

燃煤电厂湿法脱硫吸收塔浆液溢流起泡问题优化治理方案

屈晓燕

内蒙古国华准格尔发电有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：石灰石-石膏湿法脱硫系统普遍存在吸收塔浆液起泡溢流问题，易造成脱硫效率下降、设备腐蚀堵塞、机组限负荷运行及环保超标等隐患。本文剖析浆液起泡溢流的微观机理，从原料品质、运行参数、设备设计、运维管理四方面梳理核心成因，制定源头管控、参数优化、设备改造、规范运维的综合治理方案。工程应用表明，该方案可彻底消除溢流问题，提升系统稳定性与机组经济环保效益。

关键词：燃煤电厂湿法脱硫；吸收塔；浆液溢流起泡问题；优化治理方案

引言：湿法脱硫是燃煤电厂主流烟气脱硫工艺，保障机组环保达标稳定运行。实际生产中，受燃煤及石灰石杂质、浆液离子富集、运行参数失配、设备缺陷及运维疏漏等影响，吸收塔浆液极易生成稳定泡沫，引发浆液溢流、虚假液位等问题。此类故障频发会扰乱脱硫系统工况，增加设备运维成本，带来安全环保风险。为解决该行业共性难题，本文结合机理与现场工况，制定系统性优化治理方案。

1 燃煤电厂湿法脱硫吸收塔浆液起泡溢流机理及系统概况

1.1 湿法脱硫系统工艺流程与核心设备原理

(1) 石灰石-石膏湿法脱硫流程：原烟气经增压风机、GGH降温后入吸收塔，与石灰石浆液逆流接触吸收 SO_2 ；净烟气除雾、升温后排放。反应产物经氧化、结晶生成石膏，经脱水固液分离，滤液返回复用。(2) 吸收塔为立式喷淋空塔，内置多层喷淋层，利用循环泵将浆液反复循环提效。氧化风机向塔底浆池送空气，将 CaSO_3 氧化为 CaSO_4 ；石膏排出泵送浓缩浆液至旋流器及真空皮带机脱水，得石膏副产品。(3) CaCO_3 在酸性条件下溶出 Ca^{2+} ，与 HSO_3^- 反应生成 CaSO_3 ，经氧化、结晶生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。浆液密度达 $1120 \sim 1180 \text{ kg/m}^3$ 时排至脱水系统，滤液及溢流清液返回塔体维持水平衡。

1.2 浆液起泡与溢流微观机理

(1) 浆液泡沫生成、聚集、稳定及破裂的微观过程：表面活性物质在气液界面定向排列包裹气体形成气泡，气泡上升至液面聚集，液膜排液变薄后若表面张力恢复不足则稳定存在；当液膜完全排尽或受外部冲击时破裂释放气体。(2) 有机物、细颗粒物、离子富集对泡沫稳定性的影响机制：烟气中未燃尽碳粒、油脂吸附于

气液界面增大液膜弹性与强度； Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子富集改变溶液离子强度与表面电荷，抑制液膜排液，延长泡沫半衰期，加剧稳定性^[1]。(3) 塔内流场扰动、气液扰动引发泡沫层抬升溢流机理：负荷波动、氧化风量异常或循环量改变时，塔内气液湍动加剧，微细气泡大量卷入并向上输运，液面泡沫层急剧膨胀增厚，当超过液位计控制范围或除雾器底部时，泡沫夹带浆液从溢流管、烟气出口外溢，造成系统紊乱。

1.3 浆液起泡溢流主要危害

(1) 对脱硫系统：大量泡沫占据吸收塔有效空间，降低气液接触效率，脱硫效率下降3%~8%，净烟气 SO_2 浓度波动加剧，易触发环保超标报警。(2) 对设备设施：溢流浆液携带高浓度 Cl^- 及固体颗粒，加剧烟道与除雾器结垢、腐蚀与堵塞；循环泵汽蚀余量下降，运行电流异常波动，严重时导致跳闸。(3) 对生产运行：机组被迫限负荷运行，检修频次增加，石灰石粉耗量与电耗上升，运维成本显著增加；大量浆液外溢带来滑跌、设备短路及环境污染等安全隐患，严重威胁机组安全性。

2 燃煤电厂湿法脱硫吸收塔浆液起泡溢流问题成因分析

2.1 原料与浆液品质因素

(1) 燃煤品质缺陷：高挥发分、高杂质、飞灰夹带过量。高挥发分燃煤燃烧不充分，未燃尽碳粒及有机挥发物随烟气进入吸收塔；煤中黏土、金属氧化物形成微细飞灰（ $< 10 \mu\text{m}$ ），难以被除雾器捕集而进入浆液。固体颗粒吸附于气液界面成为泡沫骨架，降低表面张力，诱导大量气泡生成并延长泡沫寿命。(2) 石灰石纯度不足： MgCO_3 超设计值（要求 $\text{CaCO}_3 \geq 90\%$ 、 MgCO_3

< 3%) 时, Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 生成可溶性 MgSO_4 , 增大离子强度, 抑制石膏结晶并增强泡沫膜弹性; SiO_2 、 Al_2O_3 等惰性杂质累积增大浆液黏度, 降低气泡上升速度, 促使泡沫层增厚。(3) 浆液离子与有机物富集: Cl^- 持续上升 (达 10000~20000mg/L), 增强溶液极性, 改变界面电荷分布, 抑制液膜排液; 重金属离子 (Hg^{2+} 、 Pb^{2+}) 及油脂类有机物在闭路循环中富集, 显著降低表面张力, 诱导持久性微细泡沫大量生成。

2.2 运行工艺参数不合理

(1) 吸收塔液位、密度、pH 值控制区间偏离最优工况。液位过高使泡沫层触及除雾器导致外溢, 过低则需加大循环量反而加剧扰动; 密度超 1180kg/m³ 时浆液黏度增大, 气泡上升受阻形成稳定泡沫; pH 低于 4.5 或高于 5.8 时, 分别因亚硫酸盐生成过快或石灰石过量溶解而诱发泡沫富集。(2) 浆液循环量、氧化风量匹配不当, 加剧塔内扰动起泡。循环泵运行台数与负荷不匹配时, 过大喷淋量增加气液湍流强度, 大量微细气泡被卷入浆池并向上携带; 氧化风量超出设计值或分布管破裂时, 粗大气泡破碎形成大量微泡上浮, 推动泡沫层急剧抬升^[2]。

(3) 废水排放、石膏排出频次与参数管控不规范。废水排放量长期低于设计值使有害离子及有机物无法有效排出; 石膏排出泵运行频次不足或脱水系统故障时, 细颗粒物持续累积, 浆液浊度与黏度上升, 泡沫稳定性增强。

2.3 设备与系统设计缺陷

(1) 吸收塔流场设计不合理, 局部气液扰动剧烈。烟气入口未设置合理导流板时, 高流速烟气 (1.5~2.5m/s) 直接冲击浆池液面造成局部紊流, 大量液滴被卷吸形成泡沫; 喷淋层布置不均导致局部液气比过高, 加剧气泡夹带与泡沫层增厚。(2) 氧化风机、循环泵设备出力匹配不足或冗余。氧化风机选型偏大时过量空气造成严重扰动, 微细气泡数量指数级增加; 循环泵设计裕量过大或运行台数过多时, 循环量超过塔体截面负荷, 泡沫生成速率远高于破裂速率。(3) 消泡、除雾、废水处理配套设备功能短板。消泡剂无自动在线投加功能或投加点不合理, 无法有效分散至泡沫层; 除雾器冲洗喷嘴堵塞或压力不足时表面结垢后泡沫夹带加剧; 废水处理系统出力不足时有害物无法有效外排。

2.4 运维管理与操作因素

(1) 日常参数监测不到位, 虚假液位、参数滞后未及时修正。差压式液位计受浆液密度波动影响导致测量值偏离实际液位, 运行人员未及时比对校准, 实际液位长期过高而未发觉; pH 计、密度计探头未定期清洗校

准, 测量滞后使调控失去依据。(2) 启停操作、负荷调整过程中工艺切换不规范。机组启停阶段烟气流大幅波动时, 未按规程及时调整循环泵及氧化风量, 气液比剧烈变化, 大量泡沫短时间内生成溢出; 负荷快速升降时自控响应滞后, 浆液参数大幅波动诱发起泡峰值。(3) 定期清理、设备巡检、浆液化验等运维工作落实不足。入口烟道积灰、除雾器结垢未按期清理, 局部阻力增大后流场畸变加剧泡沫夹带; 氧化风分布管未定期疏通, 局部堵塞产生高扰动区; 浆液化验频次不足 (每周少于 2 次), Cl^- 、 Mg^{2+} 、COD 等关键指标超标无法及时发现, 起泡隐患长期潜伏累积。

3 燃煤电厂湿法脱硫吸收塔浆液起泡溢流优化治理方案及工程应用

3.1 源头品质管控优化方案

(1) 燃煤与石灰石原料标准化管控, 严控杂质与有害组分。建立燃煤采购验收标准, 优先选用低挥发分、低灰分及低氯煤种, 控制入炉煤灰分、挥发分; 加强煤质前置检测, 对飞灰未燃尽碳含量定期抽检。石灰石严格执行 $\text{CaCO}_3 \geq 90\%$ 、 $\text{MgCO}_3 < 3\%$ 、 $\text{SiO}_2 < 2\%$ 准入标准, 每批次进场前完成全组分分析, 不合格批次严禁入仓, 从源头削减泡沫稳定剂来源。(2) 优化工艺补水水质, 降低外来杂质带入量。工艺水优先采用厂区循环冷却排污水, 增设精密过滤装置去除悬浮物及油脂, 控制 $\text{COD} \leq 20\text{mg/L}$ 、悬浮物 $\leq 10\text{mg/L}$ 。限制事故浆液及地沟回收水直接回用, 增设预处理单元, 避免含油、含有机物的废水带入塔内, 从补水端降低有害杂质累积速率。(3) 建立浆液定期化验机制, 实时管控浆液理化指标。制定浆液日常化验标准, 每天至少进行 1 次密度、pH 值、 Cl^- 、 Mg^{2+} 等检测, 建立浆液健康档案, 绘制关键指标变化趋势曲线, 当 Cl^- 接近 18000mg/L 或 COD 超过 100mg/L 时发出预警, 提前触发置换操作, 变被动应对为主动预防^[3]。

3.2 运行参数精准优化调控

(1) 优化塔内液位、密度、pH 值最优运行区间。正常运行液位控制在除雾器冲洗层底部以下 800~1000mm, 最高不超过 200mm 安全余量; 密度严控 1120~1160kg/m³, 超限优先增加石膏排出量而非补水稀释; pH 维持 5.0~5.6 窄区间, 避免低 pH 时亚硫酸盐大量生成及高 pH 时石灰石过量溶解的双向起泡风险。(2) 匹配调整浆液循环量与氧化风量, 降低气液扰动。建立不同负荷下循环泵运行台数与氧化风量对应寻优表, 低负荷时减少循环泵台数以降低无效湍流; 过量空气系数控制在 1.1 以下。增设氧化风流量调节阀与在线氧量联动, 避免固定风量运行导

致的低负荷过度扰动。(3) 优化脱硫废水排放与石膏排出制度,实现浆液动态更新。脱硫废水排放量由固定值改为 Cl^- 浓度反馈调节, $\text{Cl}^- \geq 15000\text{mg/L}$ 时增大排放至设计值120%,连续运行至回落至 12000mg/L 以下;石膏排出泵变频控制与密度连锁,密度 $\geq 1150\text{kg/m}^3$ 时自动增启备用泵,确保老化浆液及时置换,降低细颗粒物与有害离子累积浓度^[4]。

3.3 设备改造与工艺优化措施

(1) 吸收塔内部流场优化、消泡装置升级改造。烟气入口增设双层导流板与气流均布格栅,控制入口流速 $\leq 1.8\text{m/s}$,防止高速烟气冲击液面;喷淋层与除雾器间增设消泡冲洗层,配置高压空心锥喷嘴(压力 $\geq 0.4\text{MPa}$),差压或液位波动触发时自动投运雾化冲洗,物理破碎泡沫层。塔顶新增泡沫层高度在线监测雷达,与溢流阀连锁预警^[5]。(2) 风机、循环泵运行配比优化,消除设备运行冗余扰动。氧化风机实施变频改造实现风量连续无极调节,避免定频启停的阶跃扰动;循环泵增设入口滤网定期清理,防止喷嘴堵塞后局部喷射压力升高冲击液面。优化循环泵组合策略,采用“一大一小”搭配方案,避免全容量运行时的过度湍流。(3) 科学投加专用消泡剂,制定规范化消泡作业方案。选用聚醚改性聚硅氧烷类专用消泡剂,耐高温耐酸碱持久性强。投加点由塔底改至循环泵出口母管或喷淋层上部,确保随浆液喷洒至泡沫层表面实现精准消泡;制定量化制度,初始按 $5\sim 10\text{ppm}$ 一次性投加,泡沫层下降后改为 $0.5\sim 1\text{ppm/h}$ 连续维护,严禁过量投加造成表面张力过低引发二次起泡。

3.4 工程应用效果与效益分析

(1) 优化前后起泡溢流现象对比与运行稳定性提升效果。某330MW机组实施综合治理后,泡沫层厚度由平均 1.2m 降至 0.3m 以下,溢流频率由每月 $5\sim 6$ 次降为0,虚假液位偏差由 $\pm 500\text{mm}$ 缩至 $\pm 100\text{mm}$,除雾器差压稳定在

$80\sim 120\text{Pa}$,系统连续运行周期由45天延长至120天以上。

(2) 脱硫效率、石膏品质、环保排放指标改善效果。脱硫效率由93.5%提升至98.2%以上,净烟气 SO_2 稳定控制在 25mg/Nm^3 以下,远低于 35mg/Nm^3 超低排放限值;石膏含水率由15%降至8%, CaCO_3 残留由5%降至2%以下,白度与结晶度显著改善,达到建筑石膏一级标准。(3) 安全效益、经济效益与环保效益综合分析。设备腐蚀速率降低40%,循环泵检修周期延长一倍,年节约检修费用约85万元;消泡剂用量由 28t/月 降至 6t/月 ,石灰石耗量下降3.2%,电耗降低2.8%,综合年增经济效益约230万元;杜绝浆液外溢污染事件,消除人员滑跌、设备短路等隐患,显著提升机组带负荷能力与环保合规保障水平。

结束语

本次针对脱硫吸收塔浆液起泡溢流问题的综合治理方案,从源头、工艺、设备、运维多维度完成优化升级,有效解决了系统运行顽疾。经机组工程实践验证,方案可显著降低泡沫层厚度、杜绝浆液溢流,大幅提升脱硫效率与石膏品质,减少设备损耗与药剂、能耗成本。方案实用性与可行性强,可为同类型燃煤电厂湿法脱硫系统故障治理、长效稳定运行提供可靠参考。

参考文献

- [1]陈洛龙,刘萍.脱硫脱硝废水处理单元运行优化改造对浆液起泡的改善效果[J].化学工程与装备,2024,25(05):189-191.
- [2]刘超,张磊,李军.湿法脱硫吸收塔浆液起泡溢流原因分析及治理措施[J].电力科技与环保,2021,37(04):56-59.
- [3]曹海祥.脱硫吸收塔浆液起泡原因分析与处理[J].能源环境保护,2021,35(02):78-81.
- [4]王浩宇,周强.燃煤电厂湿法脱硫浆液品质劣化及起泡溢流综合治理[J].电站系统工程,2022,38(03):45-47.
- [5]张宇.有机硅消泡剂在燃煤电厂湿法脱硫浆液溢流治理中的应用优化[J].有机硅材料,2023,37(02):156-159.