

文章编号:1007-9629(2022)07-0751-09

盐渍土环境下钢筋混凝土恒电流加速锈蚀试验及可靠性分析

尚明刚^{1,2}, 张云升^{1,2,3,*}, 何忠茂^{1,4}, 乔宏霞^{1,2}, 薛翠真^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省先进土木工程材料工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 4. 宁波大学 科学技术学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:采用恒电流加速锈蚀试验,结合石蜡层控制氯离子扩散路径的方法,将钢筋混凝土一维和二维试件作为研究对象,结合极化曲线(LPR)、氯离子含量分析、宏观形貌分析、扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDS)等手段,研究了盐渍土环境下钢筋混凝土的恒电流加速锈蚀规律.建立了基于可靠性的恒电流加速锈蚀与氯离子扩散腐蚀双因素作用下钢筋混凝土的劣化模型.结果表明:劣化模型推导的一维和二维试件平均寿命分别为927、618 h,石蜡层能有效隔离腐蚀性离子,实现单加速因素控制试件劣化的试验目的;钢筋混凝土的劣化主要受恒电流加速锈蚀与氯离子扩散腐蚀双因素耦合作用的影响;钢筋混凝土在恶劣环境下服役,建议以“前防锈,后防渗”的研究思路探索,即正常服役期间重点关注由钢筋锈蚀引起的腐蚀劣化,裂缝出现后重点关注由氯离子扩散引起的腐蚀劣化.

关键词:可靠性;极化曲线(LPR);恒电流加速试验;平均寿命; Cl^- 迁移劣化模型

中图分类号:TP319.56

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.07.014

Constant Current Accelerated Corrosion Test and Reliability Analysis of Reinforced Concrete in Saline Soil Environment

SHANG Minggang^{1,2}, ZHANG Yunsheng^{1,2,3,*}, HE Zhongmao^{1,4},
QIAO Hongxia^{1,2}, XUE Cuizhen^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Advanced Civil Engineering Materials Engineering Research Center, Lanzhou 730050, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 4. College of Science & Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The one-dimensional and two-dimensional reinforced concrete specimens were used as research objects in a constant current accelerated corrosion test combined with the method of controlling chloride ion diffusion path with a paraffin layer. The galvanostatic accelerated corrosion law of reinforced concrete in a saline soil environment was studied using polarization curve (LPR), chloride ion content analysis, macroscopic morphology analysis, scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive analysis (EDS). A reliability-based degradation model of reinforced concrete under the action of galvanostatic accelerated corrosion and chloride diffusion corrosion was established. The results show that the average life spans of the one-dimensional and two-dimensional specimens

收稿日期:2021-05-06; 修订日期:2021-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51468039, 51868044, 52008196); 兰州理工大学红柳一流学科建设计划资助项目; 甘肃省青年科技基金项目(20JR5RA440)

第一作者:尚明刚(1992—),男,甘肃宁县人,兰州理工大学博士生.E-mail:minggangshang@163.com

通讯作者:张云升(1973—),男,河北沧州人,兰州理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zhangyunsheng2011@163.com

deduced by the deterioration model are 927 and 618 h, respectively. The paraffin layer can effectively isolate the corrosive ions and achieve the test purpose of controlling the deterioration of the specimens by a single acceleration factor. The deterioration of reinforced concrete is mainly affected by the coupling effect of constant current accelerated corrosion and chloride ion diffusion corrosion. When reinforced concrete is used in harsh environments, it is recommended to explore the research concept of “pre-rust prevention, afterwards anti-seepage”, which means that during normal service the focus should be on corrosion and deterioration caused by corrosion of steel bars, and after cracks appear the focus should be on the corrosion and deterioration caused by the diffusion of chloride ions.

Key words: reliability; polarization curve (LPR); constant current accelerated test; average life span; Cl^- migration deterioration model

可靠性工程是一门新兴的边缘学科,现已广泛应用于化工、机械、材料等领域^[1].可靠性是部件、元件、产品或系统在规定的环境、时间、条件下无故障地完成功能的概率和能力^[2].可靠性预测的结果取决于元部件系统可靠性模型和预测的失效率数据^[3].根据 GB 50068—2018《建筑结构可靠度设计统一标准》,建筑设计寿命为 50~80 a.钢筋混凝土寿命周期较长的特点增加了对其进行寿命研究的难度.因此大多数学者引入了加速寿命试验.杨绿峰等^[4]量化了海水飞溅区混凝土暴露的环境效应;Song 等^[5]和 Pack 等^[6]研究了暴露在海洋中的混凝土结构的扩散系数和表面氯化物含量;Liu 等^[7]探索了导致海砂混凝土结构退化的原因;刘奇东等^[8]设计了人工气候模拟加速试验,研究了结构耐久性退化规律;袁迎曙等^[9]采用人工模拟气候环境和恒电流通电方法,对钢筋混凝土梁进行加速锈蚀试验;郑帆等^[10]用电子计算机断层扫描(XCT)技术分析通电加速锈蚀试验过程;尚明刚等^[11]用不同的电流密度对钢筋混凝土进行恒电流加速锈蚀试验;Abosrra 等^[12]研究了不同抗压强度的混凝土通电和加速后其内部钢筋的锈蚀;Ma 等^[13]研究了钢筋混凝土圆柱在荷载作用下的受电锈蚀损伤行为.因为自然暴露腐蚀试验周期长,所以大多数学者选择通电加速试验以快速获取锈蚀试样.加速锈蚀法主要采用全浸法、半浸法、内置阴极法和贴面法等^[14-15],以短期跟踪试验过程并获得数据.

针对西部盐渍土地区^[16]钢筋混凝土寿命问题,本文进行了室内模拟盐渍土环境下的恒电流加速锈蚀试验,以期探索腐蚀性离子服役环境对钢筋混凝土寿命的影响.使用格尔木地区盐渍土为导电介质^[17],设计石蜡层以控制单加速因素.当钢筋理论质量损失率为 0%、1%、2%、3%、4%、5%、6% 时,采集钢筋混凝土的极化曲线、氯离子含量、微观结构等数据.综合分析盐渍土环境中试件的腐蚀劣化机理,研究恒电流加速锈蚀与氯离子扩散腐蚀双因素耦合作

用对钢筋混凝土腐蚀劣化的影响,探索其劣化规律,建立双因素腐蚀作用下的钢筋混凝土劣化模型.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为 P·O 42.5 水泥,表观密度 3 000 kg/m³,甘肃祁连山水泥厂生产.细骨料(FA)选用细度模数 2.9 的机制砂.粗骨料(CA)为 5~25 mm 连续级配碎石.减水剂(SP)为江苏苏博特新材料有限公司生产的高性能减水剂,用量 1.5% (以水泥质量计).钢筋为 HRB 400 型钢筋,直径 12 mm.从青海格尔木重盐渍土地区取回盐渍土,其在易溶盐中的 SO_4^{2-} 含量为 15 648 mg/kg, Cl^- 含量为 81 016 mg/kg.石蜡选用 54 号粗石蜡,密度为 0.9 g/cm³.水为自来水.混凝土配合比见表 1.

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of concrete

kg/m ³			
C	W	FA	CA
450	158	634	1 167

1.2 试验方案

制备尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的钢筋混凝土试件.设置混凝土保护层厚度 50 mm,上表面外露钢筋 20 mm.试件分 2 组,1 组将石蜡加热融化后涂抹在混凝土成型面、下表面、左侧面和右侧面,使 4 个表面各形成厚度为 0.5 mm 的石蜡层,在室温下静置 24 h,制成一维试件.另外 1 组将石蜡涂刷在混凝土左侧面和右侧面,使试件 2 个外表面各形成厚度为 0.5 mm 的石蜡层,在室温下静置 24 h,制成二维试件.随后将试件置于翻拌均匀的盐渍土中,相对湿度为 (60±5)%.采用 PS-3002D-a 型恒电流仪进行恒电流加速锈蚀试验,如图 1 所示.

线性极化法是无损、直接、定量、快速检测混凝土中钢筋锈蚀速率的一种简单方法.根据微极化方

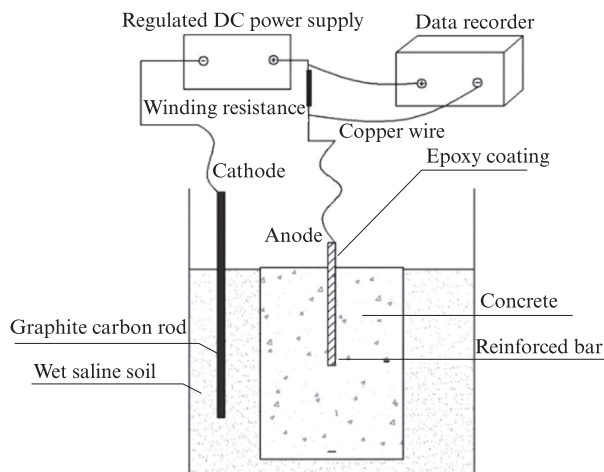


图1 恒电流加速锈蚀试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram for constant current accelerated corrosion test

程^[18],计算自腐蚀电流 I_{corr} 的大小.王鹏辉等^[19]认为恒电流加速锈蚀试验中电流密度设置不应超过 $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.本试验设定钢筋锈蚀理论质量损失率(MLR)为0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%,根据法拉第定律^[20]计算得到其对应的恒电流加速时间(t)分别为0、206、412、618、824、1 030、1 236 h.

试验使用德国Zahner E电化学工作站,极化曲线扫描范围为:相对自腐蚀电位 $-200 \sim 200 \text{ mV}$,扫描速率 0.334 mV/s ,频率 0.33 Hz .采用分析软件对极化曲线进行拟合,得出对应的腐蚀电流密度(i_{corr}),以评价钢筋锈蚀程度.可根据表2中腐蚀电流密度与钢筋瞬时锈蚀程度的对应关系^[21],初步判断钢筋锈蚀程度.

表2 腐蚀电流密度与钢筋锈蚀程度的对应关系
Table 2 Relationship between corrosion current density and corrosion degree of reinforcement

$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	Corrosion degree
<0.2	Passivation
$0.2 \sim 0.5$	Low degree corrosion
$0.5 \sim 1.0$	Medium degree corrosion
$1.0 \sim 10.0$	High degree corrosion
>10.0	Extremely corrosion

参照JGJ/T 322—2013《混凝土中氯离子含量检测技术规程》,采用Chloride Meter DY-2501A型氯离子含量测试仪,从试件外表面中心位置向内部依次取样,测定其中的氯离子含量(C ,质量分数),取样深度分别为0、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 mm.

采用JSM-5600 LV型扫描电子显微镜(SEM)结合能谱分析(EDS)研究试件微观形貌.

1.3 技术路线

采用憎水性材料石蜡对钢筋混凝土进行表面防护,能够在混凝土和外界环境间形成隔离层,通过改变混凝土表面性质来阻止或延缓氯离子等有害物质侵入,延缓混凝土中钢筋锈蚀^[22].开展恒电流加速锈蚀试验,建立盐渍土环境下的钢筋混凝土寿命预测模型,其技术路线见图2.

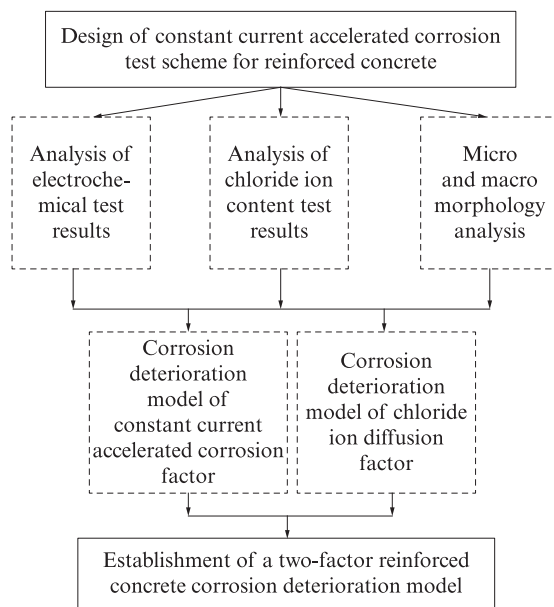


图2 技术路线

Fig. 2 Technical route

2 试验结果与分析

2.1 极化曲线

一维和二维试件极化曲线见图3.由极化曲线拟合出的腐蚀电流密度曲线见图4.

由图3(a)和图4可知:恒电流加速 $0 \sim 1\,236 \text{ h}$ 期间,一维试件横坐标的自腐蚀电位呈负向移动趋势,对应腐蚀电流密度逐渐增大,表明一维试件中钢筋锈蚀逐渐严重;在 $618 \sim 824 \text{ h}$ 期间,自腐蚀电位出现不规律的正向移动,在 $824 \sim 1\,030 \text{ h}$ 期间,腐蚀电流密度也出现不规律的负向移动,这是腐蚀产物堆积造成的,表明加速腐蚀到一定时间,腐蚀产物的堆积能够延缓腐蚀的发展.

由图3(b)和图4可见:二维试件在 $0 \sim 1\,236 \text{ h}$ 期间,横坐标的自腐蚀电位呈负向移动,腐蚀电流密度呈正向移动,表明二维试件中钢筋腐蚀劣化逐渐加速;二维试件的自腐蚀电位没有出现不规律移动,自腐蚀电流密度在 $824 \sim 1\,030 \text{ h}$ 期间呈不规律的负向移动,与一维试件的不规律移动相比,二维试件的腐蚀产物堆积对腐蚀的阻碍作用较小.

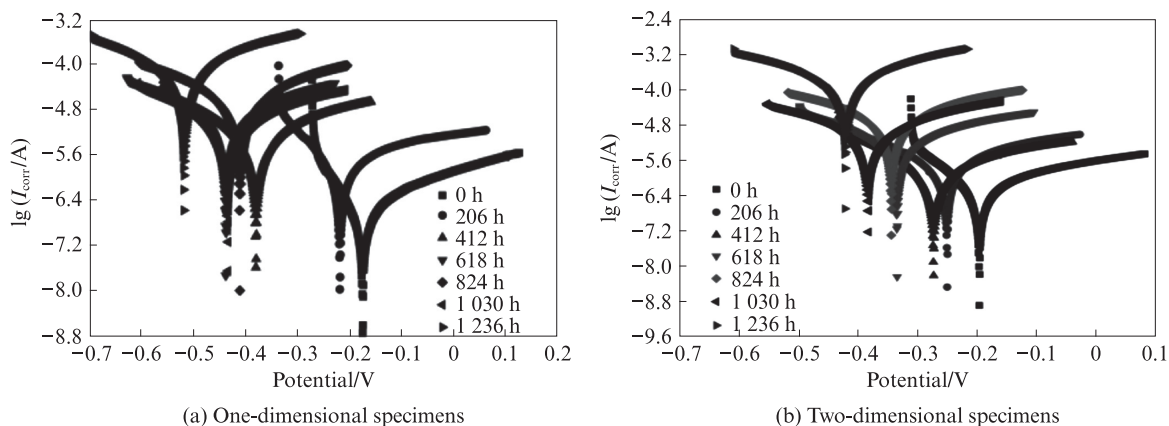


图3 一维和二维试件的极化曲线
Fig. 3 Polarization curves of one-dimensional specimens and two-dimensional specimens

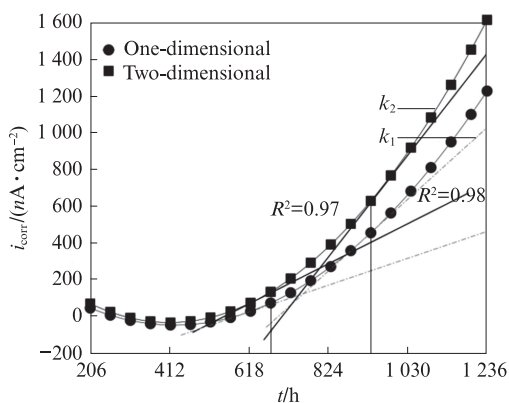
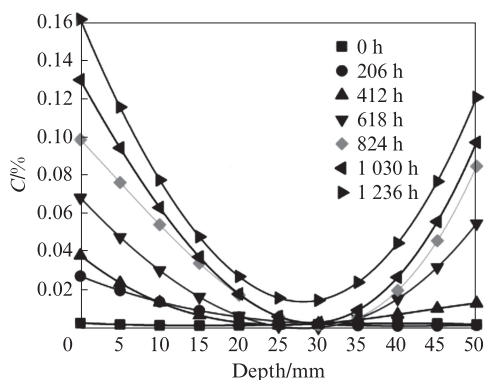


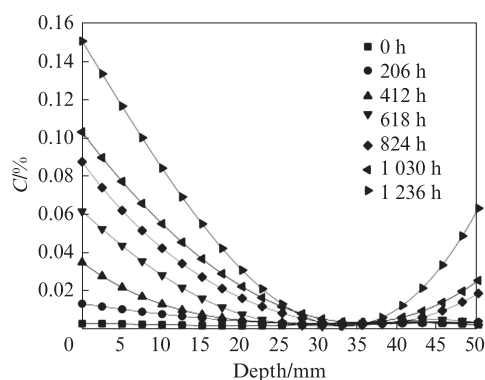
图4 一维和二维试件的腐蚀电流密度曲线
Fig. 4 Fitting curves of corrosion current density of one-dimensional specimens and two-dimensional specimens

由图4还可知:二维试件的腐蚀电流密度变化大于一维试件,表明二维试件的腐蚀程度更严重,腐蚀速率更快.一维和二维试件拟合曲线的切线方程分别为:

$$k_1 = \frac{y_1 - f(t_0)}{t_1 - t_0}, R^2 = 0.98 \quad (1)$$



(a) One-dimensional specimens



(b) Two-dimensional specimens

图5 一维和二维试件的氯离子含量
Fig. 5 Chloride ion content of one-dimensional specimens and two-dimensional specimens

$$k_2 = \frac{y_2 - f(t_0)}{t_2 - t_0}, R^2 = 0.97 \quad (2)$$

式中: k 为曲线在 t 时刻的斜率, k 越大表示腐蚀速率越高; k_1 、 k_2 分别为一维和二维试件拟合曲线的斜率, $k_1 < k_2$; t_0 为未加速的初始阶段,数值为0 h; $f(t_0)$ 为加速时间 t_0 时刻的腐蚀电流密度; y_1 为 t_1 时刻的腐蚀电流密度; y_2 为 t_2 时刻的腐蚀电流密度, $t_1 < t_2$.

在恒电流加速时间为 t_1 、 t_2 时,二维试件的 k_2 值均大于一维试件的 k_1 值,表明二维试件的腐蚀速率比一维试件快;恒电流从 t_1 加速到 t_2 时,一维和二维试件的 k 值不断增大,表明试件的腐蚀速率逐渐增大,加速时间越长,腐蚀速率越大.

2.2 氯离子含量

一维和二维试件的氯离子含量见图5.恒电流加速1 236 h时,从试件石蜡层表面向内部取样,测得沿石蜡层方向的氯离子含量见表3.

由图5(a)可知:一维试件在0~30 mm深度处,氯离子含量由外表面向中心呈逐渐减小的变化趋势,表明氯离子的渗透深度与加速时间呈正比例关

表3 恒电流加速1 236 h沿石蜡层方向的氯离子含量
Table 3 Chloride ion content in paraffin layer after constant current acceleration for 1 236 h

Specimen	$C \times 10^3 / \%$									
	0 mm	5 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm	45 mm	50 mm
One-dimensional	1.3	1.8	1.5	1.7	2.1	1.1	1.3	16.5	30.1	38.7
Two-dimensional	2.4	1.2	1.7	2.1	1.6	1.4	0.5	17.6	38.8	45.2

系;在30~40 mm深度处,氯离子含量基本趋于稳定,表明一维试件在1 236 h时,氯离子渗透深度为30 mm;在40~50 mm深度处,1 030、1 236 h后氯离子含量随深度增加而增大,原因是一维试件裂缝导致盐渍土中腐蚀性离子渗入钢筋表面,使钢筋表面腐蚀性离子堆积后外渗。

由图5(b)可知:二维试件在0~50 mm深度处,氯离子含量变化规律与一维试件类似,渗透深度为30 mm;在40~50 mm深度处,二维试件中氯离子含量较一维试件要大,这是因为二维试件暴露在盐渍土中的裂缝较多,所以在相同加速条件下,二维试件的腐蚀程度更大。

由表3可知:在0~30 mm深度处,一维和二维试件沿石蜡层方向的氯离子含量基本没有变化,表明石蜡层对腐蚀性离子的隔离有效;在35~50 mm深度处,氯离子含量随混凝土厚度增加而增大,沿裂缝渗入的氯离子反向渗透,使近钢筋端混凝土氯离子含量增大。结合图4认为,氯离子反向渗透的叠加作

用能够加快腐蚀进程,提高腐蚀速率。

2.3 宏微观形貌分析

恒电流加速1 236 h后,一维和二维试件的典型破裂形态见图6,其对应的SEM图和EDS分析见图7、8。

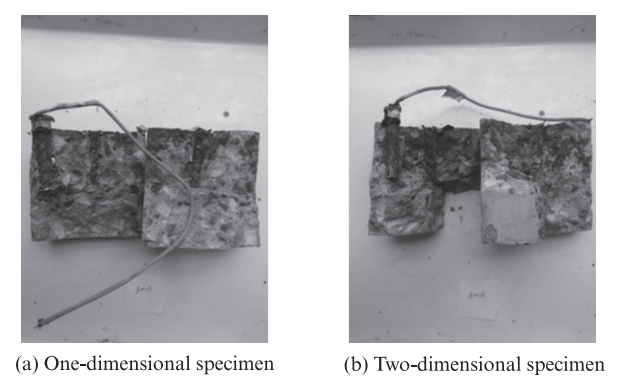


图6 恒电流加速1 236 h后一维和二维试件的典型破裂形态
Fig. 6 Typical fracture morphology of one-dimensional specimens and two-dimensional specimens after constant current accelerated corrosion for 1 236 h

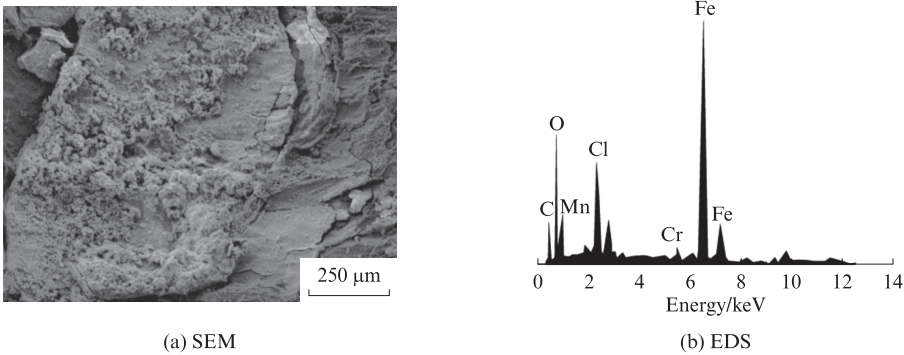


图7 恒电流加速1 236 h后一维试件的SEM图和EDS分析
Fig. 7 SEM image and EDS analysis of one-dimensional specimen after constant current accelerated corrosion for 1 236 h

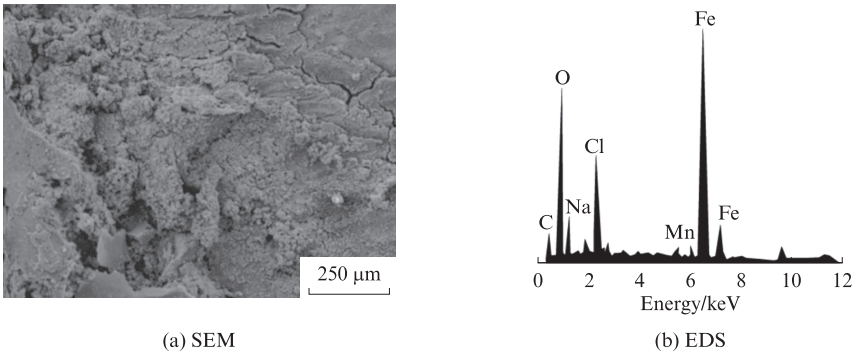
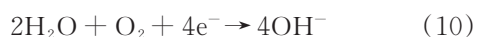
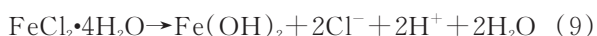
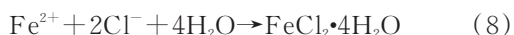


图8 恒电流加速1 236 h后二维试件的SEM图和EDS分析
Fig. 8 SEM image and EDS analysis of two-dimensional specimen after constant current accelerated corrosion for 1 236 h

由图6可知:恒电流加速1236 h后,试件内部钢筋均产生大量铁红色锈蚀产物,一维和二维试件腐蚀劣化的初始面均为上表面,腐蚀产物均由内向外扩散,表明一维和二维试件的加速腐蚀劣化机理相似,均为内部钢筋锈蚀引起试件出现结构性破坏.二维试件的铁红色锈蚀产物渗透面积大于一维试件,表明同等条件下多渗透面的试件腐蚀劣化更严重.钢筋作为加速试验两电极系统中的阳极,发生腐蚀劣化机理如式(3)~(6)所示^[23];另外,在氧气不充足时,钢筋也会发生部分氧化,见式(7).



由图7(a)与图8(a)可见:一维和二维试件破裂表面均有不同程度的龟状裂纹,且表面有凹凸不平的块状松散物以及大小和深度不规则的孔洞.这是因为钢筋锈蚀过程是从点蚀到面蚀,SEM图表明一维和二维试件中钢筋均发生锈蚀,有效截面面积均减小.由图7(b)与图8(b)可见,一维和二维试件破裂表面均含有O和Cl元素,表明钢筋表面已经发生铁氧化反应,盐渍土中氯离子已渗透至钢筋表面.氯离子引起钢筋锈蚀机理如式(8)~(10)所示^[23].



综上所述,钢筋混凝土腐蚀劣化主要是钢筋锈蚀产物体积膨胀所致.不断增多的锈蚀产物会在钢筋表面堆积,产生的负向内应力逐渐增大,导致混凝土内部产生放射状裂缝,而不断扩展的裂缝也为盐渍土中腐蚀性离子的渗透提供了更为有利的正向扩散条件,使腐蚀性离子沿出现裂缝试件的薄弱区域大量快速渗透至钢筋表面,与恒电流加速锈蚀作用叠加,进而提高了钢筋腐蚀劣化效率.分析认为,引起钢筋腐蚀劣化的因素有2个:一个是恒电流加速引起的钢筋氧化反应;另一个是腐蚀性氯离子与钝化膜已破坏的锈蚀钢筋发生的化学反应,这2种反应都加速了氯离子扩散腐蚀作用的发挥.

3 基于可靠性的钢筋混凝土劣化模型

3.1 恒电流加速锈蚀劣化模型

假定钢筋混凝土试件处于中等腐蚀状态, t 的阈值为钢筋混凝土寿命.根据表2得出其对应的腐蚀电流密度阈值为 $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.参照式(11)计算其在恒电

流因素作用下的腐蚀寿命评价参数 Ψ_1 ,结果见表4.

$$\Psi_1 = 1 - \frac{i_{\text{corr}}}{i_m} \quad (11)$$

式中: i_m 为中等腐蚀阈值.

当 $\Psi_1 < 0$ 时,试件寿命终止;当 $0 \leq \Psi_1 < 1$ 时,试件出现劣化且可继续服役.

3.2 氯离子互扩散腐蚀劣化模型

有浓度差的空间扩散称为互扩散.参考GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中氯离子扩散系数的计算方法,设计钢筋混凝土恒电流加速锈蚀试验的氯离子扩散模型^[24].石蜡层的防护性能由于因素作用随时间降低,氯离子扩散系数也随时间变化.建立经过表面处理后混凝土氯离子扩散系数的性能退化模型^[25]:

$$D(t) = D_0 \cdot g(t) \quad (12)$$

式中: $D(t)$ 为 t 时刻的氯离子扩散系数; D_0 是初始状态的氯离子扩散系数; $g(t)$ 为退化系数.

氯离子引起钢筋锈蚀可分为3个阶段:氯离子通过混凝土保护层扩散至钢筋表面并积累至临界含量,此为第1阶段;钢筋开始锈蚀引起体积膨胀、微裂纹产生、钢筋截面损失和黏结强度的损失,此为第2阶段;混凝土保护层因钢筋锈蚀而开裂到混凝土失效,此为第3阶段.依据GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》与GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》,设定钢筋表面氯离子含量达到0.06%时试件寿命达到阈值.氯离子因素作用下试件的腐蚀寿命评价参数 Ψ_2 按下式计算,结果见表4.

$$\Psi_2 = 1 - \frac{C_i}{0.06\%} \quad (13)$$

式中: C_i 为 i 时刻试件中的氯离子含量.

当 $\Psi_2 < 0$ 时,试件寿命终止;当 $0 \leq \Psi_2 < 1$ 时,试件出现劣化且可继续服役.

表4 钢筋混凝土的腐蚀评价参数

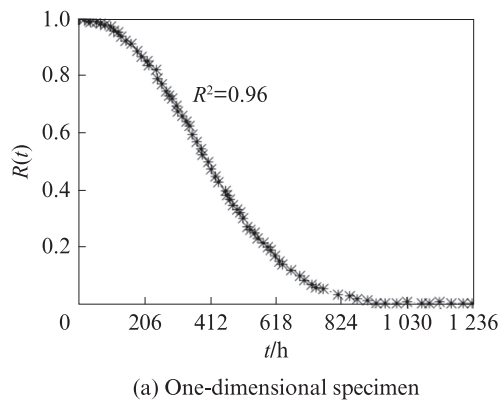
Table 4 Corrosion evaluation parameters of reinforced concretes

MLR/%	Ψ_1		Ψ_2	
	One-dimensional	Two-dimensional	One-dimensional	Two-dimensional
0	0.994	0.991	0.998	0.991
1	0.846	0.769	0.872	0.811
2	0.537	0.458	0.498	0.376
3	0.198	0.243	0.118	0.082
4	0.046	0.025	0.076	0.043
5	0.012	0.023	0.047	0.022
6	0.005	0.008	0.002	0.007

3.3 基于可靠性的双因素劣化模型

假定钢筋混凝土试件寿命符合正态分布,则用恒电流加速锈蚀试验的数据进行统计分布,分为一维和二维组.选取因素水平相同且高于正常腐蚀环境下的因素水平,进行寿命失效试验.

利用正态分布的密度函数、分布函数、失效函数,将失效率作为评价可靠性的特征量.设钢筋混凝土寿命符合具有已知均值 μ 与方差 σ 的正态分布,大小为 n 、截尾数为 r 的截尾样本前 r 个最小寿命观测值依次为 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$, $r < n$.其概率分布函数和密度函数分别为 $F(t)$ 和 $f(t)$.定义 $h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$ 为加速 t 时刻的失效率.



$h(t) dt$ 表示试件在 $(t, t+dt)$ 区间内的失效概率.

$$h(t) dt = \frac{n(t) - n(t+dt)}{n(t)} t \quad (14)$$

$1 - F(t)$ 为加速 t 时刻的可靠性,记作 $R(t)$ ^[25].

$$R(t) = 1 - F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\Psi_2 - \Psi_1)}} \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt d\Psi \quad (15)$$

式中: Ψ 为相对腐蚀评价参数.

利用Matlab软件将表4中参数 Ψ_1 和 Ψ_2 代入式(15),得到恒电流加速锈蚀与氯离子扩散腐蚀双因素下的可靠性分布,如图9所示.

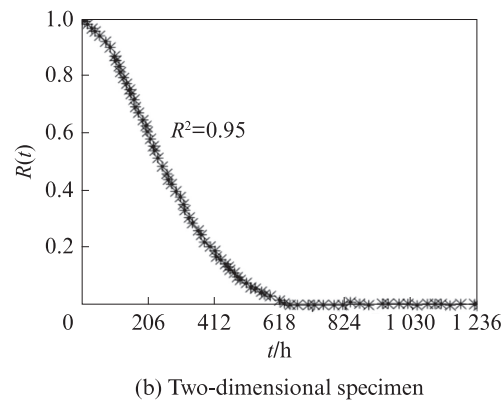


图9 可靠性分布

Fig. 9 Reliability distribution

由图9可知:基于可靠性分析,一维和二维试件的预测平均寿命分别为927、618 h,表明石蜡层能够显著延长盐渍土环境下恒电流加速锈蚀试验中试件的平均寿命,同时降低腐蚀速率.混凝土表面石蜡层能有效阻止、延缓氯离子等侵入,从而减小了氯离子的扩散系数,增加了钢筋表面氯离子含量达到阈值的时间.根据 Ψ_1 和 Ψ_2 变化规律分析,恒电流加速锈蚀试验对钢筋混凝土性能的劣化以石蜡层对氯离子扩散腐蚀作用的抵消为主,以石蜡层对恒电流加速锈蚀作用的抵消为辅.混凝土表面性质改变会影响氯离子的正向扩散作用,氯离子扩散腐蚀作用发挥的关键是钢筋表面氯离子含量达到阈值后发生化学反应,显著降低了氯离子扩散腐蚀作用因素输出值.而恒电流加速锈蚀因素的输出值由恒电流仪持续稳定输出,石蜡层无法直接影响其输出值,只能间接减小恒电流加速锈蚀因素的腐蚀速率.石蜡层混凝土表面导电性能较低,在回路电路系统中会减小电流传输效能,同时错失恒电流加速锈蚀与氯离子扩散腐蚀双因素叠加发挥最佳腐蚀效率的时机.恒电流

加速锈蚀使钢筋表面生成致密锈蚀产物,近似于在钢筋外表面形成保护层,阻碍了氯离子扩散腐蚀作用的发挥.

4 结论

(1)本文推导了基于可靠性的盐渍土环境下恒电流加速锈蚀钢筋混凝土劣化模型,一维和二维试件的预测平均寿命分别为927、618 h,表明石蜡层设计不仅可以减小腐蚀性离子渗入,作为控制变量因素的方法,还可以用于盐渍土地区混凝土结构的外防护.

(2)盐渍土环境下恒电流加速锈蚀试验中,钢筋混凝土受到恒电流加速锈蚀和氯离子扩散腐蚀的双因素耦合作用.氯离子反向渗透与钢筋钝化膜破坏的逐渐加剧,是钢筋混凝土劣化的主要原因.

(3)基于可靠性的钢筋混凝土劣化模型,能够实现对恒电流加速锈蚀和氯离子扩散腐蚀双因素作用下的钢筋混凝土综合寿命分析,为研究钢筋混凝土在复杂服役环境下的寿命特征提供理论依据,为盐

渍土环境下的钢筋混凝土耐久性提升积累基础数据.

参考文献:

- [1] 宋述芳,吕震宙,王燕萍.可靠性工程基础[M].西安:西北工业大学出版社,2018:156.
SONG Shufang, LÜ Zhenzhou, WANG Yanping. Reliability engineering basis [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2018:156. (in Chinese)
- [2] 郭永基.可靠性工程原理[M].北京:清华大学出版社,2002:42.
GUO Yongji. Principles of reliability engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002:42. (in Chinese)
- [3] 胡昌寿.可靠性工程设计、试验、分析、管理[M].北京:宇航出版社,1989:39.
HU Changshou. Reliability engineering design, test, analysis and management [M]. Beijing: Astronautic Press, 1989: 39. (in Chinese)
- [4] 杨绿峰,陈昌,余波.海洋浪溅区混凝土的多因素时变环境作用模型[J].硅酸盐学报,2019,47(11):1566-1573.
YANG Lufeng, CHEN Chang, YU Bo. Multi-factor time-varying model of marine environmental action on concrete in splash zone[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(11): 1566-1573. (in Chinese)
- [5] SONG H W, LEE C H, ANN K Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(2): 113-121.
- [6] PACK S W, JUNG M S, SONG H W, et al. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2): 302-312.
- [7] LIU W, LI Y Q, TANG L P, et al. Modelling analysis of chloride redistribution in sea-sand concrete exposed to atmospheric environment [J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 331-341.
- [8] 刘奇东,刘荣桂,姜慧,等.海洋干湿交替区混凝土结构的人工气候模拟加速试验设计[J].混凝土,2013(11):50-52,67.
LIU Qidong, LIU Ronggui, JIANG Hui, et al. Artificial climate simulation acceleration test design of concrete structure in wet-dry cycling zone of marine environment[J]. Concrete, 2013(11): 50-52,67. (in Chinese)
- [9] 袁迎曙,章鑫森,姬永生.人工气候与恒电流通电法加速腐蚀钢筋混凝土梁的结构性能比较研究[J].土木工程学报,2006,39(3):42-46.
YUAN Yingshu, ZHANG Xinsen, JI Yongsheng. A comparative study on structural behavior of deteriorated reinforced concrete beam under two different environments [J]. Chinese Civil Engineering Journal, 2006,39(3): 42-46. (in Chinese)
- [10] 郑帆,史桂均,董必钦,等.钢筋混凝土通电加速锈蚀行为可视化表征[J].硅酸盐学报,2018,46(8):1081-1086.
ZHENG Fan, SHI Guiyun, DONG Biqin, et al. Visual characterization on current accelerated corrosion profile of reinforcements[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(8): 1081-1086. (in Chinese)
- [11] 尚明刚,何忠茂,乔宏霞,等.基于恒电流密度的钢筋混凝土加速腐蚀试验研究[J].材料导报,2020,34(22):22058-22064.
SHANG Minggang, HE Zhongmao, QIAO Hongxia, et al. Experimental research on accelerated corrosion of reinforced concrete based on constant current density[J]. Materials Reports, 2020, 34(22): 22058-22064. (in Chinese)
- [12] ABOSRRA L, ASHOUR A F, YOUSEFFI M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25 (10): 3915-3925.
- [13] MA Y, CHE Y, GONG J X. Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29:548-556.
- [14] VUK A T, STEWART M G. Predicting the likelihood and extent of reinforced concrete corrosion-induced cracking[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(11): 1681-1689.
- [15] 干伟忠,金伟良,高明赞.混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J].建筑结构学报,2011,32(2):41-47.
GAN Weizhong, JIN Weiliang, GAO Mingzan. Applicability study on accelerated corrosion methods of steel bars in concrete structure[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 41-47. (in Chinese)
- [16] 包卫星.内陆盐渍土工程性质与公路工程分类研究[D].西安:长安大学,2009.
BAO Weixing. Study on engineering properties and engineering classification of inland saline soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [17] 冯琼,乔宏霞,朱彬荣,等.湿盐砂环境下钢筋混凝土加速锈蚀试验研究[J].建筑材料学报,2018,21(4):568-575.
FENG Qiong, QIAO Hongxia, ZHU Binrong, et al. Experimental study on accelerated corrosion of reinforced concrete in wet salt sand environment[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 568-575. (in Chinese)
- [18] 胡茂圃.腐蚀电化学[M].北京:冶金工业出版社,1991:260.
HU Maopu. Corrosion electrochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991:260. (in Chinese)
- [19] 王鹏辉,乔宏霞,冯琼,等.氯氧镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐久性退化研究[J].建筑材料学报,2020,23(3):563-571.
WANG Penghui, QIAO Hongxia, FENG Qiong, et al. Study on durability degradation of coated steel bar in magnesium oxychloride cement concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020,23(3):563-571. (in Chinese)
- [20] 王风平,康万利,敬和民.腐蚀电化学原理、方法及应用[M].北京:化学工业出版社,2008:84.
WANG Fengping, KANG Wanli, JING Hemin. Corrosion electrochemistry principle, method and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:84. (in Chinese)
- [21] 陈克凡,乔宏霞,王鹏辉,等.氯氧镁水泥钢筋混凝土通电锈蚀的断裂性能分析[J].建筑材料学报,2020,23(3):557-562.
CHEN Kefan, QIAO Hongxia, WANG Penghui, et al. Fracture behavior analysis of magnesium oxychloride cement reinforced concrete under electric corrosion[J]. Journal of Building Materials, 2020,23(3):557-562. (in Chinese)

- [22] 赵铁军. 渗透型涂料表面处理与混凝土耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 27.
ZHAO Tiejun. Surface treatment with permeable coating and durability of concrete[M]. Beijing: Science Press, 2009: 27. (in Chinese)
- [23] 潘金生, 仝健民, 田民波. 材料科学基础[M]. 北京: 清华大学工业出版社, 2011: 22.
PAN Jinsheng, TONG Jianmin, TIAN Minbo. Fundamentals of materials science[M]. Beijing: Tsinghua University Industry Press, 2011: 22. (in Chinese)
- [24] 孙伟. 现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 345.
SUN Wei. Durability evaluation and service life prediction of modern concrete [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015: 345. (in Chinese)
- [25] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 164.
ZHAO Yu. Data analysis of reliability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 164. (in Chinese)

(上接第 671 页)

- WANG Peiming, ZHU Huimei, ZHANG Guofang. The effects of test methods and environmental conditions on early efflorescence of decorative mortar [C]//4th Science and Technology of Commercial Mortar. Shanghai: Tongji University Press, 2011: 293-299. (in Chinese)
- [15] RUDNOV V S, BELYAKOV V A. Effective ways to reduce leaching and formation of efflorescence on structures [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 687 (2): 22-25.
- [16] 沈锐, 李云军. 超高性能混凝土工作性改善措施研究[J]. 重庆建筑, 2020, 195(1): 39-41.
SHEN Rui, LI Yunjun. Study on improving measures of workability of ultra high performance concrete [J]. Chongqing Architecture, 2020, 195(1): 39-41. (in Chinese)
- [17] 曹明莉, 许玲, 张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 246-252.
CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Influence of calcium carbonate whisker on rheology of cement mortar with different water-cement ratios and sand-cement ratios [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44 (2): 246-252. (in Chinese)
- [18] KONTOYANNIS C G, VAGENAS N V. Calcium carbonate phase analysis using XRD and FT-Raman spectroscopy [J]. The Analyst, 2000, 125(2): 251-255.
- [19] SINGH A, SINGH S K. The impact of various drug ferrying additives on phase transitions behavior of calcite, vaterite and aragonite [J]. Phase Transitions, 2019, 92(11): 990-1008.
- [20] CARTERET C, DANDEU A, MOUSSAOUI S, et al. Polymorphism studied by lattice phonon raman spectroscopy and statistical mixture analysis method. Application to calcium carbonate polymorphs during batch crystallization [J]. Crystal Growth and Design, 2009, 9(2): 807-812.
- [21] DE LA PIERRE M, CARTERET C, MASCHIO L, et al. The Raman spectrum of CaCO₃ polymorphs calcite and aragonite: A combined experimental and computational study [J]. The Journal of Chemical Physics, 2014, 140(16): 164509.
- [22] KÜTHER J, SESHADRI R, KNOLL W, et al. Templated growth of calcite, vaterite and aragonite crystals on self-assembled monolayers of substituted alkylthiols on gold [J]. Journal of Materials Chemistry, 1998, 8(3): 641-650.
- [23] BOYJOO Y, PAREEK V K, LIU J. Synthesis of micro and nano-sized calcium carbonate particles and their applications [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(35): 14270-14288.
- [24] 孙振平, 庞敏, 俞洋, 等. 减水剂对水泥浆体横向弛豫时间曲线的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(3): 537-543.
SUN Zhenping, PANG Min, YU Yang, et al. Effect of superplasticizer on transverse relaxation time curve of cement paste [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39 (3): 537-543. (in Chinese)
- [25] GORCE J P, MILESTONE N B. Probing the microstructure and water phases in composite cement blends [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(3): 310-318.