

文章编号:1673-9469(2024)05-0001-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.05.001

阻锈剂对海砂硫铝酸盐混凝土中钢筋锈蚀的影响

王坚峰¹, 梁咏宁^{1*}, 杨小彬², 叶财发³, 司青山¹, 季 韬¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省金通建设集团有限公司, 福建 福州 350399;
3. 福建同得建工集团有限公司, 福建 厦门 361111)

摘要: 利用海砂替代河砂制备海砂硫铝酸盐混凝土(SACS), 以海砂普通硅酸盐混凝土(OPCS)为对照, 研究SACS的氯离子固化性能, 并采用硬化砂浆阳极极化法及钢筋失重率法研究不同阻锈剂(单氟磷酸钠、亚硝酸锂和三乙醇胺)及其掺量(0%、0.5%、1%、1.5%、2%, 即阻锈剂与硫铝酸盐水泥的质量比)对海砂硫铝酸盐水泥砂浆(S_s)中钢筋极化电位和钢筋锈蚀的影响。结果表明: 标养28 d后SACS氯离子固化率较OPCS高约18%, S_s 中钢筋极化电位略高于海砂普通硅酸盐水泥砂浆(OPC_s); 在 S_s 中掺入阻锈剂能使钢筋极化电位正移, 失重率降低; 掺入1.5%三乙醇胺阻锈效果最佳, 钢筋极化电位变化满足规范要求, 钢筋失重率仅为0.014 2%, 与未掺入阻锈剂相比降低约91%。

关键词: 海砂; 硫铝酸盐混凝土; 氯离子固化; 钢筋; 阻锈剂

中图分类号: TU526

文献标识码: A

Influence of Rust Inhibitors on Rebar Corrosion in Sea Sand Sulfoaluminate Cement Concrete

WANG Jianfeng¹, LIANG Yongning^{1*}, YANG Xiaobin², YE Caifa³, SI Qingshan¹, JI Tao¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;
2. Fujian Jintong Construction Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350399, China;
3. Fujian Tongde Construction Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361111, China)

Abstract: In this study, sea sand was used to prepare sea sand sulfoaluminate cement concrete (SACS) by substituting river sand. Sea sand ordinary Portland cement concrete (OPCS) was used as the control group. The chloride ion solidification performance of SACS was investigated. The effects of different rust inhibitors (sodium monofluorophosphate, lithium nitrite, and triethanolamine) and their concentrations (0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, i. e., the mass ratio of rust inhibitors to sulfoaluminate cement) on rebar polarization potential and rebar corrosion in sulfoaluminate cement mortar (S_s) were studied using the methods of hardened mortar anode polarization and rebar mass loss. The results showed that after 28 days of curing, the chloride ion solidification rate of SACS was approximately 18% higher than that of OPCS. The rebar polarization potential in S_s was slightly higher than that in sea sand ordinary Portland cement mortar (OPC_s). Adding rust inhibitors to S_s shifted the rebar polarization potential in a positive direction and reduced the mass loss. The best rust inhibition effect was achieved by adding 1.5% triethanolamine, meeting the specifications for the change in rebar polarization potential, and the rebar mass loss was only 0.014 2%, approximately 91% lower than that without adding rust inhibitors.

Key words: sea sand; sulfoaluminate cement; chloride ion solidification; rebar; rust inhibitor

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708120)

作者简介: 王坚峰(1999-), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 从事水泥基材料方面的研究。

* 通信作者: 梁咏宁(1977-), 女, 山东莱阳人, 博士, 副教授, 主要从事环保水泥基材料方面的研究。

与河砂相比,海砂具有资源储量大、开采难度小、可就地取材以及运输成本低等优势^[1],利用海砂配制混凝土不仅经济性优越,还可缓解河砂资源日益匮乏和供不应求的问题^[2]。研究表明海砂含泥量低、级配良好^[3],海砂混凝土具有良好的工作性能和力学性能^[4-5]。但是,海砂中氯离子含量较高,氯离子会在混凝土内部扩散并逐渐富集到钢筋表面,导致钢筋钝化膜破坏引起钢筋锈蚀^[6-7],使海砂的应用受到限制。

相比传统的普通硅酸盐水泥(Ordinary Portland Cement, OPC),硫铝酸盐水泥(Sulphate Aluminium Cement, SAC)具有良好的固化结合氯离子能力,其制备的混凝土密实度高、孔隙率低^[8-9],能对钢筋起到良好的保护作用^[10-13],但海砂硫铝酸盐混凝土中钢筋仍会锈蚀^[14-15]。添加阻锈剂能够在钢筋表面形成一层保护膜,有效抑制海砂中氯离子对钢筋的侵蚀,因此众多学者对阻锈剂的应用及机理进行了深入研究。Soeda等^[16]研究表明亚硝酸盐阻锈剂能与 Fe^{2+} 发生反应生成 Fe_2O_3 ,其覆盖于钢筋表面形成钝化膜阻碍腐蚀介质到达钢筋表面。Chaussadent等^[17]研究发现单氟磷酸钠所含的 PO_3F^{2-} 能够与水泥水化产生的 $Ca(OH)_2$ 反应,生成磷灰石沉积在钢筋表面阻碍钢筋锈蚀反应的发生。上述研究主要集中于普通硅酸盐混凝土中,硫铝酸盐混凝土中阻锈剂的应用还鲜有学者进行研究,且目前市场上阻锈剂种类繁多,阻锈机理也各不相同,针对海砂混凝土具有高氯离子含量的特点,阻锈剂在海砂硫铝酸盐混凝土中

的阻锈效果尚待研究。

本文通过在硫铝酸盐水泥砂浆中掺入不同类型和掺量的阻锈剂,研究其对海砂硫铝酸盐水泥砂浆中钢筋锈蚀的影响,研究结果可为海砂混凝土应用提供依据。

1 试验

1.1 原材料

普通硅酸盐水泥(P. O 42.5级),表观密度为 $3\ 050\ kg/m^3$,硫铝酸盐水泥(L. SAC 42.5级),表观密度为 $3\ 150\ kg/m^3$,二者的矿物组成和物理化学性能如表1和表2所示。减水剂采用KDSP-1聚羧酸盐缓凝型高效减水剂,减水率为25%;缓凝剂采用硫铝酸盐水泥专用的缓凝剂;细骨料采用闽江河砂和漳浦海砂,各项性能指标及颗粒级配如表3和表4所示;钢筋采用热轧光圆钢筋,公称直径为6 mm;阻锈剂采用三乙醇胺 $N(CH_2CH_2OH)_3$ 、单氟磷酸钠及亚硝酸锂,三者均为分析纯。

1.2 试验配合比

采用混凝土试件进行氯离子固化性能测试(具体配合比见表5);采用水泥砂浆试件进行钢筋极化电位和失重率测试,水泥砂浆试件配合比设计如下:水灰比为0.45,胶砂比为1:3,减水剂掺量(减水剂与硫铝酸盐水泥的质量比)为1%,缓凝剂掺量(缓凝剂与硫铝酸盐水泥的质量比)为0.3%,阻锈剂掺量(阻锈剂与硫铝酸盐水泥的质量比)分别为0.5%、1%、1.5%和2%。

表1 普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥的矿物组成

(单位:%)

Tab.1 Mineral composition of ordinary Portland cement and sulphoaluminate cement

(unit:%)

水泥类型	C_3S	C_2S	C_3A	SO_3	C_4AF	C_4A_3S
普通硅酸盐水泥	55.6	19.6	7.5	2.1	9.3	—
硫铝酸盐水泥	—	31.5	—	3.0	11.3	52.9

表2 普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥的物理化学性能指标

Tab.2 Physical and chemical performance indicators of ordinary Portland cement and sulphoaluminate cement

水泥类型	表观密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	比表面积 $/(m^2 \cdot kg^{-1})$	烧失量 /%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
普通硅酸盐水泥	3 050	360	1.1	125	185	5.7	8.4	27.5	45.0
硫铝酸盐水泥	3 150	387	1.3	34	58	7.5	7.9	55.5	61.8

表3 河砂与海砂的技术指标

Tab.3 Technical specifications of river sand and sea sand

细骨料	细度模数	堆积密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	表观密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	贝壳含量 /%	含泥量 /%	氯离子含量 /%
河砂	2.5	1 480	2 591	—	3.80	—
海砂	1.5	1 539	2 951	0.16	2.08	0.23

表4 河砂与海砂的颗粒级配表

Tab. 4 Particle size distributions of river sand and sea sand

筛孔尺寸/mm	河砂		海砂	
	分计筛余/%	累计筛余/%	分计筛余/%	累计筛余/%
4.75	0.00	0.00	0.07	0.07
2.36	0.73	0.73	0.30	0.37
1.18	2.29	3.02	0.36	0.73
0.60	17.48	20.50	6.49	7.22
0.30	69.55	90.05	46.34	53.56
0.15	8.86	98.91	41.46	95.02
<0.15	1.09	100.00	4.98	100.00

表5 混凝土配合比

(单位: kg/m³)

Tab. 5 Mix proportion of concrete

(unit: kg/m³)

编号	水泥种类		拌合用水	细骨料		石子	减水剂	缓凝剂
	OPC	SAC		河砂	海砂			
OPCS	368	—	184	—	640	1 242	3.68	—
SACR	—	368	184	640	—	1 242	3.68	1.10
SACS	—	368	184	—	640	1 242	3.68	1.10

注: OPC为普通硅酸盐水泥; SAC为硫铝酸盐水泥; R、S分别代表河砂和海砂。

1.3 试验方法

1.3.1 总氯离子浓度 T 和自由氯离子浓度 F

将制备成型的混凝土置于标养室养护至相应龄期后取出, 制备成粉末并烘干。根据莫尔法, 使用灵敏度为 0.000 1 g 的分析天平称取大约 10 g 烘干的混凝土粉末放入三角烧瓶中, 后量取 20 mL 稀硝酸溶液(浓硝酸与蒸馏水按体积比 15 : 85 配置)倒入三角烧瓶中, 用瓶塞封闭瓶口, 在磁力搅拌机上搅拌 2 h 后静置 22 h, 之后用定性滤纸沉淀过滤, 利用氯离子含量快速测定仪测定总氯离子浓度。自由氯离子浓度测定除将稀硝酸溶液换成蒸馏水外, 其余步骤与总氯离子浓度测定一致。氯离子固化率的计算公式如式(1)。

$$C_b = \frac{T - F}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_b 为氯离子固化率, %; T 为总氯离子浓度, mol/L; F 为自由氯离子浓度, mol/L。

1.3.2 钢筋极化电位

为检验海砂及阻锈剂对钢筋锈蚀的影响, 依据《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)^[18], 采用硬化砂浆阳极极化法对钢筋极化电位进行测试。测试通过科思特电化学工作站完成, 以钢筋作为阳极, 不锈钢作为辅助电极, 在 50 μ A/cm² 的恒电流条件下进行测试。

1.3.3 干湿循环试验

砂浆制备成型后置于标养室养护 13 d, 养护完成后置于烘箱中 6 d, 温度为 (60 \pm 2) $^{\circ}$ C, 然后

采用环氧树脂对试件两端密封, 之后进行干湿循环试验(浸入 NaCl 溶液 1 d, 60 $^{\circ}$ C 烘干 3 d 为一循环)。

1.3.4 钢筋失重率计算

钢筋失重率参照《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)^[18]中钢筋质量损失率公式计算, 用稀盐酸溶液对钢筋进行酸洗, 酸洗时, 洗液中放入两根尺寸相同的同类无锈钢筋作空白校正, 然后烘干称重, 钢筋失重率 ω 计算如式(2):

$$\omega = \left[\left(m_0 - m - \frac{(m_{01} - m_1) + (m_{02} - m_2)}{2} \right) / m_0 \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_{01}, m_{02} 分别表示两空白校正样钢筋的初始质量, g; m_1, m_2 分别为两空白校正样钢筋酸洗后的质量, g; m_0 为酸洗前试验钢筋的初始质量, g; m 为酸洗后试验钢筋的质量, g。

2 结果与分析

2.1 SACS 与 OPCS 的氯离子固化性能

表 6 为河砂硫铝酸盐混凝土 (SACR)、海砂硫铝酸盐混凝土 (SACS) 和海砂普通硅酸盐混凝土 (OPCS) 三组混凝土的总氯离子浓度 (T)、自由氯离子浓度 (F) 和固化率 (C_b), 从表中可以看出, SACR 总氯离子含量随龄期增长在 0.001 mol/L 上下波动, SACS 和 OPCS 总氯离子含量随龄期增长在 0.003 mol/L 附近波动, 说明海砂的掺入会在混

凝土中引入大量氯离子。三组混凝土中 F 值均随着龄期的增长不断下降,说明三组混凝土随着龄期的增长水化产物增加并不断地固化氯离子,三组混凝土的 C_b 值随龄期的变化见图 1。

从图 1 中可以看出,随着龄期增长,SACS 和 OPCS 两组混凝土的 C_b 值不断上升。SACS 组的 C_b 值始终高于 OPCS 组。标养 28 d 前,SACS 和 OPCS 之间的 C_b 值差距不断增大;28 d 时 SACS 和 OPCS 氯离子固化率分别为 67.86% 和 50%,差距达 17.86%;28 d 后,SACS 和 OPCS 氯离子固化率上升幅度变缓,两者差距也有所减小;56 d 后基本保持不变,两者差距基本维持在 14% 左右。由此可见,与 OPCS 相比,SACS 具有更强的固化氯离子能力,这主要是因为 SAC 是一种含铝矿物高的水泥材料,其水化会产生大量的 AFt 和 AFm,AFm 与氯离子相结合形成氯铝酸钙,即 Friedel's 盐(F_s),使得 SACS 具有较优异的固化氯离子能力^[19-21]。

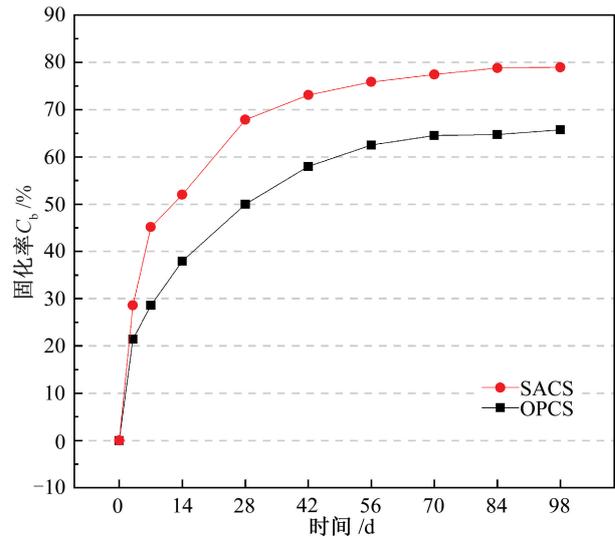


图 1 水泥类型对海砂混凝土氯离子固化率的影响

Fig. 1 Effect of cement types on the chloride ion curing rate of sea sand concrete

表 6 混凝土总氯离子浓度、自由氯离子浓度和固化率试验结果

Tab. 6 Results of total chloride ion concentration, free chloride ion concentration, and curing rate of concrete

组别	龄期/d	总氯离子浓度 $T/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	自由氯离子浓度 $F/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	固化率 $C_b/\%$
SACS	3	0.000 9	0.000 7	22.22
	7	0.001 1	0.000 7	36.36
	14	0.001 3	0.000 7	46.15
	28	0.001 1	0.000 5	54.54
	42	0.001 0	0.000 4	60.00
	56	0.001 3	0.000 5	61.53
	70	0.001 1	0.000 4	63.63
	84	0.000 9	0.000 3	66.67
	98	0.001 0	0.000 3	70.00
OPCS	3	0.002 8	0.002 0	28.57
	7	0.003 1	0.001 7	45.16
	14	0.002 5	0.001 2	52.00
	28	0.002 8	0.000 9	67.86
	42	0.002 6	0.000 7	73.08
	56	0.002 9	0.000 7	75.86
	70	0.003 1	0.000 7	77.42
	84	0.002 8	0.000 6	78.57
	98	0.002 9	0.000 6	79.31

2.2 阻锈剂及其掺量对海砂硫铝酸盐混凝土钢筋锈蚀的影响

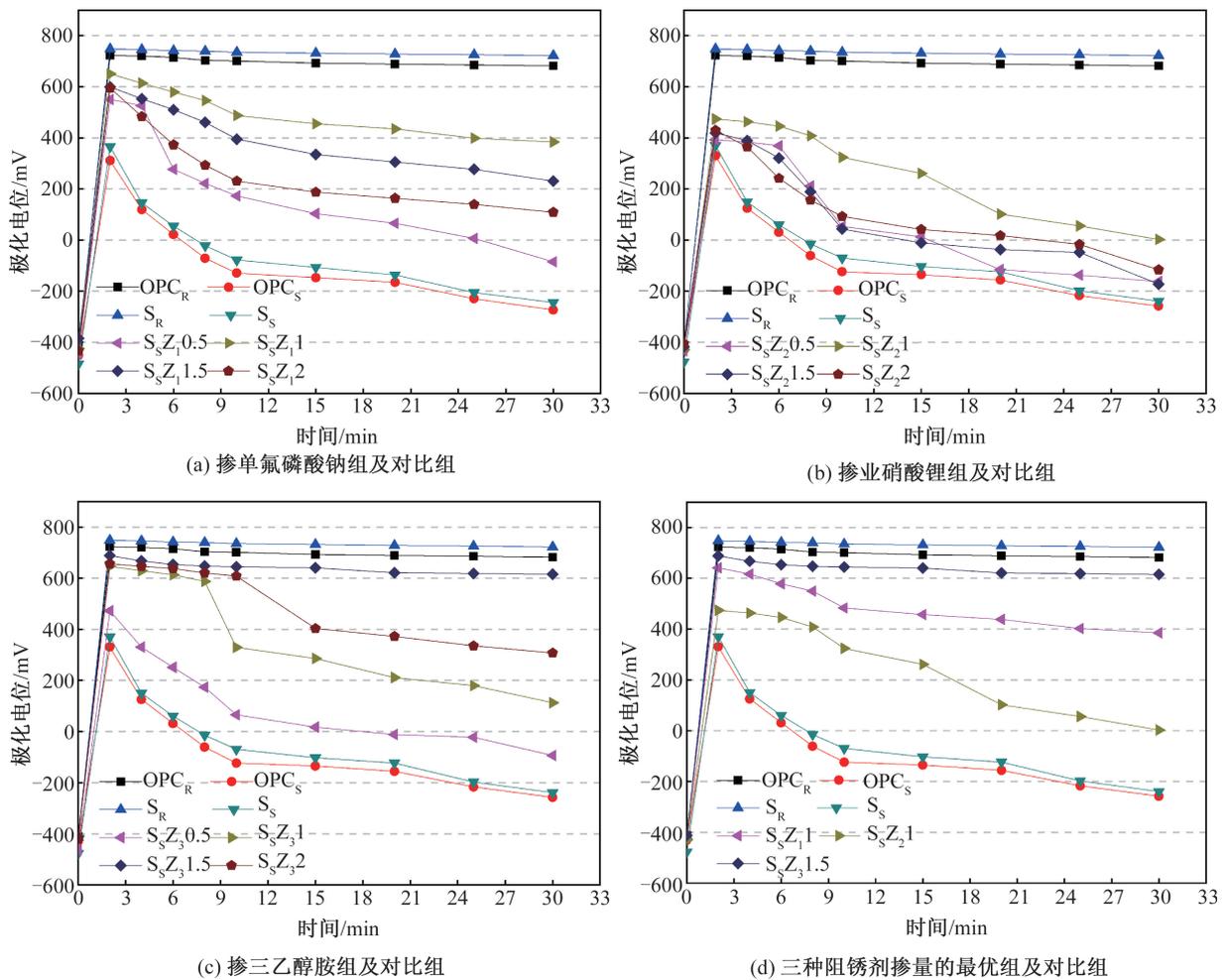
2.2.1 钢筋极化电位

为检验阻锈剂及其掺量对钢筋锈蚀的影响,进行钢筋极化电位测试,砂浆中钢筋极化电位与时间的关系见图 2,参照《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)对钢筋钝化状态进行评价^[21]。

从图 2 中可以看出,在未掺阻锈剂的情况下,OPC_R 和 S_R 中钢筋极化电位在 2 min 时分别上升到 723 mV 和 748 mV(高于 650 mV),2~15 min 内分别下降了 31 mV 和 17 mV(低于 50 mV),说明 OPC_R 和 S_R 中钢筋处于钝化状态。而 OPC_S 和 S_S 中钢筋极化电位 2 min 分别上升到 311 mV 和 366 mV(远低于 650 mV),并且在 15 min 内钢筋极化电位大幅度下降,说明 OPC_S 和 S_S 中钢筋处于活化状态,可见海砂砂浆组别中的钢筋极化电位均明显低于河砂砂浆组别,这主要是因为海

砂中富含氯离子,氯离子通过扩散、迁移等作用到达钢筋表面破坏局部钢筋钝化膜使钢筋裸露,与尚完好的钝化膜区之间产生电位差,从而导致钢筋极化电位下降^[22]。无论是使用河砂还是海砂,SAC 砂浆中钢筋极化电位均略高于 OPC 砂浆中钢筋极化电位,这是因为 SAC 砂浆具有较高的氯离子结合能力和较为致密的微观结构,可降低氯离子的传输,同时致密的微观结构能够使氧气的侵入受到阻碍,进而阻碍阴极反应的发生^[9,14,23]。

由图 2(a)(b)(c)可知,在 S_S 砂浆中掺入三种不同阻锈剂均能提高钢筋极化电位,钢筋的极化电位随着阻锈剂掺量的增加先上升后下降。单氟磷酸钠和亚硝酸锂阻锈剂掺量为 1% 时阻锈效果最佳,S_SZ₁ 组 2 min 内钢筋极化电位达到 650 mV,2~15 min 内降低 195 mV,降低幅度超过 50 mV,处于钝化与活化状态之间;S_SZ₂ 组 2 min 内钢筋极化电位达到 474 mV,在 2~15 min 内降低



注:对比组为 OPC_R/OPC_S(河砂/海砂 OPC 砂浆)、S_R/S_S(河砂/海砂 SAC 砂浆);S_SZ₁、S_SZ₂、S_SZ₃ 分别代表掺单氟磷酸钠、亚硝酸锂和三乙醇胺阻锈剂的海砂 SAC 砂浆。

图 2 各组砂浆中钢筋极化电位变化曲线图

Fig. 2 Polarization potential changes in steel reinforcement for each mortar group

213 mV,降低幅度大于 S_5Z_1 组,处于活化状态。三乙醇胺掺量为 1.5% 时阻锈效果最佳,2 min 时钢筋极化电位达到 688 mV,15 min 时仅降低 48 mV(小于 50 mV),降低幅度较 S_5Z_1 组和 S_5Z_2 组更小,其钢筋极化电位变化满足规范要求,处于钝化状态。

从图 2(d)中可以看出,三种阻锈剂最优掺量下砂浆中钢筋极化电位均在 2 min 内上升,2~15 min 下降,但只有 S_5Z_3 1.5 组砂浆钢筋极化电位在 2 min 内上升至 650 mV,2~15 min 内极化电位下降低于 50 mV,故仅有掺入 S_5Z_3 1.5 组砂浆中钢筋接近钝化状态。

三种阻锈剂阻锈效果差距主要是由阻锈剂的阻锈机理决定的。单氟磷酸钠(Na_2PO_3F)水解产生的 $H_2PO_4^-$ 与 Ca^{2+} 相结合形成磷酸钙胶粒,磷酸钙胶粒与 Fe^{2+} 反应产生磷酸钙铁沉淀膜覆盖在钢筋表面抑制腐蚀反应的发生^[24]。亚硝酸锂在碱性环境下具有氧化性能,将钢筋锈蚀产生的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 形成致密的 Fe_2O_3 钝化膜,但混凝土受到侵蚀会导致其内部碱性降低,从而减弱亚硝酸锂阻锈剂的阻锈效果^[25]。三乙醇胺可提高钢筋的防护性能,其主要机制在于其分子中含有一种特殊的吸附基团,能够吸附在钢筋表面,形成吸附膜;同时,它也具备改变钢筋表面电荷状态和界面性质的能力;此外,氨基醇类化合物可以通过氨基($-NH_2$)和羟基($-OH$)硬基团取代金属表面的氯离子,与金属原子配位在金属表面生成一层连续的薄膜,这一薄膜能够有效地抑制钢筋发生电化学腐蚀,降低钢筋锈蚀程度,提高钢筋抗腐蚀性能^[26-27]。

2.2.2 钢筋失重率

对 OPC_S 和不同阻锈剂及掺量下 S_5 试件进行 5 次干湿循环加速锈蚀后测试钢筋失重率,见表 7。

表 7 钢筋失重率测试结果 (单位:%)
Tab. 7 Test results of rebar mass loss (unit: %)

编号	阻锈剂掺量				
	0	0.5	1.0	1.5	2.0
S_5Z_1	0.153 6	0.083 3	0.051 6	0.063 5	0.076 1
S_5Z_2	0.153 6	0.102 2	0.070 1	0.082 7	0.091 0
S_5Z_3	0.153 6	0.056 5	0.039 7	0.014 2	0.026 9
OPC_S	0.175 2	—	—	—	—

由表 7 可以看出,未掺阻锈剂时, OPC_S 和 S_5 中钢筋失重率分别达到了 0.175 2% 和 0.153 6%,这主要是因为海砂中高含量的氯离子到达钢筋表

面破坏钢筋表面钝化膜,引起混凝土内部钢筋锈蚀。不同种类阻锈剂及其掺量均能降低 S_5 中钢筋失重率,钢筋失重率均随阻锈剂掺量的增加呈现先下降后上升的规律。三种阻锈剂在同一掺量下钢筋失重率大小关系为: $S_5Z_2 > S_5Z_1 > S_5Z_3$,说明三乙醇胺阻锈效果最佳,单氟磷酸钠次之,亚硝酸锂最差。三种阻锈剂最优掺量分别为 1%、1%、1.5%,掺 1.5% 三乙醇胺阻锈剂时钢筋失重率最低,仅为 0.142%,与未掺阻锈剂时相比,三种阻锈剂最优掺量下钢筋失重率分别降低约 66%、54%、91%。

3 结论

1) 与海砂普通硅酸盐混凝土相比,海砂硫铝酸盐混凝土固化氯离子能力优异,标养 28、56 和 98 d 后氯离子固化率分别提高约 18.9%、13.4% 和 13.8%,但采用海砂硫铝酸盐水泥砂浆仍会引起钢筋极化电位降低,破坏钢筋钝化膜。

2) 在海砂硫铝酸盐水泥砂浆中掺入单氟磷酸钠、亚硝酸锂以及三乙醇胺三种不同类型的阻锈剂均能提高钢筋极化电位,最佳掺量分别为 1%、1%、1.5%。在最佳掺量下三种阻锈剂阻锈效果表现为三乙醇胺最优,单氟磷酸钠次之,亚硝酸锂最差。

3) 在海砂硫铝酸盐水泥砂浆中加入掺量为 1.5% 的三乙醇胺阻锈剂,能够有效提高钢筋防护性能,钢筋极化电位满足规范要求,与未掺阻锈剂的海砂硫铝酸盐水泥砂浆相比,在进行 5 次干湿循环条件下钢筋失重率降低约 91%。

参考文献:

- [1] 蔡哲栋,吕文俊,陆俊,等.海水海砂混凝土耐久性研究进展[J].江西建材,2021(5):6-7.
- [2] 黄亮,谢建和,陆中宇.海水海砂混凝土研究现状与应用前景[J].混凝土,2020(9):155-160.
- [3] 冷发光,丁威,周永祥,等.海砂在建设工程应用的关键技术及产品开发[J].建设科技,2015(10):46-49.
- [4] 刘伟,谢友均,董必钦,等.海砂特性及海砂混凝土力学性能的研究[J].硅酸盐通报,2014,33(1):15-22.
- [5] 肖建庄,张鹏,张青天,等.海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J].建筑科学与工程学报,2018,35(2):16-22.
- [6] 王祥胜,罗星,张澳,等.海水海砂混凝土研究进展

- [J]. 节能, 2022, 41(8): 73-75.
- [7] 关国浩, 王学志, 贺晶晶. 海水海砂混凝土研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1483-1493.
- [8] 陈彩艺. 生物硫酸对人工鱼礁钢筋混凝土的腐蚀机理[D]. 福州: 福州大学, 2015.
- [9] CAI G, ZHAO J. Application of sulphoaluminate cement to repair deteriorated concrete members in chloride ion rich environment-A basic experimental investigation of durability properties (Article) [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016(7): 2832-2841.
- [10] GLASSER F P, ZHANG L. High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite compositions[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12): 1881-1886.
- [11] KALOGRIDIS D, KOSTOGLLOUDIS G C, FTIKOS C, et al. A quantitative study of the influence of non-expansive sulfoaluminate cement on the corrosion of steel reinforcement[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(11): 1731-1740.
- [12] 郭俊萍, 肖忠明, 黄芳, 等. 海水拌合硫铝酸盐水泥性能及机理分析[J]. 水泥, 2017(9): 7-10.
- [13] 蔡高创. 硫铝酸盐水泥基混凝土抗氯离子侵蚀性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [14] XU Q, JI T, YANG Z, et al. Steel rebar corrosion in artificial reef concrete with sulfoaluminate cement, sea water and marine sand[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116685.
- [15] 黄祖匡. 硫铝酸盐水泥海砂混凝土中钢筋的锈蚀机理分析[J]. 福建建设科技, 2016(4): 34-37.
- [16] SOEDA K, ICHIMURA T. Present state of corrosion inhibitors in Japan[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(1): 117-122.
- [17] CHAUSSADENT T, NOBEL-PUJOL V, FARCAS F, et al. Effectiveness conditions of sodium monofluorophosphate as a corrosion inhibitor for concrete reinforcements [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 556-561.
- [18] 中国水利水电科学研究院. 水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [19] YUE Y, WANG J, BASHEER P, et al. Raman spectroscopic investigation of Friedel's salt[J]. Cement and Concrete Composites, 2018(5): 306-314.
- [20] 王绍东, 黄煜镔, 王智. 水泥组分对混凝土氯化氯离子能力的影响[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(6): 570-574.
- [21] YUAN Q, SHI C, DE SCHUTTER G, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment-A review [J]. Construction and Building Materials, 2009(1): 1-13.
- [22] 李冰, 张世义, 王宏. 海洋环境下混凝土结构钢筋锈蚀率研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 18-23.
- [23] 龙羽. 硫铝酸盐水泥-硅酸盐水泥-石膏三元复合材料的护筋性研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [24] 张大全, 张万友, 王崑, 等. 单氟磷酸钠在混凝土模拟孔隙液中的缓蚀特性[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(2): 55-57.
- [25] PAGE C L, NGALA V T, PAGE M M. Corrosion inhibitors in concrete repair systems[J]. Magazine of Concrete Research, 2000(1): 25-37.
- [26] SOEYLEV T A, RICHARDSON M G. Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4): 609-622.
- [27] 周俊龙, 欧忠文, 江世永, 等. 掺阻锈剂掺合料海水海砂混凝土护筋性探讨[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 69-74.

(责任编辑 王利君)