

深度调峰工况下火电厂热力设备腐蚀行为预测模型研究

赵小娇

黄陵矿业集团有限公司, 陕西 延安 716000

DOI:10.61369/ME.2026020035

摘 要 : 随着火电机组深度调峰的常态化, 热力参数波动大, 设备腐蚀问题日益突出。针对传统静态预测模型在变工况条件下准确性不足的问题, 本文分析调峰过程中多参数耦合作用机理, 建立基于机理分析和支持向量回归 (SVR) 的动态预报模型, 提取温度、压强等特征构建预测框架。应用实践表明, 本研究的成果可为电厂优化水质调控策略、延缓设备寿命损失提供可靠技术支持。

关 键 词 : 深度调峰; 火电厂; 热力设备; 腐蚀预测; 数学模型

Research on Corrosion Behavior Prediction Models for Thermal Equipment in Thermal Power Plants Under Deep Peak Shaving Conditions

Zhao Xiaojiao

Huangling Mining Group Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000

Abstract : With the normalization of deep peak shaving in thermal power units, significant fluctuations in thermal parameters have led to increasingly prominent equipment corrosion issues. Addressing the inaccuracies of traditional static prediction models under variable operating conditions, this study analyzes the multi-parameter coupling mechanisms during peak shaving. A dynamic forecasting model based on mechanism analysis and Support Vector Regression (SVR) is established, incorporating features such as temperature and pressure to construct the prediction framework. Practical application demonstrates that the findings provide reliable technical support for optimizing water quality control strategies and delaying equipment life loss in power plants.

Keywords : deep peak shaving; thermal power plant; thermal equipment; corrosion prediction; mathematical model

随着“双碳”战略的实施, 以风电、光伏为代表的间歇性新能源大规模接入电网, 对电网调峰能力提出了严峻挑战。大型火电机组作为电网的基础支撑电源, 必然要频繁地进行深度调峰。在深度调峰条件下, 机组负荷往往需要在超低负荷和额定负荷间快速切换^[1]。大范围高频率变工况完全打破了热力设备原有稳定的服役环境。蒸汽系统内流体工况随负荷变化而发生剧烈变化, 致使管内壁面临复杂应力交变和水化学环境退化, 极易引发流动加速腐蚀、应力腐蚀等多种损伤形式^[2]。长期以来, 火电厂热力设备的腐蚀监测主要依靠离线水质检测和定期停机监测, 缺乏对运行工况变化的实时追踪能力。已有腐蚀预测模型多基于稳态负荷下的经验公式, 很难准确反映深度调峰过程中参数剧烈波动引起的腐蚀率非线性激增现象。因此, 探索热力设备在变负荷工况下的腐蚀演化规律, 建立高精度动态预报模型, 是保障火电机组安全、经济运行的迫切需求。

一、深度调峰期热力系统运行特性

(一) 关键热力参数动态响应特征

当火电机组执行深度调峰命令时, 锅炉的燃烧率、进汽量和给水泵的转速都会发生较大的变化。这一系统的调整直接导致了给水与蒸汽在温压、流量等方面的强烈动态响应。在降低负荷时, 主蒸汽压力、温度急剧下降, 给水量也随之急剧下降。受系统热惯性的影响, 管壁温度下降速度往往滞后于流体降温速度, 厚壁构件内壁不可避免地产生剧烈的瞬态热应力^[3]。在变工况条

件下, 管壁瞬态热应力可用以下公式近似计算:

$$\sigma = \frac{E\alpha\Delta T}{1-\nu} f(Bi, Fo) \quad (1)$$

其中, E 是金属材料的弹性模量; ΔT 为管道内、外瞬态温度差; $f(Bi, Fo)$ 为含毕奥数 (Bi) 和傅里叶数 (Fo) 的瞬态热传导修正函数; α 为金属的线膨胀系数; ν 为泊松比。这种交变的热应力不仅导致了金属的疲劳, 而且也破坏了已有的钝化保护层。同时, 管内流体雷诺数随工质流动速度的减小而变化, 近壁区边界层厚度增大, 传质阻力增大。在超低负荷运行工况下, 除氧效果

急剧下降，除氧器进水压力不足，给水溶解氧浓度容易发生超限波动。

（二）气液两相流态演变规律与传质模型

除单相流体参数波动之外，深度调峰还容易诱发局部管网内气-液两相流动形态发生突变。尤其是低压加热器疏水管和省煤器入口段，由于负荷骤降引起的系统压力骤降，导致局部工质闪蒸，形成高速汽液两相流动。在弯头、三通和节流孔板等局部阻力部位，将产生强烈的冲刷和剥离效应。在交变切应力与汽泡溃灭微射流的共同作用下，原本致密的四氧化三铁保护膜迅速破碎、剥落^[4]。

在流动加速腐蚀（FAC）过程中，金属基体材料的损失速率主要由界面质量传递过程决定，其传质速率可用基本方程来描述：

$$J = K(C_{eq} - C_b) \quad (2)$$

其中，J是腐蚀产物在金属表面的溶质通量；K是传质系数，它的大小与当地流速以及变负荷过程中的流体形态有关； C_{eq} 为铁离子在不同水化学条件（如pH、温度等）下的平衡溶解度； C_b 为铁离子在主流体中的浓度。调峰工况下，两相流强化使传质系数呈现非线性骤升，引起传质通量急剧增加，加剧设备局部减薄。此外，当系统停机备用或极低负荷运行时，易形成局部汽-水滞留区，微缝隙及沉积物下易富集氯离子等侵蚀性阴离子，是腐蚀与点蚀孕育的温床。

二、腐蚀行为预测模型构建

（一）多参量耦合机制分析

深度调峰环境下热力设备腐蚀问题是热力学、流体力学和电化学等多学科耦合的复杂动力学系统。为建立准确的腐蚀预测模型，首先需要提取影响腐蚀速率的核心特征参数。水化学参数中，pH值直接决定上述公式中平衡溶解度的大小，溶解氧浓度对氧化膜的孔隙率及致密性有影响；流体力学参数中，速度和几何形状对传质系数的影响是加剧腐蚀的重要因素。其次，引入温度变化率和压力波动方差等表征瞬态载荷特性参数，量化热应力对氧化膜力学完整性的损伤作用。构建包含水化学参数、水动力参数和工况瞬态参数的多维特征空间，实现深度调峰条件下复杂腐蚀耦合机理的全面映射。在这种机理下，尽管舍伍德数和雷诺数关联式可用于理论上的逼近，但要适应现场大量非线性操作数据，还需引入先进数据驱动的映射回归算法^[5]。

（二）预测算法核心流程与目标函数

以多参数耦合机理为基础，利用支持向量回归（SVR）算法，建立腐蚀行为预测模型。支持向量回归在处理小样本，高维和非线性回归方面有明显的优越性。其核心是将采集的多源异构运行数据映射到高维特征空间，在此空间中寻找最佳拟合超平面。

给定一个训练样本集 (x_i, y_i) ，其中 x_i 是抽取的多维运行特征向量， y_i 是对应的腐蚀速率。引入惩罚系数和不敏感损失函数构

造优化目标函数：

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*} \frac{1}{2} ||w||^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad (3)$$

约束条件为：

$$y_i - (w^T \phi(x_i) + b) \leq \delta + \xi_i \quad (4)$$

$$(w^T \phi(x_i) + b) - y_i \leq \delta + \xi_i^* \quad (5)$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0 \quad (6)$$

其中， w 是权重向量， b 是偏置项； C 是调整模型复杂程度和拟合误差权重的惩罚系数； δ 给出了不敏感损失函数所允许的误差带半宽； ξ_i 和 ξ_i^* 为松弛变量； $\phi(x_i)$ 是一种非线性映射函数，它把输入数据映射到一个高维空间。

本研究采用径向基（RBF）核函数处理腐蚀速率与各参数的强非线性映射关系。为提高模型在瞬态变工况下的泛化能力，采用滑动时间窗口技术，以历史时刻的参数变化梯度作为时序特征输入模型，实现模型对迟滞效应的记忆功能。如图1所示，整个预测算法的数据流转、模型训练和参数优化的预测结果可直接映射到某一临界管段上等效腐蚀减薄率，为后续寿命评价提供定量指标。

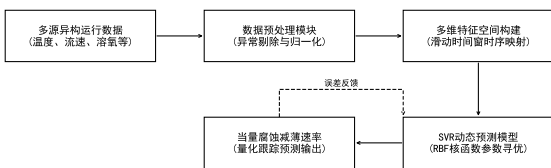


图1 腐蚀动态预测模型算法流程

三、模型应用验证评估

（一）预测结果准确性对比

以某600 MW超超临界火电机组为例，通过连续一个月的深度调峰试验，对所建模型进行验证。在这段时间里，机组多次经历了由满负荷到30%的深度调峰周期。将预处理数据输入训练好的预测模型中，获得对应时间序列的腐蚀速率预测值，并与现场高频超声测厚探头获取的实测结果进行对比分析。以均方根误差和平均绝对误差为评价指标，通过横向比较建立的支持向量回归动态预测模型与传统的静态多元线性回归模型，具体误差统计见表1。

表1 不同预测模型在深度调峰工况下的误差对比

模型类型	均方根误差 (mm/a)	平均绝对误差 (mm/a)	决定系数 (R2)
传统静态多元线性回归模型	0.086	0.065	0.76
支持向量回归动态预测模型	0.021	0.015	0.94

当负荷剧烈波动时，传统静态模型的预测残差明显增大，决定系数只有0.76，基本丧失了对变工况条件下瞬时腐蚀的跟踪能力。本文动态预测模型使均方根误差降至0.021 mm/a，决定系数

达到0.94，融合时变梯度和多参数耦合作用机理的预测模型，能极灵敏地捕捉负荷瞬变引起的水化学劣化和流场畸变信号，实现深调峰工况下异常腐蚀波动的精确锁定和定量预测。

（二）防腐控制优化阈值

通过对模型的高精度验证，可用于指导实际操作中的防腐蚀控制。模型内特性灵敏度分析表明，在机组快速降负荷阶段，溶解氧控制偏差是腐蚀增量最大的因素。通过对模型参数进行迭代仿真，得到不同降负荷率条件下除氧器运行压力和供氧量之间的动态匹配阈值。在超低负荷（小于40%）条件下，预先进行微量增氧干预，辅以精准 pH 调控，可有效抑制钝化膜在流体冲刷下的溶解破裂趋势。利用该模型输出的实时预报数据，可使操作人员摆脱过去人工调节水质的滞后性，建立起一种前馈控制策略。该方法不仅能有效抑制深调峰过程中出现的尖峰异常腐蚀现象，还能大幅度减少化学药剂的无效投药量。

四、结语

深度调峰使火电设备服役边界发生根本性变化，频繁的工况瞬态导致复杂的传质加速和机械损伤耦合作用。本文突破传统状态评估方法的局限性，建立基于支持向量回归的腐蚀动态预测模型，采用高维非线性映射的方法，捕捉热力学参数响应时序特性，实现对超低负荷、快变载荷工况的高精度跟踪，挖掘诱发腐蚀灾变的关键因素。这一模型可为我国新型电力系统柔性调峰和设备安全运行提供一条可行的智能化技术途径。

参考文献

- [1] 刘碧燕, 李栋, 刘娅莉, 等. 海上风电腐蚀防护与监测技术综述 [J]. 材料保护, 2025, 58(12): 22-32.
- [2] 周京学, 王海超. 燃煤电厂基建阶段腐蚀防护前沿技术研究 [J]. 吉林电力, 2025, 53(06): 17-20.
- [3] 何成; 游溢; 王宗江; 黄路遥; 张强; 陈云; 卢壹梁; 杨丙坤; 王晓芳. 电网碳钢材料腐蚀预测模型研究 [J]. 装备环境工程, 2025(02).
- [4] 陈文飞, 李进, 陈虎, 等. 基于 AI 的石化设备损伤精准识别及预测技术探索 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(S1): 1-6.
- [5] 李嘉轩, 孙庆峰, 刘瀚宇, 等. 基于机器学习的 H₂S/CO₂ 耦合腐蚀速率预测 [J]. 炼油与化工, 2025, 36(06): 37-44.