

火电厂湿法脱硫塔喷淋堵塞成因分析及优化运维措施

石 玺

国家电投集团远达环保工程有限公司 重庆 401122

【摘 要】：石灰石-石膏湿法脱硫是国内燃煤火电机组烟气 SO_2 治理的主流工艺，喷淋层与喷嘴作为气液接触核心构件，喷嘴、支管堵塞是现场高频故障。喷淋发生堵塞后，会造成塔内喷淋覆盖率下降、液气比失衡，直接引发脱硫效率衰减、石膏品质恶化、循环泵电流异常波动，严重时被迫降负荷或停机检修。在机组深度调峰、煤质波动大的运行背景下，浆液理化指标扰动、杂质颗粒侵入、结晶析出、设备结构缺陷、运维管控不到位等多重因素叠加，进一步加剧喷淋堵塞问题。本文结合火电厂脱硫系统现场运行台账与垢样化验结果，划分物理杂质堵塞、化学结晶结垢堵塞两大类型，从浆液物性、烟气条件、设备结构、运行调控、检修运维五个维度剖析喷淋堵塞内在机理，提出工艺参数动态调控、设备结构改造升级、分级冲洗处置、全周期运维管控等成套优化运维方案。经现场工程应用验证，该措施可有效降低喷淋堵塞频次，延长喷淋系统检修周期，保障脱硫装置长期稳定达标排放，可为同类型火电厂湿法脱硫系统运维提供工程参考。

【关键词】：火电厂；湿法脱硫；喷淋堵塞；喷嘴；结垢结晶；运维优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.009

引言

在双碳目标推动下，燃煤发电机组深度调峰常态化，机组负荷宽幅波动、入炉煤质硫分与灰分波动增大，给湿法脱硫系统稳定运行带来较大挑战。石灰石-石膏湿法脱硫依靠循环浆液泵将石灰石浆液输送至塔内喷淋层，通过喷嘴雾化形成浆液液滴，与逆向流动烟气充分接触完成二氧化硫吸收反应。喷淋层由喷淋主管、支管、大量碳化硅喷嘴组成，喷嘴流道狭窄，是整个系统最容易发生堵塞的部位。

喷淋堵塞故障在各大火电厂普遍存在，部分机组运行 3-6 个月就出现喷嘴大面积堵塞现象。堵塞之后，部分喷淋区域失效，塔内出现烟气偏流、短路，出口二氧化硫浓度周期性波动，环保排放超标风险上升；同时未堵塞喷嘴流量增大，造成喷淋管冲刷磨损加剧，支管泄漏风险增加。现场处理喷淋堵塞大多需要停机入塔人工清理，检修工作量大，占用机组检修窗口，推高环保设备运维成本。

当前多数电厂处理喷淋堵塞以事后停机清理为主，缺少系统性源头防控手段，对结晶析出、杂质来源、调峰工况下参数扰动的内在机理研究不够深入。单纯依靠停机冲洗只能临时解除堵塞，未消除诱发堵塞的根本诱因，运行一段时间后堵塞问题会反复出现。立足于火电厂实际生产痛点，本文区分物理杂质堵塞与化学结晶堵塞，系统梳理各类诱发因素，形成运行-设备-检修一体化优化运维技术方案，实现喷淋堵塞源头防控，提升脱硫系统长周期运行能力。

1 湿法脱硫喷淋堵塞主要类型及危害

结合电厂解体检查与垢样成分检测，喷淋堵塞分为物理杂质堵塞与化学结晶结垢堵塞两类，实际工况下两类堵塞经常耦

合发生。

第一类为物理杂质堵塞。堵塞物主要为大颗粒石灰石颗粒、未充分破碎的石子、锅炉飞灰、氧化风机带入的铁锈、衬胶脱落碎片、石膏大颗粒。固体颗粒进入喷嘴流道，直接造成喷嘴孔道卡堵，部分支管也会被大颗粒淤积。物理堵塞具有突发性，短时间内就会出现大量喷嘴失效，循环泵出口压力异常升高。

第二类为化学结晶结垢堵塞。浆液处于过饱和状态，硫酸钙、亚硫酸钙晶体持续析出，在喷嘴内壁、喷淋支管内壁逐步沉积，流道截面持续缩小，属于渐进式堵塞。结晶堵塞发展周期长，初期不容易被运行人员察觉，随着垢层不断增厚，喷淋雾化效果逐步变差，脱硫效率缓慢下降，后期发展为完全堵死。

喷淋堵塞带来多重运行危害：一是喷淋覆盖率不足，气液接触不充分，脱硫效率下降，环保超标风险增大；二是部分喷嘴堵塞后，其余喷嘴浆液流量增大，喷淋管冲刷磨损速度加快，容易发生支管磨穿漏浆；三是塔内流场分布不均，局部区域浆液停留时间异常，进一步加剧塔壁、除雾器结垢；四是石膏脱水受扰动，石膏含水率上升，副产品品质不达标；五是频繁需要停机入塔开展人工清堵，增加机组非计划检修风险，提升人力、备件成本。

2 喷淋堵塞多维度成因分析

2.1 浆液物性指标失衡诱发结晶堵塞

浆液 pH 值、密度、氯离子浓度、石灰石颗粒细度是影响结晶析出的关键参数。pH 值控制过高，石灰石溶解过量，浆液中钙离子浓度升高，硫酸钙更容易达到过饱和状态，晶体在

喷嘴内部析出沉积; pH 过低又会造成二氧化硫吸收效率不足, 亚硫酸钙大量富集, 亚硫酸盐结晶同样会附着在喷淋流道内壁。

浆液密度长期偏高, 石膏晶体浓度过大, 晶体析出概率显著增加; 石灰石制浆系统出力不足、石灰石粉细度不合格, 大量粗颗粒直接进入吸收塔, 一方面带来物理颗粒堵塞, 另一方面粗颗粒石灰石反应不完全, 悬浮在浆液中加剧结晶倾向。浆液氯离子持续富集, 会改变石膏结晶形态, 生成黏性较强的细小晶体, 更容易黏附在喷嘴内壁, 加速结垢发展。

机组深度调峰低负荷工况, 循环泵运行组合频繁切换, 部分喷淋层间歇停运, 支管内部滞留浆液静止, 水分蒸发, 盐类物质析出, 喷嘴内部快速结垢堵塞, 这是调峰机组喷淋堵塞高发的重要原因。

2.2 烟气侧带来杂质与工况扰动

锅炉燃烧工况波动, 电除尘、布袋除尘效率下降, 大量飞灰随烟气进入吸收塔。飞灰颗粒进入浆液循环系统, 随浆液进入喷淋层, 造成喷嘴物理堵塞。当锅炉发生爆管、投油助燃, 未燃尽油分进入脱硫塔, 油分吸附固体颗粒, 形成黏性混合物, 黏附在喷嘴流道, 形成油-灰-石膏复合垢, 清理难度大幅提升。

烟气温度异常升高, 事故工况下高温烟气进入塔内, 喷淋支管内壁浆液快速蒸发, 盐类快速析出结垢。机组启停、旁路切换过程烟气参数剧烈扰动, 进一步放大喷淋堵塞风险。

2.3 设备系统设计与硬件缺陷

石灰石制浆系统过滤装置不完善, 旋流滤网破损失效, 石块、粗颗粒直接进入吸收塔浆液池; 浆液循环泵入口滤网破损、滤网孔径偏大, 无法有效拦截固体杂质, 大颗粒直接输送至喷淋层。

喷淋支管布置存在死角, 部分管路低点存浆, 循环泵停运之后支管内部存浆无法回流, 浆液静止结晶; 喷嘴选型不合理, 喷嘴口径偏小, 抗堵塞能力弱; 喷淋管材质、衬胶质量不达标, 衬胶脱落碎片进入流道, 形成堵塞物来源。部分机组深度调峰只运行部分循环泵, 其余喷淋层长期闲置, 支管存浆结晶, 再次投运时批量出现喷嘴堵塞故障。

2.4 运行调控与检修运维管控不足

运行人员对调峰工况下浆液参数动态调整不到位, 负荷变化时 pH、密度控制策略未同步优化; 废水排放管控不严, 氯离子持续累积; 循环泵启停操作流程不合理, 停运喷淋层没有执行冲洗操作, 支管存浆结晶。

日常巡检只关注出口 SO_2 数据, 缺少喷淋堵塞预判手段, 喷嘴堵塞早期不易发现; 停机检修阶段, 喷淋层检查、冲洗流

于形式, 支管内部残留垢层没有彻底清理; 滤网、过滤器没有定期检查更换, 破损之后不能及时发现; 制浆系统、浆液循环系统的维护保养不到位, 杂质源源不断进入塔内浆液。

3 喷淋系统防堵塞优化运维技术措施

针对物理杂质堵塞、化学结晶结垢堵塞两类问题, 从工艺运行调控、设备硬件改造、分级冲洗处置、全周期运维管理四个方面构建综合防控方案。

3.1 浆液工艺参数动态优化调控

严格管控吸收塔浆液理化指标, 建立深度调峰工况下参数联动控制逻辑。浆液 pH 控制区间维持 5.2-5.8, 避免长时间高 pH 运行, 减少钙离子过饱和析出; 浆液密度控制在 $1080-1150\text{kg/m}^3$, 密度超标及时加大石膏排出量, 降低浆液固体颗粒浓度。

严格把控石灰石粉品质, 石灰石碳酸钙含量、细度满足设计要求, 粗颗粒占比严格管控; 优化制浆系统运行, 避免不合格浆液送入吸收塔。强化废水排放管理, 控制浆液氯离子含量, 抑制黏性细晶体生成。

机组深度调峰低负荷, 合理选择循环泵投运组合, 尽量减少喷淋层闲置停运时间。确有喷淋层需要停运, 执行“停运即冲洗”流程, 使用工艺水冲洗喷淋支管, 排空管路内部浆液, 防止支管存浆结晶。锅炉投油助燃期间, 加强浆液指标监测, 必要时加大废水排放量, 减少油类物质累积。

3.2 设备硬件改造升级, 切断杂质来源

完善浆液过滤拦截体系, 检修周期内检查浆液循环泵入口滤网, 损坏及时更换, 合理匹配滤网孔径, 拦截大颗粒杂质; 在石灰石供浆管路增设过滤装置, 阻挡石子、粗颗粒进入吸收塔。针对喷淋支管存在存浆死角的管路, 优化支管坡度, 保证循环泵停运后浆液可以自流返回浆液池, 消除管路静态存浆结晶问题。

对易频繁堵塞的喷嘴, 在脱硫效率允许前提下, 适度选用流道更宽的抗堵型碳化硅喷嘴; 对经常间歇停运的喷淋层, 增设独立工艺水冲洗管路, 实现远程冲洗。检查喷淋管衬胶完好情况, 衬胶起泡、脱落及时修复, 防止衬胶碎片进入循环浆液。对石膏旋流子开展定期检测, 保证旋流脱水效果, 减少细小石膏晶体在系统内循环累积。

3.3 建立分级冲洗处置机制, 区分在线与停机处理

建立预警-在线冲洗-停机检修三级处置模式。运行中通过循环泵出口压力、电流变化、脱硫效率变化综合预判喷淋堵塞趋势, 循环泵出口压力较基准值升高 0.02MPa 以上, 作为喷淋堵塞预警信号。

在机组不停机条件下,利用喷淋层备用冲洗管路,对预警喷淋层开展轮换在线冲洗,采用工艺水大流量冲刷支管与喷嘴,冲掉早期松散结晶与附着颗粒,把堵塞消除在萌芽阶段。在线冲洗适合结晶初期,对已经完全堵死的喷嘴效果有限。

机组计划检修期间,必须开展喷淋层专项检查。打开人孔进入塔内,逐根检查喷淋支管与喷嘴,采用高压水冲洗,对完全堵死的喷嘴进行拆换;清理支管内部沉积垢层,同时检查滤网、旋流设备,消除杂质源头。检修完成后做好喷淋层验收记录,统计堵塞喷嘴数量与位置,为后续运行优化提供依据。

3.4 完善全周期运维管理制度

完善脱硫系统运行规程,补充深度调峰工况喷淋系统专项操作条款,明确循环泵启停、喷淋层停运冲洗操作步骤。运行值班做好参数趋势分析,不仅仅关注出口 SO_2 达标,同时跟踪循环泵压力电流、浆液 pH、密度、氯离子指标变化,提前识别堵塞前兆。

建立定期维护台账:浆液循环泵入口滤网定期检查清理;石灰石制浆系统设备定期保养;石膏旋流子定期校验更换。把喷淋层检查纳入机组 A/B/C 检修标准项目,明确检修内容与验收标准。

强化锅炉-脱硫协同管控,锅炉侧做好除尘系统运维,减少飞灰进入脱硫塔;锅炉启停、投油阶段,提前告知脱硫运行岗位,脱硫系统针对性调整运行方式。有条件的电厂可依托智慧脱硫平台,把循环泵压力、电流、浆液参数接入故障预警模型,实现喷淋堵塞趋势智能预判,提升运维主动性。

4 工程应用效果分析

某 330MW 火电机组石灰石-石膏湿法脱硫系统,存在喷淋喷嘴频繁堵塞问题,运行 4-5 个月就出现喷嘴堵塞,脱硫效率波动,需要停机入塔清理。应用本文成套优化运维措施:优化

浆液动态控制逻辑,完善喷淋层停运冲洗流程;改造循环泵入口滤网,优化喷淋支管坡度消除存浆死角;建立预警-在线冲洗-停机检修分级处置机制,完善检修验收标准。

实施改造优化之后,喷淋系统运行数据得到明显改善:喷淋喷嘴堵塞发展速度显著放缓,喷淋系统有效运行周期由 4-5 个月提升至 10 个月以上;同等煤质条件下脱硫效率稳定性提升,出口 SO_2 浓度波动幅度明显降低;循环泵压力异常上涨现象得到抑制;检修期间喷淋清堵工作量大幅下降,减少停机清堵频次,降低环保设备运维成本,实现脱硫装置长周期稳定达标排放。实践证明,物理防控杂质源头、优化浆液运行参数、分级冲洗处置、标准化运维管理相结合,能够有效缓解喷淋堵塞问题。

5 结论

火电厂湿法脱硫塔喷淋堵塞分为物理杂质堵塞与化学结晶结垢堵塞,两类故障经常耦合发生。浆液理化指标失衡、烟气杂质带入、设备硬件缺陷、调峰工况扰动、运维管控缺失,共同诱发喷淋支管、喷嘴堵塞故障,造成脱硫效率下降、设备磨损、检修成本升高等一系列问题。

本文提出工艺参数动态调控、设备硬件改造升级、分级冲洗处置、全周期运维管控的成套优化运维方案,从源头减少杂质进入、抑制晶体析出,通过在线手段提前干预早期堵塞,结合计划检修彻底清理垢层。工程实践表明,该套措施可以有效延缓喷淋堵塞发展,延长喷淋系统运行周期,降低停机检修频次。

喷淋堵塞治理属于系统性工作,不能只依靠停机清理,需要锅炉、脱硫运行与检修岗位协同管控。在机组深度调峰常态化背景下,后续可以进一步结合数字化监测手段,构建喷淋堵塞预警模型,实现更精准的预判与主动运维,为火电机组环保设施安全经济运行提供保障。

参考文献:

- [1] 薛琛.烟气脱硫塔堵塞结垢成因分析与防治措施研究[J].电力科技与环保,2026,42(02):45-49.
- [2] 孙盈.湿法脱硫塔浆液循环系统运行稳定性研究[J].电站系统工程,2026,42(03):52-54.
- [3] 董锐锋,陈浩军,王锋涛,等.单塔双循环脱硫系统结垢问题研究[J].中国电力,2017,50(06):134-138.
- [4] 柳俊杰.燃煤电厂脱硫塔浆液喷淋层堵塞诊断与运行工况优化[J].发电技术,2025,46(04):512-518.
- [5] 国家能源局.燃煤电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫运行导则[S].2021.