

超临界机组发生 FAC 的因素及相互关系分析

肖卓楠,卞 博,徐 持,李 科

(内蒙古科技大学 能源与环境学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要:为了减轻因流动加速腐蚀(FAC)引起的锅炉结垢加速、汽水系统管道厚度减小甚至爆裂现象,对超临界机组发生流动加速腐蚀的机理及其主要影响因素进行了研究,并讨论了管壁内表面粗糙度、蒸汽含汽率、pH 值、溶氧量对 FAC 的影响,以及温度与 pH 值、温度与流速、pH 值与溶解氧量、溶解氧量与氢电导率等影响因素之间的相互作用关系,最后结合实际电厂的运行数据验证了分析结果。研究表明:减小工质流速、管壁粗糙度和氢电导率,增大给水的 pH 值和溶解氧含量可以使 FAC 的腐蚀速率减小,超临界加氧处理时 pH 值应在 8.9~9.2 之间,溶解氧量范围为 45~100 $\mu\text{g/L}$,氢电导率的期望值在 0.1 $\mu\text{S/cm}$ 以下。由于各影响因素之间的作用十分复杂,本文只给出了大致范围和趋势,并未给出准确数据。

关 键 词:超临界机组;流动加速腐蚀;溶解;影响因素;相互关系

中图分类号:TM621 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.03.021

[引用本文格式]肖卓楠,卞 博,徐 持,等.超临界机组发生 FAC 的因素及相互关系分析[J].热能动力工程,2022,37(3):143-150. XIAO Zhuo-nan, BIAN Bo, XU Chi, et al. Analysis of the factors of FAC and their interactions in supercritical units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3):143-150.

Analysis of the Factors of FAC and their Interactions in Supercritical Units

XIAO Zhuo-nan, BIAN Bo, XU Chi, LI Ke

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, Post Code:014010)

Abstract: Flow accelerated corrosion(FAC) can cause faster boiler scale formation, less pipe thickness of steam water system and even higher burst frequency. In order to reduce these phenomena, the mechanism of FAC in supercritical units and its main factors are studied, including the effects of pipe inner surface roughness, steam content, pH value and dissolved oxygen on FAC, as well as the interactions between temperature and pH value, temperature and flow rate, pH value and dissolved oxygen, and dissolved oxygen and hydrogen conductivity. The operation data of supercritical power plant is used to verify the results. The results show that the corrosion rate of FAC can be reduced by reducing the flow rate of working medium, the roughness of pipe wall and the conductivity of hydrogen, increasing the pH value and the content of dissolved oxygen of feed water. The optimum pH range in supercritical oxygenation treatment is 8.9 to 9.2, the dissolved oxygen is 45 to 100 $\mu\text{g/L}$ and the expected value of hydrogen conductivity is less than 0.1 $\mu\text{S/cm}$. Due to the complexity of the interactions, only general range and trend with no accurate data is provided.

Key words: supercritical unit, flow accelerated corrosion, dissolution, influencing factors, interrelation

收稿日期:2019-10-16; 修订日期:2020-02-26

基金项目:国家自然科学基金(51966016)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51966016)

作者简介:肖卓楠(1980-),女,内蒙古包头人,内蒙古科技大学副教授。

符号说明

- A —内横截面积, m^2
- C_{eq} —氧化膜溶解度, g/g
- D —管道内径, m
- d —管道直径, m
- D_1 —扩散系数
- G —工质的质量流量, t/h
- k —传质系数
- K_{B} —玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
- K_{b} —解离常数
- K_{W} —离子积常数
- M_{B} —水的摩尔质量, g/mol
- v —流体的平均流速, m/s
- V_{A} —氧在正常沸点下的分子体积, cm^3/mol
- v_{b} —近壁面的流速, m/s
- v_{j} —主流区中节点的流速, m/s
- X_{j} —主流区节点和壁面的距离, m
- θ —氧化膜孔隙率
- τ —壁面剪切应力, Pa
- λ —沿程阻力系数
- μ —动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- μ_{e} —当量粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- ρ —工质的密度, kg/m^3
- σ —氧化膜厚度, m
- φ —水的缩合参数, 取 2.6

引 言

随着国家经济的快速增长, 电力行业也高速发展, 为了实现燃煤电厂“安全、可靠、高效、清洁、经济”的运行目标, 近几年来国家大力发展核电和大容量、高参数火电机组, 关停小型机组, 以提升机组运行效率, 减轻环境污染^[1-2]。随着效率的提高, 机组运行参数也在不断提高, 一系列影响机组生产安全、稳定运行的问题也逐渐凸显出来。国际上许多核电站和大型火电厂都发生过流动加速腐蚀引起的人员伤亡和设备大面积损坏的问题, 严重制约了电力企业的发展^[3]。FAC 指的是管道壁面的保护性氧化膜在单相液体流或者汽液两相流中发生溶解, 导致保护性氧化膜减薄并使金属腐蚀速率变大, 最终造成管壁逐渐减薄, 出现管道破裂现象, 很大程度上影响了电厂的安全运行。对于电厂汽水管道的流动加速腐蚀, 国内外诸多学者主要针对 FAC 腐蚀特征及形成机理、影响因素、监测与预防和数值模型四方面问题, 进行了大量的理论解读、实验分析、电厂

调研、数值模拟等研究。

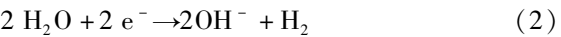
本文从 FAC 机理出发, 通过数学模型以及电厂实测数据对 FAC 的影响因素进行了分析, 并研究了因素之间存在的相互影响, 确定这些因素最佳的控制范围, 提出降低 FAC 速率的有效措施。

1 FAC 的机理

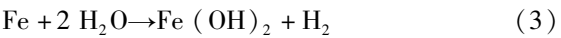
当给水的处理方式是还原性全挥发处理 (AVT (R))^[4], 金属基体会发生溶解:



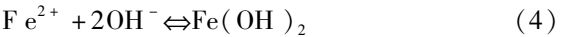
在碱性水中发生还原反应:



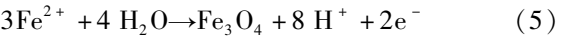
式(1)、式(2)综合反应式为:



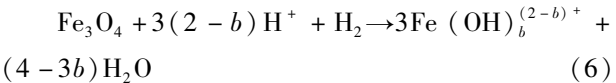
根据 Fe^{2+} 的平衡反应得到:



由金属基体溶解产生的 Fe^{2+} , 一部分在金属表面形成较致密的内伸层 Fe_3O_4 膜, 如式(5); 一部分通过内伸层的孔隙扩散到其表面形成疏松多孔的外伸层 Fe_3O_4 膜^[5], 还有一部分进到边界层。



而 Fe_3O_4 膜也会在边界层发生溶解:



式中, $b=0, 1, 2, 3$, 具体数值与亚铁离子的水解程度有关^[6]。

在边界层的 Fe^{2+} 等可溶性含铁组分在浓度梯度的作用下扩散到主流区, 随工质流走。由于不断失去 Fe^{2+} , 管壁逐渐变薄, 最终爆裂。

2 FAC 的影响因素

影响 FAC 的因素可以分为四类: 流体动力学因素、环境因素、材料因素和几何形状因素^[7-9]。通过相关关系式以及电厂实测数据分析管壁内表面粗糙度、蒸汽含汽率、pH 值和溶氧量对 FAC 的影响。

2.1 管道内表面粗糙度对 FAC 的影响

紧靠给水管壁处有一层很薄的粘性底层^[10], 它能影响管道内流体速度的分布和能量的损失, 其厚度表达式为^[11]:

$$\sigma = \frac{36.8d}{Re\sqrt{\lambda}} \tag{7}$$

管壁表面在微观上并不光滑,突起的绝对高度叫做绝对粗糙度(Δ)。令粘性底层的厚度和绝对粗糙度的比值为 K_2 ,即 $K_2 = \sigma/\Delta$ 。当 $K_2 > 1$ 时,粘性底层可以很好地覆盖住凸起的部分,管道内表面粗糙度不会影响到能量损失,管壁几乎不受流体流速变化影响,此时管壁叫做水力光滑管。当 $K_2 < 1$ 时,流体流经凸起点时会产生绕流,会形成旋涡,造成大量的能量损失,管壁将会受到流体流速变化影响,此时管壁叫做水力粗糙管。可以看出,管壁表面粗糙度是否影响到 FAC 速率,取决于 K_2 是否大于1。

在标准^[12]中,推荐低压加热器管道工质流速为0.5~2.0 m/s,高压加热器管道工质流速为2~6 m/s。管道内径的计算式为:

$$D = 594.7 \sqrt{\frac{G}{\rho V}}$$

(8)

600 MW 超临界机组的给水质量流量是1 900 t/h,低压加热器温度是25~170 ℃,高压加热器温度是170~300 ℃。取速度的上限值,通过式(8)算得低压加热器给水管道的内径为581 mm,高压加热器给水管道的内径为355 mm。

取最小温度25 ℃,最小流速0.5 m/s,得到给水管道的最小 Re 是 3.2×10^5 ,此时 Re 已经大于 1×10^5 ,所以 λ 要通过希弗林松公式^[13]确定:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0.25}$$

(9)

给水管道的绝对粗糙度Δ一般为0.046 mm,代入式(9)中可以得到低压加热器给水管道的 $\lambda = 0.0104$,高压加热器给水管道的 $\lambda = 0.0117$ 。

低压加热器给水管道的流速为0.5~2.0 m/s,温度为25~170 ℃。取最高温度170 ℃,计算不同流速下 K_2 的值,结果如图1所示。可见, K_2 随流速的增加而减小,流速增加到1.42 m/s时, $K_2 = 1$ 。当流速超过1.42 m/s后就有可能使 $K_2 < 1$,所以建议低压加热器给水管道的流速控制在0.5~1.42 m/s。

取流速的最大值2 m/s,计算不同温度下 K_2 的值,结果如图2所示。可见, K_2 随温度增大而减小。而当温度提高到115 ℃时, $K_2 = 1$,说明温度小于115 ℃时低压加热器给水管道的FAC的速率不会受到绝对粗糙度的影响。

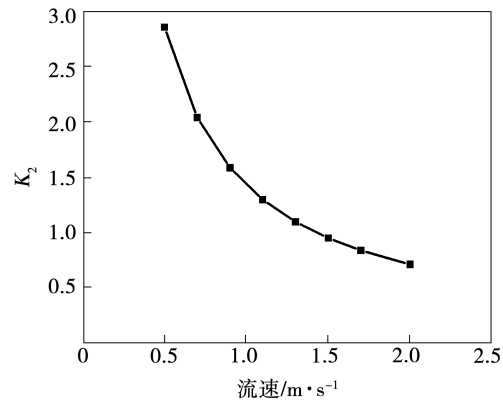


图1 低压加热器给水管道的 K_2 与流速的关系
Fig. 1 Relationship between K_2 and velocity of flow in water supply pipeline of low pressure heater

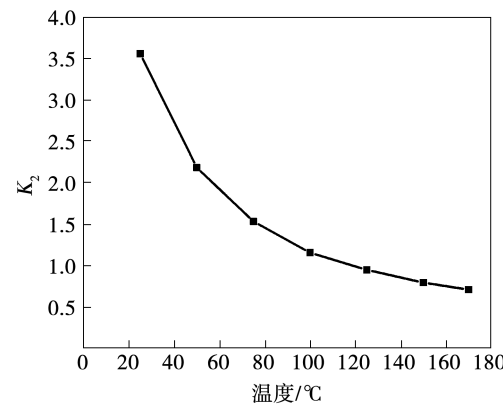


图2 低压加热器给水管道的 K_2 与温度的关系
Fig. 2 Relationship between K_2 and temperature in water supply pipeline of low pressure heater

高压加热器给水管道的流速为2~6 m/s,温度为170~300 ℃,取最低温度170 ℃,计算不同流速下的 K_2 值,结果如图3所示。

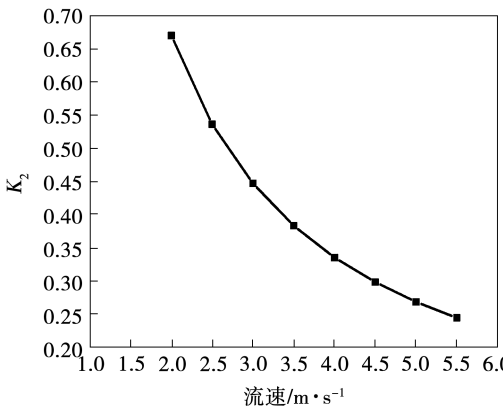


图3 高压加热器给水管道的 K_2 与流速的关系
Fig. 3 Relationship between K_2 and velocity of flow in water supply pipeline of high pressure heater

由图 3 可知,在高压加热器管道最小流速 2 m/s 的条件下,得到高压加热器管道厚度最大,此时 K_2 已经小于 1。说明全程的高压加热器给水管道的 FAC 速率都会受到绝对粗糙度的影响,而且随着流速的增大和温度的提高,管道粗糙度对 FAC 速率的影响越大。

2.2 蒸汽含汽率对 FAC 的影响

蒸汽含汽率对 FAC 的影响可以通过雷诺数的计算公式反应出来^[14],流体为汽液两相流时,雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{\rho v \cdot d}{\mu} \quad (10)$$

流速的计算公式为:

$$v = \frac{Q}{A\rho} \cdot \frac{1-\chi}{1-\alpha} \quad (11)$$

当流体为单相液体流时, Q 为工质流量, χ 为蒸汽的质量, α 为蒸汽的体积分数。而流体是汽液两相流,且蒸汽含汽率较小时,由于 $\alpha > \chi$,此时的 Re 比单相液体流的 Re 大,说明紊流程度较大,FAC 腐蚀速率也会较大。而蒸汽含汽率进一步增大时,虽然 Re 会增大,但是由于环状流(大多数的液体以膜状贴着管壁流动,而气体夹带着雾沫在管道中心高速运动)的形成^[15],管壁表面的边界层更加稳定,物质扩散阻力增加,FAC 速率降低。当流体是单相蒸汽流时, $\alpha = 1$,此时电化学腐蚀不发生,FAC 几乎不存在。所以随着蒸汽含汽率的增大,FAC 的速率是先增大后减小。

2.3 pH 值对 FAC 的影响

pH 值对 FAC 的影响,主要是因为 FAC 过程的氧化还原反应涉及到 H^+ ,而且 OH^- 与可溶性含铁组分反应生成氢氧化合物沉积于基体表面,使 FAC 速率减小,所以 pH 值对 FAC 过程有重要作用。

H^+ 的浓度与 pH 值的关系式为:

$$c[H^+] = 10^{-pH} \quad (12)$$

OH^- 浓度与 H^+ 浓度的关系式为:

$$c[OH^-] = \frac{K_w}{c[H^+]} \quad (13)$$

由式(12)、式(13)可知,随着 pH 值增大 H^+ 的浓度减小,而 OH^- 的浓度增大。采用化学平衡原理分析,当提高系统 pH 值,工质中 H^+ 浓度将降低,式(6)将会受到抑制,即 Fe_3O_4 的溶解度将会降低,从

而减小 FAC 速率。

根据沧东电厂 4 号机组的数据分析,该机组的 pH 值控制在 8.8 ~ 9.1 之间,给水 pH 值与 Fe^{2+} 浓度的关系如图 4 所示。

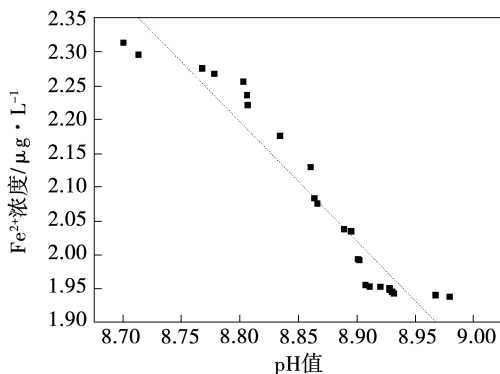


图 4 沧东 4 号机组加氧处理方式下给水 pH 值与 Fe^{2+} 浓度的关系

Fig. 4 Relationship between pH value of feed water and Fe^{2+} concentration under Cangdong 4# OT treatment

由图 4 可知,图中直线为大致趋势,黑点为现场化学水监测数据,随着 pH 值的提高, Fe^{2+} 的浓度减小,说明 FAC 速率降低。而且通过计算可得,pH 值增加到 9.0 的时候, Fe^{2+} 浓度减小到了 $1.9 \mu g/L$,说明此时 FAC 得到了有效的抑制。

2.4 溶氧量对 FAC 的影响

在纯净度极高的给水中,溶解氧会产生钝化作用。当给水采用加氧处理(OT)^[11]时,充足的氧量能让金属表面形成稳定的 Fe_3O_4 内伸层。且通过内伸层的微孔通道到达表面的 Fe^{2+} ,一部分直接形成稳定的 Fe_3O_4 外延层;另一部分氧也会进入到 Fe_3O_4 孔隙与其中的 Fe^{2+} 反应得到 Fe_2O_3 ,使微孔变小或者封闭, Fe^{2+} 扩散的速率随之减小。所以,OT 处理最终会使钢表面拥有致密稳定的“双层保护膜”,流动加速腐蚀得到有效抑制。

通过对沧东电厂 4 号机组实测数据的分析,得到 Fe^{2+} 浓度随溶解氧含量的变化情况,如图 5 所示。

由图 5 可知, Fe^{2+} 的浓度随溶解氧含量增加而减小,FAC 速率减小。通过图中趋势看出,溶解氧含量大于 $45 \mu g/L$, Fe^{2+} 的浓度将小于 $0.09 \mu g/L$,说明此时 FAC 得到了有效抑制。

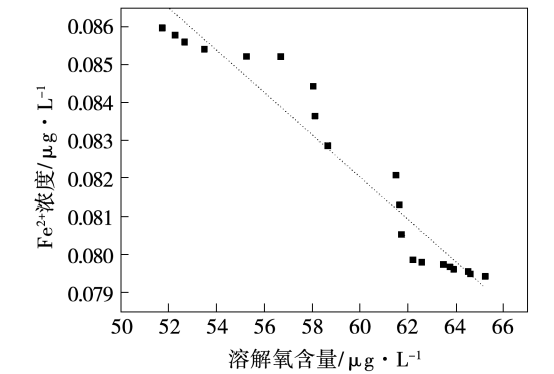


图5 给水中溶解氧含量与Fe²⁺浓度的关系

Fig.5 Relationship between dissolved oxygen content and Fe²⁺ concentration in feed water

3 影响因素之间的相互影响

前面分析了单个因素对FAC的影响情况,但因素之间也会存在相互的影响,所以研究这些相互关系对分析FAC的也有重要的意义。

3.1 温度与pH值的相互影响

pH值主要取决于H⁺的浓度,两者的关系式为:

$$\text{pH} = -\lg c[\text{H}^+] \tag{14}$$

式中: $c[\text{H}^+]$ 为H⁺浓度,其表达式为:

$$c[\text{H}^+] = \frac{K_w}{c[\text{OH}^-]} \tag{15}$$

可见,温度改变对pH值会有影响。有研究人员已经确定了高温下实际pH的计算公式^[15]:

$$\text{pH} = A_1 + B_2 \lg m + C_3 (\lg m)^2 + D_4 (\lg m)^3 \tag{16}$$

式中: A_1 、 B_2 、 C_3 、 D_4 —常数,具体值参见文献[17]。

m 是氨水的浓度,其计算公式为:

$$m = \frac{c[\text{OH}^-]^2}{K_b} \tag{17}$$

给水温度一般低于300℃,且常温时pH值范围为8~10。图6为pH值随温度的变化关系。

由图6可以看出,pH值随温度的升高减小。所以在分析高温下Fe₃O₄氧化膜溶解度的情况下应该用实际pH值。

3.2 温度与流速的相互关系

温度小于150℃时,氧化膜薄且疏松,不影响物质传输,所以FAC速率主要受到边界扩散层传质控制,此时FAC速率为:

$$K_{\text{FAC}} = k C_{\text{eq}} \tag{18}$$

$$k = \frac{\tau}{\nu \rho} \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)^{-2/3} \tag{19}$$

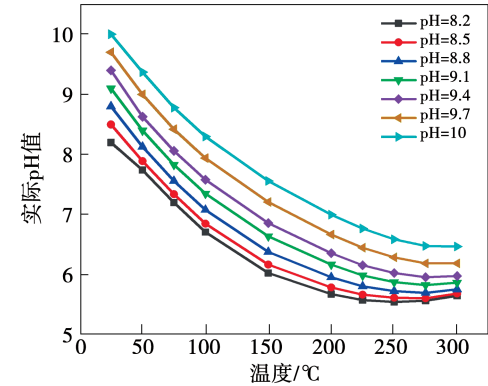


图6 温度对pH值的影响

Fig.6 Effect of temperature on pH value

壁面剪切应力的计算公式^[16]:

$$\tau = \mu_e \frac{v_j - v_b}{X_j} \tag{20}$$

通过流体力学软件Fluent对剪切力进行模拟,再结合式(18)、式(19)计算出温度小于150℃时的FAC速率,结果如图7所示。

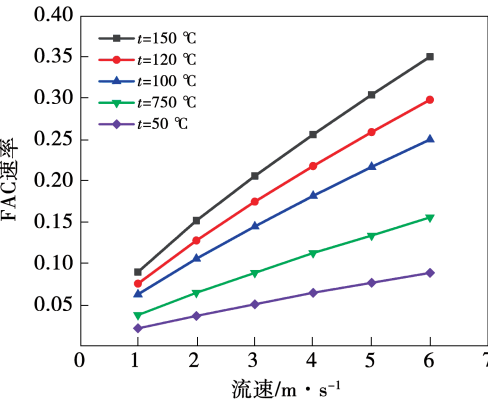


图7 流速和温度对FAC速率的影响

Fig.7 Effect of flow rate and temperature on FAC rate

由图7可以看出,工质在温度小于150℃,且在给水系统流速范围(0.5~6 m/s)内。FAC速率随流速和温度的提高而增大,而且流速越大,温度对FAC速率的影响越大。

而当温度大于150℃时,管壁表面氧化膜的孔隙率(θ)随温度升高而降低,氧化膜逐渐变得致密,FAC速率减小。可见,FAC速率随温度增大是

先提高后降低,峰值在 150 ℃。当温度大于 150 ℃, FAC 速率主要受到管壁表面氧化膜溶解度和扩散系数所影响,此时 FAC 速率 S 为:

$$S_{\text{FAC}} = 2 C_{\text{eq}} \frac{\theta D}{\sigma} \tag{21}$$

C_{eq} 主要受到 pH 值和温度的影响, D 主要受到温度的影响。可见,在温度大于 150 ℃时,流速对 FAC 的影响主要是通过影响 σ , 该温度条件下 σ 与流速的关系表达式为^[17]:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot \text{pH}}{v} \tag{22}$$

由式(22)可知,如果流速 v 增大, σ 将会减小, 进而使 FAC 速率增大。

FAC 的速率随流速的提高而增大,但影响的实质有差别。温度小于 150 ℃,流速主要影响的是传质系数,而温度大于 150 ℃,流速主要影响的是氧化膜厚度。

3.3 pH 值对溶解氧量的影响

采用 OT 处理时,确定有效抑制 FAC 速率的最小加氧量,这对精确控制加氧量具有重要的意义。

有研究 FAC 的相关学者已经建立了临界溶氧量的数学模型^[18],给出临界溶氧量表达式为:

$$C_{\text{O}_2}^{\text{cr}} = \frac{D_{\text{Fe}}}{4 D_{\text{O}_2}} S_{\text{Fe}} \tag{23}$$

D_{O_2} 是溶解氧的扩散系数,常用 Wilke-Chang 公式估算:

$$D_{\text{O}_2} = \frac{7.4 \times 10^{-15} (\phi M_B)^{0.5} T}{V_A^{0.6} \mu} \tag{24}$$

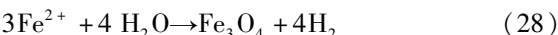
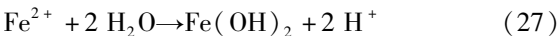
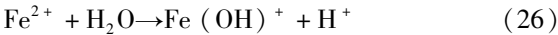
式中: $V_A = 0.258 V_C^{1.048}$, 其中 V_C 是氧的临界体积^[19], 其值为 73.4 cm³/mol。

D_{Fe} 是亚铁离子的扩散系数,计算式为:

$$D_{\text{Fe}} = \frac{K_B T}{6 \pi \mu \alpha_{\text{Fe}}} \tag{25}$$

式中: K_B 取值 1.38×10^{-23} J/K; α_{Fe} —亚铁离子半径,取 0.078 nm。

S_{Fe} 是铁的热力学溶解度,确定其值的过程为:



可以通过化学反应平衡常数定义和化学反应平

衡原理确定三个反应式的平衡常数:

$$K_1 = \frac{c_{\text{H}^+} c_{\text{Fe}(\text{OH})^+}}{c_{\text{Fe}^{2+}}^2} \tag{29}$$

$$K_2 = \frac{(c_{\text{H}^+})^2 c_{\text{Fe}(\text{OH})_2}}{c_{\text{Fe}^{2+}}^2} \tag{30}$$

$$K_3 = \frac{(c_{\text{H}^+})^6}{(c_{\text{Fe}^{2+}})^3} \tag{31}$$

可得:

$$S_{\text{Fe}} = c_{\text{Fe}^{2+}} + c_{\text{Fe}(\text{OH})^+} + c_{\text{Fe}(\text{OH})_2} = \left(\frac{(c_{\text{H}^+})^2 + K_1 c_{\text{H}^+} + K_2}{(K_3)^{\frac{1}{3}}} \right) \tag{32}$$

式中: c_{H^+} 是氢离子浓度,通过式(15)确定; K 需要通过吉布斯自由能变化量确定。

吉布斯自由能变化量在标准状态下为:

$$\Delta G = -RT \ln K \tag{33}$$

非标准状态时需要通过范特霍夫等温公式确定:

$$\Delta G = \Delta G_0 + \frac{RT}{\ln J} \tag{34}$$

标准状态下各反应式吉布斯自由能变化量是: $\Delta G_0^1 = 38.6$ kJ/mol; $\Delta G_0^2 = 102.6$ kJ/mol; $\Delta G_0^3 = 169.7$ kJ/mol。反应处于平衡状态时,反应平衡常数 K 等同于反应熵 J ,通过式(33)、式(34)可得:

$$-RT \ln K = \Delta G_0 + \frac{RT}{\ln K} \tag{35}$$

温度和 pH 值会影响 S_{Fe} , 温度影响 D_{O_2} 和 D_{Fe} , 因此临界溶氧量与温度及 pH 值有着重大关系。

由于给水温度在 150 ℃时 FAC 的情况最严重, 所以取 $T = 423$ K, 通过式(35)确定各反应式的平衡常数: $K_1 = 1.88 \times 10^{-5}$, $K_2 = 2.21 \times 10^{-13}$, $K_3 = 1.13 \times 10^{-21}$ 。

图 8 为省煤器入口温度 $T = 423$ K 时不同给水 pH 值的临界溶氧量。通过图 8 可知, 临界溶氧量随 pH 值提高而减小, 可以通过 pH 值和临界溶氧量的对应关系来指导给水的加氧量。

3.4 溶解氧量与氢电导率的相互影响

氢电导率决定了溶解氧在给水中金属离子所起的作用, 氢电导率小于 0.15 μS/cm, 溶解氧加快金属腐蚀; 氢电导率大于 0.15 μS/cm, 溶解氧抑制金属腐蚀^[20]。

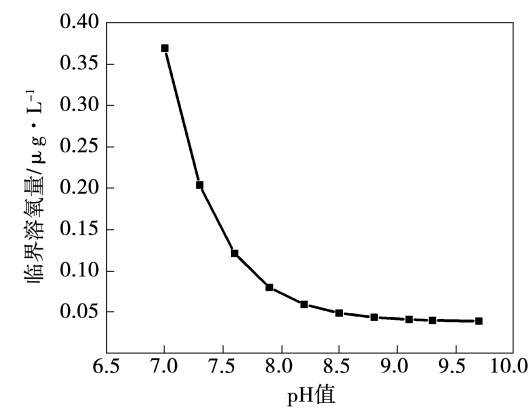


图 8 pH 值与临界溶氧量关系

Fig. 8 Relationship between pH and critical dissolved oxygen

给水的氢电导率大小主要由阴离子的含量决定,给水加氧时溶解氧含量提高,使氧化膜变得更致密。转化过程使原本存在氧化膜微孔中的阴离子排挤到主流区,导致给水氢电导率变高^[20]。

通过整理沧东电厂 4 号机组的实测数据,绘制氢电导率随溶解氧量的变化图,如图 9 所示。

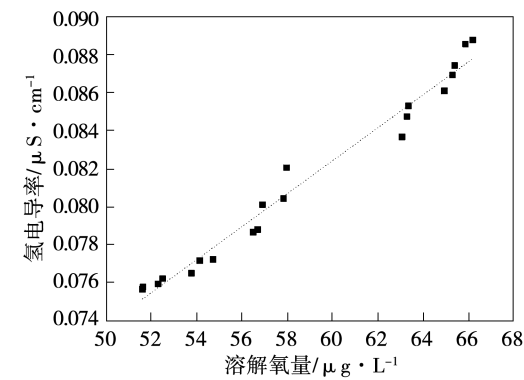


图 9 溶解氧量与氢电导率关系

Fig. 9 Relationship between dissolved oxygen and hydrogen conductivity

由图 9 可知,氢电导率随溶解氧量的提高而增大,溶解氧量增大会使 FAC 速率减小,而氢电导率增大会使 FAC 速率增大。OT 处理的氢电导率理想控制范围是 0.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下^[21],由图中的趋势可以看出,对应的溶氧量为 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 左右,而且溶氧量要达到 45 $\mu\text{g}/\text{L}$ 以上才能有效抑制 FAC 现象。因此,OT 处理的溶解氧量应维持在 45 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ ^[22]。

4 结 论

(1) 如果实际运行工况允许,减小工质流速、管壁粗糙度和氢电导率,增大给水的 pH 值和溶解氧含量可以使 FAC 的腐蚀速率减小。

(2) 超临界 OT 处理的前提下,pH 值最佳的控制范围为 8.9 ~ 9.2,溶解氧量范围为 45 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{L}$,而且氢电导率的期望值在 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下。将这些因素控制在最优范围内可以有效控制 FAC 速率。

(3) FAC 的部分影响因素之间存在着相互的关系:温度决定了流速对 FAC 速率的影响实质;pH 值会随着温度的升高而降低;氢电导率决定着溶解氧在给水中的作用效果,而且溶解氧含量增大会使氢电导率升高;临界溶氧量随 pH 值提高而减小,可以通过 pH 值和临界溶氧量的对应关系来指导给水的加氧量。

参考文献:

[1] 石荣雪,张适宜,张胜寒. 基于数据挖掘技术的国内锅炉化学水工况选择[J]. 化工进展,2016,35(3):671-678.
SHI Rong-xue, ZHANG Shi-yi, ZHANG Sheng-han. Selection of domestic boiler chemical water condition based on data mining technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(3):671-678.

[2] 边彩霞,周克毅,朱正林,等. 停机过程中锅炉高温受热面蒸汽侧氧化膜的应力分析[J]. 化工学报,2013,64(4):1444-1452.
BIAN Cai-xia, ZHOU Ke-yi, ZHU Zheng-lin, et al. Stress analysis of steam side oxide film on high temperature heating surface of boilers during shutdown[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013, 64(4):1444-1452.

[3] DOOLEY R B. Flow-accelerated corrosion in fossil and combined cycle/HRSG plants[J]. Power Plant Chemistry, 2008, 10(2):68-89.

[4] 刘志江. 电、水、热三联产机组水处理系统优化[J]. 中国电力, 2012, 45(11):28-31.
LIU Zhi-jiang. Water treatment system optimization of power, water and heat triple generation units[J]. China Electric Power, 2012, 45(11):28-31.

[5] 张辉,朱志平,荆玲玲. AVT 水工况条件下水冷壁管形成氧化膜的特性研究[J]. 热能动力工程, 2011, 26(6):732-737.
ZHANG Hui, ZHU Zhi-ping, JING Ling-ling. Study of the formation

- characteristics of oxide film on waterwall tubes under the AVT(all volatilization treatment) water condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(6): 732–737.
- [6] 林 彤, 周克毅, 司晓东. 电厂机组流动加速腐蚀研究进展及防护措施[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(5): 543–551.
LIN Tong, ZHOU Ke-yi, SI Xiao-dong. Research progress and protective measures of flow accelerated corrosion of power plant units[J]. Corrosion Science and Protective Technology, 2018, 30(5): 543–551.
- [7] 张凌翔, 周克毅, 徐 奇, 等. 90°弯管流动加速腐蚀的实验和数值模拟[J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5173–5181.
ZHANG Ling-xiang, ZHOU Ke-yi, XU Qi, et al. Experiments and numerical simulations of flow accelerated corrosion of 90 degree elbows[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2018, 69(12): 5173–5181.
- [8] EI-GAMMAL M, MAZHAR H, COTTON J S, et al. The hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 240(6): 1589–1598.
- [9] 于 森. 核电站流动加速腐蚀的机理研究[J]. 产业与科技论坛, 2015, 14(10): 43–44.
YU Miao. Study on the mechanism of flow accelerated corrosion in nuclear power plants[J]. Industry and Science Forum, 2015, 14(10): 43–44.
- [10] 周志军, 林 震, 周俊虎, 等. 不同湍流模型在管道流动阻力计算中的应用和比较[J]. 热力发电, 2007(1): 18–23.
ZHOU Zhi-jun, LIN Zhen, ZHOU Jun-hu, et al. Application and comparison of different turbulence models in calculation of flow resistance in pipelines[J]. Thermal Power Generation, 2007(1): 18–23.
- [11] 严卓奇. 流量加速腐蚀对核电站二回路材料影响及对策的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
YAN Zhuo-qi. Study on the effect of accelerated flow corrosion on secondary circuit materials of nuclear power plants and countermeasures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [12] DL/T 5054–1996, 火力发电厂汽水管设计技术规定[S].
DL/T 5054–1996, Technical regulations for steam and water pipeline design of thermal power plant[S].
- [13] 曹明磊, 郭 英, 高少娟. 管道阻力对锅炉蒸发量的影响[J]. 化学工程与装备, 2013(4): 116–117.
CAO Ming-lei, GUO Ying, GAO Shao-juan. Effect of pipeline resistance on boiler evaporation[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2013(4): 116–117.
- [14] 董超芳, 肖 葵, 刘智勇, 等. 核电环境下流体加速腐蚀行为及其研究进展[J]. 科技导报, 2010, 28(10): 96–100.
DONG Chao-fang, XIAO Kui, LIU Zhi-yong, et al. Research progress of fluid-accelerated corrosion behavior in nuclear power environment[J]. Science and Technology Review, 2010, 28(10): 96–100.
- [15] 蒋东方, 超临界机组汽水系统腐蚀产物迁徙过程研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
JIANG Dong-fang. Study on the migration process of corrosion products in steam-water system of supercritical units[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.
- [16] 刘 忠, 刘春波, 郑玉贵. 碳钢在单相流中流动加速腐蚀的数值模拟[J]. 核动力工程, 2009, 30(5): 48–53.
LIU Zhong, LIU Chun-bo, ZHENG Yu-gui. Numerical simulation of the accelerated corrosion of carbon steel in single-phase flow[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(5): 48–53.
- [17] ROCCHINI G. Magnetite stability in aqueous solutions as a function of temperature[J]. Corrosion Science, 1994, 36(12): 2043–2061.
- [18] 游 健, 丁建军. 汽轮机组给水系统的控氧与抑制流动加速腐蚀[J]. 山西电力, 2017(1): 41–45.
YOU Jian, DING Jian-jun. Oxygen control and flow accelerated corrosion suppression of steam turbine feed water system[J]. Shanxi Electric Power, 2017(1): 41–45.
- [19] 芮小平, 伍 彬, 李真子, 等. 基于元胞自动机的污染物潜水面扩散仿真算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 239–245.
RUI Xiao-ping, WU Bin, LI Zhen-zi, et al. Simulation algorithm of pollutant diffusion on diving surface based on cellular automata[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(30): 239–245.
- [20] 肖卓楠, 白冬晓, 徐 鸿, 等. 超临界机组给水加氧处理对流动加速腐蚀影响的研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(11): 880–885, 924.
XIAO Zhuo-nan, BAI Dong-xiao, XU Hong, et al. Study on the effect of feedwater oxygenation treatment on flow accelerated corrosion of supercritical units[J]. Journal of Power Engineering, 2018, 38(11): 880–885, 924.
- [21] DL/T 805.2—2004, 火力发电厂汽水化学导则: 第一部分: 直流锅炉给水加氧处理导则[S].
DL/T 805.2—2004, Steam-water chemistry guidelines for thermal power plants, part I: guidelines for feedwater oxygenation treatment of once-through boilers[S].
- [22] 肖卓楠. 超超临界机组流动加速腐蚀的分析与控制[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 142.
XIAO Zhuo-nan. Analysis and control of flow accelerated corrosion in ultra supercritical units[J]. Thermal Power Engineering, 2019, 34(6): 142.