

缓蚀剂添加量对 Q235 螺纹钢耐蚀性能的影响

史明慧, 赵德悦, 马玉春, 王志奇

(天津理工大学 材料科学与工程学院, 天津 300384)

摘要: 目的 提高螺纹钢的耐蚀性能。方法 采用模拟穿水淬火冷却工艺,在加入 ZnSO_4 缓蚀剂的介质中对 Q235 螺纹钢进行淬火热处理。通过 XRD 测试、大气腐蚀和电化学测试(包括极化曲线和交流阻抗)等手段对不同淬火介质中 Q235 螺纹钢进行表征和测试。结果 淬火处理后试样表面生成 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 的保护膜,当 ZnSO_4 缓蚀剂添加量达到 120 mg/L 时,Q235 螺纹钢的腐蚀速度由自来水淬火状态的 $0.4583 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 降低到 $0.2083 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$,腐蚀速度降低了 54.5%;Q235 螺纹钢的腐蚀电位由 -0.3752 V 提高到 -0.2997 V ,增加了 20.1%;腐蚀电流由 $5.2482 \times 10^{-5} \text{ A}$ 降低到 $1.6082 \times 10^{-5} \text{ A}$,降低了 69.3%;容抗谱 R_f 由 25.58Ω 增加到 32.52Ω ,增加了 27.1%。Q235 螺纹钢在模拟雨水中的极化形式为电化学极化。结论 ZnSO_4 缓释剂可有效提高 Q235 螺纹钢的耐蚀性能。

关键词: Q235 螺纹钢; ZnSO_4 缓蚀剂; 大气腐蚀; 电化学测试; 耐蚀性能

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2016)01-0143-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.01.023

Effect of Adding Amount of Inhibitor on Corrosion Resistance of Steel Q235

SHI Ming-hui, ZHAO De-yue, MA Yu-chun, WANG Zhi-qi

(School of Materials Science & Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the properties of corrosion resistance of steel Q235. **Methods** The quenching heat treatments were performed with simulated water quench process on steel Q235 after adding ZnSO_4 inhibitor medium. The steel Q235 was characterized and tested by XRD testing, atmospheric corrosion, and electrochemical tests (including polarization curves and AC impedance) under different solutions. **Results** Fe_2O_3 , Fe_3O_4 and $\text{Zn}(\text{OH})_2$ protective films were generated on the sample surface. When the amount of corrosion inhibitor ZnSO_4 reached 120 mg/L, the corrosion rate was reduced to $0.2083 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ from $0.4583 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ in the water quenching. The rebar corrosion rate was reduced by 54.5%. The corrosion potential increased from -0.3752 V to -0.2997 V of Q235, the corrosion potential increased by 20.1%, the corrosion current reduced from $5.2482 \times 10^{-5} \text{ A}$ to $1.6082 \times 10^{-5} \text{ A}$, the corrosion current was reduced by 69.3%, the capacitance spectrum value R_f increased from 25.58Ω up to 32.52Ω which was increased by 27.1%. The polarization of Q235 in simulated rain was the form of electrochemical polari-

收稿日期: 2015-09-17; 修订日期: 2015-10-15

Received: 2015-09-17; Revised: 2015-10-15

基金项目: 天津理工大学大学生创新性实验计划项目(201310060021)

Fund: Supported by College Students Innovation Experiment Program of Tianjin University of Technology(201310060021)

作者简介: 史明慧(1993—),女,甘肃人,主要研究方向为材料科学与工程。

Biography: SHI Ming-hui(1993—),Female, from Gansu, Research focus: materials science and engineering.

通讯作者: 马玉春(1969—),女,天津人,博士,副教授,主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Corresponding author: MA Yu-chun(1969—),Female,from Tianjin,Ph. D.,Associate professor,Research focus: corrosion and protection.

zation. **Conclusion** ZnSO_4 inhibitor can effectively alleviate Q235 steel corrosion resistance.

KEY WORDS: Q235 steel; ZnSO_4 inhibitors; atmospheric corrosion; electrochemical test; corrosion resistance

螺纹钢也称带肋钢筋,在公路、桥梁、建筑等行业中得到了广泛应用。目前在螺纹钢的生产过程中,为了获得良好的力学性能,常采用穿水冷却工艺,但在穿水冷却过程中,部分螺纹钢的氧化皮会脱落,增加表面电化学不均匀性,导致在存放和运输期间易发生锈蚀,不仅对螺纹钢的外观造成一定的影响,同时也造成螺纹钢与混凝土结合不牢固,成为影响建筑物持久性的主要因素^[1-13]。针对这一现状,本文通过在模拟穿水冷却热处理过程中添加不同质量浓度的 ZnSO_4 缓蚀剂来改善螺纹钢产品的外观,同时提高其耐蚀性能,进而提高企业的生产效益。这种在穿水过程中添加缓蚀剂的方法无需改变生产工艺,添加量很少,简单易行,同时不会增加企业太多的生产成本,为提高螺纹钢的耐蚀性能提供了一个简便易行的方法。

1 实验

将某钢厂生产的热轧螺纹钢 Q235 切割成 $\phi 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的试样,打磨抛光,放入氮气保护真空炉中,升温至 1000°C 后,恒温保持 1 h 后取出试样,在不同介质中进行淬火热处理。淬火介质分别是普通自来水和 60、80、100、120 mg/L ZnSO_4 水溶液。

对在 5 种介质中热处理后的试样进行物相分析。靶材为 Cu,固定参数为: $\lambda = 0.15418 \text{ nm}$,加载电压为 40 kV,电流为 100 mA。测试采取掠射方式,掠射角为 2° ,扫描范围 $10^\circ \sim 80^\circ$ 。

将所得 5 组淬火热处理后的试样分别用天平称量,记录数据,然后将试样放置于托盘中,在室外环境中放置 1 个月后再进行称量,记录数据。计算大气腐蚀速率。

将所得 5 组淬火热处理后的试样分别进行电化学测试。电化学测试采用 CHI660D 电化学工作站,采用三电极体系,工作电极为实验试样,辅助电极为石墨电极,参比电极为饱和甘汞电极。实验介质为模拟雨水。该模拟雨水 pH 值为 5.6,离子成分为: $\text{F}^- 7.55 \mu\text{mol/L}$, $\text{Cl}^- 31.94 \mu\text{mol/L}$, $\text{NO}_3^- 16.84 \mu\text{mol/L}$, $\text{SO}_4^{2-} 91.84 \mu\text{mol/L}$, $\text{NH}_4^+ 58.17 \mu\text{mol/L}$, $\text{K}^+ 19.35 \mu\text{mol/L}$, $\text{Na}^+ 15.28 \mu\text{mol/L}$, $\text{Ca}^{2+} 41.41 \mu\text{mol/L}$, $\text{Mg}^{2+} 3.69 \mu\text{mol/L}$ 。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

图 1 为在不同介质中热处理后 Q235 试样 XRD 衍射图谱。其中 1 号试样淬火介质为自来水,2 号试样淬火介质为 60 mg/L ZnSO_4 溶液,3 号试样淬火介质为 80 mg/L ZnSO_4 溶液,4 号试样淬火介质为 100 mg/L ZnSO_4 溶液,5 号试样淬火介质为 120 mg/L ZnSO_4 溶液。表 1 为测试结果。

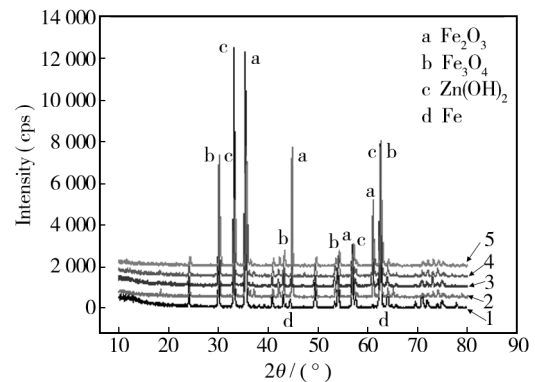


图 1 不同条件下试样 XRD 图谱

Fig. 1 The results of XRD in different conditions

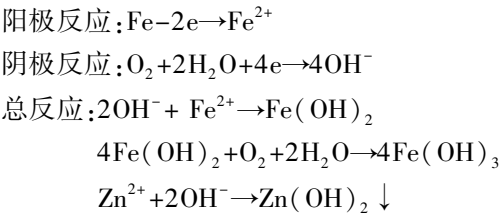
表 1 不同介质淬火试样 XRD 测试结果

Tab.1 The results of XRD in different solutions

Different solution	Phase
Water	Fe、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4
60 mg/L ZnSO_4	Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$
80 mg/L ZnSO_4	Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$
100 mg/L ZnSO_4	Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$
120 mg/L ZnSO_4	Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$

从表 1 中可以看出,Q235 在自来水中淬火的试样表面形成了 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的氧化膜,但由于水中氧离子浓度较低,其成膜的致密度也相对较低,出现了基体 Fe 的衍射峰。加入不同质量浓度 ZnSO_4 缓蚀剂的淬火试样表面均出现了 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 的保护膜。由于加入缓蚀剂质量浓度不同,生成保护膜的厚度不同,导致衍射峰的强度也不同。 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 的出现改善了螺纹钢的耐蚀性能,这是因为 Q235 螺纹钢在 ZnSO_4 水溶液中穿水淬火时发生如

下反应:



由于 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 沉淀膜能够有效地覆盖金属氧化膜的破损处,起到缓蚀作用;同时阻碍氧的扩散,抑制氧的去极化作用,使阴极极化曲线斜率增大,腐蚀电位负移,腐蚀电流降低,从而降低螺纹钢的腐蚀速度。这在电化学测试中得到了验证。

2.2 大气腐蚀

图 2 为试样在大气条件下腐蚀一个月后的表面形貌,从图中可以看出,自来水淬火试样表面生锈比较明显,其它条件试样也不同程度出现锈蚀现象,试样腐蚀程度逐步降低,特别当 ZnSO_4 缓蚀剂的质量浓度达到 120 mg/L 时,试样表面腐蚀程度明显降低。说明加入缓蚀剂后,对改善材料耐蚀性能有帮助。这

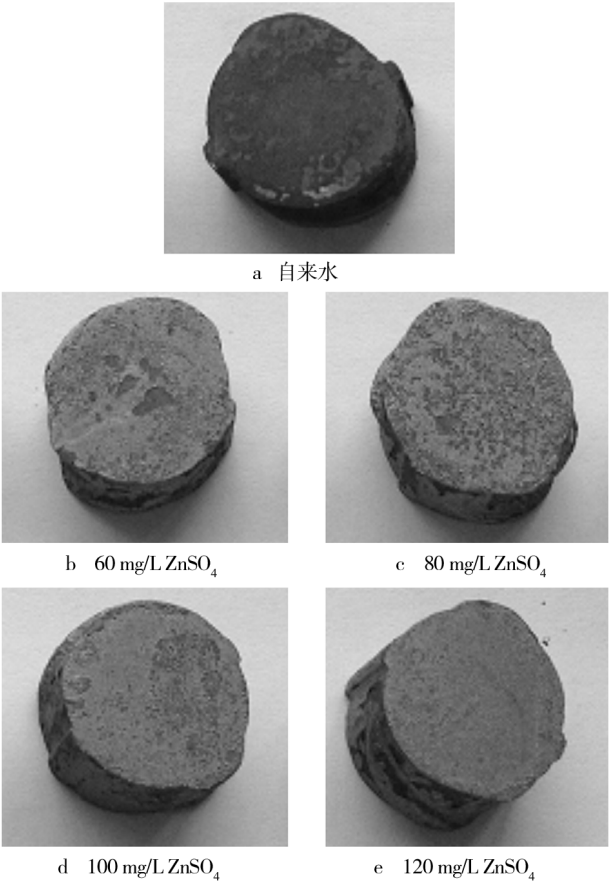


图 2 在大气条件下试样腐蚀一个月后表面形貌
Fig. 2 The surface morphology of corrosion sample in the condition of atmosphere after a month

一结果与大气腐蚀速率结果基本一致。

表 2 为在大气条件下经过一个月时间的腐蚀作用后,Q235 螺纹钢热处理后质量的变化量及其腐蚀速率。在不同介质中淬火后,各试样的腐蚀速率由高到低的顺序为:自来水、60 mg/L ZnSO_4 溶液、80 mg/L ZnSO_4 溶液、100 mg/L ZnSO_4 溶液、120 mg/L ZnSO_4 溶液。可见添加 ZnSO_4 缓蚀剂对降低金属的腐蚀速率是有益的。添加 ZnSO_4 缓蚀剂量越多,所形成的 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 保护膜越厚,越有利于降低螺纹钢的腐蚀速率。这是由于 ZnSO_4 是一种阴极型缓蚀剂,阴极型缓蚀剂通常是阳离子 Zn^{2+} 移向阴极表面,并形成化学沉淀保护膜 $\text{Zn}(\text{OH})_2$,与阳极型缓蚀剂相比,这种缓蚀剂所形成的沉淀膜如果不能完整覆盖基体金属表面时也不会加速腐蚀,但只要介质中存在有缓蚀剂组分和相应的共沉淀离子,沉淀膜的厚度就不断增加,有可能引起结垢的副作用,所以阴极型缓蚀剂的量不能添加太多。当缓蚀剂 ZnSO_4 添加量达到 120 mg/L 时,螺纹钢的腐蚀速率由自来水淬火试样的 $0.4583\text{ g}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ 降低到 $0.2083\text{ g}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$,螺纹钢的腐蚀速率降低了 54.5%,所以缓蚀剂 ZnSO_4 能明显降低 Q235 螺纹钢的腐蚀速率。

表 2 大气腐蚀一个月前后 Q235 螺纹钢质量变化
Tab. 2 The change in weight of Q235 steel after a month of atmospheric corrosion

Q235	Original weight /g	Weight after a month /g	Difference /g	Corrosion rate/ ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
Water	21.5950	21.5972	0.0022	0.4583
60 mg/L ZnSO_4	24.7780	24.7797	0.0017	0.3542
80 mg/L ZnSO_4	20.5898	20.5914	0.0016	0.3333
100 mg/L ZnSO_4	25.8155	25.8166	0.0011	0.2292
120 mg/L ZnSO_4	26.8213	26.8223	0.0010	0.2083

2.3 电化学分析

2.3.1 极化曲线分析

图 3 为不同热处理条件下 Q235 螺纹钢在模拟雨水中的极化曲线。

由图 3 可知,Q235 螺纹钢在模拟雨水中的极化形式为电荷控制下的电化学习极化,加入 ZnSO_4 缓蚀剂淬火试样的极化曲线明显右移,加入 ZnSO_4 缓蚀剂的量不同,曲线右移程度不同。根据 Tafel 外推法计算出腐蚀电位和腐蚀电流。表 3 为各试样的腐蚀电位和腐蚀电流。根据电化学的基本原理,试样的腐蚀电

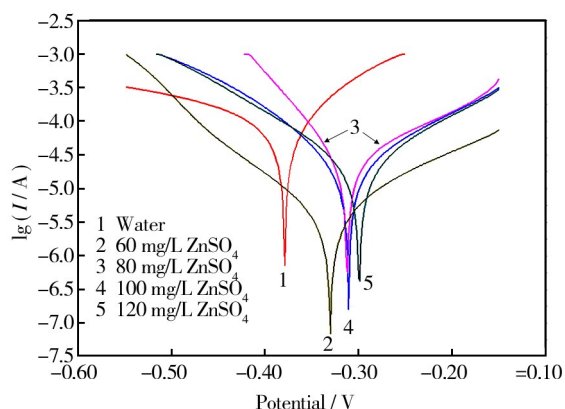


图3 Q235 螺纹钢极化曲线图

Fig. 3 The polarization curve of Q235 steel

表3 不同淬火介质中 Q235 螺纹钢试样的腐蚀电位和腐蚀电流
Tab.3 The corrosion potential and the corrosion current of Q235 steel in different quenchants

Corrosion condition	Corrosion potential/V	Corrosion current/($\times 10^{-5}$ A)
Water	-0.3752	5.2482
60 mg/L ZnSO_4	-0.3287	4.4668
80 mg/L ZnSO_4	-0.3195	1.8197
100 mg/L ZnSO_4	-0.3178	1.6595
120 mg/L ZnSO_4	-0.2997	1.6082

位越大,腐蚀电流越小,该试样的耐蚀性能越好。因此从表 3 中可知,添加不同质量浓度 ZnSO_4 缓蚀剂后可不同程度提高 Q235 螺纹钢的耐蚀性能。Q235 螺纹钢的腐蚀电位由自来水淬火时的 -0.3752 V 提高到加入 120 mg/L ZnSO_4 缓蚀剂后的 -0.2997 V,腐蚀电流由自来水淬火时的 5.2482×10^{-5} A 降低到加入 120 mg/L ZnSO_4 缓蚀剂后的 1.6082×10^{-5} A。这是因为淬火热处理介质不同,所形成的表面产物的物相以及产物膜厚度不同造成的。淬火介质为自来水时表面产物为 Fe 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 ,说明膜层不完整致密,露出基体 Fe ,耐蚀性最差。加入 ZnSO_4 缓蚀剂的淬火试样,所形成的腐蚀产物均为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$,添加 ZnSO_4 缓蚀剂的量越多形成的产物膜越厚越致密,其耐蚀性也越好。

2.3.2 交流阻抗分析

图 4 为不同淬火介质中 Q235 螺纹钢在模拟雨水中的交流阻抗谱图。由图 4 可知,该交流阻抗谱属于忽略浓差极化的电荷传递控制体系的电化学阻抗谱^[14-15],极化形式为电化学极化。可得出如图 5 所示等效电路示意图。

图 6 为等效电路的 Nyquist 图。由图 6 可知,交流阻抗谱图是以 $R_1 + 0.5R_r$ 为圆心,以 $0.5R_r$ 为半径的圆,在高频段,半圆与 X 轴相交于 R_1 处,当虚部值最大时,频率用 w_m 表示,而 $w_m = 2\pi f = \frac{1}{C_d R_r}$,由图 3 中数据计算出各淬火试样的动力学参数数据见表 4。

根据电化学腐蚀的基本原理:试样交流阻抗图谱半径越大,所对应材料的耐蚀性能越好,即用 R_r 值的大小表征材料的耐蚀性能。从表 4 中可以看出,添加 ZnSO_4 缓蚀剂后 R_r 值均大于自来水淬火试样的 R_r 值。

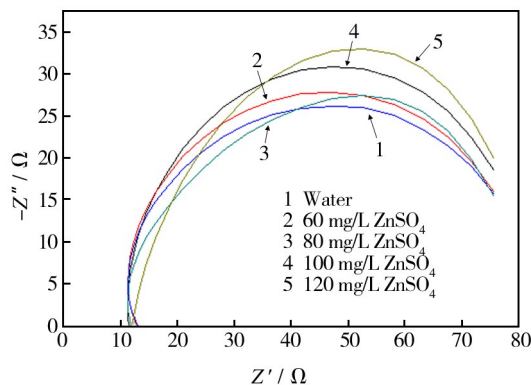


图4 Q235 螺纹钢交流阻抗图

Fig. 4 The AC impedance of Q235 steel

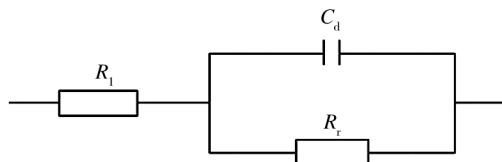


图5 电化学等效电路示意图

Fig. 5 The diagram of electrochemistry equivalent circuit

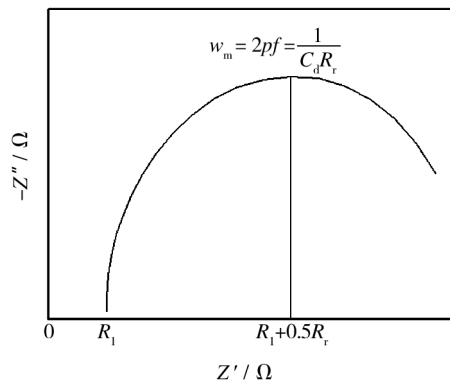


图6 等效电路的 Nyquist 图

Fig. 6 The Nyquist of equivalent circuit

表 4 电化学等效电路动力学参数
Tab.4 The dynamic parameters of electrochemical equivalent circuit

Parameters	R_1/Ω	$\frac{1}{2}R_t/\Omega$	$\left(R_1+\frac{1}{2}R_t\right)/\Omega$	f/Hz	$w_m/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	C_d/F
Water	12.03	12.79	24.82	1.21	7.60	2.06×10^{-2}
60 mg/L ZnSO ₄	11.50	13.42	24.92	1.20	7.54	1.98×10^{-2}
80 mg/L ZnSO ₄	11.52	13.73	25.25	1.05	6.59	2.21×10^{-2}
100 mg/L ZnSO ₄	11.01	15.04	26.05	1.78	10.68	1.25×10^{-2}
120 mg/L ZnSO ₄	11.53	16.26	27.79	3.16	19.84	6.20×10^{-3}

其中,自来水中淬火试样的 R_t 值最小,为 25.58 Ω ; 120 mg/L ZnSO₄ 缓蚀剂中淬火试样的 R_t 值最大,为 32.52 Ω 。所以添加 ZnSO₄ 缓蚀剂能有效提高 Q235 螺纹钢的耐蚀性,添加量不同提高程度不同。

3 结论

- 1) 添加 ZnSO₄ 缓蚀剂后 Q235 螺纹钢表面形成了 Fe₂O₃、Fe₃O₄ 和 Zn(OH)₂ 的物相膜层。
- 2) 各介质中淬火试样的腐蚀速率由高到低的顺序为:自来水淬火、60 mg/L ZnSO₄ 溶液淬火、80 mg/L ZnSO₄ 溶液淬火、100 mg/L ZnSO₄ 溶液淬火、120 mg/L ZnSO₄ 溶液淬火。
- 3) 添加 ZnSO₄ 缓蚀剂能提高材料的腐蚀电位,降低材料的腐蚀电流,可有效缓解 Q235 螺纹钢在模拟雨水中的腐蚀,Q235 在模拟雨水中的极化形式为电化学极化。

参考文献

[1] IAKY A I, EI M A, EI B, et al. Effect of Different Cooling Rates on Thermomechanically Processed High-strength Rebar Steel [J]. Materials Processing Technology, 2009, 209 (3): 1565—1569.

[2] FUENTE D L, DIAZ I, SINANCAS J, et al. Long-term Atmospheric Corrosion of Mild Steel [J]. Corrosion Science, 2011, 2011, 53 (9): 604—617.

[3] 刘金源,郑晓明,梁建珠. HRB335 螺纹钢筋穿水冷却金相组织分析 [J]. 物理测试, 2008, 26 (2): 23—25.

LIU Jin-yuan, ZHENG Xiao-ming, LIANG Jian-zhu. Micro-structure Analysis of HRB335 Reinforced Bar Penetrating into Cooling Water [J]. Physics Examination and Testing, 2008, 26 (2): 23—25.

[4] 宁保群,严泽生,赵捷,等. 淬火温度对 20MnSi 螺纹钢相

变过程的影响 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (20): 161—163.

NING Bao-qun, YAN Ze-sheng, ZHAO Jie, et al. Effect of Quenching Temperature on Phase Change Process for 20MnSi Deformed Steel Bar [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (20): 161—163.

[5] 魏洁,董俊华,柯伟. 新型化学剂快速冷却热轧螺纹钢的防锈性能研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21 (5): 468-471.

WEI Jie, DONG Jun-hua, KE Wei. Corrosion Resistance of Hot Rolled Rebar Quenched with a New Chemical Reagent [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21 (5): 468-471.

[6] 韩斌. 钢筋表面耐蚀性转化与评价方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.

HAN Bin. Research on the Corrosion Resistance transformation of the Surface and Assessment Method of Reinforced Steel Bar [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[7] 魏凤玉. 新型螺纹钢低温缓蚀淬火剂及耐腐蚀机理探讨 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

WEI Feng-yu. A Newtype of Rebar Corrosion Inhibition Agent Quenched at Low Temperature and Its Corrosion Resistant Mechanism [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.

[8] 张娟娟,魏连启. 高温防锈剂对螺纹钢耐蚀性能的影响研究 [J]. 计算机与应用化学, 2011, 28 (11): 1362—1366.

ZHANG Juan-juan, WEI Lian-qi. Study on Corrosion Resistance of High Temperature Anti-rust Agent on Rebar [J]. Computers and Applied Chemistry, 2011, 28 (11): 1362—1366.

[9] 李领,左白艳,高恩双. 新型磷酸盐在钢铁表面防锈性能研究 [J]. 盐业与化工, 2012, 41 (3): 10—13.

LI Ling, ZUO Bai-yan, GAO En-shuang. The Research of a New Type Phosphate of Anti-corrosion on the Surface of Steel Plate [J]. Salt and Chemical Industry, 2012, 41 (3): 10—13.

in a Microchannel by Dielectrophoresis [J]. Electrophoresis, 2011, 32(22): 3147—3156.

- [14] POHL H A. The Behavior of Neutral Matter in Nouniform Electric Field [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1978, 78: 1—4.

- [15] 于乐, 张鹤腾, 韩萍, 等. 介电泳的进展及物理参数对介

电泳的影响 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6): 176—180.

YU Yue, ZHANG He-teng, HAN Ping, et al. The Development of Dielectrophoresis and Effects of the Physical Parameter on Dielectrophoresis [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(6): 176—180.

(上接第 130 页)

- [18] SOLMAZ R, ŞAHİN E A, DÖNER A, et al. The Investigation of Synergistic Inhibition Effect of Rhodanine and Iodide Ion on the Corrosion of Copper in Sulphuric Acid Solution [J]. Corrosion Science, 2011, 53(10): 3231—3240.

- [19] DHAR H P, CONWAY B E, JOSHI K M. On the Form of Adsorption Isotherms for Substitutional Adsorption of Molecules of Different Sizes [J]. Electrochimica Acta, 1973, 18(11): 789—798.

- [20] HAMDY H H. Inhibition of Mild Steel Corrosion in Hydrochloric Acid Solution by Triazole Derivatives Part II: Time and Temperature Effects and Thermodynamic Treatments [J]. Electrochimica Acta, 2007, 53(4): 1722—1730.

- [21] SINGH A K, QURAISHI M A. Effect of Cefazolin on the Corrosion of Mild Steel in HCl Solution [J]. Corrosion Science, 2010, 52(1): 152—160.

(上接第 147 页)

- [10] 衣守志, 马洪运, 张琴. 螺纹钢水基防锈剂的制备及性能 [J]. 材料保护, 2012, 45(1): 30—32.

YI Shou-zhi, MA Hong-yun, ZHANG Qin. Preparation and Performance of Water-based Rust Inhibitor for Twisted Steel [J]. Materials Protection, 2012, 45(1): 30—32.

- [11] 魏凤玉, 胡芳, 黄登奎. 新型试剂快速冷却螺纹钢的耐蚀性能 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(12): 151—154

WEI Feng-yu, HU Fang, HUANG Deng-luan. Corrosion Performance of Bebar Quenched in a Novel Agent [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(12): 151—154.

- [12] 陈泽民, 路品, 苏艳丽. 钢铁水基防锈剂的研制及其性能 [J]. 材料保护, 2011, 44(6): 58—60.

CHEN Ze-min, LU Pin, SU Yan-li. Preparation and Performance of Water-based Rust Inhibitor for Steel [J]. Materials Protection, 2011, 44(6): 58—60.

- [13] 朱弘琦, 朱曾涛. 化学剂冷却条件下 20MnSi 材料的耐蚀

性能研究 [J]. 铸造技术, 2015, 36(1): 83—86.

ZHU Hong-qi, ZHU Zeng-tao. Study on Corrosion Resistance of 20MnSi Steel under Chemical Agent Cooling Condition [J]. Foundry Technology, 2015, 36(1): 83—86.

- [14] 朱青, 朱明, 余勇. AZ91D 镁合金 Mo-Mn 无铬转化膜的制备与耐蚀性 [J]. 表面技术, 2015, 44(8): 9—14.

ZHU Qing, ZHU Ming, YU Yong. Preparation and Corrosion Resistance of Mo-Mn Chromium-free Conversion Coating Formed on AZ91D Magnesium Alloys [J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 9—14.

- [15] 杨培燕, 顾宝珊, 王岩. 热浸镀锌层在模拟混凝土环境下耐蚀性能研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(4): 68—72.

YANG Pei-yan, GU Bao-shan, WANG Yan. Study on Corrosion Properties of Galvanizing Coating in Simulated Concrete Environment [J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(4): 68—72.

(上接第 154 页)

WANG Hai-jun, HAN Zhi-hai, WANG Jian, et al. Study on the Performance of Supersonic Plasma Sprayed WC-12Co Coatings [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2006, 20(1): 85—89.

- [16] 王海斗, 徐滨士, 姜祎, 等. 超音速等离子喷涂层的组织及性能分析 [J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 1—4.

WANG Hai-dou, XU Bin-shi, JIANG Yi, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Supersonic Plasma

Sprayed Coating [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 1—4.

- [17] 邓春明, 周克崧, 刘敏, 等. 大气等离子喷涂 Al_2O_3 -3% TiO_2 涂层的性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 23(1): 19—23.

DENG Chun-ming, ZHOU Ke-song, LIU Min, et al. Properties of Air Plasma Sprayed Al_2O_3 -3% TiO_2 Coatings [J]. China Surface Engineering, 2011, 23(1): 19—23.