

# Analysis on the Zero Discharge Treatment Technology and Engineering Compatibility of Desulfurization Wastewater in Thermal Power Plants

Hui Zhou Jianyang Wang

Zhejiang Zheneng Technology and Environmental Protection Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311100, China

## Abstract

With China's ongoing ecological civilization development and increasingly stringent pollutant emission standards, thermal power plants face significant challenges in achieving clean production and green transformation. As a critical byproduct of flue gas desulfurization systems, desulfurization wastewater contains substantial amounts of sulfates, chloride ions, heavy metals, and suspended solids. Its high salinity, hardness, and low biodegradability make treatment particularly challenging. Traditional approaches predominantly rely on discharge or concentration reduction methods, which fail to achieve true "zero discharge" objectives. This study systematically reviews mainstream zero-discharge treatment technologies based on the water quality characteristics of desulfurization wastewater. The research findings provide theoretical support and technical pathways for the thermal power industry to achieve deep pollution reduction and closed-loop water resource recycling.

## Keywords

thermal power plant; desulfurization wastewater; zero discharge; membrane separation; crystallization recovery

# 火电厂脱硫废水零排放处理技术及工程适配性分析

周辉 王建阳

浙江浙能科技环保集团股份有限公司, 中国·浙江 杭州 311100

## 摘要

随着我国生态文明建设持续推进和污染物排放标准日益严格,火电厂在清洁生产与绿色转型过程中面临严峻挑战。作为烟气脱硫系统的重要副产物,脱硫废水含有大量硫酸盐、氯离子、重金属及悬浮物,其高含盐、高硬度、低可生化性等特征使其处理难度较大。传统处理方式多采用外排或浓缩减量路径,难以实现真正意义上的“零排放”目标。本文基于脱硫废水水质特征,系统梳理当前主流零排放处理技术路径。研究成果可为火电行业实现深度减污与水资源闭路循环提供理论支撑与技术路径。

## 关键词

火电厂; 脱硫废水; 零排放; 膜分离; 结晶回收

## 1 引言

在“双碳”目标和水污染防治行动计划的双重驱动下,火电行业面临更加严格的环保监管。作为控制 $\text{SO}_2$ 排放的重要环保措施,烟气湿法脱硫技术在火电厂得到广泛应用,但随之产生的大量脱硫废水成为制约系统绿色运行的关键问题。该类废水中普遍富含高浓度溶解性无机盐、重金属离子及细小悬浮颗粒,具有高硬度、高盐度、成分复杂等特点,传统的物化处理与达标排放策略不仅处理成本高、运行波动大,且难以完全消除二次污染隐患。因此,推动脱硫废水处理技术向“零排放”方向演进,不仅是行业合规发展的必然

趋势,更是实现循环经济与清洁生产的重要技术支撑。

## 2 脱硫废水水质特征与处理难点分析

### 2.1 脱硫废水的成分与污染特征

火电厂烟气脱硫系统多采用湿法石灰石—石膏工艺,过程中需大量用水对脱硫塔、除雾器及其他设备进行清洗,并对石膏脱水系统进行冲洗和排渣处理,从而产生大量脱硫废水。该类废水属于典型的高盐、高硬度、高污染负荷工业废水,其成分复杂、浓度变化大,排放水质受运行工况、石灰石品质、添加剂使用及系统操作方式等因素影响较大,具有较强的非稳定性与处理挑战性。根据实际监测数据,脱硫废水的pH值通常在4.58,000 mg/L,主要由 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等离子组成,部分电厂中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{F}^-$ 等也占有一定比例。此外,由于燃煤中含有砷、汞、硒、铅、镉等微

【作者简介】周辉(1987-),男,中国浙江诸暨人,本科,工程师,从事电厂化学研究。

量重金属元素，在脱硫系统中经吸收转移进入废水，形成毒性较强、迁移性强、稳定性高的污染因子。这些重金属不仅难以通过传统物化手段有效去除，而且会造成生物毒性风险和二次污染隐患<sup>[1]</sup>。

在有机污染方面，脱硫废水的生物化学需氧量（BOD）和化学需氧量（COD）普遍较低，BOD/COD值通常小于0.1，表明其可生化性极差，难以通过生物法进行有效降解。此类废水还常伴随较高浓度的硅酸盐、磷酸盐及有机添加剂残留物，增加了后续膜系统或热处理单元的结垢风险。值得注意的是，部分电厂在脱硫过程中添加抑垢剂、增效剂、表面活性剂等助剂，这些化学品亦可能形成难降解有机复合物，与金属离子形成稳定络合物，进一步提高了废水处理系统的负荷和运行复杂度。因此，从水质层面来看，脱硫废水属于典型的“三高三难”工业废水——即高盐、高硬度、高毒性，难分离、难回用、难稳定处理。

## 2.2 零排放处理的技术挑战

尽管近年来在国家政策推动下，火电行业已逐步探索脱硫废水的深度处理与回用路径，但在实际工程落地过程中仍面临多重技术瓶颈与运行挑战，其核心难点可归纳为以下四个方面。第一，成分复杂导致多单元耦合要求高。由于脱硫废水中盐分、硬度离子和重金属共存，其处理过程无法通过单一物理或化学手段完成，必须采用多段式串联组合工艺才能实现对不同类型污染物的协同去除。例如，钙镁离子需通过化学软化与沉淀反应去除，硫酸根与氯离子需经膜分离或蒸发工艺截留，而重金属离子则需借助螯合沉淀或吸附手段加以捕获，这对系统集成度、反应控制精度及运行稳定性均提出更高要求。第二，高浓缩比操作带来的膜污染与结垢风险。在膜浓缩段，如反渗透（RO）、纳滤（NF）或碟管式反渗透（DTRO）系统长期运行于高TDS浓度、高硬度工况条件下，极易发生膜表面无机盐结垢、有机污染或微生物膜形成等现象，导致膜通量下降、能耗升高、膜寿命缩短。同时，脱硫废水中高浓度硫酸钙、氟化钙、硅酸盐极易在膜表面或结晶器中析出，严重影响设备运行效率与维护成本。

第三，蒸发与结晶单元的高能耗与高投资特性。热处理单元如多效蒸发（MED）或机械蒸汽再压缩（MVC）虽具备较高的水回收率和盐分离效率，但其运行能耗普遍高于10 kWh/m<sup>3</sup>，设备投资与运行成本亦居高不下，且对热源系统配置（如余热锅炉、抽汽系统）有较强依赖性，限制了中小型电厂或条件一般厂区的适配性。第四，工程适配性受限于厂区多维条件。包括厂区布置紧凑程度、供能系统冗余能力、水资源回用需求、环保标准要求等。例如，若厂区无法提供稳定的中温蒸汽或电能，则无法支撑蒸发系统持续运行；若厂内缺乏中水回用场景，则高成本制得的纯水可能面临“无地可用”的资源浪费。而不同厂区的原始脱硫废水水质差异较大，需进行个性化设计与参数校核，这进一步加剧了工程实施的复杂性。

可见脱硫废水零排放工程不仅是水处理技术集成的挑战，更是能源系统优化、资源循环设计与智能运行调控的系统性课题。要实现既“达标”又“经济”的目标，必须突破当前技术碎片化、系统复杂化的瓶颈，推动多学科交叉融合与全流程协同优化。只有在全面把握水质特征与系统负荷条件的基础上，量身定制高适应性的处理方案，才能真正实现脱硫废水治理从“末端达标”向“全程闭环”的跃升。

## 3 脱硫废水零排放处理技术路径与工艺体系构建

随着环境治理标准的持续提升，火电厂脱硫废水“零排放”不仅体现为合规性的制度回应，更体现为清洁生产与资源闭路循环的战略部署。

### 3.1 脱硫废水零排放处理路径的类型化结构

目前火电行业主流零排放技术路径呈现出多样化发展趋势，不同路径间的差异不仅体现在构造方式与工艺组合上，更反映在对源水负荷的响应能力、资源转化效率以及运行经济性的差异之中。综合国内典型工程实践，可将其归纳为三类具有代表性的处理路径，即膜—热集成路径、强化化学处理路径与热烟气耦合路径如下表1。

膜—热集成路径通过将高选择性膜分离系统与高效热蒸发单元相衔接，实现对废水中主要溶解性盐分的梯级截留与高纯水的提取。膜单元通常配置DTRO（碟管式反渗透）或高压RO系统，可将水量减至原体积的20%以下，显著降低后端热处理负荷；终端蒸发与结晶部分通过MED（多效蒸发器）或MVC（机械蒸汽再压缩）系统完成水盐彻底分离，最终形成可回用蒸馏水与可收集结晶盐。该路径以其成熟度高、出水水质稳定等优势成为大型燃煤机组零排放系统的首选构型，但对厂区能源保障能力与资本投入水平提出了较高要求。强化化学处理路径则强调通过多元化的化学投加手段，对原水中的硬度离子、胶体物质与重金属离子进行深度协同去除，构建以化学软化、沉淀、混凝及氧化为主的前置处理系统，从而减轻后段膜系统污染风险，延长膜组件寿命，降低运维成本。在部分中小型电厂或原水水质波动剧烈的地区，该路径凭借其系统弹性高、单元操作简洁等优势，提供了较具经济性的技术选项<sup>[2]</sup>。但其劣势亦较为突出，主要体现在反应副产物多、污泥处置负担重及二次污染控制难度大等方面。

热烟气耦合路径主要依托火电厂锅炉尾部高温烟气资源，直接将浓缩残液进行喷雾干燥处理，废水在极短时间内蒸发为蒸汽，盐分以粉尘形式随飞灰一并捕集或沉降于灰斗。这种路径简化了传统的蒸发结晶系统构造，具备占地小、流程短的优势，适用于脱硫废水量较小、厂区热能冗余充足的特定场景。但喷雾干化过程中存在喷嘴结垢、盐分回收率不稳定等问题，对运行控制的精准性及设备防腐等级均提出了更高要求。

表 1 不同技术路径下火电厂脱硫废水零排放系统比较分析

技术路径类型	典型工艺组成	适用条件	优点	局限性
膜-热集成路径	预处理 + DTRO/RO + 多效蒸发 (MED) + 强制结晶	大型电厂、供汽稳定、水资源循环要求高	水回收率高、出水水质好、工艺成熟度高	投资成本高、能耗大、运行维护复杂
强化化学处理路径	混凝软化 + 多介质过滤 + DTRO + 自然沉降或简化结晶系统	中小电厂、原水波动大、热源不足场景	前段负荷削减明显、系统弹性好、投资较低	副产污泥量大、资源化利用率低、最终仍可能存在外排风险
热烟气耦合路径	预处理 + 浓缩 + 喷雾干化 + 烟气携盐捕集	尾气资源充足、电厂热能冗余显著、排水量较小	占地小、流程短、无需额外结晶设备	盐回收效率低、粉尘控制难、对设备耐高温耐腐蚀性要求高

### 3.2 关键工艺模块的功能逻辑与技术协同

在处理路径的总体框架下，核心单元工艺的选择与耦合策略决定了系统的运行稳定性与净化效率。通常，零排放系统由预处理、膜分离、热蒸发、结晶析盐与资源回收等环节构成，各环节之间需通过精准界面控制实现功能协同。预处理单元作为系统首段环节，主要功能在于剥离废水中的悬浮物、胶体、有机杂质及部分重金属。石灰-碱式化学软化配合高分子絮凝剂使用，能够实现对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SiO}_2$  等垢源离子的沉淀转化，并形成可滤性污泥；配合气浮、沉淀或多介质过滤等物理分离手段，有效降低入膜水浊度与硬度。预处理模块的运行稳定性直接关系到后续膜系统的压差控制与膜污染风险，是保障系统整体连续运行的基础。膜分离单元则构成了水盐分离的中枢平台，其技术选择需兼顾水质负荷、回收率目标与经济性约束。DTRO 因其抗污染能力强、组件更换灵活，适用于高浓度、高波动性的脱硫废水处理场景；而纳滤/反渗透则可用于分级截留，实现高纯水与浓缩液分流，提高系统整体回用效率。在此环节中，通量调控、膜面剪切强化、周期性化学清洗程序的设置，是防止长期运行通量衰减与系统失稳的关键<sup>[1]</sup>。

蒸发与结晶模块作为末端控制单元，其核心任务是完成对浓缩母液中盐分的彻底析出并实现终端水的封闭回收。多效蒸发器通过级联换热机制提升热能利用效率，MVC 系统则通过蒸汽压缩循环进一步降低单位水回收能耗。在结晶单元中，强制循环结晶器可实现对硫酸钙、氯化钠等盐类的精准析出，并通过分级过滤、离心脱水等手段完成物相提纯。为提升结晶盐的资源化价值，部分系统已探索与建材、化工、

道路除冰盐等下游产业链对接，形成工业副资源的跨界利用模式。可以发现火电厂脱硫废水零排放技术体系已从工艺单元堆叠阶段迈入系统协同与资源化联动阶段。其工艺路径的合理选择与单元构造的精密协同构成了支撑系统长期稳定运行的基础逻辑，亦为后续规模化复制与跨区域适配奠定了可推广的工程模型。

## 4 结论

火电厂脱硫废水零排放是实现绿色低碳发展的关键环节，其核心在于通过多段耦合工艺构建水-盐-能协同循环体系。当前主流技术路径已具备工程化条件，但系统集成复杂、投资高、运行能耗大仍是制约因素。通过案例分析可见，选择适宜的预处理、膜分离与结晶工艺组合，并结合厂区能源条件与资源利用需求优化系统设计，是提升工程适配性与经济可行性的关键。未来，应在膜材料革新、低碳热处理、智能运行与副产物资源化等方向持续发力，以构建更加高效、低碳、智能的废水零排放解决方案，为火电行业生态转型提供可持续支撑。

### 参考文献

- [1] 毛耀伟,陆方荣,梁太阳. 电催化氧化技术在火力发电厂脱硫废水处理中的应用[J]. 粘接, 2025, 52(08): 135-138.
- [2] 魏巍,任淑鹏. 火电厂脱硫废水零排放技术发展现状及展望[J]. 硫酸工业, 2025, (03): 1-4.
- [3] 胡远翔,李永立,涂孝飞,等. 脱硫废水软化过程中有机物对硫酸钙结晶的抑制机理[J/OL]. 环境工程学报, 1-11 [2025-08-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5591.X.20250624.1525.010>.