

10CrMoAl 热轧薄板不同周期盐雾腐蚀的对比分析

张道达¹, 周慧云², 孟扬³, 尧凳灿¹, 肖艳琴¹

(1.江西省机械科学研究所, 南昌 330002; 2.南昌广播电视大学, 南昌 330046;
3.山东汇嘉磁电科技有限公司, 山东 禹城 251200)

摘要:目的 揭示 10CrMoAl 钢的耐腐的蚀原因及机理。方法 通过对 10CrMoAl 钢进行盐雾试验(72、168、240 h)来模拟其海水腐蚀, 并对试验后的试样进行了腐蚀速率、SEM、能谱、XRD 及电化学分析及研究。结果 72、168、240 h 盐雾腐蚀周期下, 试样的腐蚀速率分别为 2.352、1.915、2.218 mm/a。72 h 盐雾腐蚀试验后, Cr 和 Mo 主要在靠近基体一侧富集; 168 h 盐雾腐蚀试验后, Cr 主要在靠近外表面的锈层处偏聚严重; 240 h 盐雾腐蚀试验后, 在靠近锈层的基体一侧又出现了 Cr 和 Mo 的明显偏聚, 并同时出现“白亮层”。随着腐蚀时间的延长, 锈层中 FeCr_2O_4 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 含量的变化趋势是一致的, 即先不断上升, 然后趋于稳定。结论 随着腐蚀时间的延长, 腐蚀速率先降低后升高再降低, 最后趋于稳定。腐蚀过程是一个周而复始的循环过程: Cr 和 Mo 在锈层与基体交界处不断富集—形成耐腐蚀层—腐蚀脱落—Cr 和 Mo 在锈层与基体交界处富集。这种富集规律对防腐有一定的作用。此外, FeCr_2O_4 在锈层中含量较多时, 具有显著的防腐功能。
关键词: 盐雾试验; 腐蚀速率; 交流阻抗试验; 等效电路; 钝化膜
中图分类号: TG172.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0254-07
DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.038

Comparative Analysis of Salt Spray Corrosion of 10CrMoAl Hot Rolled Sheet in Different Periods

ZHANG Dao-da¹, ZHOU Hui-yun², MENG Yang³, YAO Deng-can¹, XIAO Yan-qin¹

(1.Jiangxi Mechanical Science Institute, Nanchang 330002, China; 2.Nanchang Radio and TV University, Nanchang 330046;
3.Shandong Huijia Magnetoelectricity Technology Co. Ltd, Yucheng 251200, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal cause and mechanism of corrosion resistance of 10CrMoAl steel. Seawater corrosion of 10CrMoAl steel was simulated by performing salt spray test (72 h, 168 h and 240 h). Corrosion rate, SEM, energy spectrum, XRD and electrochemical properties of the sample subject to test were analyzed and studied. After 72 h, 168 h and 240 h salt spray corrosion, the corrosion rate of the sample was 2.352 mm/a, 1.915 mm/a and 2.218 mm/a, respectively. After 72 h salt spray corrosion test, Cr and Mo were mainly enriched near the substrate; after 168 h salt spray corrosion test, Cr mainly congregated seriously on the rust layer close to outer surface; after the 240 h salt spray corrosion test, Cr and Mo congregated obviously on the substrate near the rust layer again, and "white light layer" appeared simultaneously. As corrosion time prolongs, variation trends of FeCr_2O_4 and $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ content in the rust layer were consistent, that is, first rose continuously and then tended to be stabile. As corrosion time prolongs, corrosion rate first decreases and then increases, later decreases, and finally stabilizes. Enrichment law of Cr and Mo: first enrich at the junction of rust layer and substrate→corrosion resistant layer takes

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-07-14

Received: 2017-06-05; Revised: 2017-07-14

作者简介: 张道达(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: ZHANG Dao-da (1982—), Male, Master, Engineer, Research focus: surface engineering.

shape→corrosion layer peels off→Cr and Mo again enrich at the junction, this cycle goes round and round. This enrichment law has certain effect on corrosion prevention. In addition, FeCr_2O_4 exhibits significant corrosion resistance function when FeCr_2O_4 content is higher in rust layer.

KEY WORDS: salt spray test; corrosion rate; AC impedance test; equivalent circuit; passive film

众所周知, 碳钢在大气、海水、土壤中都极易腐蚀, 绝大多数酸、碱、盐的水溶液都对碳钢有很强的腐蚀性, 碳钢腐蚀具有严重的经济、社会危害^[1-2]。通常, 碳钢使用时, 需进行腐蚀防护处理, 但费用非常高昂^[3]。

在碳钢中添加少量合金元素, 可以得到价格低廉、耐蚀性能较好的耐候钢。课题组研发的新型 10CrMoAl 热轧钢就是这种耐候钢, 其可广泛用于钻井平台及其他海上作业机械^[4-6]。海洋大气中含有大量的氯化物微粒, 这种微粒吸湿性强, 容易沉积在钢表面形成电解质膜^[7]。氯盐较高的溶解度, 使钢表面的液膜有很高的电导率, 而 Cl^- 则极易吸附在金属表面, 破坏钝化膜, 引发腐蚀。这个腐蚀过程中, Cl^- 不仅参加反应, 还起到催化作用, 促进钢铁腐蚀^[8-11]。

为了了解新型 10CrMoAl 热轧薄板钢的腐蚀过程

和机理, 对其试样进行模拟海洋大气环境的盐雾试验, 并利用 SEM、EDS、XRD 及电化学阻抗对其不同腐蚀周期的试样进行详细分析检测和讨论。

1 试验材料与方法

试验材料为 10CrMoAl 钢, 成分如表 1 所示。试样尺寸为 35 mm×20 mm×7 mm, 试样分为 3 组, 每组 2 个。3 组试样分别进行 72、168、240 h 的中性盐雾腐蚀试验, 试验设备为 NQ-0130 盐雾腐蚀试验箱。试验前, 先将试样各表面机械打磨至 800#砂纸程度, 然后用洗涤灵饱和水溶液去油, 酒精擦洗, 吹干并置入干燥皿内, 24 h 后称其原始质量。试验时采用连续喷雾, 腐蚀液为去离子水配成的 5%NaCl 溶液, pH 值 6.7~7.2, 试验温度(35±2) °C, 盐雾沉降量 2 mL/(cm²·h)。

表 1 试验用 10CrMoAl 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of experimental 10CrMoAl steel

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Ti
≤0.11	≤0.64	≤0.020	≤0.0015	≤0.51	0.81~1.20	0.22~0.30	0.42~0.80	≤0.020

注: 残余元素 Ni、Cu 均不大于 0.30%, 其余元素为 Fe

采用电化学综合测试仪 VMP3, 测定裸样和 240 h 盐雾腐蚀后试样的交流阻抗谱。电解质溶液为 0.01 mol/L NaHSO₃ 溶液, 参比电极、辅助电极和工作电极分别为饱和甘汞电极、铂电极和试样。试样面积 1 cm², 电压幅值 5 mV, 扫描范围 100 kHz~5 MHz。采用 Zsimpwin3.0 对阻抗谱进行分析。

采用 JEOL JSM-7600F 场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 和能谱仪对盐雾腐蚀试验后的试样表层进行组织形貌观察和成分分析, 采用 Shimadzu XRD-6000 X 射线衍射仪对不同腐蚀周期的试样进行物相分析, Cu 靶 (λ=0.154 056 2 nm), Kα 射线, 扫描范围 30°~100°, 扫描速度 1 (°)/min, 扫描电压、电流为 40 V、40 mA。

2 结果与分析

2.1 表面形貌观察及分析

图 1 给出了各盐雾腐蚀周期试样的表面宏观形貌图。由图可知, 经 72 h 的盐雾腐蚀试验后, 试样

表面很疏松, 存在黄褐色、黑色和灰色的锈蚀物, 但较平整。其中, 疏松的黄褐色和灰色锈蚀物占绝大多数, 且还存在一定量的点蚀坑。经 168 h 的盐雾腐蚀试验后, 试样表面变得非常粗糙, 存在比较多的黑色锈蚀物和少部分灰色锈蚀物, 黄褐色锈蚀物的颜色变深。此外, 锈层表面还有大量粒状凸起, 但没有发现明显的点蚀坑。经 240 h 的盐雾腐蚀试验后, 试样表面依然非常粗糙, 特别是黑色的锈蚀物表面。而黄褐色锈蚀物则较平整, 仍然存在少量灰色锈蚀物。

与 168 h 盐雾腐蚀试验后的试样相比, 240 h 盐雾腐蚀试验后试样表面的粒状凸起和点蚀坑均不明显。但可以明显看出, 黑色锈蚀物本来是被黄褐色锈蚀物所覆盖 (图 1c 的椭圆区域), 即黑色锈蚀物是内锈层, 其上覆盖了比较疏松的黄褐色锈层。疏松的黄褐色锈层脱落后, 黑色锈层暴露在盐雾环境中。随着腐蚀时间的延长, 最先裸露的黑色锈层变得又黑又粗糙。

腐蚀速率的计算公式见式 (1)^[12]:

$$R = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_1 - m_2)}{StD}$$
 (1)

其中, R 为腐蚀速率, mm/a; m₁ 为腐蚀前的质

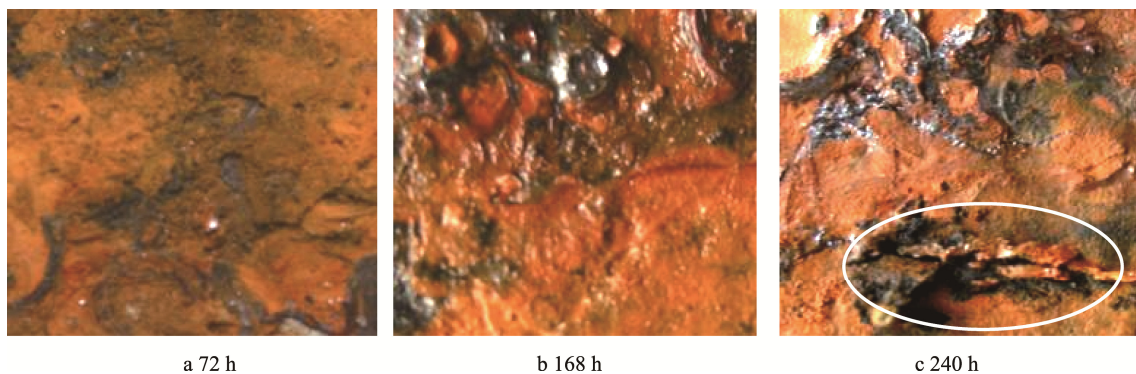


图 1 盐雾试验各周期的表面形貌

Fig.1 Morphology in each cycle of salt spray test

量, mg; m_2 为腐蚀后的质量, mg; S 为表面积, cm^2 ; t 为腐蚀时间, h; D 为被腐蚀试样的密度, mg/cm^3 。

对盐雾腐蚀试验前后的试样进行称量, 得到 72、168、240 h 盐雾腐蚀试验后试样的失重 $\Delta m = (m_1 - m_2)$ 分别为 225.10、454.72、746.85 mg。说明随着腐蚀时间的延长, Δm 逐渐增加。根据 $v = \frac{m_1 - m_2}{S}$ 得到试样在 72、168、240 h 盐雾腐蚀试验时的腐蚀率 v 分别为 15.09、28.72、47.63 mg/cm^2 。

图 2 为试样在不同腐蚀周期下的腐蚀速率图。由图可知, 72、168、240 h 盐雾腐蚀试验后试样的腐蚀速率分别为 2.352、1.915、2.218 mm/a , 随着腐蚀时

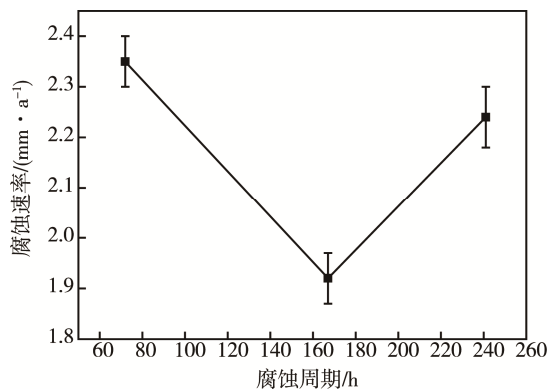


图 2 盐雾试验不同周期的腐蚀速率

Fig.2 Corrosion rate in different periods of salt spray test

间的延长, 腐蚀速率先降低后升高。这可能是热轧薄板(厚度 7 mm)表面轧制方向上的晶粒被严重拉长, 晶粒厚度变薄, 盐雾对晶粒腐蚀和晶间腐蚀的速度加快, 减弱了内锈层的防腐功能。同时, 从图 1c 的椭圆区域可以看出, 黑色锈蚀物脱落, 试样表面出现了比较深的“腐蚀沟槽”。这种情况在热轧厚板中没有出现, 进一步说明黑色锈蚀物对基体的附着力减弱, 防腐功能减弱。

2.2 扫描电镜及能谱分析

图 3 为试样在不同腐蚀周期下腐蚀后的表面 SEM 图, 从图中可以看到不同腐蚀周期下, 试样表面锈层形态的变化。经 72 h 盐雾腐蚀试验后, 试样表面出现了大量球形腐蚀物和比较大的腐蚀坑, 且锈层内存在较多裂纹。经 168 h 盐雾腐蚀试验后, 试样表面依然存在比较大的腐蚀坑和少量裂纹, 球形腐蚀物依然存在, 但数量变少, 尺寸变大, 形状变得不规则, 锈层相对较致密。经 240 h 盐雾腐蚀试验后, 试样表面的腐蚀物变成絮状, 非常疏松且存在大量点蚀坑, 此时仍存在一定量的球形腐蚀物, 但完全看不到相对致密的锈层。说明经 240 h 盐雾腐蚀试验后, 相对致密且有防腐蚀功能的内锈层仍然没有裸露出来, 而疏松呈絮状的腐蚀层却大量脱落, 从而导致腐蚀速率出现了明显升高。

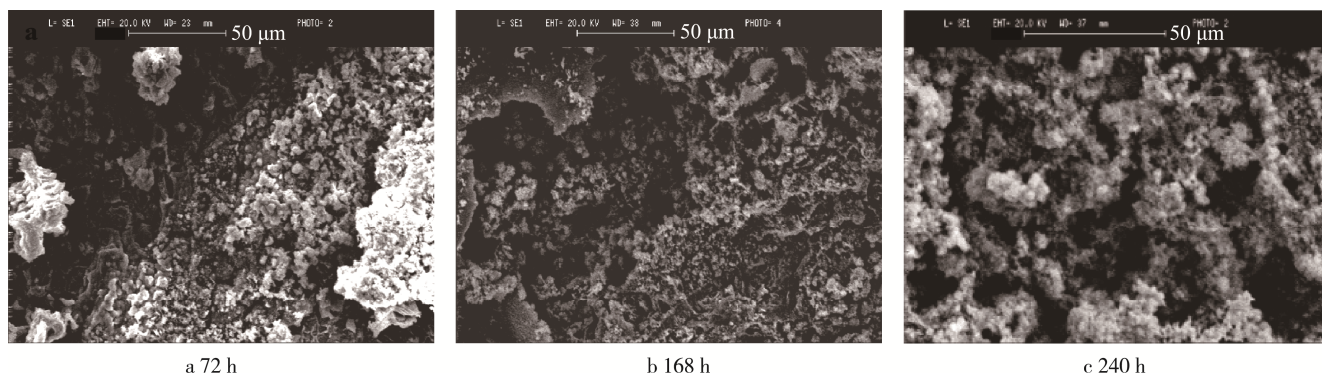


图 3 不同盐雾腐蚀周期试样表面的 SEM 图

Fig.3 SEM images of sample surface in different periods of salt spray test

图 4 为试样腐蚀不同周期后的断面 SEM 图及对应 EDS 图。SEM 图显示试样经过 72 h 盐雾腐蚀试验后, 锈层比较疏松, 锈层内有大量粒状物, 且在锈层中间出现了未被腐蚀的基体岛。这可能是成分偏聚的原因。此外, 锈层边界相对平直。从对应的能谱线扫描图谱可以看出, 锈层中没有出现 Cr 和 Mo 的明显偏聚, 但却出现了 Si 的明显偏聚; 靠近锈层的基体一侧却出现了 Cr 和 Mo 的偏聚, 而 Si 的含量却明显减少。盐雾腐蚀试验时间增加到 168 h 时, 锈层宽度没有明显增加, 但是其致密度增加且没有粒状物。说明经 72 h 盐雾腐蚀试验形成的疏松且存在大量粒状物的腐蚀层已经脱落。对应的 EDS 图显示, Cr 和 Mo 在锈层内出现了明显的偏聚。其中, Cr 在靠近外表面的锈层部分出现严重偏聚, 而在接近基体的锈层部分出现断崖式下降。从锈层到基体的方向上, Mo 含量逐渐降低, 而 Si 含量几乎为零。盐雾腐蚀时间延

长至 240 h 时, 锈层宽度明显减小, 且锈层边界出现较明显的“白亮层”。从对应的 EDS 图上可以看出, Cr 和 Mo 在锈层内几乎没有偏聚, 在靠近锈层的基体一侧却出现了明显偏聚, 而 Si 的偏聚位置与其正好相反。

以上结果说明, 在腐蚀初期, 外层锈层脱落前, Cr 和 Mo 开始在靠近锈层的基体一侧偏聚, 逐渐形成具有防腐功能的耐腐蚀层, 可有效减缓腐蚀速度。当腐蚀时间在 168 h 左右时, Cr 和 Mo 在锈层内的偏聚达到最大, 且锈层厚度也达到最大, 有效地起到了防腐功能。随着时间的进一步延长, 锈层逐渐被腐蚀, 且变薄, 但靠近锈层的基体却没有明显被腐蚀。在这层具有防腐功能的锈层被腐蚀完之前, Cr 和 Mo 又开始在靠近锈层的基体一侧偏聚, 又逐渐形成了具有防腐功能的耐腐蚀层。耐腐蚀层周而复始的脱落和形成, 大幅度提高了这种新型 10CrMoAl 钢的抗腐蚀能力。

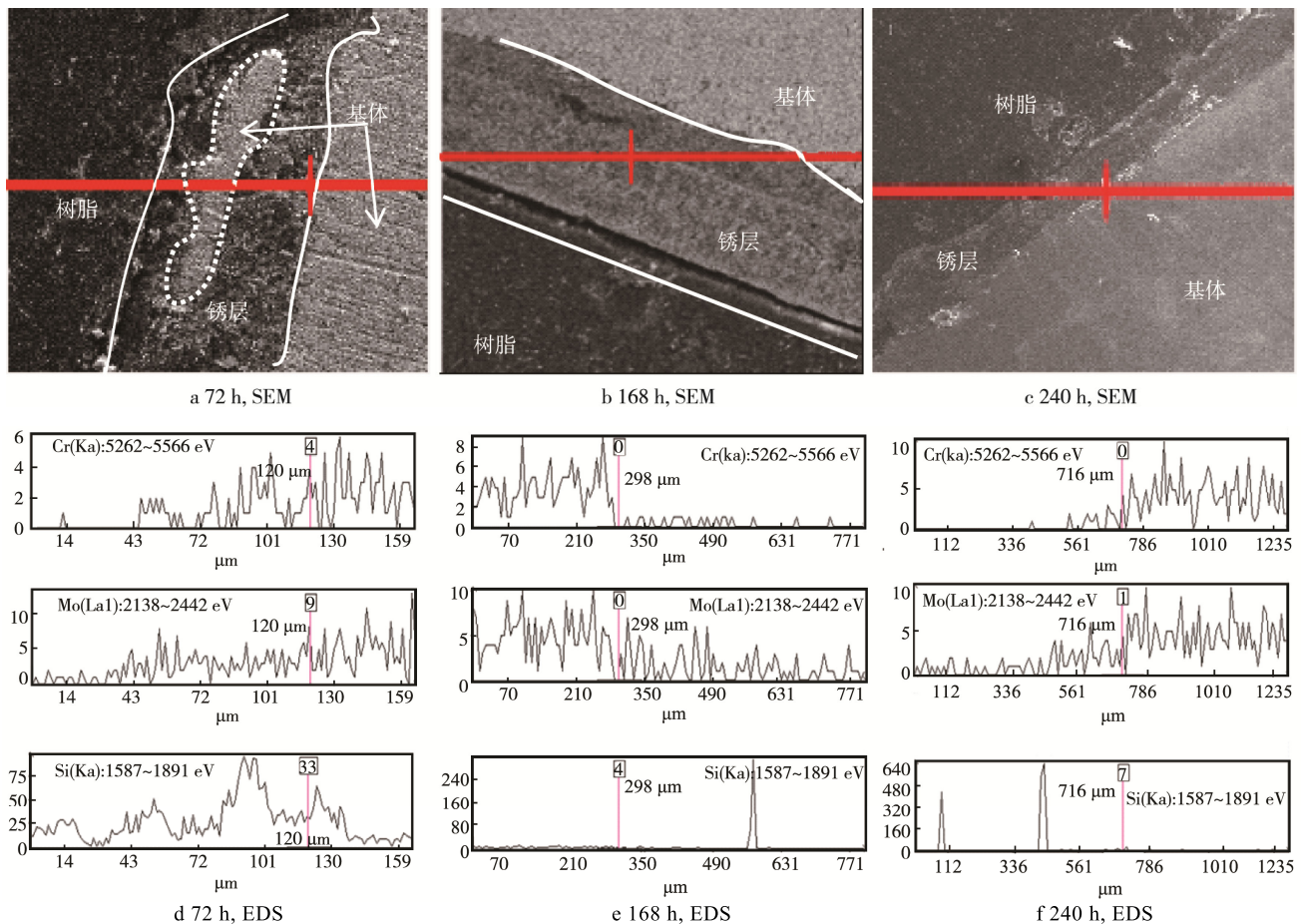


图 4 盐雾试验不同周期腐蚀试样的 SEM 照片及对应的能谱图

Fig.4 SEM images and corresponding energy spectrum diagram of corrosion sample in different periods of salt spray test

2.3 XRD 分析

图 5 为试样腐蚀不同周期后的 XRD 图。从图中可以看出, 72 h 盐雾腐蚀试验产生的锈层主要由 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和少量 FeCr_2O_4 组成。 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和

FeCr_2O_4 的吉布斯自由能较低, 属于热力学较稳定状态^[13-16], 一般认为 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和 FeCr_2O_4 属于腐蚀过程的最终产物^[17]。锈层中大量存在的 Fe_3O_4 属于疏松的腐蚀产物, 很容易脱落^[18]。这与图 3 所观察到的表面形貌结果相吻合。168 h 盐雾腐蚀试验后, 锈层中

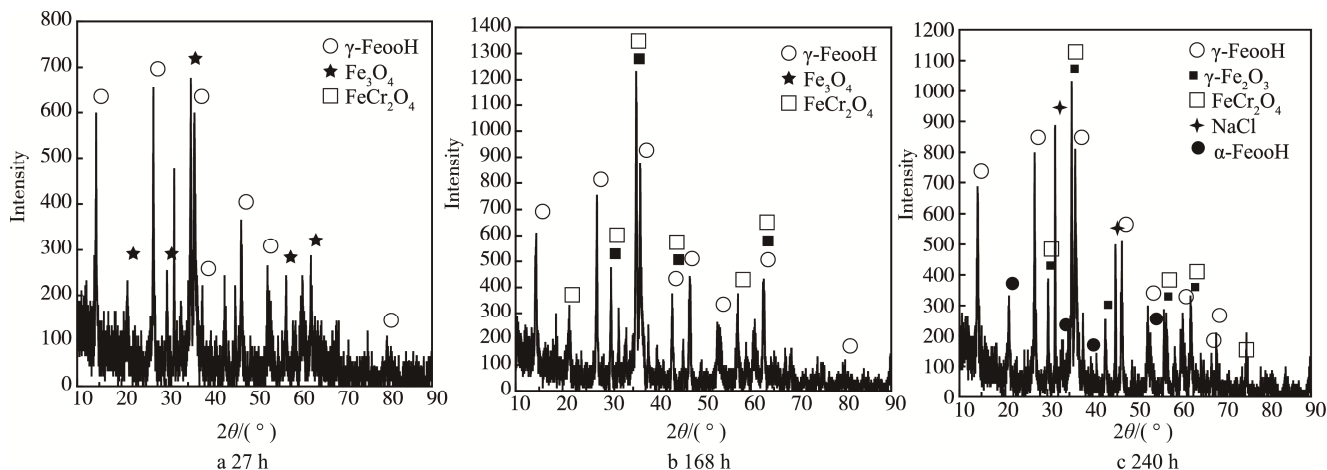


图 5 10CrMoAl 钢盐雾试验不同周期的 XRD 对比图

Fig.5 XRD comparison diagram of 10CrMoAl steel in different periods of salt spray test

的物质主要为大量的 FeCr_2O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和一定量的 $\gamma\text{-FeOOH}$ 。与 72 h 时相比, FeCr_2O_4 的含量增加了十几倍, $\gamma\text{-FeOOH}$ 的含量也有所增加。240 h 盐雾腐蚀试验后, 锈层中的物质主要为 FeCr_2O_4 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和少量的 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。与 168 h 时相比, FeCr_2O_4 的含量稍有减少, 但其质量占比仍然是最大的, 而 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的含量没有明显变化。 $\alpha\text{-FeOOH}$ 作为一种疏松的物质, 容易从锈层表面脱落, 导致经 240 h 盐雾腐蚀试验后的试样表面比较疏松。

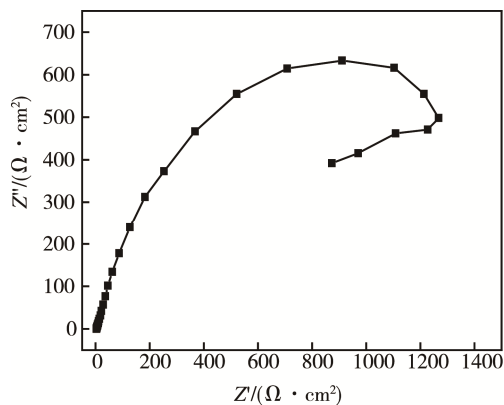
由以上结果分析可知: 当 FeCr_2O_4 的含量很高时, 锈层内不存在容易脱落的 Fe_3O_4 和 $\alpha\text{-FeOOH}$ 但当 FeCr_2O_4 含量降低时, 锈层中就会出现少量易脱落的 Fe_3O_4 或 $\alpha\text{-FeOOH}$ 。这可能是当 FeCr_2O_4 含量很高时, 防腐蚀功能很好, Fe_3O_4 和 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的形成速度远低于其脱落速度, 所以锈层表面没有发现 Fe_3O_4 和 $\alpha\text{-FeOOH}$ 。而当 FeCr_2O_4 含量降低时, 防腐蚀功能减弱, Fe_3O_4 和 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的形成速度逐渐高于其脱落速度, 从而使锈层中出现了少量的 Fe_3O_4 或 $\alpha\text{-FeOOH}$ 。此外, 从图 5 中可以看出, FeCr_2O_4 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的含量变化趋势是一致的, 即先不断上升, 然后趋于稳定。

2.4 电化学阻抗试验

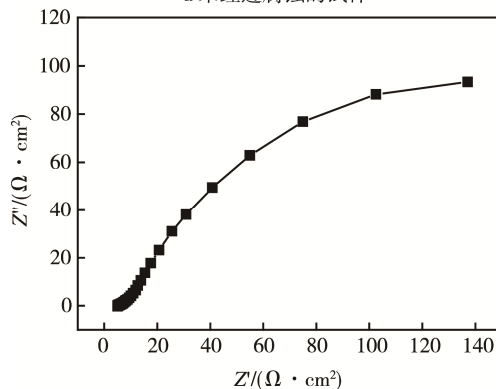
图 6 为原始试样和经过 240 h 盐雾腐蚀试验后试样的交流阻抗 Nyquist 图, 其等效电路图如图 7 所示。其中, R_s 表示介质电阻, R_t 表示试样表面反应的电荷转移电阻, C_{dl} 表示试样表面-电解质界面的双电层电容, W 为固相扩散的沃伯格阻抗^[19]。根据等效电路图, 采用 Zsimpwin3.0 软件进行拟合, 结果如表 2 所示。

由图 6a 可知, 原始试样的交流阻抗图谱在高频段出现了半径较大的容抗弧, 在低频段出现不明显的感抗弧。这是因为在开始阶段, 试样表面没有被腐蚀, 为完美的半圆弧状, 也就是说完全由电荷传递控制形成。图

谱的圆弧半径较大, 说明试样抗腐蚀能力较好^[19-20]。此外, 感抗弧的出现说明试样表面出现点蚀现象^[21-22]。经过 240 h 盐雾腐蚀试验后的试样的交流阻抗图显示, 高频区没有明显圆弧存在, 低频区的曲线呈 45° 上扬, 说明电极反应几乎完全为扩散控制^[23]。这是因为此时电极表面覆盖了较厚而疏松的腐蚀产物, 表面很粗糙, 以至于扩散过程部分相当于球面扩散。由拟合得到的等效电路可知, 电极表面形成了致密的腐蚀产物层。该致密腐蚀产物层是由金属表面的锈层以及许多松散的腐蚀产



a 未经过腐蚀的试样



b 盐雾腐蚀240 h的试样

图 6 交流阻抗试验图谱

Fig.6 AC impedance test diagram: a) uncorroded sample, b) sample after 240 h salt spray corrosion

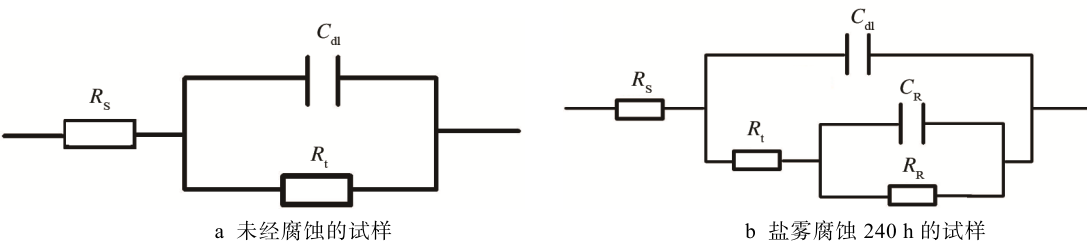


图 7 阻抗试验的等效电路图
Fig.7 Equivalent circuit diagram of impedance test: a) uncorroded sample, b) sample after 240 h salt spray corrosion

表 2 交流阻抗拟合结果
Tab.2 AC impedance fitting results

试样	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$C_{dl}/(\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_t/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_R/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$C_R/(\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$
未经过腐蚀的试样	4.994	0.000 212 8	1215	—	—
盐雾腐蚀 240 h 的试样	5.956	0.081 67	159.2	9.444	0.009 953

物构成，从而构成了金属表面的伪电容，这个金属表面的伪电容严重改变了金属/溶液的并联等效电路。

3 结论

- 1) 不同盐雾腐蚀周期下，10CrMoAl 热轧薄板的腐蚀速率规律为：72 h>240 h>168 h。
- 2) 10CrMoAl 热轧薄板的盐雾腐蚀过程是一个周而复始的循环过程：Cr 和 Mo 在锈层与基体交界处不断富集—形成耐腐蚀层—腐蚀脱落—Cr 和 Mo 在锈层与基体交界处富集。
- 3) 10CrMoAl 热轧薄板在盐雾腐蚀过程中，锈层中 FeCr₂O₄ 和 γ-Fe₂O₃ 含量的变化趋势是一致的，即先不断上升，然后趋于稳定。FeCr₂O₄ 在锈层中具有一定的防腐功能。

参考文献：

[1] 田骏, 李国明, 陈珊. Si 对低合金钢耐海水腐蚀性能影响的电化学研究[J]. 装备环境工程, 2016(2): 110-115.
TIAN Jun, LI Guo-ming, CHEN Shan. Electrochemical Study on Effects of Si Contents on the Corrosion Resistance of Low Alloy Steels to Sea Water[J]. Equipment Enviromental Engineering, 2016(2): 110-115.

[2] 张建春, 左龙飞, 蒋金洋, 等. 耐海水腐蚀钢筋 00Cr10MoV 的组织结构及性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(4): 363-369.
ZHANG Jian-chun, ZUO Long-fei, JIANG Jin-yang, et al. Microstructure and Properties of Seawater Corrosion Resistant Rebar Steel 00Cr10MoV[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2016, 36(4): 363-369.

[3] 曹国良, 李国明, 陈珊, 等. 典型耐海水腐蚀钢中 Ni

和 Cr 耐点蚀作用的比较[J]. 金属学报, 2010, 46(6): 748-754.

CAO Guo-liang, LI Guo-ming, CHEN Shan, et al. Comparison on Pitting Corrosion Resistance of Nickel and Chromium in Typical Sea Water Resistance Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(6): 748- 754.

[4] SARAF S, MOLOTSKII M, ROSENWAKS Y. Local Measurement of Surface States Energy Distribution in Semiconductora Using Kelvin Probe Force Microscope[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(17): 172104-172107.

[5] 石好, 张璟, 朱田兵. 超高强钢 22MnB5 海水腐蚀性研究[J]. 中国水运, 2015, 15(8): 326-319.
SHI Hao, ZHANG Jing, ZHU Tian-bing. Study on Corrosion Resistance of Ultra High Strength Steel 22MnB5 in Seawater[J]. China Water Transport, 2015, 15(8): 326-319.

[6] 曹国良, 李国明, 陈珊, 等. Cu 对低合金钢耐海水腐蚀的影响[J]. 材料工程, 2011(9): 62-67.
CAO Guo-liang, LI Guo-ming, CHEN Shan, et al. Effects of Cu on Sea Water Corrosion Resistance of Low Alloy Steels[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(9): 62-67.

[7] 王杨, 杨慧. 用交流阻抗法研究铌钢在海水中的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(1): 69-71.
WANG Yang, YANG Hui. Investigation on Corrosion Behavior of Niobium Containing Steel in Seawater by AC Impedance Technique[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(1): 69-71.

[8] 邹妍, 郑莹莹, 王燕华, 等. 低碳钢在海水中的阴极电化学行为[J]. 金属学报, 2010(46): 123-128.
ZOU Yan, ZHENG Ying-ying, WANG Yan-hua, et al. Cathodic Electrochemical Behavior of Low Carbon Steel in Seawater[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010 (46): 123-128.

[9] 侯健, 张彭辉, 程文华, 等. 热带海域不同海区环境因素差异及腐蚀性对比研究[J]. 装备环境工程,

- 2015(4): 44-48.
HOU Jian, ZHANG Peng-hui, CHENG Wen-hua, et al. Comparison of Environment Facts and Corrosivity in Different Tropical Sea Areas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015(4): 44-48.
- [10] LIU B Y, LIU Z, HANG C Y, et al. Corrosion Inhibition and Adsorption Behavior of 2-((Dehydroabietylamine)Methyl)-6-Methoxyphenol on Mild Steel Surface in Seawater[J]. Thin Solid Films, 2011, 519: 7836-7844.
- [11] 张道达, 孙衍乐, 姚学峰, 等. 大变形轧制超细晶 TWIP 钢的组织及性能研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 62-66.
ZHANG Dao-da, SUN Yan-le, YAO Xue-feng, et al. The Study of Microstructure and Properties of Ultra-fine-grained TWIP Steel with Heavily Deformation[J]. Journal of Jjiangxi University (Natural Science Edition), 2017, 41(1): 62-66.
- [12] 刘然克. 典型 H_2S/CO_2 环空环境下高强油套管钢应力腐蚀机理与防护[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
LIU Ran-ke. Stress Corrosion Cracking Behavior and Prevention of High Strength Tubing Steels in Typical H_2S/CO_2 Annulus Environments[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [13] 王莹, 俞宏英, 程远, 等. 钙离子的浓度对 X80 钢腐蚀行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(1): 66-71.
WANG Ying, YU Hong-ying, CHENG Yuan, et al. Effects of the Concentration of Calcium of X80 Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(1): 66-71.
- [14] 张鹏, 于浩. 耐海水腐蚀钢 10CrMoAl 组织结构和性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(2): 176-179.
ZHANG Peng, YU Hao. Microstructure and Properties of Seawater Corrosion-resistant Steel 10CrMoAl[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2010, 33(2): 176-179.
- [15] 夏妍. 碳钢和耐候钢在若干典型环境下的腐蚀行为研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
XIA Yan. Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Several Typical Conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [16] 曹公望, 王振尧, 刘雨薇, 等. 碳钢在三种大气环境中的应力腐蚀[J]. 装备环境工程, 2015(4): 6-10.
CAO Gong-wang, WANG Zhen-yao, LIU Yu-wei, et al. Stress Corrosion of Carbon Steel in Three Different Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015(4): 6-10.
- [17] UEJI R, TSUCHIDA N, TDRADA D, et al. Tensile Properties and Twinning Behavior of High Manganese Austenitic Steel with Fine-grained Structure[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(9): 963-966.
- [18] 陈宇, 陈旭, 刘彤, 等. 成膜电位对 316L 不锈钢在硼酸溶液中电化学行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(2): 137-143.
CHEN Yu, CHEN Xu, LIU Tong, et al. Effect of Potential on Electrochemical Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Borate Buffer Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(2): 137-143.
- [19] 胡家元. 碳钢在海水淡化一级反渗透产水中腐蚀机理及防腐方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
HU Jia-yuan. Study on the Corrosion Mechanism and Anticorrosion Methods of Carbon Steel in RO Product Water of Seawater[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [20] 傅欣欣, 董俊华, 韩恩厚, 等. 低碳钢 Q235 在模拟酸雨大气腐蚀条件下的电化学阻抗谱监测[J]. 金属学报, 2014, 50(1): 57-63.
FU Xin-xin, DONG Jun-hua, HAN En-hou, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy Monitoring on Mild Steel Q235 in Simulated Industrial Atmospheric Corrosion Environment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(1): 57-63.
- [21] 任呈强. N80 油管钢在含 CO_2/H_2S 高温高压两相介质中的电化学腐蚀行为及缓蚀机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
REN Cheng-qiang. Electrochemical Corrosion Behavior and Corrosion Inhibition Mechanism of N80 Tubing Steel in Two-phase Media Containing CO_2/H_2S High Temperature and Pressure[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [22] 张全成, 王建军, 吴建生, 等. 锈层离子选择性对耐候钢抗海洋大气腐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2001, 37(2): 193-199.
ZHANG Quan-cheng, WANG Jian-jun, WU Jian-sheng, et al. Effect of Ion Selectivity on Corrosion Resistance of Weathering Steel Against Atmospheric Corrosion[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(2): 193-199.
- [23] 张建春, 黄文克, 麻晗. 耐蚀钢筋 20MnSiCrV 的连续冷却转变组织与性能[J]. 热加工工艺, 2014, 43(6): 91-97.
ZHANG Jian-chun, HUANG Wen-ke, MA Han. Microstructure and Properties of Continuous Cooling Transformation of Corrosion Resistant Steel 20Mn-SiCrV[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(6): 91-97.