

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.09.003

## Cr 元素对工业环境用钢耐蚀性的影响

谢鑫<sup>1</sup>, 赵义<sup>1</sup>, 董广博<sup>1</sup>, 李爱鹏<sup>1</sup>, 王剑锋<sup>1</sup>, 翟昌鑫<sup>1</sup>, 李楠<sup>1</sup>, 徐学旭<sup>2\*</sup>

(1. 河钢乐亭钢铁有限公司 河北 唐山 063000; 2. 北京科技大学 国家材料腐蚀与防护数据中心 北京 100083)

**摘要:** 本文通过浸泡实验模拟工业环境,研究了 Cr 元素对工业环境用低合金钢耐蚀性影响。腐蚀失重结果表明,在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量分数为 0.2% 的水溶液中,三种含 Cr 低合金钢的腐蚀速率随腐蚀时间增加而降低,并且随 Cr 元素含量的增加,每个周期下的腐蚀速率都明显降低。浸泡后的电化学测试结果表明,Cr 元素在低合金钢不同腐蚀周期内的作用不同,腐蚀初期(4 h),Cr 元素降低了腐蚀阳极及阴极电流密度;腐蚀中期(54 h)Cr 元素形成保护性好的腐蚀产物膜,提高了钢的耐蚀性,使钢的阳极电流密度的降低;腐蚀后期(104 h)Cr 通过稳定腐蚀产物成分抑制了腐蚀阴极过程,降低了阴极电流密度。

**关键词:** 电化学测试;工业环境用钢;Cr 元素;耐蚀性

中图分类号: TB37

文献标识码: A

## Influence of Cr on Corrosion Resistance of Industrial Environment Steel

XIE Xin<sup>1</sup>, ZHAO Yi<sup>1</sup>, DONG Guangbo<sup>1</sup>, LI Aipeng<sup>1</sup>, WANG Jianfeng<sup>1</sup>, ZHAI Changxin<sup>1</sup>, LI Nan<sup>1</sup>, XU Xuexu<sup>2\*</sup>

(1. HBIS Group Laoting Steel Co., Ltd., Tangshan 063000, China; 2. National Materials Corrosion and Protection Scientific Data Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The influence of Cr element on corrosion resistance of low alloy steel in simulated industrial environment was studied by immersion experiment. The corrosion weight loss results show that the corrosion rates of three kinds of low alloy steels containing Cr decrease with the increase of corrosion time in 0.2 wt.%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution, and the corrosion rates decrease significantly with the increase of Cr element in each cycle. The electrochemical test results after immersion show that the effect of Cr element is different in different corrosion cycles of low alloy steel. At the initial corrosion stage (4 h), Cr element reduces the current density of corrosion anode and cathode. In the middle stage of corrosion (54 h), Cr element forms a protective corrosion product film which improves the corrosion resistance of steel and reduces the anode current density of steel. In the later stage of corrosion (104 h), Cr can inhibit the corrosion cathode process and reduce the cathode current density by stabilizing the corrosion product composition.

**Keywords:** electrochemical measurement; industrial environment steel; Cr element; corrosion resistance

收稿日期: 2020-10-29

修回日期: 2020-12-29

作者简介: 谢鑫(1981-),男,本科,工程师,email:xiexin@hbisl.com

通信作者: 徐学旭,email:xuxuexu1992@163.com

随着工业产业发展,对作为大型机械部件及工程结构的制造材料——钢的性能(如:强度、韧性、抗腐蚀性及抗疲劳性能等)的要求在逐渐提高,特别是钢的耐蚀性作为影响服役寿命的一个关键因素一直是人们研究的热点<sup>[1-4]</sup>。Cr作为一种能有效提高钢耐蚀性能的合金元素被广泛添加到低合金钢、不锈钢及石油化工领域特殊用钢等耐蚀钢中。由于低合金钢在服役环境中的经济性及实用性突出,Cr的添加对其耐蚀性能的影响被广泛研究<sup>[2,4]</sup>。付贵勤等<sup>[2]</sup>在NaCl、NaHSO<sub>3</sub>腐蚀介质中通过干湿循环加速腐蚀实验研究了轧制状态的含Cr和无Cr两组低合金钢的腐蚀行为,结果表明,Cr对锈层内 $\alpha$ -FeOOH的形成有促进作用,并且在锈层存在富集效应,导致腐蚀性介质如Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>被阻挡在锈层外,使钢的锈层保护性增加。黄桂桥<sup>[4]</sup>通过对五种Cr含量不同的低合金钢进行海水浸泡实验发现短期内Cr对钢耐海水腐蚀性有益,而长期浸泡结果显示Cr元素呈有害作用。因此,含Cr低合金钢在含Cl<sup>-</sup>或含SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>以及两者并存的环境中的腐蚀行为有明显差异。由于工业环境中以SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主要侵蚀性离子,研究Cr含量在该环境中对低合金钢耐蚀性能的影响具有实际意义,同时此类研究目前缺乏统一认识<sup>[3-6]</sup>。

因此,本文通过冶炼轧制了三种Cr含量不同的低合金钢,并通过参考GB/T19746—2005标准设计了浸泡实验模拟工业环境,通过电化学测试技术研究了Cr元素对低合金钢的腐蚀性影响。

## 1 实验方法

本文通过自行设计成分,采用河钢冶炼并轧制了三种铬元素含量不同的低合金钢,分别记为LAS1、LAS2和LAS3(Low-alloy steel)。三种钢的实际成分如表1所示,表中元素含量计量皆为质量百分比(wt.%)。

表1 三种含Cr低合金钢实际化学成分

Tab.1 Actual chemical compositions of three low alloy steel containing Cr

试样	成分含量/(wt.%)						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe
LAS1	0.08	1.32	0.25	<0.01	<0.01	0.03	其余
LAS2	0.08	1.21	0.26	<0.01	<0.01	0.14	其余
LAS3	0.09	1.33	0.24	<0.01	<0.01	0.43	其余

参考GB/T19746—2005标准设计了浸泡实验溶液模拟工业环境,实验选择Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>质量分数为0.2%的水溶液,分别浸泡4、54和104 h后进行除锈和电化学测试。失重试样(50 mm×25 mm×5 mm)浸泡于除锈液(500 mL HCl+500 mL H<sub>2</sub>O+20 g 六次甲基四胺)中进行超声除锈10 min,温度设定为30 ℃。之后用无水乙醇清洗干燥,吹干后称重,记为W<sub>1</sub>,g。通过公式计算材料腐蚀速率V:

$$V = \frac{W_0 - W_1}{St\rho} \quad (1)$$

其中,W<sub>0</sub>为试样初始重量,g;S为试样暴露面积,cm<sup>2</sup>;ρ为试样密度,g·cm<sup>-3</sup>;t为浸泡时间,h。

电化学测试试样(10 mm×10 mm×5 mm)均用环氧树脂封装并露出1 cm<sup>2</sup>暴露面在工业环境模拟浸泡溶液中进行测试,测试前样品表面用砂纸打磨至1500#,并用无水乙醇擦洗除油,去离子水清洗,冷风吹干备用。电化学测试包括极化曲线和交流阻抗谱的测试。采用常用的三电极体系进行电化学实验,制备的三种含Cr低合金钢试样作为工作电极,铂片作为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。每个周期浸泡样品的电化学测试前设置30 min的体系稳定时间。稳定开路电位(OCP)下对104 h浸泡后试样进行交流阻抗(EIS)测试时,频率范围设定从100 kHz到10 mHz,激励信号设定为10 mV振幅的正弦波电压,实验结束后通过ZSimpWin软件对EIS数据拟合。动电位极化测试中,扫描速率为0.5 mV/s,扫描时从-200 mV vs OCP处开始向电位正向扫描,直到阳极电流达到10 mA后结束扫描。

## 2 结果与讨论

图1为三种含Cr低合金钢在Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>质量分数为0.2%的水溶液中浸泡不同时间后的腐蚀速率。结果表明三种Cr低合金钢的腐蚀速率随腐蚀时间增加而减少,说明该环境下钢表面随时间形成了保护性锈层。LAS1在三个周期内的腐蚀速率均高于其他两种钢,表明Cr元素的添加提高了LAS2和LAS3基体的耐蚀性。在浸泡54 h后,LAS1的腐蚀速率降低速率明显高于LAS2和LAS3,这证实了在54 h后高含Cr钢锈层的保护性高于低含Cr钢。54 h前三种钢的腐蚀速率降低速率基本一致,说明Cr元素在钢的腐蚀初期对腐蚀速率改变影响不显著。

图2为浸泡4 h后三种不同含Cr低合金钢在

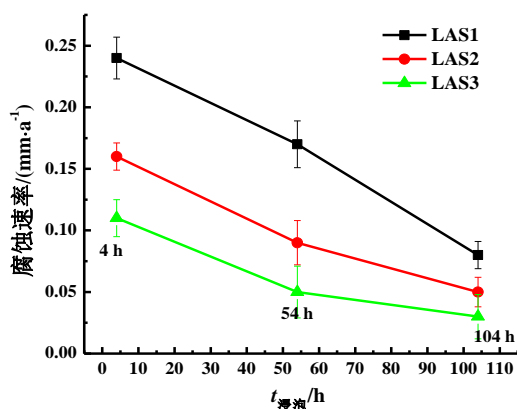


图1 三种含Cr低合金钢浸泡测试的腐蚀速率

Fig.1 Corrosion rates of three kinds of low alloy steels containing Cr after immersion

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量分数为 0.2% 的水溶液中所测动电位极化曲线。可以发现,三种含 Cr 钢浸泡 4 h 后在测试溶液中均表现为活性溶解过程,阳极反应由 Fe 的溶解控制,阴极反应由吸氧反应控制。随着 Cr 含量的增加,低合金钢的自腐蚀电位逐渐升高,阳极和阴极电流密度同时随 Cr 含量升高而降低,腐蚀电流密度也随 Cr 含量增加而降低,表明 Cr 的添加有助于降低腐蚀速率,这与 4 h 浸泡后的失重测试结果一致。可以发现, LAS3 的阴极电流密度明显低于 LAS1 和 LAS2,这表明 Cr 元素添加降低了钢的阴极反应速率。相对于阴极反应,阳极反应电流密度随 Cr 含量变化更为明显,说明阳极反应过程受 Cr 含量变化影响更大,这可能由于 Cr 含量增加提高了材料腐蚀电位使得 LAS2 和 LAS3 相对于 LAS1 的阳极溶解过程受到抑制<sup>[5]</sup>。

通过对极化曲线拟合后得到表 2 所示的腐蚀动力学参数,包括腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )、腐蚀电流密度( $i_{\text{corr}}$ )以及阳极和阴极的塔菲尔斜率( $\beta_a$ 、 $\beta_c$ )。根据 Tafel 直线规律,在腐蚀电位上下 50 mV 内,选择阴极区和阳极区直线区域分别进行拟合,求出交点并计算得到电极过程动力学参数。由表 2 中数据可知,随着 Cr 含量的升高,低合金钢的腐蚀电位逐渐正移,腐蚀动力减小使其更难发生腐蚀。腐蚀电流密度随着 Cr 含量的升高而降低,从  $38.6 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  降低到  $1.25 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,腐蚀电流密度降低了 30 倍左右,说明 Cr 元素的添加使钢在工业环境中的腐蚀敏感性降低明显,这与之前结果一致。

图 3 为三种不同含 Cr 低合金钢在浸泡 54 h 后测

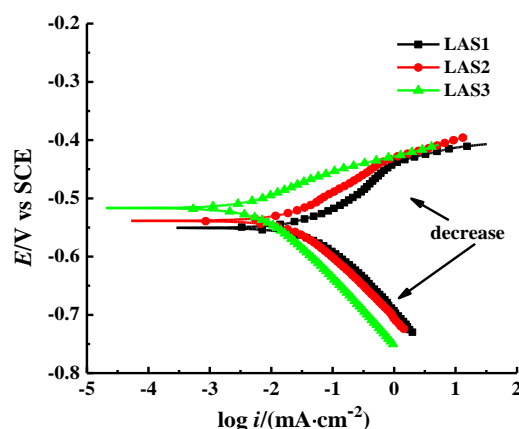


图2 三种含Cr低合金钢浸泡4 h后的动电位极化曲线

Fig.2 Potentiodynamic polarization curves of three kinds of low alloy steel containing Cr after immersion for 4 h

表2 含Cr低合金钢浸泡4 h后Tafel区腐蚀动力学参数

Tab.2 Corrosion kinetic parameters of Tafel zone of low alloy steel containing Cr after immersion for 4 h

编号	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\beta_a/(\text{mV}\cdot\text{d}^{-1})$	$\beta_c/(\text{mV}\cdot\text{d}^{-1})$
LAS1	-556	38.6	59.6	-96.4
LAS2	-524	10.3	51.4	-95.4
LAS3	-516	1.25	50.3	-98.7

得的动电位极化曲线。与 4 h 浸泡结果类似,三种 Cr 低合金钢的极化曲线均表现为活性溶解,同样地,阳极反应由 Fe 的溶解控制,阴极反应由吸氧反应控制。随着 Cr 含量的提高,极化曲线位置向左上方移动,腐蚀电位不断提高,阳极过程受到影响的程度显著高于阴极过程。当 Cr 含量从 0.03% 升高到 0.43% 时,阴极电流密度几乎不变,而阳极电流密度明显降低。说明此时 Cr 元素主要影响钢的阳极腐蚀过程,而阴极反应过程基本不变。分析认为此时在钢表面形成的腐蚀产物膜的耐蚀性受 Cr 元素影响较为明显,阳极过程受到抑制的原因可能与 Cr 的氧化物形成有关<sup>[6]</sup>。阴极过程变化不明显在于此时的腐蚀过程主要由阳极反应控制,表明  $\text{O}_2$  作为去极化剂,阴极吸氧反应能够在溶液中正常进行<sup>[6]</sup>。

表 3 为 Tafel 区拟合的电化学参数。结果表明钢中添加 0.43% 的 Cr 元素后,含 Cr 钢的腐蚀电位由 LAS1 的 -562 mV 升高至 LAS3 的 -473 mV,腐蚀电流密度从  $163.5 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  降低到  $5.1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。可见,随着 Cr 含量的增加,低合金钢的腐蚀电位正移,腐

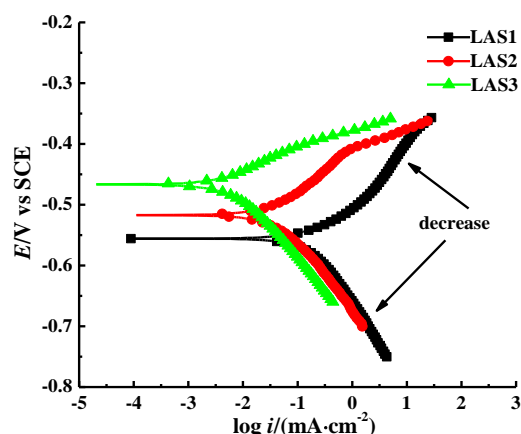


图3 三种含Cr低合金钢浸泡54 h后的动电位极化曲线

Fig.3 The potentiometric polarization curves of three low alloy steels containing Cr after immersion for 54 h

蚀过程驱动力减小,同时腐蚀电流密度和阳极电流密度也随之减小,腐蚀速度显著减小,这与图1结果一致。观察发现,阴极塔菲尔系数变化不大,而阳极塔菲尔系数变化较大,说明此时Cr的加入对阳极过程影响较大。

表3 含Cr低合金钢浸泡54 h后Tafel区腐蚀动力学参数  
Tab.3 Corrosion kinetic parameters of Tafel zone of low alloy steel after immersion for 54 h

编号	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\beta_a/(\text{mV}\cdot\text{d}^{-1})$	$\beta_c/(\text{mV}\cdot\text{d}^{-1})$
LAS1	-562	163.5	60.2	-114.3
LAS2	-508	60.5	61.2	-112.7
LAS3	-473	5.1	59.6	-113.4

图4为三种含Cr低合金钢模拟工业环境溶液中浸泡104 h后的动电位极化曲线。由极化曲线的宏观形状可以发现,三种钢浸泡后在该溶液体系下阳极一直处于活化控制状态,未发生钝化,发生铁原子活性溶解过程,并且阴极也处于活化控制状态,在测试电位范围内未发生氧极限扩散控制现象,此结果与4 h和54 h的规律一致。此时,Cr元素主要对腐蚀的阴极过程起抑制作用,这是由于生成的锈层中存在高Cr氧化物,且Cr元素促进了锈层中铁的氧化物生成,起到了稳定锈层成分的作用,因此腐蚀过程中钢表面对氧的消耗降低,导致LAS3表现出较低的阴极电流密度。

表4为Tafel拟合极化过程的动力学参数。可以发现,当铬含量增加后,浸泡104 h的腐蚀电流密

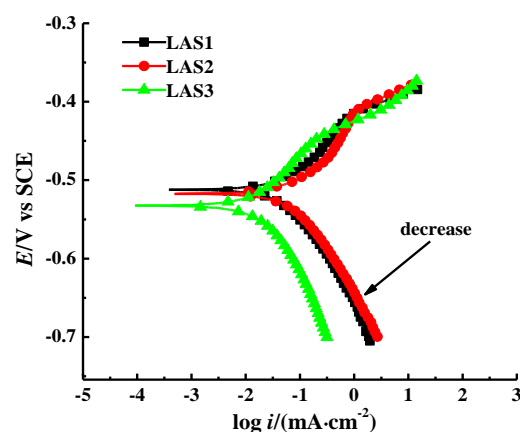


图4 三种含Cr低合金钢浸泡104 h后的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiometric polarization curves of three kinds of low alloy steel containing Cr after immersion for 104 h

度出现骤降,减小到 $32.6 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,但腐蚀电位降低,这一现象并不代表LAS3的耐蚀性劣于LAS1和LAS2,这是因为LAS3的阳极电流密度低于其他两种含Cr钢,而腐蚀电位是材料阴极和阳极反应共同的结果。拟合结果同样证实了Cr元素有助于后期降低腐蚀速率,但主要通过形成稳定锈层来抑制阴极反应过程。

表4 含Cr低合金钢浸泡104 h后Tafel区腐蚀动力学参数  
Tab.4 Corrosion kinetic parameters of Tafel zone of low alloy steel containing Cr after immersion for 104 h

编号	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\beta_a/(\text{mV}\cdot\text{d}^{-1})$	$\beta_c/(\text{mV}\cdot\text{d}^{-1})$
LAS1	-512	133.5	66.4	-98.1
LAS2	-529	123.1	52.2	-94.2
LAS3	-537	32.6	71.3	-106.3

图5为三种含Cr钢浸泡104 h后EIS测试得到的Nyquist图。由图可知,三种低合金钢阻抗谱均由一个容抗弧构成,表明三种钢在该环境的电极过程只有一个时间常数,即锈层与溶液双电层构成的双电层所致,这与浸泡环境下表面锈层容易致密化有关<sup>[6-8]</sup>。观察发现,Cr含量最大时,低合金钢容抗弧半径最大,在单一时间常数的电极过程中,容抗弧大小直观反映电极体系腐蚀阻力的大小。说明LAS3在该溶液体系下腐蚀阻力最大,最不易发生腐蚀。相反,LAS1的容抗弧半径最小,表明LAS1电极体系腐蚀阻力最小,其表面最易发生腐蚀。

使用图6所示R(QR)电路作为模拟该电极过程



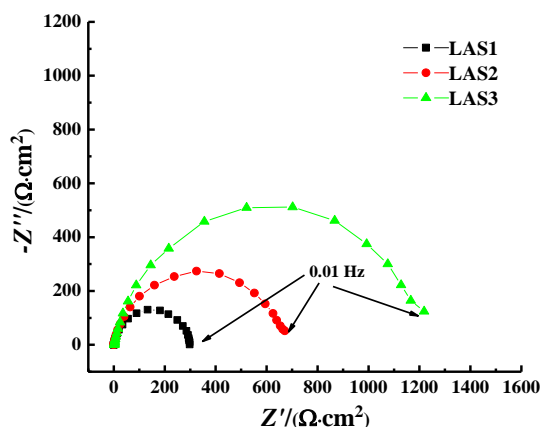


图 5 三种含 Cr 低合金钢浸泡 104 h 后的 Nyquist 阻抗谱

Fig.5 Nyquist impedance spectra of three low alloy steels containing Cr after immersion for 104 h

的等效电路。表 5 为各个等效元件的拟合数值。其中  $R_s$  为溶液电阻,  $R_t$  为电荷转移电阻,  $Q$  为常相位角元件。由于电极表面粗糙度等原因引起弥散效应, 所以在模拟等效电路中采用  $CPE(Q)$  恒相角元件代替纯电容元件  $C$ 。拟合结果表明, 三种低合金钢所在的溶液体系下溶液电阻非常小, 可以忽略不计, 溶液的电阻对低合金钢电极体系的测试基本没有影响。随着钢中 Cr 含量的增加, 电极体系的电荷转移阻抗值急剧增加, 在活化控制的体系中, 电荷转移阻抗值的增加, 反应了电极体系发生腐蚀阻力增大, 说明低合金钢的耐蚀性能提高。

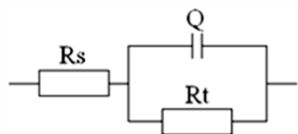


图 6 交流阻抗谱的拟合电路图

Fig.6 Fitted circuit diagrams of AC impedance spectra

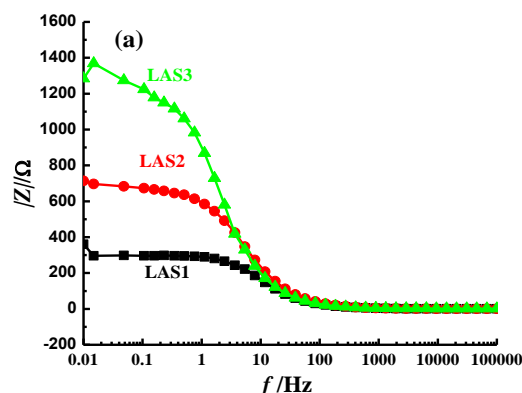
表 5 含 Cr 低合金钢浸泡 104 h 后 Tafel 区腐蚀动力学参数

Tab.5 Corrosion kinetic parameters of Tafel zone after immersion of low alloy steel containing Cr for 104 h

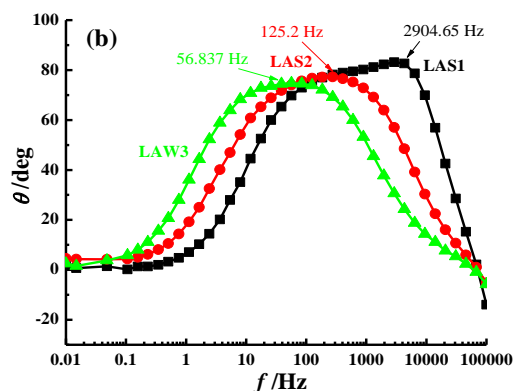
编号	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q/(10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^n)$	$n$	$R_t/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
LAS1	1.333	36.7	0.824	300.3
LAS2	0.769	19.2	0.901	818.9
LAS3	1.182	12.9	0.879	1196.2

图 7 为三种低合金钢 EIS 测试得到的 Bode 图。

结果表明 Bode 图变化规律与 Nyquist 图一致。阻抗模值随激励电位的频率的变化关系表明, 高频



(a) 模值



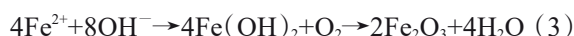
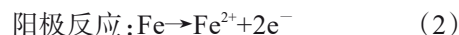
(b) 相位角

图 7 三种含 Cr 低合金钢浸泡 104 h 后的 Bode 图

Fig.7 Bode diagram of three low alloy steels containing Cr after immersion for 104 h

区下三种钢的变化规律基本一致, 这与该环境下钢表面形成的腐蚀产物致密度有关。低频区下由于腐蚀产物的双电层的特性不同, 阻抗模值随钢中 Cr 含量升高而升高。三种低合金钢表面电极阻抗随 Cr 元素添加不断增加, 其耐蚀能力增加, 这与 Nyquist 结果一致。从相位角与激励电位的频率之间的关系曲线图可以发现, Phase 曲线随着钢中 Cr 元素含量的提高而整体逐渐向左移动, 同时曲线峰宽变大。图 7(b) 中标出了相位角最大处的频率, 从电化学原理分析可知, 最大相位角频率与钢表面腐蚀产物保护性有关, 最大相位角频率越低, 表面腐蚀产物其作用的时间越长, 其保护性越好。因此, 钢中 Cr 元素的增加有助于钢表面形成保护性更好的锈层, 而锈层的保护性与锈层成分有关, 这侧面证实了 Cr 元素增加了钢腐蚀产物稳定性。

三种含Cr低合金钢在Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>质量分数为0.2%的水溶液中发生铁活性溶解的电化学反应,腐蚀电化学过程如式(2)~(4)所示<sup>[7-9]</sup>:



随着钢中Cr含量的增加,Cr固溶于铁素体中,首先在腐蚀初期钢表面的腐蚀电位升高导致阳极溶解反应受到抑制,导致阳极电流密度降低。其次,随着浸泡环境下腐蚀过程的延续,部分Cr元素溶解,并形成Cr的氧化物或氢氧化物例如Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr(OH)<sub>3</sub>等,这些Cr的腐蚀产物作为溶解铁离子的形核位点,促进了腐蚀产物的致密化,导致浸泡实验后期形成了致密的腐蚀产物膜,同时由于Cr促进了腐蚀产物物质稳定化,使其在阴极过程中的O<sub>2</sub>消耗量减少,阴极电流密度降低,进一步提高了腐蚀产物保护性。

### 3 结论

(1)腐蚀失重结果表明Cr元素的添加有助于提高钢在Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>质量分数为0.2%的水溶液中的耐蚀性。Cr元素对腐蚀初期(4~54 h)腐蚀速率降低率影响不显著,减小了腐蚀后期(54~104 h)腐蚀速率降低率,使腐蚀产物更具保护性。

(2)Cr元素在不同的浸泡周期呈现不同的耐蚀作用。其中腐蚀初期(4 h),Cr元素对提高钢基体表面的腐蚀电位的贡献,包括降低阳极及阴极电流密度;腐蚀中期(54 h)Cr元素主要通过形成保护性好的腐蚀产物膜提高钢的耐蚀性,表现为阳极电流密度的降低;腐蚀后期(104 h)Cr主要通过稳定腐蚀产物成分抑制腐蚀阴极过程,从而降低阴极电流密度。

### 参考文献

- [1] 张天翼,柳伟,范玥铭,等.海洋大气环境Cu/Ni协同作用对低合金钢耐蚀性影响[J].中国腐蚀与防护学报,2019,39(6):511-518.  
Zhang T Y, Liu W, Fan Y M, et al. Effect of synergistic action of Cu/Ni on corrosion resistance of low alloy steel in a simulated tropical marine atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(6): 511-518 (in Chinese).
- [2] 付贵勤,李东亮,朱苗勇. SO<sub>2</sub>对海洋大气环境中含铬耐候钢腐蚀行为的影响[J].钢铁,2018,53(12):94-99.  
Fu G Q, Li D L, Zhu M Y. Effect of SO<sub>2</sub> on corrosion behavior of Cr-containing weathering steel in simulated marine atmosphere[J]. Iron & Steel, 2018, 53(12): 94-99 (in Chinese).
- [3] Hong J H, Lee S H, Kima J G, et al. Corrosion behavior of copper containing low alloy steels in sulphuric acid[J]. Corrosion Science, 2012, 54: 174-182.
- [4] 黄桂桥. Cr对钢耐海水腐蚀性的影响[J].腐蚀科学与防护技术,2002,12(2):86-89.  
Huang G Q. Effect of chromium element on corrosion resistance of steel in seawater[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 12(2): 86-89 (in Chinese).
- [5] Fitzgerald K P, Nairn J, et al. Atmospheric corrosion of copper and the colour, structure and composition of natural patinas on copper[J]. Corrosion Science, 2006, 48(9): 2480-2509.
- [6] 周建龙,李晓刚,程学群,等.深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(1):47-51.  
Zhou J L, Li X G, Cheng X Q, et al. Research progress on corrosion of metallic materials in deep sea environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 47-51 (in Chinese).
- [7] 程学群,李晓刚,杜翠薇.316L不锈钢在含Cl<sup>-</sup>高温醋酸溶液中的电化学行为[J].金属学报,2006(3):299-304.  
Cheng X Q, Li X G, Du C W. Electrochemical behavior of 316L stainless steel in Cl<sup>-</sup> containing acetic acid solution under high temperature[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006(3): 299-304 (in Chinese).
- [8] 田玉琬,程学群,李晓刚.海洋大气腐蚀的室内模拟加速试验方法研究[J].腐蚀与防护,2014,35(8):781-784.  
Tian Y W, Cheng X Q, Li X G. A study of simulated indoor accelerated testing method for marine atmospheric corrosion[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(8): 781-784 (in Chinese).
- [9] 吕胜杰,程学群,段振国,等.循环水中氯离子含量对碳钢腐蚀行为影响规律的研究[J].石油炼制与化工,2011,42(3):84-87.  
Lv S J, Cheng X Q, Duan Z G, et al. Study on the influence of chloride ion content in circulating water on corrosion behavior of carbon steel[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2011, 42(3): 84-87 (in Chinese).