

# 混凝土中钢筋腐蚀过程的温湿度综合效应

姬永生<sup>a,b</sup>, 徐从宇<sup>b</sup>, 王磊<sup>b</sup>, 申建立<sup>b</sup>, 张博雅<sup>b</sup>

(中国矿业大学 a. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室; b. 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**环境的温度和相对湿度是影响混凝土中钢筋锈蚀速度的重要因素,这2个因素对混凝土中钢筋的腐蚀电流强度的影响并不是孤立的,而是互相交织在一起彼此产生影响的。通过试验研究了温湿度共同作用下混凝土中钢筋腐蚀速度的变化规律。研究表明,温度愈高,钢筋的腐蚀电流强度达到最大峰值时所对应的相对湿度愈大;相对湿度不同,温度升高对钢筋的腐蚀电流强度提高的幅度也不同。

**关键词:**温度;相对湿度;孔隙水饱和度;钢筋腐蚀速度

**中图分类号:** TU352.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0012-05

## Comprehensive Effects of Temperature and Relative Humidity on Rebar Corrosion in Concrete

Ji Yong-sheng<sup>a,b</sup>, XU Cong-yu<sup>b</sup>, WANG Lei<sup>b</sup>, SHEN Jian-li<sup>b</sup>, ZHANG Bo-ya

(a. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering; b. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** The corrosion rate of steel in concrete is highly dependent on the heterogeneous structure of the concrete and the environmental exposure conditions. Temperature and relative humidity are two important environmental factors that simultaneously influence the corrosion process and cannot be separated or isolated from each other. The interaction of temperature and relative humidity for characterizing the corrosion rate has been sufficiently studied. The results show that the higher the temperature is, the greater the relative humidity is when rebar corrosion rate reaches the max, and as to different relative humidity, the increasing extent of rebar corrosion rate with rise in temperature is different.

**Key words:** temperature; relative humidity; degree of pore saturation; rebar corrosion rate

钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性和使用寿命的重要因素。在对现有钢筋混凝土结构进行使用寿命的评估和定量预测中,钢筋的锈蚀速度是一个重要的参数。已有的研究表明<sup>[1-4]</sup>:混凝土内钢筋的腐蚀速度由混凝土自身的材料性质和外部环境的气候条件共同所决定。混凝土材料方面的性质包括混凝土的材料组成、混凝土的密实程度、混凝土的电阻率等,外部环境气候条件包括环境的温度、相对湿度等。学者们在温湿度对钢筋锈蚀速度的影响方面

进行了大量的研究<sup>[5-13]</sup>,但这些研究大都是定性分析,或是单因素下的定量研究。然而环境的温度和湿度这2个因素对钢筋锈蚀并非单独作用,而是互相交织在一起,彼此产生影响,目前关于混凝土中钢筋腐蚀过程的温湿度综合效应的研究较少。

本文通过试验研究了温湿度共同作用下混凝土中钢筋腐蚀速度的变化规律,为建立钢筋锈蚀速度模型,从而预测钢筋混凝土结构的使用寿命提供依据。

收稿日期:2011-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178455)

作者简介:姬永生(1970-),男,博士,副教授,主要从事混凝土耐久性研究,(E-mail)jysbh@126.com。

## 1 混凝土中钢筋腐蚀速率的理论计算方法

为了研究温湿度共同作用下混凝土中钢筋腐蚀速度的变化规律,这里首先介绍混凝土中钢筋腐蚀速率的理论计算方法。混凝土中钢筋腐蚀速度可以用电流强度来表示,根据欧姆定律和腐蚀电化学基本原理(如图 1 所示),混凝土中活化钢筋的腐蚀速度可表示如下<sup>[14]</sup>:

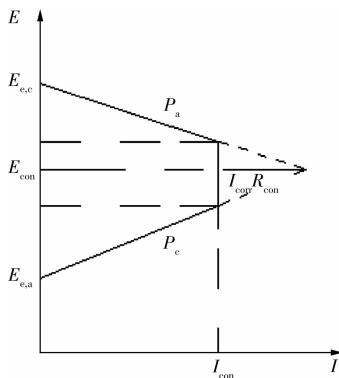


图 1 混凝土中活化钢筋的腐蚀极化曲线图

$$E_{e,c} - E_{e,a} = \Delta E_a + |\Delta E_c| + IR \quad (1)$$

$$\text{其中 } \Delta E_a = IP_a, |\Delta E_c| = IP_c \quad (2)$$

$$I_{\text{corr}} = \frac{E_{e,c} - E_{e,a}}{P_a + P_c + R_{\text{con}}} \quad (3)$$

其中:  $E_{e,a}$ 、 $E_{e,c}$  为阳、阴极电位由 Nernst 方程求得;  $P_a$ 、 $P_c$  为阳、阴极极化率;  $R_{\text{con}}$  为混凝土电阻。

由式(3)可知混凝土中钢筋腐蚀电流强度  $I_{\text{corr}}$  既取决于腐蚀的驱动力——腐蚀电池阴阳极间的电位差( $E_{e,a} - E_{e,c}$ ),也取决于腐蚀的阻力——阳极极化率  $P_a$ 、阴极极化率  $P_c$  和混凝土电阻  $R_{\text{con}}$ 。环境温湿度对混凝土中钢筋腐蚀速度的影响,主要通过影响钢筋腐蚀的阻力——阳极极化率  $P_a$ 、阴极极化率  $P_c$  和混凝土电阻  $R_{\text{con}}$  实现。

## 2 混凝土中钢筋腐蚀过程的温湿度综合效应试验

### 2.1 试件制作

截取直径 6 mm(长约 90 mm)的 HPB235(光圆)普通钢筋段若干,除锈并在两端焊接导线,然后将两端约 20 mm 长的部分用环氧树脂密封,将上述钢筋段分别浇注在图 2 所示的 100 mm×100 mm×20 mm 的试件中,试件为薄片状的目的是为了消除温湿度滞后效应的影响,以保证当环境温度和相对湿度变化时钢筋表面和混凝土表面的温湿度基本保持一致。试件中普通钢筋为钢筋锈蚀速率测定的工

作电极,试件两端的不锈钢板充当辅助电极。

混凝土强度等级为 C20,配合比为  $m_{\text{水泥}} : m_{\text{水}} : m_{\text{砂子}} : m_{\text{石子}} = 1 : 0.60 : 2.3 : 4.5$ 。试件混凝土保护层厚度为 7 mm。试验所用的水泥为江苏巨龙水泥集团生产的 P.C 32.5 复合硅酸盐水泥;石子为粒径 5~10 mm 碎石;砂子为中粗砂,级配良好,  $M_x = 2.65$ ,表观密度 2.64 g/cm<sup>3</sup>,砂子、石子均经冲洗晾干后使用。

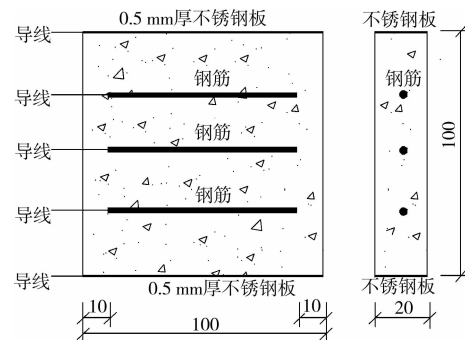


图 2 钢筋混凝土试件

### 2.2 试验步骤

1)将标准养护 28 d 的配筋混凝土试件放于盛有 10% 的 NaCl 溶液的容器中浸泡 90 d,然后连同容器一起将试件放于 20℃ 的调温调湿箱中恒温浸泡 24 h,以使试件内部温度与试验温度相同。

2)将试件从溶液中取出,迅速用干抹布擦干其表面水分,并称取其饱水重量  $G_s$ 。

3)将试件迅速放入 20℃ 恒温箱中的干燥皿中恒温干燥,试验装置见图 3。利用气候自动监测和控制系统,使试验箱内温度保持恒定,通过干燥皿中硅胶干燥剂干燥试件,干燥剂定期烘干脱水。

4)干燥过程中,不断测定其重量  $G_t$  和试件中钢筋的腐蚀电流强度  $I_{\text{corr},t}$  的变化,开始每 1 h 测定一次,6 h 后每 2 h 测定一次,12 h 后每天测定一次。试件重量用精度 0.01 g 的电子天平测定,钢筋的腐蚀电流用电化学工作站测定。

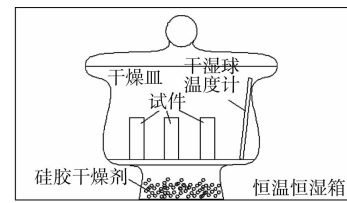


图 3 恒温干燥试验装置

5)将步骤 3)恒温干燥 28 d 的试件从恒温箱中取出,继续放于 10% 的 NaCl 溶液中浸泡 14 d,使其再次充分饱水,然后连同容器一起将试件放于 40℃ 的恒温箱中恒温浸泡 24 h,使试件内部温度与试验

温度相同。

6) 将试件从溶液中取出, 继续放于 40℃ 恒温箱中的呈有浓硫酸的干燥皿中恒温干燥, 不断测定其重量和试件中钢筋的腐蚀电流的变化, 其要求同步步骤 3)。

7) 将步骤 4) 恒温干燥 28 d 的试件从 40℃ 的恒温箱中取出, 再放于 10% 的 NaCl 溶液中浸泡 14 d, 使其再次充分饱水, 然后连同容器一起将试件放于 60℃ 的恒温箱中恒温浸泡 24 h。

8) 将试件从溶液中取出, 继续放于 60℃ 的恒温箱中呈有浓硫酸的干燥皿中恒温干燥 28 d, 不断测定其重量和试件中钢筋的腐蚀电流的变化, 其要求同步步骤 3)。

9) 将测定结束后的试件于 105℃ 的烘箱中恒温干燥 48 h, 称取其绝干重量  $G_0$ 。

### 2.3 腐蚀电流 $I_{\text{corr}}$ 的测定

锈蚀速度测试方法采用线性极化法; 混凝土内钢筋锈蚀速率用腐蚀电流强度表示, 测试仪器采用郑州杜甫仪器厂生产的 DF-2002 电化学分析系统工作站, 根据线性极化法测试原理, 电化学工作站将测试到的钢筋锈蚀极化曲线, 计算出腐蚀体系的极化电阻, 然后用 Stern-Gery 公式计算腐蚀电流, 用来表示钢筋的锈蚀速率。测试装置如图 4 所示。

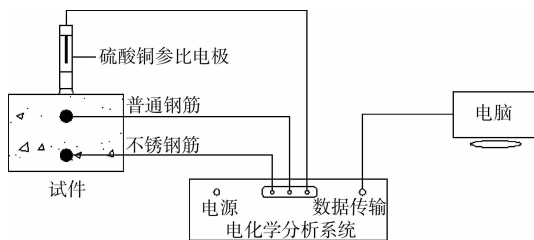


图 4 腐蚀电流  $I_{\text{corr}}$  测量系统

### 2.4 混凝土孔隙饱和度的计算

由公式(1), 计算各温湿度条件下混凝土孔隙饱和度:

$$k = \frac{G_1 - G_0}{G_s - G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $k$  为混凝土孔隙水饱和度, %;  $G_1$  为混凝土试件的重量, kg;  $G_0$  为混凝土试件烘干至恒重时的重量, kg;  $G_s$  为混凝土孔隙水饱和时的重量, kg。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 温度对混凝土中钢筋腐蚀速度的影响

环境温度和混凝土孔隙水饱和度对混凝土中钢筋腐蚀电流强度的影响如图 5 所示。从图中可以看出: 受氯盐侵蚀的钢筋混凝土结构, 在混凝土孔隙水饱和度相同的情况下, 温度愈高, 混凝土中钢筋腐

蚀电流强度愈大。这是因为随着温度升高, 不仅大气环境中的  $O_2$  和水分在混凝土内的扩散速度、钢筋腐蚀电池阴极、阳极腐蚀产物的迁移速度加快, 而且混凝土的电导率增大, 影响腐蚀的阻力——阳极极化率  $P_a$ 、阴极极化率  $P_c$  和混凝土电阻  $R_{\text{con}}$  普遍降低, 混凝土中钢筋的腐蚀速度增大。

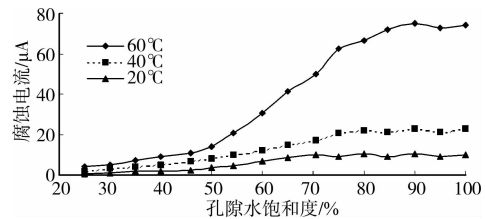


图 5 不同温度钢筋腐蚀电流强度随混凝土孔隙水饱和度的变化

### 3.2 混凝土孔隙饱和度对混凝土中钢筋腐蚀速度的影响

从图 5 中可以看出, 环境温度不变, 在开始的饱水阶段, 钢筋的腐蚀电流最大。随着干燥过程的进行, 混凝土孔隙水饱和度不断下降, 然而混凝土中钢筋的锈蚀速率依然维持在较高的水平, 没有发生显著降低。直至试件中孔隙水饱和度下降到一定值, 钢筋的腐蚀电流强度才发生明显转变。随着混凝土孔隙水饱和度的进一步降低, 钢筋的锈蚀速率急剧下降。所以在恒温条件下, 混凝土中钢筋的锈蚀速率随混凝土孔隙水饱和度的降低分为 2 个阶段: 平稳阶段和大幅的下降阶段。

目前的研究普遍假定, 混凝土中钢筋的锈蚀过程主要受氧扩散的阴极反应所控制, 也就是  $I_{\text{corr}}$  主要取决于氧在混凝土中扩散速率的大小<sup>[15-17]</sup>。依照这种观点, 在整个干燥过程中, 随着混凝土孔隙水饱和度的不断下降, 氧在混凝土中的扩散速率也不断增大, 阴极极化率  $P_c$  降低, 混凝土中钢筋锈蚀速率应该不断增大, 这种假定显然和实际情况不符。从图 4 中可以看出, 钢筋锈蚀速率与中氧在混凝土中的扩散速率的变化趋势是截然相反的。这充分说明氧虽然是钢筋持续锈蚀的重要因素之一, 却绝对不是钢筋锈蚀过程的控制因素, 即使在高湿环境供氧困难的条件下, 钢筋锈蚀速率不但没有降低反而变得更大, 氧对混凝土中钢筋锈蚀过程也没有起到控制作用。其内在的变化机理还有待于进一步研究。

### 3.3 温度和混凝土孔隙饱和度对混凝土中钢筋腐蚀速度的影响

环境温度和混凝土孔隙水饱和度对钢筋的腐蚀电流强度均是通过影响钢筋腐蚀的阻力——阳极极化率  $P_a$ 、阴极极化率  $P_c$  和混凝土电阻  $R_{\text{con}}$  来实现,

但是这两者对钢筋腐蚀电流强度的影响并不是孤立的。从图 5 中可以看出,20℃时,混凝土孔隙水饱和度约在 70%时钢筋的腐蚀电流强度最大,随着温度升高,钢筋的腐蚀电流强度达到最大的峰值向混凝土孔隙水饱和度增大方向移动,40℃时,约在 80%钢筋的腐蚀电流强度最大,而 60℃时,混凝土孔隙水饱和度约在 90%钢筋的腐蚀电流强度最大。

另外,混凝土孔隙水饱和度不同时,温度升高对钢筋的腐蚀电流强度提高的幅度也不相同,混凝土孔隙水饱和度愈大,温度对钢筋的腐蚀电流强度的提高幅度愈大。混凝土孔隙水饱和度为 50%时,60℃的钢筋腐蚀电流强度是 20℃的 4.02 倍,是 40℃的 1.75 倍,而孔隙水饱和度为 85%时,60℃的钢筋腐蚀电流强度是 20℃的 7.83 倍,是 40℃的 3.43 倍。因此,高温高湿是加速钢筋混凝土结构耐久性退化的一种非常有效的方法。

#### 4 环境相对湿度和温度对混凝土中钢筋腐蚀速度的影响

从严格意义上讲,钢筋混凝土耐久性能的退化由混凝土内部的微环境气候条件所决定,而混凝土内部的微环境气候条件则取决于混凝土所处的外部环境气候条件。由于混凝土内部的孔隙水饱和度相对难以准确地测定,而外部环境气候条件(温度和大气相对湿度)的测定能够较为方便、准确地进行,当混凝土内部的微环境与外部环境达到平衡时,混凝土的孔隙水饱和度趋于恒定。因此,可以通过测定外部环境的温度和大气相对湿度来研究温湿度对混凝土内钢筋腐蚀速度的影响。

##### 4.1 混凝土孔隙水饱和度和环境相对湿度定量关系

文献[18]测定不同温度和相对湿度环境下 C20 混凝土的孔隙水饱和度如图 6。从图中可以看出,在混凝土孔隙结构确定的情况下,混凝土中的孔隙水饱和度和环境的温湿度相对应。在温度不变的条件下,环境相对湿度愈大,混凝土中的孔隙水饱和度也愈高。但值得注意的是,对于 C20 混凝土,即使环境相对湿度达 100%,混凝土孔隙也不会被水充满,在 20℃其孔隙饱和度只有 85%左右。对于同一相对湿度,混凝土孔隙水饱和度随环境温度的升高而降低,20℃和 40℃时的混凝土孔隙水饱和度较为接近,均大于 60℃时的孔隙水饱和度。

##### 4.2 环境温度和相对湿度对混凝土中钢筋腐蚀速度的影响

由环境温湿度和混凝土孔隙水饱和度的定量关系(图 5)和钢筋腐蚀速度随混凝土孔隙水饱和度的

变化规律(图 6),可以得出混凝土中钢筋腐蚀速度随环境相对湿度和温度的变化规律如图 7 所示。从图中可以看出:由于环境相对湿度和混凝土孔隙饱和度是一一对应的,在混凝土孔隙水饱和度不高的情况下,随着环境相对湿度增大,混凝土孔隙饱和度不断提高,阳极极化率  $P_a$  和混凝土电阻  $R_{con}$  逐渐降低,而氧在混凝土内的传输愈加困难,阴极极化率  $P_c$  逐渐增大,但混凝土中钢筋腐蚀电流强度却不断增长,直至环境相对湿度达到 100%。这说明环境相对湿度增大的过程中,阳极极化率  $P_a$  和混凝土电阻  $R_{con}$  降低的速度大于阴极极化率  $P_c$  增大的速度,阴极极化率  $P_c$ 、阳极极化率  $P_a$  和混凝土电阻  $R_{con}$  三者之和逐渐减小,混凝土中钢筋腐蚀电流强度不断增长。也说明即使环境相对湿度达到 100%,混凝土也没有达到饱水状态,其孔隙饱和度只有 80%左右,混凝土中氧的供应尚能满足钢筋腐蚀发展的要求,也就是说在大气环境中,氧扩散对混凝土中钢筋的腐蚀过程并不能起到控制作用。

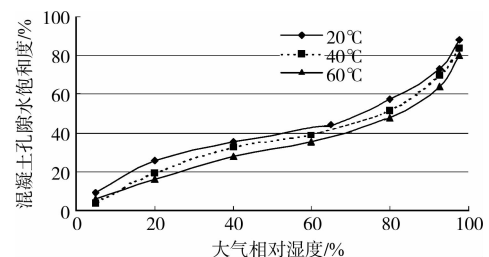


图 6 不同温度和相对湿度环境下混凝土中的孔隙水饱和度

温度与环境相对湿度对混凝土中钢筋腐蚀速度的交互影响和前述分析是一致的。在环境相对湿度一定的情况下,随着温度升高,影响腐蚀的阻力——阳极极化率  $P_a$ 、阴极极化率  $P_c$  和混凝土电阻  $R_{con}$  普遍降低,混凝土中钢筋的腐蚀速度增大。环境相对湿度愈大,温度对钢筋的腐蚀电流强度的提高幅度也愈大。

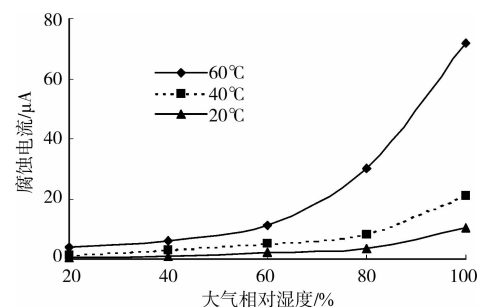


图 7 环境温湿度共同作用下混凝土中钢筋腐蚀速度的变化规律

## 5 结论

根据以上试验研究和理论分析可以得出如下结论:

1) 在混凝土孔隙水饱和度相同的情况下, 温度愈高, 混凝土中钢筋的腐蚀速度愈大, 60℃时钢筋的腐蚀速度大于 40℃时钢筋的腐蚀速度, 40℃时钢筋的腐蚀速度大于 20℃时钢筋的腐蚀速度。

2) 在温度一定的情况下, 混凝土中钢筋的腐蚀速度随混凝土孔隙水饱和度的增大可以分成 2 个阶段: 上升阶段、平稳阶段。也就是说钢筋腐蚀电流强度达到最大时所对应的混凝土孔隙水饱和度不是某一确定值, 而是一个范围。

3) 环境温度和混凝土孔隙水饱和度对混凝土中钢筋的腐蚀电流强度的影响并不是孤立的, 温度愈高, 钢筋的腐蚀电流强度达到最大的峰值时所对应的混凝土孔隙水饱和度愈大。

4) 混凝土孔隙水饱和度不同, 温度升高对钢筋的腐蚀电流强度提高的幅度不同, 混凝土孔隙水饱和度愈大, 温度对钢筋的腐蚀电流强度的提高幅度也愈大。

### 参考文献:

- [1] PECH-CANUL M A, CASTRO P. Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32: 491-498.
- [2] 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: 409-417.
- [3] SURYAVANSHI A K, SCANTLEBURY J D, LYON S B. Corrosion of reinforcement steel embedded in high water-cement ratio concrete contaminated with chloride[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998, 20: 263-281.
- [4] ANDRADE C, KEDDAM M, NOVOA X R, et al. Electrochemical behaviour of steel rebars in concrete; influence of environmental factors and cement chemistry [J]. *Electrochemical Acta*, 2001, 46: 3905-3912.
- [5] ZIVICA V, KRAJCI L, BAGEL L, et al. Significance of the ambient temperature and the steel material in the process of concrete reinforcement corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 1997, 11(2): 99-103.
- [6] 沈德建, 李祖阳, 吴胜兴. 环境温度对混凝土中钢筋锈蚀率的影响[J]. *建筑技术开发*, 2002, 29(3): 34-35. SHEN DE-JIAN, LI ZU-YANG, WU SHENG-XING. The effect of ambient temperature on the corrosion rate of reinforced concrete [J]. *Building Technique*, 2002, 29(3): 34-35.
- [7] 左勇志, 闫玉海, 宋晓冰, 等. 温度对碳化引起的钢筋混凝土腐蚀影响研究[J]. *工业建筑*, 2003, 33(3): 8-10. ZUO YONG-ZHI, YAN YU-HAI, SONG XIAO-BING, et al. The study of temperature effect on the corrosion of reinforced concrete by carbonation [J]. *Industrial Construction*, 2003, 33(3): 8-10.
- [8] GONZALEZ J A, LOPEZ W, RODRIGUEZ P. Effects of moisture availability on corrosion kinetics of steel embedded in concrete[J]. *Corrosion*, 1993(12): 1004-1010.
- [9] ENEVOLDSEN J N, HANSSON C M, HOPE B B. The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24: 1373-1382.
- [10] 阎培渝, 游轶, 崔路, 等. 高含氯混凝土中钢筋宏电池腐蚀速率控制因素[J]. *工业建筑*, 2000, 30(5): 6-9. YAN PEI-YU, YOU YI, CUI LU, et al. Controlling factor of macro cell corrosion rate of reinforcement in concrete with high proportion of chloride[J]. *Industrial Construction*, 2000, 30(5): 6-9.
- [11] DUNSTER A M, BIGLAND D J, HOLTON I R. Rates of carbonation and reinforcement corrosion in high alumina cement concrete [J]. *Bo-Magazine of Concrete Research*, 2000, 52(6): 433-441.
- [12] ANDRADE C, ALONSO C, SARRIA J. Corrosion rate evolution in concrete structures to the atmosphere [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2002, 24: 55-64.
- [13] LOPEZ W, GONZALEZ J A, ANDRADE C. Influence of temperature on the service life of rebars [J]. *Cement and Concrete Research*, 1993, 23: 1130-1140.
- [14] 姬永生. 自然与人工气候环境下钢筋混凝土退化过程的相关性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
- [15] YALCYN H, ERGUN M. The prediction of corrosion rates of reinforcing steels in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(10): 1593-1599.
- [16] LIU T, WEYERS R W. Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures [J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(3): 356-379.
- [17] GONZALEZ J A, MOLINA A, OTERO E, et al. On the mechanism of steel corrosion in concrete; the role of oxygen diffusion [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1990, 150(42): 23-27.
- [18] 姬永生, 司维, 袁迎曙, 等. 混凝土孔隙水饱和度的试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2010(1): 166-168. JI YONG-SHENG, SI WEI, YUAN YING-SHU, et al. Experimental research on degree of pore saturation in concrete [J]. *Sichuan Building Science*, 2010(1): 166-168.