} 在某个混凝土再碱化的过程中不是一个恒定值, 随着 $\frac{c_{\text{OH}^-}}{c_{\text{Na}^+}}$ 的减小而减小, 可定义 OH^- 的平均迁移数 $t_{\text{OH}^-}^a$ 为

$$t_{\text{OH}^-}^a = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(t_{\text{OH}^-}^1 + t_{\text{OH}^-}^2 + \cdots + t_{\text{OH}^-}^n) t/n}{t} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{j=1}^n t_{\text{OH}^-}^j / n \quad (20)$$

式中: t/n 表示把再碱化时间 t 分成 n 等分; $t_{\text{OH}^-}^j$ 为第 j 时间段内 OH^- 的迁移数。

3 结 语

(1) 通过深入分析得到了电化学再碱化对中性化混凝土碱性环境的修复机理: 再碱化是由电解、电渗、扩散和毛细管虹吸等共同作用, 实现对钢筋周围混凝土碱性的恢复作用的结果。

(2) 通过电化学原理研究得出了再碱化过程中的导电原理, 推导了各离子迁移数的计算模型, 并且得到了再碱化过程中 OH^- 和 Na^+ 的浓度比与其迁移数的关系, 为更加全面研究再碱化过程中各个物理化学对再碱化的贡献以及实现再碱化的控制提供了基础性理论依据。

参考文献:

References:

- [1] 李固华, 凤凌云, 郑盛娥. 高温后混凝土及其组成材料性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 1991, 20(2): 1-5.
LI Gu-hua, FENG Ling-yun, ZHENG Sheng-e. Study on Performance of Concrete After High Temperature and Material Composition[J]. Sichuan Building Science, 1991, 20(2): 1-5.
- [2] 王春华, 李小红, 潘家鼎, 等. 高温(火灾)后混凝土结构强度损伤程度评估方法的探讨[J]. 工程力学, 1994, 11(增): 711-714.
WANG Chun-hua, LI Xiao-hong, PAN Jia-ding, et al. High Temperature (Fire) of Strength of Concrete Structure Damage Assessment Method[J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(S): 711-714.
- [3] 吴波, 袁杰, 杨成山. 高温后高强混凝土的微观结构分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(3): 8-12.
WU Bo, YUAN Jie, YANG Cheng-shan. Analysis of the Microstructure of HSC After High Temperature [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32(3): 8-12.
- [4] 吕天启, 赵国藩, 林志伸. 高温后静置混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 63-70.
LU Tian-qi, ZHAO Guo-fan, LIN Zhi-shen. Experimental Study on Mechanical Properties of Long Standing Concrete After Exposure to High Temperature[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 63-70.
- [5] 冯竟竟, 傅宇方, 陈忠辉, 等. 高温对水泥基材料微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 318-322.
FENG Jing-jing, FU Yu-fang, CHEN Zhong-hui, et al. Effect of High Temperatures on Microstructure of Cement-based Composite Material[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 318-322.
- [6] 柳献, 袁勇, 叶光, 等. 高性能混凝土高温微观结构演化研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 1473-1478.
LIU Xian, YUAN Yong, YE Guang, et al. Study on Pore Structure Evolution of High Performance Concrete with Elevated Temperatures [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(11): 1473-1478.
- [7] PAPAYIANNI J, VALIASIS T. Residual Mechanical Properties of Heated Concrete Incorporating Different Pozzolanic Materials [J]. Materials and Structures, 1991, 24(2): 115-121.
- [8] CHIANG C H, TSAI C L. Time-temperature Analysis of Bond Strength of a Rebar After Fire Exposure [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(10): 1651-1654.
- [9] 张奕, 金伟良. 火灾后混凝土结构耐久性的若干研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 93-96.
ZHANG Yi, JIN Wei-liang. Several Researches on Durability of Post-fire Concrete Structures[J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 93-96.
- [10] 李书进, 沈少波. 日本既有混凝土结构物的质量检验与诊断方法[J]. 混凝土, 2003(10): 54-57.
LI Shu-jin, SHEN Shao-bo. The Quality Inspection and Damage Investigation Methods for Existing Concrete Structures in Japan[J]. Concrete, 2003(10): 54-57.
- [11] MEHTA P K. Concrete Durability—Fifty Years Progress[C]//ACI. Proceedings of the 2nd International Conference on the Durability of Concrete. Atlanta: ACI, 1991: 1-31.
- [12] 安特罗波夫 L I. 理论电化学[M]. 吴仲达, 朱耀斌, 吴万伟, 译. 北京: 高等教育出版社, 1982.
ANTROPOV L I. Electrochemical Theory [M]. Translated by WU Zhong-da, ZHU Yao-bin, WU Wan-wei. Beijing: Higher Education Press, 1982.
- [13] 邓延倬, 何金兰. 高效毛细管电泳[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
DENG Yan-zhuo, HE Jin-lan. High Performance Capillary Electrophoresis [M]. Beijing: Science Press, 2000.

