

火力发电厂脱硫废水零排放技术优化路径与工程实践研究

克立方

国能水务环保有限公司 北京 100039

摘要：火力发电作为我国电力供应体系的主体，长期以来为社会发展提供了稳定的能源保障。在火电机组运行过程中，尤其是在烟气脱硫环节中所产生的脱硫废水，其高盐、高硬度、含重金属与有机物的复杂水质特性，对环境构成了显著压力。传统的达标排放策略已难以满足“节水优先、全过程控制”的环保要求，尤其在《火电厂污染物排放标准》(GB13223)与《污水综合排放标准》日趋严格的大背景下，推动脱硫废水实现“零排放”成为行业的必然趋势。本文从脱硫废水的水质特征出发，系统梳理现有脱硫废水处理与零排放主流技术路径，深入剖析蒸发结晶、膜分离、浓缩干化等技术的工程适应性与运行效果，并在此基础上提出多技术耦合、流程集成优化、智能运行控制等路径建议，以期行业提供可复制、可推广的技术优化策略。

关键词：火力发电厂；脱硫废水；零排放技术

前言：

近年来，随着《火电厂污染物排放标准》《水污染防治行动计划》等政策法规的陆续出台，火力发电厂污染控制标准日趋严格，“脱硫废水零排放”已从环保治理的战略目标，转化为企业环境合规与绿色发展的现实刚需。同时，在“双碳”战略引领下，如何实现工业废水从“末端治理”向“过程优化”和“资源回收”转变，成为环境工程领域的重要研究方向。传统的达标排放技术难以满足现阶段的环保要求，推进高效、低耗、智能的脱硫废水零排放技术体系已成为火电行业提升生态效益与经济效能的突破口。目前，脱硫废水零排放已从早期的工程探索阶段，逐步向规模化推广和系统集成优化阶段过渡，亟需通过技术细化、路径优化与工程实践的融合研究，为行业提供高适应性、高可复制性的系统解决方案。在此背景下，深入探讨火力发电厂脱硫废水零排放的技术优化路径与工程应用实践，具有显著的理论价值与现实意义。

1. 火电厂脱硫废水水质特性与处理难点

1.1 特性

火力发电厂在进行烟气脱硫过程中，普遍采用石灰石—石膏法作为主流脱硫技术工艺，其间所产生的脱硫废水主要来自于吸收塔浆液系统的排污水。该类废水具有典型的“高盐、高硬度、高腐蚀性、高悬浮物含量”的特征，水质成分复杂且波动性大。具体而言，废水中含有大量的钙、镁、氯离子和硫酸根等无机离子，同时由于石膏副产物的析出不完

全，往往还夹杂有石灰石残渣和石膏颗粒，造成悬浮物浓度偏高。此外，废水中常伴随有微量重金属元素，如砷、汞、硒、镉等，这些污染因子即便含量极低，在环境中也可能具有显著毒性。此外，废水呈中性至弱酸性，pH值常在5~7之间，具备一定腐蚀性，对后续输送和处理设施材料提出了更高的要求。因此，脱硫废水既不能直接排放，又不能简单依赖传统物化手段加以净化，必须通过多环节、多功能集成技术路径加以系统处理，以达成零排放目标。

1.2 脱硫废水处理难点

针对火电厂脱硫废水的复杂水质，其处理过程中面临多项技术难点与系统性挑战，废水中的高盐含量特别是高浓度氯离子，对膜分离系统和金属设备具有强腐蚀作用，极易造成膜组件性能衰减和金属管道穿孔，影响运行稳定性和使用寿命。其次，高硬度离子（主要为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ）在浓缩过程中极易形成垢类沉积物，导致设备结垢堵塞，严重影响膜通量与蒸发效率，需设置有效的前端软化处理环节。第三，废水中微量重金属和亚硫酸盐等有害离子的去除效率要求极高，而传统沉淀或吸附法对低浓度毒性组分处理效果有限，易造成毒性物质残留或转移风险。此外，废水水量虽相对较小，但瞬时水质波动剧烈，系统运行难以保持连续性和均衡性，特别是蒸发结晶系统受进水浓度变化影响较大，极易引发运行失稳，整体零排放系统投资高、能耗大、运行复杂，尤其在中小火电厂实施过程中经济适应性较差，缺乏稳定回报机制，制约了大规模推广。

2. 现有脱硫废水零排放主流技术分析

2.1 高温闪蒸结晶（MVC/VCE）技术

高温闪蒸结晶技术是目前实现脱硫废水零排放的核心路径之一，主要依赖热蒸发过程将废水中的水分汽化后冷凝回收，同时将溶解盐类以固体形式析出，从而实现“水回用+固体转移”的处理目标。其中，常用工艺形式包括机械蒸汽再压缩（MVC）和多效蒸发（VCE）。MVC 系统通过压缩蒸发器产生的二次蒸汽，提高其热焓后回流换热器加热原水，具备较高的能效比，适用于中小规模废水量场景；而 VCE 则依赖多个蒸发单元间的热能梯级利用，适合较大规模的连续性处理场景。在运行过程中，该技术对废水的预处理要求较高，特别是钙、镁离子的预除必须有效，否则易导致蒸发器换热面严重结垢，影响换热效率与系统稳定性。此外，蒸发器材质需具备高耐腐蚀性能，如采用钛合金或超级双相不锈钢，以应对氯离子和高温工况的协同腐蚀挑战。结晶阶段则通过冷却与过饱和控制促使盐类析出，并通过离心分离、干化等设备实现固体回收。

2.2 膜法（RO+NF+EDR 等）

膜法是火电脱硫废水零排放系统中最具发展活力的技术路径之一，因其具有模块化程度高、运行稳定性好和占地面积小等优势而广泛应用。目前常见膜法组合包括纳滤（NF）、反渗透（RO）和电驱动再生系统（EDR）。在典型工艺流程中，首先通过预处理单元（如絮凝沉淀、超滤）去除悬浮物和部分重金属，随后进入 NF 系统，纳滤主要截留高价离子如 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} ，有效减轻后续 RO 膜结垢风险；RO 系统则对单价离子如 Cl^- 、 Na^+ 进行深度截留，回收大部分可利用水资源，其回收率可达 70%~85%。对于 RO 浓水部分，为进一步减少液体排放量，可通过电渗析反向（EDR）技术进行再浓缩，或导入蒸发结晶系统终端处理。然而，该类技术也存在膜污染、膜寿命受限等难题，特别是脱硫废水中易结垢组分和氯离子的腐蚀性对膜材质提出更高要求。因此，工程上往往需引入阻垢剂、周期性清洗程序（CIP）以及在线监控系统（如 SDI 值监测）以保障系统连续运行。此外，膜系统的能耗集中于高压泵驱动部分，需合理设计压力分段和能量回收装置（如能量回收涡轮）以降低运行成本。

2.3 浓缩干化系统

浓缩干化系统是一种以自然蒸发或低能耗辅助蒸发为核心手段，实现脱硫废水逐步浓缩并固化处置的零排放路

径，尤其适用于西北、华北等干旱地区的火电厂。该系统通常包括浓缩池、蒸发塘和干化场三大单元，其中浓缩池通过自然沉降和阳光辐射，使水分不断蒸发并提升盐分浓度；高浓度液体随后导入蒸发塘继续浓缩，当溶液达到过饱和状态时，部分盐类开始析出；最终，浓缩残液或晶体进入干化场自然风干，形成可运输、可填埋或部分可资源化的固体副产物。在技术实现层面，该系统对地形、气候条件要求较高，例如要求年蒸发量远大于降雨量，并需防止因风沙、雨季等造成二次污染。运行过程中，为防止底部渗漏，蒸发塘与干化场必须采用高密度聚乙烯（HDPE）防渗膜和导排系统，并配置集水井以收集溢流水回流再处理。此外，为提高蒸发效率，可辅以喷雾塔、黑色覆盖材料、浅层布液装置等增强措施。该系统优点在于投资低、运维简单，但其周期长、受气候波动影响显著，且处理负荷不适宜过高。因此，通常作为中小电厂零排放的末端处理或大系统中的“辅助缓冲段”存在，具备一定的灵活性与适应性。

2.4 多技术耦合与协同处理

在脱硫废水零排放系统中，单一技术路径往往难以同时兼顾处理深度、能效效率与经济适应性，因此，多技术耦合已成为实际工程应用中的主流发展趋势。这种协同处理模式通过将预处理、膜法、热法与干化系统有机整合，在保障处理效果的同时，优化各单元间的能量与物质流动，提高整体系统运行的协同性与冗余性。典型的组合如“化学软化+NF/RO+MVR”，其中软化段负责去除硬度与部分重金属，NF/RO 系统高效回收水资源，而高盐浓水则进入 MVR 系统进一步浓缩并结晶析盐。通过这种技术组合，系统不仅减少了蒸发负荷、降低能源消耗，同时提升了膜系统的运行寿命与出水稳定性。在工程实施层面，耦合系统需高度重视水质平衡控制，如在膜系统出水端设置调节池，缓冲水质波动；在热法系统入口前加入防垢剂并实施定期排污策略，减轻设备结垢风险。此外，智能控制系统的引入也尤为关键，通过构建基于 PLC 与 SCADA 的自动化平台，实现对各单元运行状态、能耗指标、药剂投加等关键参数的实时监控与协同优化。

3. 火力发电厂脱硫废水零排放技术优化路径

3.1 构建“源-网-端”全过程水质梯级控制体系

传统脱硫废水零排放处理思路大多聚焦于终端集中处理系统，忽视了源头水质变化及输送过程中水质波动对系统

稳定运行带来的深层影响。为实现更加高效与可控的处理效果，应从源头治理出发，构建“源-网-端”一体化的水质梯级控制体系。在“源”端，即脱硫系统浆液排放点，应采用定量定质排放策略，设置多点采样与在线检测设备，实时掌握废水中硬度离子、TDS、pH 等关键指标，并通过调节脱硫工况实现预处理负荷前移。在“网”端即输水网络中，可引入废水均质缓冲池和分布式调节池，将不同工况下的废水进行动态混合与水质平衡，减少膜系统和热法系统的负荷冲击；同时，管网材质应优选具有抗腐蚀与抗沉积性能的复合材料，防止结垢积泥影响输送效率。在“端”部处理系统中，应设置多级调节机制与旁路流程，以应对废水短时超标、浓度突升等波动情况，提升系统的韧性与响应速度。

3.2 推动余热驱动的热法系统能效再优化

在目前热法技术（如多效蒸发、机械蒸汽再压缩）主导的零排放实践中，高能耗一直是制约其推广应用的核心问题。因此，推动以电厂余热为驱动源的热法系统优化路径，不仅可大幅降低单位处理能耗，还能实现厂区热能的梯级利用与价值提升。在现有热法系统中，常规采用蒸汽加热器或电加热器作为能量输入源，这种方式虽控制灵活，但耗能成本高，且对机组负荷变化高度敏感。而通过对汽轮机抽汽、凝结水系统或烟气余热进行系统性整合，可实现低品质热能的“就地就近”回收。例如，可将中低压缸抽汽引入热交换单元，为预蒸发段或浓缩段供热；或利用锅炉尾部烟道中尚未回收的显热，设置热管换热器为前端加热模块提供热源。此外，为提高热能利用效率，可采用板式换热器与管壳式热交换器串联设计，实现高温高效换热与低温余热利用的多级热回收。

3.3 引入“预测-调控-反馈”式智能运行平台

在多技术集成、系统复杂度高的零排放处理系统中，如何实现各单元间的运行协调与效能最优，成为工程实践中亟需解决的问题。传统依赖人工监测与固定参数运行的模式，难以适应复杂多变的废水水质特性与处理负荷。而引入基于大数据与人工智能的“预测-调控-反馈”式智能运行平台，将成为推动技术优化的重要方向。该平台以实时在线监控为基础，利用光谱法、水质电极、智能流量计等设备获取各关

键节点的水质、水量、温度、电导率、能耗等数据，结合历史运行数据训练的 AI 模型进行趋势预测，如预测膜污染趋势、蒸发器结垢风险、盐析速率变化等，从而提前调整运行参数。调控模块则通过 PLC 控制逻辑，根据预测结果智能调节泵速、投药量、加热温度或反冲频率，实现系统动态优化运行；反馈模块则将实际运行效果回传至模型中进行算法修正与自学习迭代，逐步提升系统自适应能力。该平台还可设定处理目标权重（如能耗最低、水回收率最大、药剂投加最小等），实现多目标决策优化。

4. 结语：

在火力发电行业迈向绿色转型与高质量发展的进程中，脱硫废水零排放技术的演进不仅体现了对环境合规的回应，更是推动系统性技术革新与资源高效利用的关键窗口。本文围绕脱硫废水复杂水质特征，深入探讨了当前主流处理技术的工程逻辑、协同路径与优化机制，并在系统集成、能效利用、智能控制等层面提出可实施的优化方向。可以看出，脱硫废水零排放不应被理解为孤立的终端治理任务，而应放置于发电企业能源梯级利用、水资源循环、智能运行调度乃至碳排控制的综合视角之下，从“被动达标”转向“主动优化”，构建起面向未来的清洁能源支撑体系。

参考文献：

- [1] 丁韶南. 火电厂脱硫废水的处理及其效果 [J]. 山西化工, 2024,44(05):254-257.
- [2] 颜士杰, 孙磊. 电厂脱硫废水资源化利用工艺 [J]. 山西化工, 2024,44(04):268-270.
- [3] 栾九峰. 基于总氮处理技术的火力发电厂湿式烟气脱硫废水处理办法 [J]. 清洗世界, 2024,40(03):1-3.
- [4] 庞振东, 高良敏, 查甫更, 等. 混凝法对火力发电厂脱硫废水悬浮物粒径分布的影响研究 [J]. 当代化工研究, 2023,(24):49-51.
- [5] 罗京胜. 滨海火力发电厂末端高含盐水综合利用技术研究及应用 [J]. 清洗世界, 2023,39(10):1-3.

作者简介：

克立方（1982—）男，汉族，本科，河北唐山人，助理工程师，专业研究方向为电厂水处理。