

核电汽轮机焊接转子接头在氯离子环境中的电偶腐蚀行为

欧阳玉清, 黄毓晖, 翁 硕, 轩福贞

(华东理工大学 承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 为了研究焊接接头的尺寸效应对焊接接头的电偶腐蚀行为的影响, 采用宏观电化学、微区电化学 (SVET)、浸泡试验等试验研究了 25Cr2Ni2MoV 转子钢焊接接头在氯离子溶液中的电偶腐蚀行为. 结果表明, 焊缝的腐蚀电位最低, 腐蚀电流密度最大, 焊缝区作为阳极优先发生腐蚀, 而母材和热影响区作为阴极区被保护. 进一步运用三维形貌仪 (IFM) 和扫描电镜 (SEM) 观察腐蚀表面形貌, 发现随着焊接接头尺寸的增加电偶腐蚀效应更显著, 但是当接头尺寸增大到一定程度后, 电偶腐蚀效应又有所减弱.

关键词: 核电汽轮机; 焊接接头; 电偶腐蚀; 尺寸效应

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400171

0 序 言

随着核电汽轮机转子向着大容量、轻量化的方向发展, 焊接技术被广泛应用于不同材料、不同尺寸大型汽轮机的连接和组装. 与传统整锻转子和套装转子相比, 焊接转子具有空腔结构, 可以满足轻量化的需求, 选材及结构形式灵活, 生产成本低, 采购周期短, 同时还具有优越的使用性能^[1], 已成为核电汽轮机转子重点发展的结构形式^[2].

焊接接头母材、焊缝和热影响区间材料成分、组织结构上的差异导致熔合线附近存在原电池效应 (galvanic effect)^[3]. 李维锋等人^[4]通过对焊接接头各区域开路电位和电偶腐蚀电流的测量, 研究了采用两种不同焊接工艺所得焊接接头各区域的电偶腐蚀行为, 发现母材的耐蚀性优于热影响区和焊缝. Wei 等人^[5]运用三种 S 含量不同的焊条对 E32 等级抗腐蚀钢进行焊接, 对焊接接头进行了腐蚀试验以及动电位极化等试验, 发现 S 元素的存在降低了自腐蚀电位, 增加了焊缝区被腐蚀的可能性. 除了金属材料自身性能以外, 电偶腐蚀过程中暴露的阴阳面积比是影响电偶腐蚀的重要因素, 随着阴阳面积比的逐渐增大, 电偶腐蚀效应逐渐增强^[6-7].

Hasan^[8]测试了通过碳钢和黄铜在溶液中发生电偶腐蚀时的动电电流变化, 发现不仅阴阳极面积比且阴阳极面积之和对动电电流都存在一定的影响.

对于 NiCrMoV 钢汽轮机焊接转子接头, 在 180 °C, 3.5%NaCl 溶液中浸泡的 U 形试样表面发现靠近熔合线的焊缝区优先产生了大量点蚀坑^[9], 焊接接头中母材、焊缝和热影响区中存在的电势差引起了电偶腐蚀的发生^[10]. 但是, 目前对于 NiCrMoV 钢焊接接头电偶腐蚀的形成机理及影响因素尚未进行深入分析. 因此, 试验采用传统的宏观电化学及微区电化学试验, 综合分析焊接接头不同区域宏观及局部的电化学特性. 进一步进行焊接接头的浸泡试验, 采用三维形貌仪 (IFM)、扫描电镜 (SEM) 等分析焊接接头暴露面积对电偶腐蚀行为的影响.

1 试验方法

1.1 试验材料

试验所用材料为核电汽轮机焊接转子 25Cr2Ni2MoV 焊接接头. 为了使焊接性能优良, 焊缝采用窄间隙氩弧焊打底和窄间隙埋弧焊的焊接工艺. 焊接完成后, 再经过 550 °C/40 h 的焊后热处理来消除焊接残余应力. 25Cr2Ni2MoV 转子钢材料 (母材) 和焊缝材料的化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所示.

表 1 25Cr2Ni2MoV 转子钢材料 (母材) 和焊缝材料的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 25Cr2Ni2MoV (BM) and WM

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
母材	0.23	0.10	0.18	0.005	0.005	2.33	2.21	0.75	0.1
焊缝	0.12	0.20	1.48	0.005	0.005	0.57	2.18	0.51	—

表 2 25Cr2Ni2MoV 转子钢材料 (母材) 和焊缝的力学性能
Table 2 Mechanical properties of 25Cr2Ni2MoV (BM) and WM

材料	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	断面收缩率 $Z(\%)$
母材	723	842	21	72
焊缝	758	814	18	63

1.2 微观组织观察及显微硬度测试

从焊接接头试样上切取包含母材、焊缝和热影响区的试样,通过线切割制备 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的试样用于金相观察和显微硬度测试,用 180 ~ 2000 目砂纸打磨,并用氧化铝抛光剂抛光,再用 4% 的硝酸溶液侵蚀,通过光镜观察得到转子钢 25Cr2Ni2MoV 焊接接头焊缝、热影响区的金相组织. 硬度测试采用维氏硬度仪,通过金刚石按压得到压痕的面积得到材料的维氏硬度,其中载荷是 1.96 N, 保载时间是 15 s.

1.3 宏观电化学试验

焊接接头母材、焊缝、热影响区的电化学试验均在室温下 3.5% NaCl 溶液中进行. 电化学工作站为辰华 chi660e, 试验采用三电极体系, 饱和甘汞电极 (SCE) 为参比电极, 铂电极为辅助电极, 试样作为工作电极. 将焊接接头切片成独立的试样, 即单独的焊缝、热影响区、母材, 试样暴露于腐蚀环境的面积均为 0.95 cm^2 . 对于热影响区来说, 首先测试细晶区开路电位和极化曲线, 再用砂纸研磨至粗晶区后再测试粗晶区的电化学性能. 在开路电位测试前, 先将试样在腐蚀溶液中浸泡 10 min. 极化曲线的测试范围为 $\pm 0.4E_{\text{corr}}$, 测试速率为 $0.001\text{ V}_{\text{SCE}}/\text{s}$. 每个区域的极化曲线为三次测试后的平均值.

1.4 微区电化学试验

为检测焊接接头各微区的腐蚀电流密度, 运用 SVET (scanning vibrating electrode technique) 技术测试包含焊缝、热影响区、母材的焊接接头, 测试范围为 $12\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 试样用环氧树脂镶嵌并用 180 ~

2000 目砂纸打磨. 设定探针的振幅为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 探针和试样表面之间的距离为 $100\text{ }\mu\text{m}$. 由于在高浓度的溶液中测试腐蚀速度过快, 容易使腐蚀产物在试样表面堆积, 影响测试结果, 所以试验采用 0.05% 的 NaCl 溶液进行测试. 假设探针周围的电场恒定, 电流密度 $j(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$ 可以通过测得电势差 $\Delta\phi(\text{V})$ 、电导率 $k(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$ 及振幅 $d(\text{cm})$ 计算^[11], 即

$$j = -\Delta\phi \frac{k}{d} \tag{1}$$

1.5 浸泡试验

如图 1 所示, 对不同暴露面积的 25Cr2Ni2MoV 焊接接头进行浸泡试验, 分析暴露面积对腐蚀程度的影响, 各试样横截面积均为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 其示意图如图 1 所示. 为了对比焊接接头不同区域的腐蚀程度, 将焊接接头部分用胶带粘住 (如图 1 中

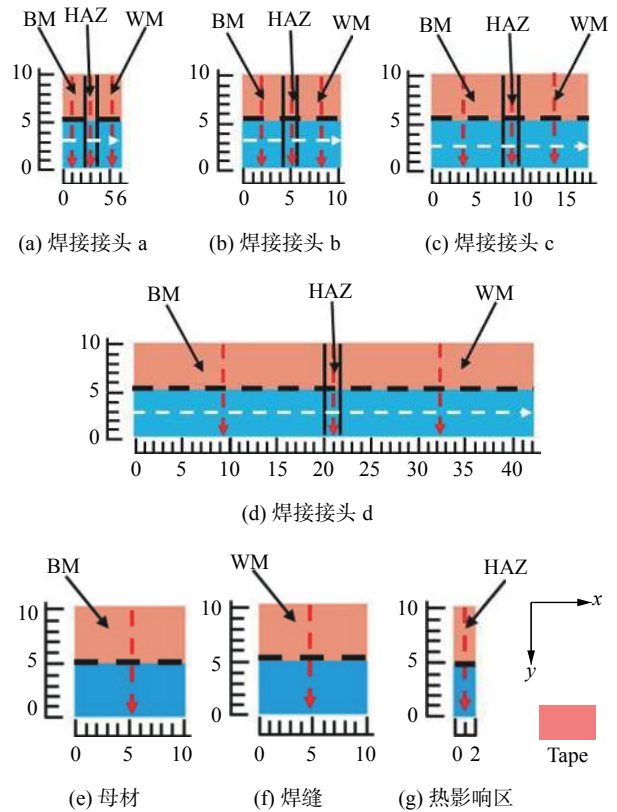


图 1 浸泡试验试样示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic diagram of the specimens using in the immersion tests

橙色区域所示)^[12]. 浸泡试验在室温下 3.5%NaCl 溶液中进行. 浸泡试验第一个周期为 240 h, 浸泡 240 h 后取出试样, 分别用去离子水、乙醇、丙酮对试样进行超声清洗. 运用三维形貌仪 (IFM) 观察表面形貌以及腐蚀坑的深度, 再利用扫描电镜 (SEM) 观察表面形貌以及能谱分析仪 (EDS) 分析试样表面元素变化. 第二个周期为继续浸泡 720 h, 同样在浸泡结束后取出试样进行上述分析.

2 试验结果与讨论

2.1 焊接接头各区域的显微组织及显微硬度分布

焊接接头各区域的显微组织如图 2 所示. 由于焊接时受温度梯度影响, 热影响区晶粒大小从熔合线开始向母材依次减小, 可以分为粗晶区 (CGHAZ) 和细晶区 (FGHAZ), 其宽度大约为 2 mm. 焊接接头各区域硬度值的分布不均是由各区域内不同的微观结构造成的, 如晶粒大小、微观组织以及碳含量等. 对于热影响区, 细晶区的晶粒是最小的, 其马氏体为颗粒状的回火马氏体 (图 3), 而粗晶区主要

由硬度较高的回火马氏体以及板条贝氏体组成 (图 4), 颗粒状马氏体的硬度低于板条状马氏体, 且该区域中马氏体板条较宽, 并且板条内分散着大量的碳化物析出物, 这些因素导致粗晶区硬度值显著地增加^[13]. 热影响区晶粒由熔合线向母材减小, 同时硬度也逐渐减小, 母材主要由板条状回火马氏体组成, 其硬度最小. 焊缝主要由马氏体基体以及条状的贝氏体组成, 并且含有少量的 δ -铁素体. 硬度从热影响区到焊缝急剧下降有可能是由于焊缝中 δ -铁素体的存在, 其硬度较马氏体小很多, 焊缝硬度稍高于母材. 因此热影响区的硬度要显著高于母材以及焊缝, 如图 5 所示.

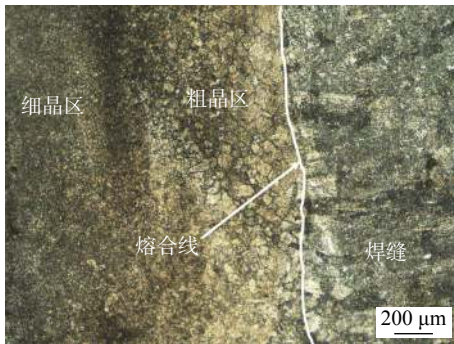


图 2 25Cr2Ni2MoV 转子钢焊缝及热影响区显微组织
Fig. 2 Microstructure of WM and HAZ of 25Cr2Ni2MoV welded joint

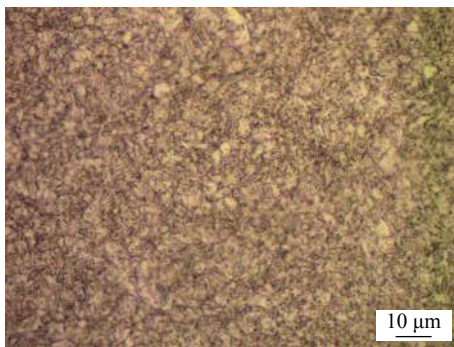


图 3 25Cr2Ni2MoV 转子钢细晶区显微组织
Fig. 3 Microstructure of FGHAZ of 25Cr2Ni2MoV welded joint

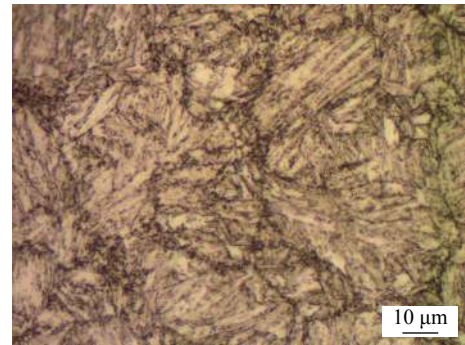


图 4 25Cr2Ni2MoV 转子钢粗晶区显微组织
Fig. 4 Microstructure of CGHAZ of 25Cr2Ni2MoV welded joint

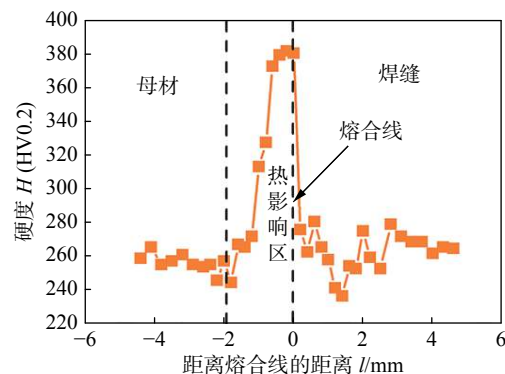


图 5 25Cr2Ni2MoV 接头熔合线附近各区域显微硬度
Fig. 5 Micro-hardness of 25Cr2Ni2MoV welded joint

2.2 宏观电化学与微区电化学 (SVET) 结果

由于焊缝、热影响区、母材组织成分存在差异, 其中焊缝与母材的 Mn, Cr 元素含量差别较大, 其它元素含量差别不大. 焊缝中 Mn 元素含量为 1.48%, 母材中仅为 0.18%, 而母材中的 Cr 元素含量却有 2.33%, 焊缝中含量为 0.57%. 有文献 [14-15] 也指出, Mn, Cr 元素的含量不同会影响耐蚀性能, 而电化学性能是衡量材料耐蚀性能的重要参数. 这就导

致焊接接头各区域存在电化学不均匀性, 电化学性能各不相同. 开路电位是衡量材料腐蚀趋势的重要参数, 焊接接头母材、细晶区、粗晶区和焊缝的开路电位如图 6 所示, 可以看出焊接接头的自腐蚀电位从大到小依次为焊缝、细晶区、母材和粗晶区. 由此可见, 焊缝具有最强的腐蚀趋势.

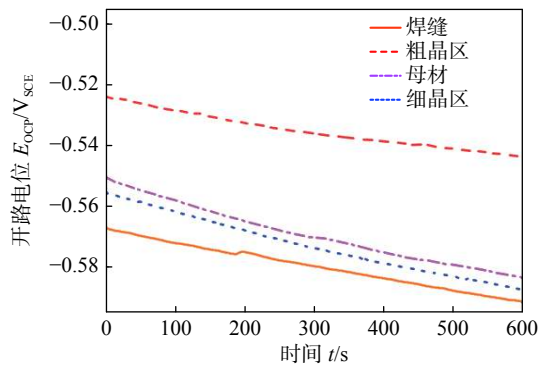


图 6 焊接接头不同区域的开路电位
Fig. 6 Open circuit potential of welded joint in different region

在 3.5%NaCl 溶液中测试焊缝、粗晶热影响区、细晶热影响区、母材的极化曲线的结果如图 7 所示. 根据 Tafel 曲线的拟合方法拟合出的腐蚀电位以及腐蚀电流密度如表 3 所示. 焊缝、母材、细晶区、粗晶区腐蚀电流密度依次减小. 由电化学原理可知, 腐蚀电位越负, 越容易被腐蚀, 而电流密度越大则被腐蚀的速率越快^[3, 16-17]. 焊缝的腐蚀电位最负并且腐蚀电流密度最大, 这与开路电位测试结果一致, 说明焊缝的耐蚀性最差. 由于接头各区域存在电位差, 其中焊缝与母材自腐蚀电位 E_{corr} 相差 30 mV, 与粗晶区自腐蚀电位相差 94 mV, 因此在熔合线附近会出现电偶腐蚀. 当焊接接头暴露在腐蚀溶液中时, 自腐蚀电位低的区域作为阳极, 电位高的区域作为阴极, 阳极区域优先被腐蚀^[18], 焊缝作为阳极, 母材和热影响区部分作为阴极, 根据 Stenta 等人^[19]的工作, 取焊缝阳极极化曲线和母材或热影响区阴极极化曲线的交点得到偶合电偶电流密度, 如表 4 所示. 焊缝与粗晶区自腐蚀电位相差最大, 将焊缝与粗晶区的极化曲线进行电偶电流拟合, 取焊缝阳极极化曲线和粗晶区阴极极化曲线的交点得到焊缝与粗晶区偶合时的电偶电流密度为 0.174 mA/cm², 和接头各区域的自腐蚀电流密度相比较可以看出 $\Delta i = i_{\text{couple(WM-CGHAZ)}} - i_{\text{corr(WM)}} = 0.0957 \text{ mA/cm}^2$.

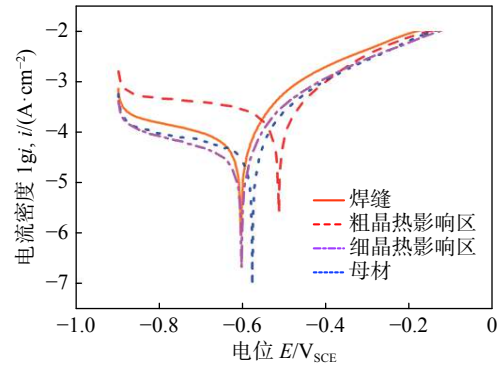


图 7 焊缝、粗晶区、细晶区、母材极化曲线
Fig. 7 Polarization curves of the WM, CGHAZ, FGHAZ, BM

表 3 各区域的电化学参数
Table 3 Electrochemical parameter of WM, CGHAZ, FGHAZ, BM

位置	自腐蚀电位 $E_{\text{corr}}/\text{V}_{\text{SCE}}$	自腐蚀电流密度 $i_{\text{corr}}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$
焊缝	-0.606	0.078 30
粗晶区	-0.512	0.026 02
细晶区	-0.602	0.041 82
母材	-0.576	0.058 86

表 4 焊缝与各区域偶合的电偶电流密度
Table 4 Galvanic current density of WM coupled with different regions

位置	自腐蚀电流密度 $i_{\text{couple}}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$
焊缝/母材	0.020 1
焊缝/粗晶区	0.174
焊缝/热影响区	0.107
焊缝/(母材 + 热影响区)	0.042 7

当发生电偶腐蚀时, 腐蚀电流密度是焊缝区域的 2 倍多, 这说明电偶效应明显加快了材料的腐蚀速率.

微区电化学 (SVET) 测试结果为由电极表面不同区域局部氧化还原反应产生的离子电流导致的电位差异, 通过式 (1) 将所得的电位转化为电流密度, 计算结果如图 8 所示, 焊接接头中不同区域存在着显著的电流密度差异, 其中焊缝整体电流密度最高, 而母材与热影响区的电流密度出现了负值, 这说明母材和热影响区发生了钝化被阴极保护起来. 这一结果与前述的宏观电化学结果一致, 电位最低的焊缝区域为阳极, 形成较大的阳极电流, 发生阳极溶解.

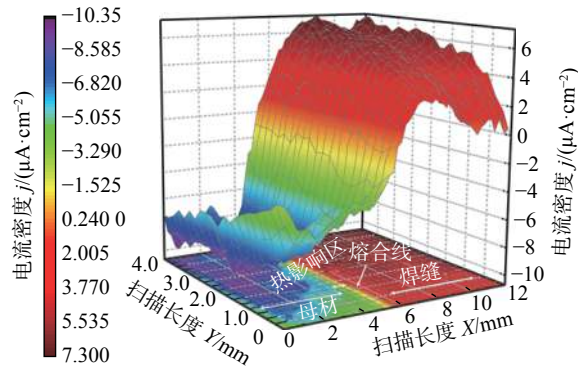


图 8 SVET 测试的焊接接头电流密度分布云图

Fig. 8 Current density mapping of welded joint measured by SVET

2.3 浸泡面积对焊接接头腐蚀深度的影响

为了进一步验证焊接接头熔合线附近的电偶腐蚀效应,试样浸泡 960 h 后通过三维形貌仪 (IFM) 观察焊接接头各区域厚度的变化. 沿图 1 中 x 轴方向线扫描观察了四种尺寸的焊接接头焊缝、热影响区、母材表面的厚度变化, 如图 9 所示. 从图中可以看出, 不同尺寸的焊接接头焊缝厚度都明显减少, 而热影响区以及母材的厚度几乎没有变化, 从而在熔合线附近形成了明显的高低差. 长度为 $20\text{ mm} + 2\text{ mm} + 20\text{ mm}$ 的焊接接头焊缝较其它三种尺寸的焊缝厚度减少的相对少一些, 这说明随着焊接接头暴露面积的增大, 熔合线附近的电偶腐蚀

效应有所减弱.

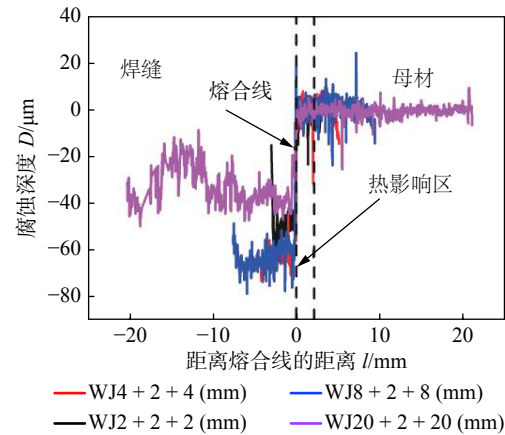


图 9 浸泡 960 h 后不同尺寸接头厚度减少程度

Fig. 9 Depth profile of the welded joints of different dimensions after immersion for 960 h

图 10 为不同暴露面积的接头中焊缝、热影响区、母材沿图 1 中 y 轴方向线扫描结果. 与未腐蚀区域 (胶带粘贴部分) 相比, 四种不同暴露面积的母材和热影响区几乎未发生腐蚀, 而焊缝表面的深度显著下降. 对四种不同接头尺寸的试样表面计算其平均腐蚀深度, 如图 11 所示. 其中, 四种不同接头尺寸的焊缝部分平均厚度减少分别为 $46.4, 55.3, 60$ 和 $37.5\text{ }\mu\text{m}$, 而纯焊缝试样的厚度减少仅为 $37\text{ }\mu\text{m}$. 对于母材来说, 四种不同接头尺寸的母材部分厚度的减少分别为 $1, 3, 3.5$ 和 $0.72\text{ }\mu\text{m}$, 而纯母材厚度

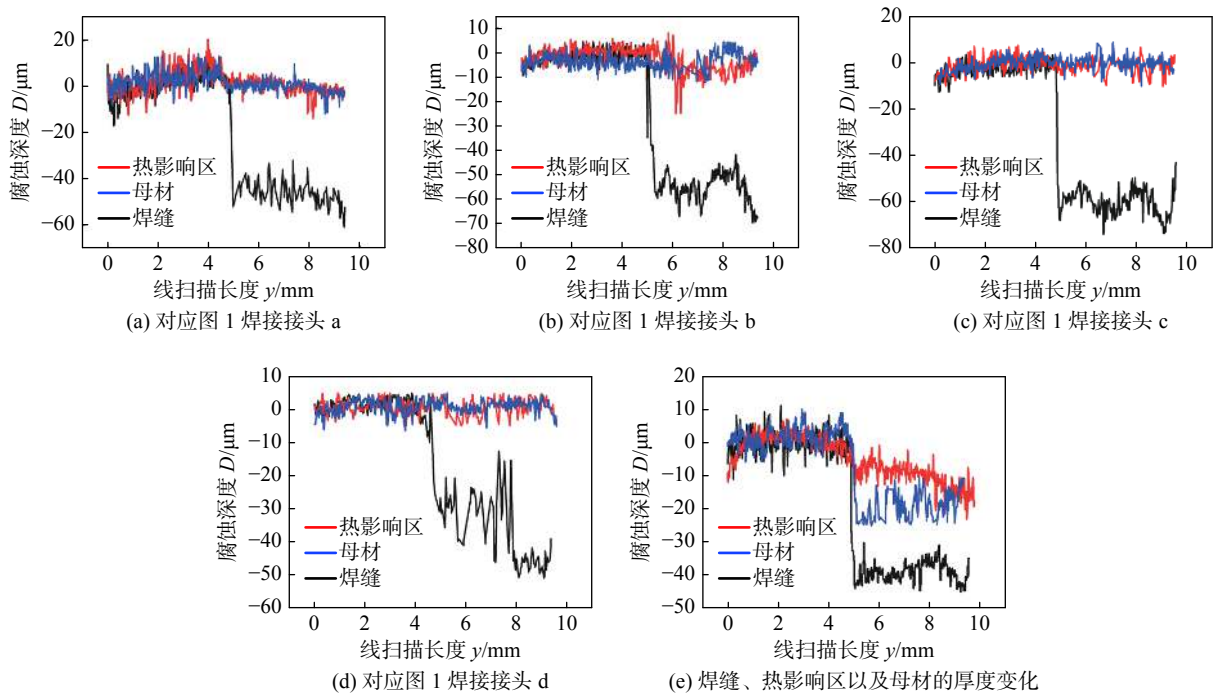


图 10 浸泡 960 h 后四种接头焊缝、热影响区、母材以及单独的焊缝、热影响区、母材的厚度变化

Fig. 10 Depth profile of each region of the welded joint of different dimensions and the isolated WM, HAZ and BM after immersion for 960 h

的减少却达到 $18\text{ }\mu\text{m}$, 远大于接头中母材部分. 因此, 与前述的电化学结果相一致, 接头中焊缝部分的腐蚀深度均大于纯焊缝试样, 说明接头中焊缝作为阳极优先发生了腐蚀. 而当母材单独暴露于腐蚀环境中时, 反而被腐蚀得更严重, 也就是说在电偶腐蚀过程中, 母材作为阴极被保护, 所以焊接接头种的母材部分较纯母材腐蚀较轻. 再看热影响区厚度减少的结果, 不论是焊接接头的热影响区还是单独的热影响区, 它们的厚度减少程度都相差不大, 说明在电偶腐蚀过程中, 虽然电化学性能差异较大, 但作为中间过渡区, 热影响区不作为强阳极或强阴极. 此外, 对比四种尺寸的焊接接头焊缝厚度减少的结果可以发现, 随着接头的尺寸增加, 焊缝的腐蚀深度逐渐增大, 但是当接头长度由 $8\text{ mm} + 2\text{ mm} + 8\text{ mm}$ 增加到 $20\text{ mm} + 2\text{ mm} + 20\text{ mm}$ 时, 焊缝的腐蚀深度又有所下降, 也就是说当接头尺寸逐渐增大时, 电偶腐蚀效应逐渐增强, 但是当接头尺寸再增加到一定程度后, 又有所减弱.

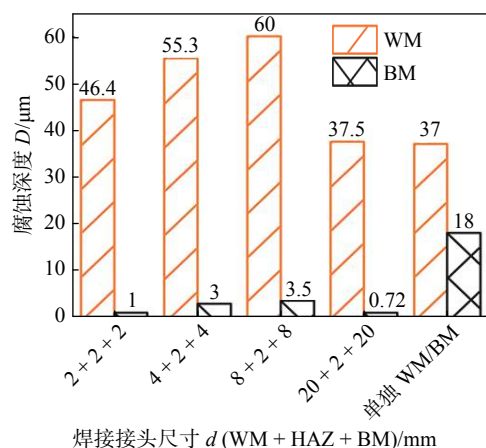


图 11 四种尺寸接头浸泡 960 h 后焊缝和母材表面厚度
Fig. 11 Depth profile of 4 welded joints with different dimensions after immersion for 960 h

2.4 焊接接头表面腐蚀产物分析

采用型号为 18KW/D/max2550VB/PC 的 X 射线衍射仪 (XRD) 对焊接接头焊缝、母材、热影响区表面的腐蚀产物进行分析. 扫描角度为 $10^\circ \sim 80^\circ$, 步长为 $2^\circ/\text{min}$. 测试结果如图 12 所示. 焊缝、热影响区、母材腐蚀产物均含 FeOOH . 在腐蚀过程中, 存在着一种电化学反应过程, 试样的溶解导致在溶液中存在游离的 Fe^{2+} , Fe^{2+} 和溶液中的 Na^+ 向阴极区移动, 而溶液中的 Cl^- 和 OH^- 离子向活性阳极区移动, 在活性阳极区形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 但 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 腐蚀产物膜并不稳定, 它会分解成 FeO 或与逐渐溶解于薄液膜中的 O_2 氧化成 FeOOH ^[20]. 通过 XRD 的检测

还发现, 母材和焊缝的腐蚀产物中分别有 FeNiCrO 以及 Fe , O , Cr 的化合物, Cr 的存在使试样表面的 FeOOH 具有阳离子选择性, 因此阻止 Cl^- 向基体扩散^[21], 也就是说这层富 Cr 的腐蚀产物对试样起到了保护作用^[13].

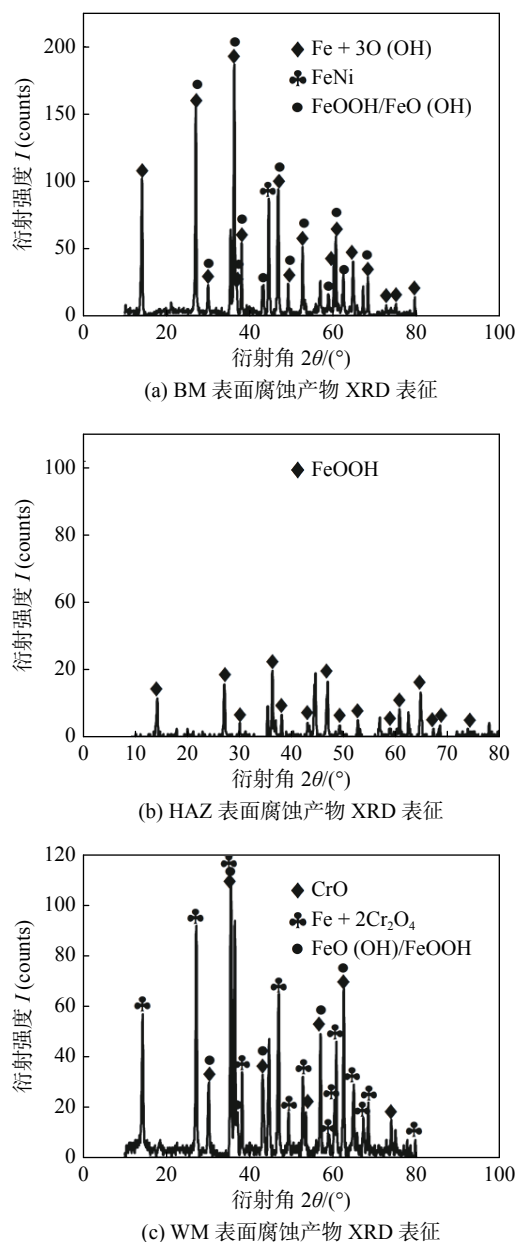
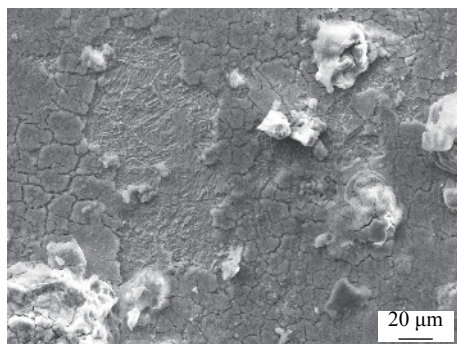


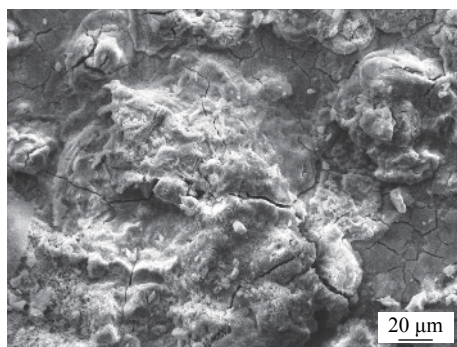
图 12 焊接接头不同区域试样表面腐蚀产物 XRD 表征
Fig. 12 Corrosion products identified by XRD on the different region of the welded joint

去除浮于试样表面的腐蚀产物后焊接接头各区域的表面腐蚀形貌如图 13 所示. 可以看到, 在母材和热影响区中, 在 Cl^- 的作用下, 氧化层出现大量的微裂纹并且有腐蚀产物的脱落, 在微裂纹处溶液会进入基体使试样继续发生腐蚀. 但是, 在焊缝区中, 表面并未观察到明显的氧化层, 根据图 9 表面

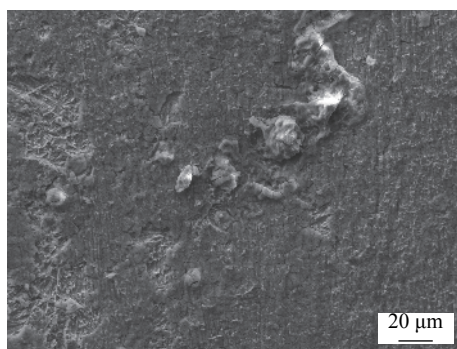
深度变化情况可以判断焊缝区作为阳极区发生了均匀腐蚀,而母材和热影响区表面氧化层的存在阻碍或减缓了腐蚀的进一步发生。



(a) BM 表面氧化层 SEM 形貌



(b) HAZ 表面氧化层 SEM 形貌



(c) WM 表面氧化层 SEM 形貌

图 13 尺寸为 20 mm + 2 mm + 20 mm 的焊接接头各区域表面氧化层 SEM 形貌

Fig. 13 SEM morphology of the oxide film on the BM of the welded joint of 20 mm + 2 mm + 20 mm

3 结 论

(1) 25Cr2Ni2MoV 焊接接头母材区主要为回火马氏体结构,热影响区由回火马氏体和回火贝氏体组成,而焊缝区除了马氏体外还存在 δ -铁素体,这种微观组织的差异导致了焊缝在 3.5%NaCl 溶液中与母材和热影响区相比更易于发生腐蚀。

(2) 25Cr2Ni2MoV 焊接接头不同部位的腐蚀电

位由低到高依次为焊缝区、细晶区、母材和粗晶区,且焊缝处腐蚀电流密度相较其它区域较大,表明核电汽轮机焊接转子焊接接头处存在电偶腐蚀,母材和热影响区作为阴极,焊缝作为阳极,加速了焊缝区的腐蚀。

(3) 25Cr2Ni2MoV 焊接接头各区域暴露面积对电偶腐蚀效应存在一定的影响,随着接头暴露面积的逐渐增大电偶腐蚀效应逐渐增强,但增大到一定程度后又有所减小。

参考文献:

- [1] 乔尚飞,沈红卫,刘霞,等.窄间隙焊接技术在 600 MW 汽轮机低压转子上的应用[J].热力透平,2008,37(4):250-252.
Qiao Shangfei, Shen Hongwei, Liu Xia, *et al.* Application of narrow gap welding technology on low pressure rotor of 600 MW steam turbine[J]. Thermal Turbine, 2008, 37(4): 250-252.
- [2] 王朋,霍鑫,丁玉明.核电汽轮机焊接转子技术发展综述[J].热力透平,2015,44(4):296-299.
Wang Peng, Huo Xin, Ding Yuming. A summary of the development of the welding rotor technology for nuclear steam turbine[J]. Thermal Turbine, 2015, 44(4): 296-299.
- [3] Yin Z F, Yan M L, Bai Z Q, *et al.* Galvanic corrosion associated with SM 80SS steel and Ni-based alloy G3 couples in NaCl solution[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(22): 6285-6292.
- [4] 李维锋,孙紫庵,陈英,等.碳钢管线焊接接头的电偶腐蚀行为研究[J].焊接技术,2016,46(7):19-21.
Li Weifeng, Sun Zihui, Chen Ying, *et al.* Study on galvanic corrosion behavior of welded joint of carbon steel pipeline[J]. Welding Technology, 2016, 46(7): 19-21.
- [5] Wei J S, Qi Y C, Tian Z L. Corrosion behavior of welded joints for cargo oil tanks of crude oil carrier[J]. Journal of Iron And Steel Research, International, 2016, 23(9): 955-962.
- [6] Song G, Johannesson B, Hapugoda S, *et al.* Galvanic corrosion of magnesium alloy AZ91D in contact with an aluminium alloy, steel and zinc[J]. Corrosion Science, 2004, 46(4): 955-977.
- [7] Oh S K, Kim Y J, Jung K M, *et al.* Effects of temperature and operation parameters on the galvanic corrosion of Cu coupled to Au in organic solderability preservatives process[J]. Metals and Materials International, 2017, 23(2): 290-297.
- [8] Hasan B O. Galvanic corrosion of carbon steel-brass couple in chloride containing water and the effect of different parameters[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 137-145.
- [9] Luo L H, Huang Y H, Weng S, *et al.* Mechanism-related modeling of pit evaluation in the CrNiMoV steel in simulated environment of low pressure nuclear steam turbine[J]. Materials and

- Design, 2016, 105: 240 – 250.
- [10] Weng S, Huang Y H, Xuan F Z. Correlation between Microstructures, Hardness and Corrosion of Welded Joints of Disc Rotors[C]//14th International Conference On Pressure Vessel Technology. Shanghai: Procedia Engineering, 2015: 1761 – 1769.
- [11] Coelho L B, Mouanga M, Druart M E, *et al.* A SVET study of the inhibitive effects of benzotriazole and cerium chloride solely and combined on an aluminium/copper galvanic coupling model[J]. Corrosion Science, 2016, 110: 143 – 156.
- [12] Zhu J, Xu L, Feng Z, *et al.* Galvanic corrosion of a welded joint in 3Cr low alloy pipeline steel[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 391 – 403.
- [13] Zhu M L, Xuan F Z. Correlation between microstructure, hardness and strength in HAZ of dissimilar welds of rotor steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 4035 – 4042.
- [14] Li Y T, Du Z Y, Tao Y Y. Effect of Mn and MnS on corrosion properties of domestic pipeline steels and welds[J]. China Welding, 2004, 13(2): 123 – 127.
- [15] 谢建平, 李 颖, 王书强. 化学成分对不锈钢在 5% H_2SO_4 溶液中均匀腐蚀性能的影响 [J]. 铸造技术, 2017, 38(4): 823 – 825.
Xie Jianping, Li Ying, Wang Shuqiang. The effect of chemical components on the uniform corrosion of stainless steel in 5% H_2SO_4 solution[J]. Foundry Engineering, 2017, 38(4): 823 – 825.
- [16] Garcia C, Martin N F, Tiedra P D, *et al.* Pitting corrosion of welded joints of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell[J]. Corrosion Science, 2008, 50(4): 1184 – 1194.
- [17] 徐连勇, 亢朝阳, 路永新, 等. 碳钢焊接接头腐蚀行为分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 97 – 101.
Xu Lianyong, Kang Chaoyang, Lu Yongxin, *et al.* Analysis of corrosion behavior of carbon steel weld joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 97 – 101.
- [18] 曹楚南. 腐蚀电化学原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [19] Stenta A, Basco S, Smith A, *et al.* One-dimensional approach to modeling damage evolution in galvanic corrosion[J]. Corrosion Science, 2014, 88(6): 36 – 48.
- [20] 郝献超, 苏 鹏, 肖 葵, 等. 不同 NaCl 浓度对耐候钢腐蚀产物的影响 [J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(5): 297 – 299.
Hao Xianchao, Su Peng, Xiao Kui, *et al.* Effect of different concentration of NaCl solution on corrosion products of weathering steel[J]. Corrosion Protection, 2009, 30(5): 297 – 299.
- [21] 王建军, 郭小丹, 郑文龙, 等. 海洋大气暴露 3 年的碳钢与耐候钢表面锈层分析 [J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(7): 288 – 291.
Wang Jianjun, Guo Xiaodan, Zheng Wenlong, *et al.* Analysis of surface rust layer on carbon steel and weathering steel exposed to ocean atmosphere for 3 years[J]. Corrosion Protection, 2002, 23(7): 288 – 291.
-
- 第一作者简介:** 欧阳玉清, 女, 1994 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向为焊接接头电偶腐蚀. Email: ecustoyyq@163.com
- 通信作者简介:** 黄毓晖, 女, 博士, 副教授. Email: yhhuang@ecust.edu.cn