

杂散电流与氯盐作用下埋地混凝土中钢筋锈蚀研究

鹿 婷¹, 金祖权¹, 陈兆毅², 李祥翔¹, 胡 源¹, 杜占涛¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300000)

摘要: 沿海地铁轨道钢筋混凝土结构因电流泄漏会处于杂散电流和氯离子共存环境中, 导致轨道混凝土结构快速失效. 本文在真实土壤中掺加 1.5% 氯盐构建盐渍土环境, 采用 10~30 V 恒压直流电模拟杂散电流, 研究钢筋混凝土在杂散电流与氯盐复合下的腐蚀损伤、锈蚀产物特性及其锈胀应力等. 结果表明: 混凝土中近保护层钢筋首先锈蚀、锈蚀面钢筋呈现部分点蚀并伴有非均匀锈蚀现象, 但随着腐蚀进行、钢筋上表面发生大面积锈蚀并向远保护层发展; 钢筋锈蚀产物主要以亚铁氧化物为主、并伴随有氯化亚铁存在; 钢筋锈蚀产生的膨胀应力大约在 2~3 MPa; 土壤氯离子含量增加、杂散电流密度增大会加速钢筋锈蚀和混凝土开裂, 锈胀应力提高 50% 左右; 杂散电流和氯离子共同作用下钢筋锈蚀程度远大于单一因素的影响.

关键词: 钢筋混凝土; 杂散电流; 氯离子; 盐渍土; 腐蚀

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0484-08

Study on corrosion of reinforcement in buried concrete under the action of stray current and chlorine salt

LU Ting¹, JIN Zuquan¹, CHEN Zhaoyi², LI Xiangxiang¹, HU Yuan¹, DU Zhantao¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. National Railway Design Group Co. Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: The reinforced concrete structure of coastal subway track will be in the coexistence environment of stray current and chloride ions due to current leakage, which leads to the rapid failure of track concrete structure. In this paper, 1.5% chloride salt is mixed with real soil to construct saline soil environment, and 10-30 V constant voltage DC is used to simulate stray currents to study the corrosion damage, corrosion product characteristics and its corrosion-induced expansive pressure of reinforced concrete under the compound of stray currents and chloride salt. The results indicate that the reinforcement near the protective layer in concrete first rusts, and the reinforcement on the rusted surface shows partial pitting corrosion accompanied by non-uniform corrosion. However, as the corrosion progresses, a large area of corrosion occurs on the upper surface of the reinforcement and develops towards the far protective layer. The corrosion products of reinforcement are mainly ferrous oxides, accompanied by ferrous chloride, and the expansion stress generated by the corrosion of reinforcement is about 2-3 MPa. The increase of soil chloride ion content and stray current density will accelerate the corrosion of reinforcement and concrete cracking, and the corrosion expansion stress will increase by about 50%. The corrosion degree of reinforcement under the combined action of stray current and chloride ions is much greater than that of a single factor.

Key words: reinforced concrete; stray current; chloride ions; salt soil; corrosion

随着沿海城市人口增长与建设高速发展, 地铁工程正在加速推进. 沿海地铁部分途经区域不可避免与海水形成地下水连通, 造成地铁车站和区间钢筋混凝土衬砌、地下室底板、轨枕等与含

有海水的盐渍土接触, 盐渍土中的氯离子将通过扩散、毛细吸附等传输至混凝土内部钢筋表面, 导致钢筋锈蚀、膨胀、混凝土保护层剥落破坏^[1].

地铁在运行过程中行走轨的电阻一般在 5~

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-14

基金项目: 国家铁路集团有限公司科技研究开发计划基金项目(N2020G055)和交通运输行业重点科技基金项目(2021-ZD1-012)

第一作者: 鹿 婷(1997—), 女, 硕士, 主要从事海洋环境混凝土耐久性研究. E-mail: lt15194270700@163.com

通信作者: 金祖权(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋环境混凝土耐久性研究. E-mail: jinzuquan@126.com

100 Ω · km 范围内;但随着运营年代的增加以及恶劣的外界环境影响,将不可避免地出现绝缘老化、轨道接缝受损等问题,从而出现回流行走轨对道床的绝缘下降,行走轨电阻增大导致钢轨泄露电阻减小和列车处走行轨电位升高,从而向道床及车站、隧道结构泄漏电流,形成杂散电流^[2].杂散电流的存在将直接导致混凝土中钢筋产生电化学腐蚀,并加快盐渍土中氯离子向混凝土中快速迁移,使得地铁钢筋混凝土受到杂散电流与氯盐复合作用,耐久性能受到严重威胁^[3].此外,杂散电流对钢筋的腐蚀往往集中于某些局部位置,如保护层相对薄弱的地方,这些部位的钢筋将很快锈断^[4].

Luca Bertolini^[5]讨论了直流/交流电流与氯离子耦合作用对混凝土中钢筋腐蚀的影响,指出直流杂散电流对钢筋腐蚀要远远大于交流杂散电流.耿健^[6]利用直流电场模拟杂散电流,并分析了杂散电流下氯离子向混凝土内部的传输规律.张二猛^[7]研究发现杂散电流产生的电场能使更多氯离子以自由态存在并快速迁移,对混凝土的耐久性能产生不利影响.吴泉水^[8]发现杂散电流会加快氯离子向混凝土内部迁移的速率,导致钢筋锈蚀速度加快、混凝土保护层提前开裂.王凯^[9]研究了杂散电流对氯离子向混凝土内传输速度影响,建立了考虑杂散电流密度、氯离子浓度的混凝土中氯离子传输模型.陈梦成^[10]采用直流电模拟杂散电流,并利用电化学测试技术分析了混凝土中钢筋锈蚀演变.周晓军^[11]对埋置在水和土壤两种腐蚀介质中的钢筋混凝土试块施加不同的电压值,测定钢筋发生电化学腐蚀时的电化学当量和腐蚀速率.张威^[12]研究发现,杂散电流与氯离子耦合作用下混凝土中钢筋破钝电位降低,钢筋提早进入腐蚀状态.郭振华^[13]采用现场收集的随时间变化的杂散电流信号和等电荷量的直流电进行钢筋锈蚀试验,采用 XCT 无损检测获得混凝土中钢筋锈蚀时变规律.陈迅捷^[14]研究了在一般环境、氯化物环境、冻融-氯化物环境中,杂散电流对普通钢筋混凝土和高性能混凝土的腐蚀程度影响.陆晨浩^[15]

通过模拟腐蚀试验,探讨了掺合料种类、含量等对混凝土中钢筋杂散电流腐蚀的影响规律.丁庆军^[16]对有无杂散电流环境下水泥石的氯离子固化能力进行研究,结果表明杂散电流能够将水泥石中钝化的氯离子转化成活泼的氯离子.杜应吉^[17]研究发现活性掺合料可以通过提升混凝土中钢筋的钝化膜电阻和累积电量来提高混凝土阻抗,从而增强地铁工程中钢筋混凝土的抗杂散电流能力.

综上所述,研究者大多通过直流/交流电模拟杂散电流并与氯盐耦合,开展了钢筋混凝土腐蚀加速试验.但由于杂散电流泄漏程度不同、盐渍土受海水污染程度不同,钢筋混凝土受到的杂散电流密度、腐蚀离子浓度存在显著差异.本文采用青岛沿海土壤中掺加氯盐构建盐渍土环境、利用 10~30 V 直流恒压电流模拟杂散电流,分析混凝土中钢筋腐蚀电化学参数、钢筋锈胀应力演变,探究杂散电流密度、盐渍土中氯离子浓度对混凝土中钢筋锈蚀的影响.

1 试验

1.1 混凝土原材料与配合比

中国建筑材料科学研究总院生产的 P · I 42.5 基准水泥、S95 级矿粉、I 级粉煤灰作为胶凝材料,主要化学成分如表 1 所示.细度模数为 2.7、含泥量 1.7% 的青岛大沽河河沙为细骨料,5~25 mm 花岗岩碎石为粗骨料,减水率为 30% 的江苏苏博特 JM-PCA(I) 型聚羧酸减水剂用于调节混凝土的工作性,混凝土配合比及 28 d 抗压强度如表 2 所示.

表 1 胶凝材料的主要化学组成/%

Tab. 1 Main chemical composition of cementitious materials/%

类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	eq-Na ₂ O
水泥	20.60	4.57	63.27	3.29	2.11	2.59	1.40
矿粉	32.58	13.27	41.06	1.34	2.68	5.62	0.45
粉煤灰	50.80	25.20	8.50	6.80	1.50	1.40	1.10

表 2 混凝土配合比/kg · m⁻³

Tab. 2 Mix proportion of concrete/kg · m⁻³

配合比/(kg · m ⁻³)						水胶比 W/C	28 d 抗压强度/MPa
水泥	矿粉	粉煤灰	砂子	石子	水		
337	45	68	650	1 130	162	0.36	65.2

1.2 直流恒压电流模拟杂散电流加速腐蚀试验

按表2所示成型100 mm×100 mm×300 mm的钢筋混凝土试件,混凝土中预埋直径为25 mm的HRB400型螺纹钢筋,保护层厚度为25 mm;钢筋混凝土标准养护28 d后取出并埋置于装满土壤(含水率为10%)的塑料箱中,土壤氯离子含量设为0、1.5%,试验方案如表3所示.采用直流电模拟杂散电流,恒电压设置为10 V、20 V、30 V.电源正极连接试件中的钢筋,碳棒作为负极并直接插入土壤.

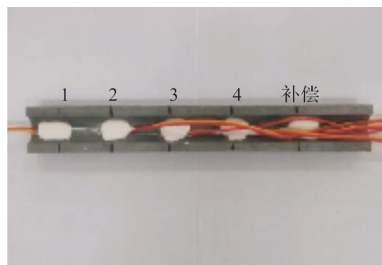
表3 试验方案

Tab.3 Experimental programme

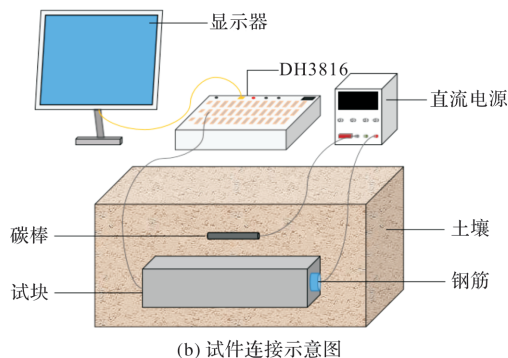
编号	电场强度/V	土壤氯离子含量/%
DC1	10	0
DC2	20	0
DC3	30	0
DC4	20	1.5

1.3 钢筋锈胀应变测试及应力计算

采用直径为25 mm的HRB400型螺纹钢筋,沿钢筋长度方向水平切开挖出直径为15 mm的半圆形凹槽.对钢筋进行酸洗除锈后放入饱和氢氧化钙溶液中和,随后用清水冲洗并放入烘箱烘干水分.待钢筋完全干燥后取出,在钢筋内壁中部环贴应变片作为测试片,在内壁端部纵贴应变片作为温度补偿片,试验采用120-5AA混凝土应变片,贴片位置如图1(a)所示.



(a) 应变片粘贴位置图



(b) 试件连接示意图

图1 直流电模拟杂散电流对钢筋腐蚀试验

Fig.1 Corrosion experiment of reinforced concrete by DC simulate stray current

将两部分钢筋用环氧树脂粘贴在一起,在其中一端绑扎导线后,两端均用环氧树脂密封,防止水分进入钢筋内部.通过测量钢筋内壁环向应变可以计算钢筋外壁锈蚀产生的锈胀力,根据作用力与反作用力理论,作用于钢筋外壁的压力与钢筋的锈胀力大小相同方向相反.故可求得钢筋锈胀力为^[18]

$$q = (1 - \sqrt{1 - \epsilon_{hs}}) \frac{E_s (r^2 - r_1^2)}{2\mu r^2} \quad (1)$$

式中: q 为钢筋外壁压力, MPa; ϵ_{hs} 为钢筋内壁环向应变; E_s 为钢筋弹性模量, GPa; μ 为钢筋泊松比; r 为钢筋外半径, mm; r_1 为钢筋内半径, mm.

1.4 混凝土中钢筋腐蚀电化学测试

本试验使用 PARSTAT 4000A 电化学工作站测试混凝土中钢筋的电化学阻抗谱(EIS).电化学测试采用三电极法,饱和甘汞电极作参比电极,碳棒作辅助电极,混凝土中的钢筋作工作电极.在电化学测试中,扫描频率为10 mHz~1 MHz,施加的交流电压为10 mV,恒电位加速腐蚀过程中每隔12小时测试一次.

1.5 锈蚀产物形貌及成分观测

对杂散电流腐蚀7 d的钢筋混凝土试件破型,宏观观察钢筋锈蚀状态和溢锈状况.采用扫描电镜观测混凝土中钢筋锈蚀产物的形貌,使用X射线衍射仪对锈蚀产物进行物相分析.对钢筋酸洗除锈,观察钢筋形貌变化.

2 结果与讨论

2.1 混凝土中钢筋锈蚀形貌分析

随着腐蚀持续进行,混凝土出现贯穿上保护层的顺筋裂缝,且随着模拟杂散电流密度和土壤氯离子含量增大,裂缝越宽、溢锈现象更加明显.对混凝土试件破型取出钢筋,如图2(a)和(c)所示.钢筋近、远保护层面均发生锈蚀,但锈蚀最先发生在近保护层面,逐步向远保护层面延伸.对锈蚀钢筋酸洗,由图2(b)和(d)可看出,钢筋近保护层面均出现明显的点蚀、坑蚀及难以洗掉的大块锈蚀产物;远保护层面均出现点蚀现象.采用超景深显微镜对钢筋锈坑进行定量测试,如图3所示.10~30 V电压作用下混凝土中锈蚀钢筋最大锈坑深度分别为437、1 083、1 592 μm ,锈蚀面积分别为4 065 229、9 440 315和9 824 563 μm^2 ;含有0和1.5%氯离子浓度的土壤里腐蚀混凝土中钢筋的最大锈坑深度和面积分别为1 083 μm 、

9 440 315 μm^2 , 1 267 μm 、9 765 501 μm^2 . 因此, 杂散电流和氯离子导致混凝土中近保护层和远保护层钢筋表面均发生锈蚀, 但近保护层钢筋腐蚀更为严重; 混凝土中钢筋表面呈现出明显的点蚀现象. 杂散电压由 10 V 增加到 30 V, 锈坑深度和锈蚀面积分别增加了 264.3%和 141.2%; 土壤中含有氯离子使得钢筋锈蚀更加严重, 锈坑深度和锈蚀面积分别增加了 17%和 3.4%.

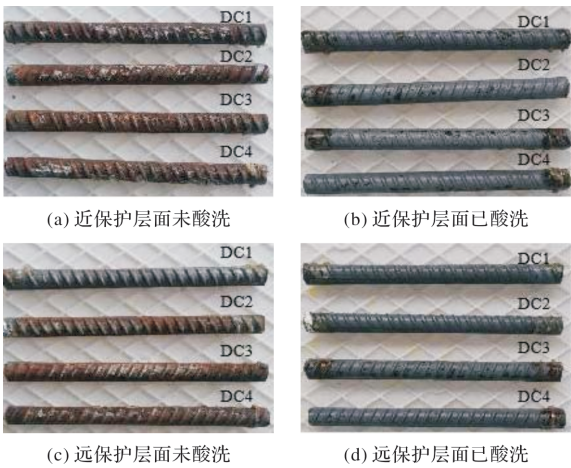


图 2 钢筋酸洗前后形貌图

Fig. 2 Morphology of reinforcement before and after pickling

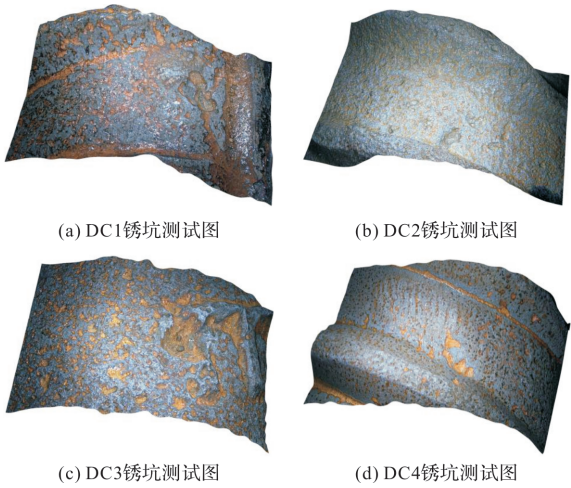


图 3 钢筋锈坑测试图

Fig. 3 Rust pit of reinforced bar in concrete

钢筋锈斑电镜图如图 4(a)~(d)所示, 随着模拟杂散电流密度增大、土壤氯离子含量增加, 钢筋锈蚀速度加快、相同时间内产生的锈蚀产物增多, 这些锈蚀产物相互挤压、堆积致使锈斑越来越密实. 观察钢筋锈蚀产物微观形貌有块状、粒状、片层状、密实针状, 根据 EDS 测试获得锈蚀产物中的 O/Fe 值在 1.19~1.74 之间, 结果如表 4 所示. XRD 测试结果表明锈蚀产物中主要存在针铁矿($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$)、四方纤铁矿($\beta\text{-FeO}(\text{OH})$)和

磁铁矿(Fe_3O_4), 也存在少量的纤铁矿($\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$). 这是由于钢筋混凝土试块埋置在土壤中, 土壤中氧气含量较低, 在杂散电流加速腐蚀下, 氧气消耗速度更快, 钢筋锈蚀产物氧含量明显降低, 锈蚀产物以二价铁离子为主. 对比 DC1、DC2、DC3 和 DC2、DC4 作用下钢筋锈蚀产物的 O/Fe 值, 随杂散电流密度增加以及氯盐作用下, 锈蚀产物的 O/Fe 值变大, 这是由于增大模拟杂散电流密度和土壤氯离子含量使混凝土锈蚀裂缝变宽, 空气能够沿裂缝快速渗透至锈蚀产物处, 使得钢筋锈蚀产物从 Fe_3O_4 转变为 Fe_2O_3 . 除此之外, XRD 还检测出锈蚀产物中存在氯化物, 这是由于土壤中 Cl^- 渗透至钢筋表面生成 FeCl_2 所致.

表 4 锈蚀产物的原子比 (%)

Tab. 4 Atomic ratio of rust products (%)

编号	O	Fe
DC1	54.306	45.694
DC2	57.727	42.273
DC3	60.730	39.270
DC4	63.480	36.520

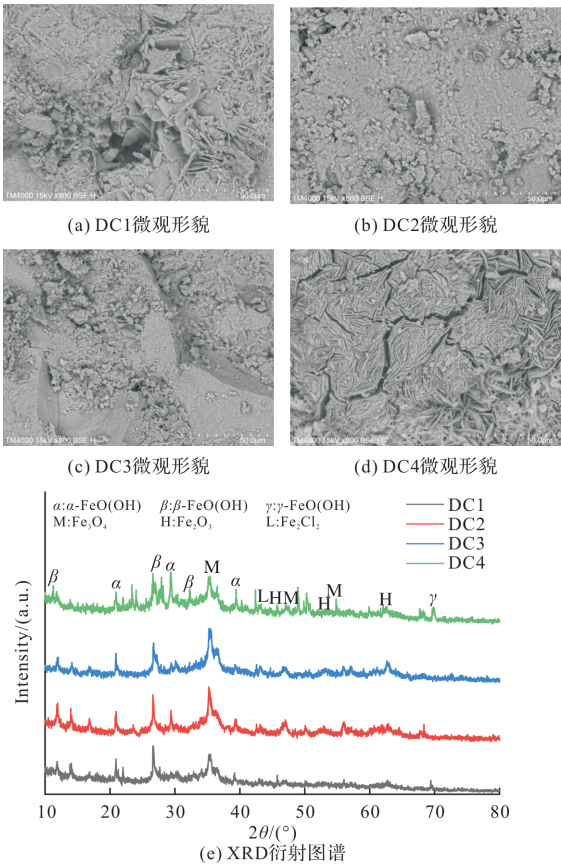


图 4 钢筋锈蚀产物主要形貌及 XRD 衍射图谱

Fig. 4 Main morphology and XRD diffraction pattern of corrosion products

2.2 混凝土中钢筋锈胀应力演变

2.2.1 杂散电流密度影响

对 10~30 V 杂散电流腐蚀作用下混凝土中钢筋内表面锈胀应变进行测试,并计算锈胀应力如图 5(a)~(f)所示.混凝土中钢筋内表面均能采集到由于钢筋锈蚀施加的锈胀应力而产生的应变,钢筋内表面 4 个测点的应变演变速度、拐点不完全一致,表明了钢筋受到非均匀锈蚀应力作用.钢筋内表面应力-应变随着钢筋锈蚀程度的增加,先增加后减小,锈胀力拐点的出现意味着混凝土开始出现开裂、应力释放现象.依据首个应变拐点判别钢筋-混凝土界面区开裂时间,在 10~30 V 电压构建三种杂散电流密度环境下的开裂时间分别为 75.5 h、69 h、63.5 h,钢筋内表面的测点应变峰值分别为 $176.6 \mu\epsilon$ 、 $259.8 \mu\epsilon$ 、 $188.3 \mu\epsilon$,计算钢筋锈蚀导致混凝土开裂的临界锈胀应力分别为 2.1 MPa、3.1 MPa、2.3 MPa.因此,钢筋混凝土在杂散电流作用下将发生非均匀锈蚀,杂散电流密度越大、钢筋锈蚀速度越快、混凝土锈胀开裂时间越短.

土在杂散电流作用下将发生非均匀锈蚀,杂散电流密度越大、钢筋锈蚀速度越快、混凝土锈胀开裂时间越短.

2.2.2 氯离子含量影响

对氯离子含量为 1.5% 土壤中钢筋混凝土腐蚀,其钢筋应变及计算的锈胀应力如图 5(g)和(h)所示.未受到氯离子污染土壤中,钢筋导致混凝土锈胀开裂时间为 69 h;在土壤氯离子含量为 1.5% 的环境中,钢筋混凝土锈胀开裂时间缩短至 48 h.显然,土壤中的氯离子在浓度差与电场作用下加速向混凝土内部钢筋表面迁移,氯离子与杂散电流复合作用使得钢筋锈蚀加速,钢筋更容易锈蚀.此外,在氯盐与杂散电流复合作用下,钢筋混凝土锈胀开裂应力为 4.5 MPa,而在杂散电流作用下的锈胀开裂应力为 3.1 MPa;也即是氯离子存在使得钢筋锈蚀产物更为致密,其产生的锈胀应力更大.

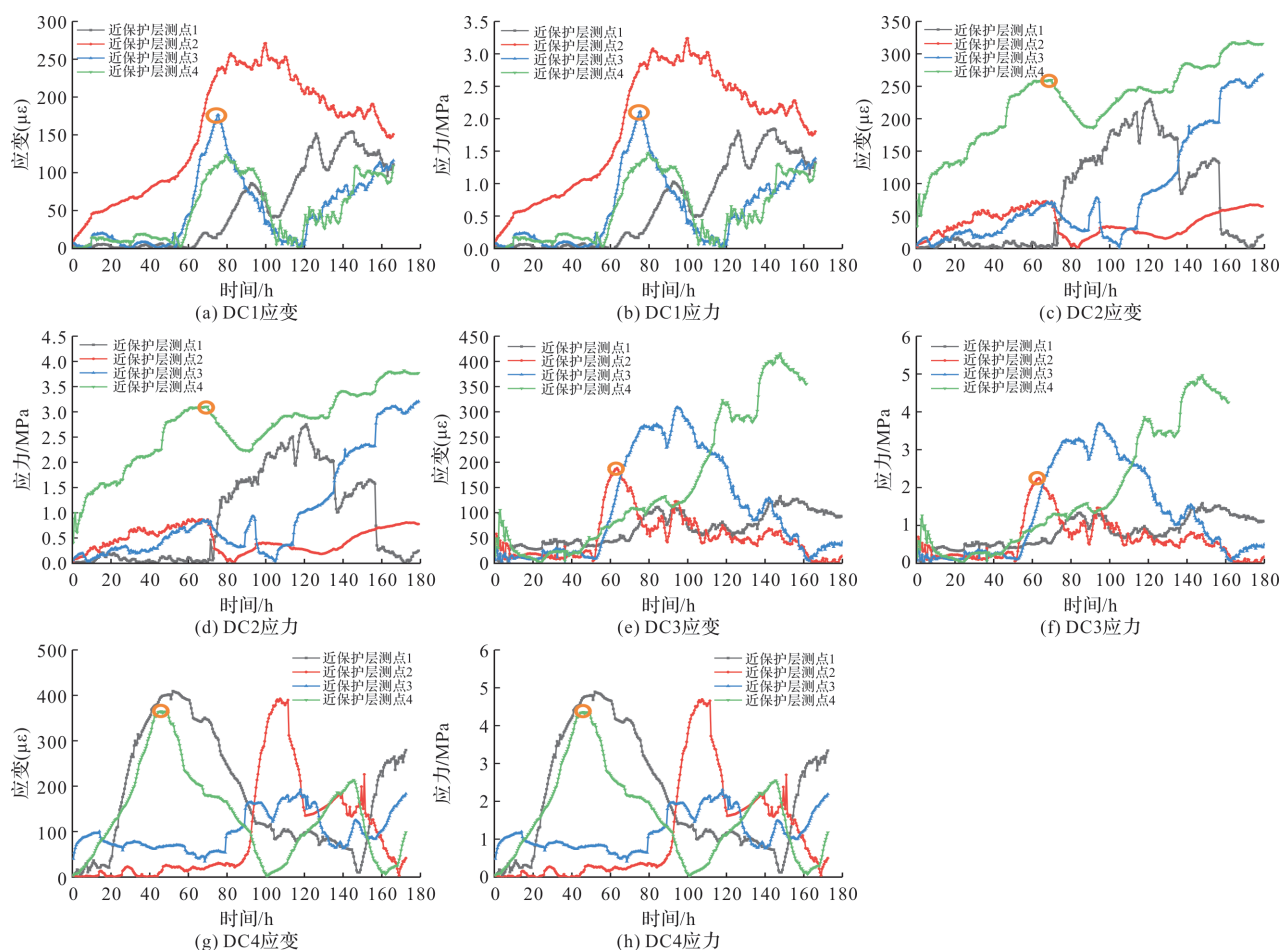


图5 钢筋-混凝土界面膨胀应变和锈胀应力

Fig. 5 Expansion strain and expansion stress at reinforced-concrete interface

2.3 钢筋腐蚀电化学参数演变

盐渍土中钢筋混凝土在 10~30 V 杂散电流作用下,测试其电化学参数演变如图 6 所示.腐蚀初

期,混凝土中钢筋的 Nyquist 图中低频区曲线斜率上扬, Bode 图中低频区最大相位角均在 70° 左右,表明此时钢筋处于钝化状态.钢筋混凝土腐蚀

72 h、36 h、12 h 后, DC1、DC2、DC3 混凝土中钢筋 Nyquist 图的容抗弧急速减小, 相位角减小至 30°、45°、25°, 表明钢筋已经出现了严重的锈蚀现象. 土壤中掺加 1.5% 的氯离子后, DC4 试件腐蚀 12 h 后, 其相位角迅速降至 25°, 相比于未污染土壤中钢筋混凝土提前了 24 h.

由于 Nyquist 图和 Bode 图只能通过图形拓扑

结构定性分析钢筋腐蚀情况, 无法获得腐蚀的具体信息. 本试验使用 Zsimpwin 拟合软件, 选择 R(QR)(QR)等效电路图对阻抗谱拟合获得钢筋极化电阻 R_p , 如图 7(b)所示. 根据 Stern-Geary 公式可计算得到不同腐蚀龄期的腐蚀电流密度, 如图 7(c)所示.

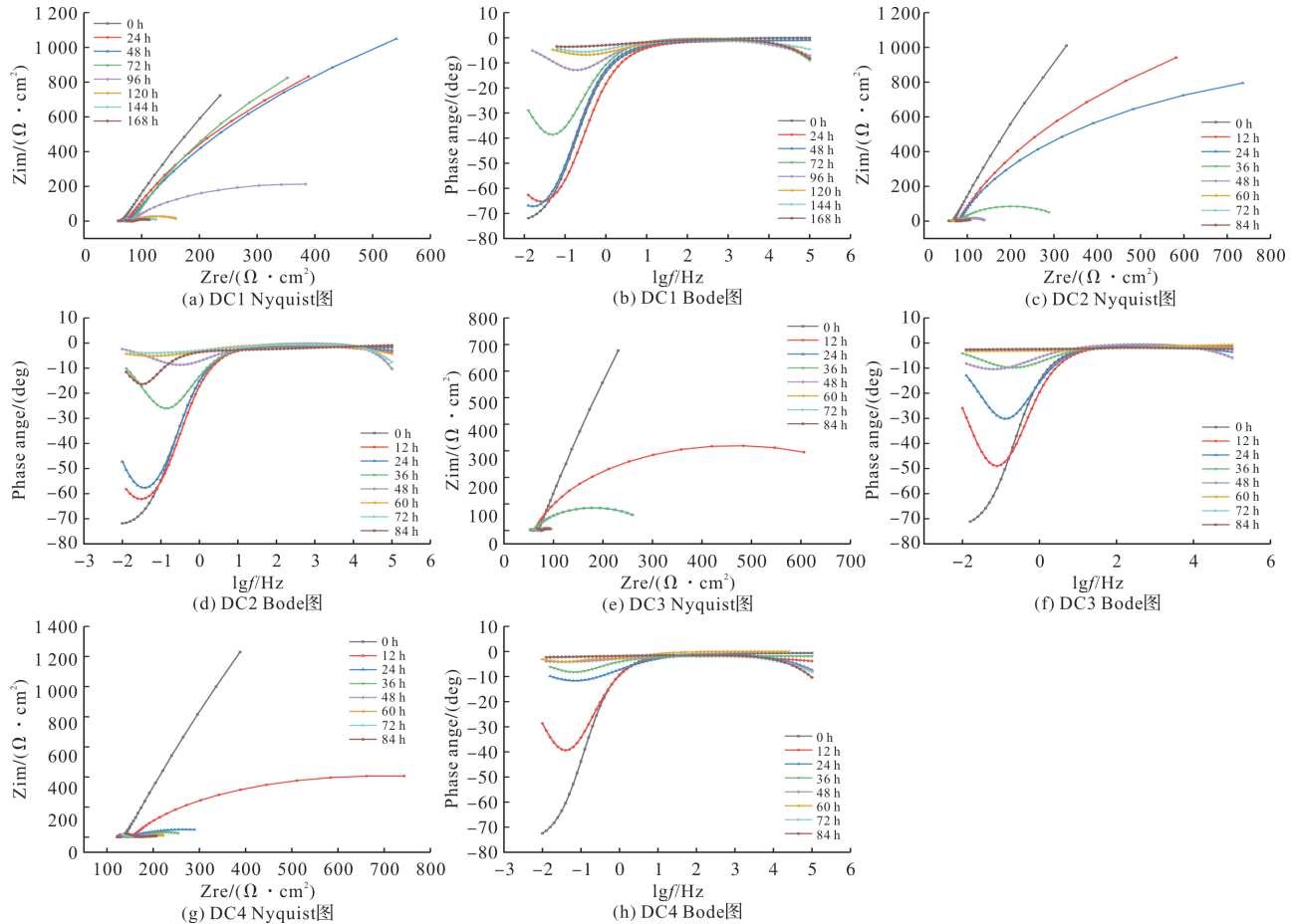


图 6 不同环境中钢筋的 Nyquist 图和 Bode 图

Fig. 6 Nyquist and Bode plots of rebar in different environments

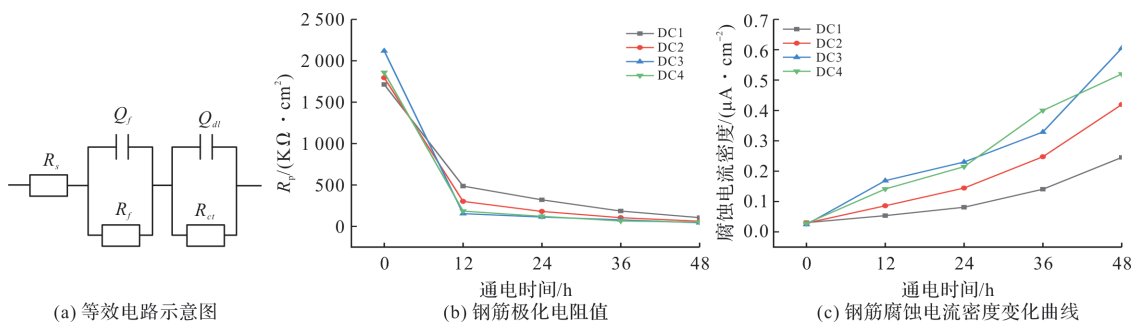


图 7 钢筋极化电阻和腐蚀电流密度图

Fig. 7 Polarization resistance and corrosion current density map of rebar

随着混凝土中钢筋腐蚀进行, 钢筋的极化电阻随腐蚀龄期的增加而降低, 腐蚀电流密度不断增大, 表明钢筋的腐蚀速度逐渐加快; 增大模拟

杂散电流密度和土壤氯盐含量, 腐蚀电流密度显著提升, 表明二者对钢筋腐蚀具有加速作用.

3 结论

(1)杂散电流作用下混凝土中近保护层钢筋首先锈蚀,锈蚀面钢筋呈现部分点蚀并伴随有非均匀锈蚀现象,随着腐蚀进行钢筋近保护层发生大面积锈蚀并延伸至远保护层面,增大杂散电流密度和土壤氯离子含量加速混凝土中钢筋腐蚀速率;

(2)盐渍土混凝土中钢筋在杂散电流作用下锈蚀产物主要是针铁矿、四方纤铁矿和磁铁矿并伴随有氯化亚铁存在;随杂散电流密度增加和土壤氯离子含量增大,钢筋锈蚀产物更加密实,但更宽的锈蚀裂缝使得环境中氧气更易渗透至钢筋,锈蚀产物的 O/Fe 值增加;

(3)通过测量钢筋内壁环向应变可实时获得混凝土中钢筋锈胀应力演变,杂散电流作用下混凝土中钢筋锈胀应力大致在 2~3 MPa,盐渍土中氯盐存在使得钢筋锈胀应力提高了 1.5 MPa 左右;

(4)模拟杂散电流的恒电压由 10 V 提高至 20 V 和 30 V,混凝土中钢筋严重锈蚀时间分别提前了 36、60 h,混凝土锈胀开裂时间提前了 6.5、12 h;土壤中氯离子含量由 0 提高至 1.5%,钢筋发生严重锈蚀时间提前了 24 h,凝土开裂时间提前了 21 h.

参考文献 References

- [1] 李哲,金祖权,邵爽爽,等. 海洋环境下混凝土中钢筋锈蚀机理及监测技术概述[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4170-4181.
LI Zhe, JIN Zuquan, SHAO Shuangshuang, et al. A review on reinforcement corrosion mechanics and monitoring techniques in concrete in marine environment [J]. Materials Reports, 2018, 32(23): 4170-4181.
- [2] 干伟忠,高明赞. 杂散电流对钢筋混凝土结构耐久性的影响[J]. 混凝土, 2009, 236(6): 21-24, 45.
GAN Weizhong, GAO Mingzan. Effects of stray current on reinforced concrete durability [J]. Concrete, 2009, 236(6): 21-24, 45.
- [3] 朱瑶宏,邹玉生,耿健,等. 杂散电流对氯离子在混凝土内部迁移过程的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(7): 32-36.
ZHU Yaohong, ZOU Yusheng, GENG Jian, et al. Influence of stray current on chloride ion migrates in concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(7): 32-36.
- [4] 庄华夏,蔡跃波,陈迅捷,等. 盐冻对钢筋混凝土杂散电流腐蚀的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2023, No. 325(5): 12-16.

- ZHUANG Huaxia, CAI Yuebo, CHEN Xunjie, et al. Effect of salt-freezing on stray current corrosion of re-inforced concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2023, No. 325(5): 12-16.
- [5] Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Pietro Pedferri. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current[J]. Corrosion Science, 2006, 49(3): 1056-1068.
- [6] 耿健,丁庆军,孙家瑛,等. 杂散电流影响下氯离子向混凝土内部的传输特征[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 121-124.
GENG Jian, DING Qingjun, SUN Jiaying, et al. Transport characteristics of chloride ion in concrete with stray current[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 121-124.
- [7] 张二猛. 弯曲荷载及杂散电流与腐蚀介质复合作用下地铁混凝土的抗侵蚀性能[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
ZHANG Ermeng. The anti-erosion performance of metro concrete under the effect of bending load and stray current coupled with corrosive medium [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [8] 吴泉水. 杂散电流与氯离子耦合作用下混凝土中钢筋锈蚀研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2011.
WU Quanshui. Research of steel corrosion in concrete under the coupling actions of stray currents and chloride ion[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2011.
- [9] 王凯,赵杰,彭文瑞,等. 杂散电流对氯离子向混凝土中传输性能的影响[J]. 建筑科学, 2015, 31(11): 79-85.
WANG Kai, ZHAO Jie, PENG Wenrui, et al. Influence of stray current on chloride ion transports properties in concrete[J]. Building Science, 2015, 31(11): 79-85.
- [10] 陈梦成,韩英俊,谢力,等. 杂散电流与氯离子耦合作用下钢筋锈蚀[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(2): 244-250.
CHEN Mengcheng, HAN Yingjun, XIE Li, et al. Study on rebar corrosion under coupling action of stray current and chloride ion [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 31(2): 244-250.
- [11] 周晓军,高波. 地铁迷流对钢筋混凝土中钢筋腐蚀的试验研究[J]. 铁道学报, 1999(5): 99-105.
ZHOU Xiaojun, GAO Bo. Experimental study on metro stray current corrosion of rebars in reinforced concrete[J]. Journal of the China Railway Society, 1999

- (5): 99-105.
- [12] 张威. 钢筋混凝土结构轨道交通杂散电流腐蚀损伤机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
ZHANG Wei. Corrosion damage mechanism of reinforced concrete structures caused by the stray current of rail transit system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] 郭振华. 地铁杂散电流场数值模拟及其对混凝土中钢筋锈蚀作用的试验研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
GUO Zhenhua. Numerical simulation of stray current field in subway and experimental study on corrosion of steel bars in concrete[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [14] 陈迅捷, 欧阳幼玲, 钱文勋, 等. 不同环境中杂散电流对钢筋混凝土腐蚀影响[J]. 水利水运工程学报, 2014(2): 33-37.
CHEN Xunjie, OUYANG Youling, QIAN Wenxun, et al. Influences of stray current on corrosion behaviors of reinforcing steel bar in concrete placed in different environments[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(2): 33-37.
- [15] 陆晨浩, 农兴中, 范进, 等. 杂散电流作用下钢筋混凝土腐蚀电流时变规律研究[J]. 混凝土, 2021, 375(1): 13-16.
LU Chenhao, NONG Xingzhong, FAN Jin, et al. Study on timevarying regularity of reinforced concrete corrosion current under stray current[J]. Concrete, 2021, 375(1): 13-16.
- [16] 丁庆军, 吴雄, 耿健. 抑制杂散电流对水泥石固化氯离子能力的影响[J]. 建筑材料学报, 2008(1): 80-83.
DING Qingjun, WU Xiong, GENG Jian. Experimental study of binding capability of chloride ion under stray current in cement hardened paste admixed with fly ash[J]. Journal of Building Materials, 2008(1): 80-83.
- [17] 杜应吉, 李元婷. 活性掺合料对地铁混凝土杂散电流的抑制作用[J]. 混凝土, 2005(6): 77-79.
DU Yingji, LI Yuanling. The restraining function of active aggregate on stray electricity current in subway concrete[J]. Concrete, 2005(6): 77-79.
- [18] 秦一琦, 金祖权, 李师财, 等. 砂浆内钢筋锈胀应力监测与数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(2): 179-186.
QIN Yiqi, JIN Zuquan, LI Shicai, et al. Experimental and numerical simulation study on corrosion evolution of steel bar in mortar[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(2): 179-186.

(编辑 郑晓龙 沈 波)