● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3211

400 MPa 级 Cr–Mo 合金化耐蚀钢筋在氯盐环境下的腐蚀行为

黄吉祥[1],李 霈[1],袁 静[1,3],雷 霆[2],阴树标[1]

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 昆明冶金高等专科学校 冶金与矿业学院, 云南 安宁 650300; 3. 新余钢铁股份有限公司,江西 新余 338000)

摘 要: 通过周浸腐蚀实验和电化学实验研究了一种 400 MPa 级 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋 HRB400cE 和普通碳素钢筋 HRB400E 在中性氯盐环境中的耐腐蚀性能,利用钨灯丝扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)等手段分析了两种钢筋锈层的形貌和组成。结果显示,在 2%NaCl(质量分数)溶液中加速腐蚀后,400 MPa 级 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋相比普通碳素钢筋具有较好的耐氯离子腐蚀能力,腐蚀速率为普通钢筋的 67%。普通碳钢经过加速腐蚀后出现疏松结构的较厚锈层,而耐蚀钢筋则是多层致密结构的较薄锈层。相比 HRB400E 钢筋,HRB400cE 钢筋自腐蚀电位及自腐蚀电流更低,具有较小的电化学腐蚀速率,在不同浓度氯盐环境中体现了良好的耐腐蚀性能。

关键词:耐蚀钢筋;氯盐环境;电化学;腐蚀行为

中图分类号: TG174.3+6; TB37 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2024)07-0687-07

Corrosion Behavior of 400 MPa Cr–Mo Alloyed Corrosion Resistant Rebars in a Chloride Environment

HUANG Jixiang[1], LI Pei[1], YUAN Jing[1,3], LEI Ting[2], YIN Shubiao[1]

(1. Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Metallurgy and Mining College, Kunming Metallurgy College, Anning 650300, China; 3. Xinyu Iron & Steel Co., Ltd., Xinyu 338000, China)

Abstract: The corrosion resistance of a 400 MPa Cr-Mo alloyed corrosion-resistant HRB400cE steel bar and an ordinary HRB400E carbon steel bar in a neutral chloride environment was studied through weekly immersion corrosion experiments and electrochemical experiments. The morphology and composition of the rebar rust layer were analysed by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The results show that after accelerated corrosion in a 2 wt. %NaCl solution, the new chromium-alloyed corrosion-resistant rebar has better resistance to chloride ion corrosion than ordinary carbon rebar, and the corrosion rate in the alternate immersion test is 67% of that of ordinary rebar. After accelerated corrosion, the ordinary carbon rebar exhibits a thicker rust layer with a loose structure, while the chromium-alloyed corrosion-resistant rebar exhibits a thinner rust layer with a multilayer dense structure. Compared to the HRB400 rebar, the HRB400cE rebar has a higher corrosion potential, lower self-corrosion current, and lower electrochemical corrosion rate, exhibiting good corrosion resistance in environments with different chloride concentrations.

Key words: corrosion-resistant rebar; chloride environment; electrochemistry; corrosion behavior

钢筋因价格低廉,力学性能良好及质量稳定等特点,被广泛应用于钢筋混凝土结构中。自 2012 年以来, 建筑用钢需求一直在国内钢材市场占据第一,其采购占比是钢材贸易的 55%左右。但是随着钢筋混凝土构件使用期限的增长, 钢材的耐久性问题也更加突出。钢筋的腐蚀往往会引起钢筋混凝土结构的损坏, 腐蚀所引起的裂缝或破坏会影响整体结构的正常使用,不但导致了资源的损耗浪费,甚至

收稿日期: 2023-08-13

作者简介: 黄吉祥,1995 年生,硕士生. 研究方向为耐腐蚀钢筋. Email: 2197144154@qq.com

通讯作者: 阴树标,1977 年生,博士,副教授. 研究方向为高性能钢铁材料. Email: 278912571@qq.com

引用格式: 黄吉祥,李霈,袁静,雷霆,阴树标. 400 MPa 级 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋在氯盐环境下的腐蚀行为[J]. 铸造技术,2024, 45(7): 687-693.

HUANG J X, LI P, YUAN J, LEI T, YIN S B. Corrosion behavior of 400 MPa Cr-Mo alloyed corrosion resistant rebars in a chloride environment[J]. Foundry Technology, 2024, 45(7): 687-693.

会危及到人的生命财产安全[1]。氯盐腐蚀是导致常规混凝土结构中钢筋服役寿命缩短的主要原因,氯离子会通过混凝土表面小孔或微裂纹渗透到内部,使钢筋表面的钝化膜被破坏,进而导致内层钢筋被腐蚀,而疏松的腐蚀产物体积是铁的 2~6 倍,体积膨胀所累积的应力最终造成混凝土结构开裂破坏[2]。华南地区码头建筑的调查结果表明,超过 80% 的钢筋发生了严重程度及以上的锈蚀破坏,部分出现锈蚀破坏的码头距离建成的时间仅 5~10 年,钢筋锈蚀给我国基础设施及国民经济带来了较大损失[3],因此必须通过技术手段提高钢筋耐腐蚀能力。

为了延长钢筋混凝土结构的使用寿命,国内外已经采取了多种防治钢筋锈蚀的方法,包括采用缓蚀剂,在混凝土表面涂装保护涂层,阴极保护及开发耐蚀钢筋等手段[4]。传统防治钢筋锈蚀大多是从钢筋的外部条件入手,在不改变普通碳素钢筋基体的前提下,通过阻滞外界腐蚀物质侵蚀来保护钢筋免受锈蚀,这不仅工艺繁琐,同时还增加了建筑成本。相反,从钢筋锈蚀的内部原因考虑,提升钢筋自身抗腐蚀性能是解决钢筋锈蚀问题的长期有效方法。在提高普通碳钢的耐腐蚀性能方面,含铬元素的钢材具有更加致密的锈层,铬元素对提高钢的耐腐蚀性能作用明显[5]。Cr 相对于其他合金元素具有较高的性价比,因此在提高钢材耐腐蚀性方面备受研究人员的关注[6]。

我国对耐蚀钢筋的研发起步较晚,虽然已经开展了包括实海和实地环境中的试验研究,但目前耐蚀钢筋尚未被大量应用[7],因此急需研发出成本低廉、耐腐蚀性能优良的低合金耐腐蚀钢筋。本文针对这一需求,研发出一种具有良好耐蚀性能的 400 MPa 级 Cr-Mo 合金化耐腐蚀钢筋。通过周浸腐蚀实验和电化学实验,采用扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)等设备,对比分析了普通钢筋 HRB400E 与 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋 HRB400cE 在中性氯盐环境下的腐蚀行为,研究了钢筋锈层的宏观形貌和成分组成,探讨了普通碳素钢筋和 Cr 合金化耐蚀钢筋腐蚀性能差异。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

分别选用钢厂生产的 16 mm 普通钢筋HRB400E 和新研发的 400 MPa 级 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋 HRB400cE 为实验用钢,其化学成分如表 1 所示。2 种钢筋的基体显微组织如图 1 所示,HRB400E 主要是铁素体+珠光体组织,晶粒度评级为 12 级,而 HRB400cE 则主要是铁素体+珠光体+部分贝氏体,晶粒度评级为 13 级。HRB400cE 钢筋中除了加入 Cr 元素提高耐蚀性能外,还加入 Mo 元素促进晶粒细化,提高钢的淬透性,在合适的工艺下得到适当比例的贝氏体,既提高了钢筋耐蚀性能又保证了钢筋的力学性能[8]。珠光体相内具有高电位的渗碳体,因其与铁素体间较大的电位差而在晶粒间形成腐蚀微电池,导致不均匀腐蚀,而铁素体与贝氏体结构相对均匀,不易产生微电池,从而降低了晶间腐蚀[9]。因此,具有贝氏体组织的 HRB400cE 能够提高耐腐蚀性能。

1.2 实验方法

将 10 mm×10 mm×3 mm 的长方体方块,通过焊接导线制成工作面积为 1 cm^2 的电极试样,并使用环氧树脂密封其余非工作面。试样使用 180~5 000 目砂纸逐步打磨后进行抛光,然后依次使用蒸馏水和酒精溶液清洗。电化学测试在 CHI600E 型电化学工作站上进行,其中以试验钢筋作为工作电极,饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,铂电极作为辅助

表1 2种试验钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the two experimental rebals

(mass fraction/%)

Rebal	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni
HRB400E	0.20	0.40	1.20	0.023	0.018	-	-	-	-
HRB400cE	0.12	0.38	1.14	0.013	0.003	0.95~1.05	0.15~0.25	0.45~0.55	0.40~0.50

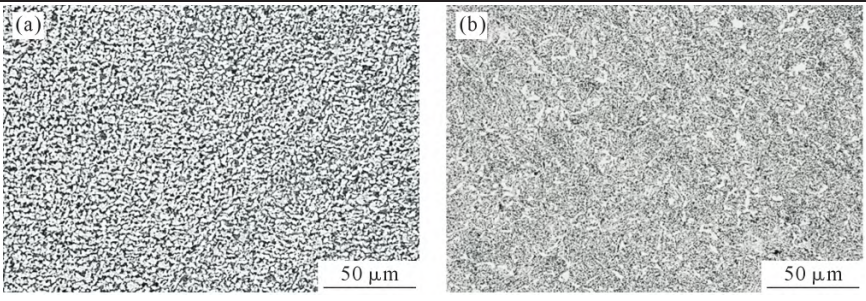


图 1 钢筋显微组织:(a) HRB400E; (b) HRB400cE
Fig.1 Microstructure of the rebals: (a) HRB400E; (b) HRB400cE

电极。实验介质是质量分数为 2%和 3.5%的 NaCl 溶液，实验温度 25 ℃，在进行极化曲线测试前先测试样品的开路电位，电极表面稳定后进行动电位极化实验，动电位极化曲线在 -1.2~1.0 V 范围扫描，扫描速率为 1 mV/s，电化学阻抗谱测试的频率范围为 0.01 Hz~100.00 kHz，测定结果利用 Zview 软件进行解析。

按照 YB/T 4367-2014《钢筋在氯离子环境中腐蚀试验方法》标准进行周浸腐蚀实验。试样为 ϕ9 mm×50 mm 的圆柱，采用质量分数 2%的中性 NaCl 溶液作为腐蚀溶液，试验温度为(45±2)℃，湿度为(70%±10%)RH。实验设定为 288 个循环周期，每个循环周期为 1 h，其中每个循环周期的浸泡时间为 12 min，干燥时间为 48 min。实验前对样品依次使用洗涤剂、蒸馏水和酒精溶液清洗并称量。实验过程中每天补充腐蚀液 1 次，实验结束后，先用机械方式去除带锈试样疏松锈层，然后在除锈液(500 mL 盐酸 +500 mL 蒸馏水+3.5 g 六次甲基四胺)中进行清洗，采用失重法计算腐蚀率。试样表面锈层形貌采用 VEGA-3SBH 型扫描电镜观察，锈层组成则采用 D/Max 2200 型 X 射线衍射仪进行分析。

2　实验结果及分析

2.1　腐蚀率曲线

图 2 展示了 2 种钢筋平均腐蚀率随实验周期变化散点图，并绘制了两者的拟合曲线。从图中可以看出，400 MPa 级 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋HRB400cE 试样的腐蚀率比普通钢筋 HRB400E 明显低。在实验

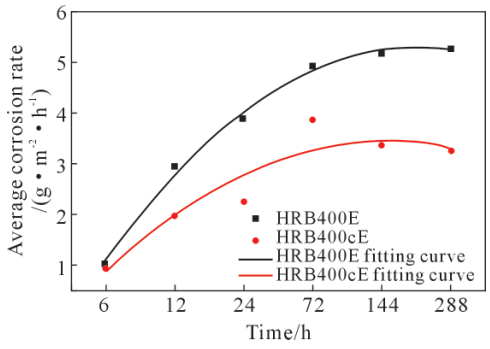


图 2　两种试验钢腐蚀率曲线

Fig.2　Corrosion rate curves of the two kinds of test rebals during alternate immersion corrosion tests

周期内，两种钢筋腐蚀率在 72 h 前具有较快的上升趋势，而 72 h 后腐蚀率趋势平缓，甚至HRB400cE 钢筋在 144 h 后出现腐蚀率下降的趋势。主要原因是含 Cr 钢筋在腐蚀过程中逐渐形成致密锈层，阻碍了阴离子侵蚀钢筋基体，从而导致后期腐蚀率降低。因此，相对普通钢筋，耐蚀钢筋在周浸腐蚀试验中表现出了良好的耐氯离子侵蚀性能，其平均腐蚀率相对普通钢筋为 67%，符合 GB/T 33953《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》要求。

2.2　腐蚀形貌

从图 3 可以看出，在周浸实验腐蚀后，随着循环周期的增加，HRB400E 和 HRB400cE 的腐蚀程度均逐渐加剧。HRB400E 试验钢筋锈层有明显的分层，表层容易剥落，144 h 后出现瘤状或溃疡状腐蚀，288 h 后锈层加厚，腐蚀程度进一步加剧，缺陷增多。相比之下，HRB400cE 试验钢筋在腐蚀 72 h 后，表面锈层为黑色基体与橙色铁锈相间状态，随着周

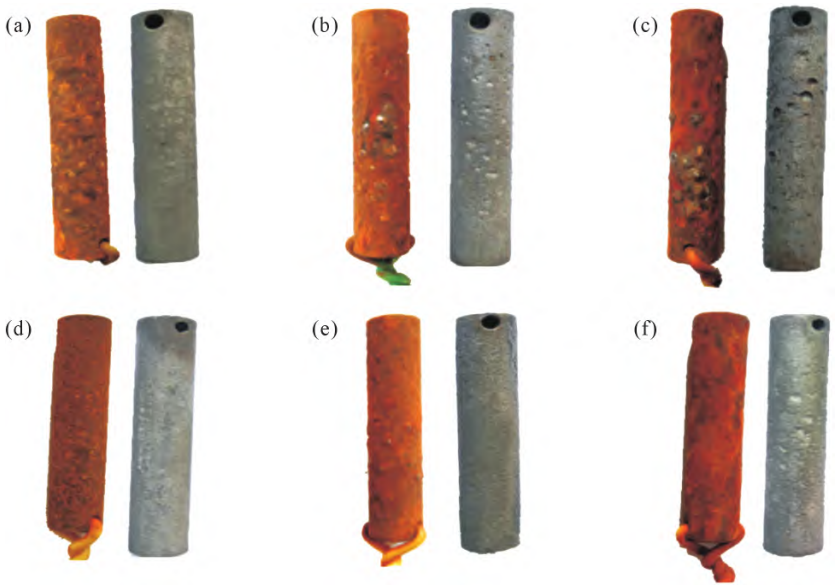


图 3　不同时间周浸腐蚀试验后两种试验钢在锈层清理前(左)后(右)的腐蚀形貌：(a) HRB400E, 72 h; (b) HRB400E, 144 h; (c) HRB400E, 288 h; (d) HRB400cE, 72 h; (e) HRB400cE, 144 h; (f) HRB400cE, 288h

Fig.3　Corrosion morphology of two test rebals before (the left) and after (the right) removal of rust after different durations of corrosion: (a) HRB400E, 72 h; (b) HRB400E, 144 h; (c) HRB400E, 288 h; (d) HRB400cE, 72 h; (e) HRB400cE, 144 h; (f) HRB400cE, 288h

期的增加，锈层中黑色基体部分逐渐被锈层覆盖，最后几乎被橙色锈层完全覆盖，腐蚀速率也趋于稳定。在对不同时刻周浸实验钢筋表面锈层清理后可见，普通钢筋腐蚀 72 h 出现蚀坑，局部腐蚀严重，腐蚀 144 和 288 h 后蚀坑纵向腐蚀明显，钢筋基体凹凸不平。Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋HRB400cE 表面均匀，腐蚀 288 h 后只出现零散分布的腐蚀坑，具有较好的耐腐蚀性能。含铬增强钢表现出比传统低碳增强钢更高的耐腐蚀性，这是由于在钝化阶段形成了更具保护性和稳定性的钝化膜，以及在腐蚀传播阶段出现更致密的腐蚀产物 [10]。此外耐蚀钢筋中的 Mo 元素在腐蚀过程中形成$Fe_2(MoO_4)_3$ 和 $CaMoO_4$ 等化合物，组成的致密保护膜也有效地防止了 Cl^- 离子入侵[11]。

为了更深入了解普通 HRB400E 钢和HRB400cE 钢的腐蚀产物情况，使用扫描电镜对两种钢锈层表面的微观形貌进行观察。如图 4 所示，两种钢筋在腐蚀 72 h 的锈层表面凹凸不平且覆盖不均匀，锈层整体较为疏松稀薄，表明腐蚀反应尚不充分，未形成大量腐蚀产物，这种不平整的锈层紧密性较差，对钢筋基体保护作用弱[12]。随着腐蚀周期进入 144 和 288 h，两种钢筋的锈层逐渐变得更为密实且覆盖均匀，能够更好地保护钢筋基体免受氯离子侵入腐蚀，而这也与中后期腐蚀速率降低的现象相吻合。相比较而言，HRB400E 表面存在裂纹且腐蚀产物颗粒大小不均，颗粒搭接不紧凑，导致氯离子可以通过这些通道进入基体，加速钢筋腐蚀。而 HRB400cE 腐蚀后的锈层形貌平整紧密，锈层致密度高，具有更好地阻止 O_2、氯离子等物质腐蚀钢筋基体的能力，可以很大程度阻滞和减缓基体的腐蚀拓展[13]。在长期腐蚀过程中，Cr 含量越高，锈层中裂纹和气孔的数量越少，锈层颗粒的尺寸越小，减少了腐蚀物质的扩散与侵蚀[14]。

以两种试验钢周浸腐蚀 288 h 为例，用扫描电镜对两者锈层横截面形貌进行观察，从图 5 可以看出，HRB400cE 截面锈层相对 HRB400E 更薄且致密，其平均锈层厚度为 370 μm，小于 HRB400E 的 534 μm 的平均锈层厚度。此外，HRB400E 钢筋基体由于锈层保护能力弱，导致腐蚀性氯离子沿着疏松通道进入钢筋基体[15]，造成钢筋基体出现较大面积的腐蚀坑，而 HRB400cE 钢筋锈层的致密性阻碍了侵蚀性离子的进入，基体仍然较为光滑。

2.3 锈层组成

利用 XRD 分析了试样在 288 h 周浸加速腐蚀后的锈层产物，如图 6 所示。铬含量 1.0%的耐蚀钢筋 HRB400cE 试样锈层主要物相为 Fe_3O_4、α-FeOOH 和 Cr_2O_3，而普通钢筋 HRB400E 试样的锈层主要物相为 Fe_2O_3、β-FeOOH。由于 α-FeOOH 具有优异的黏附性、致密性和低电化学活性而被认为在钢铁腐蚀过程具有保护作用[16-17]。在腐蚀过程中，耐蚀钢筋具有较高含量 α-FeOOH 能够增加附着于基体表面的致密锈层，降低基体的腐蚀速率。而普通钢筋中的 β-FeOOH 和 γ-FeOOH 都是钢的非保护性腐蚀产物[18]。此外，HRB400cE 中合金元素 Cr 以 Cr_2O_3 的形式参与钢钝化膜的形成，Cr^{3+} 的加入使锈的离子选择性由阴离子选择性转变为阳离子选择性，使 Cl^- 等腐

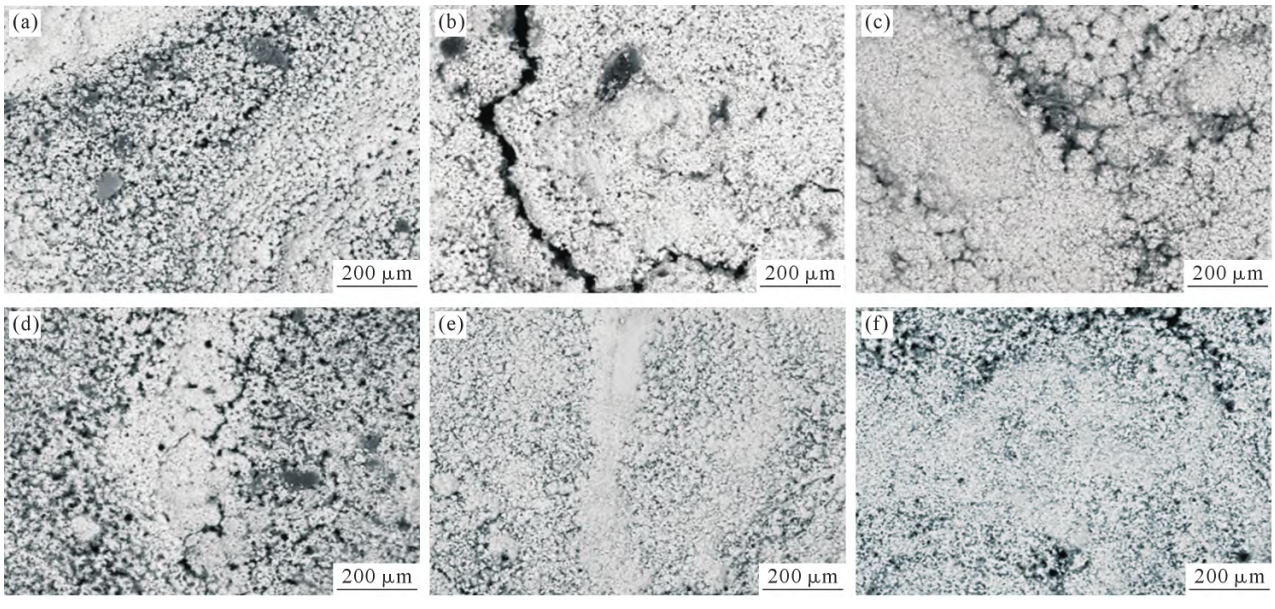


图 4 不同时间周浸腐蚀试验后两种试验钢锈层表面形貌：(a) HRB400E, 72 h; (b) HRB400E, 144 h; (c) HRB400E, 288 h; (d) HRB400cE, 72 h; (e) HRB400cE, 144 h; (f) HRB400cE, 288 h

Fig.4 Surface morphology of two types of rebals rust layers after different corrosion durations: (a) HRB400E, 72 h; (b) HRB400E, 144 h; (c) HRB400E, 288 h; (d) HRB400cE, 72 h; (e) HRB400cE, 144 h; (f) HRB400cE, 288 h

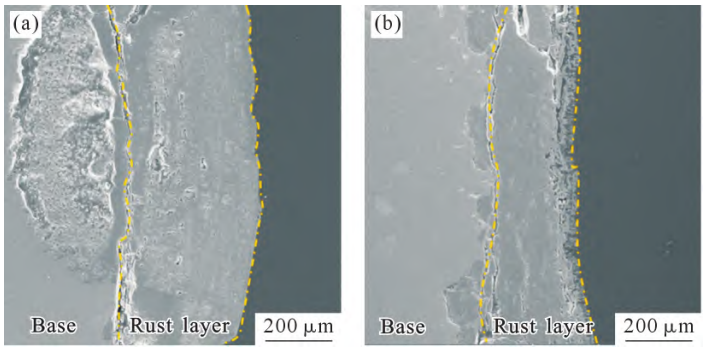


图 5 钢筋腐蚀 288 h 后锈层截面形貌：(a) HRB400E; (b) HRB400cE

Fig.5 Cross-sectional morphology of the rust layer after corrosion for 288 h: (a) HRB400E; (b) HRB400cE

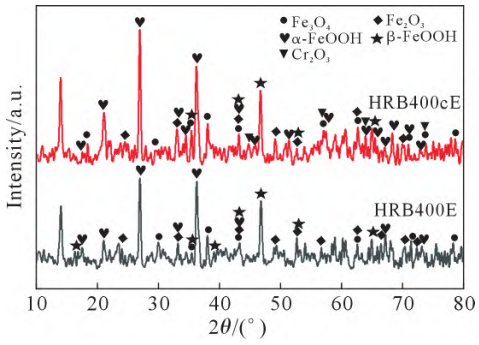


图 6 两种试验钢在周浸腐蚀试验后的 XRD 分析结果

Fig.6 XRD patterns of the two test rebals after alternate immersion corrosion tests

蚀性阴离子的渗透受到阻碍，从而提高钢筋耐蚀性能[19]。以上的分析结果表明，HRB400cE 中的 Cr 元素促进了锈层中 α-FeOOH 的形成，提高了锈层的致密性和稳定性，阻碍了腐蚀性介质的传输过程，从而增强了材料的耐蚀性能。

2.4 极化曲线

图 7 为两种钢筋试样在 2%NaCl 和 3.5%NaCl溶液中的动电位极化曲线。相应的腐蚀电流密度(i_{corr})和腐蚀电位(E_{corr})值如表 2 所示。结果显示，在两种浓度的 NaCl 溶液中，普通 HRB400E 和HRB400cE 钢筋的极化曲线均呈现出活化极化现象，没有出现钝化现象，两种钢的极化曲线形状相似，说明钢阳极活化溶解过程具有相同的动力学行为，两者的腐蚀机理相似[20]。在同一种浓度 NaCl 溶液中，含 Cr 的 HRB400cE 钢筋自腐蚀电流密度低于不含 Cr 的 HRB400E 钢筋，表现为 i_{corr}(HRB400E)>i_{corr}(HRB400cE)，而自腐蚀电位增大。对于同一种钢筋，随着 Cl^- 浓度的提高，其自腐蚀电流密度增加，而自腐蚀电位减小。以上表明 HRB400cE 钢筋具有较低的电化学腐蚀速率，这也说明 Cr 含量的增加可以提高钢筋在氯离子环境中的耐蚀性。

表 2 钢的动电位极化参数

Tab.2 Potentiodynamic polarization parameters of two steels

Solution	Trademark	E_{corr}/V	i_{corr}/(A·cm^{-2})
2%NaCl	HRB400E	-0.759	3.327×10^{-6}
	HRB400cE	-0.707	1.616×10^{-6}
3.5%NaCl	HRB400E	-0.764	4.198×10^{-6}
	HRB400cE	-0.715	1.693×10^{-6}

图 8 为两种钢筋在 2%和 3.5%NaCl 溶液中的 Nyquist 图。Nyquist 图容抗弧半径大体上反映钢筋腐蚀反应进行的阻力，容抗弧半径越大，则电子在钢材表面传递受阻碍程度越高，钢筋越耐腐蚀。在同一种 Cl^- 浓度溶液中，含 Cr 的 HRB400cE 钢筋容抗半径大于不含 Cr 的 HRB400E 钢筋，表明HRB400cE 钢筋较为耐腐蚀。随着溶液中 Cl^- 含量增加，HRB400cE 和 HRB400E 钢筋容抗半径均减小，表明 Cl^- 浓度增加导致钢筋稳定性下降，耐蚀性能降低。

图 9 为两种钢筋在 2%和 3.5%NaCl 溶液中的 Bode 图。Bode 图阻抗模量可以表征钢材的抗腐蚀

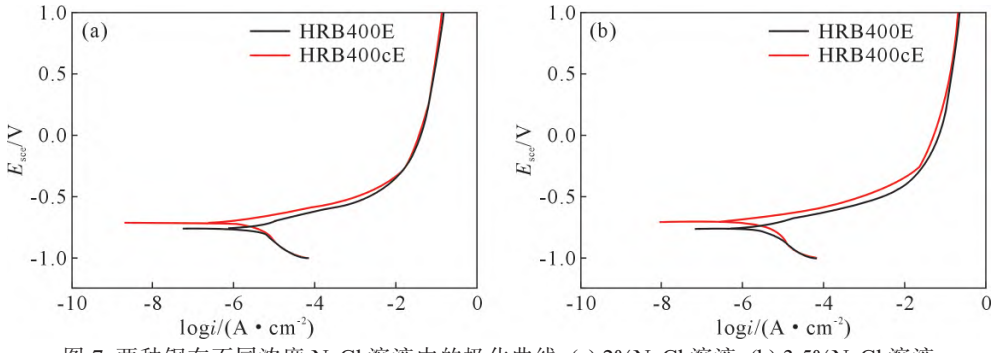


图 7 两种钢在不同浓度 NaCl 溶液中的极化曲线：(a) 2%NaCl 溶液；(b) 3.5%NaCl 溶液

Fig.7 Polarization curves of two types of rebal in different concentrations of NaCl solution: (a) 2 wt. %NaCl solution; (b) 3.5 wt. %NaCl solution

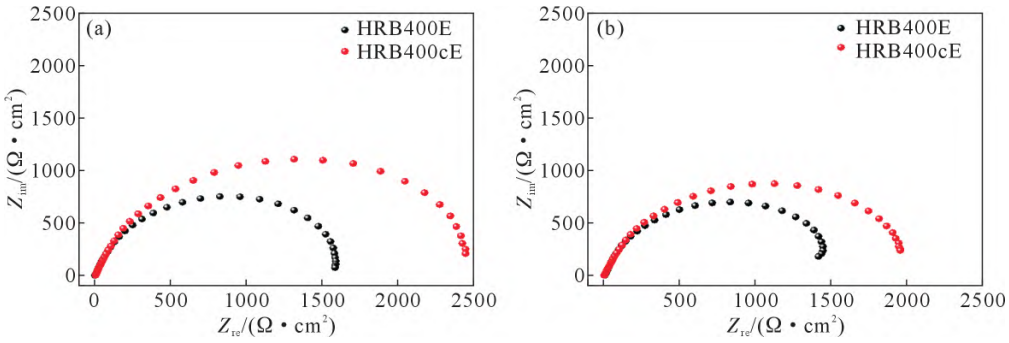


图 8 两种钢在不同浓度 NaCl 溶液中的 Nyquist 图:(a) 2%NaCl 溶液;(b) 3.5%NaCl 溶液

Fig.8 Nyquist plots of two types of steel in different concentrations of NaCl solution: (a) 2 wt. %NaCl solution; (b) 3.5 wt. %NaCl solution

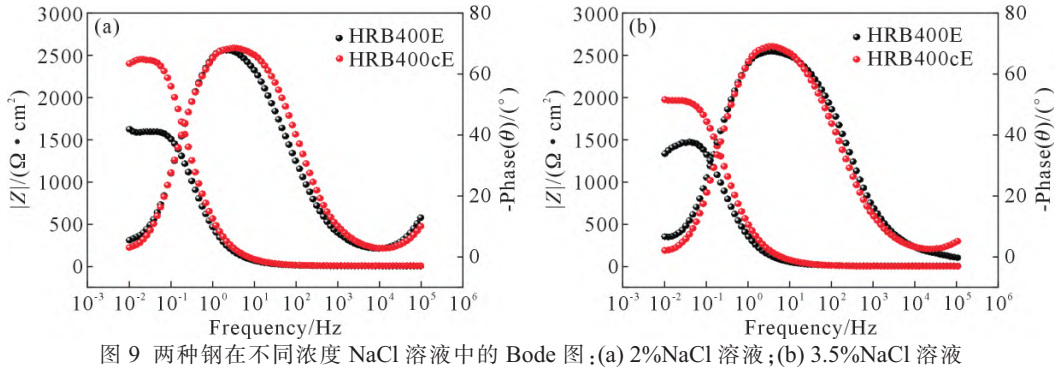


图 9 两种钢在不同浓度 NaCl 溶液中的 Bode 图:(a) 2%NaCl 溶液;(b) 3.5%NaCl 溶液

Fig.9 Bode diagrams of two types of rebal in different concentrations of NaCl solution: (a) 2 wt. %NaCl solution; (b) 3.5 wt. %NaCl solution

性能,阻抗模量越大则钢筋越耐腐蚀。当钢筋表面平整时,Bode 图最大相角绝对值接近 90°,最大相角绝对值越小则表面平整度越低,可以认为钢筋表面膜层越粗糙,防护作用越差[21]。在同一种 Cl^- 浓度中,HRB400cE 钢筋阻抗模量与最大相角绝对值均大于 HRB400E。说明 HRB400cE 耐腐蚀性能强于 HRB400E。随着溶液中 Cl^- 含量增加,HRB400cE 和 HRB400E 阻抗模量下降明显,此外两种钢筋最大相角随 Cl^- 浓度略微下降。基本可以认为加入 Cr 元素能够使钢筋锈层致密,加大对钢筋基体的保护作用,减少 Cl^- 的侵蚀作用,从而提高钢筋的耐电化学腐蚀性能。

3 结论

(1)400 MPa级 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋 HRB400cE 在氯盐环境中以均匀腐蚀为主,表现出良好的耐氯离子侵蚀性能,与普通 HRB400E 钢筋相比,周浸试验中的相对腐蚀速率为 67%,满足耐蚀钢筋国家标准。

(2)普通钢筋在经过周浸腐蚀后,其锈层较为疏松,主要成分是 Fe_2O_3 和 β-FeOOH。而 Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋的锈层则相对薄且致密,主要成分是化学性质较为稳定的 Fe_3O_4、α-FeOOH 和 Cr_2O_3,锈层对钢筋基体提供了更好的保护作用,能够有效防止钢筋继续腐蚀。

(3)随着溶液中 Cl^- 浓度增加,Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋 HRB400cE 与普通钢筋 HRB400E 均出现自腐蚀电流密度增加、容抗弧半径减小情况,钢筋钝化膜稳定性减弱,耐腐蚀性能下降。

(4)相比 HRB400 钢筋,Cr-Mo 合金化耐蚀钢筋 HRB400cE 自腐蚀电位较高,自腐蚀电流密度较低,其极化电阻增大,容抗弧半径与阻抗模量增加,具有较小的电化学腐蚀速率,从而使钢筋在氯盐环境下具有更优异的耐腐蚀性。

参考文献:

[1] 杜元龙, 史志明. 钢筋混凝土腐蚀防护的技术发展动态(英文)[J].吉林工学院学报(自然科学版),1998, 19(2): 2-12.
DU Y L, SHI Z M. The state-of-art on corrosion and prevention of reinfored concrete[J]. Journal of Jilin Institute of Technology, 1998, 19(2): 2-12.

[2] 于同仁,郭湛,陈开智,潘红波. 含 Cr 低合金钢筋的耐蚀性能研究[J]. 安徽冶金,2017(3): 11-15.
YU T R, GUO Z, CHEN K Z, PAN H B. Study on the corrosion resistance of low alloy steel bars containing Cr[J]. Anhui Metallurgy, 2017(3): 11-15.

[3] 王市均. 充分发挥企业研发潜力开发低成本抗震耐蚀钢筋[N]. 世界金属导报,2013, 5, 21.
WANG S J. Fully unleashing the R&D potential of enterprises to develop low-cost seismic and corrosion-resistant steel bars[N]. World Metal Journal, 2013, 5, 21.

[4] 何琴琴. 低合金化耐腐蚀钢筋现状及发展趋势[J]. 中国钢铁业,

2021(8): 37-41.
HE Q Q. Current situation and development trend of low alloyed corrosion-resistant steel bars[J]. China Steel, 2021(8): 37-41.

[5] 周大元. 耐蚀钢筋组织及合金元素对耐蚀性能影响的研究[D]. 合肥：安徽工业大学，2017.
ZHOU D Y. Research on the influence of microstructure and alloy elements on the corrosion resistance of rebar[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2017.

[6] 李涛，陈思瑶，史艳华，梁平. 铬污染对 Q345 钢在抚顺污灌区土壤腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺，2015, 44(4): 90-93.
LI T, CHEN S Y, SHI Y H, LIANG P. Effect of chromium contamination corrosion behavior on Q345 steel in soil of sewage water irrigation region in fushun[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(4): 90-93.

[7] 左龙飞，张建春，麻晗，蒋金洋，施锦杰. 一种Cr-Ni 合金化耐蚀钢筋在氯盐环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护，2017, 38(2): 83-90.
ZUO L F, ZHANG J C, MA H, JIANG J Y, SHI J J. Corrosion behavior of Cr-Ni alloyed corrosion resistant rebal in chloride environments[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(2): 83-90.

[8] 张开广，陈颜堂，童明伟，程吉浩. DH36 钢成分组织与耐腐蚀性能的关系[J]. 中国材料科技与设备，2013(2): 45-47.
ZHANG K G, CHEN Y T, TONG M W, CHENG J H. Relation of mechanical properties and microstructure on their corrosion resistance to DH36 steel[J]. China Materials Technology and Equipment, 2013(2): 45-47.

[9] 艾志勇. 新型合金耐蚀钢筋的腐蚀行为及耐蚀机制[D]. 南京：东南大学，2017.
AI Z Y. Corrosion behaviour of new alloy corrosion-resistant steel and its anticorrosion mechanisms[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[10] MING J, WU M, SHI J J. Corrosion resistance of a Cr-bearing low-alloy reinforcing steel: Effect of surface condition, Alkaline solution, and chloride content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(4): 04020034.

[11] DONG B J, LIU W, ZHANG T Y, CHEN L Z, FAN Y M, ZHAO Y G, LI S M, YANG W J, BANTHUKUL W. Optimize Ni, Cu, Mo element of low Cr-steel rebars in tropical marine atmosphere environment through two years of corrosion monitoring[J]. Cement & Concrete Composites, 2022, 125: 104317.

[12] YANG X J , YANG Y, SUN M H, JIA J H, CHENG X Q, PEI Z B, LI Q, XU D, XIAO K, LI X G. A new understanding of the effect of Cr on the corrosion resistance evolution of weathering steel based on big data technology[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 104: 67-80.

[13] JIA J H, CHENG X Q, YANG X J, LI X G, LI W. A study for corrosion behavior of a new-type weathering steel used in harsh marine environment[J]. Construction & Building Materials, 2020, 259: 119760.

[14] 刘明，程学群，李晓刚，邢佩，洪媛媛，魏子博. 新型耐蚀低合金钢筋腐蚀行为[J]. 科技导报，2016, 34(2): 205-209.
LIU M, CHENG X Q, LI X G, XING P, HONG Y Y, WEI Z B. Corrosion behavior of new low alloy corrosion resistant rebal[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(2): 205-209.

[15] ZHAO Q H，LIU W, ZHU Y C，ZHANG B L, LI S Z, LU M X. Effect of small content of chromium on wet-dry acid corrosion behavior of low alloy steel[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2017, 30(2): 164-175.

[16] CHENG X Q, TIAN Y W, LI X G, ZHOU C. Corrosion behavior of nickel-containing weathering steel in simulated marine atmospheric environment [J]. Materials and Corrosion, 2014, 65 (10): 1033-1037.

[17] KAMIMURA T, STRATMANN M. The influence of chromium on the atmospheric corrosion of steel[J]. Corrosion Science, 2001, 43 (3): 429-447.

[18] SHI J J, MING J, WU M. Electrochemical behavior and corrosion products of Cr-modified reinforcing steels in saturated $Ca(OH)_2$ solution with chlorides[J]. Cement & Concrete Composites, 2020, 110: 103587.

[19] ZHAO Y X, REN H Y, DAI H, JIN W L. Composition and expansion coefficient of rust based on X-ray diffraction arid thermal analysis[J]. Corrosion Science, 2011, 53(5): 1646-1658.

[20] 刘新，吴淼，施锦杰. 耐蚀钢筋在混凝土模拟液中的电化学行为[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2019, 49(3): 502-506.
LIU X, WU M, SHI J J. Electrochemical behavior of corrosion-resistant rebal in simulated concrete pore solutions[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(3): 502-506.

[21] MARTÍNEZ I, ANDRADE C. Application of EIS to cathodically protected steel: Tests in sodium chloride solution and in chloride contaminated concrete[J]. Corrosion Science, 2008, 50(10): 2948-2958.