

DOI: 10.19666/j.rlfed.202408191

调峰机组汽轮机初凝区低压缸材料的点蚀行为研究

慕晓炜¹, 闪志刚², 李大才³, 陈皓¹, 刘德胜², 匡磊³,
崔晓峰², 张达光⁴, 贺明鹏⁵

(1.中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院, 安徽 合肥 230088;

2.广东大唐国际潮州发电有限责任公司, 广东 潮州 521021;

3.广东大唐国际雷州发电有限责任公司, 广东 湛江 524255;

4.大唐锅炉压力容器检验中心有限公司, 安徽 合肥 230088;

5.大唐三亚未来能源研究所有限公司, 海南 三亚 572024)

[摘要] 火电厂深度调峰是新能源快速发展情况下的必然趋势, 由此导致汽轮机初凝区前移、低压缸腐蚀加剧。通过电化学测试、试样失重以及金属表面形貌特征分析(金相显微镜、SEM、EDS、XRD等), 研究了模拟初凝区条件下, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CH_3COO^- (乙酸根)3种阴离子在不同质量浓度、不同 Cl^- 与 SO_4^{2-} 质量浓度比下汽轮机低压缸材料2Cr13钢的点蚀特性。试验结果表明:2Cr13钢随阴离子离子质量浓度升高而腐蚀速率相应增加, 最大腐蚀速率出现在为2:1时, 其值为 $0.095\ 23\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;各试样都观察到点蚀现象发生, 点蚀数量随着阴离子离子质量浓度的升高也随之增加;随着的变化, Cl^- 与 SO_4^{2-} 在2Cr13钢金属表面由位点竞争吸附效应变化到相互协同效应, 导致均匀腐蚀与点蚀均加剧;初凝区中氯离子和硫酸根会促进2Cr13钢的腐蚀, 电厂实际运行中应当采取防止凝汽器管泄漏、有效清除阳树脂碎颗粒等措施加以防范。

[关键词] 2Cr13钢; 调峰; 点蚀; 汽轮机; 初凝区; 电化学测试

[引用本文格式] 慕晓炜, 闪志刚, 李大才, 等. 调峰机组汽轮机初凝区低压缸材料的点蚀行为研究[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 165-171. MU Xiaowei, SHAN Zhigang, LI Dacai, et al. Study on pitting behavior of low pressure cylinder material in initial condensation zone of steam turbine in peak load regulation unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 165-171.

Study on pitting behavior of low pressure cylinder material in initial condensation zone of steam turbine in peak load regulation unit

MU Xiaowei¹, SHAN Zhigang², LI Dacai³, CHEN Hao¹, LIU Desheng², KUANG Lei³,
CUI Xiaofeng², ZHANG Daguang⁴, HE Mingpeng⁵

(1.East China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China;

2.Guangdong Datang International Chaozhou Power Generation Co., Ltd., Chaozhou 521021, China;

3.Guangdong Datang International Leizhou Power Generation Co., Ltd., Zhanjiang 524255, China;

4.Datang Boiler and Pressure Vessel Inspection Center Co., Ltd., Hefei 230088, China;

5.Datang Sanya Future Energy Research Institute Co., Ltd., Sanya 572024, China)

Abstract: Peak regulation in thermal power plants is an inevitable trend under the development of new energy. Under this condition, the initial condensing zone of steam turbine moves forward and the corrosion of low pressure cylinder intensifies. Several methods such as electrochemical testing, sample weight loss and metal

收稿日期: 2024-08-14

基金项目: 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司科技项目(20220030785)

Supported by: Science and Technology Project of China Datang Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd. (20220030785)

第一作者简介: 慕晓炜(1983), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电厂化学与环保技术, muxiaowei0123@163.com.

通信作者简介: 贺明鹏(1997), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电厂化学腐蚀与水处理技术, 2271662193@qq.com.

surface topography analysis (SEM, EDS, XRD, and so on) were used to study the pitting corrosion characteristics of 2Cr13 steel (the material of low pressure cylinder of the steam turbine) under the conditions of simulated initial setting zone, with different mass concentrations and different mass concentration ratios of Cl^- to SO_4^{2-} of three anions (Cl^- , SO_4^{2-} and CH_3COO^-). The test results showed that, the corrosion rate of 2Cr13 steel increased with the anions' mass concentration, and the maximum corrosion rate ($0.095\ 23\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) occurred when was 2:1. Pitting corrosion was observed in all samples, and the number of pitting corrosion increased with the anions' mass concentration. With the change of, Cl^- and SO_4^{2-} on the metal surface of 2Cr13 steel changed from site competitive adsorption effect to mutual synergistic effect, resulting in the intensification of uniform corrosion and pitting corrosion. The chloride ions and sulfate in the initial coagulation zone of steam turbine will accelerate the corrosion rate of 2Cr13 steel and the occurrence of point corrosion. In actual operation of power plant, measures should be taken to prevent the leakage of condenser tubes and the broken particles of positive resin should be effectively removed.

Key words: 2Cr13 steel; peak regulation; pitting corrosion; steam turbine; initial condensation zone; electrochemical detection

2023 年我国全年发电量为 89 091 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 其中火电占比 63.2%、核电占比 4.5%, 可见火力发电仍然占据着主导地位^[1]。目前新能源发电量与装机容量越来越高, 2024 年 6 月底, 全国并网的风电和太阳能装机容量 11.8 亿 kW , 超过了煤电装机容量 (11.7 亿 kW), 且新能源具有优先上网政策优势, 因此火电机组调峰运行是大势所趋。在调峰运行时, 汽轮机初凝区发生前移^[2-5], 初凝区前移后改变了材料原来的腐蚀环境, 加剧低压缸腐蚀; 同时前移后的低压叶片都将处于两相流环境, 扩大了腐蚀范围^[6-11]。

汽轮机低压缸初凝区的腐蚀不仅会降低其运行效率、增加能源消耗和运营成本, 还可能损害设备结构, 进而导致设备故障停机。美国电力研究院 (EPRI) 发布的报告强调, 汽轮机低压缸的初凝区所发生的腐蚀现象, 已被列为导致汽轮机强制停机的重要原因之一^[2]。

汽轮机低压缸初凝区属于腐蚀性环境 (其 pH 值一般小于 4), 这个区域特别容易发生腐蚀^[12-15]。在火电厂水汽系统中, 由于锅炉水处理不当或凝汽器管发生泄漏等情况, 氯离子^[16] (Cl^-)、硫酸根 (SO_4^{2-})、低分子有机酸 (HAc) 等典型腐蚀性阴离子也会进入炉水中, 并且随着蒸汽携带而进入到汽轮机中, 引起汽轮机腐蚀^[17-25]。而腐蚀性杂质在初凝水与蒸汽中的浓度分布, 主要受其分配系数的影响^[26]。分配系数, 作为衡量杂质在汽液两相间重新分配倾向的一个参数, 具体表现为杂质在汽相中的浓度与其在液相中浓度的比值^[27]。腐蚀性杂质大多更倾向于被携带至初凝水中, 如氯离子的分配系数小于 1, 所以在相变区初凝水中会携带大量腐蚀性杂质。 NH_3 常被用作汽水系统中的一种碱化剂, 能够有效提升系统的 pH 值, 从而一定程度上预防

热力设备遭受腐蚀的损害^[28]。尽管 NH_3 作为碱化剂在提升汽水系统 pH 值方面表现优异, 但其较高的分配系数 (超过 10) 使得其在低压缸的初凝区域, 更倾向于被蒸汽携带。这一特性导致初凝水中的 pH 值发生明显下降, 甚至可能降至酸性范围。在酸性条件下, 更有利于腐蚀性杂质的腐蚀性, 加剧了其对于汽轮机的侵蚀, 可能引发酸性腐蚀及点蚀等多种形式的损害^[29]。而点蚀的产生会使汽轮机叶片存在开裂甚至断裂的风险^[30]。

为延长汽轮机服役年限, 研究腐蚀性 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、HAc 等在初凝区的腐蚀作用机理至关重要。虽然深度调峰会导初凝区前移, 但初凝区本身的腐蚀环境变化不大, 因此本工作配制了一系列的模拟初凝水溶液, 包含了不同量的侵蚀性阴离子及乙酸。通过汽轮机低压缸叶片用 2Cr13 钢在模拟初凝水溶液中的电化学腐蚀试验和 $150\ ^\circ\text{C}$ 高温反应釜腐蚀挂片试验, 研究了深度调峰下 2 种腐蚀性杂质离子共同作用的腐蚀机理, 以期调峰机组汽轮机的安全运行提供理论依据。

1 试验材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为汽轮机低压缸 2Cr13 钢, 是一种马氏体不锈钢, 其化学成分见表 1。本试验所用试片: 电化学试样为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 的 2Cr13 正方形试片, 非工作面焊接铜导线并封装, 作为工作电极; 挂片试验试样为有悬挂小孔的 $50\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$ 规格的标准腐蚀试片。

试验中模拟初凝水溶液均采用高纯水配制, 乙酸固定为 $0.5\ \text{mg}/\text{L}$, 溶液中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 质量浓度也约为 $0.5\ \text{mg}/\text{L}$, 即 Cl^- 与 SO_4^{2-} 质量浓度比 λ 为 1:1 时, 其余以此类推, 按 λ 为 1:1、1:2、1:3、2:1、3:1 配制

5 组溶液。

表 1 2Cr13 钢的化学成分 单位: w/%
Tab.1 Chemical composition of 2Cr13 steel

C	Cr	Mn	Si	Ni	P
0.16~0.25	12.0~14.0	≤1.0	≤1.0	≤0.6	≤0.035

1.2 试验方法

共 5 组溶液, 分别为 0.5 mg/L HAc 与 5 个 λ 比例的溶液。试验时所有溶液均进行通氮除氧, 直至氧质量浓度小于 30 μg/L。

电化学试验采用三电极体系, 在电化学工作站中完成, 电化学工作站型号为 CHI600E 型。电极配置如下: 辅助电极采用铂片电极, 参比电极则选用饱和甘汞电极, 工作电极是制备的。测试温度为常温, 电位扫描速度为 0.01 V/s, 极化电压扫描范围为测得的开路电位 $E_0 \pm 250$ mV, EIS 测试结果在 ZSimpWin 软件上拟合。

高压釜挂片试验所用的溶液与电化学试验时一致。试验温度设置为 150 °C, 试验时间为 24 h。试验过程: 试片打磨后用蒸馏水冲洗, 然后再用无水乙醇、丙酮清洗, 冲洗干净后干燥 24 h 备用, 最后记录每片试片的质量 m_0 。在高压釜试验结束后, 取出的挂片先用蒸馏水处理, 并用湿棉花擦拭表面, 之后按照国标《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》(GB/T 16545—2015) 对挂片表面的腐蚀产物进行去除。去除完腐蚀产物的试片, 再一次用蒸馏水、无水乙醇清洗, 并干燥 24 h 后, 称取其质量 m_1 , 采用式(1)计算其腐蚀速率。

$$V = \frac{m_0 - m_1}{S \times t} \quad (1)$$

式中: S 为试片表面积; t 为试片反应时间; V 为计算后的腐蚀速率。

挂片试验结束后, 对其进行 SEM、EDS、XRD 等分析, 得到其表面腐蚀产物的微观形貌、主要化学成分及物相组成。

2 结果分析与讨论

2.1 腐蚀速率分析

图 1 给出了 2Cr13 钢试片在不同 λ 初凝水溶液中的高压釜挂片试验结果, 试验温度为 150 °C、时间为 24 h。从图 1 中可以看出: 2Cr13 钢在不同 λ 溶液中的腐蚀速率都处于同一个数量级, 但随着 Cl^- 或 SO_4^{2-} 离子比例的增加, 腐蚀速率也随之增加; 但在 λ 为 2:1 时, 挂片失重法测得的腐蚀速率反而比

λ 为 3:1 时更大, 腐蚀速率为 0.095 23 g/(m²·h)。

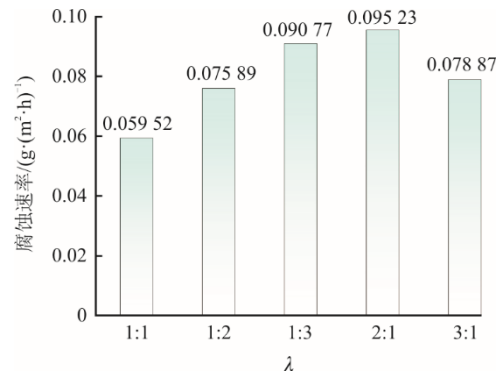


图 1 2Cr13 钢在不同 λ 初凝水中的腐蚀速率

Fig.1 Corrosion rates of 2Cr13 steel in initial coagulation water with different λ s

2.2 电化学分析

图 2 给出了 2Cr13 钢在不同 λ 比的极化曲线, 表 2 给出了极化曲线参数拟合结果(β_a 为阳极斜率、 β_c 为阴极斜率、 J_c 为腐蚀电流密度、 E_c 为腐蚀电位)。

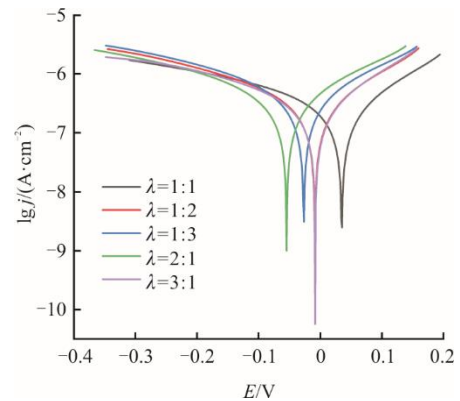


图 2 2Cr13 钢在不同 λ 的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of 2Cr13 steel at different λ s

表 2 2Cr13 钢在不同 λ 的极化曲线参数

Tab.2 Polarization curve parameters of 2Cr13 steel at different λ s

λ	β_a /(mV·dev ⁻¹)	β_c /(mV·dev ⁻¹)	J_c /(A·cm ⁻²)	E_c /V
1:1	6.878	4.285	2.509×10^{-7}	0.041
1:2	6.692	4.692	2.521×10^{-7}	-0.017
1:3	5.845	4.874	2.800×10^{-7}	-0.034
2:1	6.093	4.822	2.880×10^{-7}	-0.052
3:1	6.963	4.528	2.422×10^{-7}	-0.016

由图 2、表 2 可以看到, 随着 SO_4^{2-} 的增加, 其整体变化表现为自腐蚀电位负移, 自腐蚀电流密度增大, 斜率变化不明显, 这表明 SO_4^{2-} 的增加并不会单独改变某一种活化反应。 SO_4^{2-} 更容易在金属表面的缺陷处发生吸附, 主要是应力集中、位点密集处。从而促使金属表面的保护膜发生反应生成可溶解的腐蚀产物, 随着 SO_4^{2-} 的增加, 试样的腐蚀速

度也会随之增加。Cl⁻的作用机理和腐蚀影响与SO₄²⁻类似，但随着Cl⁻增加，试验的自腐蚀电位也随之负移动，但在λ为2:1后发生正移，继续增加Cl⁻，使λ至3:1后，反而出现正移至与λ为1:2相当。

图3给出了2Cr13钢在不同λ的阻抗Nyquist图、图4给出了阻抗等效模拟电路，表3给出了阻抗参数拟合(R_s为溶液电阻、R_p为极化电阻、C_p为双电层电容)。由图3、表3结果表明：溶液中电解质增加，阻抗图的半圆直径也随之减小，而半圆直径的变化则间接反映了电极电荷极化电阻的变化。且溶液电阻展现出递减的情况，这表明阴离子含量的增加导致了试样的腐蚀速率加快。但是与极化曲线出现了同样的趋势，当λ为2:1时的极化阻抗反而最小，继续增加氯离子反而极化阻抗增加。这可能是由于这2种腐蚀性杂质在金属表面会存在对金属表面位点竞争吸附的情况，而通常情况下Cl⁻的吸附位点能力没有SO₄²⁻强，在λ为2:1时SO₄²⁻仍能占据一定位点，与Cl⁻发生了协同作用，而当增加氯离子的比例后，硫酸根在对位点的竞争吸附中处于下风，金属表面的位点主要由氯离子占据，而氯离子虽然同样能够破坏表面保护膜，并对基体造成损伤，但是其破坏保护膜的速度没硫酸根与氯离子共同作用快，因此会出现低于λ为2:1的情况，该结果与图1的失重试验结果相符合，存在对应关系。

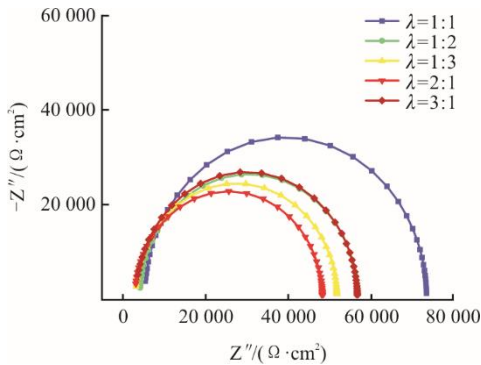


图3 2Cr13钢在不同λ的阻抗Nyquist图
Fig.3 Nyquist diagram of impedance of 2Cr13 steel at different λ s

表3 2Cr13钢在不同λ时的阻抗参数
Tab.3 Impedance parameters of 2Cr13 steel at different λ s

λ	R _s /(kΩ·cm ²)	C _p /(F·cm ²)	R _p /(kΩ·cm ²)
1:1	5.216	4.365×10 ⁻¹⁰	68.50
1:2	4.074	6.921×10 ⁻¹⁰	52.87
1:3	3.044	6.375×10 ⁻¹⁰	48.91
2:1	2.872	5.121×10 ⁻¹⁰	45.54
3:1	3.159	3.138×10 ⁻¹⁰	53.74

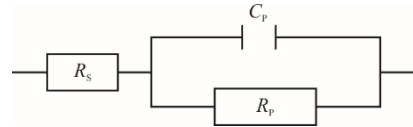


图4 等效模拟电路
Fig.4 Equivalent analog circuit diagram

2.3 腐蚀形貌分析

图5为2Cr13钢在不同λ初凝水中挂片24h后的宏观腐蚀形貌。图中试样表面均可明显观察到红棕色腐蚀产物层，这主要是由于模拟初凝水配制中加入了乙酸，从而发生了酸性腐蚀的均匀腐蚀现象。同时，虽然试样表面并没有出现大面积的点腐蚀现象，但是在试样表面局部区域仍然能够观察到一些不明显的点腐蚀形貌，主要是腐蚀性离子Cl⁻和SO₄²⁻在试样表面占据位点，沉积积累的结果。

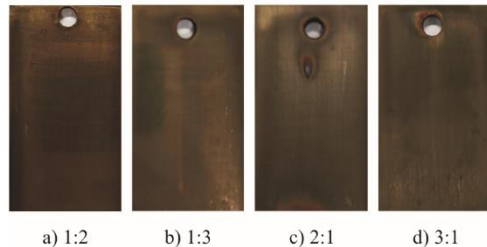


图5 2Cr13钢在不同Cl⁻:SO₄²⁻初凝水中的宏观腐蚀形貌
Fig.5 The macroscopic corrosion morphology of 2Cr13 steel in initial coagulation water with different mass concentration ratios of Cl⁻:SO₄²⁻

图6给出了图5中4个腐蚀试样的显微形貌观察。图6的结果表明：4个试样中均观察到点腐蚀现象发生，其中图6a)中的点腐蚀坑尺寸最小，密度最小，图中区域的点腐蚀坑数量总共60个左右；图6b)中的点腐蚀坑尺寸与图6a)近似，但点腐蚀坑的密度比图6a)更大，区域中的点腐蚀坑数量有几百个左右，相较于图6a)区域中的点腐蚀坑数量多了近一个数量级，但点腐蚀坑都比较浅。按照《金属和合金的腐蚀点蚀评定方法》(GB/T 18590—2001)测得图6b)最大点蚀坑深度为10 μm，比图6a)的最大点蚀坑深度30 μm小些。这主要是因为硫酸根半径较大，对试样表面的钝化膜破坏较慢，且从图6a)与图6b)的比较中可以看到，图6b)中的打磨痕迹被腐蚀产物层覆盖在SEM中呈现黑色条状，相较于图6a)更多的被腐蚀产物层覆盖，这说明硫酸根的增加不仅会增加点腐蚀坑的数量，还对酸性条件下的均匀腐蚀有一定促进作用。图6c)与图6d)的比较中，虽然氯离子的质量浓度有所增加，图6c)的点蚀坑大小没有图6d)的大，但是图6c)的点蚀坑密度反而比图6d)

大，点蚀坑的数量约为 400 个，这与失重试验中测得的腐蚀速率也互相对应。由于图 6c)中点蚀坑的数量与 SO_4^{2-} 增加的图 6b)中点蚀坑的数量类似，所以考虑出现这一现象的原因可能是 SO_4^{2-} 在与 Cl^- 的共同腐蚀中发挥了一定的作用。

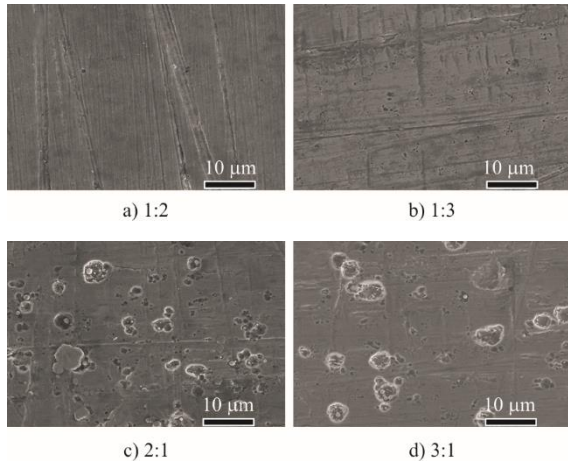


图 6 2Cr13 钢在不同 $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ 初凝水中的微观腐蚀形貌
Fig.6 The micro-corrosion morphology of 2Cr13 steel in initial coagulation water with different mass concentration ratios of $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$

图 7 为 2Cr13 钢在 λ 为 2:1 时腐蚀后点蚀坑内部的形貌，点蚀坑内崎岖不平，可能存在着厚度不一的腐蚀产物层，点蚀坑的中心呈锥形深入状，并表现出持续深入的趋势，这也是该条件下，点蚀坑内可能出现对于基体损伤的表现。

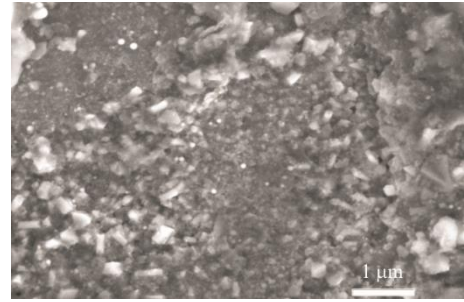


图 7 2Cr13 钢在 λ 为 2:1 的初凝水中腐蚀后的点蚀坑内部形貌

Fig.7 The pitting pit morphology of 2Cr13 steel after corrosion in initial coagulation water with an initial λ value of 2:1

2.4 EDS 分析

图 8 为 2Cr13 钢在 λ 为 2:1 时腐蚀后点蚀坑内部的 EDS 能谱。结果表明：点蚀坑中除了试片本身的元素外，还含有模拟初凝水中的阴离子元素 S 和 O，且存在大量 Fe 元素，说明有铁氧化物的生成。通常反应初期，诱导点蚀坑形成的主要原因是 SO_4^{2-} 的优先吸附。由于模拟初凝水是一个有乙酸存在的弱酸性环境， SO_4^{2-} 造成的腐蚀产物更容易生成水性 FeSO_4 。而 FeSO_4 在点蚀坑内进一步水解，则会产生更强的酸性物质，导致酸性腐蚀加剧；这种腐蚀过程产生的腐蚀产物会粘附在试片表面，形成锈蚀层；表面锈蚀层与内部之间的氧质量浓度差异，从而进一步加剧了局部腐蚀现象。

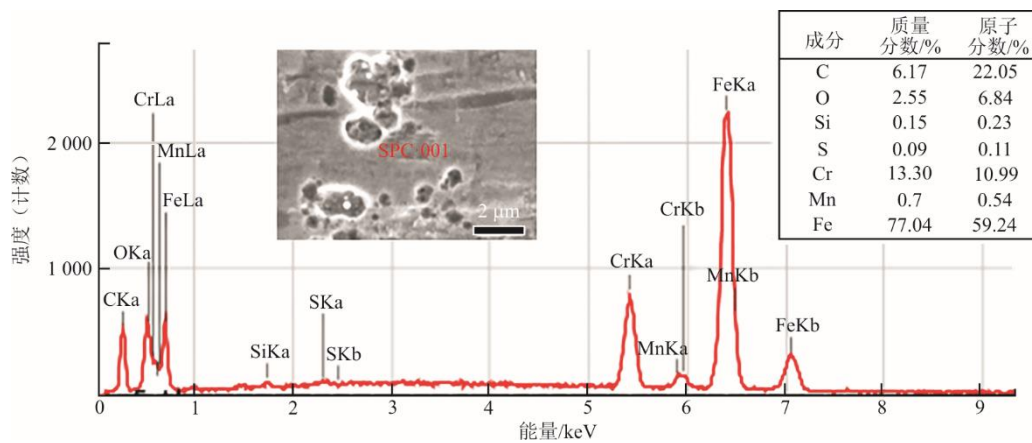


图 8 2Cr13 钢在 λ 为 2:1 的初凝水中腐蚀后点蚀坑的 EDS 能谱

Fig.8 EDS spectra in pitting pit of 2Cr13 steel after corrosion in initial coagulation water with λ of 2:1

2.5 XRD 分析

图 9 为 2Cr13 钢在 λ 为 2:1 腐蚀后的 XRD (虚线标注为标准卡片峰与图中的峰的对应)。结果表明，试样表面的腐蚀产物，锈蚀层主要是 FeO 化合物，同时还检测出 Ni-Cr-Fe 等 2Cr13 钢的基体元素，

可能是由于点蚀坑的产生，使得基体暴露在锈蚀层外。但从形貌可以看到，整体腐蚀挂片都呈现棕黄色，SEM 图也能看出覆盖较为全面，并且图 7 的点蚀坑内形貌也能看出，点蚀坑内出现了对于基体损伤的表现，所以推测出现基体元素峰是因为点蚀坑

的形成所致。而 SO_4^{2-} 虽然对点蚀坑的产生有一定的诱导作用，但其对不锈钢保护膜层的穿透并没有这么强大^[20,22,29]，这一推断也可以在 λ 为 1:3 时看出来，所以该现象是由 SO_4^{2-} 与 Cl^- 的共同作用引起。

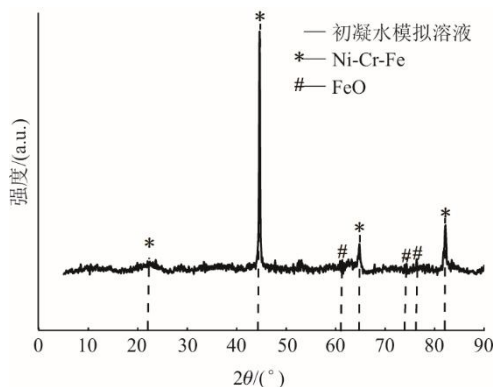


图9 2Cr13 钢在 λ 为 2:1 的初凝水中腐蚀后的 XRD
Fig.9 XRD patterns of 2Cr13 steel after corrosion in initial coagulation water with λ of 2:1

综上，本文对 Cl^- 与 SO_4^{2-} 作用机理的解释为：腐蚀初期， Cl^- 与 SO_4^{2-} 之间的相互作用主要是竞争吸附，由于 SO_4^{2-} 的竞争吸附能力较强，在 λ 为 2:1 时仍然能够占据吸附位点，诱导形成了点蚀坑^[31]，并生成相应的腐蚀产物粘在试片表面形成锈层，而 Cl^- 由于半径较小，部分会留存在腐蚀产物层中；在腐蚀中期，随着点蚀坑的加深，点蚀坑的周围多出了很多的空的位点，未占据吸附位点的 Cl^- 则趁机占据点蚀坑附近的空位点，且弱酸性环境中易生成水性 FeSO_4 ， FeSO_4 在点蚀坑内进一步水解，形成更强的酸介质，导致酸性腐蚀加剧；局部腐蚀加剧又促进了 Cl^- 的腐蚀， Cl^- 与 SO_4^{2-} 的相互协同作用，导致 λ 为 2:1 时的腐蚀最严重；腐蚀后期，点蚀坑的发展可以深入到 2Cr13 钢基体。

3 结 论

1) 试验结果表明：汽轮机低压缸用 2Cr13 钢随阴离子质量浓度升高而腐蚀速率增加，最大腐蚀速率出现在 λ 为 2:1 时，其值为 $0.095\ 23\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

2) Cl^- 与 SO_4^{2-} 主要表现为竞争吸附关系，通常是 SO_4^{2-} 优先占据材料表面的吸附位点，诱导产生点蚀坑；而 Cl^- 表现为相互协同作用，不仅导致均匀腐蚀加剧和点蚀数量增多，还会对点蚀坑的深度起着促进作用。

3) 针对 Cl^- 与 SO_4^{2-} 促进初凝区 2Cr13 钢腐蚀的问题，电厂实际运行中应当采取防止凝汽器管泄漏、有效清除阳树脂碎颗粒等措施加以防范。

[参 考 文 献]

- [1] 刘卓. 核电站向火电站设备管理对标与浅析[J]. 中国设备工程, 2023(22): 60-63.
LIU Zhuo. Benchmarking and analysis of equipment management from nuclear power station to thermal power station[J]. China Equipment Engineering, 2023(22): 60-63.
- [2] 周柏青, 魏加强, 文一章, 等. 乙酸对 2Cr12MoV 钢在初凝水中腐蚀的影响[J]. 湖南电力, 2022, 42(6): 27-31.
ZHOU Baiqing, WEI Jiaqiang, WEN Yizhang, et al. Effect of acetic acid on corrosion behavior of 2Cr12MoV steel in early condensates[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(6): 27-31.
- [3] 陈宇, 应光耀, 包劲松, 等. 浙江省燃煤机组深度调峰汽轮机设备影响分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(10): 100-105.
CHEN Yu, YING Guangyao, BAO Jinsong, et al. Analysis of the influence on steam turbine at deep peak regulation operations in Zhejiang Province[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(10): 100-105.
- [4] 刘传亮, 江路毅. 热电联产汽轮机调节级叶片断裂的分析与改进[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(1): 66-70.
LIU Chuanliang, JIANG Luyi. Analysis and improvement of blade fracture on governing stage of extraction condensing steam turbine of cogeneration set[J]. Turbine Technology, 2023, 65(1): 66-70.
- [5] 宫啸宇, 蒋楠, 戴义平. 深度调峰运行时汽轮机低压叶片的安全性分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9): 21-29.
GONG Xiaoyu, JIANG Nan, DAI Yiping. Safety analysis of low-pressure turbine blades during deep peak shaving[J]. Thermal Energy and Power Engineering, 2023, 38(9): 21-29.
- [6] 郭航, 林波, 常银虎, 等. 超超临界 1050 MW 机组深度调峰控制策略探讨[J]. 能源与环境, 2021(3): 23-25.
GUO Hang, LIN Bo, CHANG Yinhu, et al. Discussion on deep peaking control strategy of ultra-supercritical 1050 MW unit[J]. Energy and Environment, 2021(3): 23-25.
- [7] 张立新. 调峰火电机组金属监督关键问题[J]. 山东电力技术, 2021, 48(3): 65-71.
ZHANG Lixin. Key points of metal supervision for thermal power units with peak load regulation[J]. Shandong Electric Power Technology, 2021, 48(3): 65-71.
- [8] 史香锬, 杨均勇, 杨鹏, 等. 调峰运行对核电机组主汽轮机的影响分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(1): 35-39.
SHI Xiangkun, YANG Junyong, YANG Peng, et al. Effects of peak load regulation on main steam turbines of nuclear power units[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(1): 35-39.
- [9] 吴瑞康, 华敏, 秦攀, 等. 燃煤机组深度调峰对汽轮机设备的影响[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 89-94.
WU Ruikang, HUA Min, QIN Pan, et al. Influence of deep peak load regulation of coal-fired units on turbine equipment[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 89-94.
- [10] 宋先林, 张涛, 虞旭清. 300 MW 机组调峰运行金属部件检测重点[J]. 中国电力, 2001, 34(4): 15-17.
SONG Xianlin, ZHANG Tao, YU Xuqing. Main checking and testing points of metallic components of 300 MW generating units in cyclic operation[J]. Electric Power, 2001, 34(4): 15-17.
- [11] 吴立华, 胡兴强. 机组调峰与汽轮机的结垢腐蚀[J].

- 湖北电力, 2001(2): 33-34.
WU Lihua, HU Xingqiang. Relationship between peak load regulation of generating and deposit and corrosion of steam turbine[J]. Hubei Electric Power, 2001(2): 33-34.
- [12] 曹丽华, 李禹, 司和勇. 超低负荷工况下大功率汽轮机低压缸内温度场分布特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1018-1026.
CAO Lihua, LI Yu, SI Heyong. Research on temperature distribution characteristics in low pressure cylinder of large steam turbine under ultra-low load conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1018-1026.
- [13] 虞炜玲, 曹顺安, 张达光, 等. 灰口铸铁在含乙酸初凝水中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(5): 22-26.
TUO Weiling, CAO Shun'an, ZHANG Daguang, et al. Corrosion behavior of gray cast iron in early condensate water containing acetic acid[J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(5): 22-26.
- [14] 吴宇坤, 周敬恩. 汽轮机叶片常见失效方式及研究现状[J]. 汽轮机技术, 1995(6): 362-367.
WU Yukun, ZHOU Jing'en. Common failure modes and research status of turbine blades[J]. Turbine Technology, 1995(6): 362-367.
- [15] 王淑君, 刘文通, 卢昌华, 等. 有机污染与汽轮机腐蚀——成都热电厂汽轮机酸腐蚀初论[J]. 西南电力技术, 1984(5): 1-15.
WANG Shujun, LIU Wentong, LU Changhua, et al. Organic pollution and steam turbine corrosion: a preliminary study on acid corrosion of steam turbine in Chengdu Thermal Power Plant[J]. Southwest Electric Power Technology, 1984(5): 1-15.
- [16] 李岩, 方可伟, 刘飞华. Cl⁻对 304L 不锈钢从点蚀到应力腐蚀转变行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(11): 955-959.
LI Yan, FANG Kewei, LIU Feihua. Influence of Cl⁻ on development behavior from pitting corrosion to stress corrosion cracking of 304L stainless steel[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(11): 955-959.
- [17] 蔡文博, 王一坤, 成纳坤, 等. 生物质 Cl 的析出迁移特性及对锅炉受热面腐蚀研究进展[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 1-7.
CAI Wenbo, WANG Yikun, CHENG Ruishen, et al. Progress in precipitation and migration characteristics of chlorine in biomass and corrosion of boiler heating surfaces[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 1-7.
- [18] 张冰清, 田进, 张志博, 等. 火电厂锅炉水冷壁管失效原因分析[J]. 热力发电, 2019, 48(5): 97-101.
ZHANG Bingqing, TIAN Jin, ZHANG Zhibo, et al. Failure analysis for boiler water wall tubes in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 97-101.
- [19] 姜涛, 王晓放, 王巍. 超临界 H₂O/CO₂ 混合工质透平初凝区酸腐蚀过程分析[J]. 汽轮机技术, 2018, 60(6): 447-449.
JIANG Tao, WANG Xiaofang, WANG Wei. Analysis of acid corrosion process in the initial condensing zone of supercritical H₂O/CO₂ mixture turbine[J]. Turbine Technology, 2018, 60(6): 447-449.
- [20] 张锐峰, 李宇春, 庞飞飞, 等. ETA 水工况下 SO₄²⁻对 690 合金腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(5): 413-416.
ZHANG Ruifeng, LI Yuchun, PANG Feifei, et al. Effect of SO₄²⁻ concentration on corrosion behavior of alloy 690 under ETA water chemistry condition[J]. Corrosion and Protection, 2013, 34(5): 413-416.
- [21] 邓辉. 超临界机组低压末三级叶片开裂原因分析[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(4): 301-305.
DENG Hui. Cause analysis of crack on the last three stage low-pressure blade of supercritical unit[J]. Turbine Technology, 2023, 65(4): 301-305.
- [22] 薛育龙, 张文奇, 李改娣, 等. 超临界 350 MW 机组给水泵汽轮机第 5 级动叶片断裂原因调查分析[J]. 汽轮机技术, 2022, 64(2): 136-140.
XUE Yulong, ZHANG Wenqi, LI Gaidi, et al. Fracture analysis on the fifth stage moving blade of feed Water pump Turbine of a supercritical 350 MW unit[J]. Turbine Technology, 2022, 64(2): 136-140.
- [23] 刘延湘, 楼台芳. 炉水中侵蚀性阴离子对碳钢腐蚀的试验研究[J]. 工业水处理, 2001(7): 30-32.
LIU Yanxiang, LOU Taifang. Study on the corrosion of carbon steel by erosive anions in boiler water[J]. Industrial Water Treatment, 2001(7): 30-32.
- [24] 孟宇, 张俐, 史然峰, 等. 15CrMo 钢在含有 SO₄²⁻ 的模拟汽轮机初凝水中的腐蚀特性[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(12): 1208-1211.
MENG Yu, ZHANG Li, SHI Ranfeng, et al. Corrosion behaviors of 15CrMo steel in simulated initial-condensate water containing SO₄²⁻ ions of different concentrations[J]. Corrosion and Protection, 2014, 35(12): 1208-1211.
- [25] ZHU Z P, JIAO X C, TANG X Y, et al. Effects of SO₄²⁻ concentration on corrosion behavior of carbon steels[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2015, 62(5): 322-326.
- [26] 孙本达. 从碳钢的腐蚀行为论汽轮机低压缸腐蚀[J]. 热力发电, 1986, 14(2): 18-25.
SUN Benda. Discussion on corrosion of low pressure cylinder of steam turbine from corrosion behavior of carbon steel[J]. Thermal Power Generation, 1986, 14(2): 18-25.
- [27] 何明军. 防治异常水质对汽轮机的危害[J]. 云南电力技术, 2008(3): 45-46.
HE Mingjun. Prevention and control of damage of abnormal water quality to steam turbine[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2008(3): 45-46.
- [28] 朱志平, 黄可龙, 周艺, 等. 汽轮机初凝区腐蚀机理分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006(1): 20-23.
ZHU Zhiping, HUANG Kelong, ZHOU Yi, et al. An analysis on corrosion process in primary condensation zone of steam turbine[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006(1): 20-23.
- [29] 叶超, 杜楠, 赵晴, 等. 不锈钢点蚀行为及研究方法的进展[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(3): 271-276.
YE Chao, DU Nan, ZHAO Qing, et al. Progress in research of pitting corrosion behavior and research methods of stainless steels[J]. Corrosion and Protection, 2014, 35(3): 271-276.
- [30] 杨众魁, 史艳华, 崔浩燃, 等. NaClO₂ 溶液中 S2205 不锈钢在点蚀初期的行为[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(10): 28-33.
YANG Zhongkui, SHI Yanhua, CUI Haoran, et al. Pitting behavior of S2205 stainless steel in NaClO₂ solution at initial stage[J]. Corrosion and Protection, 2021, 42(10): 28-33.
- [31] CHEN Y, SRIDHARAN K, ALLEN T. Corrosion behavior of ferritic-martensitic steel T91 in supercritical water[J]. Corrosion Science, 2006, 48: 2843.

(责任编辑 邓玲惠)