

钢筋混凝土在重盐渍土通电环境中基于Wiener随机过程可靠性分析

路承功¹, 魏智强², 乔宏霞^{1,3}, 李刊¹, 乔国斌¹, 杨博¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州, 730050;

2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州, 730050;

3. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州, 730050)

摘要: 为探究服役环境中腐蚀离子和电流对钢筋混凝土耐久性能的影响, 以3种不同强度等级的钢筋混凝土为研究对象, 将钢筋混凝土棱柱体试件置于重盐渍土中进行恒电流通电加速试验。定期利用电化学工作站和裂缝观测仪进行无损检测, 通过极化曲线和交流阻抗图谱分析钢筋混凝土耐久性退化过程。选择非单调Wiener随机退化过程建模, 利用极大似然法进行参数估计, 根据混凝土裂缝宽度, 结合裂缝破坏准则, 得到腐蚀电流密度在盐渍土通电加速环境中的失效阈值, 并建立通电时间与可靠度的关系曲线。研究表明: 盐渍土通电环境下, 腐蚀性离子通过扩散、渗透及电场吸附进入混凝土内部, 并向钢筋表面迁移, 混凝土内部pH降低, 导电性增强, 极化曲向负电位方向发生较大移动, 腐蚀发生的概率及速率均增加, 交流阻抗图谱呈现出双容抗弧; 通电开始后, 低频容抗弧半径锐减, 并向阻抗实部收缩。混凝土裂缝宽度为0.2 mm时, C35, C40和C45钢筋混凝土腐蚀电流密度失效阈值分别为2.353, 1.817和1.187 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。混凝土强度等级越高, 可靠度保持在1.0时的持续时间越长, 抗侵蚀能力越强。在腐蚀离子与电流耦合作用下, C35, C40和C45这三类试件分别在160, 240和430 h时可靠度降低至1.0以下, 通电时间越长, 钢筋混凝土可靠度越低。

关键词: Wiener随机过程; 电化学; 钢筋混凝土; 盐渍土; 通电加速; 可靠性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



文章编号: 1672-7207(2020)08-2266-11

Reliability analysis of reinforced concrete based on Wiener stochastic process in heavy salt soil electrified environment

LU Chenggong¹, WEI Zhiqiang², QIAO Hongxia^{1,3}, LI Kan¹, QIAO Guobin¹, YANG Bo¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling Built by Province and Ministry of Non-ferrous

收稿日期: 2019-10-25; 修回日期: 2019-11-28

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51168031, 51868044); 中铁一勘院科研开发基金资助项目(13-24-01); 兰州理工大学红柳一流学科建设计划资助(225105) (Projects(51168031, 51868044) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(13-24-01) supported by Research and Development Fund of China Railway First Exploration Institute; Project (225105) supported by Hongliu First Class Discipline Construction Plan of Lanzhou University of Technology)

通信作者: 乔宏霞, 博士, 教授, 博士生导师, 从事混凝土材料耐久性研究; E-mail: qhxlut7706@163.com

Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to explore the influence of corrosion ion and current on the durability of reinforced concrete in the service environment, reinforced concrete prismatic specimens of three strength grades were placed in the heavy saline soil for constant current acceleration test. The electrochemical workstation and crack detector were used for nondestructive testing regularly. The degradation process of reinforced concrete durability was analyzed by polarization curve and alternating current impedance graph. Non-monotone Wiener stochastic degradation process was selected for modeling and maximum likelihood method was used for parameter estimation. According to the crack width of concrete and crack failure criterion, the failure threshold of corrosion current density in the electrified accelerated environment of saline soil was obtained, and the relationship curve between electrified time and reliability was established. The results show that in the electrified environment of saline soil, corrosive ions enter into the concrete through diffusion, infiltration and electric field adsorption, and then migrate to the surface of reinforcement. pH value of the concrete decreases and the conductivity increases. The polarization curve moves toward the negative potential. The probability and rate of corrosion increase, and the alternating current impedance spectrum shows double capacitive reactance arc. At the beginning of power on, the arc radius of low frequency capacitive reactance decreases sharply and shrinks to the real part of impedance. When the crack width is 0.2 mm, the failure thresholds of corrosion current density of reinforced concrete for C35, C40 and C45 are 2.353, 1.817 and 1.187 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectively. The higher the strength grade of concrete is, the longer the reliability is maintained at 1.0, and the stronger the anti erosion ability is. Under the coupling action of corrosive ions and current, the degree of reliability for C35, C40 and C45 specimens decrease to below 1.0 at 160, 240 and 430 h, respectively. The longer the time of power on is, the lower the reliability of reinforced concrete is.

Key words: Wiener random process; electrochemistry; reinforced concrete; saline soil; electrify to accelerate; reliability

混凝土结构因其强度高、可模性好、易于就地取材造价和相对低廉等诸多优点已成为 21 世纪的主要建筑结构形式, 混凝土材料被广泛应用于建筑、铁路和水利水电等基础设施建设领域^[1-2]。然而, 伴随着混凝土建筑物或构筑物大规模建设, 腐蚀^[3]、冻胀^[4]和电流^[5]等因素对钢筋混凝土结构耐久性的破坏已经成为不可忽视的问题, 不仅造成了巨大经济损失, 而且也对钢筋混凝土的服役寿命产生较大的影响^[6-7]。

针对钢筋混凝土耐久性能的劣化, 前人从多方面展开研究^[8-17]。吴灵杰等^[8]通过实体检测腐蚀环境中既有建筑, 分析了不同建筑部位氯离子侵蚀扩散特性; 李镜培等^[9-10]充分考虑扩散时变性和氯离子结合能力, 建立了氯离子侵蚀下寿命预测模型, 重点分析了氯离子浓度和保护层厚度等对混凝土结构寿命的影响。除了海洋中的氯离子, 大气中 CO_2 气体, 水中碳酸盐对混凝土结构造成的

损伤破坏也不容忽视^[11-13], 碳化导致混凝土内氢氧化钙含量减少, 加剧了混凝土裂缝的发展和钢筋腐蚀。此外 CO_2 浓度、相对湿度和温度等因素都对混凝土碳化有着重要影响。通过碳化试验, 修正碳化模型, 实现碳化环境中钢筋混凝土耐久性设计与分析的定量化^[14]。不同于东部沿海城市, 西北内陆地区对混凝土结构的腐蚀主要来自于盐渍土中的腐蚀离子^[15]。乔宏震等^[16]立足西北盐渍土, 通过现场暴露试验, 长期跟踪混凝土耐久性能变化, 揭示其腐蚀劣化机理。在探究影响混凝土耐久性因素和劣化机理的基础上, BINGÖL 等^[17]从材料出发, 寻求提高混凝土结构性能的方法, 极大丰富了混凝土耐久性理论。

从上述研究中可以看到, 当前针对钢筋混凝土耐久性的研究大多关注于氯盐侵蚀、碳化和冻融破坏等方面, 并以海工建筑物耐久性侵蚀劣化作为研究重点。而针对盐渍土环境下的损伤劣化

机理及可靠性分析方面研究较少,尤其在盐渍土环境中进行通电加速方面研究更少。为此,本文考虑腐蚀离子与电流耦合作用,设计室内通电加速试验,利用 Wiener 随机过程建模,研究盐渍土通电加速环境中钢筋混凝土耐久性能及可靠性。

1 试验方案设计

对于地铁工程和电力工程中的钢筋混凝土结构来说,由于机车和电力设备运行时会有部分直流电泄漏到轨道和底座结构周围,形成杂散电流,对钢筋混凝土结构造成较严重破坏。在西北盐渍土地区,特别是格尔木重盐渍土地区,杂散电流与腐蚀离子共同作用,对混凝土建筑物和构筑物破坏更大,部分混凝土结构使用年限仅为 3~5 a。基于此,本文选用 3 种不同配比的钢筋混凝土试件,试件长×宽×高为 100 mm×100 mm×400 mm,钢筋纵向贯穿于试件中部,置于重盐渍土中,通过直流电源模拟电流输出,研究电流对钢筋混凝土耐久性能劣化规律的影响。混凝土配合比及相关物理性能如表 1 所示,其强度为 28 d 龄期测试所得,为了后期测试方便及防止养护时钢筋提前锈蚀对结果造成的影响,裸露钢筋处缠绕铜导线,并用环氧树脂包裹。取自格尔木的重盐渍土在甘肃省土木科学研究所进行土质分析,其腐蚀离子主要有 CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 和 Mg^{2+} 等,且盐渍土中各腐蚀离子含量分别为 96, 153, 6591, 6 609 和 1 566 mg/kg。

恒电流加速法是目前较为常用的通电加速法,能够定量控制钢筋腐蚀程度。为了更加符合自然环境下电流对钢筋腐蚀劣化的规律,参考文献[18]将电流密度设定为 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,对应的恒电流为 20 mA,通电加速腐蚀系统如图 1 所示。待试件养护至 28 d 龄期时,用盐渍土掩埋试件至表面处,2

个试件之间保持 100 mm 距离,间隔处用盐渍土夯实,除上表面以外,其他 5 个面与盐渍土充分接触,石墨电极距离试件表面 50 mm。试验中以钢筋理论质量损失率作为测试控制节点,其与时间的关系如式(1)所示,

$$t = \frac{\Delta m \times Z \times F}{M \times J} \quad (1)$$

式中: t 为通电时间; Δm 为理论钢筋质量损失; Z 为反应电极化学价,取 +2; F 为法拉第常数,取 $96\,500 \text{ C/mol}$; M 为铁的相对分子质量,取 56; J 为电流强度。

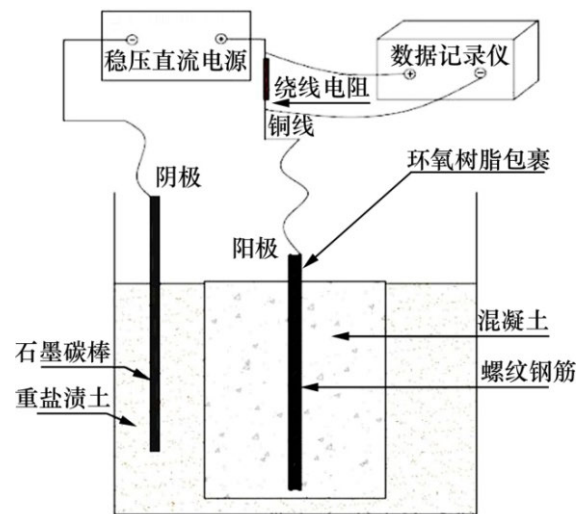


图 1 盐渍土通电加速腐蚀系统

Fig. 1 Electrified accelerated corrosion system of saline soil

利用式(1)计算得到钢筋理论质量损失率分别为 3%, 6%, 9%, 12% 及 15% 时的通电时间为 220, 440, 660, 880 及 1 100 h, 然后进行电化学测试,测试系统选用经典三电极体系,如图 2 所示。电化学工作站采用德国 Zahner 公司生产的 ZENNIUM 高精度工作站。同时试验中密切关注试件表面裂缝发育,采用混凝土裂缝观测仪计量宽度。为了更加符合实际劣化环境,使腐蚀离子具

表 1 混凝土配合比及物理性能

Table 1 Concrete mix proportion and physical properties

混凝土配合比/(kg·m ⁻³)							28 d 强度/MPa	坍落度/mm	强度等级
水泥	粉煤灰	粗骨料	细集料	水	阻锈剂	减水剂			
300	90	1 153	621	148.2	36	4.68	38.6	180	C35
320	96	1 111	681	145.6	36	4.99	43.9	175	C40
340	102	1 100	720	141.5	36	5.75	48.3	175	C45

有必要的传输媒介, 每次测试后对盐渍土喷洒按土质分析报告中腐蚀离子种类及含量配置的盐溶液, 并重新搅拌均匀, 通过湿度测试仪保持其湿度在 50% 水平。为避免电流损失, 盛装箱选用塑料制品。

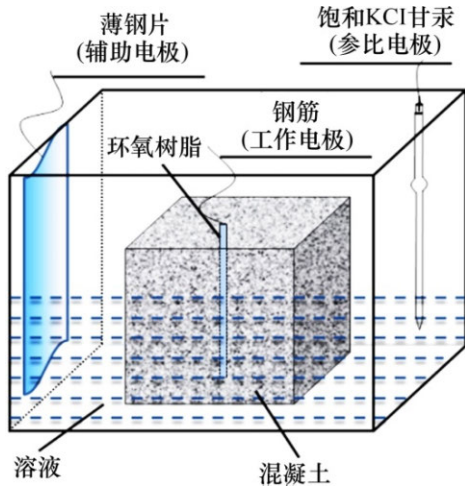


图 2 电化学测试体系

Fig. 2 Electrochemical test system

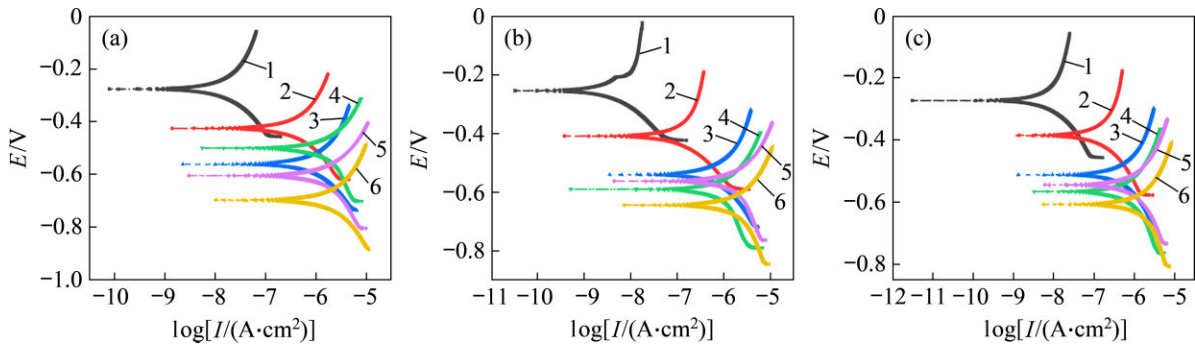
2 耐久性试验结果

2.1 极化曲线

将钢筋混凝土试件置于重盐渍土中进行通电, 不同通电时刻下钢筋混凝土极化曲线如图 3 所示。由图 3 可见: 未通电时, 3 类强度等级钢筋混凝土试件的阴阳两极极化曲线较为不平衡, 其中阳极极化曲线较陡, 而阴极极化曲线较为平缓, 表明钢筋阳极的去极化过程存在较大阻力。这是混凝土水化过程中形成的强碱环境, 在钢筋表面生成

致密的钝化膜所致, 钢筋处于良好的保护状态之中。通电开始后, 混凝土中钢筋作为正极, 石墨碳棒作为负极, 盐渍土中的腐蚀性离子作为电流传输介质, 形成了一个完整的闭合电流回路。由于混凝土材料来源广, 在成型之初就不可避免地带入一些腐蚀性离子, 且水泥等胶凝材料里也有 Cl^- 和 SO_4^{2-} 存在, 电流初始通过时, 混凝土材料中的腐蚀性离子首先向钢筋表面富集迁移, 导致钢筋表面腐蚀性离子浓度逐渐增大。当累积达到临界浓度时, 活性大、半径小的 Cl^- 率先穿过钝化膜, 破坏钢筋钝化膜, 并开始锈蚀, 这一过程称为失钝阶段。随着通电时间的增加, 盐渍土中的腐蚀性离子也通过混凝土孔隙进入试件内部, 进而到达钢筋表面, 钢筋表面离子浓度增加, 钢筋混凝土体系的导电性增强, 腐蚀电流密度增大, 钢筋锈蚀加快。宏观表现为阴阳两极的极化曲线逐渐较对称, 向负电位方向发生较大移动, 腐蚀发生的概率及速率均增加。

从极化曲线图中还可以观察到, 通电开始后钢筋混凝土的阴阳两极平衡电位发生较大幅度负移, 220 h 时 C35 和 C40 试件平衡电位已经超过 -400 mV 的阈值, C45 试件也接近此阈值。而根据文献[19], 当电位超过 -400 mV 时钢筋锈蚀已经完全发生, 表明盐渍土中, 对钢筋混凝土通电极大加速了试件的腐蚀劣化程度。随着通电时间增加, 腐蚀离子不断向混凝土内部和钢筋表面富集, 生成的锈蚀产物在钢筋与混凝土间隙处累积。然而钢筋-混凝土界面处的空间有限, 而锈蚀产物不断增多, 开始对混凝土周围孔壁产生膨胀应力, 同时周围混凝土对锈蚀产物产生反向约束力促使锈



(a) C35; (b) C40; (c) C45

通电时间/h: 1—0; 2—220; 3—440; 4—660; 5—880; 6—1100。

图 3 不同通电时间下极化曲线

Fig. 3 Polarization curve under different conduction time

蚀产物密实度增加,在一定程度上会阻碍 O_2 , H_2O 和钢筋的直接接触,锈蚀过程难度暂时有所增大。一旦钢筋锈蚀量达到一定值,对混凝土周围孔壁产生的拉应力超过混凝土极限拉应力时,混凝土便产生沿钢筋分布的纵向裂纹,进而形成裂缝,此时锈蚀所需要的 O_2 , H_2O 及腐蚀性离子更容易达到钢筋表面,损伤劣化程度进一步增加。

2.2 交流阻抗图谱

通过对通电加速环境下钢筋混凝土体系阻抗谱进行等效,发现阻抗谱能够较好地描述盐渍土中通电时钢筋混凝土的腐蚀劣化规律。其中高频区容抗弧代表混凝土保护层的电阻,低频区的容抗弧反映钢筋表面的保护状态。

不同通电时刻下钢筋混凝土交流阻抗如图 4 所示。由图 4 可见:未通电时,低频阻抗弧半径最大,斜率最高,这是混凝土水化在钢筋表面生成钝化膜对钢筋保护的结果,此时,钢筋拐点处的位置最靠右,表明混凝土保护层对钢筋防护效果好。通电开始后,阻抗图谱发生较大变化,低频容抗弧半径锐减,并向阻抗实部收缩,表明通电极大加速了钢筋表面钝化膜的溶解破坏,钝化膜失去了对钢筋的保护,外界腐蚀性离子及 O_2 可以很容易到达钢筋表面而发生腐蚀。通电时间越长,高频容抗弧越向左移动,表明混凝土的电阻越小,这主要是因为通电时,盐渍土中的腐蚀性离子通过渗透和扩散向混凝土内部和钢筋表面迁移的同时,还会受到电场的加速作用,大量的腐蚀阴离子在电场力作用下不断向混凝土内部迁移,混凝土对钢筋的保护作用减弱,尤其当锈蚀量过多,产生的拉应力超过混凝土极限拉应力导致混凝土

产生裂缝后,锈蚀发生所需要的 O_2 更易进入混凝土,混凝土失去了对钢筋的保护作用,钢筋混凝土劣化加剧。

3 Wiener 理论

Wiener 过程也称为布朗运动过程,它是 Brown 对浸没于液体或气体中小粒子运动的描述时发现的,是概率论中最为重要的随机过程之一,其本质上可以看作是由 Brown 运动驱动的扩散过程。适用于描述因大量微小损伤而导致产品具有增加或减小趋势的非单调退化过程。对于服役于盐渍土中的钢筋混凝土结构,钢筋混凝土的腐蚀劣化并不是一蹴而成,它是各种大量腐蚀离子和电流等破坏因素逐渐劣化综合作用的结果,并且离子浓度、各种离子之间的相互作用存在明显的加速促进作用,因此,可以用 Wiener 过程理论对钢筋混凝土在腐蚀环境下的耐久性能退化进行建模。

Wiener 过程具有多种形态分布,常见的有漂移 Wiener 过程、原点吸收 Wiener 过程、原点反射 Wiener 过程及几何 Brownian 过程等,考虑到钢筋混凝土耐久性指标存在一种逐渐远离初始点的退化趋势,选用带有漂移特性的 Wiener 进行建模。假设 $\{B(t); t>0\}$ 是标准 Wiener 过程,漂移参数为 α , 扩散参数为 β , 则漂移 Wiener 过程 $\{B(t); t>0\}$ 具有如下性质:

- 1) $W(0)=0$;
- 2) $\{W(t); t>0\}$ 具有平稳独立增量,且增量 $W(t+\Delta t)-W(t) \sim N(\alpha\Delta t, \beta^2\Delta t)$;
- 3) 对任意 $W(t)$, 服从均值为 at , 方差为 β^2t 的

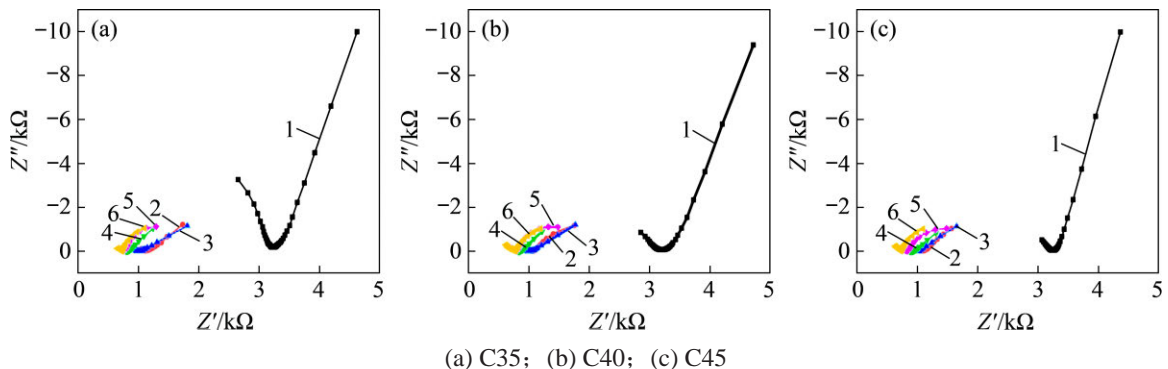


图 4 不同通电时间下交流阻抗图谱

Fig. 4 Alternating current impedance diagram under different time

正态分布。

因此, 带漂移的 Wiener 过程可以表示成

$$W(t) = at + \beta B(t) \tag{2}$$

由于 $t \sim t + \Delta t$ 时刻之间的增量 ΔW 服从正态分布, 因此, 增量 ΔW 可以是大于、等于或者小于 0 的任何情形, 即 Wiener 过程不是严格正则的退化过程, 因而可以很好地描述钢筋混凝土在重盐渍土通电加速环境中的腐蚀劣化过程。

3.1 Wiener 过程建立

从性能退化过程的角度来看, 采用带漂移的 Wiener 过程建模, 认为同一批钢筋混凝土试件的退化过程相同, 即耐久性能退化时漂移系数 α 和扩散系数 β 相同。由于测试过程不可避免地存在人为误差和仪器设备误差, 因此, 假设 $X(t)$ 为钢筋混凝土在时刻 t 的耐久性真实退化量, 而 $Y(t)$ 为耐久性测量值, 则有

$$Y(t) = X(t) + \delta \tag{3}$$

式中: δ 为测量误差, 由于在参数估计时采用归一化处理, 减少了仪器误差和人为误差, 因此, 为进一步简化运算, 可认为 δ 为 0, 则有

$$Y(t) = X(t) \tag{4}$$

由于混凝土结构的耐久性退化趋势为随机过程, 用带偏移的布朗运动进行描述, 则有

$$X_i(t) = at + \beta B(t) \tag{5}$$

式中: $B(t)$ 为标准布朗运动, $E[B(t)] = 0$, $E[B(t_1)B(t_2)] = \min(t_1, t_2)$ 。

假设钢筋混凝土试件的失效阈值为 $D_f (D_f > 0)$, T 为随机过程首次达到或超过耐久性退化量的时间, 则有

$$T = \inf \{t | X(t) > D_f, t \geq 0\} \tag{6}$$

记时刻 t 时 $X(t)$ 的概率密度函数为 $f(x, t)$, 则钢筋混凝土试件在 t 时间内不失效的概率为

$$P\{T > t\} = P\{X(t) < D_f\} = \int_{-\infty}^{D_f} f(x, t) dx \tag{7}$$

可以看出, 只要求出 $f(x, t)$ 就可以得到寿命 T 的分布。文献 [20] 通过利用 Fokker-Planck 方程 (Kolmogrov 前向方程) 便可得到密度函数的形式为

$$f(x, t) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x - at)^2}{2\beta^2 t} \right] - \exp \left(\frac{2\alpha D_f}{\beta^2} \right) \exp \left[-\frac{(x - 2D_f - at)^2}{2\beta^2 t} \right] \right\} \tag{8}$$

将式(8)代入式(7)得到

$$P\{T > t\} = 1 - F(t) = \Phi \left(\frac{D_f - at}{\beta \sqrt{t}} \right) - \exp \left(\frac{2\alpha D_f}{\beta^2} \right) \Phi \left(\frac{-D_f - at}{\beta \sqrt{t}} \right) \tag{9}$$

进一步可得 T 的分布函数和密度函数分别为

$$F_T(t) = \Phi \left(\frac{at - D_f}{\beta \sqrt{t}} \right) + \exp \left(\frac{2\alpha D_f}{\beta^2} \right) \Phi \left(\frac{-D_f - at}{\beta \sqrt{t}} \right) \tag{10}$$

$$f(t) = \frac{D_f}{\sqrt{2\pi\beta^2 t^3}} \exp \left[-\frac{(D_f - at)^2}{2\beta^2 t} \right] \tag{11}$$

3.2 阈值建立

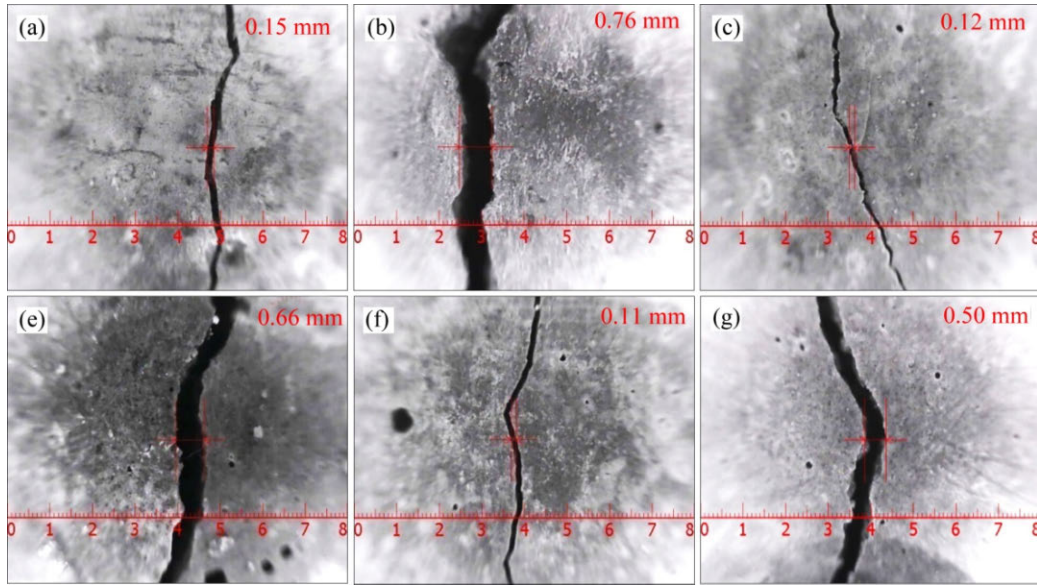
获得钢筋混凝土退化模型后, 为评钢筋混凝土可靠度, 首先需要确定加速环境下钢筋混凝土的失效准则即失效阈值。失效阈值是判断产品是否处于“正常”状态的边界, 其关系到钢筋混凝土试件在腐蚀环境下的服役时间。

在盐渍土通电环境下, 钢筋发生严重的腐蚀劣化, 锈蚀产物对周围孔壁产生的膨胀压力导致混凝土产生沿钢筋分布的纵向裂缝, 如图 5 所示。从图 5 可见: 通电 440 h 即产生裂缝, 随着通电时间增加, 裂缝宽度不断增大, 强度等级越高, 相同通电时长下混凝土裂缝宽度越小。根据文献 [21] 以及重盐渍土通电对混凝土耐久性的作用等级, 以混凝土裂缝宽度为 0.2 mm 时的腐蚀电流密度作为可靠度模型的失效阈值。

首先, 根据宽度发育与时间的关系得到裂缝宽度为 0.2 mm 时的腐蚀通电时间; 然后, 利用腐蚀电流密度与时间的关系得到裂缝宽度为 0.2 mm 时的腐蚀电流密度。为了更加合理地得到通电加速环境下各耐久性退化量的退化轨迹, 避免单一退化轨迹对阈值造成的影响, 采用 3 类函数形式进行拟合, 并以平均值作为最终度量。不同钢筋混

凝土试件裂缝与腐蚀电流密度拟合曲线如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可见：各函数都能很好反映混凝土裂缝开展规律和钢筋腐蚀劣化情况，拟合得到的相关参数如表 2 和表 3 所示。从表 2 和表 3 可见：各函数相关系数均很高，且在加速环境下，

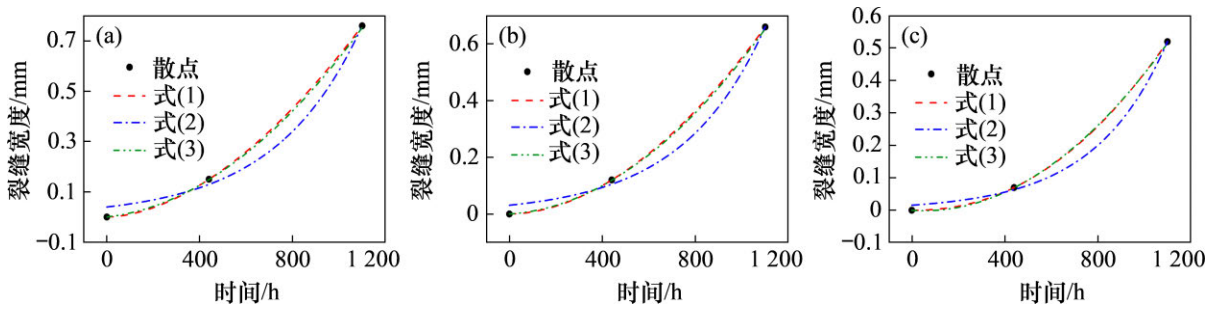
不同试件达到裂缝阈值的时间不同，强度等级越高，达到规定阈值的持续时间越长，此时所对应的腐蚀电流密度也越小，最终得到 C35、C40 和 C45 这三类钢筋混凝土试件的耐久性失效阈值分别为 2.353、1.817 和 1.187 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。



(a) C35-440 h; (b) C35-1 100 h; (c) C40-440 h; (d) C40-1 100 h; (e) C45-440; (f) C45-1 100 h

图 5 不同通电时长下钢筋混凝土裂缝发育特征

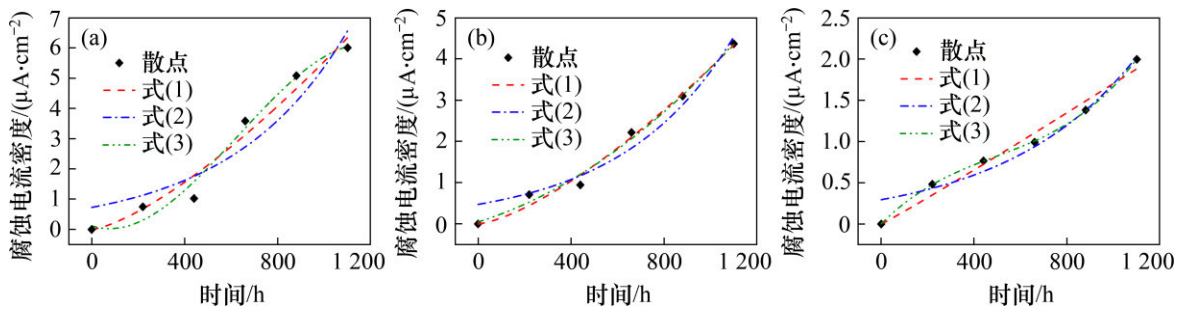
Fig. 5 Crack development of reinforced concrete under different power on time



(a) C35; (b) C40; (c) C45

图 6 混凝土裂缝宽度发展拟合图

Fig. 6 Fitting diagram of concrete crack width development



(a) C35; (b) C40; (c) C45

图 7 腐蚀电流密度拟合图

Fig. 7 Fitting diagram of corrosion current density

表2 裂缝拟合相关系数汇总表

Table 2 Summary of fracture fitting correlation coefficient

试件强度等级	公式	拟合函数形式	参数			R ²	裂缝阈值时腐蚀时间/d
			a	b	c		
C35	(1)	y=ax ^b	3.124×10 ⁻⁶	1.770 93	—	1	518
	(2)	y=ab ^x	3.981×10 ⁻²	1.002 69	—	1	601
	(3)	y=a+bx+cx ²	-7.139×10 ⁻¹⁷	1.065×10 ⁻⁴	5.25×10 ⁻⁷	0.999	530
C40	(1)	y=ax ^b	1.449×10 ⁻⁶	1.860 49	—	1	579
	(2)	y=ab ^x	3.078×10 ⁻²	1.002 79	—	0.995	671
	(3)	y=a+bx+cx ²	-5.552×10 ⁻¹⁷	5.4×10 ⁻⁵	4.91×10 ⁻⁷	0.999	593
C45	(1)	y=ax ^b	1.148×10 ⁻⁷	2.188 53	—	1	711
	(2)	y=ab ^x	1.565×10 ⁻²	1.003 19	—	0.998	800
	(3)	y=a+bx+cx ²	-1.547×10 ⁻¹⁶	-4.95×10 ⁻⁵	4.71×10 ⁻⁷	0.999	714

表3 腐蚀电流密度拟合

Table 3 Corrosion current density fitting

试件强度等级	公式	拟合函数形式	参数				R ²	阈值时腐蚀电流密/(μA·cm ⁻²)
			a	b	c	d		
C35	(1)	y=ax ^b	3.96E-4	1.382 00	—	—	0.951	2.430
	(2)	y=ab ^x	0.730 03	1.002 00	—	—	0.904	2.191
	(3)	y=a+bx+cx ² +dx ³	0.120 66	-0.002 49	1.72×10 ⁻⁵	-9.15×10 ⁻⁹	0.982	2.439
C40	(1)	y=ax ^b	2.181 03	1.413 16	—	—	0.984	1.905
	(2)	y=ab ^x	0.472 43	1.002 06	—	—	0.964	1.675
	(3)	y=a+bx+cx ² +dx ³	0.046 50	0.001 76	1.95×10 ⁻⁶	1.75×10 ⁻¹¹	0.981	1.872
C45	(1)	y=ax ^b	0.001 28	1.041 84	—	—	0.959	1.252
	(2)	y=ab ^x	0.294 69	1.001 76	—	—	0.955	1.087
	(3)	y=a+bx+cx ² +dx ³	0.002 00	0.002 84	-3.59×10 ⁻⁶	2.42×10 ⁻⁹	0.939	1.123

3.3 Wiener 参数估计

设共有 n(n=3)个钢筋混凝土试件进行盐渍土环境下通电加速试验, 试件 i 初始时刻 t₀ 耐久性退化量 X_{i0} 取 0, 在 t_{i1}, ..., t_{im_i} 时刻试件耐久性退化量分别为 X_{i1}, ..., X_{im_i}, 如图 8 所示。记 ΔX_{ij}=X_{ij}-X_{ij-1}, 为钢筋混凝土试件 i 在相邻时刻的耐久性退化量, Δt_{ij}=t_{ij}-t_{ij-1}, 为各试件的测量间隔, 其中, j 为检测钢筋混凝土耐久性的次数, 且 j=1, 2, ..., m_i。

由 Wiener 过程性质可知

$$\Delta X_{ij} \sim N(\alpha \Delta t_{ij}, \beta^2 \Delta t_{ij}) \quad (12)$$

因此, 得到该退化模型参数的似然函数为

$$L(\alpha, \beta^2) =$$

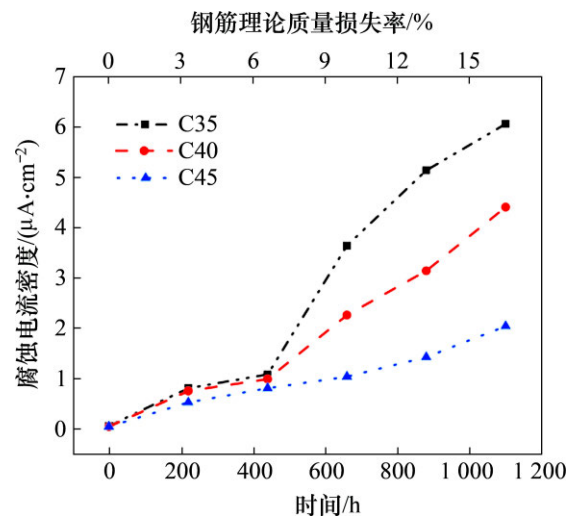


图8 钢筋混凝土耐久性经时变化轨迹

Fig. 8 Time dependent change track of reinforced concrete durability

$$\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i} \frac{1}{\sqrt{2\beta^2 \pi \Delta t_{ij}}} \exp \left[-\frac{(\Delta X_{ij} - \alpha \Delta t_{ij})^2}{2\beta^2 \Delta t_{ij}} \right] \quad (13)$$

由式(13)可直接求得漂移参数 α 和扩散参数 β^2 的极大似然估计如下

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n X_{imi}}{\sum_{i=1}^n t_{imi}} \quad (14)$$

$$\beta^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(\Delta X_{ij})^2}{\Delta t_{ij}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_{imi} \right)^2}{\sum_{i=1}^n t_{imi}} \right] \quad (15)$$

利用式(14)和(15)得到各钢筋混凝土试件的扩散系数和漂移系数,以均值作为最终参数估计值。本次试验中各强度等级钢筋混凝土试件参数估计值如表4所示。

表4 钢筋混凝土 Wiener 参数估计值

Table 4 Estimated values of reinforced concrete Wiener parameters

参数	C35	C40	C45
α	$2.237 01 \times 10^{-3}$	$2.082 9 \times 10^{-3}$	$1.450 4 \times 10^{-3}$
β	$4.694 9 \times 10^{-4}$	$1.879 3 \times 10^{-4}$	$5.604 5 \times 10^{-5}$
阈值	2.439 0	1.904 5	1.252 3

4 基于 Wiener 钢筋混凝土可靠性

将极大似然法计算得到的估计参数和失效阈值同时代入可靠度函数,得到钢筋混凝土试件的可靠度曲线如图9所示。由图9可见:钢筋混凝土试件在盐渍土通电加速时可靠度曲线呈现出三阶段变化特点,即初期可靠度未出现下降,保持在1.0,表明钢筋混凝土抗侵蚀性能良好;中期可靠度加速下降,表明侵蚀作用明显,量变积累已引起质变,钢筋混凝土性能劣化;后期可靠度降为0,钢筋混凝土失效破坏。

3类试件的可靠度曲线相似,但前期和中期的持续时间差异明显。对于C45钢筋混凝土试件,第1阶段持续时间最长,在430 h时才出现下降,C40和C35试件持续时间明显缩短,分别在240 h和160 h出现下降,表明强度等级越高的混凝土具有

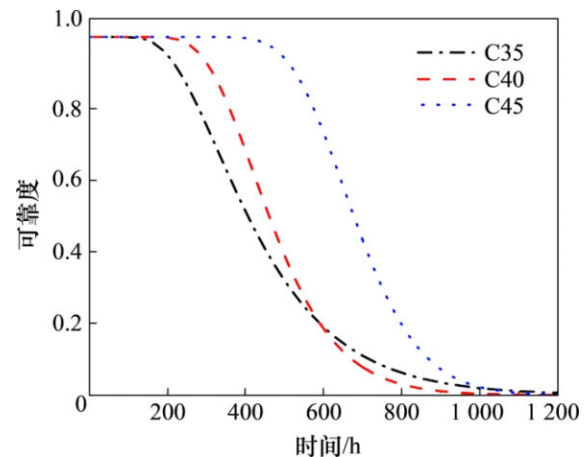


图9 钢筋混凝土可靠度曲线

Fig. 9 Reliability curve of reinforced concrete

更好的抗侵蚀劣化性能。这主要是因为混凝土强度等级越高,其水化后越密实,混凝土内部闭口毛细微孔较多,而表面开口孔隙较少,盐渍土中腐蚀性离子通过混凝土到达钢筋表面时需要更长、更曲折的路径。当通电破坏钢筋表面的钝化膜后,盐渍土中的腐蚀性离子通过渗透、扩散及电场作用到达钢筋表面,在 O_2 和 H_2O 共同存在时便发生氧化还原反应,钢筋锈蚀。通电时间越长,钢筋表面腐蚀离子富集量越大,整个电流回路的导电性越强,锈蚀量越大,对混凝土产生的膨胀压力也越大,钢筋混凝土试件的破坏越大。

从图9还观察到:C45在第2阶段的可靠度曲线一直在其他2类试件的上方,表明C45混凝土抗腐蚀离子与电流耦合侵蚀能力最好。且550 h之前,C40试件可靠度一直比C35试件的高,而在550 h后,C40试件可靠度比C35试件的低,究其原因主要是:腐蚀中后期,相比较于C40试件,C35试件钢筋表面生成更多的腐蚀产物,附着在钢筋基体表面,阻碍了钢筋与 O_2 和 H_2O 的直接接触,导致钢筋锈蚀发生的概率及速率有所降低,以腐蚀电流密度退化指标得到的可靠度略高于C40试件的可靠度。

5 结论

1) 通电加速环境下,盐渍土极化曲线由初始时刻阳极极化曲线陡峭,阴极极化曲线较为平缓

的非对称状逐渐向阴阳两极极化曲线均较平缓的对称状变化,并向腐蚀电流密度增大和负电位方向发生较大移动。

2) 交流阻抗图谱呈双容抗弧,在盐渍土通电加速环境中,低频容抗弧半径锐减,并向阻抗实部收缩,通电时间越长,高频容抗弧越向左移动,混凝土的电阻越小,对钢筋保护作用越弱。

3) 盐渍土中腐蚀性阴离子通过扩散、渗透及电场吸附进入混凝土内部,并向钢筋表面迁移,锈蚀产物对周围混凝土产生较大膨胀应力,产生沿钢筋纵向分布的裂缝。

4) 当裂缝宽度为0.20 mm时,C35,C40和C45试件在盐渍土通电加速环境下的腐蚀电流密度失效阈值分别为2.353,1.817和1.187 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

5) 通电加速时,盐渍土可靠度曲线呈三阶段变化,即初期可靠度保持1.0,中期加速下降,后期降至为0,C45钢筋混凝土试件抗侵蚀能力最好,第1阶段持续时间最长,C40次之,C35试件最短,强度等级越高,相同通电时长下钢筋混凝土可靠性越大。

参考文献:

- [1] SU Yu, WU Chengqing, LI Jun, et al. Development of novel ultra-high performance concrete: From material to structure [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 517–528.
- [2] YOO D Y, YOON Y S. A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2016, 10(2): 125–142.
- [3] CAO Zhonglu. Corrosion behaviors of reinforcing steel in concrete with various moisture contents[J]. *Key Engineering Materials*, 2019, 805: 100–105.
- [4] 姜乐, 翁兴中, 颜祥程, 等. 冻融作用下混凝土的扩散系数与损伤演化规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(8): 3118–3123.
JIANG Le, WENG Xingzhong, YAN Xiangcheng, et al. Moisture diffusion coefficient and internal deterioration evolving rule of concrete exposed to freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2015, 46(8): 3118–3123.
- [5] TANG Kangkang. Stray alternating current(AC) induced corrosion of steel fibre reinforced concrete[J]. *Corrosion Science*, 2019, 152: 153–171.
- [6] JAMES A, BAZARCHI E, CHINIFORUSH A A, et al. Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 224: 1026–1039.
- [7] WITTMANN F H, ZHAO Tiejun, JIANG Fuxiang, et al. Influence of combined actions on durability and service life of reinforced concrete structures exposed to aggressive environment[J]. *Restoration of Buildings and Monuments*, 2012, 18(2): 105–112.
- [8] 吴灵杰, 寇新建, 周拥军, 等. 既有混凝土码头的时变氯离子扩散过程[J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(4): 444–449.
WU Lingjie, KOU Xinjian, ZHOU Yongjun, et al. Time-dependent chloride transport in existing concrete docks [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2017, 51 (4): 444–449.
- [9] 李镜培, 李鹤. 海洋环境下混凝土方桩使用寿命预测模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(9): 1371–1376.
LI Jingpei, LI He. Service life prediction model of concrete square piles in marine environment[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(9): 1371–1376.
- [10] 邵伟, 李镜培. 氯离子侵蚀钢筋混凝土管桩的使用寿命预测[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(12): 1820–1825, 1839.
SHAO Wei, LI Jingpei. Service life prediction of reinforced concrete pipe pile due to chloride ion corrosion [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(12): 1820–1825, 1839.
- [11] 彭里政俐, MARK G. Stewart. 气候变化对中国钢筋混凝土基础设施碳化腐蚀及破坏风险的影响[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(10): 61–69.
PENG Lizhengli, MARK G. Stewart. Climate change effects on carbonation-induced corrosion and damage risks of RC infrastructure in China[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2014, 47(10): 61–69.
- [12] 孔丽娟, 韩梦迪, 吴志刚. 碳化对污水环境下混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8): 1117–1125.
KONG Lijuan, HAN Mengdi, WU Zhigang. Effect of carbonation on concrete performance in sewage environment [J]. *Journal of Silicate*, 2018, 46 (8): 1117–1125.
- [13] ZHAO Shunbo, LIANG Na, MA Xiaolu, et al. Experiment of carbonization for wet-sieving fine aggregate concrete made from ordinary concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 201: 2887–2890.

- [14] 余波, 成荻, 杨绿峰. 混凝土结构的碳化环境作用量化与耐久性分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 51-59.
YU Bo, CHENG Di, YANG Lüfeng. Quantification of environmental effect for carbonation and durability analysis of concrete structures[J]. Journal of Civil Engineering, 2015, 48 (9): 51-59.
- [15] 夏文俊, 赵阳, 周欣, 等. 盐渍土腐蚀机理与防腐措施分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(S1): 11-15.
XIA Wenjun, ZHAO Yang, ZHOU Xin, et al. Analysis of corrosion mechanism of saline soil and prevention measures [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(S1): 11-15.
- [16] 乔宏霞, 朱彬荣, 陈丁山. 西宁盐渍土地区混凝土劣化机理试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(4): 805-815.
QIAO Hongxia, ZHU Binrong, CHEN Dingshan. Experimental study of the deterioration mechanism of concrete in Xining saline soil area[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(4): 805-815.
- [17] BINGÖL A F, BALANEJI H H. Determination of sulfate resistance of concretes containing silica fume and fly ash[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2019, 43(S1): 219-230.
- [18] TANG Fujian, LIN Zhibin, CHEN Genda, et al. Three-dimensional corrosion pit measurement and statistical mechanical degradation analysis of deformed steel bars subjected to accelerated corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 104-117.
- [19] 乔国富. 混凝土结构钢筋腐蚀的电化学特征与监测传感器系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2008: 21-22.
QIAO Guofu. Electrochemical characteristics and monitoring sensor system of the corrosion of the steel bar in concrete structure[D]. Harbin: Harbin University of technology. School of Civil Engineering, 2008: 21-22.
- [20] COX D R, MILLER H D. The theory of stochastic processes [M]. London: Routledge, 2017: 55-56.
- [21] GB 50010—2010. 混凝土结构耐久性设计规范[S].
GB 50010—2010. Durability design specification for concrete structures[S].

(编辑 秦明阳)