

## 碱激发体系杂散电流作用下氯离子对 钢筋锈蚀行为的影响研究

李祥翔, 金祖权\*, 逢博

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 钢筋混凝土结构在杂散电流和氯离子存在的复合腐蚀环境下易发生锈蚀, 威胁工程安全运营。本文模拟不同碱激发矿渣孔溶液环境, 研究杂散电流和不同浓度氯离子对钢筋开路电位、电化学阻抗以及腐蚀电流密度的影响。结果表明, 在杂散电流和氯离子共同作用下, 钢筋的腐蚀速率大幅提高。在碱当量较高的模拟孔溶液中, 杂散电流和氯离子对钢筋的破坏相对较小, 其保护效果优于其他碱激发模拟孔溶液和普通混凝土模拟孔溶液。这说明碱当量水平较高的碱激发矿渣混凝土能更好地抵抗杂散电流和氯离子的复合腐蚀作用, 对于沿海地区地铁工程的长期耐久性具有重要意义。

**关键词:** 碱激发模拟孔溶液; 钢筋锈蚀; 电化学; 杂散电流; 氯离子

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2026)02-0015-11

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.003

## Study on the effect of chloride ion on the corrosion behavior of steel bars under the action of stray current in alkali-activated system

LI Xiangxiang, JIN Zuquan\*, PANG Bo

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** Reinforced concrete structures are prone to corrosion under the combined corrosive environment of stray current and chloride ions, which threatens the safe operation of engineering projects. This study simulates different alkali-activated slag pore solutions environment, and investigates the effects of different concentrations of chloride ions and stray current on the open circuit potential, electrochemical impedance and corrosion current density of the steel reinforcement. The results show that under the combined action of stray current and chloride ions, the corrosion rate of steel reinforcement is significantly accelerated. In the simulated pore solution with a relatively high alkali content, the damage of stray current and chloride ions to the steel reinforcement is relatively small, and its protective effect is better than that of other alkali-activated simulated pore solutions and ordinary concrete simulated pore solutions. This indicates that alkali-activated slag concrete with a higher alkali content can better resist the combined corrosion effect of stray current and chloride ions, which is of

收稿日期: 2024-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(52078259)

作者简介: 李祥翔(2001—), 男, 山东济宁人。硕士, 研究方向为碱激发钢筋混凝土耐久性。E-mail: 2079909077@qq.com。

\* 通信作者: 金祖权(1977—), 男, 四川南充人。博士, 教授, 主要从事海工混凝土制备及耐久性等方面的研究。

E-mail: jinzuquan@126.com。

great significance to the long-term durability of subway engineering in coastal areas.

**Key words:** alkali-activated simulated pore solution; corrosion of reinforcement; electro-chemistry; stray current; chlorid ion

近年来,随着城市化进程的推进,地铁建设在我国快速发展。地铁系统虽能有效缓解城市交通压力,但其运行环境易导致钢轨绝缘失效,产生杂散电流<sup>[1]</sup>。这些杂散电流是埋地金属结构发生电化学腐蚀的主要诱因,会严重降低钢筋混凝土结构寿命,威胁地铁工程安全运营。特别是在沿海地区,地铁钢筋混凝土结构常处于杂散电流与高浓度氯化物的恶劣环境中。杂散电流不仅会加速腐蚀离子在混凝土中扩散和钢筋表面氧化还原反应,还会提高腐蚀产物传输速度,削弱钢筋与混凝土黏结力,加剧钢筋锈蚀<sup>[2-4]</sup>。因此,研究这种复合腐蚀环境下钢筋混凝土的耐久性问题,对保障地铁工程安全运营至关重要。

氯离子和杂散电流是导致钢筋混凝土锈蚀的主要原因。氯离子可通过内掺或外渗进入混凝土内部,累积到一定浓度时会破坏钢筋钝化膜,形成微小电池,加剧钢筋锈蚀。反应过程中氯离子不会被消耗,而是以  $\text{FeCl}_2$  形式存在,不会转变成固态铁锈排出<sup>[5]</sup>。因此,在氯离子环境中,钢筋钝化膜的稳定性主要取决于混凝土中游离氯离子的浓度。杂散电流作为外加电流,不仅直接加速钢筋氧化反应,还促进阴极区  $\text{OH}^-$  产生,破坏钝化膜,同时提高了离子和腐蚀产物迁移速率,因此在氯离子和杂散电流共同作用下,钢筋锈蚀速率会大大加快<sup>[6]</sup>。单独杂散电流或氯离子都会加速钢筋锈蚀,当二者共同作用时,对钢筋锈蚀的危害会进一步加剧<sup>[7]</sup>。研究表明<sup>[8]</sup>在杂散电流促进下,混凝土中氯离子的扩散系数提高了 15.2%~44.3%。一方面,杂散电流的存在会促进氯离子向钢筋表面的迁移,使得钝化膜被破坏的区域增大;另一方面,杂散电流加速了阳极氧化反应和阴极还原反应,从而加剧了钢筋的溶解和腐蚀产物的产生。此外,杂散电流还能提高离子和腐蚀产物在混凝土内部的迁移速率,减弱钢筋与混凝土的黏结力<sup>[9]</sup>。因此,在杂散电流和氯离子共同作用的情况下,钢筋锈蚀的程度和速率都会大大提高。

鉴于沿海地区地铁工程常面临杂散电流与氯离子的复合腐蚀环境,研究该环境下钢筋锈蚀行为对确保工程安全运营至关重要。目前,对于复合作用下的锈蚀机理认识还不够全面深入,因此,本文拟模拟这一环境,研究碱激发矿渣混凝土中钢筋的锈蚀情况;在模拟孔溶液中探究杂散电流作用下氯离子浓度对钢筋钝化膜破坏和锈蚀产物的影响;研究复合作用下钢筋电化学阻抗变化,阐明锈蚀机理,为地铁工程中碱激发混凝土耐久性设计提供理论参考。

## 1 试验

### 1.1 直流电源模拟杂散电流测试

在模拟孔溶液环境下,采用恒流模式进行杂散电流测试。将电源正极连接到钢筋,负极连接到碳棒,模拟实际情况下轨道电流的泄漏情况。

### 1.2 电化学测试

所有电化学测试均在 Gamry5000E 电化学工作站上进行,采用三电极体系。钢筋/电极作为工作电极,碳棒为辅助电极,R501 型汞/氧化汞( $\text{Hg}/\text{HgO}$ )为参比电极。

1) 开路电位(OCP)测试:连接好工作电极、辅助电极和参比电极,尽量保证三者在同一水平面上。设置持续时间为 1200 s,待开路电位变化完全稳定后终止测试。

2) 电化学阻抗谱测试:在开路电位测试完成后,设置扫描频率为 0.1 Hz~100 kHz,交流扰动信号振幅为  $\pm 10$  mV,进行电化学阻抗谱测试。

### 1.3 模拟孔溶液的萃取

采用压滤法获取真实的孔溶液数据。制备 2 组碱激发矿渣砂浆(碱当量为 5%,模数分别为 1.50、0.75)和 1 组普通硅酸盐砂浆作为对照组(水胶比 0.45),养护 7 d 后,放入压滤模具,在压力试验机中以 5 MPa/s 的速度加载 10 min,卸载后收集压滤出的溶液。

收集到的孔溶液先过滤(0.45  $\mu\text{m}$  滤纸),然后使用 PHS-3E pH 计(有效量程 -2.00~18.00)测试 pH 值,接着利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测试孔溶液的化学组成及元素含量。此外,使用离

子色谱仪测试硫离子总含量  $S_{\text{total}}$ , 稀释 10 倍。测试结果如表 1 所示。

表 1 AASM 和 PC 砂浆孔溶液成分

编号	元素含量/(mmol · L <sup>-1</sup> )									pH
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	AlO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>total</sub>	
PC	436.72	98.54	0.01	—	2.44	1.89	—	—	—	13.52
AASM-A	13.72	1127.00	2.32	0.41	15.86	56.27	14.01	32.60	48.27	14.27
AASM-B	23.54	1079.14	1.38	0.06	8.45	46.92	10.14	17.06	28.33	14.11

注:PC 为普通混凝土模拟孔溶液;AASM-A 为碱当量 5%、模数 1.50 的碱激发模拟孔溶液;AASM-B 为碱当量 5%、模数 0.75 的碱激发模拟孔溶液。

以电感耦合等离子体发射光谱测试的离子含量为基准,根据 OH<sup>-</sup> 浓度计算模拟孔溶液的离子组成,如表 2 所示。所用药品均为分析纯。相比普通混凝土孔溶液,碱激发模拟孔溶液离子成分更复杂。配制过程中,先将试验药品加入烧杯中,再加入适量去离子水后密封搅拌 24 h 使其完全溶解,静置 24 h 后用一次性针管转移至容量瓶中备用。钢筋电极编号及试验环境如表 3 所示。

表 2 模拟孔溶液化学试剂含量

编号	mmol/L							
	KOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>	NaAlO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NaOH
PC	436.72	0.01	—	2.44	1.89	—	—	98.54
AASM-A	13.72	2.32	0.41	15.86	15.99	14.10	32.60	1842.90
AASM-B	23.54	1.38	0.06	8.45	46.92	10.14	17.06	1263.27

表 3 钢筋电极编号及试验条件

编号	杂散电流/mA	腐蚀性离子含量/%
AASM-A-01		0
AASM-A-02		1.5
AASM-A-03		3.5
AASM-B-01		0
AASM-B-02	25	1.5
AASM-B-03		3.5
PC-01		0
PC-02		1.5
PC-03		3.5

注:腐蚀性离子含量以 Cl<sup>-</sup> 计。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 氯盐环境下的碱激发体系钢筋锈蚀规律

#### 2.1.1 开路电位

图 1 为钢筋电极在 25 mA 杂散电流与氯离子作用下,不同模拟孔溶液中钢筋电极腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )的演变。钢筋电极的  $E_{\text{corr}}$  值低于 -600 mV 时,可认为钢筋电极进入脱钝锈蚀状态。在图 1(a)中,AASM-A-01 钢筋电极在碱激发模拟孔溶液的腐蚀时间达到 291.5 h 时, $E_{\text{corr}}$  值由 -91.21 mV 降至 -600 mV 以下。当添加 1.5% 氯离子后,AASM-A-02 钢筋电极仅在腐蚀 51.5 h 后便达到了相同  $E_{\text{corr}}$  值(-600 mV

以下),且随着氯离子浓度继续增加,达到 3.5 %时,钢筋电极(AASM-A-03)的脱钝锈蚀时间缩短到 27.5 h。此外,从其他碱激发模拟孔溶液(图 1(b))中钢筋电极腐蚀电位的演变可以看出,钢筋电极在不同碱激发模拟孔溶液中,腐蚀电位的变化规律与图 1(a)一致。开路电位测试结果表明,在杂散电流作用下,氯离子的存在会显著加速钢筋电极的脱钝锈蚀过程,且脱钝时间随氯离子浓度的增加而明显缩短;与普通混凝土模拟孔溶液相比(图 1(c)),碱激发模拟孔溶液由于其高碱性环境能够更好地保护钢筋表面的钝化膜,从而延长了钢筋的脱钝时间,其中在杂散电流和氯离子共同作用的复合腐蚀环境下,AASM-B 模拟孔溶液对钢筋电极表现出了最强的保护能力。

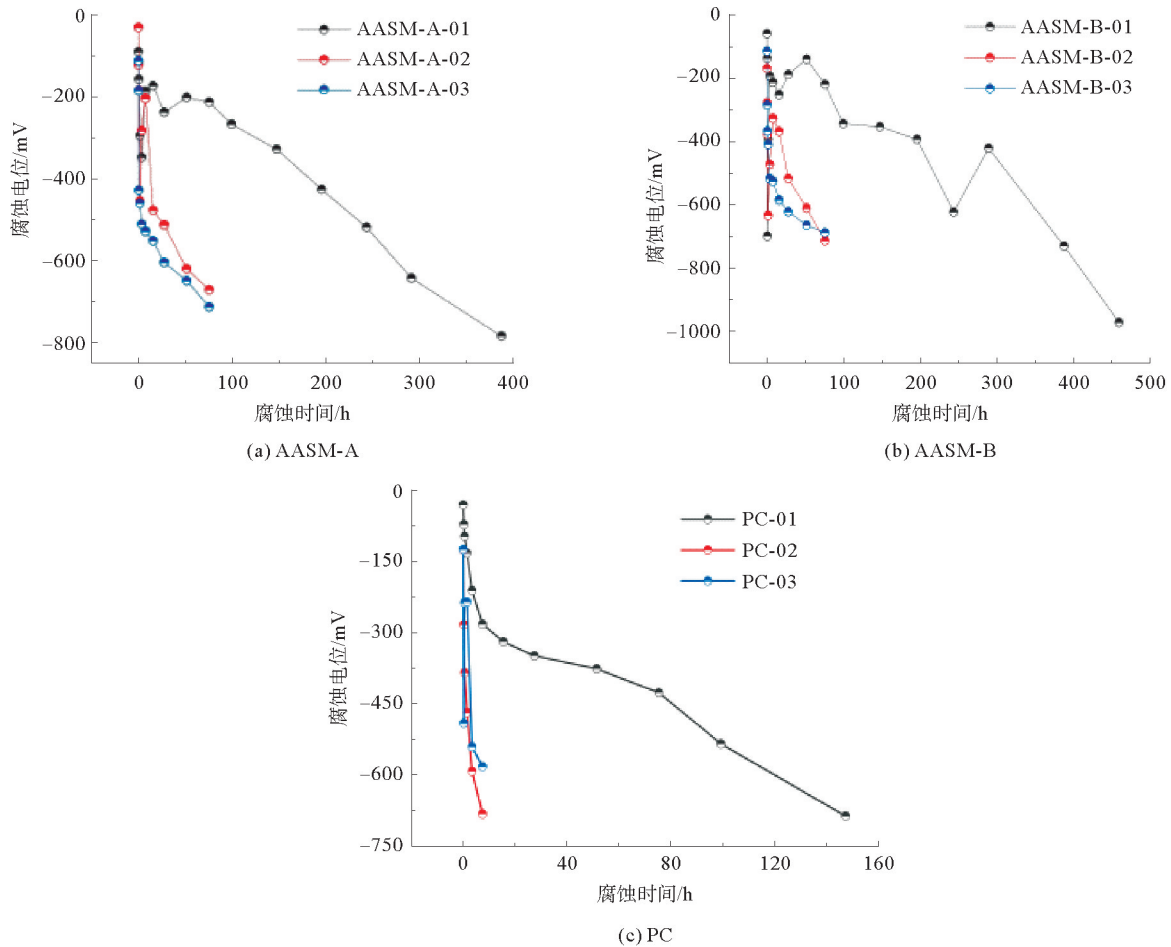


图 1 不同模拟孔溶液内钢筋电极的开路电位演变

### 2.1.2 电化学阻抗

图 2 为钢筋电极在杂散电流大小为 25 mA 时,AASM-A 模拟孔溶液中不同氯离子含量下钢筋电极的电化学阻抗演变,其中, $Z_r$  为实部阻抗; $Z_i$  为虚部阻抗。从图 2 中可看出,AASM-A-01、AASM-A-02 和 AASM-A-03 钢筋电极在测试时间分别为 3.5、1.5、1.5 h 时,相位角出现短暂减小。含有 3.5% 氯离子腐蚀环境中的 AASM-A-03 钢筋电极在 3.5 h 时,低频区容抗弧迅速减小(图 2(c)),相位角由  $81.66^\circ$  减小至  $35.51^\circ$ (图 2(f)),率先脱钝锈蚀。对其他腐蚀离子环境下钢筋电极的脱钝锈蚀时间进行对比,在图 2(a)(b)中,碱激发模拟孔溶液内氯离子含量分别为 0%、1.5% 时,AASM-A-01、AASM-A-02 钢筋电极分别在 195.5、7.5 h 出现容抗弧迅速减小的现象,相位角分别降至  $35.32^\circ$ 、 $36.49^\circ$ (图 2(d)(e)),钢筋电极完全脱钝锈蚀。

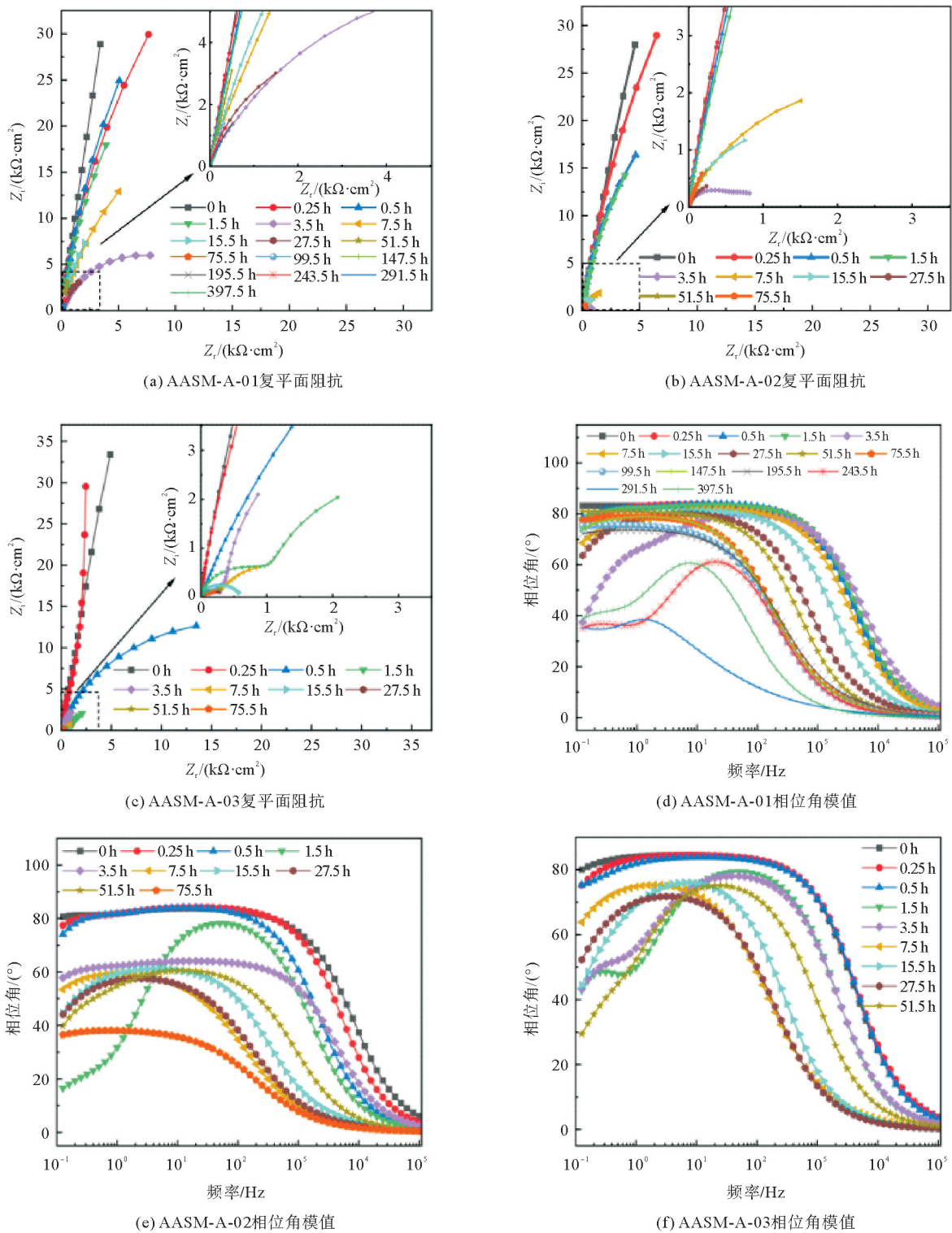


图 2 AASM-A 模拟孔溶液中氯离子环境下钢筋电极的电化学阻抗演变

图 3 为在 AASM-B 模拟孔溶液中不同氯离子含量下钢筋电极的电化学阻抗演变。在 AASM-B 模拟孔溶液中, AASM-B-01 钢筋电极在腐蚀 387.5 h 之前, 容抗弧半径保持较高水平(图 3(a)), 相位角也在 80°附近小范围波动(图 3(d)), 表明此时 AASM-B 碱激发模拟孔溶液对钢筋电极的钝化作用大于 25 mA 的杂散电流对钢筋钝化膜的破坏作用, 与 AASM-A-01 钢筋电极相比, 达到脱钝锈蚀状态的时间延长了 192 h。当加入 1.5% 氯离子时, AASM-B-02 钢筋电极在 15.5 h 时, 容抗弧半径迅速缩小(图 3(b)), 相位

角降至  $45.39^\circ$ (图 3(e)),表明钢筋电极开始脱钝,与相同氯离子含量下的 AASM-A-02 钢筋电极相比达到脱钝锈蚀状态的时间延长了 8 h。当氯离子浓度增加至 3.5%时,AASM-B-03 钢筋电极在 3.5 h 内就达到了脱钝锈蚀状态(图 3(c)(f))。综上所述,AASM-B 碱激发模拟孔溶液对钢筋电极的钝化作用明显优于 AASM-A 碱激发模拟孔溶液,在杂散电流和氯离子共同作用下,AASM-B 碱激发模拟孔溶液对钢筋电极的保护效果更好。这说明合适的碱当量水平是提高碱激发混凝土耐久性的关键因素之一。

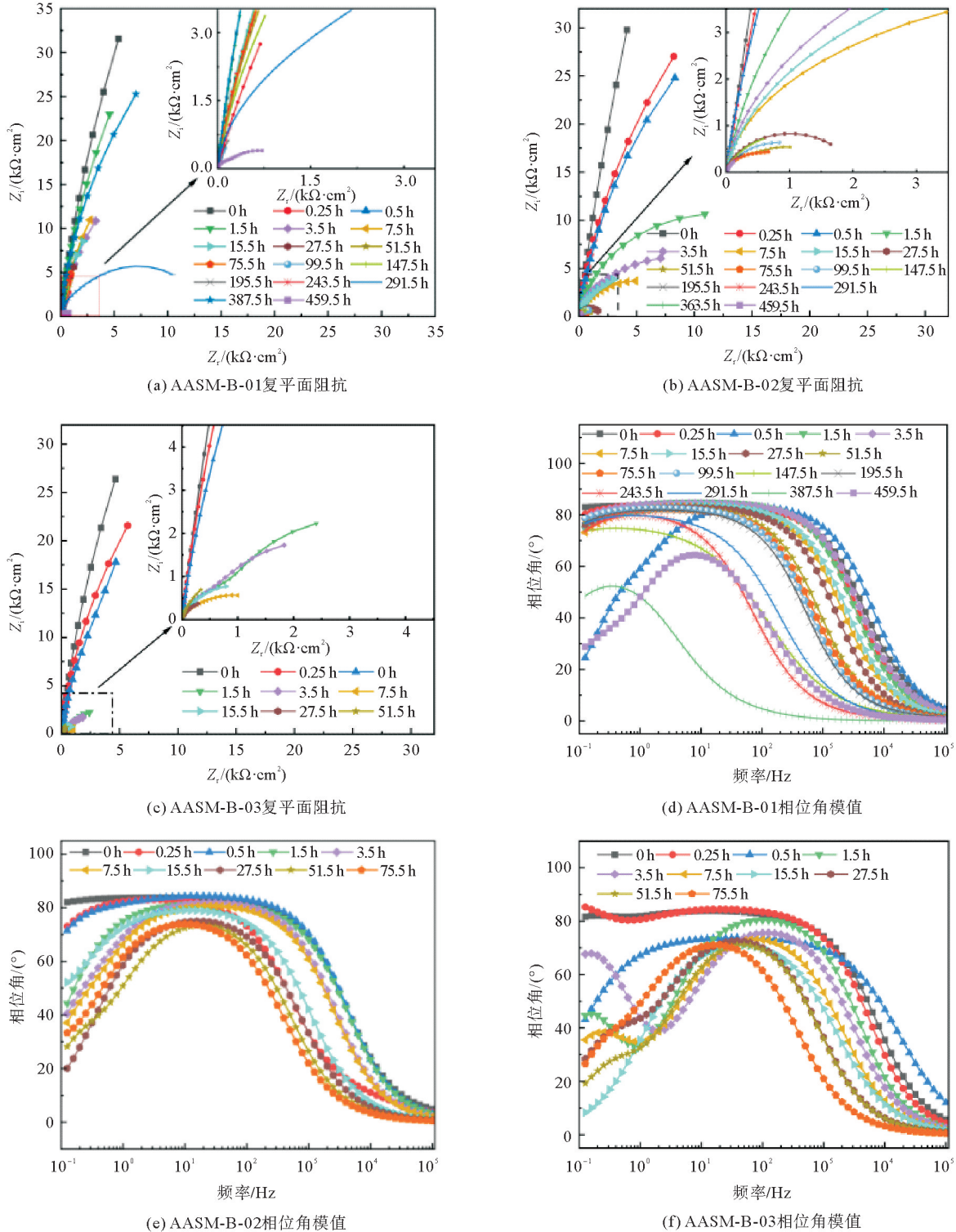


图3 AASM-B模拟孔溶液中氯离子环境下钢筋电极的电化学阻抗演变

在杂散电流和氯离子作用下,普通混凝土模拟孔溶液对钢筋电极的保护效果远低于碱激发混凝土模拟孔溶液。在无任何腐蚀离子的钝化环境中,AASM-A、AASM-B 2 种碱激发模拟孔溶液中钢筋电极的脱钝锈蚀时间分别为 195.5、387.5 h,而 PC 模拟孔溶液中钢筋只用 99.5 h 就完全脱钝(图 4(a)(d))。在 PC 模拟孔溶液中,添加 1.5% 和 3.5% 氯离子后,钢筋电极的容抗弧半径急剧降低,相位角也从初始的 80.72° 分别减小至 0.21、0.08°(图 4(e)(f)),表明杂散电流和氯离子共同作用下仅 0.25 h 内就对钢筋电极造成了不可逆的破坏,PC 模拟孔溶液无法对其进行有效保护。不同腐蚀离子环境下,PC 模拟孔溶液中钢筋电极的电化学阻抗演变规律与碱激发模拟孔溶液中相似,但 PC 模拟孔溶液的保护效果明显差于碱激发模拟孔溶液。综上所述,在杂散电流和氯离子共同作用下,碱激发混凝土模拟孔溶液特别是 AASM-B

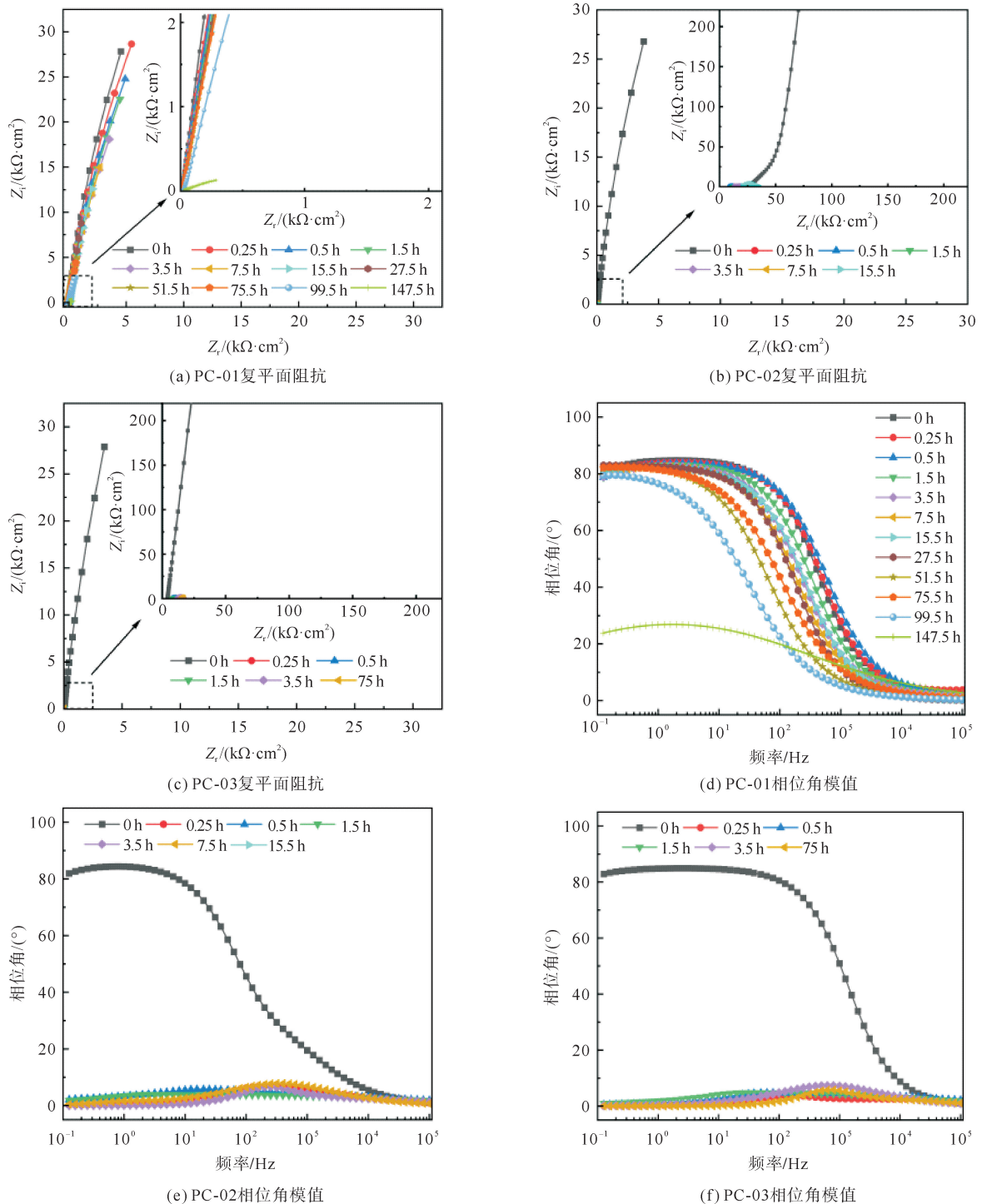


图 4 PC 模拟孔溶液中氯离子环境下钢筋电极的电化学阻抗演变

对钢筋电极的保护效果要优于普通混凝土模拟孔溶液, 这为提高地铁工程碱激发混凝土结构耐久性提供了理论依据。

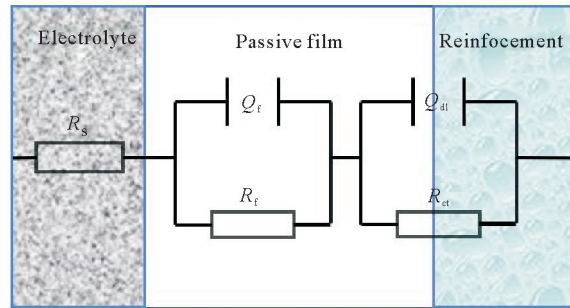
2.1.3 腐蚀电流密度

考虑到电化学阻抗谱仅能通过图形的拓扑结构对钢筋电极腐蚀状态进行初步识别, 为了进一步分析, 仍需利用 ZSimpWin 软件对腐蚀参数进行拟合。根据试验电路分布情况, 选择 R(QR)(QR) 为拟合电路。使用 ZSimpWin 软件拟合可获得极化电阻  $R_p$  (研究表明电荷转移电阻  $R_{ct}$  近似等于  $R_p$  [10]), 拟合电路如图 5 [11-13] 所示。根据 Stern-Geary 公式 [10], 可计算得到钢筋电极不同腐蚀龄期的钢筋腐蚀电流密度  $i_{corr}$ , 如式(1)所示。

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (1)$$

式中:  $i_{corr}$  为腐蚀电流密度,  $\mu A/cm^2$ ;  $B$  为塔菲尔斜率, mV, 在 0 h 时, 钢筋电极还处于钝化状态,  $B = 52$  mV, 此后取  $B = 26$  mV。

图 6 展示了不同模拟孔溶液中, 25 mA 杂散电流与氯离子共同作用下钢筋电极  $i_{corr}$  的演变过程。一般认为, 当  $i_{corr}$  值超过  $0.1 \mu A/cm^2$  时, 可认为钢筋电极进入脱钝锈蚀状态 [14-15]。由图 6 可知, 在不同模拟孔溶液中, 25 mA 杂散电流和氯离子共同作用下, 钢筋电极  $i_{corr}$  的演变规律: ① AASM 孔溶液样品在腐



$R_s$ —溶液电阻;  $Q_f$ —膜层常相位元件;  $R_f$ —膜层电阻;  
 $Q_{dl}$ —双电层常相位元件;  $R_{ct}$ —电荷转移电阻。

图 5 等效电路示意 [11-13]

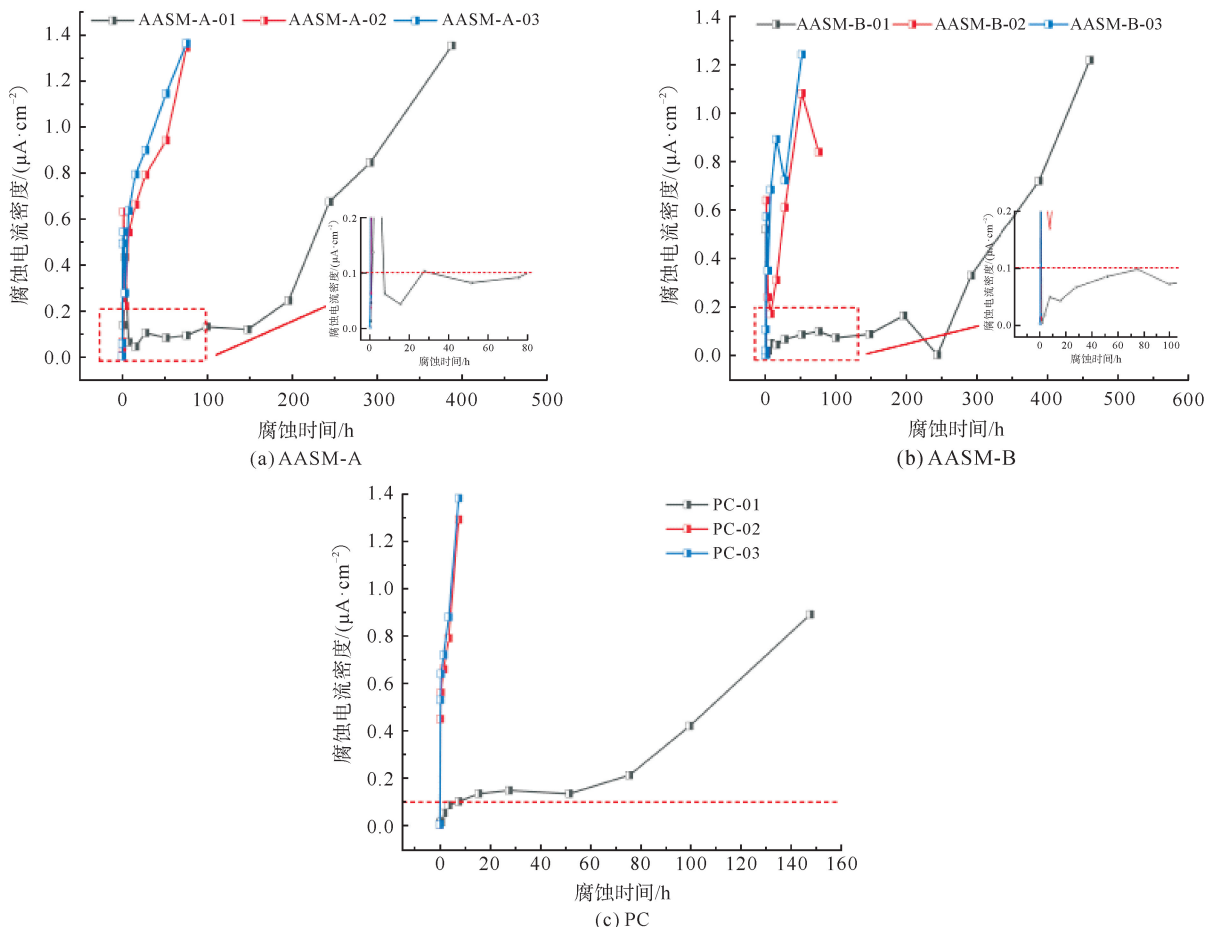


图 6 不同模拟孔溶液中钢筋电极的腐蚀电流密度演变

蚀初期出现  $i_{\text{corr}}$  先增大后降低的现象,推测是杂散电流导致局部钝化层损伤,暴露钢筋表面反应加快,但随后碱激发孔溶液对钝化层的恢复作用使  $i_{\text{corr}}$  降低;②与 AASM 孔溶液相比,PC 孔溶液在 0.25 h 时  $i_{\text{corr}}$  就已超过  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,表明对钢筋电极的保护作用明显弱于 AASM 孔溶液。这主要是由于 AASM 孔溶液的高碱环境对钢筋钝化有促进作用。综合电化学分析结果,在 25 mA 杂散电流和氯离子作用下,0.75 模数、5%碱当量的 AASM-B 模拟孔溶液对钢筋电极的保护效果最佳。

## 2.2 钢筋锈蚀产物分析

### 2.2.1 微观形貌

钢筋电极的锈蚀产物在扫描电镜下的腐蚀形貌如图 7 所示,不同氯离子环境中钢筋电极的锈蚀产物形貌相差较大。从图 7(a)中可以看出,AASM-B-01 钢筋电极锈蚀产物表面出现蜂窝状的保护膜层,这是由于在碱激发模拟孔溶液中,钢筋与溶液之间发生的电化学反应使得钢筋局部发生腐蚀或溶解,进而形成蜂窝状的保护膜层。从图 7(b)中可以看到,随着氯离子的加入,在 AASM-B-02 钢筋锈蚀产物的表面出现明显的白色结晶体,钢筋电极的腐蚀形貌呈蜂窝状和粉末状。氯离子含量为 3.5%的腐蚀环境中钢筋电极锈蚀破坏最为严重,钢筋锈蚀产物表面出现明显的点蚀坑,从放大图中可以看到,钢筋电极的基体发生剧烈锈蚀膨胀,包裹在钢筋电极表面的环氧树脂已出现开裂(图 7(c))。同时,结合能量散射谱仪(EDS)测试可以发现,随着氯离子含量增加,钢筋锈蚀速度进一步加快,锈蚀产物 Fe/O 值由 0.36 增加到 1.71 (表 4)。

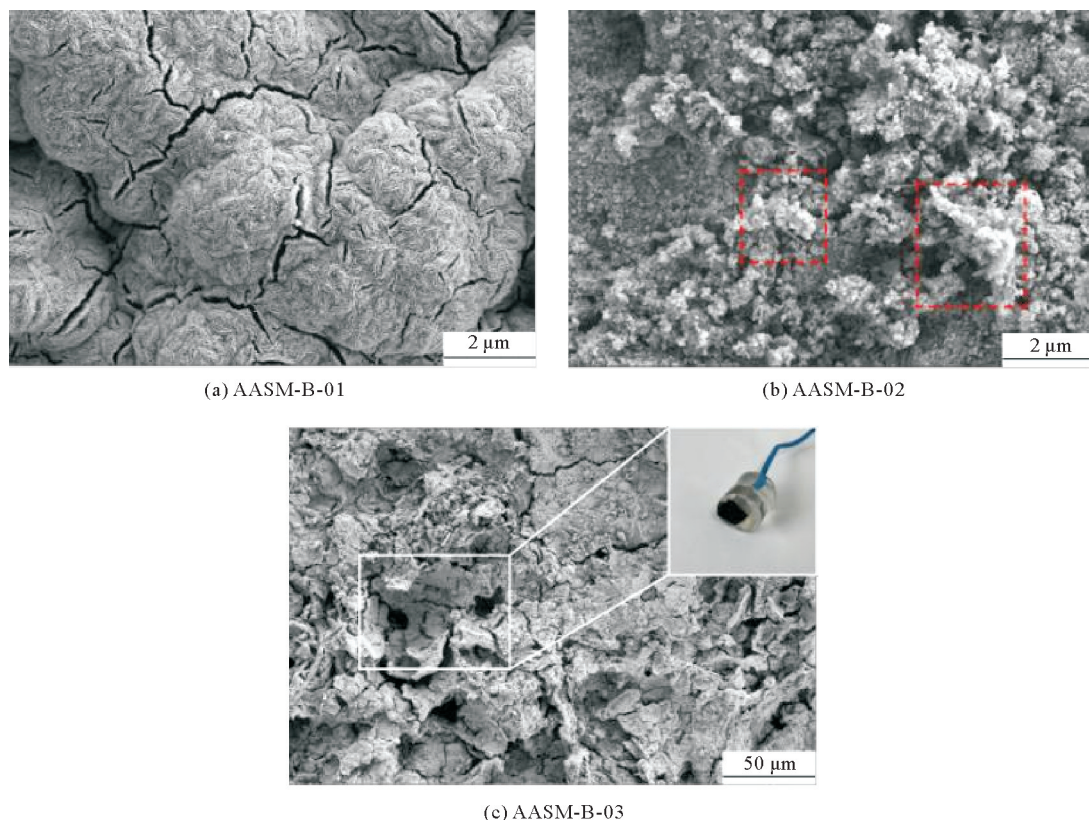


图 7 AASM-B 碱激发模拟孔溶液中钢筋电极锈蚀产物的微观形貌

表 4 AASM-B 碱激发模拟孔溶液中钢筋锈蚀产物的 Fe/O 值

元素比	AASM-B-01	AASM-B-02	AASM-B-03
Fe/O	0.36	0.64	1.71

### 2.2.2 物相组成

图8中展示了AASM-B碱激发矿渣模拟孔溶液内不同氯离子含量下锈蚀产物的衍射图谱(XRD)。从图8中可以看出,氯离子含量的改变对锈蚀产物主衍射峰的位置基本没有影响,锈蚀产物主要由各种形式的氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 等)组成,这是因为模拟孔溶液环境中氧气含量较低,在杂散电流加速下氧气进一步被消耗,钢筋锈蚀产物的主要成分表现为三价铁的化合物。

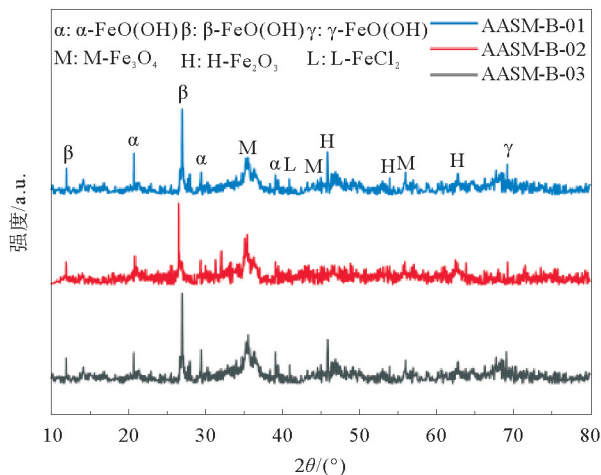


图8 杂散电流与氯离子作用下钢筋锈蚀产物的XRD衍射图谱

## 3 结论

1) 在杂散电流和氯离子共同作用下,碱激发模拟孔溶液对钢筋电极的保护作用优于普通混凝土孔溶液。与普通混凝土孔溶液相比,在无任何腐蚀离子的情况下,碱激发模拟孔溶液中钢筋电极脱钝锈蚀的时间延长了96.48%~289.44%。

2) 在相同腐蚀离子环境下,不同碱激发模拟孔溶液对钢筋电极的保护效果存在差异,0.75模数、5%碱当量下由水玻璃和氢氧化钠共同激发的AASM-B模拟孔溶液表现最佳。

3) 氯离子的存在会加速钢筋电极在碱激发模拟孔溶液中的脱钝锈蚀过程,且钢筋电极的脱钝锈蚀时间随着氯离子浓度的增加而缩短。

4) 杂散电流的存在会加速氯离子向钢筋表面迁移,促进钝化膜破坏区域扩大,同时提高氯离子和腐蚀产物在混凝土内的迁移速率。

5) 在碱激发模拟孔溶液的保护作用下,尽管钢筋电极经历了短暂的腐蚀电流密度峰值,但后续腐蚀电流密度会快速降低并在较低水平持续一段时间。

6) 在杂散电流和氯离子共同存在的腐蚀环境下,合理设计碱激发模拟孔溶液的成分和浓度可以显著提高钢筋混凝土结构的耐久性。

### 参考文献(References):

- [1] 马帅杰,冯志永,杜艳霞,等. 动态杂散电流干扰下管地电位的波动特征[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(2): 90-96.  
MA Shuaijie, FENG Zhiyong, DU Yanxia, et al. Fluctuation characteristics of pipe-to-soil potential under dynamic stray current interference[J]. Corrosion & Protection, 2024, 45(2): 90-96.
- [2] 衣军勇,刘玲,王晓晖,等. 地铁杂散电流腐蚀劣化钢筋混凝土机理及抑制研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 201-204.  
YI Junyong, LIU Ling, WANG Xiaohui, et al. Research progress on mechanism and inhibition of reinforced concrete deteriorated by subway stray current corrosion[J]. Materials Reports, 2022, 36(S2): 201-204.
- [3] 鹿婷,金祖权,陈兆毅,等. 杂散电流与氯盐作用下埋地混凝土中钢筋锈蚀研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(4): 484-491.  
LU Ting, JIN Zuquan, CHEN Zhaoyi, et al. Study on corrosion of reinforcement in buried concrete under the action of stray current and chlorine salt[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2023, 55(4): 484-491.

- [4] 周爱萍,葛刚,宋子健,等. 复杂环境下轨道交通混凝土杂散电流及其防治方法研究进展[J]. 混凝土与水泥制品,2023(12):39-43.  
ZHOU Aiping,GE Gang,SONG Zijian, et al. Research progress on stray current of rail transit concrete in complex environment and its prevention and control methods[J]. China Concrete and Cement Products,2023(12):39-43.
- [5] 王珑霖,张文,张卫红,等. 盐渍土腐蚀钢筋混凝土研究现状及展望[J]. 科学技术与工程,2020,20(3):883-891.  
WANG Longlin,ZHANG Wen,ZHANG Weihong, et al. The current situation and prospect of the corrosion of reinforced concrete in saline soils[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(3):883-891.
- [6] 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.
- [7] 耿健. 杂散电流与氯离子共存环境下钢筋混凝土劣化机理的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.  
GENG Jian. The research on the deteriorated mechanisms of reinforced concrete in stray currents and chloride ion coexisted corrosion environment[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2008.
- [8] 韩凯,徐锋,王曙光,等. 杂散电流与硫酸盐耦合作用对地下结构混凝土中氯离子传输过程的影响[J]. 混凝土,2016(5):45-48.  
HAN Kai,XU Feng,WANG Shuguang, et al. Influence of the coupled effect of stray current and sulfate upon chloride diffusing into concrete of underground structures[J]. Concrete,2016(5):45-48.
- [9] 卢霄,陈旭,白国强,等. 杂散电流与氯盐耦合作用对钢筋混凝土耐久性的影响[J]. 新型建筑材料,2018,45(8):100-103.  
LU Xiao,CHEN Xu,BAI Guoqiang, et al. Study on the influence of coupling action of stray current and chloride solution on reinforced concrete[J]. New Building Materials,2018,45(8):100-103.
- [10] ANDRADE C,ALONSO C. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site[J]. Construction and Building Materials,1996,10(5):315-328.
- [11] 许晨,李志远,金伟良. 混凝土中钢筋锈蚀的电化学阻抗谱特征研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2011,23(5):393-398.  
XU Chen,LI Zhiyuan,JIN Weiliang. Electrochemical impedance spectroscopy characteristics of corrosion behavior of rebar in concrete[J]. Corrosion Science and Protection Technology,2011,23(5):393-398.
- [12] 史美伦,杨正宏. 混凝土阻抗谱的拓扑结构[J]. 建筑材料学报,2002(2):132-136.  
SHI Meilun,YANG Zhenghong. Topological structure of the spectroscopy of AC impedance for concrete[J]. Journal of Building Materials,2002(2):132-136.
- [13] SHI J J,MING J,SUN W, et al. Corrosion performance of reinforcing steel in concrete under simultaneous flexural load and chlorides attack[J]. Construction and Building Materials,2017,149(15):315-326.
- [14] FELIÚ S,GONZÁLEZ J A,ANDRADE C. Electrochemical methods for on-site determinations of corrosion rates of rebars[J]. Technique to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures,1996:107-118.
- [15] 金凡,张苑竹. 地铁杂散电流对钢筋混凝土的腐蚀研究综述及机制砂应用展望[J]. 混凝土与水泥制品,2023(4):24-29.  
JIN Fan,ZHANG Yuanzhu. Summary of research on corrosion of reinforced concrete caused by stray current in subway and application prospect of manufactured sand[J]. China Concrete and Cement Products,2023(4):24-29.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)