

基于化学仪表精确测量的亚临界机组水汽循环系统腐蚀速率评估

冀亚妮

(大唐国际发电股份有限公司张家口发电分公司, 河北 张家口 075000)

摘要 随着我国电力行业节能减排与安全生产要求的不断提高,《电力安全生产“十四五”规划》《火电机组节能降碳改造升级实施方案(2022—2025年)》等文件明确提出,要加快火电机组数字化、智能化改造,提升设备运行监测和故障预警能力。亚临界机组作为当前火电系统的重要组成,其水汽循环系统腐蚀问题直接影响机组效率与使用寿命。传统的腐蚀监测多依赖人工取样与实验分析,存在时效性差、精度不足的问题。本文基于化学仪表精确测量技术,构建了亚临界机组水汽循环系统腐蚀速率实时评估模型,利用在线电导率、pH、溶解氧、铁离子浓度等关键参数的动态监测数据,分析腐蚀速率变化规律及其影响因素,以期为相关人员提供借鉴。

关键词 亚临界机组; 水汽循环; 化学仪表; 腐蚀速率; 智能监测

中图分类号: TH7; TM31

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.028

0 引言

在火电厂运行中,管道、汽轮机和换热器等设备因长期处于高温高压的水汽环境,面临电化学腐蚀的显著风险,导致性能衰退甚至事故隐患。针对这一问题,化学仪表在线检测技术发挥了核心作用,通过持续监测电导率、溶解氧、pH值和金属离子等参数,实现腐蚀速率的定量分析,并为预测与防护措施提供可靠数据支持。这一技术路径不仅契合能源安全与设备健康管理的迫切现实需求,更是推动火电行业向高质量发展的必然趋势。

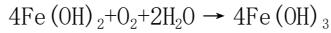
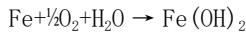
1 系统现状与腐蚀机理分析

1.1 运行环境苛刻, 腐蚀问题突出

以某600 MW亚临界燃煤机组为例,锅炉主汽压力约16.7 MPa,过热蒸汽温度达540 °C。在此如此高温高压、氧含量波动的环境中,水汽循环系统极易发生氧腐蚀与酸腐蚀。在实际运行中,机组负荷频繁波动(±20%负荷范围内),加氨、加联氨控制延迟常导致pH值短时降至8.5以下,除氧器出口溶解氧偏高至0.02 mg/L以上,造成省煤器进水管和凝汽器钢管内壁出现 Fe(OH)_3 沉积和 Cu_2O 脱膜现象。近三年定检数据显示,凝汽器管壁平均减薄速率约为0.12 mm/a,局部点蚀深度超过0.5 mm,说明腐蚀问题已影响热交换效率与运行安全^[1]。

1.2 腐蚀机理复杂, 损伤类型多样

亚临界水汽系统中腐蚀主要由溶解氧、电化学反应及流体冲蚀耦合效应造成。典型反应如下:



Fe(OH)_3 沉积后易在局部形成差异氧浓池,诱发点蚀。若pH超过9.6, Fe_3O_4 膜被破坏,碱脆裂纹沿晶界扩展;而在高流速弯头处,雷诺数超过 2×10^5 时冲蚀速率显著增加,导致气蚀坑与应力腐蚀裂纹共存,损伤具有不可逆性。

1.3 监测方式滞后, 智能检测势在必行

目前部分机组仍采用化验室取样滴定或重量损失法,数据滞后6~12小时,无法动态反映腐蚀速率变化。针对这一问题,本研究引入化学仪表在线测量+数字化数据融合评估系统,实现实时监测与趋势预测。通过高精度电化学传感器采集腐蚀电流密度,与水质参数(pH、电导率、溶氧、Fe离子浓度)进行耦合分析,形成“腐蚀电流—离子浓度—水质参数”多变量监控模型,为锅炉水化学运行调整提供依据^[2]。

2 化学仪表测量与数据评估方法

2.1 多点布置监测体系, 构建全过程测量网络

系统监测点依据流体循环路径及腐蚀敏感位置分布布置,共设10个主要监测节点,各监测点采用分级仪表系统(见表1)。

高温段(>250 °C):安装K型高温电化学探头与耐腐蚀合金保护套,信号通过热电隔离放大后接入DCS。

低温段(<100 °C):使用光学pH电极与离子选

表 1 系统监测点监测详情汇总

区段	监测点位置	关键监测参数	监测目的
除氧器出口	高压给水出水管	pH、溶解氧	判断除氧及加氨控制效果
省煤器进口	冷却水回路	电导率、Fe 离子	监测进水污染及金属溶出
汽包	上升管与下降管汇	腐蚀电流密度、pH	判断汽水分离区腐蚀活性
过热器入口	高温段	电导率、Fe 离子	检测高温氧化皮脱落趋势
凝汽器入口与出口	铜管内外壁	溶解氧、电导率	判断冷端氧腐蚀与电化学差异
给水回路	低压段管线	pH、电导率、腐蚀电流	综合评估系统腐蚀速率

择电极分析仪 (Fe^{2+} 检测限 0.01 mg/L)。

溶解氧分析仪:采用极谱型传感器,检测限 0.001 mg/L,配合定期校准的在线流通池。

所有仪表信号经 Modbus TCP/IP 协议传输至化学监控服务器,并与 DCS 系统实现数据同步与报警联动。若监测值超限(如 $\text{pH} < 8.8$ 、电导率 $> 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、溶解氧 $> 0.02 \text{ mg/L}$),系统会自动触发化学加药单元的联动响应,实现闭环控制。

2.2 多参数耦合模型构建, 实现腐蚀速率定量化计算

数据分析是研究构建了基于电化学腐蚀原理的多参数耦合下腐蚀速率计算模型,并且利用 Nernst 电位方程和法拉第定律进行腐蚀速率计算分析,在溶解氧、 pH 、电导率、温度和铁离子的基础上进行多元线性回归,最终得到腐蚀速率(瞬时腐蚀速率)(mm/a),主要公式表达式为:

$$V = k(a_1[O_2] + a_2pH - 1 + a_3\sigma + a_4[\text{Fe}^{2+}]) + \epsilon \quad (1)$$

式(1)中, O_2 为溶解氧浓度, σ 为电导率, $[\text{Fe}^{2+}]$ 为铁离子浓度, ϵ 为系统误差项。模型参数经逐步回归与偏最小二乘法优化后,相关系数 R^2 达到 0.91,具有良好的预测精度。

在对设备信号进行采集的基础上,为了减小数据波动,本系统使用滑动窗口平均算法和小波滤波进行仪表信号的自动滤波,去除信号中的瞬时扰动和操作冲击。如正常运行时,某段时间机组由负荷 80% 上升至 100% 时,除氧器温度变化的扰动,使得 D-O 的溶解氧发生短时波动,但经过滤波后,腐蚀速率的曲线没有大的波动,模型输出结果在正常状态,腐蚀速率平均为 $0.018 \sim 0.026 \text{ mm}/\text{a}$,当 D-O 达到 $0.03 \text{ mg}/\text{L}$ 时,腐蚀速率上升为 $0.043 \text{ mm}/\text{a}$ 。研究证实 D-O 是影响腐蚀速率变化的主要影响因素, pH 达到 $8.8 \sim 9.2$ 时系统为最佳防腐运行状态^[3]。

2.3 构建智能预警机制, 实现工况动态调控

为突破传统腐蚀监测的“后验分析”局限,系统依托厂级实时数据库(HIS)+深度学习引擎(TensorRT),构建“监测—识别—响应”三级智能预警模型。该模型以 Fe^{2+} 浓度变化速率($d[\text{Fe}^{2+}]/dt$)与溶解氧增长速率($d[D_O]/dt$)为主控参数,并引入运行负荷、 pH 、主汽温度等协同因子,实现对腐蚀趋势的提前识别。

1. 算法层设计:模型采用基于双通道 CNN-LSTM 结构的时序预测算法,其中 CNN 用于提取水化学信号的局部特征(如波动频率、振幅),LSTM 捕捉时间依赖性。训练数据来自 3 年机组运行历史(约 9.8×10^6 条样本),经归一化和噪声滤波处理后输入模型,预测平均误差控制在 $\pm 0.038 \text{ mm}/\text{a}$ 。

2. 触发阈值与响应逻辑:当 Fe^{2+} 浓度连续 3 分钟 $> 10 \mu\text{g}/\text{L}$ 或 D_O 上升速率 $> 0.005 \text{ mg}/\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,系统自动发出双级报警:一级 DCS 报警:在主控屏红色高亮闪烁,并记录触发时间及关联参数(pH 、电导、流量、负荷等);二级远程联动:通过 SMTP 网关向化学值班员与运行主管推送短信与邮件,附带报警曲线与五分钟窗口内趋势分析图。

3. 自学习与复盘机制:系统自动保存报警前后 ± 5 分钟运行数据及趋势图,经 AI 分析后标注异常原因(如加氨延迟、除氧温度滞后等),并生成“事件复盘报告”。

据统计,智能预警模块投运 6 个月后,氧腐蚀导致的铁离子异常事件减少 47%,维护工单下降 35%,非计划停机次数由每季度 2 次降至 1 次以下。

2.4 融合数字孪生技术, 推进评估智能化升级

在实时监测的基础上,引入数字孪生(Digital Twin)技术,构建亚临界机组水汽循环系统的虚拟孪生体,实现腐蚀状态的“可视—可算—可控”。

1. 模型构建:平台以 SolidWorks 三维模型为基础,导入实际管道参数(材质、壁厚、流量、温度场)和

在线监测数据，通过 ANSYS Fluent 进行流固耦合模拟，实时映射到孪生平台。每个节点（如省煤器入口、凝汽器出水口）均绑定实时数据流。

2. 功能实现：腐蚀分布可视化，平台以三维色谱方式显示各管段腐蚀速率，绿色（ $< 0.02 \text{ mm/a}$ ）、黄色（ $0.02 \sim 0.04 \text{ mm/a}$ ）、红色（ $> 0.04 \text{ mm/a}$ ），并实时闪烁风险区段。

3. 趋势预测：内嵌 LSTM 算法预测未来 48 小时腐蚀变化，平均误差 $\pm 0.004 \text{ mm/a}$ 。

4. 远程管理与仿真优化：管理人员可通过移动端远程查看腐蚀分布、运行状态及推荐调整参数（如加氨量、联氨比例、除氧温度），实现“云端化学监控”。

5. 运行成效：数字孪生系统上线后，人工趋势分析时间缩短 60%，数据异常定位时间从平均 1 小时降至 12 分钟。通过趋势预测调整维护周期，锅炉管道检修周期由 8 个月延长至 12 个月，年均节约成本约 38 万元，并显著提升了防腐维护的主动性与精准^[4]。

3 监测结果分析与优化对策

3.1 监测结果分析：腐蚀速率受运行工况影响显著

以某 600 MW 亚临界机组连续运行 6 个月的监测数据为例，系统采集了约 2.1×10^8 条实时记录。结果显示：

1. 启停阶段腐蚀峰值明显。在冷态启动后 60 分钟内， Fe^{2+} 浓度峰值达 $22 \mu\text{g/L}$ ，腐蚀速率 0.048 mm/a ，是稳态运行期的 3 倍。

2. 负荷波动导致腐蚀速率同步波动。当机组负荷从 70% 升至 100% 时，因除氧器温度滞后 $2 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、溶解氧升高至 0.025 mg/L ，腐蚀速率由 0.020 mm/a 增至 0.042 mm/a 。

3. 局部高流速区腐蚀集中。通过数字孪生可视化发现，凝汽器出口及省煤器进口处腐蚀热点明显， Fe^{2+} 浓度较全系统平均高出 52%。

4. 腐蚀的主导原因包括：(1) 除氧器温度滞后造成溶氧升高；(2) 加氨与联氨投加响应延迟（约 4 分钟）；(3) 冷凝水回收波动导致电导率 $> 15 \mu\text{S/cm}$ 。

5. 稳定满负荷运行时腐蚀速率最低 (0.016 mm/a)，充分证明化学控制稳定性与热力工况一致性是防腐关键。

3.2 优化控制策略：构建“精准监测—动态调节—趋势预警”三层体系

为实现腐蚀风险动态调控，研究构建了集测量、控制、预警于一体的三层智能防控体系：

1. 精准监测层：高精度化学仪表实现 10 s 级连续

监测；通过 Kalman 滤波与滑动中值算法剔除漂移与瞬态噪声，漂移率控制在 1% 以内；数据符合《火电厂水汽化学监测仪表技术条件》（DL/T 1152—2021）。

2. 动态调节层：建立“腐蚀速率—加药量”反馈模型，实时计算氨、联氨投加比；PID 控制算法 ($K_p=1.25$ 、 $K_i=0.12$ 、 $K_d=0.05$) 自动调整加药泵流量，使 pH 稳定在 $8.8 \sim 9.2$ ，溶解氧维持 $< 0.010 \text{ mg/L}$ ；与人工操作相比，自动响应时间缩短 80%，短时腐蚀抑制效率提高 43%。

3. 趋势预警层：应用动态阈值探测算法，对铁离子增长速率 ($d[\text{Fe}^{2+}]/dt$) 实时计算滑动平均；当速率 $> 0.5 \mu\text{g/L} \cdot \text{min}$ 时自动发出黄色预警，并在 DCS 与手机端同步提示。

实际运行数据显示，事件响应时间由 0.67 小时 缩短至 0.17 小时 ，腐蚀事件提前干预率提升 71%^[5]。

4 结束语

本研究基于化学仪表的精确测量技术，构建了集实时监测、腐蚀速率定量评估、智能预警和数字孪生于一体的综合评价体系，实现了亚临界机组水汽循环系统腐蚀管理从“滞后判断”向“实时感知—动态预测—主动调控”的转变。研究成果表明，该体系不仅提升了腐蚀监测的精细化水平，也为设备健康管理、节能降耗和机组安全稳定运行提供了强有力的技术支撑。随着火电行业数字化、智能化进程的持续推进，该体系具有广泛的推广应用前景，对推进火电机组运维的高质量发展具有重要意义。

参考文献：

- [1] 孙跃禹, 金昌盛, 郑淇元. 水汽品质监督在线检测管理系统在亚临界机组中的应用 [C]//中国电力技术市场协会. 2025 年 (第九届) 发电行业水处理技术研讨会论文集. 黑龙江华电齐齐哈尔热电有限公司, 2025.
- [2] 王华阳, 姚喜亮, 王峰, 等. 某电厂 1000MW 超超临界机组水汽系统氢电导率异常原因分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(10):53-56.
- [3] 张文帅, 白鸿斌, 姚海宝, 等. 超超临界机组水汽异常排查及腐蚀机理探究 [J]. 盐科学与化工, 2023, 52(06):46-51.
- [4] 李晨. 600MW 火电机组凝结水精处理系统氯离子超标原因分析及解决方法 [C]//中国电力技术市场协会. 2022 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集. 中电华创电力技术研究有限公司, 2022.
- [5] 李少杰, 谈群兴. 超超临界机组水汽质量控制研究 [J]. 南方能源建设, 2021, 08(03):109-113.