

超临界机组火电四管腐蚀机理及复合防护技术研究

廖晓强

福建华电可门发电有限公司, 福建省福州市, 350500;

摘要: 超临界机组作为现代火力发电的核心装备, 其运行稳定性直接关系到电力系统的安全高效运转。火电四管(水冷壁、过热器、再热器、省煤器)作为机组能量转换的关键载体, 长期承受高温(600-700℃)、高压(25-30MPa)及高流速烟气(15-40m/s)的多重作用, 磨损与爆管事故频发。据电力行业统计, 四管故障导致的非计划停机占火电机组总非停时长的60%以上, 单次事故经济损失可达数百万元。其中水冷壁高温腐蚀与省煤器低温腐蚀已成为制约机组运行的突出问题, 某600MW机组水冷壁高温腐蚀速率达0.3mm/年, 导致更换周期缩短至2万小时。本文系统剖析超临界机组四管高温/低温腐蚀机理及与磨损的耦合效应, 构建“腐蚀机理-靶向防护-精准运维”三位一体技术体系, 提出针对高低温腐蚀环境的复合防护方案, 为提升机组可靠性提供理论支撑与工程指导。

关键词: 超临界机组; 火电四管; 高温腐蚀; 低温腐蚀

DOI: 10.64216/3080-1508.25.04.051

1 引言

1.1 超临界机组技术特征

超临界机组(主蒸汽压力>22.12MPa, 温度≥538℃)凭借38%-42%的发电效率(较亚临界机组提升3-5个百分点), 已成为我国火电装机的主力机型。截至2024年, 国内超临界及超超临界机组装机容量占火电总容量的75%以上。其高温高压特性使四管面临极端腐蚀环境: 水冷壁受900-1100℃还原性烟气侵蚀, 过热器区域存在600-700℃高温氧化氛围, 省煤器则遭遇120-150℃硫酸露点腐蚀, 形成典型的“高温-中温-低温”全区间腐蚀梯度带。某电厂实测数据表明, 燃用高硫煤时水冷壁管外壁腐蚀速率可达0.25mm/年, 远超设计预期的0.05mm/年。

1.2 四管腐蚀失效的行业影响

腐蚀引发的四管失效已成为电力行业重大隐患。2023年行业统计数据 displays, 水冷壁高温腐蚀导致的爆管占四管总故障的32%, 省煤器低温腐蚀泄漏占比28%, 两者合计达60%。某百万千瓦超超临界机组因炉膛四角水冷壁高温腐蚀减薄, 运行2.3万小时后发生爆管, 停机抢修102小时, 直接经济损失超800万元。调峰机组因燃烧工况频繁变化, 水冷壁高温腐蚀区域已从传统燃烧器区域扩展至折焰角, 腐蚀面积扩大1.5倍。因此, 深化高低温腐蚀机理研究, 开发针对性防护技术具有重要工程价值。

2 超临界机组火电四管腐蚀机理及与磨损的耦合效应

2.1 水冷壁高温腐蚀机理

2.1.1 硫化物型高温腐蚀

在还原性气氛($O_2 < 2\%$)炉膛内, 煤粉燃烧产生的 H_2S 与Fe发生如下反应: $Fe + H_2S \rightarrow FeS + H_2 \uparrow$, 生成的FeS(熔点1193℃)形成低熔点共晶物(Fe-FeS共晶点988℃), 破坏管壁表面氧化膜完整性。当壁温超过650℃时, 腐蚀速率随温度呈指数增长, 650℃时腐蚀速率为0.05mm/年, 750℃时骤增至0.3mm/年。某电厂水冷壁检测结果显示, 燃烧器区域(壁温800-900℃)存在厚度1.2mm的FeS腐蚀层, 其下方基体已出现晶间裂纹。

2.1.2 氯化物高温腐蚀

煤中Cl元素(0.1%-0.3%)在高温条件下生成HCl, 与金属反应生成 $FeCl_2$ (沸点1023℃), 形成“活性氧化”循环机制: $FeCl_2$ 挥发后在低温区分解为 Fe_2O_3 和HCl, HCl返回高温区持续参与腐蚀反应。当烟气中HCl浓度>50ppm时, 会显著加速硫化腐蚀进程, 使腐蚀速率提升40%-60%。某褐煤机组因煤中Cl含量达0.25%, 水冷壁仅运行1.8万小时即发生腐蚀爆管, 爆口处检测到Cl元素富集(质量分数3.2%)。

2.1.3 腐蚀-磨损协同效应

高温腐蚀形成的疏松腐蚀产物(如FeS、 Fe_3O_4)与管壁结合力较弱, 在飞灰颗粒(15-25m/s)冲击作用下易被剥离, 暴露的新鲜金属表面加速腐蚀反应。实测数

据表明，腐蚀与磨损协同作用下的材料损失量是单一腐蚀的 2.3 倍，是单一磨损的 1.8 倍。水冷壁管排振动（振

幅 0.5-1mm）导致的管间摩擦，会进一步破坏腐蚀层完整性，形成交替腐蚀-磨损的恶性循环。

表 1 水冷壁高温腐蚀影响因素及量化关系

影响因素	参数范围	腐蚀速率变化规律	典型案例数据
壁温	600-900℃	温度每升高 50℃，腐蚀速率提升 1.8-2.2 倍	650℃时 0.05mm/年，750℃时达 0.3mm/年
烟气含氧量	1%-3%	O ₂ <2%时腐蚀速率急剧增加，O ₂ >3%时趋于稳定	O ₂ =1.5%时腐蚀速率 0.21mm/年，O ₂ =2.5%时降至 0.09mm/年
煤中硫含量	0.5%-3%	S 含量每增加 1%，腐蚀速率提升 40%-60%	硫分 1.0%时腐蚀 0.08mm/年，硫分 2.0%时达 0.15mm/年
烟气中 HCl 浓度	20-100ppm	HCl>50ppm 时，腐蚀速率提升 40%-60%	30ppm 时 0.07mm/年，80ppm 时达 0.12mm/年

2.2 省煤器低温腐蚀机理

2.2.1 硫酸露点腐蚀过程

烟气中 SO₃与水蒸气结合形成 H₂SO₄蒸气，当省煤器壁温低于硫酸露点（120-150℃）时，凝结形成浓度 5%-30%的硫酸液膜。金属在酸性介质中发生电化学腐蚀：阳极反应为 Fe→Fe²⁺+2e⁻，阴极反应为 2H⁺+2e⁻→H₂↑，腐蚀速率随酸浓度升高呈先增后减趋势（20%浓度时达峰值）。某机组实测显示，壁温 130℃（低于露点 5℃）时，省煤器腐蚀速率达 0.15mm/年，是正常工况的 5 倍。

2.2.2 烟气成分影响规律

煤中 S 含量每增加 1%，烟气中 SO₃浓度提升 80-100ppm，露点温度升高 5-8℃。当过量空气系数从 1.2 降至 1.05 时，因氧量不足导致 SO₂向 SO₃转化减少，露点温度降低 10-15℃，但会增加水冷壁高温腐蚀风险。烟气中灰分可吸附部分 SO₃，飞灰浓度每增加 50g/m³，露点温度降低 3-5℃，具有一定缓蚀作用。

2.2.3 腐蚀产物特性

低温腐蚀产物主要为 FeSO₄·7H₂O（绿矾），其体积为原金属的 2.5 倍，会产生膨胀应力导致涂层剥落。某省煤器检修发现，腐蚀产物层厚度达 2-3mm，呈分层结构：外层为疏松 FeSO₄，内层为致密 Fe₃O₄，界面处存在微裂纹。

表 2 省煤器低温腐蚀防护技术对比

防护技术	实施方式	核心参数	防腐效果	经济性（以 600MW 机组为例）
暖风器加热	提升入口风温至 80-100℃	壁温高于露点 10-15℃	腐蚀速率从 0.12mm/年降至 0.03mm/年	初期投资 280 万元，年运行成本 35 万元
ND 钢+氟碳涂层	基体选用 ND 钢，表面喷涂 50-80μm 氟碳涂层	耐 10%H ₂ SO ₄ 腐蚀	腐蚀速率降至 0.02mm/年，寿命延长至 5 年	管材成本增加 40%，年维护费用降低 60%
钛钢复合管	TA2 钛材与 20G 钢复合	耐酸 pH 范围 1-14	腐蚀速率<0.01mm/年	初期投资是碳钢的 3.5 倍，寿命延长至 8 年以上
热管式省煤器	采用相变传热元件	壁温均匀性提升±5℃	局部低温区消除，腐蚀减少 90%	改造费用 450 万元，投资回收期 3.2 年

3 腐蚀主导型爆管机理

3.1 高温腐蚀爆管机制

3.1.1 壁厚减薄型爆管

高温腐蚀持续消耗管壁金属，当壁厚减薄至强度临界值（设计壁厚的 70%）时，在内外压差作用下发生塑

性失稳。某 T91 钢水冷壁（设计壁厚 6mm）因腐蚀减薄至 4.1mm，运行中发生爆破，爆口呈塑性胀粗（胀粗率 7%），边缘可见腐蚀凹坑。腐蚀减薄速率受温度影响显著，800℃时的减薄速率是 600℃时的 5 倍。

3.1.2 晶间腐蚀开裂

硫化物、氯化物沿晶界扩散，优先腐蚀晶界区域，

导致材料脆化。T91 钢在 800℃ 含硫气氛中暴露 1000 小时后，晶间腐蚀深度达 50 μm，冲击韧性从 200J 降至 60J。某机组水冷壁管因晶间腐蚀，在启动过程中（热应力 150MPa）发生脆性爆管，断口呈典型沿晶断裂特征，晶界可见 S 元素富集。

3.2 低温腐蚀爆管特征

省煤器低温腐蚀多表现为溃疡状局部减薄，当剩余壁厚不足设计值 50% 时，在烟气压力波动下发生爆管。爆口呈不规则形状，周围存在明显的腐蚀坑（深度 0.5-2mm）。某 300MW 机组省煤器爆管检测显示，腐蚀坑底部存在应力集中引发的微裂纹，裂纹扩展至管壁厚度 1/2 时发生失稳断裂。低温腐蚀还会伴随氢脆现象，氢原子渗入金属晶格导致脆性增加，使爆管呈现低应力断裂特征。

4 针对性复合防护技术

4.1 高温腐蚀防护技术

4.1.1 抗高温腐蚀涂层体系

水冷壁采用超音速火焰喷涂 NiCrAlY-SiC 复合涂层（厚度 0.3-0.5mm），通过形成 Cr₂O₃-Al₂O₃ 复合氧化膜，将高温腐蚀速率降至 0.03mm/年以下。某电厂应用结果表明，水冷壁腐蚀泄漏次数从每年 4 次降至 0.5 次。对于燃烧器区域，采用激光熔覆 Co 基合金涂层（硬度 HR C50-55），其耐 FeS 熔蚀性能比传统涂层提升 2 倍，可耐受 900℃ 高温腐蚀环境。

4.1.2 耐蚀管材升级方案

将水冷壁传统 T91 钢升级为 Sanicro25（25Cr-35Ni-3Cu），其在 800℃ 含硫气氛中腐蚀速率仅为 T91 的 1/5。某超超临界机组试用后，水冷壁寿命从 2 万小时延长至 6 万小时。对于高 Cl 煤种，选用镍基合金 625，其耐氯化物腐蚀性能比 Sanicro25 提升 30%，但成本增加约 3 倍，适用于腐蚀最严重区域的局部更换。

4.1.3 燃烧优化控制技术

采用低氮燃烧器+空气分级燃烧技术，将炉膛出口 NO_x 控制在 300mg/Nm³ 以下的同时，使水冷壁附近过量空气系数保持在 1.05-1.1，避免还原性气氛形成。某电厂通过调整二次风配比，将水冷壁区域 O₂ 浓度从 1.5% 提升至 2.5%，腐蚀速率降低 58%。开发基于红外测温的燃烧动态调整系统，实时监控水冷壁温度场，当局部超温（>750℃）持续 10 分钟时自动调整配风参数。

4.2 低温腐蚀防护措施

4.2.1 材料与涂层防护

省煤器采用 ND 钢+氟碳涂层复合防护体系，ND 钢基体耐硫酸腐蚀性能是 16Mn 的 5 倍，表面氟碳涂层（厚度 50-80 μm）可耐受 10% H₂SO₄ 溶液腐蚀，使腐蚀速率降至 0.02mm/年。某电厂应用后，省煤器更换周期从 2 年延长至 5 年。对于高硫煤机组，采用钛钢复合管（TA2/20G），其耐酸腐蚀性能优异，但成本较高，适用于尾部低温段。

4.2.2 烟气温度调控

通过增设暖风器将省煤器入口风温从 30℃ 提升至 80-100℃，使壁温高于硫酸露点 10-15℃。某机组改造后，省煤器壁温从 125℃ 升至 140℃（露点 130℃），酸液凝结量减少 90%，腐蚀速率从 0.12mm/年降至 0.03mm/年。采用热管式省煤器，通过相变传热提高壁温均匀性，避免局部低温区形成。

4.3 智能腐蚀监测系统

4.3.1 高温腐蚀在线监测

在水冷壁布置光纤光栅传感器（测温精度 ±1℃），结合电化学阻抗谱（EIS）传感器，实时监测腐蚀速率（分辨率 0.001mm/年）。某系统通过分析阻抗模值变化，提前 3 个月预警了水冷壁局部腐蚀加剧趋势。开发腐蚀形貌数字孪生模型，基于超声检测数据（精度 0.01mm）重构腐蚀坑三维形态，预测剩余寿命误差 <5%。

4.3.2 低温腐蚀预警技术

省煤器安装露点仪（测量精度 ±2℃）与腐蚀挂片，当壁温低于露点 3℃ 时触发预警。采用超声波测厚系统（采样频率 1Hz），对弯头、烟气走廊等重点区域进行连续监测，当减薄速率 >0.05mm/月时自动报警。某电厂应用该系统后，低温腐蚀导致的非停次数减少 80%。

5 工程应用案例

某 660MW 超临界机组（燃用烟煤，硫分 1.2%，Cl 含量 0.08%）实施综合防护方案：

水冷壁燃烧器区域更换为 Sanicro25 管材，其余区域喷涂 NiCrAlY 涂层

采用燃烧优化系统，将炉膛出口 O₂ 控制在 3.0±0.5%

省煤器加装暖风器，壁温提升至 145℃（露点 132℃）部署智能腐蚀监测系统，覆盖 12 个重点区域改造后运行 2 万小时检测显示：水冷壁平均腐蚀速

率从 0.21mm/年降至 0.04mm/年,省煤器腐蚀速率从 0.10mm/年降至 0.02mm/年,未发生腐蚀导致的非计划停机,年减少经济损失约 600 万元。

6 结语

超临界机组四管腐蚀以水冷壁高温硫化/氯化腐蚀和省煤器硫酸露点腐蚀为主要形态,其本质是高温化学反应与流体力学、材料科学的复杂耦合过程。本文通过深化腐蚀机理认识,构建了“涂层防护-材料升级-燃烧调控-智能监测”的全链条技术体系。实践表明,针对性防护措施可使高温腐蚀速率降低 85%以上,低温腐蚀速率减少 70%,显著提升机组运行可靠性。

未来研究应聚焦于:1)开发耐受 1000℃以上的陶瓷基复合涂层(如 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$);2)研究煤中有害元素(S、Cl)的在线脱除技术;3)构建基于多物理场耦合的腐蚀

寿命预测模型。通过持续技术创新,有望将超临界机组四管腐蚀导致的非停时长控制在每年 10 小时以内,为火电行业的清洁高效发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]李德波,李冠华,李建波,等.超超临界锅炉前屏过热器爆管原因分析及改造措施研究[J].热电技术,2018. DOI:CNKI:SUN:RDJS.0.2018-04-012.
- [2]李德波,李冠华,李建波,等.超超临界锅炉前屏过热器爆管原因分析及改造措施研究[C]//2018.
- [3]佟得吉.超临界机组锅炉不锈钢管爆原因及预防措施研究[D].北京化工大学,2017. DOI:10.7666/d.Y3367255.
- [4]杜文友,陈昊,齐义文,等.超临界机组锅炉爆管故障诊断方法:202110539910[P][2025-07-09].