

# Risk Prediction and Prevention Strategies for Low-Temperature Corrosion in Boiler Tail Flue

Kunlong Qin

State Grid Energy Xinjiang Zhundong Coal Power Co., Ltd., Zhundong, Xinjiang, 831100, China

## Abstract

Low-temperature corrosion in boiler tail flue is a critical issue constraining safe and efficient boiler operation. It primarily occurs when acidic media such as  $\text{SO}_3$  generated from sulfur-containing fuel combustion combine with water vapor, condensing when the tube wall temperature falls below the dew point. Factors like fly ash erosion and load fluctuations further exacerbate corrosion. To precisely mitigate this risk, risk prediction can be achieved through dew point calculation, online monitoring modeling, and condition correlation analysis. Multi-faceted prevention strategies should be formulated based on actual operational needs: optimizing combustion and flue gas conditions to reduce acidic media generation, enhancing tube wall temperature through structural design, operational adjustments, and heat tracing insulation, selecting corrosion-resistant materials and anti-corrosion coatings to strengthen equipment protection, while strengthening operation and maintenance monitoring and emergency response. This paper systematically elucidates the causative mechanisms, prediction methods, and prevention pathways for low-temperature corrosion, providing technical references for reducing equipment wear and ensuring stable unit operation, thereby contributing to the green and low-carbon development of the energy and power industry.

## Keywords

boiler; flue; low temperature corrosion

## 锅炉尾部烟道低温腐蚀风险预测与防控策略

秦坤龙

国网能源新疆准东煤电有限公司, 中国·新疆 准东 831100

## 摘要

锅炉尾部烟道低温腐蚀是制约锅炉安全高效运行的关键问题, 主要由含硫燃料燃烧生成的  $\text{SO}_3$  等酸性介质与水蒸气结合, 在管壁温度低于露点时凝结引发, 飞灰冲刷、负荷波动等因素会进一步加剧腐蚀。为精准防控该风险, 可通过露点计算、在线监测建模、工况关联分析等方法实现风险预测, 结合实际运行需求制定多元防控策略: 优化燃烧与烟气工况以减少酸性介质生成, 通过结构设计、运行调节及伴热保温提升管壁温度, 选用耐蚀材料与防腐涂层强化设备防护, 同时加强运维监测与应急处置。本文系统阐述低温腐蚀的成因机理、预测方法与防控路径, 为降低设备损耗、保障机组稳定运行提供技术参考, 助力能源电力行业绿色低碳发展。

## 关键词

锅炉; 烟道; 低温腐蚀

## 1 引言

锅炉尾部烟道作为烟气余热回收的核心区域, 涵盖省煤器、空气预热器等关键设备, 其运行状态直接影响锅炉的热效率与使用寿命。低温腐蚀是该区域最突出的失效风险之一, 主要由烟气中酸性介质凝结引发, 会导致设备管壁变薄、泄漏甚至断裂, 不仅增加检修成本、影响机组正常运行, 还可能引发安全事故。因此, 精准预测低温腐蚀风险并采取有效防控措施, 对保障锅炉长期稳定运行、降低能耗损失具有重要现实意义。

【作者简介】秦坤龙(1992-), 男, 中国河南沈丘人, 本科, 技术员, 从事火力发电研究。

## 2 锅炉尾部烟道低温腐蚀的成因机理

低温腐蚀的本质是酸性介质与金属材料的化学反应, 其发生需满足“酸性物质生成”与“壁面温度低于露点”两个核心条件:

酸性介质的生成: 燃料燃烧过程中, 煤、油等含硫燃料会产生  $\text{SO}_2$ , 部分  $\text{SO}_2$  在催化剂(如金属氧化物)作用下进一步氧化生成  $\text{SO}_3$ ;  $\text{SO}_3$  与烟气中的水蒸气结合形成  $\text{H}_2\text{SO}_4$  蒸汽, 此外烟气中还可能存在  $\text{HCl}$  等其他酸性气体, 共同构成腐蚀介质。

露点腐蚀的触发: 当锅炉尾部烟道管壁温度低于酸性蒸汽的露点温度(主要是  $\text{H}_2\text{SO}_4$  露点, 通常在  $120\text{-}160^\circ\text{C}$  之间, 远高于水露点)时, 酸性蒸汽会在管壁表面凝结形成酸

性液膜,对金属材料(如碳钢、低合金钢)产生强烈的电化学反应与化学腐蚀,导致管壁逐渐腐蚀减薄。

腐蚀加剧因素:烟气中飞灰的冲刷会破坏管壁表面的氧化膜,加速腐蚀进程;机组启停频繁、负荷波动大时,管壁温度反复变化,易导致酸性液膜积累与应力腐蚀;燃料含硫量过高、空气过量系数不合理等燃烧工况,会进一步增加酸性介质浓度,提升腐蚀速率。

### 3 低温腐蚀风险的预测方法

#### 3.1 基于机理的露点计算预测

通过热力学公式计算烟气中  $H_2SO_4$  露点温度,结合尾部烟道各部位实际壁温,判断腐蚀风险等级:

核心参数采集:收集燃料含硫量、燃烧空气过量系数、烟气湿度、烟道各段烟温与壁温等数据;

露点温度计算:采用经验公式(如奥氏公式)计算  $H_2SO_4$  露点,公式为:  $t_d = 106.2 + 23.8 \times \lg(SO_3 \text{ 浓度}) - 2.5 \times \lg(\text{烟气总压})$ ,其中  $SO_3$  浓度可通过燃料含硫量与转化率估算;

风险判定标准:当壁温低于计算露点温度  $5^\circ C$  以上时,判定为高腐蚀风险;壁温在露点温度  $\pm 5^\circ C$  范围内为中腐蚀风险;壁温高于露点温度  $5^\circ C$  以上为低腐蚀风险。

#### 3.2 基于监测数据的趋势预测

在线监测指标:通过安装腐蚀传感器(如电阻式、电感式腐蚀探针)实时监测管壁腐蚀速率;利用烟气分析仪连续检测  $SO_2$ 、 $SO_3$ 、 $HCl$  等酸性气体浓度;通过温度传感器实时采集管壁温度与烟温;

数据建模分析:基于历史监测数据,建立腐蚀速率与酸性气体浓度、壁温、运行负荷等因素的多元回归模型,通过机器学习算法(如 BP 神经网络)预测不同运行工况下的腐蚀风险趋势;

预警阈值设定:根据设备材质耐蚀性能与检修周期,设定腐蚀速率预警阈值(如碳钢设备预警阈值设为  $0.1\text{mm/a}$ ),当预测值超过阈值时及时发出预警。

#### 3.3 基于经验的工况关联预测

结合锅炉长期运行经验,总结高腐蚀风险工况:

燃料含硫量  $> 2\%$  且未采取脱硫措施时;

空气预热器冷端壁温长期低于  $120^\circ C$  时;

机组低负荷运行(负荷  $< 60\%$  额定负荷)且烟气挡板调节不当导致局部烟温过低时;

脱硫系统故障导致烟气中  $SO_3$  排放超标时。针对上述工况,可直接判定为高腐蚀风险,提前启动防控措施。

### 4 低温腐蚀的防控策略

低温腐蚀的本质是酸性介质(主要为  $H_2SO_4$ ) 在尾部受热面凝结引发的电化学反应与化学腐蚀叠加效应,防控需围绕“减少酸性介质生成、避免凝结条件形成、强化设备耐蚀能力、动态监测预警”四大核心目标,构建全流程、

多层次的防控体系。

#### 4.1 优化燃烧与烟气工况,减少酸性介质生成

酸性介质的生成量与燃料含硫量、燃烧工况及烟气处理效率直接相关,需通过源头控制与过程优化实现精准管控。

燃料硫分管控:优先选用低硫煤(含硫量  $< 1\%$ , 优选  $\leq 0.7\%$  的优质动力煤),从源头减少  $SO_2$  生成基数;对于高硫煤必须采用预处理技术,物理洗选可去除煤炭中  $40\%-70\%$  的无机硫,化学脱硫(如石灰石-石膏法预处理、微波脱硫)可将总硫含量降至  $1\%$  以下,尤其适用于硫分  $> 3\%$  的高硫劣质煤。同时建立燃料入厂检验机制,采用 X 射线荧光硫分析仪实时检测硫分,严禁超标燃料入炉。

燃烧工况优化:空气过量系数是影响  $SO_2$  向  $SO_3$  转化的关键参数,需根据燃料特性(挥发分、发热量)动态调整,一般维持在  $1.1-1.2$ ,避免局部区域过量空气系数  $> 1.3$  导致的高温氧化环境——当火焰中心温度超过  $1300^\circ C$  时,  $SO_2$  氧化率会显著上升,因此需通过调整燃烧器摆角、优化配风方式(分级配风、浓淡燃烧)控制火焰中心高度,降低局部高温区占比。同步采用低氮燃烧技术(如空气分级燃烧、燃料分级燃烧、烟气再循环),在减少  $NO_x$  生成(降低  $30\%-60\%$ )的同时,利用还原性气氛抑制  $SO_2$  氧化,使  $SO_3$  转化率降低  $15\%-25\%$ 。此外,定期清理燃烧器喷口积灰,避免气流偏斜导致的局部燃烧不完全与过度氧化。

烟气深度处理:配套高效湿法脱硫系统,优先采用石灰石,通过优化吸收塔浆液 pH 值(维持在  $5.0-5.8$ )、液气比 ( $15-25 \text{ L/m}^3$ )、浆液喷淋密度,确保  $SO_2$  去除率  $> 95\%$ ,出口浓度  $\leq 35 \text{ mg/Nm}^3$ ;对于环保要求严格的区域,可增设湿式电除尘器或脱硫增效装置,进一步去除  $SO_3$  (去除率  $> 80\%$ )。采用 SCR 脱硝技术时,需严格控制反应温度在  $300-400^\circ C$  (避免低于  $280^\circ C$  或高于  $420^\circ C$ ),选择低  $SO_2$  氧化活性的催化剂(如  $V_2O_5-WO_3/TiO_2$  体系,  $V_2O_5$  含量控制在  $1\%-3\%$ ),并定期检测催化剂活性(通过氨逃逸率、脱硝效率反向推算),当活性下降超过  $30\%$  时及时再生或更换,防止催化剂过度催化  $SO_2$  氧化(避免  $SO_3$  生成量增加  $20\%$  以上)。

#### 4.2 提升管壁温度,避免酸性介质凝结

管壁温度低于烟气露点是酸性介质凝结的必要条件,需通过结构优化、运行调节与伴热保温等手段,确保管壁温度始终高于露点温度,从根本上消除凝结腐蚀的环境基础。

设备结构优化:对于回转式空气预热器,冷端蓄热元件采用“双波形+大换热面积”设计,换热面积较传统设计增加  $15\%-20\%$ ,提升换热效率的同时降低壁温降幅;设置“冷端旁路”系统,当机组负荷低于  $50\%$  额定负荷时,自动切换旁路,减少冷空气与蓄热元件的换热,使冷端壁温提升  $8-15^\circ C$ 。对于管式空气预热器,可采用多级布置,将低温段与高温段分离,通过调整管排间距减少烟气滞留,避

免局部壁温过低。省煤器采用顺流或逆流-顺流混合布置,优化管程与壳程流速,减少管壁结露风险。

运行方式调节:机组低负荷(<60%额定负荷)运行时,启动热风再循环系统,将空气预热器出口热风抽出20%-30%返回入口,提升冷空气初始温度,使管壁温度升高5-10℃;同时适当降低烟气流量(通过调整引风机转速),减少换热强度,避免壁温过度下降。严格控制机组低负荷运行时长,单次连续低负荷运行不超过72小时,必要时通过调整负荷曲线(如峰谷调节)避开长期低烟温工况。此外,定期吹灰(采用蒸汽吹灰或声波吹灰),清除管壁积灰,避免积灰导致的“搭桥”现象,确保换热效率,维持管壁温度稳定。

伴热保温强化:在尾部烟道冷端、省煤器低温段、空气预热器冷端等关键部位(露点温度通常为105-130℃),加装电伴热装置(功率密度20-30 W/m<sup>2</sup>)或蒸汽伴热盘管(蒸汽压力0.3-0.5 MPa),采用温度自动控制系统,确保壁温始终高于露点温度5-10℃,偏差不超过±2℃。保温层采用硅酸铝纤维或岩棉材料,厚度≥80 mm,外护板采用彩钢板密封,避免空气泄漏导致的局部降温;定期检测保温层完好性,修补破损部位,防止“冷桥”效应引发的局部腐蚀。

#### 4.3 选用耐蚀材料与防腐涂层

针对尾部受热面恶劣的腐蚀环境,通过材料升级与表面防护,提升设备本身的抗腐蚀能力,延长使用寿命。

关键部位材料升级:空气预热器冷端蓄热元件优先选用ND钢(09CrCuSb),其耐硫酸腐蚀性能是普通碳钢的5-8倍,适用于露点温度≤130℃的工况;对于高硫燃料或露点温度>130℃的场景,选用钛合金(TA2)或哈氏合金(C-276),耐蚀性提升10-15倍,但需考虑成本控制,可采用“局部升级”策略(仅冷端最易腐蚀区域使用高端合金)。省煤器低温段管束选用09CrCuSb耐酸钢,替代传统20G碳钢,其含有的Cu、Sb元素可在表面形成致密的氧化膜,抑制腐蚀反应;对于腐蚀严重区域,可采用双相钢(2205)或超级奥氏体不锈钢(904L),进一步提升耐蚀等级。烟道壳体及法兰连接处采用耐蚀钢板(如Q235NH),避免壳体腐蚀导致的烟气泄漏。

表面防腐涂层处理:对于现有碳钢设备,采用表面喷涂防腐涂层形成隔离屏障,阻止酸性介质与金属基体接触。常用涂层一般适用这些,①聚四氟乙烯涂层(PTFE),耐酸温度≤200℃,适用于省煤器低温段,涂层厚度50-80 μm,附着力≥5 MPa;②陶瓷涂层(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>),耐温可达800℃,硬度HV≥800,适用于空气预热器蓄热元件,采用等离子喷涂工艺,涂层厚度100-150 μm;③玻璃鳞片涂层(乙烯基树脂基),耐酸、耐磨性能优异,适用于烟道内壁及法兰密封面,涂层厚度200-300 μm,可在常温下施

工。建立涂层定期检测机制,每6个月采用超声波测厚仪检测涂层厚度,通过电火花检测仪(电压10-30 kV)排查针孔、破损,发现问题及时修补,避免“点腐蚀”扩大。

#### 4.4 加强设备运维与监测

定期检修维护,每年停机检修时,对尾部烟道、省煤器、空气预热器等设备进行腐蚀检测(如超声波测厚、内窥镜检查),及时更换腐蚀减薄超标的管壁与元件;清理设备内部积灰,避免飞灰冲刷加剧腐蚀;

完善监测系统,在尾部烟道关键部位增设腐蚀探针、温度传感器与烟气分析仪,实现腐蚀速率、酸性气体浓度、壁温等参数的实时监测;建立监测数据台账,定期分析腐蚀趋势,优化防控策略;

制定应急预案,针对脱硫脱硝系统故障、燃料含硫量突变等突发情况,制定应急处置方案,如紧急切换低硫燃料、调整运行负荷、启动伴热装置等,避免腐蚀风险加剧。

## 5 结语

锅炉尾部烟道低温腐蚀是多因素共同作用的复杂问题,其防控需坚持“预防为主、综合治理”的原则。通过精准预测腐蚀风险,结合燃烧优化、温度调控、材料升级与运维强化等多元防控策略,可有效降低低温腐蚀发生率,延长设备使用寿命,保障锅炉机组安全、高效、经济运行。未来,随着智能化监测技术与新型耐蚀材料的发展,低温腐蚀防控将朝着精准化、智能化、长效化方向迈进,为能源电力行业的绿色低碳发展提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 超临界锅炉尾部烟道振动分析及治理[J]. 李有信. 华电技术, 2017(10)
- [2] 锅炉尾部烟道振动原因分析及处理[J]. 楼杰; 蒋建伟. 四川电力技术, 2012(04)
- [3] 卡门涡流对电站锅炉安全性的影响及治理措施[J]. 董琨. 热力发电, 2008(10)
- [4] 大型火电锅炉尾部烟道积灰引发振动机理及清洗治理研究. 李鹏; 吴金国; 程雁; 刘希洲; 史建. 清洗世界, 2025(10)
- [5] 电厂锅炉尾部烟道飞灰特性及解堵思路. 刘红林; 李越. 中国科技论文在线精品论文, 2025(02)
- [6] 一种基于时序信息模型的循环流化床机组床压预测方法[P]. 高明明; 谌际宇; 于浩洋; 刘博通; 郭炯楠; 王志强; 刘晓龙; 毅力骑; 岳光溪. 华北电力大学; 北方联合电力有限责任公司呼和浩特金桥热电厂; 清华大学. 2025 [6] 循环流化床烟气脱硫在火电厂中的应用. 宋柳昱; 王丹; 秦九义. 新疆钢铁2025年科技工作者学术交流论文集, 2025
- [7] 降低锅炉尾部烟道受热面磨损速度的措施. 丰月明; 郝泽华. 2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集(下册), 2023