

层流冷却浊环水中 Cl^- 质量浓度对 SPHC 钢板的腐蚀行为

薛佳威^{1a}, 张博睿², 吴永鹏^{1a}, 陈雨来^{1a,1b}, 余伟^{1a,1b}

(1. 北京科技大学 a. 工程技术研究院 b. 国家板带生产先进装备工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 宁波钢铁公司技术中心, 浙江 宁波 315800)

摘要: **目的** 为了明确层流冷却浊环水中 Cl^- 质量浓度对 SPHC 钢板腐蚀的影响, 提高 SPHC 钢板在潮湿环境下存放发生腐蚀后的表面质量。**方法** 通过全浸腐蚀试验进行模拟。已有研究表明层流冷却浊环水中 Cl^- 的质量浓度与钢板表面 Cl^- 的残留量呈线性正比关系, 因此设置不同 Cl^- 质量浓度对 SPHC 钢板的腐蚀行为进行研究。通过数码相机、扫描电镜和激光共聚焦显微镜分析宏观腐蚀形貌和腐蚀坑形貌, 采用失重法测量不同 Cl^- 质量浓度下的均匀腐蚀速率, 电化学测试分析不同 Cl^- 质量浓度下覆盖腐蚀产物膜试样的电化学特征。**结果** Cl^- 质量浓度为 60、300、1 000 mg/L 时, 均匀腐蚀速率都呈现先增大后减小的趋势, 这是点蚀的形成扩展和腐蚀产物的缓蚀作用所致。 Cl^- 质量浓度升高, 穿过基体表面的离子增多, 缩短了点蚀形成和扩展的时间, 均匀腐蚀速率增大。 Cl^- 质量浓度的升高使得基体表面钝化膜被加速破坏, 腐蚀电流密度增大, 形成的锈层极易被溶解, 阻抗值上下波动, 这种情况下形成的锈层对基体不具有保护作用。**结论** 降低层流冷却浊环水中 Cl^- 的质量浓度是提高潮湿环境下腐蚀后 SPHC 钢板表面质量的有效途径。

关键词: SPHC 钢板; 全浸腐蚀试验; Cl^- 质量浓度; 腐蚀行为; 电化学; 表面质量

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)10-0269-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.10.028

Corrosion Behavior of SPHC Steel Plates by Cl^- Concentration in Laminar Cooling Turbid Ring Water

XUE Jia-wei^{1a}, ZHANG Bo-rui², WU Yong-peng^{1a}, CHEN Yu-lai^{1a}, YU Wei^{1a,1b}

(1. a. Institute of Engineering Technology, b. National Engineering Technology Research Center of Advanced Equipment for Strip Production, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Ningbo Iron and Steel Company Technology Center, Zhejiang Ningbo 315800, China)

ABSTRACT: The surface quality of steel products has always been a major concern. In the steel rolling process, in order to reduce production costs, laminar flow cooling of steel plates is often performed using recyclable water treated by turbid ring water systems. Due to the rapid evaporation of water during the cooling process, there will be some ions left on the surface of

收稿日期: 2021-09-29; 修订日期: 2022-06-17

Received: 2021-09-29; Revised: 2022-06-17

作者简介: 薛佳威 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: XUE Jia-wei (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: corrosion and protection.

通讯作者: 余伟 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料。

Corresponding author: YU Wei (1968-), Male, Doctor, Professor, Research focus: metallic materials.

引文格式: 薛佳威, 张博睿, 吴永鹏, 等. 层流冷却浊环水中 Cl^- 质量浓度对 SPHC 钢板的腐蚀行为[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 269-275.

XUE Jia-wei, ZHANG Bo-rui, WU Yong-peng, et al. Corrosion Behavior of SPHC Steel Plates by Cl^- Concentration in Laminar Cooling Turbid Ring Water[J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 269-275.

the steel plate, which will make the steel plate corrosive in the later storage process. In order to clarify the effect of the concentration of Cl^- in laminar cooling turbid ring water on the corrosion of SPHC steel plates, so as to improve the surface quality of SPHC steel plates after corrosion occurs when they are stored in a humid environment, simulations were performed by full immersion corrosion tests. It was shown that the concentration of Cl^- in the laminar cooling turbid ring water showed a linear and positive relationship with the residual amount of Cl^- on the surface of steel plates, so the corrosion behavior of SPHC steel plates was studied by setting different concentrations of Cl^- . The macroscopic corrosion morphology of the specimens was analyzed by digital camera. The surface morphology and depth of corrosion pits on the specimens were analyzed by scanning electron microscopy and laser confocal microscopy, respectively. The loss-in-weight method was used to measure the uniform corrosion rate for different concentrations of Cl^- . Electrochemical tests were performed to analyze the electrochemical characteristics of specimens covered with corrosion product films at different concentrations of Cl^- . The results show that whether the concentration of Cl^- is 60 mg/L, 300 mg/L or 1 000 mg/L, the uniform corrosion rate shows a trend of increasing first and then decreasing, which is caused by the formation and expansion of pitting corrosion in the early and middle stages of corrosion and the corrosion retardation of corrosion products in the late stages of corrosion. The increase in the concentration of Cl^- increases the number of ions crossing the surface of the substrate, shortening the time for pitting to form and expand, and increasing the uniform corrosion rate. Although the accelerated corrosion rate will also accelerate the formation of corrosion products, the high concentration of Cl^- will destroy the protective effect of corrosion products on the substrate. The analysis of the polarization curve shows that the increase of the concentration of Cl^- makes the passivation film on the surface of the substrate be accelerated and destroyed, and the corrosion current density increases. In addition, the impedance value fluctuates at the high Cl^- concentration, indicating that the rust layer formed is easily dissolved, and this rust layer does not have a good protective effect on the substrate. Therefore, the concentration of Cl^- in the turbid ring water needs to be reduced in order to reduce the residual amount of Cl^- on the surface of the steel plate. In summary, reducing the concentration of Cl^- in laminar cooling turbid ring water is an effective way to improve the surface quality of SPHC steel plates after corrosion in a humid environment.

KEY WORDS: SPHC steel plate; full immersion corrosion test; Cl^- concentration; corrosion behavior; electrochemistry; surface quality

过去,对钢铁产品质量判定主要集中在基材本身的力学性能,而较少关注外观。现在,钢铁产品表面质量已经成为钢材质量的重要组成部分^[1]。浊环水主要用于轧钢过程中的除磷及直接冷却,通过浊环水系统的物理化学处理,控制污染物含量,达到循环利用和达标排放^[2]。如果层流冷却浊环水中离子质量浓度(尤其是 Cl^- 质量浓度)不达标,在后期钢板冷却和存放期间会形成腐蚀坑,直接影响产品销售,严重的锈蚀会影响产品的表面质量和性能,甚至影响产品的力学性能^[3-4]。

钢板表面形成腐蚀坑的原因主要是 Cl^- 的点蚀作用^[5]。 Cl^- 对金属的腐蚀一方面是降低钢板表面钝化膜形成的可能或加速对钝化膜的破坏,从而促进局部腐蚀;二是使得水溶液中溶解氧含量降低,缓解钢板的腐蚀。 Cl^- 半径小、具有很强的穿透力,能够被金属表面较强吸附。 Cl^- 质量浓度越高,生成高质量浓度的 FeCl_2 , FeCl_2 的水解会使得溶液 pH 降低,加剧腐蚀^[6-8]。层流冷却浊环水中 Cl^- 质量浓度与钢板表面 Cl^- 残留量呈线性正比关系, Cl^- 质量浓度为 60 mg/L 时,腐蚀速率出现了极大值^[9],但并未对其进行更深入的表征研究。

对现场水质进行检测, Cl^- 质量浓度高达 300 mg/L,这会成为钢板表面形成腐蚀坑的关键因素。在本工作中,将试样分别在 60、300、1 000 mg/L 的 Cl^- 质量浓度下进行全浸腐蚀试验,多种表征手段分析,研究 Cl^- 对钢板的腐蚀行为。

1 试验

1.1 材料与方法

试验采用某钢厂提供的 SPHC 钢板,其化学成分见表 1。采用全浸试验装置进行腐蚀试验(试验装置示意图如图 1 所示)。

试验溶液含 60、300、1 000 mg/L Cl^- 的 NaCl 溶液。溶液 pH 为 8。失重试样尺寸为 60 mm×30 mm×3 mm,形貌观察试样尺寸为 20 mm×10 mm×3 mm,

表 1 试验钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of test steel

	wt. %					
Sample	C	Si	Mn	S	P	Al
SPHC	0.050	≤0.030	0.200	0.020	≤0.020	0.015-0.060

电化学试样电极暴露面积为 1 cm^2 。试验前将试样打磨至 800#砂纸并用无水乙醇清洗。试验周期为 24、72、120、168、240 h, 水浴锅控制温度恒为 40°C 。

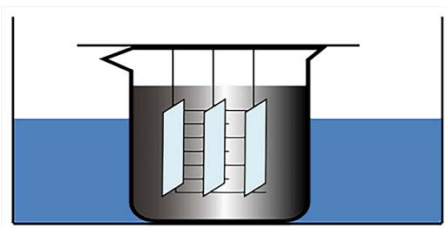


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test device

1.2 形貌观察及腐蚀速率分析

采用数码相机对试样表面宏观形貌进行观察, 采用 ZEISS ULTRA55 扫描电镜和 LEXT QLS4100 激光共聚焦显微镜对腐蚀坑的微观形貌进行观察。将吹干后的试样用电子分析天平称量, 试验结束后去除锈层, 超声清洗吹干后, 再次用电子分析天平称量, 分析腐蚀速率。

1.3 电化学测试

采用 RST5200F 电化学工作站测试极化曲线和电化学交流阻抗谱 EIS。采用三电极体系, 辅助电极为铂片电极, 参比电极为饱和甘汞电极, 工作电极为在不同 Cl^- 质量浓度溶液全浸试验不同周期后得到的锈

层试样。测试介质为 5% 的 NaCl 溶液。测量 EIS, 起始频率为 100 kHz, 终止频率为 10 mHz, 交流振幅为 5 mV。测量极化曲线, 初始电位和终止电位分别为 -0.25 、 0.25 V (vs.OCP) , 扫描速度为 0.5 mV/s 。

2 结果及分析

2.1 形貌观察

图 2 为 60、300、1 000 mg/L Cl^- 质量浓度下全浸腐蚀试验 24 h 和 240 h 后带锈试样和除锈后试样的宏观形貌。由于在试验过程中很难避免锈层的脱落, 通过对除锈试样的观察可以看出 Cl^- 质量浓度越高, 试样被腐蚀的程度越严重。 Cl^- 对钢板的腐蚀由点蚀萌生开始, 随着腐蚀周期的延长, 点蚀进行扩展, 由局部腐蚀逐步发展为全面腐蚀。腐蚀前期, Cl^- 质量浓度越高, 点蚀发生面积越大, 腐蚀程度越大; 腐蚀中后期, 三者都表现为全面腐蚀。

图 3 为 60、300、1 000 mg/L Cl^- 质量浓度下全浸腐蚀试验 72 h 和 168 h 后去除锈层试样扫描电镜下的腐蚀坑微观形貌。当 Cl^- 质量浓度为 60 mg/L 时, 腐蚀前期, 腐蚀坑尺寸小, 随着腐蚀周期的延长, 腐蚀坑尺寸变大, 腐蚀后期, 基体表面相对平整。同样腐蚀 72 h 时, Cl^- 质量浓度为 300 mg/L 时的腐蚀程度比 Cl^- 质量浓度为 60 mg/L 时的大, Cl^- 质量浓度为 300 mg/L 时的基体表面表现为大坑包小坑的情况, 腐蚀周期延长, 小的腐蚀坑尺寸变大。当 Cl^- 质量浓度为 1 000 mg/L

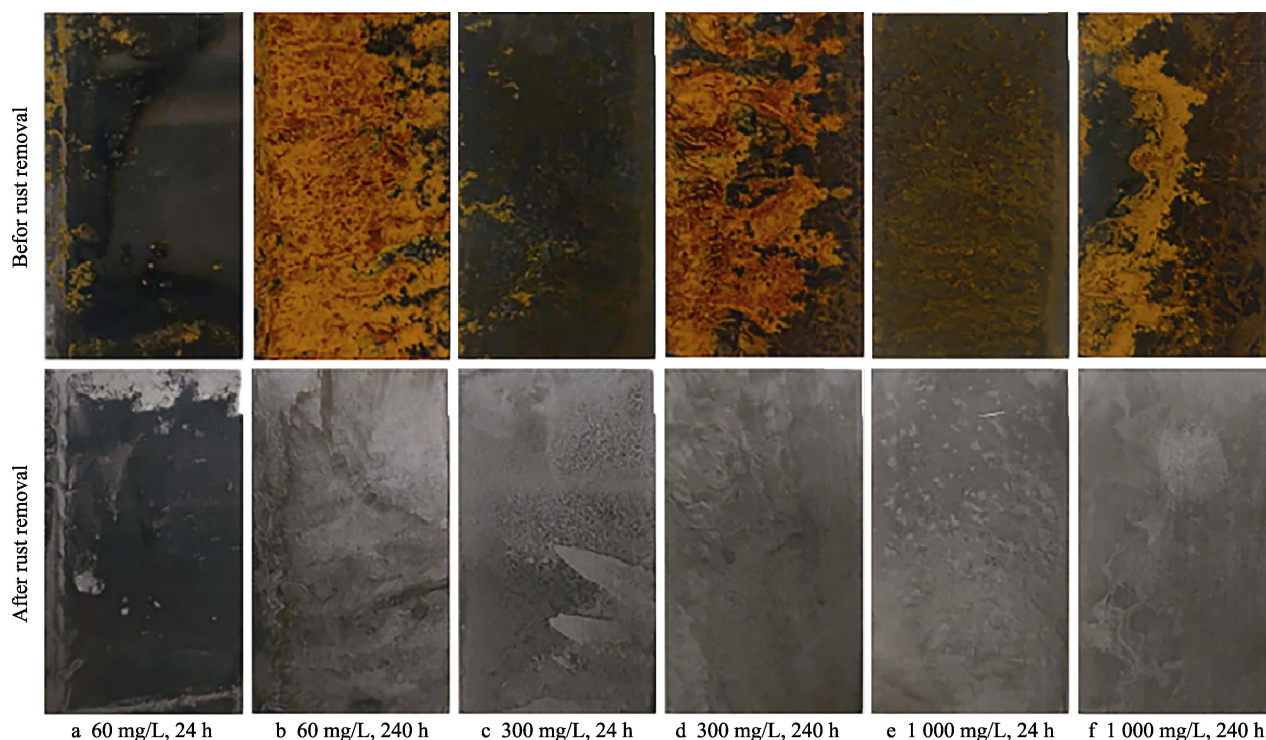


图 2 不同质量浓度 Cl^- 下宏观腐蚀形貌和除锈后基体的宏观腐蚀形貌

Fig.2 The macroscopic corrosion morphology of different concentrations of Cl^- and the macroscopic corrosion morphology of the substrate after rust removal

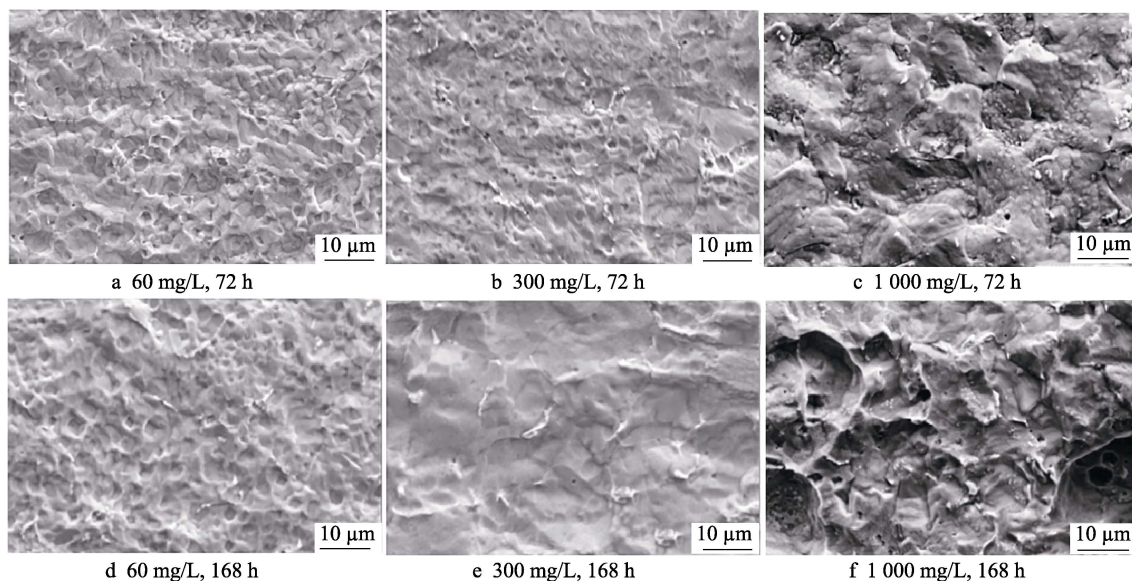


图3 试样在不同 Cl^- 质量浓度下浸泡不同周期除锈后的腐蚀坑微观腐蚀形貌
Fig.3 The microscopic corrosion morphology of the corrosion pits of the sample after immersion in different Cl^- concentrations for different periods of rust removal

时, 腐蚀前期, 腐蚀坑尺寸明显比同周期下其他 2 种质量浓度的腐蚀坑尺寸大, 而且在腐蚀后期, 腐蚀向更深处发生。

利用激光共聚焦显微镜对腐蚀坑进行深度分析。图 4 为 Cl^- 质量浓度为 60、300、1 000 mg/L 不同腐蚀周期的腐蚀坑深度图。腐蚀前期, 腐蚀坑深度尺寸随着质量浓度的升高不断变大, 说明在同腐蚀周期下, 质量浓度越高, 腐蚀越严重; 腐蚀中后期, 质量浓度升高, 腐蚀坑深度变浅, 这是由于腐蚀加剧, 基体发生下沉式腐蚀, 基体表面被腐蚀脱落, 与在扫描电镜下分析的结果一致。

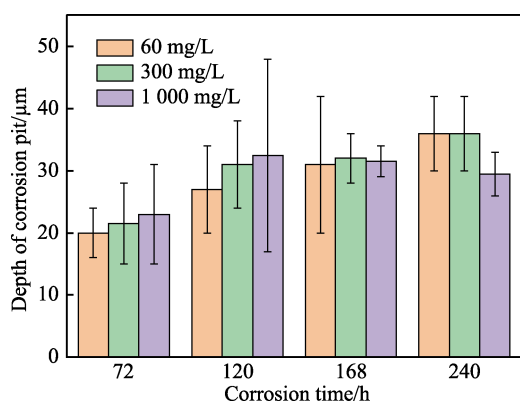


图4 试样在不同 Cl^- 质量浓度下腐蚀不同周期的腐蚀坑深度

Fig.4 Corrosion pit depth of specimens at different Cl^- concentrations

2.2 腐蚀速率分析

图 5 为试样在 Cl^- 质量浓度为 60、300、1 000 mg/L 时的腐蚀速率。用 Origin 软件进行数据拟合, 回归腐

蚀速率数学模型见式 (1)。

$$y = \frac{a}{1 + e^{-kx+b}} \quad (1)$$

腐蚀前期是点蚀萌生阶段, 腐蚀速率较小, 随着 Cl^- 质量浓度的升高, 点蚀萌生所需要的时间缩短, 进而加快腐蚀。腐蚀中期, 点蚀扩展, 腐蚀速率加快, 同时也加快了锈层的形成, Cl^- 质量浓度的升高同样加快了这一过程。腐蚀后期, 由于锈层的缓蚀作用, 腐蚀速率有所下降。

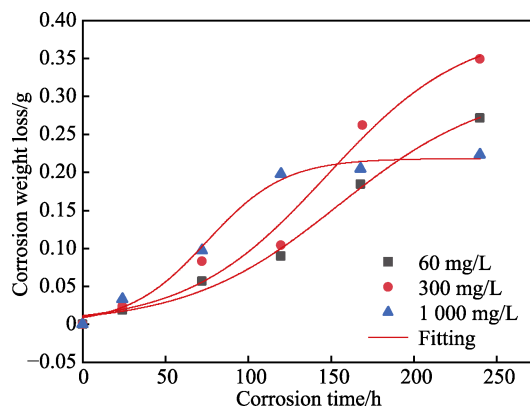


图5 试样在不同 Cl^- 质量浓度下的腐蚀速率
Fig.5 Corrosion rate of specimens at different Cl^- concentrations

2.3 电化学分析

2.3.1 极化曲线

图 6 为在 300、1 000 mg/L Cl^- 质量浓度及不同腐蚀周期下的极化曲线。腐蚀浸泡后, 基体表面的钝化膜被破坏, 1 000 mg/L Cl^- 质量浓度下阳极电位更正, 腐蚀速率更大。表 2 为相对应的极化曲线参数。 Cl^-

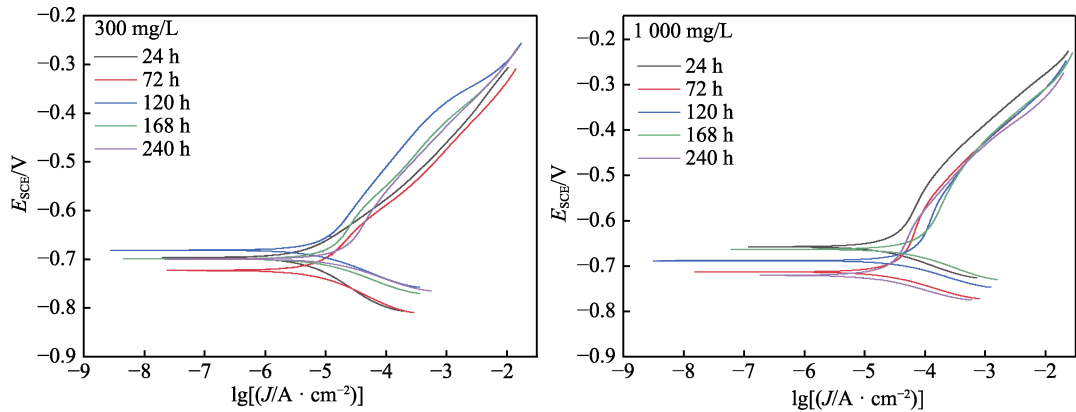


图 6 不同质量浓度 Cl⁻及不同腐蚀周期下的极化曲线
Fig.6 Polarization curves at different concentrations of Cl⁻ with different corrosion cycles

表 2 试样在不同 Cl⁻质量浓度腐蚀不同周期下极化曲线参数
Tab.2 Parameters of polarization curves of specimens with different Cl⁻ concentrations

Cl ⁻ concentrations	Parameters	24 h	72 h	120 h	168 h	240 h
60	E_0/V	-0.666 2	-0.695 2	-0.667 9	-0.697 7	-0.742 2
	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	2.912 7	4.605 4	6.109 7	5.832 3	4.980 5
300	E_0/V	-0.696 5	-0.722 9	-0.681 5	-0.699 3	-0.699 3
	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	3.725 1	6.049 0	6.086 2	7.318 2	11.209 8
1 000	E_0/V	-0.657 4	-0.712 6	-0.688	-0.669 2	-0.721 0
	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	16.560 0	18.092 2	31.695 6	40.656 1	13.165 3

质量浓度为 60 mg/L 时, 腐蚀电流密度先增大后减小; Cl⁻质量浓度为 300 mg/L 时, 腐蚀电流密度一直增大; Cl⁻质量浓度为 1 000 mg/L 时, 腐蚀电流密度先增大后减小。但是总体来看, 电流密度比前两者的大, 说明 Cl⁻质量浓度的升高加快了对基体钝化膜的破坏。

2.3.2 交流阻抗谱

使用 Zview 软件对阻抗谱数据进行拟合处理, 图 7 为在 60、1 000 mg/L Cl⁻质量浓度及不同腐蚀周期下的阻抗谱。一般情况下, 锈层的电阻在高频区占主导地位, 在铁锈界面上的电荷转移电阻在低频区下占主导地位^[10-11]。高频区半径大小能评价锈层电阻的大小, 进而分析锈层对基体的保护作用。在 60 mg/L Cl⁻

质量浓度下, 随着腐蚀周期的延长, 阻抗值呈现增大的趋势。在 300 mg/L 和 1 000 mg/L Cl⁻质量浓度下, 随着腐蚀周期的延长, 阻抗值都呈现上下波动的趋势, 锈层处于不断形成和被破坏的状态, 说明在高 Cl⁻质量浓度下形成的锈层对基体没有保护作用。

Cl⁻的半径很小, 具有很强的侵蚀性, Cl⁻质量浓度的升高使得溶液的电导率增加, 为“点蚀的形核”提供了有利条件, 在点蚀部位发生 Cl⁻富集, 这不仅为“新的形核”提供了条件, 而且加快了长大, 表现为腐蚀坑尺寸增大。点蚀的发生伴随着锈层的形成, 锈层区域和无锈层区域之间形成电偶电池^[12]。再加上疏松多孔的锈层对水溶液的吸附作用, 促进了锈层下

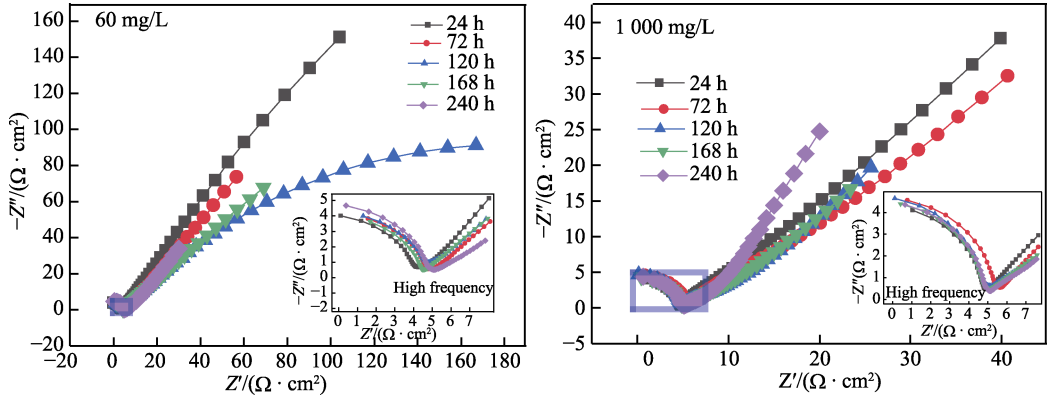


图 7 不同 Cl⁻质量浓度及不同腐蚀周期下的阻抗谱
Fig.7 Impedance spectra at different corrosion cycles with different Cl⁻ concentrations

基体的腐蚀^[13-14],随着周期的延长,从宏观来看试样表面由局部腐蚀转变为全面腐蚀。从微观腐蚀坑形貌来看,Cl⁻使得溶液导电性增加,铁失去电子,优先形成点蚀,当溶液中存在高质量浓度、高导电的FeCl₂时,pH值下降,加剧腐蚀^[15]。随着腐蚀周期的延长,点蚀萌生增多,进而点蚀扩展,表现为腐蚀坑尺寸以及深度的增大,而后各个腐蚀坑之间发生连接,基体表面发生腐蚀脱落,表现为相对平整的表面。Cl⁻质量浓度的升高使点蚀更易发生,而且腐蚀坑的形成成为Cl⁻的进一步点蚀提供了有利条件,使得腐蚀向基体的更深处进行,发生下沉式腐蚀,这也是腐蚀坑深度变浅的原因。

腐蚀前期,Cl⁻进入基体表面所需能量较大,基体表面的钝化膜较难被破坏^[16-17],腐蚀速率和腐蚀电流密度较小;Cl⁻质量浓度的升高使得基体更易失去电子生成FeCl₂,发生自酸性腐蚀,使得腐蚀加剧,因此腐蚀前期300 mg/L和1 000 mg/L Cl⁻质量浓度下的腐蚀电流密度较60 mg/L Cl⁻质量浓度下的大。随着腐蚀周期的延长,腐蚀中期腐蚀速率和腐蚀电流密度都比较大。腐蚀加快的同时也加快了腐蚀产物的生成,腐蚀产物大部分为 α -FeOOH、 γ -FeOOH,还有Fe₃O₄以及Fe₂O₃^[18-20],利用XRD分析锈层物相,如图8所示。腐蚀后期, α -FeOOH含量升高, α -FeOOH的热力学性质最稳定,锈层的缓蚀作用使三者的腐蚀速率都有所减小,而且Cl⁻质量浓度越高, α -FeOOH含量越高,因此1 000 mg/L Cl⁻质量浓度下腐蚀速率在后期急剧下降,除300 mg/L Cl⁻质量浓度外,腐蚀电流密度都呈现减小的趋势。通过对带锈层电极阻抗谱的测量^[21-23],综合腐蚀电流密度分析^[24-26],高Cl⁻质量浓度下的阻抗值上下波动再次证实了腐蚀程度加重。

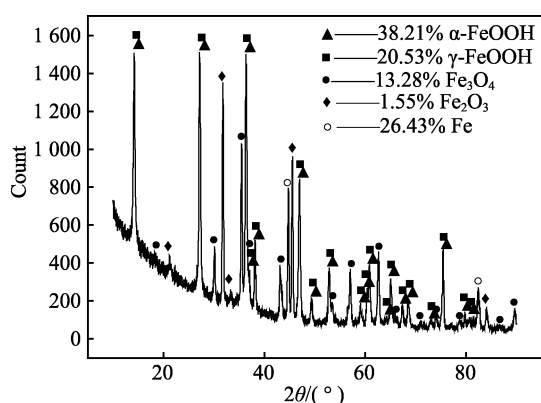


图8 试样被Cl⁻腐蚀后的腐蚀产物
Fig.8 Corrosion products of the specimen after corrosion by Cl⁻

综上所述,Cl⁻质量浓度的升高,使得溶液的导电率增大,发生自酸性腐蚀,点蚀萌生和扩展加快,腐蚀速率以及腐蚀电流密度增大,形成的锈层对基体没有保护作用,大大降低了钢板的表面质量。结合已

有研究,降低层流冷却浊环水中Cl⁻的质量浓度是提高SPHC钢板表面质量的有效途径。

3 结论

1) Cl⁻的半径很小,具有很强的吸附性及侵蚀性,Cl⁻质量浓度的升高使得溶液的导电性增加,加剧腐蚀。从宏观形貌来看,缩短了由局部腐蚀到全面腐蚀的时间;从微观形貌来看,腐蚀前期,腐蚀坑大小和深度尺寸都增大,腐蚀中后期,大腐蚀坑中出现小腐蚀坑,基体表面被腐蚀脱落,向基体更深处腐蚀,腐蚀坑深度略有变浅。

2) 通过失重分析表明,Cl⁻质量浓度的升高使腐蚀速率明显增大。极化曲线测量结果显示,Cl⁻质量浓度升高,腐蚀电流密度也增大,说明钝化膜被破坏严重,形成的锈层阻抗值上下波动,对基体没有保护作用,因此在实际生产中要降低层流冷却浊环水中Cl⁻的质量浓度,从而减少钢板表面Cl⁻的残留量。

参考文献:

- [1] 查方来. 水质对热轧钢板表面质量的影响及净化水质联合工艺研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015: 3-15.
ZHA Fang-lai. The Influence of the Water Quality on the Surface Quality of the Hot Rolling Steel Sheet and the Combined Purification Process Research[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015: 3-15.
- [2] 安福怀, 王学江. 水处理技术在轧钢生产中的应用[J]. 宽厚板, 2007, 13(3): 38-41.
AN Fu-huai, WANG Xue-jiang. Application of Water Treatment Technology in Rolling Production[J]. Wide and Heavy Plate, 2007, 13(3): 38-41.
- [3] 张华, 钱余海, 齐慧滨, 等. 汽车热轧钢板的锈蚀行为及预防措施[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(6): 316-318, 333.
ZHANG Hua, QIAN Yu-hai, QI Hui-bin, et al. Rusting Behavior and Preventing Measures of Hot-Rolled Steel Plates for Automobile[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(6): 316-318, 333.
- [4] 刘李斌, 康永林, 宋仁伯, 等. 1 000 MPa级超高强度热镀锌钢板耐腐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(10): 723-730.
LIU Li-bin, KANG Yong-lin, SONG Ren-bo, et al. Corrosion Behavior of 1 000 MPa Grade Ultra-High Strength Hot-Dip Galvanized Steel Sheets[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(10): 723-730.
- [5] 崔志峰, 韩一纯, 庄力健, 等. 在Cl⁻环境下金属腐蚀行为和机理[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2011, 28(4): 1-5.
CUI Zhi-feng, HAN Yi-chun, ZHUANG Li-jian, et al. Corrosion Behavior and Mechanisms of Metals in Cl⁻ Environment[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2011, 28(4): 1-5.
- [6] 王旭旦, 毛松林, 许国峰, 等. 轧钢浊环水系统水质控

- 制分析与对策[J]. 冶金动力, 2019, 38(9): 71-75, 79.
- WANG Xu-dan, MAO Song-lin, XU Guo-feng, et al. Analysis and Countermeasures of Water Quality Control of Hot Rolling Turbid Circulating Water System[J]. Metallurgical Power, 2019, 38(9): 71-75, 79.
- [7] 伊帆, 李德豪, 郎春燕, 等. 模拟循环冷却水中几种因素对碳钢腐蚀的影响[J]. 工业水处理, 2012, 32(8): 45-49.
- YI Fan, LI De-hao, LANG Chun-yan, et al. Corrosive Influence of Several Important Factors in Simulated Circulating Cooling Water on Carbon Steel[J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(8): 45-49.
- [8] 张贵泉, 孙雅萍, 苏尧, 等. 氯离子对电站常用金属材料腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(4): 14-18.
- ZHANG Gui-quan, SUN Ya-ping, SU Yao, et al. Influence of Chlorine Ion on Corrosion Behavior of Metal Materials Used in Power Plants[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(4): 14-18.
- [9] 李沛, 程学群, 郭秋实, 等. Cl^- 残留对热轧碳钢大气腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(3): 228-232.
- LI Pei, CHENG Xue-qun, GUO Qiu-shi, et al. Influence of Residual Cl^- on Corrosion Behavior of Hot Rolled Steel in Atmospheric Environment[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(3): 228-232.
- [10] TANG Xiao, MA Chao ran, ORAZEM M E, et al. Local Electrochemical Characteristics of Pure Iron under a Saline Droplet II: Local Corrosion Kinetics[J]. Electrochimica Acta, 2020, 354: 136631.
- [11] 雒娅楠, 宋诗哲, 金威贤, 等. 碳钢试片实海电化学检测与腐蚀规律的相关性[J]. 化工学报, 2008, 59(11): 2864-2869.
- LUO Ya-nan, SONG Shi-zhe, JIN Wei-xian, et al. In Field Electrochemical Detections and Corrosion Behavior of Carbon Steel Samples[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(11): 2864-2869.
- [12] 江旭, 柳伟, 杨善武, 等. Cl^- 质量浓度对低合金钢周期浸润腐蚀形态和腐蚀电化学行为的影响[C]//裕祥杯全国青年腐蚀与防护科技论文讲评会暨中国青年腐蚀与防护研讨会. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2007: 61-68.
- JIANG Xu, LIU Wei, YANG Shan-wu, et al. The Effect of Cl^- Concentration on the Cyclic Wetting Corrosion Morphology and Corrosion Electrochemical Behavior of Low Alloy Steel[C]//Yuxiang Cup National Youth Corrosion and Protection Science and Technology Papers Review and China Youth Corrosion and Protection Symposium. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007: 61-68.
- [13] 周旬, 徐海卫, 钟声, 等. 热轧水质问题浅析[J]. 中国金属通报, 2020(2): 230-231.
- ZHOU Xun, XU Hai-wei, ZHONG Sheng, et al. Analysis of Hot Rolling Water Quality[J]. China Metal Bulletin, 2020(2): 230-231.
- [14] SUN Mei-hui, YANG Xiao-jia, DU Cui-wei, et al. Distinct Beneficial Effect of Sn on the Corrosion Resistance of Cr-Mo Low Alloy Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 81: 175-189.
- [15] 薛焯, 郝文瑞. 工业再生水对循环冷却水系统腐蚀的分析研究[J]. 包钢科技, 2020, 46(3): 76-78.
- XUE Ye, HAO Wen-rui. Analytical Research on Corrosion of Industrial Reclaimed Water to Circulating Cooling Water System[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2020, 46(3): 76-78.
- [16] 郭瑞金, 火时中. 小孔腐蚀诱发过程的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1986, 6(2): 113-122.
- GUO Rui-jin, HUO Shi-zhong. An in Vestigation of Pitting Initiation Process[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1986, 6(2): 113-122.
- [17] QIAO Chuang, WANG Ming-na, HAO Long, et al. Temperature and NaCl Deposition Dependent Corrosion of SAC305 Solder Alloy in Simulated Marine Atmosphere[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 75: 252-264.
- [18] 陈惠玲, 魏雨. 一种碳钢在模拟潮湿环境中腐蚀机理的探讨[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(4): 255-257.
- CHEN Hui-ling, WEI Yu. Corrosion Mechanism of a Carbon Steel in Simulated Humid Atmospheres[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(4): 255-257.
- [19] 陈小平, 王向东, 米丰毅, 等. 耐候钢的腐蚀过程及锈层形成机理[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(12): 1093-1097.
- CHEN Xiao-ping, WANG Xiang-dong, MI Feng-yi, et al. Corrosion Process and Rust Formation of Weathering Steel [J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(12): 1093-1097.
- [20] 陈惠玲, 李晓娟, 魏雨. 碳钢在含氯离子环境中腐蚀机理的研究[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(1): 17-19.
- CHEN Hui-ling, LI Xiao-juan, WEI Yu. Corrosion Mechanism of Carbon Steel in Chloride Solution[J]. Corrosion & Protection, 2007, 28(1): 17-19.
- [21] DONG C F, XUE H B, LI X G, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Hot-Rolled Steel under Oxide Scale in Chloride Solution[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(17): 4223-4228.
- [22] 阳建君, 旷焕, 范才河, 等. 不同 NaCl 溶液质量浓度中 2A96 铝锂合金的腐蚀行为研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2019, 47(6): 25-29.
- YANG Jian-jun, KUANG Huan, FAN Cai-he, et al. Study on Corrosion Behavior of 2A96 Aluminum-Lithium Alloy in Different Concentration of NaCl Solution[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2019, 47(6): 25-29.
- [23] 陈文娟, 陈翌庆, 潘刚. O_3/Cl^- 复合大气环境中 Q235B 钢的腐蚀演化特性[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(1): 8-18.
- CHEN Wen-juan, CHEN Yi-qing, PAN Gang. Corrosion Evolution Characteristics of Q235B Steel in an O_3/Cl^- Containing Atmosphere[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(1): 8-18.
- [24] GHANBARI E, IANNUZZI M, LILLARD R S. The Mechanism of Alternating Current Corrosion of API Grade X65 Pipeline Steel[J]. Corrosion, 2016, 72(9): 1196-1210.