

脱硫废水零排放施工技术研究

朱学真

江苏京源环保股份有限公司, 江苏 南通

收稿日期: 2025年6月25日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月25日

摘要

随着环保要求的日益严格, 脱硫废水零排放成为燃煤电厂面临的重要课题。本文深入研究脱硫废水零排放施工技术, 详细阐述了其处理原则、主要技术及工艺流程, 分析了施工过程中的要点与难点, 并结合实际案例探讨了施工技术的应用效果与优化方向, 旨在为脱硫废水零排放工程的设计、施工与运行提供参考, 推动燃煤电厂的绿色可持续发展。

关键词

脱硫废水, 零排放, 施工技术, 蒸发结晶, 烟道蒸发

Research on Zero Discharge Construction Technology for Desulfurization Wastewater

Xuezhen Zhu

Jiangsu Jingyuan Environmental Protection Co., Ltd., Nantong Jiangsu

Received: Jun. 25th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

With the increasingly strict environmental requirements, zero discharge of desulfurization wastewater has become an important issue faced by coal-fired power plants. This article deeply studies the zero discharge construction technology of desulfurization wastewater, elaborates on its treatment principles, main technologies, and process flow, analyzes the key points and difficulties in the construction process, and combines practical cases to explore the application effect and optimization direction of construction technology. The aim is to provide reference for the design, construction, and operation of desulfurization wastewater zero discharge projects, and promote the green and sustainable development of coal-fired power plants.

Keywords

Desulfurization Wastewater, Zero Emissions, Construction Technology, Evaporative Crystallization, Flue Evaporation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在燃煤电厂的生产过程中，湿法脱硫技术广泛应用，虽然有效控制了烟气中硫化物的排放，但也产生了大量脱硫废水。这些废水具有高悬浮物、高含盐量、高硬度、重金属含量较高等特点，若未经妥善处理直接排放，将对环境造成严重污染[1]。随着环保政策的日益严格，脱硫废水零排放成为必然趋势。实现脱硫废水零排放不仅有助于减少环境污染，还能提高水资源的利用率，符合可持续发展的要求。因此，深入研究脱硫废水零排放施工技术具有重要的现实意义。

2. 脱硫废水零排放处理原则

2.1. 实现全厂近零排放的关键

燃煤电厂除脱硫废水外，各类废水经处理后基本能实现“一水多用，梯级利用”、废水不外排，因此，脱硫废水零排放是燃煤电厂实现全厂近零排放的重点和关键环节。只有解决好脱硫废水的处理问题，才能真正实现电厂废水的零排放目标，减少对周边环境的污染[2]。

2.2. 针对高含盐量的处理策略

脱硫废水经过预处理后含盐量依然很高，这是脱硫废水处理的难点之一。目前，脱硫废水零排放技术主要包括烟气余热喷雾蒸发干燥、高盐废水蒸发结晶等，旨在通过物理或化学方法将废水中的盐分离出来，实现废水的净化和零排放。

2.3. 预处理工艺的重要性

在进行蒸发干燥或蒸发结晶之前，宜采用反渗透、电渗析等膜浓缩预处理工艺减少废水量。这些预处理工艺可以有效去除废水中的杂质和部分盐分，降低后续处理工艺的负荷和成本，提高整个脱硫废水零排放系统的运行效率和稳定性[3]。

2.4. 加强全厂水务管理

电厂应加强全厂水务管理，经济合理地处理各种废水，最大限度地提高废水回用率。通过优化用水流程，实现水资源的梯级利用，减少新鲜水的取用，降低废水的产生量，从而降低废水处理成本，提高电厂的经济效益和环境效益。

3. 脱硫废水零排放主要技术及工艺流程

3.1. 蒸发结晶技术

蒸发结晶技术是通过一系列方法将废水浓缩，浓缩液蒸发结晶，蒸汽经冷凝回收，而盐结晶干燥成工业盐，从而达到废水零排放的目的[4]。目前，废水蒸发结晶技术主要有高效蒸发技术和机械蒸汽再压缩技术。

多效蒸发技术：常规蒸发结晶技术为多效蒸发(MED)结晶技术，该技术一般分为热输入单元、热回收单元、结晶单元和附属系统单位 4 个单元。常规处理后的废水经过多级蒸发室的加热浓缩后成为盐浆，盐浆经离心、干燥后成为工业盐运输出厂出售或掩埋。多效蒸发技术较为成熟，但能耗极高，限制了其发展和推广。

机械蒸汽再压缩技术：为减少能耗，研发出采用机械蒸汽再压缩(MVR 或 MVC)技术的蒸发器。MVR (MVC)技术是将二次蒸汽经绝热压缩后送入加热室，压缩后的蒸汽温度升高，可重新作为热源使用，从而大大降低了蒸汽用量，降低了能耗。但在实际运行过程中，存在产品为复杂混合盐，只能作为危险固体废物进行处理，成本极高，以及进水未经充分软化，结垢严重，除垢清洗频繁等问题[5]。经过改良，采用立式降膜蒸发器可以有效解决卧式蒸发器结垢严重和能耗较大的问题，该技术已经应用于多个废水零排放建设工程。

蒸发结晶技术的工艺流程一般包括：废水首先进入调节池，对水质和水量进行调节，保证后续处理系统的稳定运行；然后进入中和反应池，加入石灰乳或氢氧化钠，调节废水 pH 值，去除部分重金属；接着进入絮凝反应池，加入絮凝剂，使悬浮物形成较大絮体；再进入沉淀池，去除废水中的悬浮物和部分重金属。经过预处理后的废水进入膜浓缩系统，通过超滤进一步去除悬浮物和大分子有机物，为后续反渗透膜提供保护，反渗透对废水进行浓缩，产生淡水和浓水，淡水回用，浓水进入蒸发结晶系统。在蒸发结晶系统中，机械式蒸汽再压缩(MVR)蒸发器将浓水蒸发，使盐分结晶析出，最后通过离心分离，分离出结晶盐，干燥后作为工业盐外售或综合利用[6]。

3.2. 烟道蒸发技术

烟道蒸发技术是利用锅炉尾部烟气的余热，将脱硫废水雾化喷入烟道中，使废水在高温烟气的作用下迅速蒸发，盐分和杂质随烟气进入除尘器被捕集，从而实现废水的零排放[7]。烟道蒸发技术主要包括直接烟道蒸发和旁路烟道蒸发。

直接烟道蒸发：直接将脱硫废水喷入主烟道中，利用主烟道内的高温烟气进行蒸发。这种方式受钢铁烧结或球团烧结生产负荷影响，限制了蒸发水量，如未蒸干液滴黏附在烟道内壁，易引起主烟道腐蚀，影响正常生产，存在一定局限性。

旁路烟道蒸发：从主烟道引出一部分烟气进入旁路烟道，在旁路烟道内设置蒸发装置，将脱硫废水喷入旁路烟道进行蒸发。旁路烟道蒸发具有不受烧结球团负荷影响、设备构造简单、维修方便等优点，但在工艺设计中应注意控制旁路烟道蒸发抽取烟气量占总烟气量 3%~5%范围内，控制出口烟气温度在 130℃ 以上，控制经雾化装置喷入后烟气含水率增加量 $\leq 0.8\%$ ，避免造成酸露点腐蚀及保证除尘器收集效率；如除尘器排灰循环至前端钢铁工序内，为保证产品质量，则旁路烟道蒸发装置不可用；如除尘灰单独收集利用，应核算除尘灰中氯离子含量，保证的除尘灰品质不受影响；喷入的脱硫废水 pH 为中性偏碱性，避免旁路烟道蒸发装置腐蚀。

烟道蒸发技术的工艺流程一般为：脱硫废水首先进入预处理系统，进行预沉、除固等处理，去除废水中的悬浮物和大部分杂质；然后进入一体化雾化蒸发安保系统，进行高精度过滤，滤除十微米以上颗粒物，使含固率降至百分之零点五以下；接着通过双流雾化喷枪系统，将废水与压缩空气混合，气液交融，雾化充分，喷入烟道中，在高温烟气的作用下，废水高效蒸发结晶，吸出物随烟气被除尘器捕捉，水蒸汽流经吸收塔时冷凝回用，实现脱硫废水处理的零排放[8]。

4. 脱硫废水零排放施工要点与难点

4.1. 施工要点

设备安装精度：蒸发结晶设备、膜组件、雾化喷枪等关键设备的安装精度直接影响系统的运行效果。

在安装过程中,应严格按照设备厂家的安装说明书进行操作,确保设备的水平度、垂直度和密封性符合要求。例如,MVR 蒸发器的安装,要保证蒸发器的各部件连接紧密,防止蒸汽泄漏,影响蒸发效率;膜组件的安装要避免划伤膜表面,确保膜的性能不受影响。

管道连接与防腐:脱硫废水具有强腐蚀性,管道连接必须牢固可靠,同时要做好防腐措施。采用耐腐蚀的管材,如衬胶管道、不锈钢管道等,并在管道连接部位采用密封胶或法兰连接,确保管道不泄漏。在管道安装完成后,要进行压力测试和防腐处理,如涂刷防腐漆、内衬防腐材料等,以延长管道的使用寿命。

电气与自动化系统安装:电气与自动化系统是脱硫废水零排放系统稳定运行的重要保障。要确保电气设备的接线正确、牢固,自动化仪表的安装位置合理、精度准确。自动化系统应具备远程监控、故障报警、自动调节等功能,能够实时监测系统的运行参数,如废水流量、水质、温度、压力等,并根据设定的参数自动调节设备的运行状态,保证系统的稳定运行。

4.2. 施工难点

场地限制:在电厂现有场地进行脱硫废水零排放系统的施工,可能会面临场地狭窄、空间有限的问题。这给设备的堆放、安装和施工通道的设置带来困难。需要合理规划施工场地,采用模块化施工方式,将设备在工厂预制好,然后运输到现场进行组装,减少现场施工时间和占地面积。**立体布局:**利用垂直空间分层布置设备(如上层设膜组件,下层设储药罐和水箱),通过钢结构支架实现紧凑化布局。**因地制宜利用现有设施:**结合厂区现有建筑物(如空压机房、废弃仓库)或地形(如斜坡、地下空间)嵌入处理设备,减少新增用地。**简化预处理流程:**采用高效药剂(如复合絮凝剂)或一体化设备(如高效沉淀池 + 过滤器集成装置),缩短预处理环节占地[9]。**分阶段建设:**先实施关键处理单元(如预处理和浓缩系统),待场地条件允许后再补充蒸发结晶单元,避免一次性大规模施工。**临时过渡方案:**若场地紧张,可先采用移动式处理设备(如车载式蒸发装置)作为过渡,待永久场地落实后再迁移设备。

系统调试与优化:脱硫废水零排放系统涉及多个工艺环节和设备,系统调试难度较大。在调试过程中,需要对各个设备的运行参数进行优化,如蒸发温度、压力、废水流量、加药量等,以确保系统的稳定运行和处理效果。同时,要解决设备之间的协同工作问题,避免出现设备故障或运行不稳定的情况。例如,在蒸发结晶系统调试中,要调整好蒸发器的加热功率、结晶器的搅拌速度等参数,使盐分能够顺利结晶析出,同时保证蒸汽的回收利用效率。通过 PLC 控制系统模拟废水全流程处理,验证各单元联动逻辑(如预处理出水不达标时自动回流至调节池)。人为设置故障(如膜系统压力异常、蒸发器液位过低),测试系统自动报警和切换备用设备的响应时间(要求 ≤ 30 秒)。通过以上策略,可在有限场地条件下实现系统高效集成,并通过分阶段调试确保各单元稳定运行,最终达成脱硫废水零排放目标。

与现有系统的衔接:脱硫废水零排放系统需要与电厂现有的脱硫系统、除尘系统、供水系统等进行衔接。在施工过程中,要确保新系统与现有系统的接口匹配、运行协调[10]。例如,在烟道蒸发技术中,要合理确定烟气的抽取位置和废水的喷入位置,避免对现有烟道和设备造成影响,同时要保证废水能够在烟道中充分蒸发,不影响烟气的排放指标。在设计阶段通过 BIM 技术模拟设备布局,提前规避管道干涉、检修空间不足等问题,减少调试阶段的改造量。调试期间建立数据台账(如每日记录各单元运行参数、药剂消耗量),每周召开技术会议调整工艺参数,形成“施工 - 调试 - 优化”闭环。

5. 案例分析

5.1. 某电厂脱硫废水零排放工程案例

某电厂建设了一套脱硫废水零排放系统,采用了膜浓缩 + 蒸发结晶的工艺路线。该工程的设计

处理规模为 $20\text{ m}^3/\text{h}$ ，主要工艺流程为：脱硫废水首先进入调节池，调节水质和水量；然后依次进入中和反应池、絮凝反应池和沉淀池，进行预处理，去除废水中的悬浮物、重金属等杂质；预处理后的废水进入超滤系统，进一步去除悬浮物和大分子有机物；超滤产水进入反渗透系统进行浓缩，反渗透浓水进入蒸发结晶系统，通过 MVR 蒸发器将浓水蒸发结晶，产生的结晶盐干燥后外售，蒸汽冷凝后回用。

在施工过程中，严格按照施工要点进行操作，确保了设备的安装精度和管道的连接质量。同时，针对施工难点，采取了有效的解决措施。例如，由于场地限制，采用了模块化施工方式，将部分设备在工厂预制好后运输到现场组装，大大缩短了施工周期。将预处理单元设计为三层钢结构：一层布置调节池与加药罐，二层安装高效沉淀池，三层设置管式过滤器，垂直空间利用率提升 40%。蒸发结晶单元采用“MVR 蒸发器 + 结晶罐 + 离心机”立体堆叠设计：蒸发器位于底层，结晶罐架设在蒸发器上方，离心机通过管道与结晶罐对接，节省水平占地面积约 30 m^2 。在系统调试过程中，通过对各个设备的运行参数进行优化，使系统能够稳定运行，处理后的废水达到了零排放的要求。调试初期按膜浓缩回收率 70%、蒸发处理量 30% 设计，待膜系统稳定后逐步提升至回收率 85%、蒸发满负荷运行，避免蒸发单元过载。蒸发结晶设备采用“工厂预制 + 现场组装”模式(如 MVR 蒸发器在工厂完成管道焊接、仪表安装)，现场仅需对接水电接口，缩短调试周期 15 天。通过以上措施，可有效解决膜浓缩 + 蒸发结晶工艺在场地限制下的集成难题，同时通过分单元调试与全流程联动优化，确保系统长期稳定运行。

该工程投入运行后，取得了良好的效果。每年可节约大量的新鲜水资源，同时产生的结晶盐作为工业盐出售，创造了一定的经济效益。此外，实现了废水的零排放，减少了对环境的污染，具有显著的环境效益。

5.2. 案例经验总结与启示

通过该案例可以看出，在脱硫废水零排放工程施工中，选择合适的工艺路线和设备是关键。要根据电厂的实际情况，如废水水质、水量、场地条件、投资预算等因素，综合考虑选择最适合的工艺和设备。同时，施工过程中的质量控制和调试优化也至关重要。严格按照施工要点进行施工，确保设备的安装质量和系统的稳定性；在调试过程中，要充分考虑各种因素，对系统进行优化，使系统能够达到最佳的运行效果。此外，与现有系统的衔接和后期的运行维护管理也不容忽视，要建立完善的运行维护管理制度，确保系统的长期稳定运行。

6. 结论与展望

6.1. 研究结论

脱硫废水零排放施工技术是实现燃煤电厂绿色可持续发展的重要保障。本文通过对脱硫废水零排放处理原则、主要技术及工艺流程、施工要点与难点的研究，结合实际案例分析，得出以下结论：

脱硫废水零排放应遵循实现全厂近零排放、针对高含盐量处理、加强预处理和全厂水务管理等原则 [11]。

蒸发结晶技术和烟道蒸发技术是目前常用的脱硫废水零排放技术，各有优缺点，应根据实际情况选择合适的技术和工艺路线。

在施工过程中，要把握好设备安装精度、管道连接与防腐、电气与自动化系统安装等要点，同时解决好场地限制、系统调试与优化、与现有系统衔接等难点问题。

实际案例表明，合理的工艺选择、严格的施工质量控制和科学的调试优化能够确保脱硫废水零排放系统的稳定运行，实现经济效益、环境效益和社会效益的多赢。

6.2. 研究展望

随着环保要求的不断提高和技术的不断进步, 脱硫废水零排放施工技术也将不断发展和完善。未来的研究方向可以包括:

开发更加高效、节能、环保的脱硫废水零排放技术, 降低处理成本, 提高资源利用率。例如, 研究新型的膜材料和膜工艺, 提高膜的抗污染能力和分离效率; 探索新的蒸发结晶技术, 进一步降低能耗[12]。

加强对脱硫废水零排放系统运行维护管理的研究, 建立智能化的运行监控和故障诊断系统, 提高系统的可靠性和稳定性。通过实时监测系统的运行参数, 及时发现和解决问题, 保障系统的长期稳定运行。

开展对脱硫废水零排放技术的标准化研究, 制定统一的设计、施工、验收标准, 规范工程建设市场, 促进脱硫废水零排放技术的推广应用。

研究脱硫废水零排放系统与电厂其他系统的深度融合, 实现资源的综合利用和优化配置, 进一步提高电厂的整体效益。例如, 将脱硫废水零排放系统与电厂的循环水系统、除灰除渣系统等进行有机结合, 实现水资源和废弃物的循环利用。

总之, 脱硫废水零排放施工技术的研究和应用具有广阔的前景, 需要不断地探索和创新, 为实现燃煤电厂的绿色发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 王森, 张广文, 蔡井刚. 燃煤电厂湿法烟气脱硫废水“零排放”蒸发浓缩工艺应用综述[J]. 陕西电力, 2014, 42(8): 94-98.
- [2] 徐敏, 杜洪宇, 郭家明, 等. 面向物质资源化的燃煤电厂脱硫废水零排放工艺研究[J]. 环境工程, 2022, 40(10): 169-175.
- [3] 段威, 姚宣, 王冬生. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术对比及经济性分析[J]. 工业水处理, 2021, 41(3): 129-132.
- [4] 史德佩, 周然. 略论燃煤电厂脱硫废水零排放处理与预处理的软化技术[J]. 山东工业技术, 2018(21): 88.
- [5] 崔丽. 火力发电厂脱硫废水深度处理工艺的应用[J]. 吉林电力, 2018, 46(5): 47-52.
- [6] 王焕伟, 治卿, 张文耀, 柳丽平. 燃煤电厂脱硫废水零排放现状分析[J]. 环境保护科学, 2020, 46(3): 85-88.
- [7] 郑利兵, 魏源送, 焦赞仪. 零排放形势下热电厂脱硫废水处理进展及展望[J]. 化学工业与工程, 2019, 36(1): 24-37.
- [8] 姚宁. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理工艺[J]. 黑龙江科技信息, 2016(35): 39.
- [9] 白璐, 陈武, 王凯亮, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(4): 16-20.
- [10] 张忠梅. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术探讨[J]. 节能与环保, 2019(10): 47-48.
- [11] An, W.H. and Zhao, J. (2022) Zero-Liquid Discharge Technologies for Desulfurization Wastewater: A Review. *Journal of Environmental Management*, **3**, 17.
- [12] Xu, F. and Zhao, S.M. (2024) Current Status of Zero Liquid Discharge Technology for Desulfurization Wastewater. *Water*, **16**, 900.