

基于原电池原理的电化学脱氯试验研究

俞坚祥¹, 吴焯², 房子柱², 庄磊¹, 孙克纬², 冯龙海², 李森林²

(1. 中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司, 浙江 宁波 315207;

2. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 对不同水灰比钢筋混凝土开展了基于原电池原理的电化学脱氯试验, 研究了不同水灰比的钢筋混凝土电化学参数随时间的演变规律。结果表明: 水灰比越大, 脱氯初期阳极工作电位越负, 回路电流越大, 脱氯效率越高; 水灰比越大, 脱氯后钢筋腐蚀电位正移越明显, 极化电阻增幅越大, OH^- 浓度的增幅越小; 脱氯后, 混凝土中 C-S-H 凝胶和 Friedel's 盐的含量略微降低, 而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量略微增加, AFt 和 C-S-H 凝胶少量分解。

关键词: 原电池原理; 脱氯; 水灰比; 钢筋腐蚀电位; 极化电阻; 回路电流

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)01-0104-07

Experimental study on electrochemical dechlorination based on galvanic cell principle// YU Jianxiang¹, WU Ye², FANG Zizhu², ZHUANG Lei¹, SUN Kewei², FENG Longhai², LI Senlin² (1. Sinopec Zhenhai Refining & Chemical Co. Ltd., Ningbo 315207, China; 2. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Electrochemical dechlorination experiments based on the principle of galvanic cell were carried out on reinforced concrete with different water-cement ratios. The evolution of electrochemical parameters of reinforced concrete with different water-cement ratios over time was studied. The results show that the higher the water-cement ratio, the more negative the anodic operating potential at the initial stage of dechlorination, the larger the loop current, and the higher the dechlorination efficiency. The higher the water-cement ratio, the more obvious the positive shift of corrosion potential of the rebar after dechlorination, the greater the increase of polarization resistance, and the smaller the increase of OH^- concentration. After dechlorination, the contents of C-S-H gel and Friedel's salt in concrete slightly decrease, while the content of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ slightly increases, and a small amount of AFt and C-S-H gel decomposes.

Key words: galvanic cell principle; dechlorination; water-cement ratio; corrosion potential of rebar; polarization resistance; loop current

海工钢筋混凝土由于遭受氯离子的侵蚀, 其耐久性问题十分严重。大量数据表明, 氯离子侵蚀诱发钢筋活化腐蚀是导致钢筋混凝土结构性能劣化的关键因素^[1-3], 腐蚀产物的体积增大数倍, 造成混凝土开裂、剥落, 最终导致结构承载力下降, 甚至倒塌, 对社会经济发展和人身安全构成威胁。因此, 深入研究海工钢筋混凝土的脱氯技术, 对于提高其耐久性具有重要意义。

脱氯技术根据电流提供方式的不同, 可分为外加电流方式和基于原电池原理的牺牲阳极方式这两种类型。其中, 外加电流方式主要借助外部施加电流来实现脱氯, 通常使用较大的电流密度, 脱氯所需的周期短, 效率高, 但脱氯后存在钢筋混凝土界面的

黏结强度下降以及在通电过程中钢筋可能发生氢脆等问题; Lin 等^[4]发现采用外加电流方式进行电化学脱氯会导致水化硅酸钙凝胶的分解以及氢气的析出, 使得钢筋混凝土界面黏结力下降, 且电流密度越大, 这种影响越显著。Zhang 等^[5]通过有限元模拟, 探究了采用外加电流方法脱氯后混凝土梁性能的变化。模拟结果表明, 当采用 5 A/m^2 的电流密度通电 2 周或者 3 A/m^2 的电流密度通电 4 周后, 钢筋混凝土的黏结性能降低了 50%, 承载能力降低了 20%。李森林等^[6-7]提出了基于原电池原理的电化学脱氯方法。这一方法具有成本低廉、安装简便以及无需长期监控的优势, 尤其适用于预应力钢筋, 能够有效避免氢脆的发生, 但是其需要较长的脱氯周期。

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y423007)

作者简介: 俞坚祥(1968—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事港口储运管理工作。E-mail: yujianx.zhlh@sinopec.com

的标准试验方法》，对试验过程中钢筋和阳极的电位进行测试。脱氯开始前，对钢筋腐蚀电位进行测试，以评估钢筋的初始腐蚀状况。脱氯过程中，在确保回路连通的前提下对钢筋的保护电位和阳极的工作电位进行测试。脱氯试验结束后，断开钢筋和阳极的连接，对钢筋的去极化电位进行为期 2 月的持续测试。

b. 钢筋极化电阻测试。 钢筋的极化电阻采用线性极化法进行测试，所选用的仪器为 CST700 型腐蚀速率测量仪，该仪器采用护环电极技术，可将极化电流限制在特定的区域内^[16]。测量前需确保待测混凝土表面处于润湿状态，接着将护环电极放置在混凝土表面，并将护环电极探头与测量仪的接口连接，随后将钢筋引出线与测量仪的工作电极接口相连，设置好相关参数，便可以开始测量钢筋的腐蚀速率。在实验过程中，由于工作电极与参比电极之间存在较大的混凝土电阻 R_c ，因此实际测得的极化电阻 R_p 为

$$R_p = (\Delta E / I_{ce} - R_c) \pi DL \quad (1)$$

式中： ΔE 为极化电位值； I_{ce} 为极化电流； D 为钢筋直径，本试验为 12 mm； L 为钢筋极化距离，本试验为 10 cm。

c. 回路电流测试。 为避免电流表自身电阻对测量结果的影响，采用双表法对回路电流进行测试。具体操作步骤如下：首先，选用两个阻值相同的万用表，断开钢筋与阳极之间的回路。接着，将一个万用表的正极夹头与钢筋相连，负极夹头与阳极相连，待数据稳定后，读取万用表的示数，记录为 I_1 。随后，将这两个万用表同时串联接入电路中，两个电表的读数分别记录为 I'_2 和 I''_2 ，取其平均值 $I_2 = (I'_2 + I''_2) / 2$ 。最后，计算回路中电流：

$$I = I_1 I_2 / (2I_2 - I_1) \quad (2)$$

d. 自由氯离子与 OH^- 含量滴定分析。 先将试件的试验面清洁并晾干，然后，对于自由氯离子滴定分析，按照每 5 mm 的深度钻取一层自由氯离子滴定粉样，每层取 8 个孔（如图 3 所示）。氯离子的滴定方法参照 JTS/T 236—2019《水运工程混凝土试验检测技术规范》的规定进行。而对于 OH^- 含量滴定分析，则按照每 10 mm 钻取一层粉样。滴定过程基于

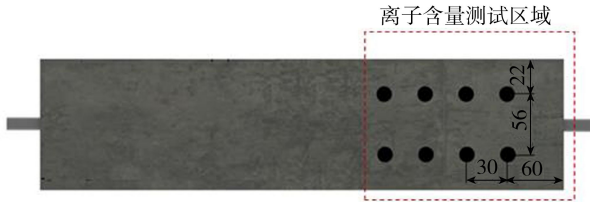


图 3 钻孔取粉示意图(单位:mm)

中和反应原理：先将待测样品溶解于 200 mL 蒸馏水中，随后静置 24 h，待溶液稳定后进行过滤处理，从中量取 20 mL 滤液，接着滴加酚酞试剂，使溶液呈现微红色，此时再使用 0.1 mol/L 的稀盐酸滴定，直至溶液变为无色，记录所消耗的稀盐酸体积，从而计算出 OH^- 含量。

2 结果与分析

2.1 水灰比对脱氯效率的影响

图 4 为不同水灰比试件脱氯前后自由氯离子质量分数的变化。由图 4 可知，脱氯试验前，水灰比为 0.40、0.50 和 0.55 的试件在不同深度层处的自由氯离子质量分数分布较为均匀，其平均值分别为 0.315%、0.304% 和 0.307%，这与预先将 3.0% 的 NaCl 溶解于水后均匀拌制有关。在开展 120 d 的脱氯试验后，各水灰比试件内的自由氯离子质量分数均明显降低，具体表现为：水灰比为 0.40、0.50 和 0.55 的试件内不同深度层的自由氯离子质量分数最大值分别为 0.227%、0.152% 和 0.142%，最小值分别为 0.159%、0.113% 和 0.097%，平均值分别为 0.193%、0.132% 和 0.119%。此外，从图 4 还可以看出，在实施脱氯试验后，混凝土表面附近及钢筋周围的自由氯离子质量分数略低于中间层的自由氯离子质量分数。上述试验结果表明，所设计的电化脱氯装置对试件内不同深度层的自由氯离子均有显著的脱除效果。

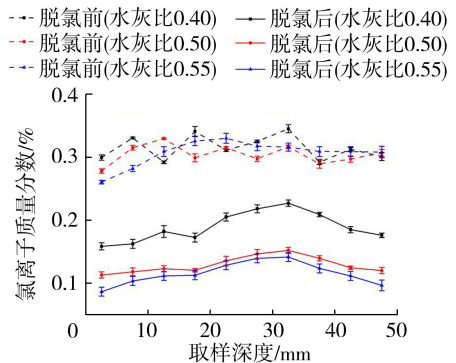


图 4 不同水灰比试件脱氯前后自由氯离子质量分数的变化

图 5 为不同水灰比试件的脱氯效率。由图 5 可知，脱盐试验后，水灰比为 0.40、0.50 和 0.55 的试件内不同深度层的自由氯离子脱除效率最大值分别为 50%、64% 和 68%，最小值分别为 29%、51% 和 54%，平均值分别为 39.5%、57.5% 和 61%，这表明水灰比越大，自由氯离子脱除效果越显著，脱氯效率越高。同时，混凝土表面附近及钢筋周围的氯离子脱除效率明显高于中间层，这一发现与 Du 等^[17]的试验结果相一致。此外，郑靓等^[18]认为在脱氯过程中，由于氯离子迁出混凝土的速度快于其进入中间

层的速度,因此在中间层混凝土产生淤塞效应,进而影响中部氯离子的去除效率。

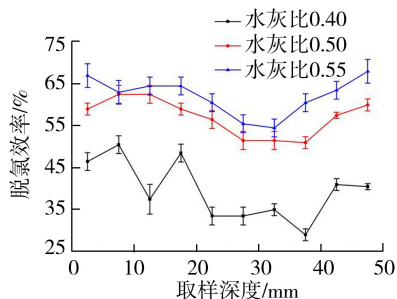


图5 不同水灰比试件的脱氯效率

2.2 水灰比对钢筋腐蚀电位的影响

图6为不同水灰比试件脱氯前后钢筋腐蚀电位的变化。由图6可知,成型养护60d后,水灰比为0.40、0.50和0.55的试件内钢筋腐蚀电位从初始的-404、-408、-416mV依次正向偏移至-296、-319、-328mV,表明3组不同水灰比的试件内钢筋腐蚀电位的变化趋势基本一致,但在60d后钢筋腐蚀电位均位于-300mV附近,说明3组试件内钢筋均处于腐蚀状态。由于本试验采用预掺盐的方法向混凝土中引入氯离子(占水泥质量的3%),因此可以认为混凝土中氯离子的分布是均匀的。尽管水灰比不同,但各试件之间的氯离子质量分数差异较小(如图4所示)。水灰比为0.40、0.50和0.55的试件在电化学腐蚀试验(ECE)前的氯离子质量分数处于0.261%~0.354%。因此,各试件在ECE前的腐蚀电位未产生显著差异。

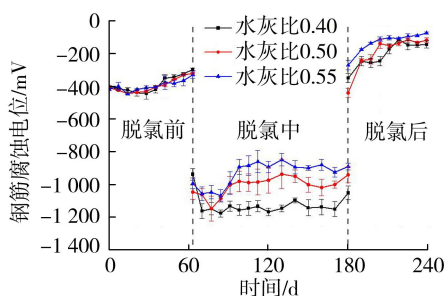


图6 不同水灰比试件脱氯前后钢筋腐蚀电位的变化

在脱氯试验期间,3组试件中的钢筋腐蚀电位在前20d均呈现负移,主要原因在于自腐蚀阳极与试件中的钢筋相互连通后,由于二者之间存在电位差,阳极加速消耗促使钢筋迅速极化,从而导致钢筋腐蚀电位负移。随着试验的逐步开展,钢筋腐蚀电位开始缓慢正移,并逐渐趋于稳定。接近120d时,水灰比为0.40、0.50和0.55的试件内钢筋腐蚀电位分别稳定在-1096、-972、-891mV左右,3组试件中钢筋腐蚀电位均高于-1100mV。

脱氯试验结束后,钢筋腐蚀电位在去极化过程

中随着时间的推移逐步正移,且水灰比越大的试件,钢筋腐蚀电位的正移越显著,其中,水灰比为0.40、0.50和0.55的试件的钢筋腐蚀电位分别从脱氯前的-296、-319、-328mV分别正移至-143、-117、-73mV。

2.3 水灰比对钢筋极化电阻的影响

图7为不同水灰比试件脱氯前后钢筋极化电阻的变化。由图7可知,在脱氯试验前,3组不同水灰比的试件中钢筋极化电阻相差较小,成型养护60d时水灰比为0.40、0.50和0.55的试件中钢筋极化电阻分别为42.82、37.14、30.50kΩ·cm²。脱氯试验结束后,3组试件中钢筋极化电阻逐渐增大,至240d时,水灰比为0.40、0.50和0.55的试件中钢筋极化电阻分别达到94.20、114.5、130.97kΩ·cm²,增长幅度分别为119.9%、208.2%和329.4%,这说明试件水灰比越高,通过该方法脱除氯离子后,钢筋恢复钝化效果越显著。

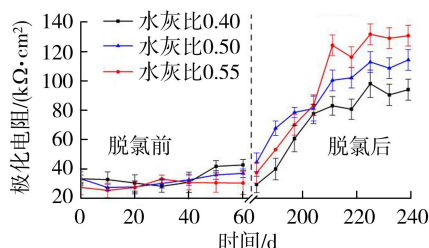


图7 不同水灰比试件脱氯前后钢筋极化电阻的变化

2.4 水灰比对阳极工作电位的影响

图8为不同水灰比试件脱氯过程中阳极工作电位的变化。由图8可知,在脱氯试验开始的20d内,各水灰比试件配置的阳极工作电位均有所正移,水灰比为0.40、0.50和0.55的试件配置的阳极工作电位分别从-1.609、-1.595、-1.605V正移至-1.558、-1.515、-1.539V,然后阳极工作电位在-1.60~-1.50V(相对于Cu/饱和和CuSO₄)范围内波动,且不同水灰比的试件的阳极工作电位无显著差异,这表明水灰比对阳极工作电位并无显著影响。

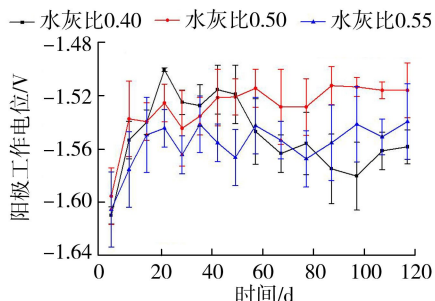


图8 不同水灰比试件脱氯过程中阳极工作电位的变化

2.5 水灰比对回路电流的影响

图9为不同水灰比试件脱氯过程中回路电流的

变化。由图 9 可知,在整个脱氯试验周期内,回路电流整体呈下降趋势,水灰比为 0.40、0.50 和 0.55 的试件在脱氯回路中电流分别从 2.8、3.6、3.7 mA 下降至 1.4、1.3、1.4 mA,从中可以看出:水灰比越大,脱氯试验中试件的回路电流也越大,但在脱氯试验后期,各试件回路电流相差不大。这主要是因为,在脱氯试验前期,电流主要与回路电阻有关,水灰比越大,混凝土试件的密实度越低,电阻率越小,所以电流相对较大;而在脱氯试验后期,随着自腐蚀阳极的消耗,工作电流较大的试件,其阳极消耗更快,因此电流下降也更快,并最终趋于稳定。

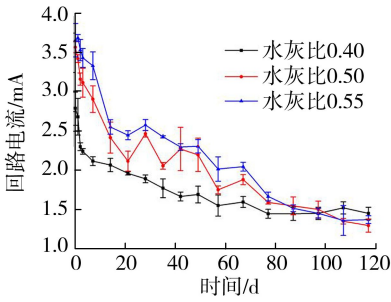


图 9 不同水灰比试件脱氯过程中回路电流的变化

2.6 OH⁻ 浓度变化

图 10 为不同水灰比试件脱氯前后 OH⁻ 浓度变化。由图 10 可知,脱氯处理后 3 组不同水灰比的试件的 OH⁻ 浓度均较未进行脱氯处理的试件有所上升,且水灰比越小的试件,其 OH⁻ 浓度的增幅越大,可能原因是水灰比越小的试件,混凝土的密实度越大,其初始 OH⁻ 浓度越高,且 OH⁻ 向混凝土外部迁移的速率越低,因此混凝土内保留的 OH⁻ 也越多。另外,靠近钢筋附近的混凝土中 OH⁻ 浓度略高于混凝土表面层附近的 OH⁻ 浓度,主要原因是外层混凝土的碳化作用导致其碱度降低,与此同时,在脱氯过程中阴极发生反应生成 OH⁻,并且这些 OH⁻ 在电场作用下逐步向内部迁移,因此内部区域 OH⁻ 浓度较高。

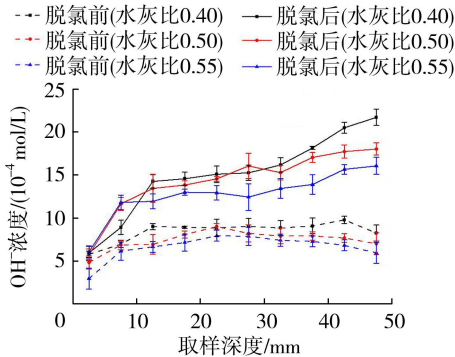


图 10 不同水灰比试件脱氯前后 OH⁻ 浓度分布

表 2 为脱氯前后钢筋表面的 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$ ($c(\text{Cl}^-)$ 和 $c(\text{OH}^-)$ 分别为 Cl^- 和 OH^- 的浓度)。由

表 2 可知,脱氯处理后不同水灰比的试件中钢筋表面的 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$ 均明显下降,且都低于混凝土中钢筋去钝化的 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$ 阈值(约为 0.6^[19]),说明试件钢筋表面正在逐渐恢复钝化状态。此外,试件的水灰比越大,脱氯后试件钢筋表面的 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$ 比值越低,表明水灰比较大的试件中钢筋越易恢复钝化,这一结论与钢筋电极电位和极化电阻的测试结果相一致。

表 2 脱氯前后钢筋表面的 $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$

试件编号	水灰比	$c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$	
		脱氯前	脱氯后
1	0.40	1.95	0.45
2	0.50	2.24	0.37
3	0.55	1.81	0.31

2.7 热重分析测试

图 11 为水灰比 0.40 的混凝土试件脱氯前后的 TG-DTG 曲线。由图 11 可知,在温度区间 310 ~ 385℃ 内,可观察到 Friedel's 盐的吸热峰^[20],表明混凝土中的部分自由氯离子转化为结合氯离子。在脱氯处理前后,Friedel's 盐的减重率分别为 0.64% 和 0.55%,说明脱氯处理对化学结合的氯离子影响较小,脱氯后只有少量的结合氯离子被去除^[21]。

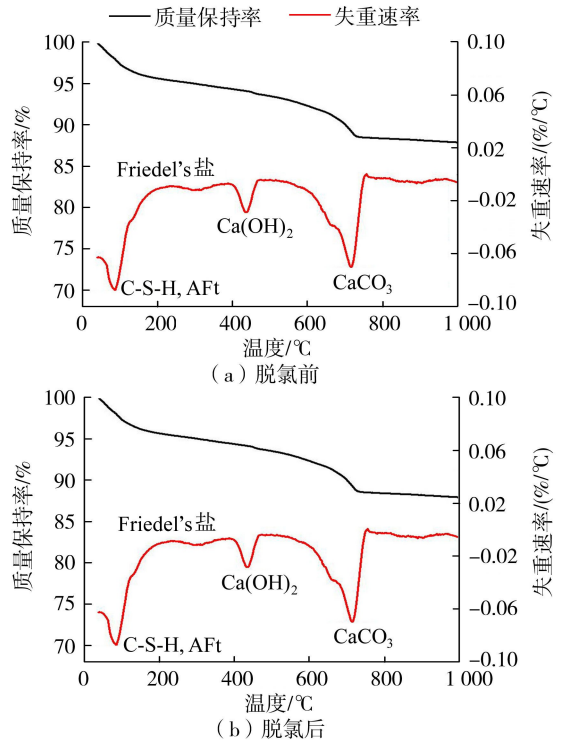


图 11 水灰比 0.40 的混凝土试件脱氯前后的 TG-DTG 曲线

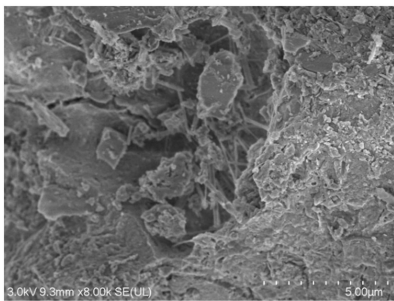
在 50 ~ 200℃ 的温度范围内,可观察到 C-S-H 凝胶和 AFt 的吸热峰^[22]。水灰比为 0.40 的试件在脱氯后 C-S-H 凝胶和 AFt 的减重率分别为 6.54% 和 5.18%,表明基于原电池原理的电化学脱氯方法所施加的电流密度较小,因此电流对混凝土微观结构

造成的不利影响可忽略不计。

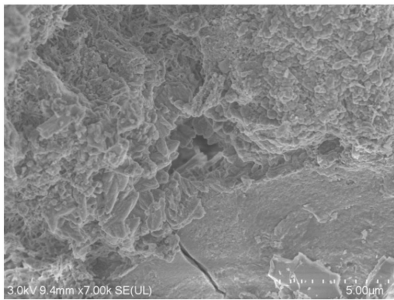
在 400 ~ 500℃ 的温度区间内,各试件均出现 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的吸热峰,脱氯前后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的减重率分别为 1.20% 和 1.28%,表明脱氯后 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量有所增加。这是因为在脱氯过程中,部分 C-S-H 凝胶在电流作用下分解为富钙的阳离子和富硅酸盐的阴离子, Ca^{2+} 在电场作用下向阴极迁移,并在迁移过程中与 OH^- 结合,形成了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体^[23]。但是由于在基于原电池原理的脱氯过程中施加的电流密度较小,阴极反应产生的 OH^- 含量较低,因此对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量的提升效果并不明显。

2.8 SEM 和 EDS 测试

各试件在脱氯前后的微观形貌如图 12 所示,未经脱氯处理的试件中观察到明显的针棒状的 AFt 晶体以及絮状的 C-S-H 凝胶,经过脱氯处理后,各试件内的 AFt 和 C-S-H 出现了少量分解,使得混凝土结构更加密实。可能原因是在脱氯过程中,C-S-H 在电流的作用下分解,分解产物填充了混凝土的孔隙,使得混凝土整体形貌变得致密。



(a) 脱氯前



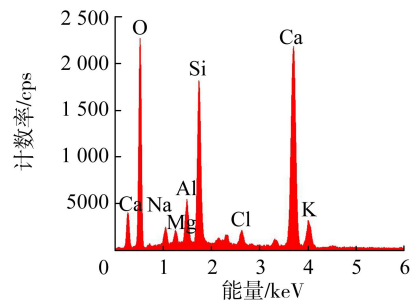
(b) 脱氯后

图 12 水灰比 0.40 的混凝土试件脱氯前后微观形貌

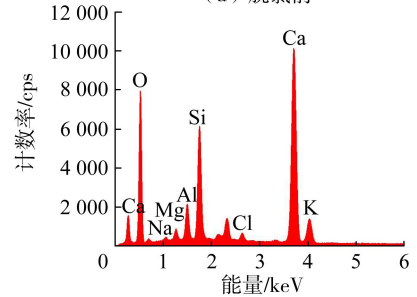
图 13 显示了各试件脱氯前后的能量色散谱(EDS)分析结果。由图 13 可知,脱氯前后混凝土内的元素组成未发生明显变化,但 Cl 元素的占比有所降低,而 K、Ca、Na 等元素的占比升高,说明脱氯效果显著。

3 结论

a. 基于原电池原理的电化学脱氯方法对掺盐钢筋混凝土试件的脱氯效果显著。水灰比越大,脱



(a) 脱氯前



(b) 脱氯后

图 13 水灰比 0.40 的混凝土试件脱氯前后 EDS 测试结果
氯效率越高,钢筋腐蚀电位正移幅度越大,极化电阻增幅越大,钢筋腐蚀概率降低的效果越明显。

b. 各水灰比试件组的自腐蚀阳极的工作电位在脱氯试验前 20 d 内均发生正移,水灰比越大,电位越负;20 d 后阳极工作电位逐渐趋于稳定,在 $-1.60 \sim -1.50 \text{ V}$ (相对于 Cu/饱和 CuSO_4) 范围内波动。

c. 在整个脱氯试验周期内,回路电流整体呈下降趋势。水灰比越大的试件,在脱氯试验中的回路电流越大,但在脱氯试验后期,不同水灰比试件的回路电流相差不大。

d. 经脱氯试验后,混凝土内 OH^- 浓度显著增加,水灰比越大的试件,混凝土内的 OH^- 浓度的增幅越小, $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$ 的比值越低,表明钝化恢复效果越明显。

e. 脱氯处理后,混凝土中 C-S-H 凝胶和 Friedel's 盐的含量略微降低,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量略微增加,试件内的 AFt 和 C-S-H 凝胶少量分解。

参考文献:

- [1] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2 版. 北京: 科学出版社,2014.
- [2] 蒋林华,白舒雅,徐金霞,等. 钢筋锈蚀氯离子临界浓度研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):77-82. (JIANG Linhua, BAI Shuya, XU Jinxia, et al. Review on research of threshold chloride concentration of reinforcing steel corrosion in concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):77-82. (in Chinese)).
- [3] 葛燕,朱锡昶. 氯化物环境钢筋混凝土的腐蚀和牺牲阳

- 极保护[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(4): 67-70. (GE Yan, ZHU Xichang. Corrosion and sacrificial anode cathodic protection of reinforced concrete in chloride environment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(4): 67-70. (in Chinese)).
- [4] LIN Hui, LI Yue, LI Yaqiang. A study on the deterioration of interfacial bonding properties of chloride-contaminated reinforced concrete after electrochemical chloride extraction treatment [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 228-240.
- [5] ZHANG Qin, GONG Jinxin. Study on seismic behavior of reinforced concrete columns after ECE treatment [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 549-559.
- [6] 李森林, 朱雅仙, 杨吴礼, 等. 便于安装和更换的钢筋混凝土氯离子定向吸收装置及方法: 201410280899. 7 [P]. 2017-01-18.
- [7] 奚圣海, 李森林, 刘云飞, 等. 牺牲阳极方式电化学脱盐效率影响因素[J]. 水运工程, 2015, 502(4): 46-49. (XI Shenghai, LI Senlin, LIU Yunfei, et al. Factors influencing efficiency of electrochemical chloride extraction by sacrificial anode [J]. Port & Waterway Engineering, 2015, 502(4): 46-49. (in Chinese))
- [8] SARASWATHY V, LEE H S, KARTHICK S, et al. Extraction of chloride from chloride contaminated concrete through electrochemical method using different anodes [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 549-562.
- [9] 屈锋, 侯海龙, 胡松, 等. 冻融循环作用后钢筋混凝土电化学除氯效果研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2): 347-353. (QU Feng, HOU Hailong, HU Song, et al. Study on electrochemical chloride extraction effect of reinforced concrete after freeze-thaw cycle [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 347-353. (in Chinese))
- [10] 屈锋, 孙浩然, 雷智昊, 等. 不同因素下钢筋混凝土电化学除氯效率研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(5): 515-520. (QU Feng, SUN Haoran, LEI Zhihao, et al. Effect of several processing factors on electrochemical dechlorination efficiency of reinforced concrete [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(5): 515-520. (in Chinese))
- [11] 叶国林. 矿物掺合料对混凝土电化学除氯效果及性能的影响研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
- [12] DE ALMEIDA SOUZA L R, DE MEDEIROS M H F, PEREIRA E, et al. Electrochemical chloride extraction: efficiency and impact on concrete containing 1% of NaCl [J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 435-444.
- [13] 李树鹏, 金祖权, 熊传胜. 钢筋混凝土电化学除氯技术研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 25-33. (LI Shupeng, JIN Zuquan, XIONG Chuansheng. Research status of electrochemical chloride extraction technology of reinforced concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(1): 25-33. (in Chinese))
- [14] 刘涛, 储洪强, 朱正宇, 等. 脉冲参数对电化学脱盐效率及离子分布的影响[J]. 混凝土, 2018(12): 18-22. (LIU Tao, CHU Hongqiang, ZHU Zhengyu, et al. Effects of pulse parameters on electrochemical chloride removal efficiency and ions distribution [J]. Concrete, 2018(12): 18-22. (in Chinese))
- [15] YU Haiyan, SHI Shengjiao, Xu Rui, et al. Study on the removal mechanism of chemically bonded chloride ions in concrete under electric field [J]. Ferroelectrics, 2019, 549(1): 126-136.
- [16] 董泽华, 罗颖, 易宜君. 钢筋混凝土在线腐蚀监测中护环电极智能约束研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 247-249. (DONG Zehua, LUO Ying, YI Yijun. Smart confinement of guard ring electrode technique for online monitoring of corrosion of reinforced concrete [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(3): 247-249. (in Chinese))
- [17] DU Fengyin, JIN Zuquan, ZHAO Tiejun, et al. Electrochemical chloride extraction from corrosion-resistant steel bar-reinforced concrete [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(7): 7076-7094.
- [18] 郑靓, 韦江雄, 余其俊, 等. 电化学除盐中混凝土内氯离子的迁移特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(2): 42-45. (ZHENG Liang, WEI Jiangxiong, YU Qijun, et al. Research of the chloride ion migration in concrete during electrochemical chloride extraction [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(2): 42-45. (in Chinese))
- [19] 曹鹏飞, 秦鸿根, 孙伟. 矿物掺合料对混凝土中钢筋去钝化阈值的影响[C]. 第十届全国水泥和混凝土化学及应用技术会议论文摘要集. 北京: 中国硅酸盐学会, 2007.
- [20] 杨楠仁, 岳文华. 无机非金属材料图集手册[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2001.
- [21] HERRERA J C O, ESCADEILLAS G, ARLIGUIE G. Electrochemical chloride extraction: influence of C3A of the cement on treatment efficiency [J]. Cement & Concrete Research, 2006, 36(10): 1939-1946.
- [22] MICHEL M, GEORGIN J F, AMBROISE J. Improving the mechanical performance of high-grade slag cement by the addition of Portland cement and sulfoaluminate cement [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37(37): 291-300.
- [23] 叶国林. 矿物掺合料对混凝土电化学除氯效果及性能的影响研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.

(收稿日期: 2024-03-18 编辑: 雷燕)