



氯盐环境下 600 MPa 级耐蚀钢筋 腐蚀行为研究

李 霏¹, 袁 静², 黄吉祥¹, 闫 博¹, 阴树标^{1*}, 雷 霆³

(1. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 新余钢铁股份有限公司, 江西 新余 338001; 3. 昆明冶金高等专科学校, 云南 昆明 650033)

摘要:以普通 600 MPa 级高强抗震钢筋 HRB600E 和经过合金调控后的同级别耐蚀钢筋为试验对象, 通过周期浸润试验、电化学试验、表面分析技术和物相分析技术研究了氯盐环境下 Cr、V 对 600 MPa 级耐蚀钢筋腐蚀行为。结果表明, 耐蚀合金的加入促进基体中贝氏体组织产生, 减缓了铁素体阳极腐蚀进程; V、Cr 元素的协同作用能够阻碍 Cl⁻ 下渗, 有效延缓锈层生长速度, 360 h 周期浸润后耐蚀钢筋腐蚀速率下降; Cr-V 体系元素调控下耐蚀钢筋电化学性质自腐蚀电位提升, 钝化后电位正移, 腐蚀电流密度下降; 耐蚀钢筋钝化后交流阻抗值显著提升, 在混凝土碱性环境中耐腐蚀性能优异; 合金元素调控改善了钢筋腐蚀产物的物相组成, 耐蚀钢筋后期腐蚀产物中 α -FeOOH 及 γ -FeOOH 占比更高, 且内锈层有尖晶石结构产物 FeCr₂O₄ 富集, 增加了内锈层的致密度和稳定性。

关键词:600 MPa 级耐蚀钢筋; 腐蚀行为; 耐蚀性能; 氯离子腐蚀; Cr-V 体系

中图分类号: TF76, TU375

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)03-0123-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Study on the corrosion behavior of a 600 MPa corrosion-resistant steel bar in a chloride environment

Li Pei¹, Yuan Jing², Huang Jixiang¹, Yan Bo¹, Yin Shubiao^{1*}, Lei Ting³

(1. School of Material and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Xinyu Iron and Steel Group Co., Ltd., Xinyu 338001, Jiangxi, China; 3. Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, Yunnan, China)

Abstract: The effect of Cr and V elements on the corrosion behavior of the ordinary 600 MPa grade high-strength seismic steel bar HRB600E and the same grade corrosion-resistant steel bar after alloy regulation was studied by the cyclic immersion tests, electrochemical tests, surface analysis, and phase analysis in a chloride environment. The results show that the addition of corrosion-resistant alloy promotes the formation of bainite in the matrix and slows down the corrosion process of the ferrite anode. The synergistic effect of V and Cr elements can hinder the infiltration of Cl⁻, effectively delaying the growth rate of the rust layer, and the corrosion rate of corrosion-resistant steel bars decreases after 360 hours of cyclic immersion. Under the control of Cr-V elements, the self-corrosion potential of the electrochemical properties of corrosion-resistant steel bars increases, while the potential shifts positively after passivation, and the corrosion current density decreases. The AC impedance value of the corrosion-

收稿日期: 2022-12-23

作者简介: 李霏, 1996 年出生, 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 研究方向: 钢铁材料腐蚀与应用, E-mail: lp1277504201@163.com; * 通讯作者: 阴树标, 男, 博士, 副教授, 长期从事先进钢铁材料强化机制及腐蚀机理的研究工作, E-mail: 278912571@qq.com。

resistant steel bar is significantly improved after passivation, and it shows excellent corrosion resistance in the alkaline environment of concrete. The regulation of alloying elements improves the phase composition of corrosion products of the steel bars. The proportion of α -FeOOH and γ -FeOOH in the later corrosion products of the corrosion-resistant steel bars is higher and the internal rust layer is enriched with spinel-structured product FeCr_2O_4 , which increases the density and stability of the internal rust layer.

Key words: 600 MPa corrosion resistant rebar, corrosion behavior, corrosion resistance, chloride ion corrosion, Cr-V system

0 引言

钢筋混凝土结构是沿海建筑中最常见的结构类型之一,海洋环境中氯离子富集,氯离子渗透腐蚀引起的钢筋混凝土失效案例广泛存在于岸基建筑中,造成巨大经济和人身安全损失^[1-4]。海岸港口混凝土结构中钢筋存在严重的氯离子渗透腐蚀,大大影响其服役年限^[5-7]。随着我国海洋经济蓬勃发展,对海洋工程和岸基建筑混凝土用钢筋的耐蚀性能和力学强度提出了更高的要求^[8-9]。为了获得高强度和优良耐蚀性能的耐蚀钢筋,提升钢筋混凝土的服役年限,国内外学者进行了大量的研究,并从表面防护和基材成分调控两个方面出发开发了多种防腐蚀技术,例如钢筋阻锈剂、不锈钢钢筋、环氧涂层钢筋、不锈钢包覆钢筋、以及低合金钢筋^[10]。对比其他耐蚀措施的高成本和不彻底性,通过合金元素调控技术生产的高强度抗震耐蚀钢筋不仅制备成本低,而且具有较好的耐蚀性能,成为了研究的重点。

400 MPa 和 500 MPa 级别抗震耐蚀钢筋开发趋于成熟,而对更高强度的 600 MPa 级耐蚀钢筋腐蚀行为的研究甚少,处于探索阶段^[11]。因此,笔者按照国标要求,对 600 MPa 级别高强抗震耐蚀钢筋和普通 600 MPa 级别耐蚀钢筋进行周期浸润试验和电化学试验,研究其不同周期浸润时长下的腐蚀行为,并考察其在碱性环境下的电化学特征。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料选用 600 MPa 级单 V 低合金抗震耐蚀钢筋(编号 HRB600cE),对比试验采用 Nb-V 复合体系高强抗震钢筋(编号 HRB600E),其化学成分见表 1。前者合金添加量较高,Cr 含量达到 0.75%~1.10%(质量分数,下同),Mo+Ni+Cu 总添加量 $\geq 1.10\%$,同时添加一定量的 V 元素提升其强度,V 含量 $\leq 0.10\%$ 。HRB600E 未添加任何耐蚀合金元素。

表 1 试验钢化学成分
Table 1 Chemical compositions of HRB600cE and HRB600E bar

钢种	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo+Ni+Cu	V	Nb	Fe
HRB600cE	≤ 0.20	0.50	1.15	≤ 0.004	≤ 0.018	0.75~1.10	≥ 1.10	≤ 0.10		
HRB600E	0.26	0.70	1.54	≤ 0.008	≤ 0.025			≤ 0.15	≤ 0.012	余量

1.2 试验方法

HRB600cE 和 HRB600E 利用 DK77 电火花线切割机加工成 $\text{Ø}12\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的金相试样,将试样用 180~5 000 目砂纸和 0.25 μm 刚玉抛光膏进行预磨抛光处理,利用无水乙醇将试样清洗后吹干,使用 4% 硝酸酒精进行 5~7 s 浸泡腐蚀,利用蔡司电子光学显微镜对 HRB600cE 和 HRB600E 进行显微组织观察。

针对周期浸润试验,将 HRB600cE 与 HRB600E 加工成 $\text{Ø}9\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的圆棒状试样,保证表面光

滑度小于 0.8,按照 YB/T4368-2014 中规定的周期浸润溶液和条件进行试验,测定贫氯环境下 HRB600cE 和 HRB600E 的腐蚀速率和腐蚀深度。分别设置 72、144、360 h 浸润周期进行试验,浸润完毕后对试样分别进行物理除锈和化学除锈,物理除锈前利用 SEM(TM-3 030 Plus, Hitachi, Tokyo, Japan)对试样表面和截面进行观测,对其外锈层结构进行分析。化学除锈采用 500 mL 盐酸+500 mL 去离子水+10 g 六次甲基四胺配置成 1 L 溶液进行酸洗,除去顽固锈层。物理除锈后的腐蚀产物进行

XRD(MiniFlex 600, Rigaku, Tokyo, Japan) 分析, 化学除锈后的试样用于计算腐蚀速率和腐蚀深度, 腐蚀速率按照公式(1)计算得到, 周期腐蚀深度由式(2)计算得到, 年腐蚀深度按照公式(3)得到。

$$v = \frac{w}{s \times t} \times 10^6 \quad (1)$$

$$d = \frac{w}{s \times \rho} \times 10^3 \quad (2)$$

$$D = \frac{d \times 365 \times 24}{10^3 \times t} \quad (3)$$

其中, v 为腐蚀速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; d 为腐蚀深度, μm ; D 为年腐蚀深度, μm ; w 为腐蚀失重, g ; s 为周期浸润表面积, mm^2 ; t 为浸润时长, h ; ρ 为密度, 取 $7.87 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

针对电化学试验, 分别对 HRB600cE 和 HRB600E 的原始态试样和钝化态试样进行极化曲线测定和电化学阻抗谱测定。将试样在饱和的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中钝化 24 h 后进行检测。试验选择在 2.0% (质量分数) NaCl 溶液中进行, 电化学测试采用标准的三电极体系, 钢筋试样为工作电极, 对电极选用铂电极, 参比电极选用甘汞电极。利用 DK77 电火花线切割机将钢筋加工成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的薄片试样, 利用焊锡将其与铜芯导线焊接后密封, 保证只有测试面与溶液接触, 保留 100 mm^2 的外露工作面积。试验前, 采用与金相试样同样的抛光处理, 并用无水乙醇和去离子水轮流清洗并吹干。

动电位极化曲线和电化学阻抗谱采用 PARSTAT2273 电化学工作站进行, 试验温度选定为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。测定极化曲线和阻抗谱前先对试样进行开路电位 (OPC) 测定, 开路电位稳定后再进行后续测定。动电位极化曲线测定范围设定为 $-1 \sim 1.2 \text{ V}$, 扫描速率为 $0.1 \text{ mV}/\text{s}$, 电化学阻抗谱在前期测定的开路电压下进行测量 $10^{-2} \sim 10^5 \text{ Hz}$, 阻抗测量信号幅值为 10 mV 正弦波。测定结果用 Zview 软件进行拟合。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

HRB600cE 和 HRB600E 两种钢筋的金相显微组织相差较大, 如图 1 所示。HRB600cE 为贝氏体 + 铁素体组织, HRB600E 为珠光体 + 铁素体组织。研究表明, 贝氏体 + 铁素体组织相较于珠光体加铁素体组织具有更加优异的耐腐蚀性能^[12]。HRB600cE

经过耐蚀合金元素调控, 并结合冶炼轧制工艺, 在保证 C 含量降低的同时促进了贝氏体形成。相比之下, HRB600E 中组成珠光体的渗碳体和铁素体在腐蚀进程中会形成腐蚀电池。渗碳体电化学活性较差, 形成了电池阴极, 在腐蚀进程中加速铁素体阳极的腐蚀^[13]。

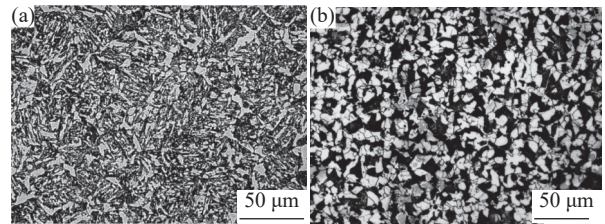


图 1 HRB600cE(a) 和 HRB600E(b) 钢筋的微观组织结构
Fig. 1 Microstructures of HRB600cE (a) and HRB600E (b) bars by electron microscope

2.2 腐蚀速率

图 2 为不同周期浸润时长下两钢种的腐蚀速率及年腐蚀深度。由图 2(a) 可知, HRB600cE 在 72 h 周浸结束时的腐蚀速率为 $4.214 5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, HRB600E 腐蚀速率为 $6.292 1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 前者的腐蚀速率仅为后者的 67%。当周浸时长达到 144 h 时, HRB600cE 和 HRB600E 的腐蚀速率与 72 h 比较均有所上升, 分别为 $4.301 2$ 、 $6.361 7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 上升幅度接近。当周浸时长达到 360 h 时, HRB600cE 腐蚀锈层趋于致密, 抑制腐蚀进一步加深, 因此腐蚀速率与 144 h 比较呈降低趋势, 为 $4.141 8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。可见耐蚀合金元素使 600 MPa 级高强度抗震钢筋耐蚀性能提升明显, 尤其表现在腐蚀进程后期。

图 2(b) 显示, 无论是 HRB600cE 还是 HRB600E, 年腐蚀深度都与腐蚀时长呈正相关增长, 前者 72 h 的年腐蚀深度为 $4.733 2 \mu\text{m}$, 144 h 时加深至 $4.830 6 \mu\text{m}$, 后者腐蚀深度也随时间延长呈增长趋势。浸润时长达到 360 h 时, 前者年腐蚀深度有所降低, 后者腐蚀加深程度更甚, 且较 144 h 有所提升, 为 $7.285 1 \mu\text{m}$ 。可以推测耐蚀合金元素在腐蚀后期促进了致密内锈层的形成, 阻碍了氯离子对基体的侵蚀。HRB600cE 中 Cr 元素与 V 元素发挥协同作用, 二者主要以氧化物形态富存于锈层中, 改变了内锈层局部位置的电荷性质, 对 Cl^- 通过锈层向基体渗透有一定阻碍作用; 其次, Mn 以较强的电化学活性存在于钢筋基体, 优先生成的 Mn^{2+} 与 Cu^{2+} 在内锈层中聚集^[14], 能够有效延缓腐蚀介质的下渗和外锈层的生长, 腐蚀深度有所降低。

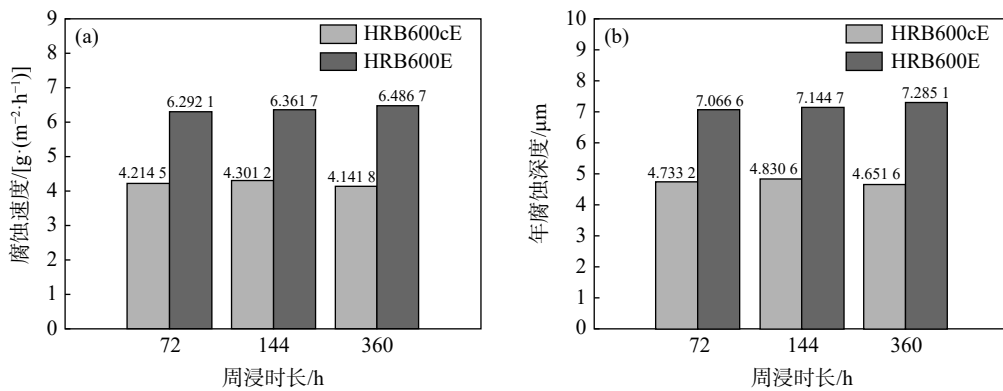


图 2 HRB600cE and HRB600E 不同时长下腐蚀速率 (a) 和年腐蚀深度 (b)
 Fig. 2 Corrosion rate (a) and annual corrosion depth (b) of HRB600cE and HRB600E

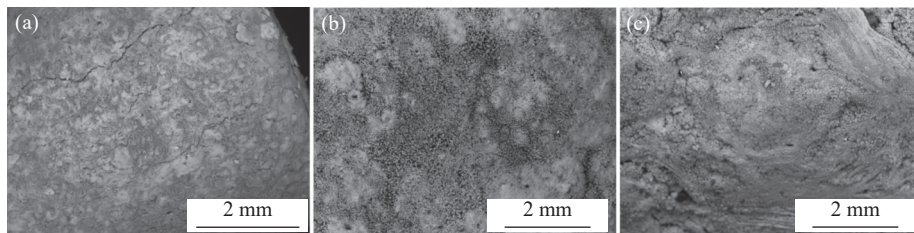
从腐蚀速率下降程度和年腐蚀深度变化趋势可以看出 HRB600cE 的耐腐蚀性能明显优于 HRB600E, 降低 C 含量和提升 Cr、Mo、Ni 等耐蚀合金元素含量对耐蚀性能的提升明显。

2.3 锈层形貌分析

图 3、4 分别为 HRB600cE 和 HRB600E 浸润 72、144、360 h 后扫描电镜下表面外锈层宏观形貌。图 5 分别为试验钢浸润 144、360 h 后锈层微观形貌及能谱, 表 2 为锈层致密处各元素组成占比。

经 72 h 周期浸润后, HRB600cE 和 HRB600E 均表现为均匀腐蚀, 与 HRB600E 对比, HRB600cE 宏观表面锈层较为致密, 锈层生长裂纹数量少, 外锈

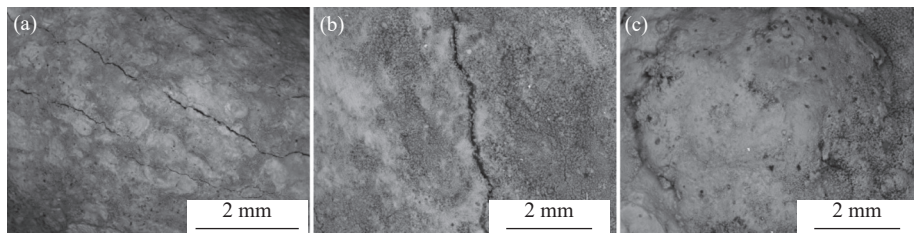
层贴合度高, 可阻碍氯离子进一步向内锈层渗透; 经 144 h 浸润后, HRB600cE 外锈层由致密形态转变为絮状和致密状, 无明显裂纹, 致密处有 Cr 和 V 元素富集, 总含量达到 0.675%, HRB600E 表面絮状锈层占比较高, 且腐蚀裂纹沿径向分布, 氯离子沿疏松絮状锈层和腐蚀裂纹向内锈层渗透, 加速腐蚀进程, 因此腐蚀速率较 HRB600cE 更高; 360 h 周期浸润结束后, HRB600cE 外锈层转变为致密态, Cr 和 V 元素富集量达到 0.459%, 但表面有颗粒状腐蚀产物脱落痕迹, HRB600E 表面则出现明显锈层肿胀, 肿胀边缘为絮状腐蚀产物, 粘合性差, 外锈层与内锈层之间呈剥离趋势。因此 HRB600E 腐蚀深度较 HRB600cE 更深, 耐腐蚀性能更差。



(a)72 h; (b)144 h; (c)360 h

图 3 HRB600cE 不同浸润时长下外锈层腐蚀宏观形貌

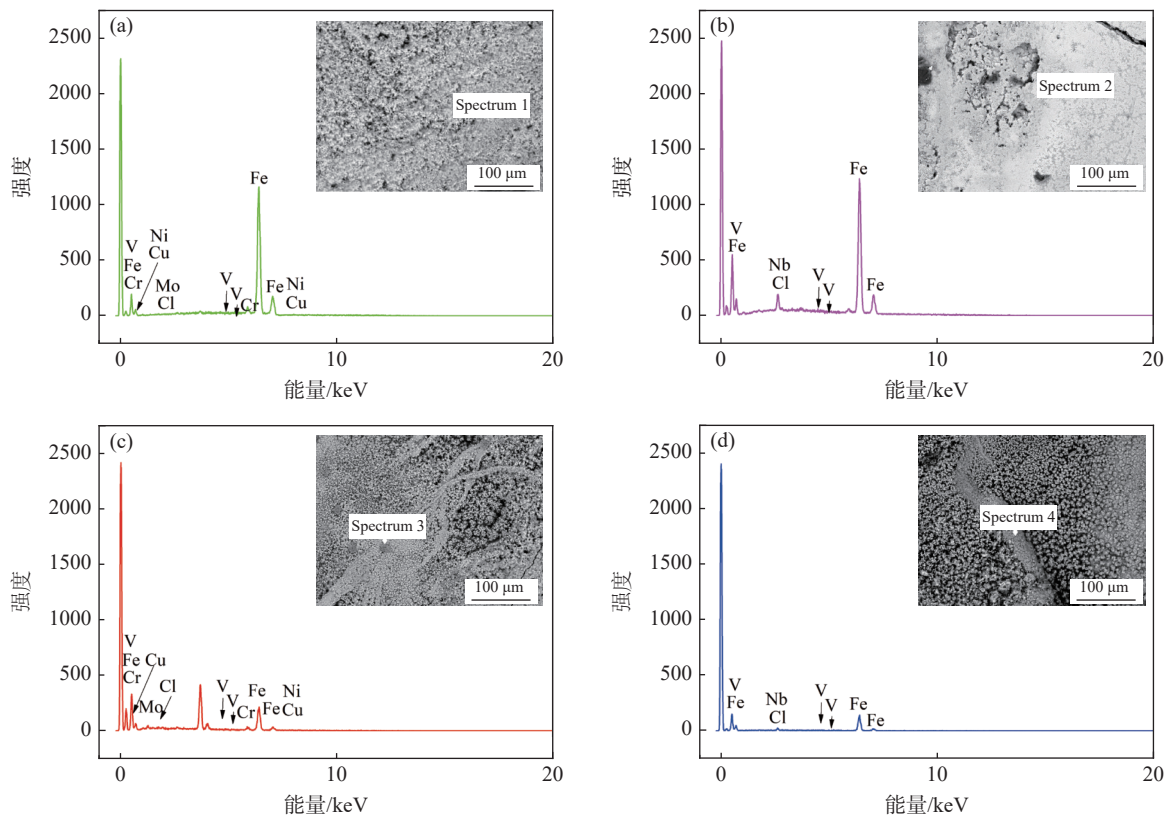
Fig. 3 Corrosion profile of the outer rust layer at different immersion time of HRB600cE



(a) 72 h; (b) 144 h; (c) 360 h

图 4 HRB600E 不同浸润时长下外锈层腐蚀宏观形貌

Fig. 4 Corrosion profile of the outer rust layer at different immersion time of HRB600E



(a) HRB600cE, 周期浸润 144 h; (b) HRB600E, 周期浸润 144 h; (c) HRB600cE, 周期浸润 360 h; (d) HRB600E, 周期浸润 360 h

图 5 试验钢周期浸润 144、360 h 后锈层微观形貌及能谱

Fig. 5 Micromorphology of the rust layer and XRD after 144 h and 360 h immersion

表 2 锈层致密处元素组成

Table 2 Chemical compositions of the compact rust

牌号	浸润时长/h	元素占比/%				
		O	Cr	V	Fe	Cl
HRB600cE	144	5.321	0.421	0.254	93.684	0.320
	360	30.835	0.158	0.301	67.726	0.980
HRB600E	144	12.822		0.023	84.341	2.267
	360	27.942		0.331	69.033	2.182

综上所述, Cr-V 体系下 HRB600cE 钢筋表面外锈层致密度更高, 阻碍氯离子渗透, 可以有效延缓内锈层腐蚀生长, 腐蚀速率较低。HRB600E 钢筋外锈层腐蚀膨胀明显, 腐蚀裂纹沿钢筋进行分布, 腐蚀进一步加速, 腐蚀速率较高。由此可推测 HRB600E 腐蚀进程速度比 HRB600cE 更快。

2.4 腐蚀产物分析

图 6 为 HRB600cE 与 HR600E 不同周期浸润时长下腐蚀产物 XRD 检测结果。由图 6 可知, 二

者腐蚀产物组分基本一致, 均为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 α - $FeOOH$ 及 γ - $FeOOH$ 。 α - $FeOOH$ 与 γ - $FeOOH$ 相比, 电化学活性稳定, 可有效保护基体免受氯离子侵蚀。对于化学成分, 二者锈层成分的主要差别在于各生成了 2 种稳定的尖晶石结构产物, 前者为 $FeCr_2O_4$, 后者为 Fe_2VO_4 , 有利于提升锈层稳定性。经 72 h 周期浸润后, HRB600cE 与 HRB600E 腐蚀产物中 Fe_2O_3 各角度下特征峰数量接近, 但 HRB600E 腐蚀产物中 Fe_2O_3 在 33.2° 下特征峰强度更高, 且锈层中 Fe_3O_4 衍射强度达到最高, 锈层稳定性增强。HRB600cE 物相中较稳定的 α - $FeOOH$ 衍射强度在 21.1° 附近更强, 且 HRB600E 腐蚀产物中 γ - $FeOOH$ 占比较高。HRB600cE 在该周浸时长下尖晶石结构产物 $FeCr_2O_4$ 衍射峰强度与数量达到最高; 144 h 周期浸润结束后, HRB600cE 腐蚀产物中 α - $FeOOH$ 在各衍射角度的特征峰强度较 HRB600E 更高, 且 γ - $FeOOH$ 衍射角度 14.1° 附近的特征峰较 HRB600E 强, 而二者腐蚀产物中 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 衍射强度与衍射峰无明显差距。360 h 周期浸润结束后,

HRB600cE 腐蚀产物中 γ -FeOOH 及 α -FeOOH 特征峰数量及强度远高于 HRB600E, 说明此时前者已形成了稳定的钝化膜, 后者钝化组分占比较低, 前者腐

蚀速率较后者降低更甚。可见腐蚀产物稳定性为 HRB600cE > HRB600E。

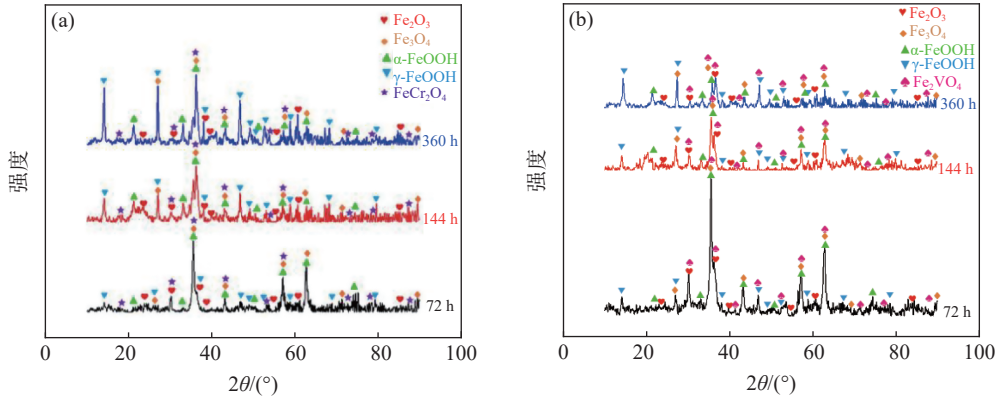


图 6 HRB600cE(a) 及 HRB600E(b) 不同时长下锈层腐蚀产物物相组成
Fig. 6 XRD results of the rust layer components of HRB600cE(a) and HRB600E(b) rebars for different corrosion times

2.5 电化学极化曲线与阻抗谱

图 7 为 HRB600cE 和 HRB600E 在质量分数为 2.0%NaCl 溶液中原始态及在 pH 值为 12.6 的饱和 Ca(OH)₂ 中钝化 24 h 后所测得的极化曲线, 相关指标列于表 3 中, 其中 E_{corr} 为自腐蚀电位, i_{corr} 为自腐蚀电流密度, E_p 为钝化电位区间。从图 7 可以看出 4 条曲线均无明显钝化平台, 原始态下的 HRB600cE 的自腐蚀电位高于原始态下 HRB600E, 前者自腐蚀电流密度为后者的三分之一, 可以推测耐蚀合金元素的加入是使得其自腐蚀电位较低的主要原因之一, 其中 Cr 元素会在腐蚀初期与氧元素反应, 生成致密氧化层, 避免基体进一步腐蚀。可以得出四种状态下钢筋的自腐蚀电位关系为 HRB600E 原始态 > HRB600E 钝化 24 h > HRB600cE 原始态 > HRB600cE 钝化 24 h; 证明 HRB600cE 电化学活性差, 耐氯离子腐蚀能力更强。此外, HRB600E 阳极极化曲线电极电位与电流密度成正相关, 反应过程为极化反应。HRB600cE 在原始状态下腐蚀电位与钝化后腐蚀电位差距较大, 证明其在碱性环境下电化学活性更稳定, 腐蚀进程相对缓慢。

为评价钢筋钝化后的耐氯离子腐蚀性能, 分别对 HRB600cE 和 HRB600E 进行 24 h 碱性钝化处理, 与原始态在质量分数 2.0% 的 NaCl 溶液中进行交流阻抗谱测定, 利用 Zview 软件对阻抗谱进行拟合, 结果如图 8 所示。其中, Z_{Re} 表示阻抗实部, Z_{im} 代表阻抗虚部。

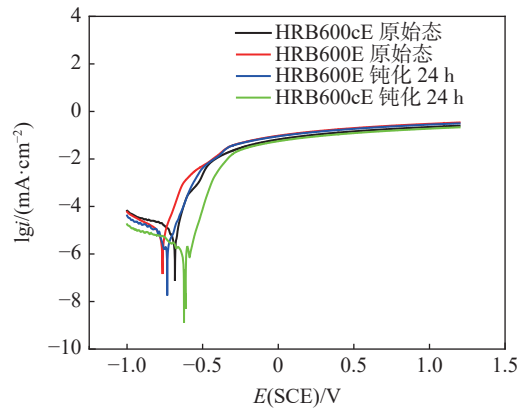


图 7 HRB600cE 及 HRB600E 在 2.0%NaCl 溶液中原始态及钝化态极化曲线

Fig. 7 Polarization curves of HRB600cE and HRB600E rebars in a 2.0% NaCl solution

表 3 HRB600cE 与 HRB600E 极化曲线拟合结果
Table 3 Fitting results of the polarization curves of HRB600cE and HRB600E

钢筋状态	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	E_p/mV
HRB600cE原始态	683	1.34	0
HRB600cE钝化后	623	0.78	29
HRB600E原始态	765	4	0
HRB600E钝化后	734	3.32	0

由图 8 可知, 4 种条件下钢筋表现为容抗特征, 容抗曲线半径大小与其耐腐蚀性能呈正相关。容抗弧半径大小关系为 HRB600cE 钝化 24 h > HRB600E 钝化 24 h > HRB600cE 原始态 >

HRB600E 原始态。HRB600cE 经 24 h 钝化后阻抗值最大,表现出优异的耐腐蚀性能,HRB600E 经钝化后耐腐蚀阻抗对比原始态有所提升,但阻抗值仍与 HRB600cE 钝化后有很大差距,可推测是由于传统 Nb-V 复合体系下 600 MPa 级抗震钢筋中 Nb, V 以碳氮化物的形式析出,在钢筋基体形成了“大阳极,小阴极”微型电池结构,导致其耐腐蚀性能降低。

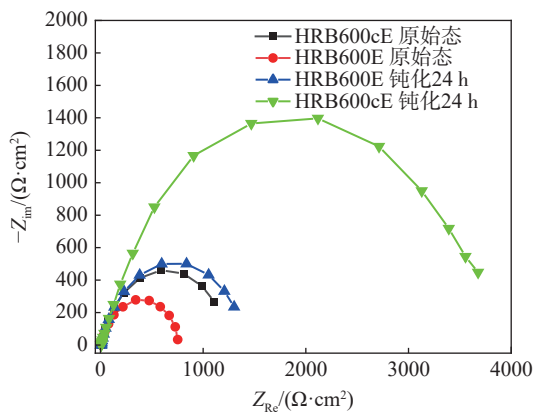


图 8 HRB600cE 及 HRB600E 在 2%NaCl 溶液中交流阻抗曲线

Fig. 8 Nyquist plots of HRB600cE and HRB600E rebars in a 2% NaCl solution

参考文献

- [1] Ye Zhanchun, Guan Chunlong. Study on corrosion resistance and wear resistance of new vanadium-containing weather proof steel for building[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(4): 116–120.
(叶占春, 关春龙. 含钒新型建筑耐候钢的耐蚀及耐磨性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(4): 116–120.)
- [2] Luo Yihua, Huang Yao, Yang Xuefeng, et al. Effect of P elements on mechanical properties and corrosion resistance of high strength weathering steel used in transmission tower[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(1): 142–147.
(罗义华, 黄耀, 杨雪峰, 等. P元素对耐候高强钢铁塔力学性能和腐蚀性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(1): 142–147.)
- [3] 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: 7076–7094.
- [4] Xie Qiong, Shi Peiyang, Liu Chengjun, et al. Experimental studies on corrosion behaviour of ferritic stainless steel in HCl based solution[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2015, 36(4): 114–118.
(解琼, 史培阳, 刘承军, 等. 铁素体不锈钢在盐酸基溶液中的加速腐蚀行为研究[J]. *钢铁钒钛*, 2015, 36(4): 114–118.)
- [5] Zhou Yu, Ye Yinghua, Xi Jie, et al. Experiment of properties deterioration of air- entrained concrete in seawater-aggressive and freeze-thaw environment[J]. *Concrete*, 2011, (12): 18–20.
(周煜, 叶英华, 裘杰, 等. 海水侵蚀环境与冻融交替作用下引气混凝土性能劣化试验[J]. *混凝土*, 2011, (12): 18–20.)
- [6] Bao Huiming, Zhao Xuewen, Xiong Xin, et al. Study of sisal fiber concrete's anti-erosion property in marine environment[J]. *Concrete*, 2012, (6): 23–24.
(包惠明, 赵学文, 熊鑫, 等. 海洋环境下剑麻纤维混凝土抗侵蚀试验研究[J]. *混凝土*, 2012, (6): 23–24.)
- [7] Qin Fangcheng, Qi Haiquan, Meng Zhengbing, et al. Advances in high corrosion resistant rebar for ocean engineering[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(6): 158–164.
(秦芳诚, 齐海全, 孟征兵, 等. 海洋工程高抗蚀筋材研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(6): 158–164.)
- [8] Sun Lijuan, Liu Bingwei, Sun Yongjuan. Influence of seawater erosion on the mechanical properties and chloride ion transport

3 结论

1) Cr-V 体系 HRB600cE 高强抗震耐蚀钢筋对比 Nb-V 复合体系下 HRB600E 耐蚀钢筋,耐蚀合金的加入促进基体中贝氏体组织产生,减缓了铁素体阳极腐蚀进程,360 h 周期浸润后腐蚀速率 4.141 8 g/(m²·h); Cr 与 V 元素协同作用促进外锈层致密态形成,阻碍 Cl⁻向内锈层下渗,延缓锈层生长速度,降低腐蚀速率及年腐蚀深度,耐腐蚀性能优异。

2) HRB600cE 与 HRB600E 极化曲线阳极区均无明显钝化现象,耐蚀合金元素调控下前者的自腐蚀电位更大,腐蚀电流密度更低;两者阻抗谱均表现出明显容抗特征,前者钝化 24 h 后交流阻抗值显著提升,在碱性环境中耐腐蚀性能更好,适用于混凝土结构。

3) Cr-V 元素调控改善了钢筋腐蚀产物的物相组成,改善了外锈层结构,提升了内锈层致密程度。HRB600cE 腐蚀后期 α -FeOOH 及 γ -FeOOH 占比更高,证明基体表面已充分钝化,腐蚀速率可以保持稳定。Cr 和 V 元素在腐蚀过程中生成了稳定的尖晶石结构产物 FeCr₂O₄ 及 Fe₂VO₄,增加了内锈层的致密度和稳定性。

- of fiber concrete[J]. *Concrete*, 2022, (6): 24–28.
(孙丽娟, 刘兵伟, 孙永娟. 海水侵蚀对纤维混凝土力学性能和氯离子传输性能的影响[J]. *混凝土*, 2022, (6): 24–28.)
- [9] Liu Tao, Chen Yongfeng, Zhu Libin, *et al.* Effect of alloy adjustment on corrosion resistance of steel rebar[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(2): 156–161.
(刘涛, 陈永峰, 朱利斌, 等. 合金调控对钢筋耐蚀性能的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(2): 156–161.)
- [10] Ai Zhiyong, Sun Wei, Jiang Jinyang. Recent status of research on corrosion of low alloy corrosion resistant steel and analysis on existing problems[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2015, 27(6): 525–536.
(艾志勇, 孙伟, 蒋金洋. 低合金耐蚀钢筋锈蚀研究现状及存在的问题分析[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2015, 27(6): 525–536.)
- [11] Tian Yuwan. Study on corrosion mechanism of the high-strength corrosion-resistance steel reinforcement and inhibitor in marine structures [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
(田玉琬. 海工用高强耐蚀钢筋的腐蚀机理及阻锈剂研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.)
- [12] Chen Huande, Ma Han, Zhang Yu, *et al.* Microstructure and tensile properties of 00Cr10MoV corrosion resistant rebar for ocean engineering[J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*, 2019, 40(5): 103–108.
(陈焕德, 麻晗, 张宇, 等. 海洋工程用00Cr10MoV耐蚀钢筋的组织及拉伸性能[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(5): 103–108.)
- [13] Gan Ling. Corrosion behavior of high-strength corrosion resistant rebar in a solution of chlorine salt[D]. Ma' anshan: Anhui University of Technology, 2017.
(甘玲. 高强耐蚀钢筋在氯盐环境下的腐蚀行为[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.)
- [14] Chen Xinhua, Dong Junhua, Han Enhou, *et al.* Effect of Cu-Mn on the corrosion performance of carbon steels in wet/ dry environments[J]. *Materials Protection*, 2007, 40(10): 19–22,93-94.
(陈新华, 董俊华, 韩恩厚, 等. 干湿交替环境下Cu、Mn合金化对低合金钢腐蚀行为的影响[J]. *材料保护*, 2007, 40(10): 19–22,93-94.)

编辑 杨冬梅

攀钢建成全国首家钒钛矿低碳冶金新工艺实验室

(5月8日消息)日前,拥有自主知识产权的可变压变气氛熔滴实验装置在攀钢研究院完成调试并投入使用。这标志着历时两年建设的全国首家钒钛矿低碳冶金新工艺实验室在攀钢建成落地。

该实验室由攀钢研究院自主设计建设,旨在提升钒钛磁铁矿低碳冶金基础研究能力,为钒钛磁铁矿资源绿色高效利用提供坚实的技术支撑。

攀钢研究院按照“聚焦世界一流实验室,打造行业标杆和对外合作窗口,成为支撑未来钒钛矿冶炼的重要支点”要求,实行工艺路线设计与实验室建设两手抓,走访多家钢企和实验设备制造商,提出具有自主知识产权的钒钛磁铁矿低碳冶金工艺技术路线,并联合制造商重新设计了13台冶金领域专有设备和自主设计4台非标型冶金设备,引进了3台高精度分析设备,实验室设备80%以上为自主设计,实现了反应过程参数检测在线化、反应流程高度可视化、实验操作高度自动化,具备了前瞻性、先进性的钒钛磁铁矿低碳冶金与传统冶金相结合等多项功能,并申报了多项专利。

攀钢钒钛矿低碳冶金新工艺实验室的建成,得到国内外知名高校学者高度评价,并联合申报了3个国家级项目,签订联合培养研究生2名。目前,该实验室已成为攀钢研究院的一个重要对外合作窗口。未来,攀钢研究院将依托钒钛矿低碳冶金新工艺实验室,强化钒钛磁铁矿低碳冶金领域引领策源能力,为打造新鞍钢高质量发展战略支撑极作出更大贡献。

摘自 https://www.pzhsteel.com.cn/index.php?s=/Home/Article/pg_jianjie/art_bm_id/101/fl/two/msg_id/5870