

文章编号:1007-9629(2021)06-1322-06

海水拌制珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的锈蚀速率

冯兴国^{1,2}, 卢潇^{1,2}, 卢向雨^{1,2}, 杨雅师³, 罗锋^{1,2}

(1.河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室,江苏南京210098;

2.河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京210098;

3.皖江工学院水利工程学院,安徽马鞍山243000)

摘要:为探究不锈钢钢筋珊瑚混凝土的长期耐蚀性,采用线性极化、交流阻抗、极化曲线等方法,研究了珊瑚混凝土中304、2205不锈钢钢筋在3.5% NaCl溶液中750 d的锈蚀电流密度,并与强度等级相当的普通混凝土中碳钢钢筋进行对比.结果表明:珊瑚混凝土中不锈钢钢筋锈蚀电流密度始终低于 $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,750 d后不锈钢钢筋仍处于钝化状态,其中2205不锈钢钢筋的锈蚀电流密度更低;普通混凝土中碳钢钢筋腐蚀电流密度始终维持在珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的10倍以上,750 d时碳钢钢筋发生了明显锈蚀;线性极化法测量的钢筋锈蚀状态与实际观察结果吻合较好,更适用于测量混凝土中钢筋锈蚀状态.

关键词:珊瑚混凝土;不锈钢钢筋;锈蚀速率;线性极化;交流阻抗

中图分类号: TU511.3

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.026

Corrosion Rate of Stainless Steel Rebar in Coral Concrete Prepared with Seawater

FENG Xingguo^{1,2}, LU Xiao^{1,2}, LU Xiangyu^{1,2}, YANG Yashi³, LUO Feng^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy Engineering,

Wanjiang University of Technology, Maanshan 243000, China)

Abstract: For investigating the long-term corrosion resistance of stainless steel rebar in coral concrete, the corrosion current densities of stainless steel rebar type 304 and 2205 were measured by applying the linear polarization resistance, electrochemical impedance spectroscopy, and polarization curve methods in the coral concrete in 3.5% NaCl solution for 750 days. Simultaneously, the corrosion current density was compared to that of the carbon steel in the similar strength grade of ordinary concrete. The results suggest that the corrosion current density of the stainless steel rebar is lower than $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, and maintained passivation in the coral concrete after 750 days in 3.5% NaCl solution. In comparison, the corrosion current density of stainless steel rebar type 2205 is lower than that of the 304 counterparts. Moreover, the corrosion current density of the carbon steel rebar is 10 times higher than that of the stainless steel rebar with the result that the former samples are severely corroded. In general, the corrosion state calculated from the linear polarization resistance is most consistent with the observed. Therefore, the linear polarization resistance method is proposed to test the corrosion rate of rebar in concrete.

收稿日期:2020-07-12; 修订日期:2020-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51601074);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(B200202058)

第一作者:冯兴国(1983—),男,重庆垫江人,河海大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: fengxingguo@hhu.edu.cn

通讯作者:卢向雨(1984—),女,河北唐山人,河海大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: luxiangyu@hhu.edu.cn

Key words: coral concrete; stainless steel rebar; corrosion rate; linear polarization; electrochemical impedance spectroscopy

中国南海分布着数千座珊瑚岛礁^[1-2],随着海洋开发推进,要在这些远离大陆的岛礁修建大量建筑结构.岛礁建设若采用传统钢筋混凝土结构则需从陆地运输砂石骨料,费用高昂且转运周期长^[3].而因地制宜以珊瑚碎屑为骨料制备钢筋混凝土结构可降低工程造价,提高建设效率^[3].

珊瑚混凝土中Cl⁻等离子易诱发钢筋锈蚀,部分学者认为其不宜制备钢筋混凝土结构^[4].Kakooei等^[4]对比了相同强度等级珊瑚混凝土和普通混凝土中钢筋锈蚀速率,发现珊瑚混凝土中钢筋锈蚀速率仅为普通混凝土中2倍左右.鉴于不锈钢钢筋耐蚀性明显优于碳钢钢筋,其锈蚀速率仅为碳钢钢筋的1/10~1/1 000^[5-6].可预计珊瑚混凝土中不锈钢钢筋锈蚀速率将显著低于普通混凝土中碳钢钢筋锈蚀速率,其结构具有良好耐蚀性^[5-6].冯兴国等^[7-8]初步研究了不锈钢钢筋在珊瑚混凝土中的短期耐蚀性,发现珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的锈蚀速率还不到相同强度等级普通混凝土中碳钢钢筋的1/100;且珊瑚混凝土强度对2205不锈钢钢筋锈蚀速率的影响较小.总体而言,目前关于不锈钢钢筋珊瑚混凝土耐蚀性的研究较少^[7-8],且现有研究试验周期较短.

本文对海水拌制珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的锈蚀电流密度进行了750 d的测量,并将其与相同强度

等级的普通混凝土中碳钢钢筋锈蚀电流密度进行对比,研究结果对远洋岛礁工程中不锈钢钢筋珊瑚混凝土结构耐久性设计具有借鉴意义.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

钢筋采用 $\phi 10 \times 60$ mm的光圆碳钢钢筋、304奥氏体不锈钢钢筋、2205双相不锈钢钢筋,用800#砂纸打磨钢筋,并采用丙酮除油,在钢筋的一端焊上铜导线以便后续电化学测试,并用硅胶密封焊接头.采用粒径在0.8~2.0 cm的珊瑚碎屑作为粗骨料,粒径小于0.3 cm的珊瑚碎屑作为细骨料,3.5% (质量分数)的NaCl溶液作为模拟海水,利用珊瑚碎屑和模拟海水拌制珊瑚混凝土CWC.采用粒径在1.0~2.0 cm的天然碎石作为粗骨料,细度模数2.5的河砂作为细骨料,利用自来水拌和普通混凝土OC.珊瑚混凝土和普通混凝土的配合比如表1所示.珊瑚混凝土和普通混凝土的28 d立方体抗压强度分别为 (28.7 ± 2.9) 、 (34.9 ± 2.7) MPa,可认为2种混凝土的强度等级相当.为比较珊瑚混凝土和普通混凝土中钢筋的耐蚀性,将2种不锈钢钢筋埋置于珊瑚混凝土内,碳钢钢筋埋置于普通混凝土内.

表1 珊瑚混凝土和普通混凝土的配合比

Table 1 Mix proportion of coral concrete and ordinary concrete

Concrete	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				m_w/m_c
	Cement	Coarse aggregate	Fine aggregate	Solution	
CWC	440	647	453	261	0.59
OC	440	1 243	532	185	0.42

制备的钢筋混凝土试件如图1所示,钢筋埋置在 $\phi 100 \times 80$ mm的混凝土试件中心处,混凝土浇筑24 h后脱模,并将其浸泡在3.5% NaCl溶液中.每组5个平行试件.为方便表述,采用CS-OC表示普通混凝土中埋置碳钢钢筋试件,304SS-CWC表示珊瑚混凝土中埋置304不锈钢钢筋试件,2205SS-CWC表示珊瑚混凝土中埋置2205不锈钢钢筋试件.

1.2 测试方法

采用CS350 (武汉科思特)工作站进行电化学测试,测试时采用三电极体系,即钢筋试件为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为辅助电

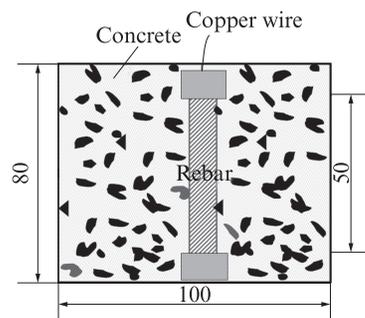


图1 钢筋混凝土试件示意图

Fig. 1 Illustration of reinforced concrete specimen (size: mm)

极,对各钢筋试件进行线性极化、交流阻抗(EIS)和极化曲线等测试.在开路电位 ± 15 mV的范围内以 10 mV/min的速率进行线性极化测量,利用CVIEW2软件计算极化电阻;利用扰动幅值为 10 mV的信号在 $10^5 \sim 10^{-2}$ Hz范围内测量钢筋的交流阻抗;当钢筋混凝土试件在 3.5% NaCl溶液中浸泡 750 d后进行极化曲线测试,测试范围在锈蚀电位以下 200 mV至锈蚀电位以上 1000 mV,扫描速率为 1 mV/s.在浸泡 750 d后剖开 2 种混凝土保护层,观察 3 种钢筋的锈蚀状态.

2 结果与讨论

2.1 线性极化

线性极化法广泛用于混凝土结构中钢筋锈蚀速率的测量.本研究中钢筋混凝土试件在 3.5% NaCl溶液中浸泡不同时间后,通过线性极化法测量混凝土中钢筋的极化电阻(R_p),结果如图2所示.由图2可以看出:在浸泡初期(100 d以内), R_p 明显下降,这可能是因为混凝土未充分发生水化反应导致其孔隙率较高,溶液中的 Cl^- 快速渗透至钢筋/混凝土界面并使钢筋钝化性能降低^[9];随着浸泡时间的延长,混凝土完成水化反应,保护层孔隙率大幅下降,溶液中的 Cl^- 向混凝土内部的迁移受阻;且水化产物可将前期进入混凝土中的部分游离态 Cl^- 转变为化合态,加之水化反应生成的 $Ca(OH)_2$ 可提高钢筋/混凝土界面pH值,进而促进混凝土中钢筋完成钝化^[10],因此在 $100 \sim 300$ d之间,各试件钢筋极化电阻 R_p 处于相对稳定阶段;随着浸泡时间进一步延长,在 300 d后各试件中钢筋极化电阻 R_p 均有所增加.由图2还可看出,珊瑚混凝土中 2 种不锈钢钢筋的极化电阻相近, 2205 不锈钢钢筋的 R_p 略高于 304 不锈钢钢筋,两者 R_p 都明显高于强度等级相当的普通混凝土中碳钢

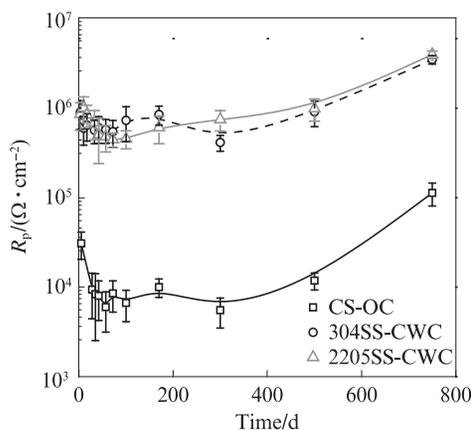


图2 混凝土中钢筋的极化电阻

Fig. 2 Polarization resistance of steel reinforcement in concrete

钢筋.表明珊瑚混凝土中不锈钢钢筋耐蚀性明显优于强度等级相当的普通混凝土中碳钢钢筋耐蚀性.

按照式(1)计算混凝土中钢筋的锈蚀电流密度(i_{corr})^[11-12],结果见图3.

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

式中: B 为常数,对于钝化状态的钢筋 B 取 52 mV,对于已脱钝状态的钢筋 B 取 26 mV^[11].本研究采用 3.5% NaCl溶液拌制珊瑚混凝土,采用自来水拌制普通混凝土,且制备的钢筋混凝土均浸泡在 3.5% NaCl溶液中,故珊瑚混凝土中的 2 种不锈钢钢筋和普通混凝土中的碳钢钢筋均为已脱钝状态,对应的 B 值取 26 mV^[11-12].

由图3可见,海水拌制珊瑚混凝土中 304 、 2205 不锈钢钢筋的锈蚀电流密度均低于 0.10 $\mu A/cm^2$,且随着浸泡时间的延长其锈蚀电流密度进一步降低,在 750 d后甚至低于 0.01 $\mu A/cm^2$;而普通混凝土中碳钢钢筋锈蚀电流密度在浸泡初期迅速上升,超过 1.00 $\mu A/cm^2$,在 750 d后降至 0.23 $\mu A/cm^2$.此外,普通混凝土中碳钢钢筋腐蚀电流密度始终维持在珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的 10 倍以上.

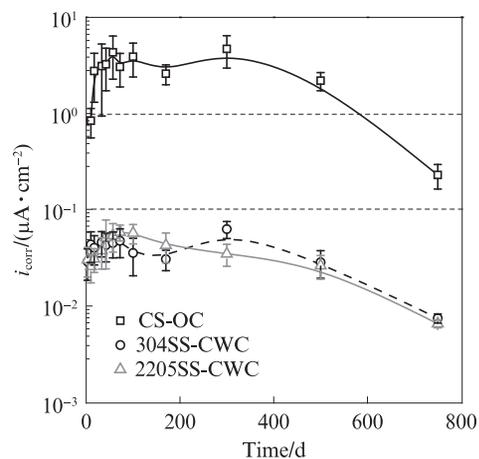


图3 线性极化法所得混凝土中钢筋腐蚀电流密度
Fig. 3 Corrosion current density of rebar in concrete calculated from linear polarization resistance

根据 Otieno 等^[13-14]的研究,混凝土中钢筋锈蚀电流密度可划分为 4 个等级:钝化($i_{corr} < 0.1$ $\mu A/cm^2$)、低速锈蚀(0.1 $\mu A/cm^2 \leq i_{corr} < 0.5$ $\mu A/cm^2$)、中等速率锈蚀(0.5 $\mu A/cm^2 \leq i_{corr} < 1.0$ $\mu A/cm^2$)、高速锈蚀($i_{corr} \geq 1.0$ $\mu A/cm^2$).对照该标准可发现,本研究中,珊瑚混凝土中 2 种不锈钢钢筋均处于钝化状态,普通混凝土中碳钢钢筋则长期处于高速锈蚀状态,在 750 d后才逐步下降至低速锈蚀状态.这表明 304 、 2205 不锈钢钢筋在海水拌制珊瑚混凝土中具有良好的耐蚀性,可满足相关海工结构的耐久性要求.

2.2 交流阻抗

钢筋混凝土试件在3.5% NaCl溶液中浸泡34、170、300、750 d后进行交流阻抗测试,结果如图4所示.由图4可见:混凝土中钢筋的Nyquist谱呈现2个

容抗弧;珊瑚混凝土中304和2205不锈钢钢筋的容抗弧半径明显大于普通混凝土中碳钢钢筋的容抗弧半径,再次表明珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的耐蚀性明显优于普通混凝土中碳钢钢筋.

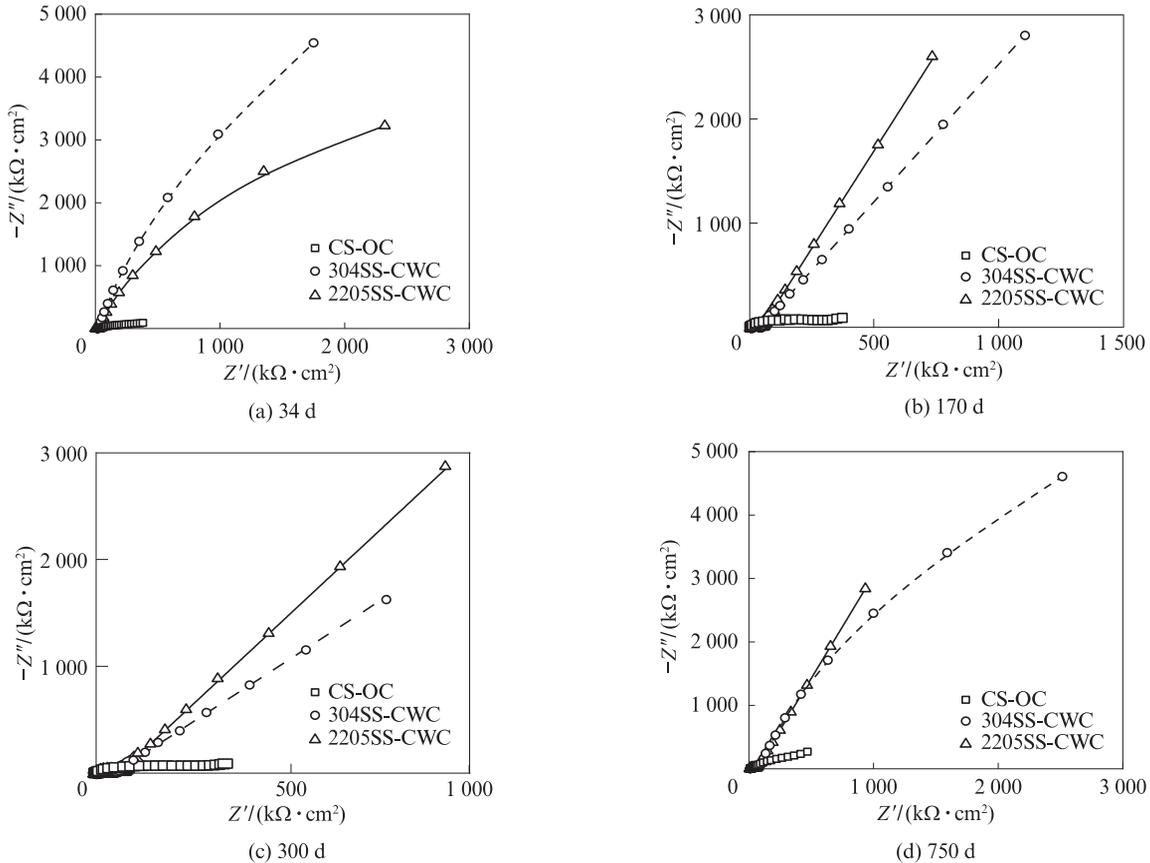


图4 钢筋混凝土试件的交流阻抗谱
Fig. 4 EIS of steel rebar in concrete

用等效电路(见图5)对交流阻抗谱进行拟合.图中 R_s 表示溶液电阻; R_{con} 、 Q_{con} 分别表示混凝土电阻和混凝土电容; R_{ct} 和 Q_{ct} 分别表示钢筋/混凝土的界面电阻和界面电容^[15-16].

阻.再次证明珊瑚混凝土中不锈钢钢筋的耐蚀性明显优于普通混凝土中碳钢钢筋.

参照式(1),根据 R_{ct} 计算混凝土中钢筋锈蚀电流密度,其中 B 取26 mV,结果也列于表2.由表2可见:普通混凝土中碳钢钢筋的锈蚀电流密度比珊瑚混凝土中不锈钢钢筋锈蚀电流密度约高1个数量级;珊瑚混凝土中2种不锈钢钢筋的锈蚀电流密度相差不大;随着浸泡时间的延长,300、750 d时的2205不锈钢钢筋的锈蚀电流密度略低于304不锈钢钢筋,表明2205不锈钢钢筋在珊瑚混凝土中的长期耐蚀性略优,这与线性极化测试结果吻合.对照Otieno等^[13-14]的钢筋锈蚀电流密度划分标准可发现,普通混凝土中碳钢钢筋、海水拌制珊瑚混凝土中304、2205不锈钢钢筋均维持在钝化状态,这与线性极化测试结果有差异.

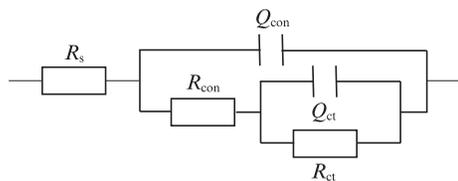


图5 等效电路图
Fig. 5 Equivalent circuit diagram

拟合所得的混凝土电阻(R_{con})和钢筋混凝土界面电阻(R_{ct})如表2所示,由表2可见:普通混凝土的电阻(R_{con})明显高于珊瑚混凝土的电阻,这可能与珊瑚骨料的高孔隙率有关;不锈钢钢筋/珊瑚混凝土的界面电阻明显高于碳钢钢筋/普通混凝土的界面电

2.3 极化曲线

钢筋混凝土试件在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后进行极化曲线测试,结果如图6所示.由图6可见,

表2 EIS法所得混凝土电阻、钢筋/混凝土界面电阻和钢筋锈蚀电流密度

Table 2 R_{con} , R_{ct} and i_{corr} calculated from EIS

Specimen	$R_{con} / (k\Omega \cdot cm^2)$				$R_{ct} / (k\Omega \cdot cm^2)$				$i_{corr} / (\mu A \cdot cm^{-2})$			
	34 d	170 d	300 d	750 d	34 d	170 d	300 d	750 d	34 d	170 d	300 d	750 d
CS-OC	52.43	70.07	69.33	77.18	2 641.00	765.21	375.73	277.72	0.009 80	0.033 98	0.069 20	0.093 63
304SS-CWC	28.04	43.17	58.87	66.71	42 610.00	3 617.00	2 039.00	6 808.00	0.000 61	0.007 19	0.012 75	0.003 82
2205SS-CWC	24.06	38.66	55.23	43.10	10 940.00	2 874.00	4 479.00	16 150.00	0.002 38	0.009 05	0.005 80	0.001 61

普通混凝土中碳钢钢筋试样的锈蚀电位最低,其次是珊瑚混凝土中的304不锈钢钢筋,珊瑚混凝土中2205不锈钢钢筋的锈蚀电位最高。

根据极化曲线计算钢筋锈蚀电流密度如图7所示。由图7可见,在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后,普通混凝土中碳钢钢筋和珊瑚混凝土中304、2205不锈钢钢筋的锈蚀电流密度均低于 $0.10 \mu A/cm^2$,处于钝化状态^[13-14]。极化曲线测试结果与交流阻抗测试结果吻合较好,与线性极化测试结果有差异。

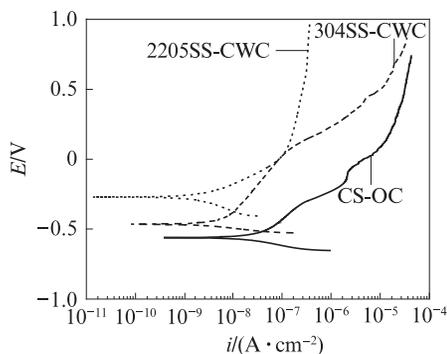


图6 钢筋混凝土试件在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves of specimens after immersion in 3.5% NaCl solution for 750 d

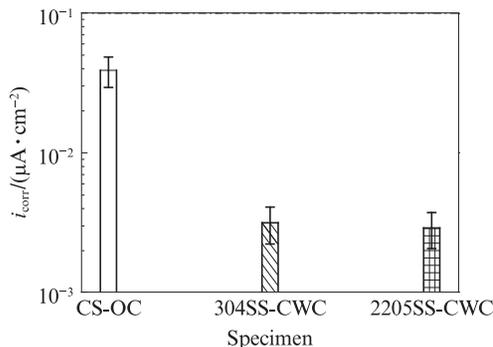


图7 极化曲线法所得钢筋锈蚀电流密度

Fig. 7 Corrosion current density of rebar calculated from polarization curves

2.4 钢筋锈蚀状态

在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后,剖开普通混凝土和珊瑚混凝土保护层,观察碳钢钢筋和304、2205不锈钢钢筋的锈蚀状态,如图8所示。由图8可

以看出:普通混凝土中碳钢钢筋在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后出现了明显的锈蚀,这与线性极化法的测试结果吻合较好,而与交流阻抗和极化曲线法所测量结果明显不符。Poursaei^[17]系统对比了半电池法、交流阻抗、线性极化、恒电流脉冲等方法测量的混凝土中钢筋锈蚀信息,并将其与锈蚀失重法测量结果进行对比,发现线性极化法与锈蚀失重法测量的锈蚀状态最为接近。从测试原理上讲,线性极化法和交流阻抗法均属无损检测技术,但交流阻抗测试更易受外界环境干扰,且其求解锈蚀电流密度的过程繁杂,比线性极化法更容易引入误差;而极化曲线法是一种破坏性测试手段,其测试过程中的强极化也容易引入较大误差。由图8还可看出,海水拌制珊瑚混凝土中304、2205不锈钢钢筋均未出现明显的锈迹,与上述3种电化学方法测量结果均吻合,表明不锈钢钢筋珊瑚混凝土结构具有良好的耐蚀性。

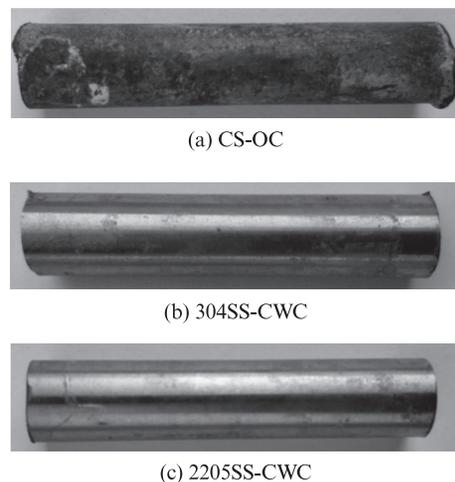


图8 钢筋在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后的锈蚀状态

Fig. 8 Corrosion state of rebar after immersion in 3.5% NaCl solution for 750 d

3 结论

(1)海水拌制珊瑚混凝土中304不锈钢钢筋和2205不锈钢钢筋在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后其锈蚀电流密度不足 $0.01 \mu A/cm^2$,均处于钝化状态,表明不锈钢钢筋珊瑚混凝土具有良好的耐蚀性。

相对于304不锈钢钢筋,2205不锈钢钢筋的锈蚀电流密度更低,即海水拌制珊瑚混凝土中2205不锈钢钢筋的耐蚀性更佳。

(2)在混凝土强度等级相当条件下,普通混凝土中碳钢钢筋在3.5% NaCl溶液中浸泡750 d后,其表面出现明显锈蚀,线性极化、交流阻抗和极化曲线的测试结果均表明其腐蚀电流密度比海水拌制珊瑚混凝土中不锈钢钢筋约高1个数量级。

(3)将线性极化、交流阻抗和极化曲线法测得的钢筋锈蚀电流密度与实际观察到的钢筋锈蚀状态进行对比可知,线性极化法测量的锈蚀状态与实际观察结果最为接近,因此,线性极化法更适用于测量混凝土结构中钢筋的锈蚀状态。

参考文献:

- [1] 赵艳林,韩超,张栓柱,等.海水拌养珊瑚混凝土抗压龄期强度试验研究[J].混凝土,2011(2):43-45.
ZHAO Yanlin, HAN Chao, ZHANG Shuanzhu, et al. Experimental study on the compression age strength of seawater coral concrete[J]. Concrete, 2011(2):43-45. (in Chinese)
- [2] WANG Q K, LI P, TIAN Y P, et al. Mechanical properties and microstructure of Portland cement concrete prepared with coral reef sand[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2016, 31(5):996-1001.
- [3] WANG A G, LYU B C, ZHANG Z H, et al. The development of coral concretes and their upgrading technologies: A critical review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:1004-1019.
- [4] KAKOOEI S, AKIL H M, DOLATI A, et al. The corrosion investigation of rebar embedded in the fibers reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35(10):564-570.
- [5] 陈龙,瞿彧,汤雁冰,等.2种不锈钢钢筋在混凝土孔隙中的钝化行为[J].材料保护,2013,46(10):58-59,62.
CHEN Long, QU Yu, TANG Yanbing, et al. Passivation behavior of two kinds of stainless steel reinforcing bars in simulated concrete pore solution[J]. Journal of Materials Protection, 2013, 46(10):58-59, 62. (in Chinese)
- [6] PÉREZ-QUIROZ J T, TERÁN J, HERRERA M J, et al. Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(11):1317-1324.
- [7] 冯兴国,石锐龙,徐逸文,等.不锈钢钢筋在珊瑚混凝土中的耐蚀性研究[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会.舟山:海洋出版社,2017:736-740.
FENG Xingguo, SHI Ruilong, XU Yiwen, et al. Corrosion resistance of stainless steel rebar in coral concrete [C]//Proceedings of the 18th China Ocean (Shore) Engineering Symposium. Zhoushan: China Ocean Press, 2017:736-740. (in Chinese)
- [8] FENG X G, ZHANG L Y, ZHANG J, et al. Effect of aluminum tri-polyphosphate on corrosion behavior of reinforcing steel in seawater prepared coral concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2019, 34(4):906-913.
- [9] CHEN X D, WU S X. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38:804-812.
- [10] CHEN D, LIAO Y D, JIANG C H, et al. The mechanical properties of coastal soil treated with cement [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 28(6):1155-1160.
- [11] WU Z Y, YU H F, MA H Y, et al. Rebar corrosion in coral aggregate concrete: Determination of chloride threshold by LPR[J]. Corrosion Science, 2020,163:108238.
- [12] POUR-GHAZ M, BURKAN ISGOR O, GHODS P. The effect of temperature on the corrosion of steel in concrete. Part 2: Model verification and parametric study [J]. Corrosion Science, 2009, 51(2):426-433.
- [13] OTIENO M, BEUSHAUSEN H, ALEXANDER M. Prediction of corrosion rate in reinforced concrete structures - A critical review and preliminary results[J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(9):777-790.
- [14] BROOMFIELD J P, RODRIGUEZ J, ORTEGA L M, et al. Corrosion rate measurements in reinforced concrete structures by a linear polarization device [C]//Symposium on Corrosion of Steel in Concrete. Minneapolis:[s.n.], 1994. 163-181.
- [15] 冯兴国,卢向雨,陈达,等.拉应力和压应力对砂浆中钢筋腐蚀的影响[J].建筑材料学报,2015,18(4):640-646.
FENG Xingguo, LU Xiangyu, CHEN Da, et al. Corrosion behavior of reinforcing steel bars in mortar under tensile and compressive stresses [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4):640-646. (in Chinese)
- [16] FENG X G, YAN Q X, LU X Y, et al. Protection performance of the submerged sacrificial anode on the steel reinforcement in the conductive carbon fiber mortar column in splash zones of marine environments [J]. Corrosion Science, 2020, 174:108818.
- [17] POURSAAE A. Corrosion measurement techniques in steel reinforced concrete [J]. Journal of ASTM International, 2011, 8(5):JAI103283(1-15).