

燃煤机组脱硫系统腐蚀堵塞问题综合治理技术研究

刘志强

国能宝清煤电化有限公司 黑龙江 双鸭山 155600

摘 要：燃煤机组湿法脱硫系统长期运行中，腐蚀与堵塞问题相互交织，已成为制约系统安全经济运行的主要瓶颈。本文系统分析了脱硫系统腐蚀与堵塞的成因机理及其耦合关系，从材料优选、工艺优化、运行调控和智能监测四个维度提出了综合治理技术体系。研究表明，腐蚀与堵塞之间存在相互促进的恶性循环关系，单一治理措施难以根除问题，须采取多维度协同治理策略。通过在某 600MW 机组脱硫系统的工程应用验证，综合治理方案可显著延长设备检修周期、降低系统能耗，为燃煤机组脱硫系统的长周期安全运行提供技术支撑。

关键词：燃煤机组；湿法脱硫；腐蚀；堵塞；综合治理

引言：石灰石-石膏湿法脱硫技术以其脱硫效率高、运行可靠、适用煤种广等优势，在我国燃煤机组烟气脱硫领域占据主导地位。然而，脱硫系统长期处于强酸、高盐、干湿交替的恶劣工况环境中，设备腐蚀与浆液系统堵塞问题普遍存在，二者相互叠加、互为诱因，严重制约系统可用率和运行经济性。现有治理研究多聚焦单一环节，缺乏从腐蚀-堵塞耦合机理出发的系统性综合治理思路。本文立足工程实践，系统剖析腐蚀堵塞的成因与互馈机制，提出覆盖材料、工艺、运行与监测的全方位治理方案，为燃煤机组脱硫系统长周期安全稳定运行提供技术支撑。

1 脱硫系统腐蚀与堵塞的成因机理分析

1.1 腐蚀环境特征与主要失效模式

湿法脱硫系统腐蚀环境复杂严酷。烟气中 SO_2 吸收后形成亚硫酸，进而氧化为硫酸，浆液 pH 值通常维持在 4.5 至 5.5，局部可低至 2.0 以下。氯离子因工艺水循环浓缩可达 20000 至 60000mg/L，穿透不锈钢钝化膜能力强，易诱发点蚀和应力腐蚀开裂。浆液固含量 15% 至 25%，高速含固浆液产生持续冲刷磨损，加速腐蚀。多重因素耦合作用下，系统形成均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂和冲刷腐蚀等失效模式。不同区域腐蚀机制差异显著：烟气入口干湿交界区以露点腐蚀为主，腐蚀速率达 2 至 3mm/年；吸收塔浆液区以氯离子点蚀与冲刷腐蚀协同作用为主；净烟道主要承受残余酸性气体均匀腐蚀。

1.2 堵塞物的形成机制与分布规律

脱硫系统堵塞集中在浆液循环回路、喷淋层、除雾器及石膏脱水系统。浆液循环堵塞源于石膏晶体与飞

灰、石灰石杂质形成的复合沉积物，当过饱和度控制不当或停留时间不足时，细小不规则晶体易在管壁附着形成硬垢。喷淋层喷嘴堵塞最为常见，成因包括大颗粒杂质卡堵、石膏沉积缩径及停运干固^[1]。除雾器堵塞表现为叶片表面硫酸钙和亚硫酸钙硬垢，压差可从 200Pa 升至 1500Pa 以上，影响引风机出力。堵塞分布规律：最上层喷嘴堵塞率最高，除雾器入口侧以石膏硬垢为主、出口侧以亚硫酸钙软垢为主。 SO_2 浓度波动或氧化风量不足时，亚硫酸钙含量升高会急剧加速堵塞。

1.3 腐蚀与堵塞的耦合互馈机制

腐蚀与堵塞形成复杂的互馈循环。腐蚀产生的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 进入浆液后催化亚硫酸氢根离子氧化，干扰石膏晶体正常生长，使晶体趋向细小不规则，更易附着设备表面，为堵塞提供初始沉积位点。堵塞物形成则改变局部流场和化学环境：喷嘴堵塞导致浆液分布不均、局部 pH 值偏低，塔壁和支撑梁腐蚀速率显著升高；除雾器堵塞导致烟气流速升高，加速净烟道和烟囱腐蚀。停炉检修期间，残留浆液干固形成浓缩液膜，对金属基体产生强腐蚀，干固垢层成为新一轮堵塞的结晶基底。“腐蚀促进堵塞、堵塞加剧腐蚀”的恶性循环使系统劣化加速，是制定综合治理方案的理论基础。

2 防腐材料优选与新型防护技术

2.1 不同服役区域的选材原则与匹配方案

脱硫系统腐蚀环境具有显著的区域差异性，选材须遵循“环境匹配、经济合理”原则。烟气入口干湿交变区以露点腐蚀和缝隙腐蚀为主，宜选用耐蚀合金复合板（如 C276 合金贴衬）或高镍基合金堆焊层。吸收塔浆液区长期处于酸性浆液中，氯离子浓度高，冲刷与腐蚀

联合作用显著,侧壁板材宜采用双相不锈钢(如 2205)复合板或钛钢复合板(TA2+Q235B),塔内壁防腐涂层可选用玻璃鳞片乙烯基酯树脂,厚度不低于 2mm。浆液循环泵过流部件宜选用高铬耐磨铸铁(Cr 含量 26%至 30%)或聚氨酯弹性体衬里。喷淋层管道和喷嘴宜选用碳化硅陶瓷,运行 3 至 5 年仍能保持设计流量偏差小于 5%。净烟道和烟囷内壁宜选用钛钢复合板或内衬发泡玻璃砖。各区域选材须统筹兼顾,避免局部选材不当成为系统短板。

2.2 新型耐蚀材料的工程应用评价

近年来,多种新型耐蚀材料在脱硫系统中得到推广应用。钛合金(TA2、TC4)在含氯离子酸性介质中耐点蚀性能优异,腐蚀速率低于 0.01mm/年,但成本较高,适用于关键部位薄板衬里。双相不锈钢(2205、2507)抗点蚀当量数(PREN)达 35 以上,在氯离子浓度低于 30000mg/L 环境中表现出色,性价比优于钛合金。高硅不锈钢(254SMo、904L)耐高温酸性均匀腐蚀能力突出,适用于烟气换热器等高温酸露点区域。玻璃鳞片乙烯基酯树脂复合涂层耐温可达 120℃,使用寿命一般 8 至 12 年。聚氨酯弹性体衬里耐磨指数为高铬铸铁的 3 至 5 倍,用于浆液循环泵叶轮可延长检修周期 2 至 3 年。选型时应综合评估材料初期投资与全生命周期维护成本,避免片面追求低价导致频繁维修^[2]。

2.3 表面防护与阴极保护等辅助技术

辅助防护技术对抑制局部腐蚀具有重要作用。热喷涂技术可在碳钢基体表面制备 Ni-Cr-Mo 合金涂层(厚度 0.3 至 0.5mm),配合封孔剂使用后涂层孔隙率可降至 1%以下。衬胶技术将丁基橡胶或氯丁橡胶与碳钢基体复合(橡胶层厚度 3 至 6mm),适用于管道内壁、箱罐内壁等部位,但在温度波动大的区域易出现老化剥离。阴极保护技术通过安装牺牲阳极(镁阳极或锌阳极),使金属电位负移至免蚀区,保护度可达 85%以上,适用于吸收塔底部和浆液箱底部。辅助防护措施不能替代主体选材,须与合理的结构设计和规范的施工工艺配合使用,衬里施工中的针孔、气泡、搭接缺陷往往是腐蚀萌发的起点。

3 工艺流程优化与结构设计改进

3.1 塔内流场优化与喷淋层布置改进

传统喷淋层布置常出现浆液覆盖不均匀、壁面偏流和中心空洞等问题。CFD 流场模拟技术可精确预测塔内流场分布,据此优化喷淋层布置。采用四层喷淋、各层喷嘴交错布置的方案,可使浆液覆盖率从 85%提升

至 98%以上,有效消除壁面偏流。大口径空心锥形喷嘴的抗堵塞性能优于实心锥形喷嘴,雾化粒径控制在 1200 至 1800 μm 范围内。喷淋层间距不宜小于 1.8m,过小会导致上层喷淋对下层形成“水幕效应”。吸收塔入口烟气导流板应确保烟气均匀向上流动,避免集中于塔壁一侧。塔内浆液池液位应稳定在设计液位 $\pm 200\text{mm}$ 范围内,液位大幅波动会导致搅拌器露出液面空转,加速设备损坏^[3]。

3.2 除雾器结构选型与冲洗制度优化

屋脊式除雾器由于叶片倾角大、自清洁性好,近年已成为大型机组的主流选择。叶片间距应在 25 至 32mm 之间,过小容易卡堵、过大则除雾效率下降。冲洗水压力须保持在 0.2 至 0.3MPa 之间,过低冲洗不净、过高会造成二次携带;冲洗频次根据除雾器压降动态调整,当压降较设计值升高 50%时应增加冲洗频次;冲洗水悬浮物含量应低于 30mg/L。在除雾器上下游设置差压变送器实时监测压降,接入 DCS 系统设定高报警值(800Pa)和超高报警值(1200Pa)。叶片材质宜选用 PPH 或 PVDF,表面光洁度 $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$,可有效延缓垢层附着。

3.3 浆液循环系统防堵设计改良

浆液循环管道流速应控制在 2.5 至 3.5m/s 范围内,流速过低导致沉积、过高加速冲刷腐蚀,DN250 管径对应流速 3.0m/s 为最佳工况点。管道布置应尽量减少 90° 弯头,以 45° 或 60° 弯头代替,弯头半径不小于管径的 5 倍;主管道宜设置不小于 5‰ 坡度,最低点设排放口。浆液循环泵入口设滤网(10 $\times$ 10mm),防止大颗粒杂质进入泵体。泵出口宜安装在线冲洗装置,停运时自动冲洗不少于 3 分钟。浆液密度控制目标为 1080 至 1150kg/m³,超出范围时应调整脱水系统运行方式或补充工艺水,维持浆液过饱和度在合理区间。

4 运行优化与智能监测技术

4.1 关键运行参数的优化调控

浆液 pH 值长期高于 5.8 时,亚硫酸钙含量升高、结垢倾向增加;低于 4.5 时,酸性腐蚀加剧。推荐 pH 值控制在 5.0 至 5.6 之间,既保证脱硫效率在 98%以上,又控制结垢和腐蚀。浆液密度控制目标为 1080 至 1150kg/m³,密度过高易形成硬垢,过低则晶体细小易附着。氯离子浓度宜控制在 20000mg/L 以下,超标时应加大废水排放量^[4]。氧化风量按 SO₂ 脱除量的化学计量比 2.0 至 2.5 倍配置,不足会导致亚硫酸钙含量超标,该物质是除雾器和喷淋层结垢的重要诱因。以上参数相互关

联,须统筹协调。

4.2 停备期间的防腐防堵维护策略

短期停运(3天以内)应保持浆液循环泵低速运行和搅拌器连续运转。长期停运(超过3天)应将浆液排空至事故浆液箱,用工艺水对塔内壁、喷淋层、除雾器彻底冲洗。对已有明显结垢的系统,采用高压水射流(30至50MPa)物理清洗后再进行化学清洗。化学清洗可采用5%至10%的氨基磺酸溶液循环清洗6至8小时,清洗后须用清水彻底冲洗残余酸液。金属设备停运期间应保持干燥,必要时充氮保护,内部相对湿度控制在40%以下。停备期间应安排关键部位壁厚检测和内窥镜检查,提前识别隐患。

4.3 腐蚀堵塞在线监测与预警系统构建

在吸收塔壁、浆液管道、烟气入口等关键部位安装在线腐蚀速率探头(LPR法或ER法),腐蚀速率超过0.2mm/年时触发预警。壁厚在线监测采用超声波测厚技术,在易冲刷减薄部位焊接测厚探头,连续追踪壁厚变化趋势。堵塞监测以除雾器压差、喷淋层压力、循环泵电流等参数间接指示:喷淋层入口压力升高15%以上指示喷嘴堵塞率超20%。将监测参数集成到智能监控平台,基于大数据趋势分析和神经网络算法建立状态评估模型,实现对腐蚀堵塞风险的提前预警和根因诊断。

5 综合治理方案的工程应用实践

5.1 综合方案的设计原则与整体架构

综合治理方案遵循“源头控制为主、过程调节为辅、末端治理为补”的设计原则,从三个层次展开:基础层通过合理选材和结构优化提升系统固有抗腐蚀抗堵塞能力;运行层通过工艺参数精细化调控抑制腐蚀和结垢的诱发条件;监测层通过在线监控实现状态预判和及时干预。三个层次互为支撑、协调推进,单一维度改进难以取得理想效果。

5.2 典型工程案例应用效果

国内一台600MW机组脱硫系统存在喷嘴堵塞(每3至4个月清洗一次)、除雾器压差高(运行1年后升800Pa以上)、塔壁腐蚀减薄(6年减薄40%)等问题。按综合治理方案改造:材料方面烟气入口贴衬C276合金板,循环泵叶轮更换聚氨酯衬里,喷嘴升级碳化硅;工

艺方面CFD优化喷淋层布置,除雾器改为屋脊式,管道流速调至3.0m/s;运行方面pH值由5.8至6.2下调至5.2至5.6,密度控制在1100kg/m³以内;监测方面安装在线腐蚀速率探头和压差监测^[5]。改造后连续运行18个月未因喷嘴堵塞停运,除雾器压差稳定在400Pa以内,腐蚀速率由0.25mm/年降至0.08mm/年,年节省约280万元。

5.3 治理方案的经济性评估

以600MW机组为例,材料升级约200万元,工艺改造约180万元,智能监测约120万元,合计初期投资约500万元。改造后年均节省检修费120万元,增加发电收益80万元,节省电耗80万元,年综合收益约280万元,静态回收期约1.8年,全生命周期净收益约3700万元。单一措施年收益不足80万元,回收期6年以上。系统性综合治理的经济效益和长效性显著优于单一措施方案。

结束语

燃煤机组脱硫系统的腐蚀与堵塞问题是相互促进、互为因果的综合性工程难题,单一环节治理难以根除隐患。本文从腐蚀堵塞耦合机理出发,系统构建了涵盖材料优选、工艺优化、运行调控与智能监测四维度的综合治理技术体系,并在典型工程中验证了方案的有效性和经济性。脱硫系统腐蚀堵塞的根治,需要将技术措施与精细化管理相结合,在全链条中贯穿防腐防堵理念。随着环保标准提升和燃煤机组调峰常态化,脱硫系统工况将更加复杂,未来应进一步推进耐蚀新材料研发、智能运维技术应用和全生命周期成本管理,推动脱硫系统向长周期安全、经济、清洁运行方向持续进步。

参考文献

- [1] 董海涛. 燃煤电厂脱硫系统防腐蚀措施研究及应用[J]. 能源科技, 2025, 23(6):33-37.
- [2] 李征, 刘伟伟. 燃煤电厂脱硫系统设备腐蚀防护工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(11):108-110.
- [3] 张立超. 燃煤电厂脱硫系统设备腐蚀与防护技术[J]. 应用能源技术, 2022(11): 29-32.
- [4] 王成满, 赵耀. 燃煤烟气脱硫系统的氯平衡分析[J]. 中国科技纵横, 2025(14): 91-93.
- [5] 张优. 双塔串联脱硫系统一级塔除雾器堵塞研究[J]. 电工技术, 2025(3): 231-233.