第 7 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

燃煤电厂脱硫废水零排放预处理工艺优化及重金属去除研究

茶文尖[1] 任玟洁[2]
1.国家能源集团阳宗海发电有限公司；2.昆明市政务服务便民热线

DOI:10.32629/jpm.v7i10.9080

[摘 要] 针对云南某电厂 2×300MW 机组原有脱硫废水一体化处理工艺药剂体系单一，对汞、镉、氟化物去除效能不足、出水水质易超标等运行问题，本文对电厂脱硫废水预处理系统开展升级优化改造，结合原有配套建设的主烟道团聚协同高温喷雾蒸发零排放处理系统，新增中和-反应二联箱预处理单元，采用氢氧化钠、TMT-15 有机硫重金属捕捉剂、氯化钙药剂组合工艺，精准实现废水中汞、镉等重金属离子及氟化物的高效稳定去除；预处理出水配制团聚复合剂钝化液，通过双流体喷枪喷入 SCR 后、空预器前高温烟道，依托锅炉高温烟气余热实现废水完全雾化蒸发，废水中盐分随烟气粉尘被电除尘器协同捕集并纳入粉煤灰系统，彻底实现脱硫废水零外排。同时，所采用的团聚复合剂兼具氯离子钝化与烟气 SO_3 脱除双重功效，可有效抑制空预器硫酸氢铵结盐堵塞问题，显著降低烟气烟道低温腐蚀风险。工程实践表明，优化改造后预处理系统处理水量区间为 2～15 m^3/h，单台机组零排放系统额定处理水量为 2 m^3/h，系统出水水质完全满足 DL/T997-2020 标准，系统运行稳定、抗波动能力强，可为同类型燃煤电厂零排放系统升级改造提供技术借鉴。

[关键词] 燃煤机组；脱硫废水；预处理；烟道喷雾蒸发；零排放；团聚复合剂
[中图分类号] X773 [文献标识码] A

Optimization of Zero Liquid Discharge Pretreatment Processes for Desulfurization Wastewater from Coal-Fired Power Plants and Research on Heavy Metal Removal

Chawenjian[1] Ren Wenjie[2]
1.National Energy Group Yangzonghai Power Generation Co., Ltd.;
2.Kunming Government Service Convenience Hotline

[Abstract] To address operational issues at a power plant in Yunnan—specifically, the limited variety of chemicals in the existing integrated desulfurization wastewater treatment process, insufficient removal efficiency for mercury, cadmium, and fluorides, and a tendency for effluent quality to exceed standards—this study implemented an upgrade and optimization of the plant's desulfurization wastewater pretreatment system. In conjunction with the existing integrated high-temperature spray evaporation zero-discharge treatment system installed alongside the main flue gas duct, a new neutralization-reaction double-box pretreatment unit was added. By employing a combined process utilizing sodium hydroxide, TMT-15 organic sulfur heavy metal capture agent, and calcium chloride, the system achieves the efficient and stable removal of heavy metal ions (such as mercury and cadmium) and fluorides from the wastewater. The pretreatment effluent is formulated into a passivation solution containing a composite agent, which is injected via dual-fluid nozzles into the high-temperature flue gas ducts downstream of the SCR and upstream of the air preheater. Utilizing the waste heat from the high-temperature boiler flue gas, the wastewater is completely atomized and evaporated; the salts in the wastewater are co-removed with flue gas dust via an electrostatic precipitator and incorporated into the fly ash system, thereby achieving complete zero external discharge of desulfurization wastewater. Furthermore, the composite agent employed provides dual functions: chloride ion passivation and flue gas SO_3 removal. This effectively suppresses the clogging issue caused by ammonium bisulfate scale formation in the air preheater and

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文| 刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

significantly reduces the risk of low-temperature corrosion in the flue gas ducts. Engineering practice has demonstrated that, after the optimization and retrofitting, the pretreatment system operates within a treatment capacity range of 2 – 15 m^3/h, while the rated treatment capacity of the zero-discharge system for a single unit is 2 m^3/h. The effluent quality fully complies with the DL/T 997-2020 standard; the system operates stably with strong resistance to fluctuations, providing a technical reference for the upgrade and transformation of zero-discharge systems in similar coal-fired power plants.

[Key words] coal-fired power units; desulfurization wastewater; pretreatment; flue-gas spray evaporation; zero liquid discharge; agglomerating composite agent

引言

当前燃煤电厂环保管控标准持续升级，稳定达标处置与零排放改造成为火电环保治理的重点工作。云南某电厂 2×300MW 机组原有脱硫废水系统采用添加单一药剂的一体化处理工艺，对镉、氟化物去除能力不足，出水水质波动大、易超标，难以满足 DL/T 997-2020 规范及环保管控要求。系统依托主烟道高温喷雾蒸发零排放技术，利用烟气余热完成废水雾化蒸发，实现废水零外排。本文结合工程实际，系统分析改造工艺、运行效果及运维要点，可为同类型电厂脱硫废水提质改造提供技术参考。

1 项目概况

1.1 进水水质与改造目标

该电厂脱硫废水原水实测水质：总汞 0.0383mg/L，总镉 1.12mg/L，氟化物 360mg/L。依据 DL/T997-2020《火电厂石灰石-石膏湿法脱硫废水水质控制指标》，本次改造预处理系统设计出水控制指标：总汞≤0.005mg/L，总镉≤0.05mg/L，氟化物≤30mg/L，pH 维持 6～9，悬浮物≤70mg/L。

1.2 设计规模

1）脱硫废水预处理系统：设计处理能力 2～15m^3/h；受入炉煤质、机组运行工况扰动，脱硫废水产水量波动明显，系统日最大处理量 120m^3/d。

2）脱硫废水零排放系统：2 台 300MW 机组，单台机组烟道喷雾设计处理量 2m^3/h，总处理量 4m^3/h。预处理系统处理容量大于零排放系统用水需求，可有效缓冲脱硫废水水量波动。

2 工艺原理

2.1 预处理单元工艺原理

脱硫废水首先进入中和箱，投加质量分数 32%氢氧化钠溶液，调节废水 pH 至 7.5 左右，使部分重金属离子生成氢氧化物沉淀；废水自流进入反应箱，投加 TMT-15 有机硫重金属捕捉剂，汞、镉等溶解态重金属发生螯合反应，生成稳定、难溶的大分子螯合沉淀物；同步投加氯化钙，钙离子与氟离子反应生成氟化钙沉淀，实现氟化物去除。经过反应单元处理后的废水进入原有高效一体化处理设备，投加絮凝药剂，在高剪切搅拌条件下完成絮凝反应，溢流液进入澄清浓缩池实现泥水分离；上清液溢流至清水箱作为烟道零排放系统进水，底部污泥送入压滤机进行脱水处置。

2.2 主烟道团聚协同高温喷雾蒸发零排放原理

预处理达标脱硫废水与团聚复合剂乳化液按比例混合配制成钝化工作液，通过双流体喷枪喷入 SCR 出口-空预器入口烟道，烟道烟气温度维持 300～400℃。雾化后液滴平均粒径≤60μm，依靠烟气显热快速蒸发，废水中各类盐分转化为固态颗粒物，随烟气进入电除尘器被捕获，混入粉煤灰，实现脱硫废水零排放。

团聚复合剂具备两大功能：

1）氯离子钝化防腐：药剂有机芳环上的活性基团与氯离子发生氧氯化反应，生成性质稳定有机含氯化合物，抑制氯离子对烟道金属的腐蚀，反应如式(1)。

$$Ar\text{-}H+HCl+O_2 \rightarrow Ar\text{-}Cl+H_2O \quad (1)$$

2）脱除烟气 SO_3：与烟气中 SO_3 发生磺化反应，消耗烟气三氧化硫，减少硫酸氢铵生成，缓解空预器堵塞，降低烟气酸露点，反应如式(2)。

$$Ar\text{-}H+SO_3 \rightarrow Ar\text{-}SO_3H \quad (2)$$

式中：Ar 代表芳环有机高分子基团。

3 工艺流程

3.1 改造后脱硫废水预处理工艺流程

脱硫废水来水→废水旋流给料罐→废水旋流给料泵→废水旋流器。旋流器溢流液（含固约 3%）→废水收集箱→废水提升泵→中和箱（投加 NaOH 调节 pH）→反应箱（投加 TMT-15、氯化钙）→高效一体化处理设备（投加一体化药剂 0.3～0.5kg/t 废水）→澄清浓缩池。澄清池上清液→清水箱→清水输送泵；出水设置在线浊度监测；浊度＞200NTU 联锁开启回流阀，废水回流；浊度＜150NTU，合格水输送至零排放废水缓存池。澄清池底部污泥→污泥输送泵（气动隔膜泵）→压滤机脱水，泥饼按固废合规处置。旋流器底流液（含固约 10%）→滤液水箱，返回脱硫制浆系统回用。

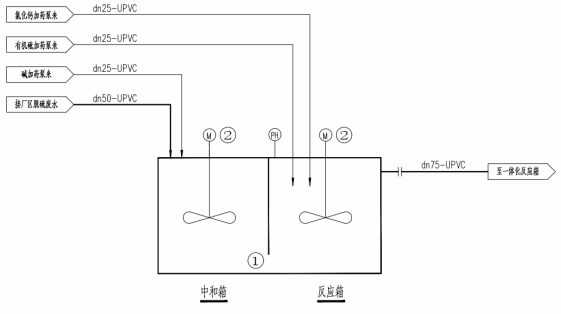
3.2 脱硫废水零排放系统工艺流程

零排放系统分为乳化液制备、钝化液配制、烟道喷雾蒸发三个工序。

1）乳化液制备：团聚复合剂粉体由粉料仓经螺旋计量下料机送入乳化罐，与工艺水在乳化剪切泵作用下均质乳化，配制 0.1%～0.2%高浓度乳化液。

2）钝化液配制：预处理合格脱硫废水进入废水缓存池，废水输送泵将脱硫废水与乳化液按照体积比 9∶1 送入静态混合器，进入混合罐搅拌稀释，配制 0.1～0.3‰钝化工作液。

3）烟道喷雾蒸发：钝化工作液经脱硫废水喷雾泵输送至喷枪计量分配模块；0.3～0.5MPa 压缩空气接入双流体喷枪；混合液雾化后喷入 SCR 后-空预器前高温烟道完成蒸发，盐尘被电除尘器捕集至灰库。工艺路径简式：下料仓→螺旋下料机→乳化罐→乳化输送泵→静态混合器→混合罐→脱硫废水喷雾泵→双流体喷枪→高温烟道蒸发，析出的固态盐尘随烟气流动被电除尘器捕获，最终进入灰库。如图 1。



Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文| 刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

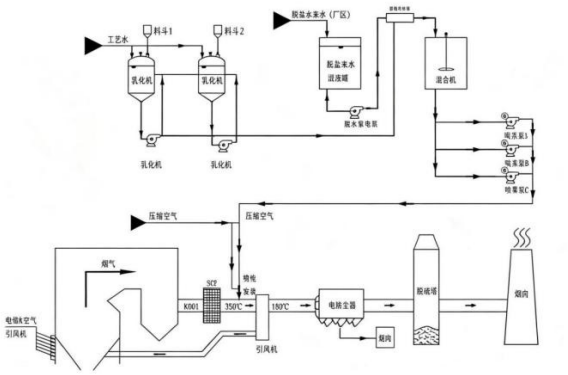


图 1　脱硫废水零排放系统工艺流程图

4 系统运行控制

4.1 预处理系统运行控制

第一，系统启动流程。1）启动废水旋流单元，投入液位联锁，旋流给料罐、废水收集箱按照液位自动启闭进料阀门。2）依次投运废水收集箱、一体化设备、中和-反应箱、清水箱搅拌器。3）启动废水提升泵，系统联锁启动粉料加药机；一体化药剂投加量控制 0.3～0.5kg/t 废水，变频设置 A 模式，根据进水流量自动调节加药频率。4）污泥处置：澄清池累计进水 40～50t 启动压滤机，单次压滤周期约 60min；压滤机支持就地手动、就地自动、DCS 远程三种控制模式；压紧压力 22MPa，进料压力不大于 1.2MPa。

第二，关键液位及水质联锁保护。1）废水旋流给料罐液位＜0.05m，保护停止旋流给料泵；液位＞1.7m 保护关闭进料阀。2）废水收集箱液位＜0.5m，保护停止废水提升泵。3）清水箱液位＞3.7m，保护停止废水提升泵。4）清水出水浊度＞200NTU 联锁开启不合格水回流阀；浊度＜150NTU 切向零排放缓存池供水。

4.2 零排放系统运行控制

投运前完成设备、液位、仪表、阀门检查；停用 7 天以上电机启动前测试绝缘合格；依次投运压缩空气系统、乳化制备系统、团聚钝化液制备系统、喷雾喷射系统，定期执行管道清洗程序，避免管路结盐堵塞。

1）乳化制备顺控：乳化罐进水至设定液位，开启剪切泵冷却水；依次启动乳化输送泵、乳化剪切泵；螺旋下料机投加团聚粉体，单次下料 0.3kg；乳化循环搅拌 15min 完成配制；乳化罐液位低于 100mm 触发制备顺控,参数可在 DCS 画面调整，2 套乳化罐一用一备。

2）团聚钝化液制备：乳化液与脱硫废水体积配比 1∶9；0.3m³ 乳化液搭配 2.7m³ 脱硫废水；混合罐液位低于 600mm 自动触发制备；液位到达 1850mm 联锁停止废水、乳化输送泵，防止满罐溢出。

3）喷雾系统投运：启动允许条件：混合罐液位＞500mm；压缩空气母管压力≥0.3MPa；喷枪前烟气温度满足对应负荷阈值。打开储气罐出口阀、混合罐出口阀；启动脱硫废水喷雾泵，调节频率保证喷雾母管压力≥0.35MPa；开启喷枪电磁阀，按照机组负荷设定总喷水量。单台机组负荷-喷量对应关系见表 1。

表 1　机组负荷与脱硫废水喷射量对应关系

机组负荷 /MW	喷枪前烟气温度 /℃	单台机组喷射量 /（$m^3 \cdot h^{-1}$）	投入喷枪数量 /支
130～150	＞315	0.6	8
150～200	＞325	1.2	8
200～250	＞335	1.6	8
250～300	＞345	2.0	8

喷雾系统停运流程：停止喷雾泵→关闭喷枪电磁阀→延时 30s 关闭废水母管调节阀；系统停止 15min 后再关闭储气罐出口电动阀。运行约束：严禁无压缩空气压力投运喷枪；喷枪液路压力 0.12～0.25MPa，气路压力 0.30～0.45MPa；单支喷枪流量 100～250L/h；各喷枪流量偏差大于 50L/h，需要就地手动调阀均衡流量。4）管道清洗程序：喷雾泵累计运行 72h 自动启动管道冲洗，冲洗时间 30min；停机少于 3d 需要清水冲洗排污；停机超过 3d 冲洗完成后排空全部管路积液，防止药剂、盐结晶堵塞喷嘴管路。

4.3 DCS 控制系统

整套零排放系统接入脱硫 DCS 系统，具备就地、远方两种操作模式；远方模式分为手动点操和顺控自动。顺控功能包含自动模式、手动单步、暂停、复位、跳步请求。画面状态标识：阀门红色代表开、绿色代表关；泵电机红色代表运行、绿色代表停止。设备切远方操作前，就地控制柜切换把手必须置于“远方”，就地模式下 DCS 指令无效。

5 运行经济性分析

本项目预处理改造新增药剂主要包含 32%氢氧化钠溶液、TMT-15 有机硫、氯化钙；整套预处理+零排放系统吨水综合运行成本约 22.08 元/m³；日最大处理 120m³ 废水，每日运行总费用约 2649.67 元，其中药剂费用占主要部分，电耗占比较小。本项目采用主烟道高温喷雾蒸发零排放工艺，充分利用机组 SCR 与空预器之间高温烟气余热实现废水蒸发，无需配套建设蒸发结晶设备、无需额外消耗蒸汽热源，相较于传统 MVR、多效蒸发结晶工艺，显著降低设备投资、土建投入与系统能耗。同时通过前端预处理深度脱除重金属、氟化物，保障进水水质稳定，有效规避喷枪结晶、管路堵塞及烟道腐蚀风险。

6 结论

云南某电厂 2×300MW 机组针对原有脱硫废水单一药剂处理工艺去除重金属、氟化物能力不足、出水易超标等问题，通过增设中和-反应二联箱预处理单元，采用氢氧化钠、TMT-15 有机硫、氯化钙组合分级处理工艺，实现废水中汞、镉重金属及氟化物的高效稳定去除，改造后出水水质完全满足 DL/T 997-2020 标准，彻底解决原系统水质超标隐患。系统后端配套主烟道团聚协同高温喷雾蒸发零排放工艺，依托锅炉高温烟气余热完成废水完全雾化蒸发，废水盐分随烟气粉尘经电除尘器捕集进入粉煤灰系统，实现脱硫废水完全零外排。投加的团聚复合剂可同步实现氯离子钝化与烟气 SO_3 脱除，有效抑制烟道低温腐蚀、缓解空预器硫酸氢铵结盐堵塞问题，兼具环保治理与设备防护双重效益。该改造方案工程量小、无需新增大型蒸发结晶设备、能耗低、改造性价比高，可为同类型燃煤机组脱硫废水零排放提供技术借鉴。

[参考文献]

[1]李建惠,刘文桦. 基于烟气余热梯级利用的燃煤电厂脱硫废水零排放工艺及 CFD 模拟研究[J].能源工程,2026,46(2):60-67.

[2]张文斐,高沛荣,马翼超,等. 从达标排放到高值回用：燃煤电厂脱硫废水零排放技术现状与展望[J/OL].化工进展,1-16.

[3]何江丹. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术现状与应用[J].应用能源技术,2025,(11):82-84.

[4]蔡晨. 燃煤电厂废水处理及脱硫废水零排放技术探讨[J].当代化工研究,2025,(22):102-104.

[5]吴健思. 燃煤电厂脱硫废水的零排放处理工艺分析[J].皮革制作与环保科技,2025,6(20):117-119.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.