

# Research on the Deep Treatment Process of Wastewater from Wet Desulfurization in Thermal Power Plant

Zhengjun Sang

Liaoning Datang International Shendong Thermal Power Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110172, China

## Abstract

The wet flue gas desulfurization (WFGD) process is widely used in China's coal-fired power plants to achieve sulfur dioxide removal. The accompanying wastewater is strongly alkaline and rich in dissolved sulfides, dissolved salts, and trace metal ions. The fluctuating water volume and complex water quality pose challenges to plant-level water resource recycling and end-of-pipe discharge control. Based on China's power plant operation practices and recent research, this paper systematically reviews the water quality characteristics and treatment challenges of WFGD wastewater, proposes and compares several implementable advanced treatment pathways. It focuses on five technical routes: pretreatment, concentration and separation, membrane and electrochemical approaches, advanced oxidation, and crystallization/curing recovery. The paper details the process layout, key operational parameters, and operational management points for each route, aiming to provide actionable process solutions for power plants to achieve efficient reduction and resource utilization.

## Keywords

thermal power plant; wet desulphurization wastewater; advanced treatment process; investigation

# 火力发电厂湿法脱硫废水深度处理工艺探究

桑政军

辽宁大唐国际沈东热电有限责任公司, 中国·辽宁 沈阳 110172

## 摘要

湿法脱硫工艺广泛应用于中国燃煤电厂以实现二氧化硫去除, 其配套产生的废水呈强碱性并富含溶解性硫化物、溶解盐类与微量金属离子, 且水量波动及水质复杂性给厂级水资源循环和末端排放控制带来挑战。本文立足于中国电厂运行实践与近期研究, 系统梳理湿法脱硫废水的水质特征与处理难点, 提出并比较若干可落地的深度处理路径, 着重从预处理、浓缩分离、膜与电化学途径、先进氧化以及结晶/固化回收五条技术路线展开, 详述各路线的工艺布置、关键操作参数与运行管理要点, 以期电厂实现高效减量与资源化利用提供可实施的工艺方案。

## 关键词

火力发电厂; 湿法脱硫废水; 深度处理工艺; 探究

## 1 引言

随着国家对生态环境保护日益严格的要求, 火力发电厂燃煤机组烟气必须脱硫处理后达标排放, 因此也面临脱硫废水的处理排放问题。通常所采用的常规脱硫废水絮凝、沉淀、澄清处理工艺, 处理后的脱硫废水仍然具有很高的含盐量, 这不仅难以达到回用标准, 同时其排放会增加下级污水处理厂的运行负荷<sup>[1]</sup>。对此, 下文将基于文献资源查阅与多年工作经验重点围绕火力发电厂湿法脱硫废水深度处理工艺提出几点看法与建议, 希望能够给行业中其他从业者工作开展提供一定有益参考。

【作者简介】桑政军(1982-), 男, 中国辽宁朝阳人, 本科, 工程师, 从事电力企业生态环境保护、碳排放碳达峰中和研究。

## 2 火力发电厂湿法脱硫废水概述

湿法石灰石-石膏或石灰-石膏脱硫系统在吸收塔中以碱性吸收液捕捉  $\text{SO}_2$  并生成石膏或硫酸盐产物, 同时伴生脱硫循环补给水及洗涤废水。该类废水的典型理化特征包括高电导率、高悬浮固体含量、可溶性硫化物与硫酸盐、显著的钙镁硬度, 以及铁、镁、锰等过量溶解性金属离子; 有机物含量通常较低但在某些工况下存在可氧化游离有机物或工程用添加剂残留。水量与水质受燃料组成、脱硫剂配比、塔内循环策略和旁路排放管理影响, 出水往往呈高盐、高碱与高化学需氧量耦合状态。工艺处理的主要难点在于高盐导致的膜污染与结垢、硫化物与铁离子在后续浓缩过程中的沉淀与毒化, 以及在追求零排放或高回用率时对浓缩水处置的能耗与固化处置的成本问题<sup>[2]</sup>。基于上述水质特征, 深度处理需同时兼顾前端抑制与后端浓缩固化的耦合设计, 优

化化学投加、沉降与膜系统的协同运行,以降低系统整体的运行风险与处置成本。

### 3 火力发电厂湿法脱硫废水深度处理工艺探究

#### 3.1 化学沉淀与超滤耦合预处理路径

在火力发电厂湿法脱硫废水化学沉淀与超滤耦合预处理路径中,第一,精细化药剂投配与分段 pH 控制方案:基于进水流量与在线化学需氧量、电导率和铁铝浓度曲线实施流速响应的药剂计量,先在弱碱 pH8.0~9.0 区域以石灰乳或碳酸钠将  $\text{Fe}^{3+}$  及部分  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  转化为氢氧化物沉淀并添加低用量聚合氯化铝以形核,再提升 pH 至 9.5~10.5 促使  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  以碳酸盐或氢氧化物形式沉降,投药比例通过在线粒度与浊度反馈闭环修正以降低过投。第二,固液分离与渣样检测,采用带式压滤联合离心脱水的串联浓缩流程,压滤端设置两级滤室并配套在线滤饼含水率与抗压速测,脱水渣按批次抽样做总硫、可溶态重金属及游离石膏含量分析以判定直接固化或需添加固化剂的处置路径,同时对滤液实施回流稀释比控制以稳定系统负荷。第三,关于超滤单元选型与运行维护,优先采用耐氯耐污染的陶瓷中空纤维或表面亲疏水经交联处理的聚偏二氟乙烯膜,装置设计采用模块化并联以便局部反洗与在线化学清洗,运行策略包括基于跨膜压差阈值的定时低压反冲与周期性化学洗脱,化学清洗配方以酸碱交替并含螯合剂以去除金属胶体并恢复通量。第四,为联动控制与反洗水回收体系,构建以浊度、电导率与 pH 为主的多参数联动控制器实现混凝投加与膜清洗联动触发,反洗水经初步沉淀回流至缓冲调节池再进入沉淀单元以最大限度回收可沉物并降低外排量,系统同时设置在线报警与自动切换旁路以防膜污染突发事件。

#### 3.2 膜浓缩—反渗透与膜结晶联用工艺

膜浓缩与反渗透体系在追求高回用率中具有关键地位,其对盐分和溶解性污染物的截留能力决定了清水回用比例,具体包括:第一,在预处理与纳滤截留联接设计上,先行实施混凝助沉与化学软化以有效去除  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  及胶体悬浮物,随后采用高截留率复合膜列的纳滤实现一价离子与高分子有机物的选择性分离,纳滤浓水应直接进入再浓缩单元以避免在 RO 端产生不可逆结垢,纳滤运行采用恒通量运行策略并结合在线电导与压差监测,实施差压反洗与低剂量絮凝剂清洗。第二,反渗透浓缩体系采用两级串联布置,第一级为中压高回收段以产出满足锅炉补给或循环补水的高质量穿透水,第二级为高压低回收段将浓度推升至结晶前端要求的过饱和区,系统配置能量回收器并采用变频泵组,沿程注入脉冲式聚合物阻垢剂并结合定量投药与周期性酸碱交替清洗以控制可溶盐析出。第三,对 RO 浓缩液实行膜结晶或膜蒸发耦合,工艺以控溶度诱导晶核并以剪切场与沉积抑制层促成可控原位成核,结晶单元配备在线饱和度与粒径检测,并根据反馈调整再循环比和结晶剂投加,分离出的晶体

经级联洗涤、离心脱水及热风干燥后送固化或原料回用,蒸发段可选用 MVR 或多效换热以降低热耗<sup>[1]</sup>。第四,系统控制与运维要求建立在线进出水温度、电导率、PH 及颗粒计数的多参数监测网络,并以产水电导、单位能耗与渗透压为指标构建寿命模型以指导维护,运行中实施自适应投药与阶段性反洗并开展在线固相取样,浓缩固体按矿物相分类后经化学预处理、固液分离与稳定化处置并记录批次。

#### 3.3 电渗析 / 电化学浓盐分离与离子选择性回收路径

基于进水离子组分与结垢倾向,设计交替堆叠的一价选择性阴阳离子膜电渗析单元,采用带电密度不同的膜组合实现  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  与金属阳离子的分级迁移,堆栈电阻通过隔室串并联与膜面积配比匹配,堆栈设计包括膜面积分配与隔室厚度优化以降低极化电阻并采用分段进水回流以均匀传质,运行以恒电流与多点电位监测为控并以间歇反极性与酸碱交替化学清洗抑制极化与结垢,同时配套在线硬度与碳酸根速测以指导纳滤或软化预处理并实施低剂量螯合剂投加。针对高硫酸盐浓缩液,构建电化析盐—电凝耦合单元,采用可调脉冲电流在耐腐电极表面促进硫酸根物相转化并诱导  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$  沉淀富集,电极材料选用钛基涂层或镍合金并辅以在线电化学阻抗谱分析判断钝化,以电化学再生程序与固液分离装置保障膜侧进入物相可控。系统层面耦合高效直流电源与双向能量回收装置,并设在线温度、电导及 pH 闭环校正回路及过饱和度预测模型以优化电场与流速并降低欧姆损失,能量回收采用双向逆变与再生供电策略并以实时能耗模型评估单位产盐电耗与系统回收率。电渗析浓盐经硬度调控与纳滤预处理后,采用限定电场与选择性膜排列将氯化钙、硫酸钠与氯化钠富集分流,分相后进入种子床或蒸发结晶单元以控制过饱和度并回收可利用盐品,离子交换塔采用可电化学再生的强酸强碱树脂并结合低温蒸发或流化床干燥处置沉渣,结晶与离子交换环节重视种子控制、CGS 监测与树脂再生回路的化学耗材最小化以保证产物纯度与回用水率并设失效报警与在线取样留样制度。

#### 3.4 先进氧化与化学强化处理结合的有机物与微量污染物去除

尽管火力发电厂湿法脱硫废水中有机物总体含量不高,但存在的表面活性剂、工艺添加剂残余及微量有机污染物对后续膜系统和生物处理构成风险,先进氧化工艺可作为靶向降解手段,具体为:第一,根据目标污染物氧化还原电位与基质电导率,构建分级复合 AOP 流程以实现选择性裂解,先在试验段筛选光催化剂晶相和比表面并以 LC-MS 鉴定降解中间体,再以臭氧消耗动力学量化臭氧当量并据此制定 Fenton 投加与 pH 控制曲线,工程段采用光催化—臭氧或臭氧-Fenton 串并联以兼顾芳烃与表面活性剂的裂解路径。第二,对于富含游离硫化物或还原性金属的基质,先行设置气力曝气或微纳米气泡氧化器以将硫化物氧化为硫酸盐并稳定铁态形态,必要时投加缓冲剂保障 Fenton 体系 pH 并减小

活性自由基耗损,预处理后增设精密过滤以降低悬浮物对催化剂及膜的机械负荷。第三, AOP 出水应开展分子量分级与生物可降解性分析并据此设计生物活性炭或 MBR 衔接策略,若 BOD<sub>5</sub>/COD 提升不足则在臭氧或紫外段后串接高比表面积活性炭柱以截留低分子极性产物并提供生物附着位点,吸附床再生宜采用低温蒸汽或碱洗以延长材料寿命并回收富集有机物<sup>[4]</sup>。第四,运行监控基于 TOC、UV<sub>254</sub> 与臭氧消耗速率的联动在线控制并建立去除效率与能耗的等效模型以优化单元负荷,在线仪表按标准物质定期互校并在运维手册中明确采样频次与分析方法,膜段设置可变回流与程控冲洗以抑制不可逆污染并将 AOP 副产物纳入在线风险检测,同时将试验与运行数据入库以供放大比选与经济性评估,建议在工程放大前开展不少于六个月的连续运行以验证长期稳定性与药剂消耗曲线。同时将在线色谱与光谱溯源方法写入质控手册并定期开展膜通量与截留率可靠性试验,并建立 AOP 副产物溯源与处置流程以满足回用或排放要求。

### 3.5 蒸发结晶与固化处置并举的浓缩水终端处置

在脱硫系统中对高浓缩水及回收剩余母液采取蒸发结晶与固化并举的终端处置,应以热力经济性与环境风险并重的工程化流程为设计基点。第一,蒸发浓缩单元宜优先选用多效蒸发或机械蒸汽再压缩 MVR 系统以提高热能回用率,蒸发器前设强碱性或硫酸根控垢预处理段,通过调节 pH 并添加可逆晶核剂实现 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 及硅酸盐的选择性预结晶,减少传热面结垢并延长换热器运行周期,同时应配套在线结垢监测与自动在线清洗装置以保障系统稳定运行。第二,在蒸发器尾端布置强制冷却的脱水结晶器或气速降膜结晶器以促进晶核长大,采用种子晶再循环与晶型诱导剂控制晶体形貌,结合内部筛分级配实现晶体与母液的高效分离,所获晶体经离心脱水后进入干燥与筛选流程以便后续固化或回收。第三,对于结晶产物进行成分分流管理,对主要为石膏或可商品化氯化物组分的晶体实施固相分离并接入工

业原料回收链路,对含油、有机物或重金属的混合固体首先进行热脱水或真空干燥降低含水率,再按处置类别添加适配性固化剂如硅酸盐水泥或石灰基材料,采用配比优化与长期浸出试验确定固化体耐久性指标以满足危险废物稳定化处置标准<sup>[5]</sup>。第四,终端处置体系应与厂级能量回收回路耦合,优先回收蒸发冷凝水热能并网换热回用;废气脱硫装置对蒸发浓缩过程可能产生的 HCl 及 H<sub>2</sub>S 应设独立吸收段并在线监测;固体产物需在防渗硬化库短期贮存并按浸出标准进行常态化 TCLP 及长期稳定性评估以保证符合危险废物或一般工业固体废物处置规范。

## 4 结语

综上所述,上文基于中国火力发电厂湿法脱硫废水的水质特征与工程实践出发,提出了以化学沉淀—超滤预处理、膜浓缩与结晶联用、电渗析的离子分级回收、先进氧化的靶向净化以及蒸发结晶与固化处置并举的综合工艺体系作为深度处理路径。上述方案强调单元间的耦合与动态在线控制,兼顾降低膜污染、提高回用率与降低终端处置能耗的工程目标。针对具体电厂,应依据燃料成分、脱硫工况与厂级水循环目标定制工艺组合及运行策略,以实现切实可行的减排与资源化目标。

## 参考文献

- [1] 谈正强.燃煤电厂脱硫废水深度处理技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(4):4.
- [2] 赵德玉,崔振,王志永,等.燃煤锅炉烟气石灰石湿法脱硫废水处理技术与应用[J].煤质技术, 2023, 38(2):19-29.
- [3] 王华阳,汪勇建,戴雅欣,等.2×1050 MW机组火电厂脱硫废水深度处理工艺分析[J].计算机应用文摘, 2025, 41(3):169-171.
- [4] 丁先满.火电厂脱硫废水深度处理工艺优化设计研究[J].山西化工, 2024, 44(12):245-246.
- [5] 李正超,张燕玲,詹道平,等.湿法脱硫废水多污染物深度净化及作用机制[J].中国环境科学, 2025(6).