● 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 Jixiang¹, LI Pei¹, YUAN Jing^{1,3}, LEI Ting², YIN Shubiao¹

Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
 Metallurgy and Mining College, Kunming Metallurgy College, Anning 650300, China;
 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-resistant 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^{III}。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^{III}。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^{III},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 发耐蚀钢筋等手段间。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¹⁷⁷,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¹⁸。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¹⁹。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 cm² 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

(mass fraction/%)

								(IIIIII))	inaction (0)
Rebal	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо	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
				<u>50 μm</u>	(b)		- 50 (μm	

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

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 mmx 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





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Fe₂(MoO₄)₃和 CaMoO₄等 化合物,组成的致密保护膜也有效地防止了 CF 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 O₂、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 Fe₃O₄、 α -FeOOH 和 Cr₂O₃,而普通钢筋 HRB400E 试样的锈层主要物 相为 Fe₂O₃、 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 Cr₂O₃ 的形式参 与钢钝化膜的形成,Cr³⁺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 CI 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 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*cor)和 腐蚀电位(*E*cor)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

表 2 钢的动电位极化参数 Tab.2 Potentiodynamic polarization parameters of two

steels								
Solution	Trademark	$E_{\rm con}/{ m V}$	$i_{\rm con}/({\rm A}\cdot{\rm cm}^{-2})$					
$20/N_{\odot}C1$	HRB400E	-0.759	3.327×10 ⁻⁶					
2%INACI	HRB400cE	-0.707	1.616×10 ⁻⁶					
2.50/31.01	HRB400E	-0.764	4.198×10 ⁻⁶					
3.5%NaCl	HRB400cE	-0.715	1.693×10 ⁻⁶					

筋自腐蚀电流密度低于不含 Cr 的 HRB400E 钢筋,表 现为 *i*con(HRB400E)>*i*con(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。

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







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 CI 浓度中, HRB400EE 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 CI 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 CI 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 CI 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 Fe₂O₃ 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 Fe₃O₄、α-FeOOH 和 Cr₂O₃, 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 CI 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 U-niversity 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.
- $\left[12\right]\,$ 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,吴森,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.