

2205 双相不锈钢焊接接头在模拟海水中的腐蚀行为

彭杏娜¹, 乔亚霞¹, 高仕龙², 杨 勇²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 利用 X 射线衍射仪(XRD)及背散射电子衍射(EBSD)分析了 2205 双相不锈钢焊接接头不同区域的物相及微观组织;采用电化学测试和 X 射线光电子能谱仪(XPS),探究了该焊接接头不同区域在模拟海上柔直平台冷却系统中的腐蚀行为。结果表明,焊接接头热影响区(HAZ)的动电位极化曲线中的钝化电流密度均小于母材和焊缝位置,HAZ 阻抗弧半径最大且开路电位最高,HAZ 的耐蚀性最好;XPS 结果显示在该环境中 2205 双相不锈钢钝化膜以金属氢氧化物与氧化物为主。

关键词: 2205 双相不锈钢;海上柔直平台冷却系统;电化学;腐蚀;钝化膜

中图分类号: TG174. 4

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)10-0057-08

海上风电作为新能源发电的主要载体之一,相比陆上风电,具有资源丰富且稳定、利用小时数更高、消纳便利等优点^[1]。冷却系统是海上柔直平台的关键设备之一,是换流阀、联结变压器等核心设备稳定运行的重要保障。海上柔直平台冷却系统通常采用三循环方式冷却设备,即用海水冷却淡水,淡水再冷却设备,是常用的热交换方式^[2-3]。

双相不锈钢(DSS)具有体积分数占比相近的奥氏体和铁素体组织,拥有优异的力学性能和耐蚀性,被广泛应用于工业设备和海洋结构中^[4]。但是由于 Cl^- 、 S^{2-} 等侵蚀性离子的存在,DSS 会产生局部腐蚀,因此,其腐蚀防护一直是研究的热点。海上柔直平台冷却系统长期运行于高温、高湿、高盐雾、强台风及海浪等恶劣环境中,核心设备在长期服役过程中面临着严重腐蚀风险^[5-6]。冷却系统循环管路由钢材焊接而成,焊缝是管线钢腐蚀失效最敏感的部位,虽然焊缝数量较陆地管线大幅减少,但焊缝及其热影响区(HAZ)仍是最容易受到腐蚀的部位,严重影响了管线钢的寿命和服役安全性^[7-8]。

LIOU 等^[9]通过热模拟方法研究了双相不锈钢热影响区(HAZ)的应力腐蚀行为,认为沿晶应力腐蚀大多发生在 HAZ 的晶界奥氏体,而晶内奥氏体、魏氏体的存在则可以降低应力腐蚀开裂敏感性。此外,在焊接过程中双相不锈钢中产生的二次奥氏体、

Cr_2N 沉积、 σ 相等不利组织也会降低焊接接头的耐蚀性及可靠性。WANG 等^[10]在 3.5% (质量分数,下同)NaCl 溶液中测试了 2205 DSS/X70 异种金属焊接接头不同区域的电化学行为,不同区域耐蚀性差异由强到弱依次为 2205 DSS、焊缝金属、X70HAZ、X70 母材,且在腐蚀环境中,异种金属焊接接头将发生电偶腐蚀。

笔者以 2205 DSS 管材焊接接头不同区域为研究对象,采用 X 射线衍射仪(XRD)、背散射电子衍射(EBSD)、电化学测试和 X 射线光电子能谱仪(XPS)等,分析表征了其相结构及微观组织;利用电化学方法研究了焊接接头在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为。以期海上柔直平台冷却系统用焊接管材的安全服役提供理论依据。

1 试 验

试验材料为 $\phi 325 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 2205 DSS 焊管,采用填丝的自动钨极氩弧焊进行焊接,交货态为固溶态,其化学成分见表 1。

在焊接接头不同区域取样,取样位置见图 1。其中,母材(Matrix)试样尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,焊缝(Weld)试样尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,HAZ 试样尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。对焊接接头不同位置试样进行了物相分析、微观组织观察及电化学腐蚀测试,并对电化学腐蚀试样的钝化膜进行了分析。

用于物相分析及微观组织观察的试样表面用砂纸(3000 号)打磨后,用 SiO_2 悬浮抛光液(50 nm)抛光,去除表面应力后,依次用去离子水和无水乙醇超声清洗。物相鉴定通过 $\text{Cu K}\alpha(\lambda = 1.540 6 \text{ \AA})$ 辐射

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 国家电网公司科技项目(5200-2356142A-1-1-ZN)

通信作者: 彭杏娜(1983—),高级工程师,博士,从事腐蚀与防护相关研究,13810109440, pengxingna2325@163.com

表 1 2205 DSS 焊管的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 2205 DSS welded pipe

元素	Si	Mn	P	Mo	Cr	Ni	C	S	N	Fe
质量分数/%	0.59	1.20	0.029	2.62	22.57	4.63	0.029	0.043	0.13	余



图 1 焊接接头不同区域的取样示意

Fig. 1 Sampling diagram for different areas of welded joints

的 X 射线衍射得到。工作参数如下:电压 40 kV、电流 30 mA,扫描范围 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$,扫描速率 $3 (^{\circ})/\text{min}$ 。采用 EBSD 技术进行接头微观组织分析,并通过 TSL OIM 软件对收集的数据进行分析表征。

用于电化学测试的试样用砂纸(2000 号)打磨后,非工作面用环氧树脂覆盖,其中,母材试样工作面积为 100 mm^2 ,焊缝试样工作面积为 25 mm^2 ,HAZ 试样工作面积为 9 mm^2 ,电化学试验用试样在测试前均经打磨清洗,表面无异物。电化学试验介质为 3.5% NaCl 溶液,溶液温度为 35°C ,即海水冷却循环系统中的出水口设计温度,以模拟海上柔直平台冷却系统中的海水环境。电化学试验采用三电极系统,试样、石墨和 Ag-Ag/Cl(饱和 KCl)电极分别用作工作电极、辅助电极和参比电极。测试过程中,首先在 -0.6 V (相对于饱和 KCl 电极)下极化 600 s 以除去试样表面的氧化膜,然后进行开路电位(OCP)测量。电化学阻抗谱(EIS)测试在开路条件下进行,电压幅值为 10 mV,频率为 $10^{-2} \sim 10^5 \text{ Hz}$ 。动电位极化曲线扫描速率为 1 mV/s ,扫描范围为 $-0.6 \sim 1.5 \text{ V}$ (相对于参比电极),当电流密度增加到 5 mA/cm^2 后停止扫描。EIS 和动电位极化曲线所得数据分别由 ZSimpWin 和 EClab 软件拟合,采用三个平行试样进行电化学测量,保证试验数据的重复性。

使用 EscaLab 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪测量 3.5% NaCl 溶液中 2205 DSS 表面钝化膜的化学成分,采用 Al $K\alpha$ X 射线源。试样首先在 -0.6 V (相对于饱和 KCl 参比电极)下极化 600 s,以除去表面钝化膜,然后在试验溶液中浸泡 3 600 s,以获得稳定的钝化膜,之后进行 XPS 测量。C 1s 峰

(284.8 eV)用于校准电荷偏移,并使用 XPS 峰值软件 Avantage 进行峰值拟合。

2 结果与讨论

2.1 物相分析及微观组织表征

由图 2 可见:母材和热影响区最强峰为面心立方(FCC)和体心立方(BCC)结构,符合商用 2205 为双相不锈钢的显微组织要求^[11]。焊缝处识别出一些金属间化合物的弱峰,无法判断其具体结构,可能为焊接时高温产生的碳化物^[12]。

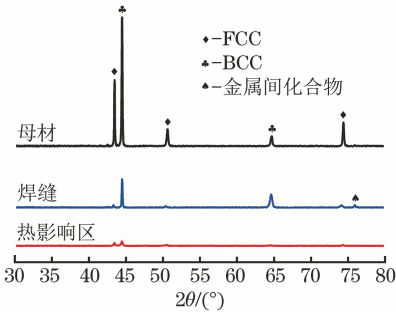


图 2 焊接接头不同区域的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of different regions of welded joints

由图 3 可见:母材试样和 HAZ 试样表现出标准的商用 2205 双相不锈钢的特征,即具有相近体积分数的奥氏体相和铁素体相^[11,13]。而焊缝区试样主要以 BCC 为主,同时存在点状 FCC 结构,还掺杂少量未识别的金属间化合物,与图 2 中 XRD 图谱结果相一致。图 3(d),(h)和(l)分别显示了母材、热影响区和焊缝的晶粒尺寸分布,其中母材、热影响区和焊缝的晶粒尺寸分别为 15.8, 14.7, 234.0 μm 。即热影响区试样的晶粒尺寸最小,焊缝试样的晶粒尺寸最大。焊接接头不同位置晶粒尺寸的差异可能对其耐蚀性产生影响。罗检等^[14]发现晶粒细化可以提高材料的耐蚀性。除此之外,尺寸较小的杂质和第二相在一定程度上也可以提高材料的耐蚀性^[15]。

2.2 电化学行为

2.2.1 动电位极化

由图 4 可见:焊接接头不同区域试样的极化曲线阳极部分都具有相似的形状,这表明其具有相似的钝化行为^[16]。此外,所有试样均表现出较弱的钝化行为,腐蚀电流密度(J_{corr})随着外加电位

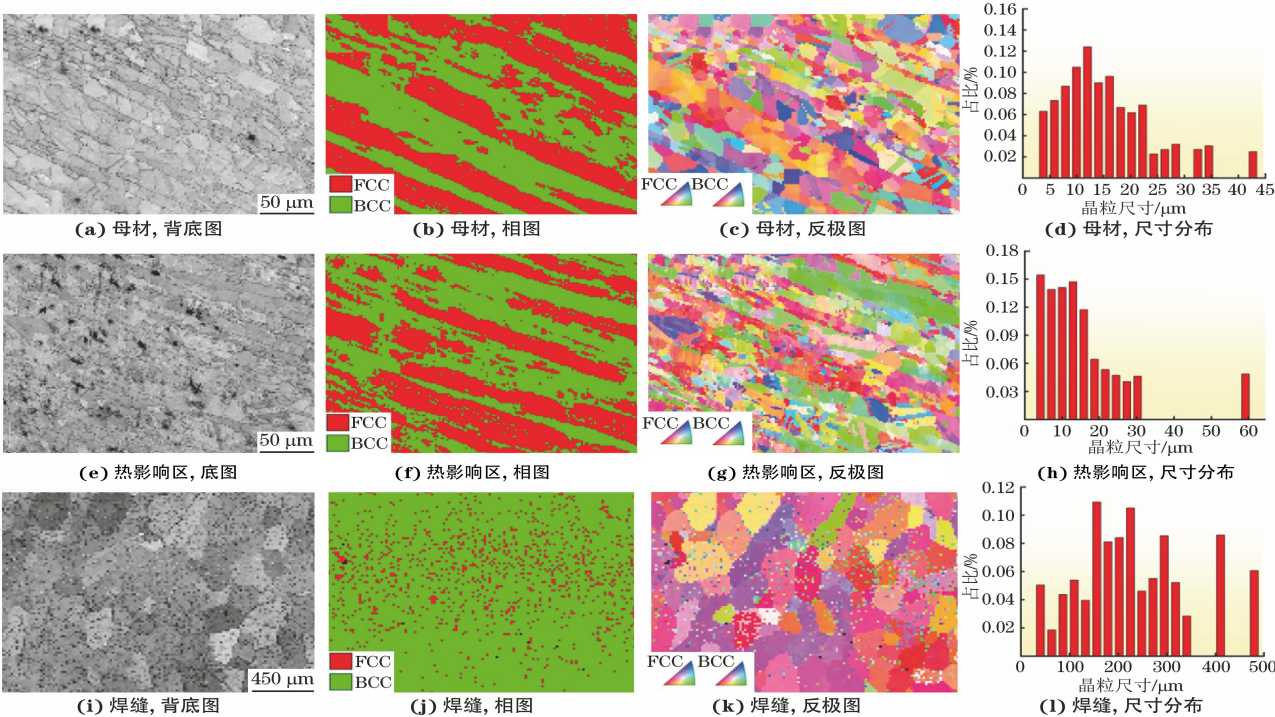


图 3 2205 不锈钢焊接接头不同区域的 EBSD 图谱

Fig. 3 Back contrast map (a, e, i), phase map (b, f, j), inverse pole figures (c, g, k) and grain size distribution map (d, h, l) of different regions of commercial 2205 welded joints

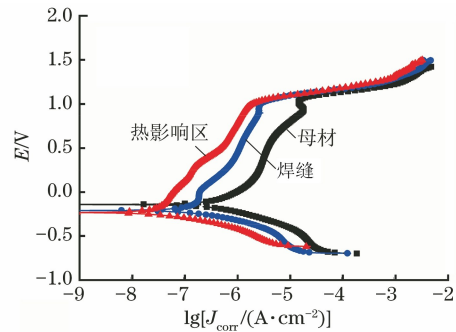


图 4 焊接接头不同区域试样在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化曲线
Fig. 4 Dynamic polarization curves of samples of different areas of welded joints in 3.5% NaCl solution

的升高均逐渐增大,在超过 1 V 后发生过钝化,这主要是由于阳极钝化膜的溶解速率高于钝化膜^[17-18]。由表 2 可见:母材试样的 J_{corr} 最高($2.84 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$),即耐蚀性最差;热影响区试样的 J_{corr} 最低($1.4 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$),即耐蚀性最好,且热影响区试样的钝化电流密度(J_p)最低,这也表明其具有最好的耐蚀性。

表 2 极化曲线拟合结果

试样	$E_{\text{corr}}/$	$J_{\text{corr}}/$	$J_p/$
	mV	($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
母材	-141.776	2.84×10^{-7}	1.21×10^{-6}
焊缝	-206.725	1.51×10^{-7}	1.84×10^{-7}
热影响区	-231.309	1.4×10^{-8}	5.21×10^{-8}

2.2.2 电化学阻抗谱

图 5 所示为 2205 不锈钢焊接接头各区域试样在 3.5%NaCl 溶液中的 EIS 测量结果。如图 5(a)所示,所有试样的曲线都呈现出相似的电容弧形状,表现出类似的钝化行为^[19]。母材试样的曲线半径最小,而热影响区试样的曲线半径则最大,表明了热影响区具有最好的耐蚀性。图 5(b)所示的 Bode 图表明,与其他试样相比,热影响区试样表现出最高的阻抗模量 $|Z|$ 值,而母材试样表现出较低的 $|Z|$ 值,这表明热影响区试样在试验溶液中具有较高的耐蚀性。

为了进一步阐述反应机理,用 ZsimpWin 软件将 EIS 数据利用如图 5(c)所示的等效电路进行拟合。模型中各部分具体含义如下: R_s 代表溶液电阻, CPE_1 代表钝化膜电容, R_f 代表钝化膜电阻, CPE_2 代表双电层电容, R_{ct} 代表钝化膜与母材之间的电荷转移电阻^[20]。 R_{ct} 值越大,说明试样电荷越难发生转移,腐蚀抑制作用越明显,腐蚀速率降低。考虑试样表面的不均匀性,采用恒相位元件(CPE)代替纯电容。拟合结果如表 3 所示,误差值(χ^2)较小,表明模型拟合性能良好^[21]。由拟合值可知,热影响区的 R_{ct} 值最大,而母材的 R_{ct} 最小,表明热影响区试样更能抑制腐蚀作用,具有较低的腐蚀速率,这与图 4 中极化曲线所得结果相同。极化电阻($R_p =$

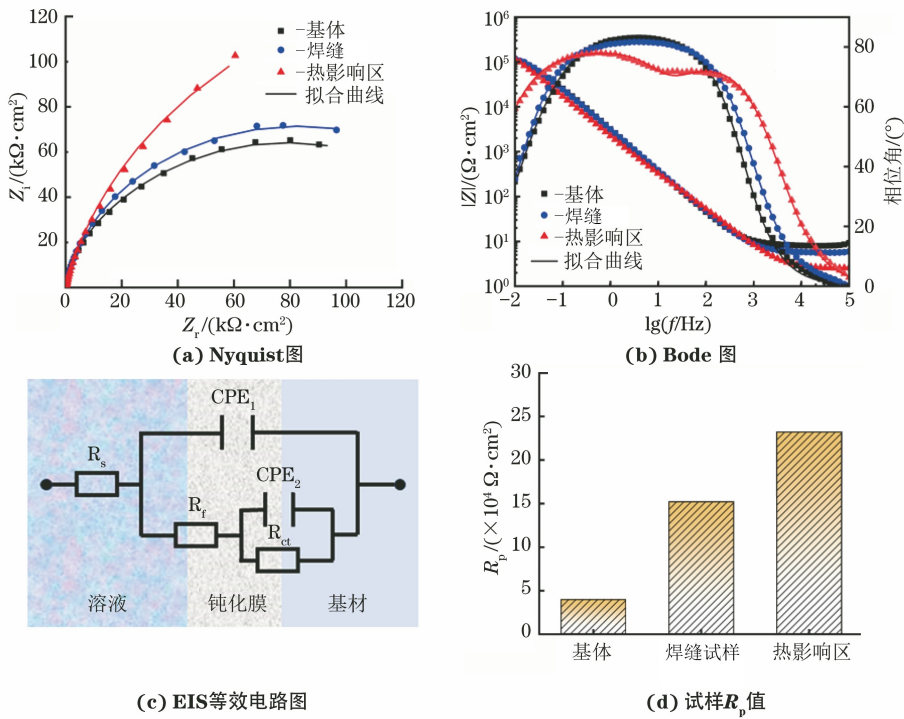


图 5 焊接接头不同区域试样在 3.5%NaCl 溶液中的 EIS 结果

Fig.5 EIS results of samples of different areas of welded joints in 3.5% NaCl solution: (a) Nyquist plots; (b) Bode plots; (c) equivalent circuit diagram for EIS; (d) R_p of samples

表 3 电化学阻抗谱拟合结果
Tab.3 Fitting results of EIS

试样	$R_s/$ $(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	CPE_1		$R_f/$ $(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	CPE_2		$R_{ct}/$ $(10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\chi^2/$ 10^{-3}
		$Y_0/(10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n_1		$Y_0/(10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n})$	n_2		
母材试样	8.22	5.65	0.93	11.2	16.02	0.94	0.398	1.15
焊缝试样	5.64	3.65	0.95	9.98	2.48	0.84	1.52	0.153
热影响区试样	2.46	2.80	0.96	7.78	1.72	0.81	2.32	0.222

R_f+R_{ct})可以直观地反映试样的耐蚀性,可以认为极化电阻越高,耐蚀性越好^[17,22]。图 5(d)显示了不同区域的试样 R_p 值,可以看出母材试样的 R_p 值最低,为 $3.98 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$,而热影响区试样的最高($2.32 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$),即热影响区试样的耐蚀性最好。

2.2.3 钝化膜的 Mott-Schottky 分析

由图 6 可见:随着测试时间的延长,各区域试样的电位逐渐稳定,最终测得热影响区试样的开路电位最高,焊缝试样次之,母材试样的开路电位最低,开路电位更高代表耐蚀性更好^[23]。

由于金属表面钝化膜的半导体特性在损耗状态下符合 Mott-Schottky 关系式,对于不同类型半导体分别有^[24]:

n 型:

$$\frac{1}{C_{sc}^2} = \frac{2}{\epsilon \epsilon_0 e N_D} \left(U - U_{fb} - \frac{kT}{e} \right) \quad (1)$$

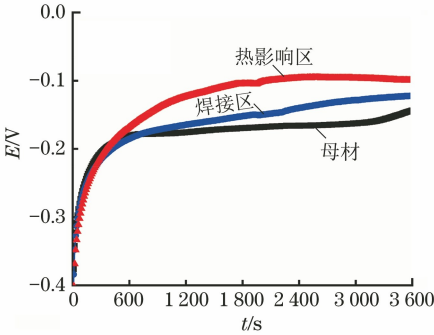


图 6 不锈钢焊接接头不同区域试样在 3.5%NaCl 溶液中的开路电位

Fig.6 Open circuit potential of samples of different areas of stainless steel welded joints in 3.5% NaCl solution

p 型:

$$\frac{1}{C_{sc}^2} = -\frac{2}{\epsilon \epsilon_0 e N_A} \left(U - U_{fb} - \frac{kT}{e} \right) \quad (2)$$

式中: C_{sc} 为空间电荷层电容; ϵ 为钝化膜的相对介

电常数(不锈钢钝化膜的 ϵ 值常采用 12); ϵ_0 为真空介电常数 (8.854×10^{-12} F/m); e 为电子电量 (1.602×10^{-19} C); N_D 为施主浓度; N_A 为受主浓度; U 为外加电位; U_{fb} 为平带电位; k 为波尔兹曼 (Boltzmann) 常数 ($1.380\ 66 \times 10^{-23}$ J/K); T 为热力学温度。

由 Mott-Schottky 分析图的直线段斜率可求出施主浓度 N_D 和受主浓度 N_A 。

在 Mott-Schottky 曲线图中,根据对应曲线斜率的正负可判断氧化膜半导体的类型。如果斜率为正值,表示氧化膜为 n 型半导体;如果斜率为负值,则为 p 型半导体^[23, 24]。由图 7 可见,3 种试样的钝化膜都表现出相似的 p-n-p 型半导体特性。为了便于分析,将 Mott-Schottky 曲线从左到右分别为 I,

II 和 III 区。I 区 ($-1 \sim -0.5$ V) 和 III 区 ($0.5 \sim 1$ V) 的曲线斜率为负值,说明钝化膜呈 p 型半导体特征,此时阳极氧化膜的半导体特性与氧化膜形成的电解液种类有关,空间电荷区多数载流子为空穴^[23, 25]。II 区 ($-0.5 \sim 0.5$ V) 曲线的斜率都为正值,这表明钝化膜具有 n 型半导体特征,氧空位和阳离子间隙是钝化膜内的主要点缺陷^[26]。

图 7(b)所示为计算得到的 2205 不锈钢焊接接头不同部位在线性区域 II 的 N_D 值。 N_D 值越大,通常表明钝化膜表面与溶液的反应越剧烈,这会导致钝化膜的稳定性下降。如图 7(b)所示,热影响区试样在 3.5% NaCl 溶液中表现出良好的耐蚀性, N_D 为 $3.203\ 4 \times 10^{18}$ cm^{-3} ,而母材的 N_D 为 $2.105\ 4 \times 10^{19}$ cm^{-3} ,表现出最差的耐蚀性。

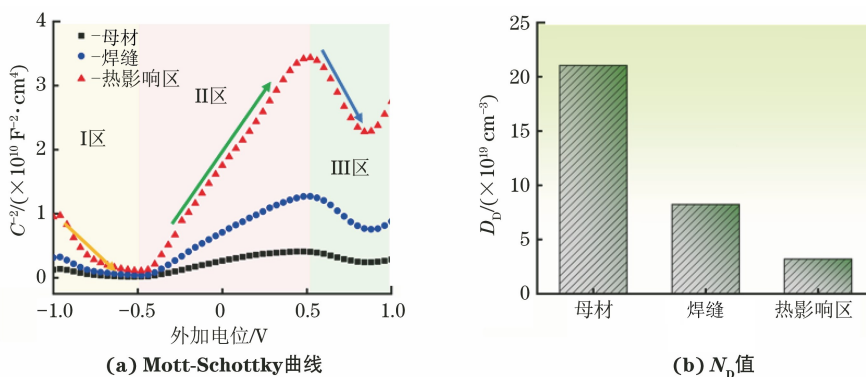


图 7 焊接接头不同区域试样在 3.5% NaCl 溶液中的 Mott-Schottky 曲线及计算得到的不同区域钝化膜中的 N_D 值

Fig.7 Mott-Schottky curves in different regions of welded joints of 2205 stainless steel in 3.5% NaCl solution (a); N_D value of passive film in different regions of welded joints (b)

2.3 钝化膜 XPS 结果分析

图 8 为 2205 不锈钢在模拟海上柔直平台冷却系统溶液环境中的钝化膜 XPS 测试结果,分别对应于 Fe2p、Mo3d、Ni2p、Cr2p 和 O1s 的光谱。Fe2p 光谱显示四个峰,Fe 金属 (706.6 eV 和 720.2 eV), $\text{Fe}_{\text{ox}}^{3+} 2p_{3/2}$ (710.4 eV) 和 $\text{Fe}_{\text{ox}}^{8/3+} 2p_{1/2}$, 其中主峰为 $\text{Fe}_{\text{ox}}^{3+} 2p_{3/2}$ (710.4 eV) 和 $\text{Fe}_{\text{ox}}^{8/3+} 2p_{1/2}$, 说明母材钝化膜中 Fe 元素主要以 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 氧化物的形式存在^[17]。在 Cr2p 光谱中,可以观察到三个峰: $\text{Cr}_{\text{hy}}^{3+} 2p_{1/2}$ (586.8 eV), $\text{Cr}_{\text{ox}}^{4+} 2p_{3/2}$ (576.3 eV) 和 Cr 金属 (573.8 eV), 钝化膜中 Cr 元素主要以 CrO_2 氧化物和 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 氢氧化物的形式存在。Mo3d 光谱在 $\text{Mo}_{\text{ox}}^{4+} 3d_{3/2}$ (234.2 eV)、 $\text{Mo}_{\text{ox}}^{4+} 3d_{5/2}$ (231.1 eV) 和 Mo 金属 (227.5 eV) 处显示峰,表明 MoO_2 是钝化膜中 Mo 的主要形式。Ni2p 光谱只显示 Ni 金属 (852.6 eV) 处的峰,表明 Ni 在该溶液环境中主要以金属态的形式存在,也有研究显示 Ni 的常见氧

化物 NiO 在碱性溶液中可以稳定形成,酸性和中性溶液中较多以 Ni 离子形态存在^[27]。O1s 光谱显示对应于 H_2O (533.3 eV)、 OH^- (532 eV) 和 O^{2-} (530.4 eV) 的峰,其中观察到 OH^- 和 O^{2-} 的强度最高。这三个峰中, OH^- 和 O^{2-} 指的是钝化膜中的氢氧化物和氧化物, H_2O 可以捕获溶解的金属离子,有助于修复钝化膜^[28]。由图 8(f) 可见,母材钝化膜中的金属氢氧化物的占比较高,说明氧化膜不够致密,而且结合水 (H_2O) 的含量较少,即钝化膜腐蚀后的再钝化能力较差,这与图 4 中极化曲线结果一致。

3 结 论

(1) 不锈钢母材和热影响区表现出标准的 FCC+BCC 双相结构,而焊缝为 BCC 和点状 FCC 结构,并伴随金属间化合物的析出。其中焊缝处晶粒尺寸最大,母材次之,热影响区的最小。

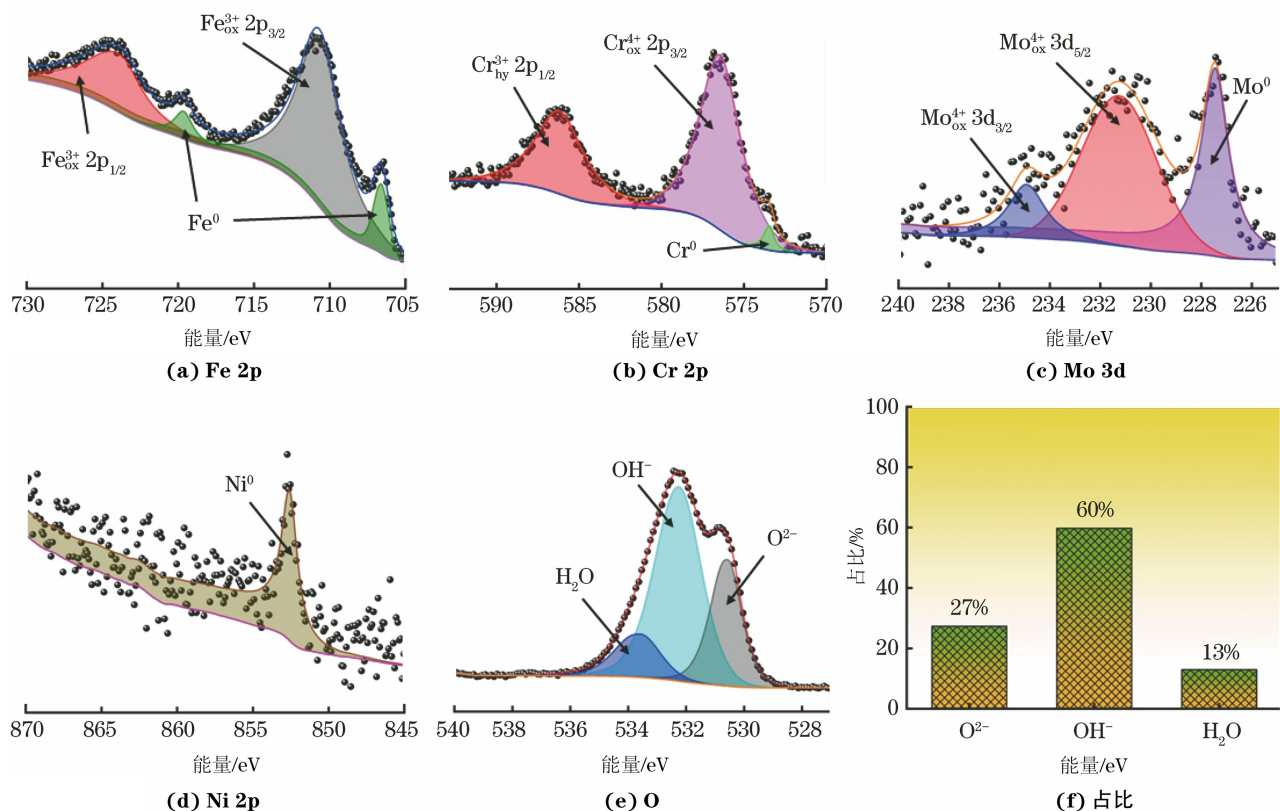


图 8 2205 不锈钢试样在模拟海上柔直平台冷却系统溶液环境中钝化膜的 XPS 图谱

Fig.8 XPS spectrum of passivated film of 2205 stainless steel in the solution environment of the simulation cooling system of a flexible offshore platform: (a) Fe2p spectrum; (b) Cr2p spectrum; (c) Mo3d spectrum; (d) Ni2p spectrum; (e) O1s spectrum; (f) content proportion of different elements in figure (e)

(2) 电化学测试结果表明热影响区试样的耐蚀性最好。对三个区域试样的钝化膜 Mott-Schottky 特性分析表明,热影响区试样的载流子浓度也最低,为 $3.2034\times10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 。

(3) 2205 不锈钢表面钝化膜中氧化物成分主要为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 CrO_2 和 MoO_2 ,氢氧化物主要为 $\text{Cr}(\text{OH})_3$,其中氢氧化物占比最高。

参考文献:

[1] 闵兵,王梦川,傅小荣,等. 海上风电是风电产业未来的发展方向——全球及中国海上风电发展现状与趋势[J]. 国际石油经济,2016,24(4):29-36.
MIN B, WANG M C, FU X R, et al. Offshore wind power as the development trend of wind industry—developments of global offshore wind power [J]. International Petroleum Economics, 2016, 24 (4): 29-36.
[2] 高润秋,段建良,董健,等. 2205 DSS 连续油管的适用性研究[J]. 石油管材与仪器,2021,7(2):38-42.
GAO R Q, DUAN J L, DONG J, et al. Suitability of 2205 DSS coiled tubing[J]. Petroleum Tubular Goods

&. Instruments,2021,7(2):38-42.
[3] 王诗超,刘嘉畅,刘展志,等. 海上风电产业现状及未来发展分析[J]. 南方能源建设,2023,10(4):103-112.
WANG S C, LIU J C, LIU Z Z, et al. Analysis of current situation and future development of offshore wind power industry [J]. Southern Energy Construction,2023,10(4):103-112.
[4] 刘俊,曾超,赵林烨. 焊接工艺对双相钢焊缝宏观形貌及组织性能的影响[J]. 现代制造技术与装备,2021,57(9):55-59.
LIU J, ZENG C, ZHAO L Y. Effect of welding technology on the macroscopic morphology and microstructure properties of double-phase steel welds [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2021,57(9):55-59.
[5] GISBORNE J T. Sea water corrosion[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1981,12(5):625-626.
[6] 刘智勇,万红霞,李禅,等. X65 钢焊接接头在模拟浅表海水和深海环境中的腐蚀行为对比[J]. 中国腐蚀与防护学报,2014,34(4):321-326.
LIU Z Y, WAN H X, LI C, et al. Comparative study on corrosion of X65 pipeline steel welded joint in

- simulated shallow and deep sea environment [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(4): 321-326.
- [7] WANG J, XIAO G, ZHAO W, et al. Microstructure and corrosion resistance to H₂S in the welded joints of X80 pipeline steel[J]. Metals, 2019, 9(12): 1325.
- [8] XU L Y, KANG Z Y, HAN Y D, et al. Effect of hydrogen on the fracture toughness of X65 high-frequency welded pipeline[J]. Welding in the World, 2019, 63(1): 75-86.
- [9] LIOU H Y, HSIEH R I, TSAI W T. Microstructure and stress corrosion cracking in simulated heat-affected zones of duplex stainless steels[J]. Corrosion Science, 2002, 44(12): 2841-2856.
- [10] WANG J, LU M X, ZHANG L, et al. Effect of welding process on the microstructure and properties of dissimilar weld joints between low alloy steel and duplex stainless steel [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012, 19(6): 518-524.
- [11] 丁奕,王力伟,刘德运,等. 低合金钢与双相不锈钢异种金属焊接接头组织和性能的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(2): 295-300.
DING Y, WANG L W, LIU D Y, et al. Microstructure and properties of dissimilar metal welded joints of low alloy steel and duplex stainless steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(2): 295-300.
- [12] 黎丽,唐焱杰,戴伟,等. 2205 和 Q235B 异种钢的焊接接头组织及性能分析[J]. 金属加工(热加工), 2023(12): 66-69.
LI L, TANG Y J, DAI W, et al. Microstructure and property analysis of welded joint of 2205 and Q235B dissimilar metal[J]. MW Metal Forming, 2023(12): 66-69.
- [13] 王晓燕,张雷,路民旭. 双相不锈钢与微合金钢异金属焊接接头的组织及性能[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(2): 131-136.
WANG X Y, ZHANG L, LU M X. Microstructure and properties of dissimilar weldment between duplex stainless steel and micro-alloyed steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(2): 131-136.
- [14] 罗检,张勇,钟庆东,等. 晶粒度对一些常用金属耐腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(4): 349-352, 356.
LUO J, ZHANG Y, ZHONG Q D, et al. Influence of grain size on corrosion resistant of commonly used metals[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(4): 349-352, 356.
- [15] WANG P J, MA L W, CHENG X Q, et al. Influence of grain refinement on the corrosion behavior of metallic materials: a review[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(7): 1112-1126.
- [16] PAN Z M, WEI Y, FU Y, et al. Effect of electrochemical hydrogen charging on the mechanical property and corrosion behavior of Ti-3Mo alloy[J]. Corrosion Science, 2022, 200: 110219.
- [17] ZHAO Q C, LUO H, PAN Z M, et al. Effect of hydrogen charging on the corrosion behavior of a body-centered cubic FeCrV medium entropy alloy[J]. Corrosion, 2023, 223: 111468.
- [18] LUO H, SU H Z, DONG C F, et al. Passivation and electrochemical behavior of 316L stainless steel in chlorinated simulated concrete pore solution [J]. Applied Surface Science, 2017, 400: 38-48.
- [19] PAN Z, LUO H, CHENG H, et al, et al. A nano-sized precipitate strengthened medium entropy alloy with superior strength-ductility synergy and exceptional corrosion resistance[J]. Materials Today Physics, 2023, 33: 120-125.
- [20] HAMLAOUI Y, TIFOUTI L, PEDRAZA F. On the corrosion resistance of porous electroplated zinc coatings in different corrosive media [J]. Corrosion Science, 2010, 52(6): 1883-1888.
- [21] POTUCEK R K, RATEICK R G Jr, BIRSS V I. Impedance characterization of anodic barrier Al oxide film beneath porous oxide layer [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(8): B304.
- [22] 王博,安士忠,郭俊卿,等. 商用 MB1 和 MB8 镁合金在 NaCl 溶液中的电化学性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024(8): 1073-1080.
WANG B, AN S Z, GUO J Q, et al. Electrical performance of commercial MB1 and MB8 Mg-alloys in NaCl solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024(8): 1073-1080.
- [23] BI D, CHANG Y, LUO H, et al. Corrosion behavior and passive film characteristics of AlNbTiZrSix high-entropy alloys in simulated seawater environment[J]. Corrosion Science, 2023, 224: 111530.
- [24] 罗检,王毅,蒋继波,等. 不同晶粒度螺纹钢的电化学行为及其钝化膜的 Mott-Schottky 研究[J]. 化学学报, 2012, 70(10): 1213-1220.
LUO J, WANG Y, JIANG J B, et al. Electrochemistry behavior of rebars with different

grain size and mott-schottky research of passive films [J]. Acta Chimica Sinica,2012,70(10):1213-1220.

[25] ZHAO Q C,PAN Z M,WANG X F, et al. Corrosion and passive behavior of $Al_xCrFeNi_{3-x}$ ($x=0, 6, 0.8, 1.0$) eutectic high entropy alloys in chloride environment [J]. Corrosion Science, 2022, 208: 110666.

[26] 邢少华,彭文山,钱山尧,等.海水冲刷流速对不同表面处理 2205 不锈钢点蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报,2024,44(3):658-668.

XING S H, PENG S H, QIAN Y, et al. Effect of seawater flow velocity on pitting corrosion of 2205 stainless steel with different surface treatments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024,44(3):658-668.

[27] SEQUEIRA C A C,CARDOSO D S P,AMARAL L, et al. On the performance of commercially available corrosion-resistant nickel alloys: a review [J]. Corrosion Reviews,2016,34(4):187-200.

[28] PAN Z, LUO H, ZHAO Q, et al. Tailoring microstructure and corrosion behavior of CoNiAl x medium entropy alloys via Al addition[J]. Corrosion Science. 2022, 207.

Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joint in Simulated Seawater

PENG Xingna¹, QIAO Yaxia¹, GAO Shilong², YANG Yong²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The phase and microstructure of different areas of 2205 duplex stainless steel welded joints were analyzed using X-ray diffractometer (XRD) and electron back scatter diffraction (EBSD). The corrosion behavior of different areas of the welded joint in a simulated offshore flexible platform cooling system was studied using electrochemical tests and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results show that the passivation current density in the potentiodynamic polarization curve of the heat-affected zone (HAZ) of the welded joint was smaller than that of the base metal and weld seam. The HAZ had the largest impedance arc radius and the highest open circuit potential, and the HAZ had the best corrosion resistance; XPS results show that the passivation film of 2205 duplex stainless steel in this environment was dominated by metal hydroxides and oxides.

Key words: 2205 duplex stainless steel; offshore flexible platform cooling system; electrochemistry; corrosion; passivation film