

文章编号:1007-9629(2021)05-0986-08

利用 Wiener 过程探究镁水泥混凝土中涂层钢筋 在盐类环境下的腐蚀寿命

乔宏霞^{1,2}, 杨振清¹, 王鹏辉¹, 温少勇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 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要:采用氯盐溶液和硫酸盐溶液浸泡镁水泥钢筋混凝土构件,使构件中的涂层钢筋加速锈蚀,并利用电化学工作站进行电化学试验;以腐蚀电流密度作为钢筋耐久性退化指标,建立一元 Wiener 过程预测模型进行钢筋腐蚀寿命预测.结果表明:在氯盐溶液环境下,镁水泥混凝土构件中的钢筋受腐蚀问题较之硫酸盐溶液环境更为突出,且涂层在 2 种盐溶液环境中均对钢筋起到了较好的防护效果;在氯盐溶液环境中,涂层钢筋在 1 500 d 附近进入中等腐蚀阶段,在硫酸盐溶液环境中,涂层钢筋在 22 000 d 进入中等腐蚀阶段.

关键词:镁水泥混凝土;电化学;氯盐;硫酸盐;Wiener 过程

中图分类号:TU528.571

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.012

Corrosion Life Investigation of Coated Steel Bars in Magnesium Cement Concrete under Salt Solution Environment Using Wiener Process

QIAO Hongxia^{1,2} YANG Zhenqing¹, WANG Penghui¹, WEN Shaoyong¹

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

2. Gansu Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Reduction, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The magnesium cement reinforced concrete components were soaked in chloride and sulfate solutions to accelerate the corrosion of the coated steel bars in the components. The electrochemical workstation was used for electrochemical tests; the corrosion current density was used as the durability degradation index of the steel bars to establish a unary Wiener process. The prediction model was used to predict the corrosion life of steel bars. The results have shown that the corrosion of steel bars in magnesium cement concrete components is more prominent in the chloride salt solution environment than in the sulfate solution environment, and the coating has a better protective effect on the steel bars in the two salt solution environments. In the chloride salt solution environment, the coated steel bars enter a moderate corrosion stage around 1 500 days, and the coated steel bars in sulfate solution environment enter a moderate corrosion stage at 22 000 days.

Key words: magnesium cement concrete; electrochemistry; chloride salt; sulfate; Wiener process

中国西北地区气候干旱,水分容易蒸发,受盐分流动迁移的影响,形成了大片盐渍土地区^[1].中国西北盐渍土地区占世界盐渍土总面积 2.2%.通过对甘

肃、青海和新疆盐渍土地区成分测定,发现这些盐渍土的主要成分是氯盐和硫酸盐^[2].盐渍土地区土壤中硫酸盐和氯盐对建筑物腐蚀严重,普通硅酸盐水泥

收稿日期:2020-07-01; 修订日期:2020-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51468039,51868044)

第一作者:乔宏霞(1977—),女,山西应县人,兰州理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:qhxlut7706@163.com

在这些地区往往几年内就被严重破坏,无法达到使用设计年限^[3-4].氯氧镁水泥作为一种 $MgO-MgCl_2-H_2O$ 体系组成的镁质胶凝材料^[5-6],具备很好的抗盐卤腐蚀能力^[7],在中国西北盐渍土地区具有适用性.但是由于镁水泥本身对钢筋有腐蚀性,使其应用范围受限.如果采用涂层来保护镁水泥混凝土中的钢筋,将有可能实现镁水泥混凝土在中国西北盐渍土地区的全面应用^[8-11].

通过电化学工作站对镁水泥混凝土中的钢筋持续监测 720 d,发现钢筋涂层可以有效降低其腐蚀程度.由于腐蚀电流密度能够直观反映镁水泥混凝土构件的结构损伤速率,因此将其作为耐久性退化指标^[12],试验时对腐蚀电流密度进行持续监测;而 Wiener 过程是一个独立增量过程,可以通过当前试验数据信息来预测未来的数据信息,反映产品性能退化过程,因此被广泛应用于可靠度建模中. Wiener 过程已应用于航空发动机性能可靠性预测、电路故障特征优化、森林物种多样性保育评估等,但是针对

镁水泥混凝土中涂层对钢筋的防护效果方面尚缺乏应用^[13-15].为了探究盐溶液环境中涂层对镁水泥混凝土中钢筋的保护能力,本文以腐蚀电流密度作为退化指标,利用 Wiener 过程来预测钢筋的腐蚀寿命.

1 试验

1.1 试验材料

镁水泥钢筋混凝土构件主要组成为:轻烧氧化镁(MgO)、氯化镁($MgCl_2$)、粗细骨料、粉煤灰、减水剂、耐水剂和钢筋.钢筋涂层采用内含超细锌铝鳞片的达克罗(DKL)涂层,其主要成分(质量分数)见表1;轻烧 MgO 和 $MgCl_2$ 均取自格尔木市察尔汗盐湖氯化镁厂;细骨料取自兰州当地河砂;粗骨料采用兰州建筑企业施工用的石子;I级粉煤灰;减水剂选用 JW-IV 萘系高效减水剂;选择磷酸作为耐水剂;选择 HPB300 钢筋,钢筋屈服强度 $f_y=300\text{ N/mm}^2$.镁水泥钢筋混凝土配合比见表2.

表1 达克罗涂层主要成分

Table 1 Main components of DKL coating

						$w/\%$
Zinc powder	Aluminum powder	Reducing agent	Surfactant	Chromium anhydride	Lubricant	
15.0-30.0	5.0-10.0	0.5-1.5	0.2-0.5	1.0-3.0	1.0-5.0	

表2 镁水泥钢筋混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of magnesium cement reinforced concrete

								kg/m^3
MgO	$MgCl_2$	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water reducer	Water repellent	Water	Fly ash	
388.95	147.81	625.00	1 162.10	16.20	4.60	136.00	69.00	

1.2 试验方案

试验所用钢筋为长度 115 mm、直径 12 mm 的光圆钢筋.首先对钢筋表面进行去污处理,再进行酸洗、碱洗.在钢筋表面涂刷的 DKL 涂层平均厚度控制在 0.2 mm.将无涂层和有涂层的钢筋分别置于 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 镁水泥混凝土试块中,制成 2 组镁水泥钢筋混凝土试件,混凝土保护层厚度均设置成 25 mm.将 2 组钢筋混凝土试件分别浸泡在 1.5 mol/L NaCl 溶液和 $1.5\text{ mol/L Na}_2\text{SO}_4$ 溶液中,每隔 90 d 测定一次电化学参数,到 720 d 止;测试仪器为 CS350 电化学工作站.仪器中辅助电极为薄钢片,参比电极为 KCl 甘汞,电化学工作站三电极测试系统示意图见图 1.腐蚀电流密度 i_{corr} 与钢筋腐蚀程度对应关系见表 3.

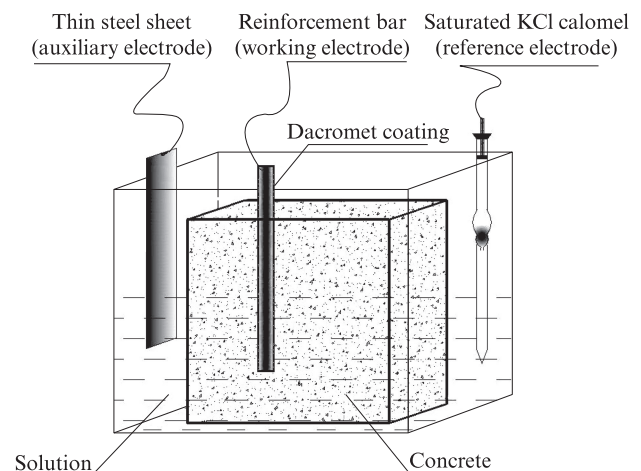


图1 三电极系统电解池示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrolytic cell of three electrode system

表3 腐蚀电流密度与钢筋腐蚀程度对应关系

Table 3 Corresponding relationship between corrosion current density and corrosion degree of reinforcement

$i_{\text{corr}} \leq 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 < i_{\text{corr}} \leq 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2 < i_{\text{corr}} \leq 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$i_{\text{corr}} > 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
No corrosion	Low corrosion	Moderate corrosion	Serious corrosion

2 结果与讨论

2.1 氯盐溶液环境中涂层钢筋与裸露钢筋极化曲线

图2、3为氯盐溶液环境中,裸露钢筋和涂层钢筋的极化曲线.图中 I 为电流密度; E 为钢筋的开路电位值.

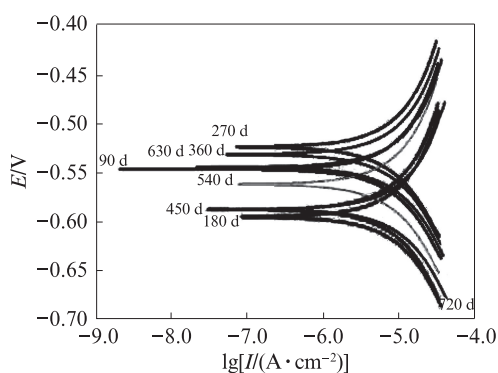


图2 氯盐溶液环境中的裸露钢筋极化曲线

Fig. 2 Polarization curves of bare steel bar in chloride salt solution environment

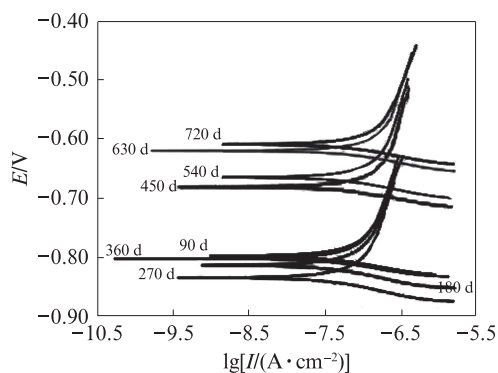


图3 氯盐溶液环境中的涂层钢筋极化曲线

Fig. 3 Polarization curves of coated steel bar in chloride salt solution environment

由图2、3可见:在氯盐溶液环境中,90 d时裸露钢筋开路电位值要比涂层钢筋开路电位值大,且涂层钢筋极化曲线中阳极曲线陡峭、阴极曲线平缓,说明涂层对腐蚀的进行有阻碍作用;90~180 d时,裸露钢筋和涂层钢筋极化曲线中开路电位值均向负向移动,裸露钢筋中电位偏移程度更大.结合表4可知,裸露钢筋从90 d时就处于严重腐蚀状态,原因是镁水泥本身含有盐卤成分,其中的 Cl^- 破坏了钢筋表面“钝化膜稳定”的高碱度环境,使得裸露钢筋遇

到腐蚀介质侵入时几乎没有抵抗能力而受到严重腐蚀;180~270 d时,裸露钢筋开路电位值大幅度向正向偏移,此过程中,裸露钢筋表面发生腐蚀,产生Fe的氧化物,这些腐蚀产物充当保护层而对腐蚀起到了阻碍作用,因此裸露钢筋腐蚀电流密度出现下降趋势,但仍处于严重腐蚀阶段,说明氧化产物对腐蚀介质向钢筋内部渗透的阻碍作用有限;270~720 d时,涂层钢筋开路电位值正向偏移程度较大,此过程中涂层中所含金属Zn、Al反应生成碱式碳酸锌($\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$)和碱式氯化铝($\text{Al}_5\text{Cl}_3(\text{OH})_{12}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$),Zn、Al在Fe发生腐蚀前优先发生反应,且碱式碳酸锌($\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$)和碱式氯化铝($\text{Al}_5\text{Cl}_3(\text{OH})_{12}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$)又能充当保护层起到隔绝腐蚀介质的作用.整体上看,在90~720 d氯盐溶液环境中,裸露钢筋均处于严重腐蚀阶段,涂层钢筋基本处于低腐蚀阶段,且其在180~270 d附近处于未受腐蚀阶段.

表4 氯盐溶液环境中裸露钢筋与涂层钢筋的腐蚀电流密度

Table 4 Corrosion current density of bare steel bars and coated steel bars in chloride salt solution environment

Status of steel bar	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$							
	90 d	180 d	270 d	360 d	450 d	540 d	630 d	720 d
Without coating	5.75	5.97	5.42	5.85	5.71	5.54	6.33	6.99
With DKL coating	0.12	0.10	0.09	0.16	0.17	0.16	0.18	0.19

2.2 硫酸盐溶液环境中涂层钢筋与裸露钢筋极化曲线

图4、5为硫酸盐溶液环境中,裸露钢筋和涂层钢筋的极化曲线.

由图4、5可见:在硫酸盐溶液环境中,90~180 d时裸露钢筋和涂层钢筋的开路电位值均向正向移动,此阶段裸露钢筋腐蚀电流密度出现下降趋势,原因主要是腐蚀产物发挥了作用,对腐蚀的继续进行起到了一定程度的阻碍作用;180~720 d时裸露钢筋腐蚀电流密度均比90 d时小,原因主要是腐蚀产物充当了保护层,在一定程度上阻碍了腐蚀介质的侵入,说明腐蚀产物对硫酸盐渗透的阻碍作用较明显.涂层钢筋在180~720 d过程中的开路电位值在正负向之间来回偏移,且腐蚀电流密度均处于低腐蚀阶段,此时主要是涂层和Zn、Al的腐蚀产物共同发挥作

用.整体上看,90~720 d时,在硫酸盐溶液环境中的裸露钢筋同样处于严重腐蚀阶段,但是其腐蚀程度要低于氯盐溶液环境中的裸露钢筋;在硫酸盐溶液环境中的涂层钢筋则处于低腐蚀阶段.与氯盐溶液环境相比,处于硫酸盐溶液环境中的钢筋腐蚀电流密度较小(其腐蚀电流密度如表5所示).这是因为硫酸盐中缺少腐蚀发生所需要的氧化剂,因而对钢筋不具有腐蚀性,腐蚀发生的原因集中在水溶液中.水溶液作为一种弱电解质,在钢筋表面形成水膜后,会使钢筋中的Fe和C形成微小电池,发生电化学腐蚀;Fe作为负极,失去电子被氧化,此过程中水作为电解质对电子迁移起到了促进作用;另外,水中通常含有Ca盐,Mg盐,Fe盐等多种盐,会结合空气及水中的溶解气体形成CaCO₃等物质.在此基础上,考虑到随着碳化过程的进行,混凝土内部pH值降低,会对钢筋表面氧化产物形成的防护层构成破坏,使钢筋表面出现损伤.

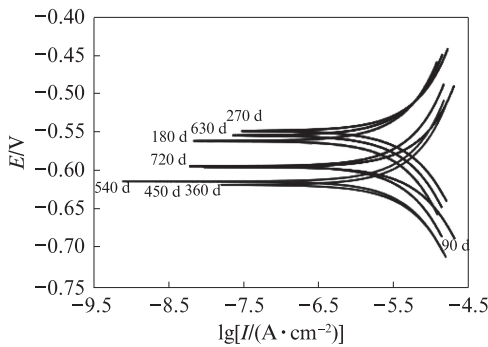


图4 硫酸盐溶液环境中的裸露钢筋极化曲线
Fig. 4 Polarization curves of bare steel bars in sulfate solution environment

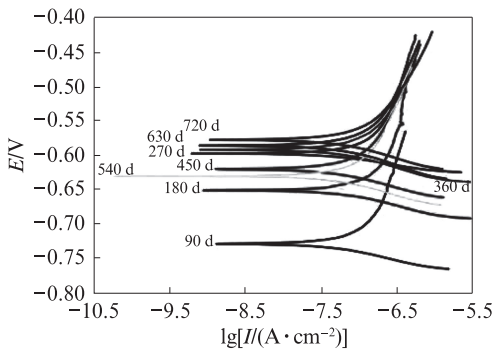


图5 硫酸盐溶液环境中的涂层钢筋极化曲线
Fig. 5 Polarization curves of coated steel bar in sulfate solution environment

对比2种盐溶液环境中镁水水泥混凝土构件中钢筋的腐蚀电流密度发现:在氯盐溶液环境中,90~720 d时裸露钢筋均处于严重腐蚀阶段,而涂层钢筋基本处于低腐蚀阶段,尤其是180~270 d时,涂层钢

表5 硫酸盐溶液环境中裸露钢筋与涂层钢筋的腐蚀电流密度

Table 5 Corrosion current density of bare steel bars and coated steel bars in sulfate solution environment

	μA/cm ²							
Status of steel bar	90 d	180 d	270 d	360 d	450 d	540 d	630 d	720 d
Without coating	3.49	2.08	2.82	2.72	2.52	2.53	2.40	2.47
With DKL coating	0.14	0.17	0.25	0.14	0.13	0.12	0.13	0.14

筋处于未受腐蚀阶段;在硫酸盐溶液环境中,90~720 d时裸露钢筋均处于严重腐蚀阶段,而涂层钢筋处于低腐蚀阶段;氯盐溶液环境下,镁水水泥混凝土构件中的钢筋受腐蚀问题较之硫酸盐溶液环境更为突出,而涂层在2种盐溶液环境中均对钢筋起到了较好的防护作用.

3 基于Wiener过程建模

3.1 Wiener过程相关函数

一元Wiener过程表示为^[16]:

$$X(t, \mu, \sigma^2) = \mu t + \sigma W(t) \quad (1)$$

式中: t 为时间; μ 为漂移系数; σ 为扩散系数; $W(t)$ 为标准布朗运动公式.

对于一元连续随机过程 $\{X(t), t \geq 0\}$,有如下性质:

(1)时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 之间的增量满足: $\Delta X = X(t + \Delta t) - X(t) \sim N(\mu \Delta t, \sigma^2 \Delta t)$.

(2)任意2个不相交的时间区间 $[t_1, t_2], [t_3, t_4], t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ 且增量间相互独立.

(3) $X(0) = 0$,并且在 $t = 0$ 处连续,

$$Z(t) = \sup_{0 \leq s \leq t} \{X(s); s \geq 0\} \quad (2)$$

时刻 t 时 $Z(t)$ 的概率密度函数为 $g(z, t)$,产品在 t 时间内的不失效概率 P 为:

$$P\{T > t\} = P\{Z(t) < \tau\} = \int_{+\infty}^{\tau} g(z, t) dz \quad (3)$$

式中: τ 为阈值.

$g(z, t)$ 表达式(Fokker-Planck方程)为^[17]:

$$g(z, t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi t}} \left\{ \exp\left[-\frac{(Z - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] - \exp\left(\frac{2\mu\tau}{\sigma^2}\right) \exp\left[-\frac{(Z - 2\tau - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] \right\} \quad (4)$$

结合式(3)、(4),得到可靠度函数 $R(t)$ 和概率密度函数 $f(t)$,见式(5)、(6):

$$R(t) = P\{T > t\} = 1 - F(t) = \Phi\left(\frac{\tau - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\mu\tau}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-\tau - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right) \quad (5)$$

$$f(t) = \frac{\tau}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(\tau - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right) \quad (6)$$

3.2 Wiener过程增量检验

分析电化学试验得到的2种盐溶液环境中钢筋腐蚀电流密度可知:裸露钢筋在90 d之前就已经进

入严重腐蚀状态,其腐蚀寿命在90 d以内;涂层钢筋在90 d时也已处于发生锈蚀阶段,但未达到严重腐蚀状态.因此本文只对涂层钢筋作腐蚀寿命预测.对表4、5中腐蚀电流密度数据进行处理,得到2种盐溶液环境中涂层钢筋在 $t_{i+1}-t_i$ 时间段内的腐蚀电流密度增量 Δi_{corr} ,见表6、7.

表6 氯盐溶液环境中涂层钢筋腐蚀电流密度增量 Δi_{corr}
Table 6 Corrosion current density increment Δi_{corr} of coated steel bar in chloride salt solution environment

t_1-t_0	t_2-t_1	t_3-t_2	t_4-t_3	t_5-t_4	t_6-t_5	t_7-t_6
-0.02	-0.01	0.07	0.01	-0.01	0.02	0.01

表7 硫酸盐溶液环境中涂层钢筋腐蚀电流密度增量 Δi_{corr}
Table 7 Corrosion current density increment Δi_{corr} of coated steel bar in sulfate solution environment

t_1-t_0	t_2-t_1	t_3-t_2	t_4-t_3	t_5-t_4	t_6-t_5	t_7-t_6
0.03	0.08	-0.09	-0.01	-0.01	0.02	0.01

利用P-P图对涂层钢筋腐蚀电流密度增量进行检验,见图6~9.如果腐蚀电流密度增量数据点在P-P图中沿着对角线分布,并且在去趋势的P-P图中离散分布,则表明该参数服从检验分布^[18].由图6~9可见,2种盐溶液环境中,涂层钢筋腐蚀电流密度增量服从正态分布,可以利用一元Wiener过程对其进行腐蚀寿命预测.

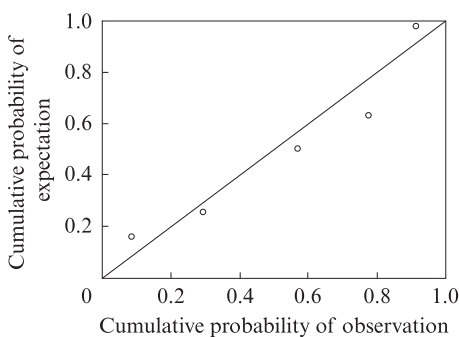


图6 氯盐溶液环境中涂层钢筋P-P图
Fig. 6 P-P diagram of coated steel bar in chloride salt solution environment

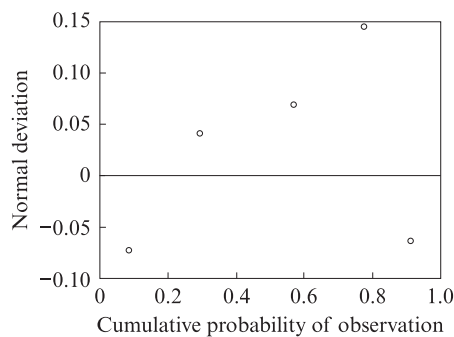


图7 氯盐溶液环境中涂层钢筋去趋势P-P图
Fig. 7 Detrend P-P diagram of coated steel bar in chloride salt solution environment

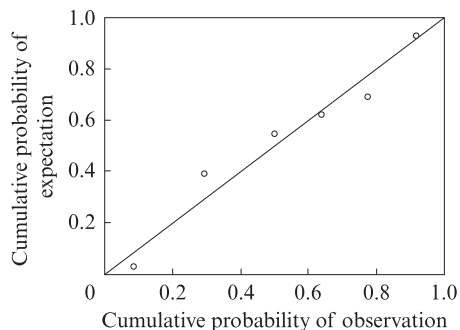


图8 硫酸盐溶液环境中涂层钢筋P-P图
Fig. 8 P-P diagram of coated steel bar in sulfate solution environment

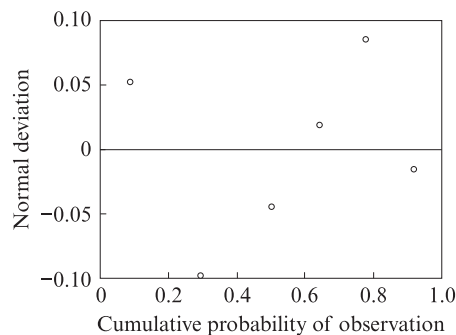


图9 硫酸盐溶液环境中涂层钢筋去趋势P-P图
Fig. 9 Detrend P-P diagram of coated steel bar in sulfate solution environment

3.3 Wiener过程参数估计

由表3可知,当 $0.1 \mu A/cm^2 < i_{corr} \leq 0.5 \mu A/cm^2$ 时,钢筋锈蚀程度属于低腐蚀状态.因此腐蚀电流密度阈值取 $\tau=0.5 \mu A/cm^2$.

由式(6)可知,某一时刻的概率密度似然函数 $L(\mu, \sigma^2)$ 为:

$$L(\mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{m_i} \frac{1}{2\sigma^2 \pi \Delta t_{ij}} \exp\left[-\frac{(\Delta x_{ij} - \mu \Delta t_{ij})^2}{2\sigma^2 \Delta t_{ij}}\right] \quad (7)$$

对式(7)取对数,并分别对 μ, σ^2 求偏导数,得到其极大似然估计 $\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2$:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{im_i}}{\sum_{i=1}^n t_{im_i}} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{(\Delta X_{ij})^2}{\Delta t_{ij}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_{im_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n t_{im_i}} \right] \quad (9)$$

式中: X_{im_i} 为腐蚀电流密度退化量; $\Delta X_{ij} = X_{ij} - X_{i(j-1)}$;
 $\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{i(j-1)}$.

计算得到氯盐溶液环境中Wiener过程参数 $\hat{\mu} = 5.07937 \times 10^{-4}$, $\hat{\sigma}^2 = 9.4603 \times 10^{-6}$;硫酸盐溶液环境中 $\hat{\mu} = 6.3492 \times 10^{-5}$, $\hat{\sigma}^2 = 7.50612 \times 10^{-5}$.由此可以得到参数已知的可靠度函数和概率密度函数.

在氯盐溶液环境中,计算得到参数对应的可靠度函数和概率密度函数为:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{0.5 - 0.000507937 \times t}{0.0030757601 \times \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2 \times 0.000507937 \times t}{0.0000094603}\right) \times \Phi\left(\frac{-0.5 - 0.000507937 \times t}{0.0030757601 \times \sqrt{t}}\right) \quad (10)$$

$$f(t) = \frac{0.5}{\sqrt{2\pi \times 0.0000094603 \times t^3}} \times \exp\left(-\frac{(0.5 - 0.000507937 \times t)^2}{2 \times 0.0000094603 \times t}\right) \quad (11)$$

同理,在硫酸盐溶液环境中,计算得到参数对应的可靠度函数和概率密度函数为:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{0.5 - 0.000507937 \times t}{0.0086637867 \times \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2 \times 0.000063492 \times t}{0.0000750612}\right) \times \Phi\left(\frac{-0.5 - 0.000063492 \times t}{0.0086637867 \times \sqrt{t}}\right) \quad (12)$$

$$f(t) = \frac{0.5}{\sqrt{2\pi \times 0.0000750612 \times t^3}} \times \exp\left(-\frac{(0.5 - 0.000063492 \times t)^2}{2 \times 0.0000750612 \times t}\right) \quad (13)$$

3.4 腐蚀寿命预测

图10~13为涂层钢筋在2种盐溶液环境中的可靠度和概率密度随腐蚀时间变化的曲线.由图10可知:在氯盐溶液环境中,涂层钢筋在1500 d附近由低腐蚀阶段进入中等腐蚀阶段(裸露钢筋在90 d之前就已进入严重腐蚀阶段);基于Wiener过程腐蚀寿命预测模型,可以看出涂层对钢筋的保护期限为1500 d,如果采用更高效的涂层,保护期限将更长.图11为检验过程,发现可靠度建模离散性较好.

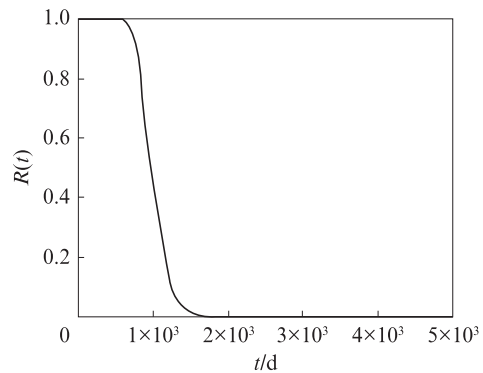


图10 氯盐溶液环境中涂层钢筋可靠度
Fig. 10 Reliability of coated steel bar in chloride salt solution environment

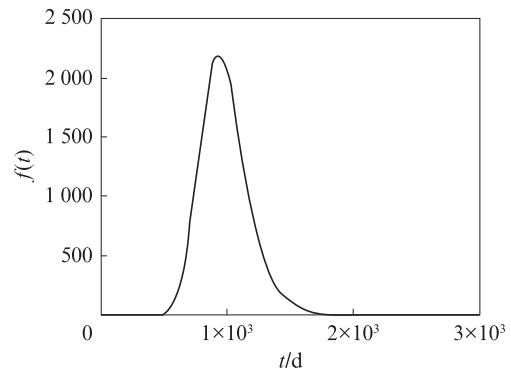


图11 氯盐溶液环境中涂层钢筋概率密度
Fig. 11 Probability density of coated steel bar in chloride salt solution environment

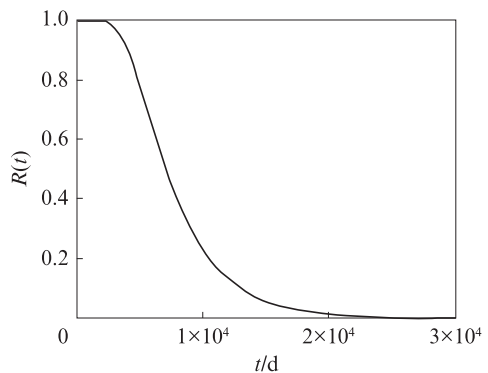


图12 硫酸盐溶液环境中涂层钢筋可靠度
Fig. 12 Reliability of coated steel bar in sulfate solution environment

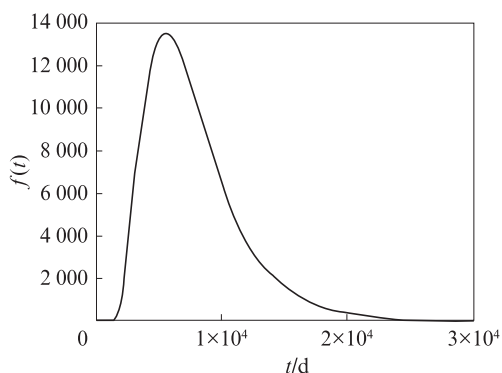


图13 硫酸盐溶液环境中涂层钢筋概率密度
Fig. 13 Probability density of coated steel bar in sulfate solution environment

由图12可知,在硫酸盐溶液环境中,涂层钢筋在22 000 d进入中等腐蚀状态,即涂层在硫酸盐溶液环境中对钢筋的保护期限为22 000 d左右.对比图10得出的结论发现,与硫酸盐溶液环境相比,镁水泥钢筋混凝土中的钢筋在氯盐溶液环境中更容易受到腐蚀.

4 结论

(1)与硫酸盐溶液环境相比,90~720 d时,镁水泥混凝土中的裸露钢筋在氯盐溶液环境中受到更严重的腐蚀.对于涂层钢筋而言,在氯盐溶液环境中,90~720 d时其基本处于低腐蚀阶段,180~270 d附近则处于未受腐蚀阶段;在硫酸盐溶液环境中,90~720 d时其处于低腐蚀阶段.涂层在钢筋受腐蚀时保护作用明显,利用涂层来保护镁水泥混凝土中的钢筋是可行的.

(2)采用腐蚀电流密度作为钢筋耐久性退化指标,利用Wiener过程来建立钢筋腐蚀寿命预测模型可行;Wiener过程得出的可靠度预测方式可以反映钢筋的腐蚀过程,可以用于预测达到不同腐蚀程度时钢筋的腐蚀寿命.利用Wiener过程得出的钢筋腐蚀寿命预测模型表明,镁水泥混凝土中,氯盐溶液环境中涂层钢筋在1 500 d附近由低腐蚀阶段进入中等腐蚀阶段,硫酸盐溶液环境中涂层钢筋在22 000 d进入中等腐蚀阶段.

参考文献:

[1] 廉发军.盐渍土地区房屋基础的防腐措施[J].全面腐蚀控制,2019,33(7):83-84.
LIAN Fajun. Antiseptis measures for house foundation in saline soil area[J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(7): 83-84. (in Chinese)

[2] 汪林,甘泓,于福亮,等.西北地区盐渍土及其开发利用中存在问题对策[J].水利学报,2001(6):90-95.
WANG Lin, GAN Hong, YU Fuliang, et al. Salinized soil in northwest China and countermeasures for problems in its development and utilization [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(6):90-95. (in Chinese)

[3] 李颖,余红发,董金美,等.氯氧镁水泥的水化产物、相转变规律和抗水性评价方法的研究进展[J].硅酸盐学报,2013,41(11):1465-1473.
LI Ying, YU Hongfa, DONG Jinmei, et al. Research progress in hydration products, phase transition law and water resistance evaluation method of magnesium oxychloride cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41 (11): 1465-1473. (in Chinese)

[4] 严育通,景燕,马军.氯氧镁水泥的研究进展[J].盐湖研究,2008(1):60-66.
YAN Yutong, JING Yan, MA Jun. Research progress of magnesium oxychloride cement [J]. Salt Lake Study, 2008 (1): 60-66. (in Chinese)

[5] 文静,余红发,吴成友,等.氯氧镁水泥水化历程的影响因素及水化动力学[J].硅酸盐学报,2013,41(5):588-596.
WEN Jing, YU Hongfa, WU Chengyou, et al. Hydration kinetic and influencing parameters in hydration process of magnesium oxychloride cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(5): 588-596. (in Chinese)

[6] MAZURANIC C, BILLINSKI H, MATKOVIC B. Reaction products in the system $MgCl_2-NaOH-H_2O$ [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1982, 65(10):523-526.

[7] POWER I M, DIPPLE G M, FRANCIS P S. Assessing the carbon sequestration potential of magnesium oxychloride cement building materials[J].Cement and Concrete Composites, 2017,78:97-107.

[8] 乔宏霞,巩位,程千元,等.盐湖地区镁水泥钢筋混凝土耐久性试验[J].煤炭学报,2015,40(增刊2):346-352.
QIAO Hongxia, GONG Wei, CHENG Qianyuan, et al. Durability of magnesium cement reinforced concrete in saline soil area [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40 (Suppl 2): 346-352. (in Chinese)

[9] 乔宏霞,巩位,陈广峰,等.基于极化曲线的镁水泥混凝土中钢筋腐蚀试验[J].华中科技大学学报(自然科学版),2016,44(1):6-10.
QIAO Hongxia, GONG Wei, CHEN Guangfeng, et al. Experimental study on corrosion of steel bar in magnesium cement concrete based on polarization curves [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2016, 44(1): 6-10. (in Chinese)

[10] 乔宏霞,巩位,高升,等.镁水泥混凝土中钢筋的电化学腐蚀研究[J].材料科学与工艺,2016,24(1):63-69.
QIAO Hongxia, GONG Wei, GAO Sheng, et al. Electrochemical corrosion of steel bar in the magnesium cement concrete [J]. Materials Science and Technology, 2016, 24 (1): 63-69. (in Chinese)

[11] 乔宏霞,巩位,王鹏辉,等.硫酸盐环境氯氧镁水泥混凝土中

- 钢筋防护试验[J].西南交通大学学报,2017,52(2):247-253.
- QIAO Hongxia, GONG We, WANG Penghui, et al. Experimental study on steel reinforcement protection in magnesium oxychloride cement concrete under sulfate environment [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52 (2) : 247-253. (in Chinese)
- [12] 杨勇涛,贡金鑫,赵尚传.钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀电流密度[J].公路交通科技(应用技术版),2010,6(5):135-139.
- YANG Yongtao, GONG Jinxin, ZHAO Shangchuan. Corrosion current density of reinforcement in reinforced concrete structures[J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology), 2010, 6(5):135-139. (in Chinese)
- [13] 朱磊,左洪福,蔡景.基于Wiener过程的民用航空发动机性能可靠性预测[J].航空动力学报,2013,28(5):1006-1012.
- ZHU Lei, ZUO Hongfu, CAI Jing. Performance reliability prediction for civil aviation aircraft engine based on Wiener process. [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(5):1006-1012. (in Chinese)
- [14] 安秀杰.非线性模拟电路Wiener核故障特征提取的优化方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- AN Xiujie. Research on optimization method of Wiener kernel fault feature extraction for non-linear analog circuit [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 王兵,郑秋红,郭浩.基于Shannon-Wiener指数的中国森林物种多样性保育价值评估方法[J].林业科学研究,2008,21(2):268-274.
- WANG Bing, ZHENG QiuHong, GUO Hao. Economic value assessment of forest species diversity conservation in China based on the Shannon-Wiener index [J]. Forest Research, 2008, 21(2):268-274. (in Chinese)
- [16] 彭宝华.基于Wiener过程的可靠性建模方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010.
- PENG Baohua. Economic value assessment of forest species diversity conservation in China based on the Shannon-Wiener index [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] COX D R, MILLER H D. The theory of stochastic processes [M]. London: Chapman and Hall, 1965:5-25.
- [18] 杨兴民,刘保东,李娟.基于Gaussian Copula与t-Copula的沪深股指相关性分析[J].山东大学学报(理学版),2007,42(12):63-68,72.
- YANG Xingmin, LIU Baodong, LI Juan. Correlation analysis of the Shanghai-Shenzhen stock index based on Gaussian Copula and t-Copula [J]. Shandong Daxue Xuebao (Lixue Ban), 2007, 42(12):63-68, 72. (in Chinese)