

# 火电厂脱硫废水零排放技术路线比较与经济性分析

刘海洋

大唐内蒙古多伦煤化工有限责任公司 内蒙古锡林郭勒 027300

**摘要:** 随着环保法规日益严格和水资源日益短缺,火电厂脱硫废水“零排放”已成为行业发展的必然趋势。本文旨在对当前主流的火电厂脱硫废水零排放技术路线进行系统比较,并重点分析其经济性。通过对预处理、浓缩减量、固化处置等关键环节的技术特点、适用性及优缺点进行梳理,重点对比了蒸发结晶(如多效蒸发MED、机械蒸汽再压缩MVR)、烟道蒸发等不同技术路线的投资成本、运行成本及综合经济效益。研究表明,不同技术路线在处理效果、稳定性、能耗及成本方面存在显著差异,且经济性受电厂具体条件(如热源情况、废水水质水量、结晶盐处置方式等)影响较大。选择适宜的零排放技术路线需综合考虑技术成熟度、运行可靠性、环境效益及全生命周期成本,实现技术经济性与环境效益的最佳平衡。

**关键词:** 火电厂; 脱硫废水; 零排放; 技术路线; 经济性分析; 蒸发结晶; 烟道蒸发

## 引言

火电厂在烟气脱硫(FGD)过程中产生的脱硫废水,因其成分复杂、污染物浓度高(高含盐、高浊度、重金属离子等),是火电厂最难处理的工业废水之一。随着我国《水污染防治行动计划》《火电厂污染防治技术政策》等法规政策的出台与实施,对火电厂水资源利用效率和废水排放提出了更高要求,实现脱硫废水“零排放”已成为火电企业可持续发展的必经之路。脱硫废水零排放是指将脱硫废水经处理后不外排,全部转化为水蒸气或固化在固体废弃物(如灰渣、结晶盐)。

## 一、火电厂脱硫废水特性与零排放技术概述

### (一) 脱硫废水来源与产生量

火电厂脱硫废水主要来源于采用湿法烟气脱硫(FGD)工艺过程中的石膏脱水系统和设备清洗环节。在湿法脱硫过程中,石灰石(或石灰)浆液与烟气中的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )发生反应生成亚硫酸钙,进而被氧化为硫酸钙(石膏)。石膏浆液通过水力旋流器进行一级脱水,产生的溢流水以及后续皮带过滤机或真空皮带脱水机处理石膏时产生的滤液,共同构成了脱硫废水。此外,吸收塔、浆液循环箱等设备的定期冲洗也会产生部分废水。脱硫废水的产生量与电厂装机容量、燃煤硫分、脱硫系统入口 $\text{SO}_2$ 浓度及运行方式密切相关,通常每百万千瓦装机容量每小时产生约2-10吨废水。由于其产生是维持脱硫系统物质平衡(特别是控制循环浆液中氯离子浓度

以保证石膏品质)的必要环节,因此必须被持续排出处理,其处理效果直接关系到电厂的整体环保水平和水资源利用效率。

### (二) 脱硫废水的水质特性

火电厂脱硫废水具有成分复杂、污染物浓度高且波动大的显著特点,是工业废水中处理难度较大的一种。其pH值通常较低,呈弱酸性(约4.-6.),主要由脱硫剂(石灰石)未完全反应和溶解的酸性气体所致。废水中的悬浮物(SS)含量极高,主要来自未反应的石灰石颗粒、生成的石膏细小晶体以及系统腐蚀产生的杂质,浓度可达10,000-30,000mg/L甚至更高。盐分含量也非常高,以氯化物( $\text{Cl}^-$ )和硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )为主,氯离子浓度常超过10,000mg/L,总溶解固体(TDS)含量可达数十万毫克每升。此外,废水中还含有较高浓度的化学需氧量(COD),主要来自有机脱硫剂、微生物代谢产物及溶解的有机物,一般在几百至一千毫克每升范围。更值得关注的是,废水中常含有多种重金属离子,如汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)等,这些是严格控制的污染物。废水还可能含有氟化物、氨氮等。这些复杂的污染物组合,使得脱硫废水处理面临去除效率、运行稳定性和二次污染控制的严峻挑战。

### (三) 脱硫废水零排放典型技术路线

实现火电厂脱硫废水“零排放”通常需要采用集成化的处理工艺,其典型技术路线一般包含预处理、浓缩减量和最终处置(结晶或固化)三个核心阶段。预处

理阶段旨在去除废水中的重金属离子、调节pH值、降低悬浮物和部分有机物含量，为后续处理创造条件，常用方法包括中和沉淀、絮凝、氧化等。浓缩减量化阶段是零排放技术的核心，目标是大幅减少废水的体积，降低后续处置的负荷和成本。主流技术包括反渗透（RO）、电渗析（ED）等膜分离技术，以及多效蒸发（MED）、机械蒸汽再压缩（MVR）、热力蒸汽再压缩（TVR）、多级闪蒸（MSF）等蒸发技术。这些技术利用压力或热能驱动，将废水中的水分分离出来，使盐分得到浓缩。最终处置阶段则处理浓缩后的高含盐废水。对于火电厂而言，最常见的是蒸发结晶技术，即将浓缩液进一步蒸发，使盐类结晶析出，实现水盐分离。结晶得到的盐分（主要是硫酸钠、氯化钠等混合盐）需要妥善处理或资源化利用。

## 二、主要脱硫废水零排放技术路线比较分析

### （一）蒸发结晶技术路线

蒸发结晶是火电厂脱硫废水零排放领域应用较为广泛且技术相对成熟的一类方法。该技术路线的核心在于利用热能将脱硫废水（经预处理后）中的水分逐步蒸发，使溶解的盐分不断浓缩并最终结晶析出，实现水与盐的彻底分离。根据热源利用方式和系统结构，常见的蒸发结晶技术包括多效蒸发（MED）、机械蒸汽再压缩（MVR）以及热力蒸汽再压缩（TVR）等。MVR技术因其能高效回收利用二次蒸汽的潜热，显著降低了对外部新鲜蒸汽的需求，从而大幅节省了运行能耗，在大型项目中应用较多。蒸发结晶技术的优势在于处理效果稳定可靠，能够产生固态结晶盐，出水（蒸汽）纯度高，满足严格的零排放要求。

### （二）烟道蒸发技术路线

烟道蒸发技术是一种利用锅炉尾部烟气余热处理脱硫废水的新型零排放或近零排放技术路线。其基本原理是将脱硫废水（通常经简单预处理去除大颗粒杂质和部分重金属后）通过特殊设计的喷嘴直接喷入锅炉省煤器与空气预热器之间的烟道内。在高温烟气流（通常在300-400℃）的作用下，废水被迅速雾化并瞬间蒸发，水分转化为水蒸气进入后续烟气处理系统，而废水中的盐分和其他固体杂质则因惯性或被吸附而沉积，最终被静电除尘器（ESP）或布袋除尘器捕获，混入飞灰中一同处理。烟道蒸发技术的显著优势在于其巧妙地利用了原本废弃的烟气余热，无需额外消耗新鲜蒸汽或大量电力，因此具有初始投资相对较低、运行成本（尤其是能耗）

极低的优点。

### （三）其他技术路线简介（如结晶干燥、膜法浓缩等）

除蒸发结晶和烟道蒸发外，还存在其他一些用于脱硫废水处理的技术路线或作为零排放工艺中浓缩环节的技术选择。例如，结晶干燥技术，通常作为蒸发结晶后的补充或特定处理方式，旨在将蒸发产生的湿态结晶盐通过热风干燥等方式去除水分，得到含水率更低的干盐产品，便于后续的储存、运输和资源化利用。膜法浓缩技术，特别是反渗透（RO）和正渗透（FO）等，在零排放流程中常被用作关键的浓缩减量化手段，尤其是在预处理后对废水进行深度浓缩，大幅减少后续蒸发处理的负荷，从而可能降低整体能耗和成本。有时也会结合纳滤（NF）等分盐膜技术，在浓缩前预先分离出部分易处理盐分（如氯化钠），实现分质结晶，提高结晶盐的品质和资源化价值。此外，还有如离子交换、高级氧化等用于特定污染物去除或预处理的技术，以及正在探索的如低温蒸发、冷冻结晶等新型技术。这些技术或作为独立方案，或与其他技术组合，共同构成了脱硫废水处理与零排放的技术库，为不同场景下的工程应用提供了更多选择。

## 三、脱硫废水零排放技术经济性分析

### （一）经济性分析框架与指标

对火电厂脱硫废水零排放技术的经济性进行评估，需要建立一个全面的分析框架。该框架应涵盖项目的全生命周期成本，包括初始投资和长期的运行维护支出。核心分析指标主要包括：单位处理成本（元/吨），即总成本（投资分摊+运行成本）除以处理水量，反映处理每吨废水的平均费用；投资成本（ICC），涵盖设备购置费、安装费、土建费、设计费、调试费等一次性投入；运行成本（O&M），包括能耗费（蒸汽、电力）、药剂费（絮凝剂、pH调节剂等）、人工费、维修费、备品备件费以及污泥或结晶盐的最终处置费等持续性支出。此外，投资回收期、净现值（NPV）、内部收益率（IRR）等财务指标也可用于评估项目的经济效益。在比较不同技术路线时，需确保采用统一的成本计算基准和贴现率，并考虑技术寿命、处理规模、废水水质水量、当地能源价格及政策等因素对经济性的影响。

### （二）不同技术路线投资成本估算与比较

脱硫废水零排放技术的投资成本（ICC）是项目经济性的重要组成部分，显著影响项目的初始经济负担。不同技术路线的投资差异主要源于其工艺复杂度、设备规模和材质要求。一般来说，采用多效蒸发（MED）、机

械蒸汽再压缩 (MVR) 等大型蒸发结晶技术的投资成本最高, 这主要因为其需要购置昂贵的蒸发器、结晶器、蒸汽压缩机、大型泵组以及复杂的自动化控制系统和辅助设备, 且通常需要较大的厂房和土建基础。相比之下, 烟道蒸发技术由于主要利用现有烟道和除尘器, 新增设备相对较少 (如废水输送泵、雾化喷嘴、部分管道阀门等), 其投资成本通常显著低于蒸发结晶技术。膜法浓缩等作为预处理或浓缩环节的技术, 其投资规模则取决于膜组件数量、压力容器、高压泵等。投资成本的比较需结合具体项目规模、设计参数和设备选型进行详细估算, 但总体趋势是: 蒸发结晶 > 烟道蒸发 > 单独的膜法或预处理技术。

### (三) 不同技术路线运行成本估算与比较

运行成本 (O&M) 是脱硫废水零排放技术经济性分析中的另一关键因素, 直接影响项目的长期经济效益和可持续性。不同技术路线的运行成本结构差异显著。蒸发结晶技术 (尤其是 MVR) 的主要成本在于能耗, 包括驱动蒸汽压缩机的电力或维持多效蒸发所需的新鲜蒸汽消耗, 此外还有药剂消耗 (用于防垢、阻蚀、杀菌等)、设备维护维修费用以及最终结晶盐的处置费用。其运行成本相对较高, 特别是对于大型系统。烟道蒸发技术由于利用烟气余热, 其能耗成本极低甚至接近于零, 这是其最突出的经济优势。其主要运行成本可能来自预处理药剂的消耗、废水输送泵的耗电、喷嘴的定期维护更换, 以及最终混盐随飞灰一同处置可能带来的协同处理成本或潜在的环境影响费用。膜法浓缩技术的运行成本主要包括高压泵的耗电、膜元件的清洗与更换费用以及药剂消耗。运行成本的比较需要精确核算各项费用, 并结合当地能源价格、人工成本、维护水平等具体条件进行分析, 通常能耗是主导因素。

### 四、对火电厂脱硫废水零排放技术选择的建议

火电厂在选择脱硫废水零排放技术时, 必须坚持“因地制宜”和“技术经济并重”的核心原则。所谓“因地制宜”, 意味着技术选择不能脱离电厂的具体实际。需综合考虑电厂所在地的水资源状况、环保法规要求、场地条件限制、可用能源 (如蒸汽、电力、烟气余

热) 的种类与成本、废水的水质水量特性 (如含盐量、重金属种类与浓度) 以及当地气候环境等因素。例如, 对于热源丰富或电价较低的电厂, 蒸发结晶技术可能更具吸引力; 而对于场地紧张、希望降低初始投资的电厂, 烟道蒸发技术或与其他技术组合的紧凑型方案可能更合适。所谓“技术经济并重”, 则强调在满足环保法规和达标排放要求的前提下, 必须对技术的成熟度、运行可靠性、处理效果稳定性、操作维护便利性以及全生命周期成本 (包括投资、运行、维护、处置等) 进行全面评估和比较。不能仅追求技术的先进性或单一指标的优势, 而忽视其经济可行性和长期运行的可持续性。最终选择应是在技术可行、环境友好的基础上, 实现综合经济效益最优的解决方案。

### 结束语

综上所述, 火电厂脱硫废水零排放技术的选择是一个涉及技术、经济、环境等多方面因素的复杂决策过程。通过对预处理、浓缩、结晶等关键环节不同技术路线的比较, 特别是对其投资成本、运行成本及综合经济性的深入分析, 可以清晰地认识到各种技术的适用边界和经济效益差异。蒸发结晶技术虽然处理效果稳定, 但能耗和成本相对较高; 烟道蒸发技术利用烟气余热, 成本较低, 但技术成熟度和稳定性有待进一步验证<sup>[8, 9]</sup>。实际工程中, 技术路线的选择必须结合电厂的具体条件, 如废水水质水量、可用热源情况、场地限制、结晶盐的处置途径以及地方环保政策等综合考量。

### 参考文献

- [1] 刘剑桥. 关于火电厂脱硫废水零排放技术应用 [J]. 中国设备工程, 2022 (8): 174-175.
- [2] 盖克勤, 陈优东. 关于火电厂脱硫废水零排放技术应用 [J]. 科技创新与应用, 2021 (3): 104-106.
- [3] 刘晓东. 电厂废水零排放技术的优化与实践 [J]. 水环境研究, 2023, 56 (4): 142-148.
- [4] 陈蓓, 李鸣. 电厂脱硫废水零排放技术的应用与挑战 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 73-79.