

脱硫废水低温浓缩减量技术及零排放工程实践

曾书怀 郭海红

中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司 北京 100120

【摘要】：脱硫废水是燃煤电厂等工业生产中产生的高污染废水，有高盐、高浊、高腐蚀、污染物种类繁多等特点，达标处理成为行业的绿色转型瓶颈。低温浓缩减量技术由于具有低能耗、低腐蚀、适配性好等特点，成为脱硫废水减量化处理的主要途径，为零排放目标的实现打下了基础。本文系统阐述脱硫废水处理的现实意义，重点分析低温闪蒸、低温多效蒸发、膜蒸馏、低温烟气余热浓缩等主流低温浓缩减量技术的原理、工艺特点和应用条件，结合国家电投商丘电厂、蒲洲热电公司等典型工程案例，研究零排放工程的工艺设计、运行效果和效益。希望给脱硫废水零排放技术的优化推广提供一些参考。

【关键词】：脱硫废水；低温浓缩；减量技术；零排放；工程实践

DOI:10.12417/3083-5526.25.04.003

引言

在“双碳”目标引领下能源结构发生深刻变化的时候，燃煤电厂等工业领域清洁化改造势在必行。石灰石-石膏湿法脱硫工艺是目前控制二氧化硫排放的主要技术，它在脱硫过程中会产生大量的脱硫废水。此种废水含有大量的氯离子、硫酸盐、重金属和悬浮物，若直接排放出去，则会造成土壤盐碱化、水体污染，严重影响生态环境安全，并且造成水资源的浪费。由于环保法规越来越严格，以脱硫废水零排放为标准的工业企业合规经营也成了必然。本文从行业发展需求出发，对脱硫废水低温浓缩减量技术类型进行梳理，结合近年的工程实践案例，分析脱硫废水低温浓缩减量技术的应用要点及效益，为推动脱硫废水零排放技术规模化应用提供理论和实践支撑。

1 脱硫废水零排放处理的意义

1.1 保护生态环境，降低污染风险

脱硫废水中的重金属具有强生物累积性，如果随意排放就会通过土壤、水体、食物链的传导途径对人的健康造成危害；高浓度的盐分会破坏土壤结构，使耕地盐碱化，影响植被生长；悬浮物和可溶性污染物会引发水体的富营养化，破坏水生生态平衡。有关研究显示，未经处理的脱硫废水排放以后，周边土壤氯离子含量在短时间内会提高30%以上，农作物减产幅度达15%-20%。零排放处理技术可以将重金属、悬浮物去除99%以上，使盐分固化回收，切断污染扩散的途径^[1]。

1.2 提升水资源利用效率，缓解资源短缺压力

我国是水资源短缺国家，工业用水占总用水量的24%以上，其中燃煤电厂是工业用水大户，脱硫废水排放量占电厂总废水排放量的5%到10%。脱硫废水零排放处理采用浓缩减量和资源化回收的方法，将处理过的产水用作循环冷却水补充水、脱硫工艺补水等，大大降低新鲜水取用量。单台600MW机组脱硫废水零排放系统年回收水资源约10万吨，相当于300亩农田一年灌溉用水量。该模式不仅可以提高水资源循环利用效率，而且可以减少企业对周围水资源的依赖，缓解区域水资源

源的供需矛盾，为节水型社会建设提供有力支撑^[2]。

2 脱硫废水低温浓缩减量技术

2.1 低温闪蒸浓缩技术

(1) 技术原理

低温闪蒸浓缩技术利用水的沸点随压力降低而降低的特点，用降压的方法使预热后的脱硫废水在低于大气压的环境下瞬间蒸发，达到水分和盐分分离的目的。其主要流程是脱硫废水进入预热器，用系统二次蒸汽或者低品位余热（通常是烟气余热）加热到60-80℃；然后进入闪蒸室，在真空下迅速汽化，产生的低温蒸汽经过冷凝后成为可回用的蒸馏水；未蒸发的浓缩液从闪蒸室底部排出，进入后续处理单元。脱硫废水在多个串联的蒸发器中经过加热蒸汽的作用下逐渐蒸发。多效闪蒸系统把前一效产生的二次蒸汽作为后一效的热源，从而提高热能利用效率，降低能耗^[3]。

(2) 工艺特点

该技术有明显的优势，能耗低，主要依靠低品位余热驱动，运行能耗比传统高温蒸发技术低30%-50%；工况温和，操作温度低于80℃，大大减少高氯离子对设备的腐蚀，降低对钛合金等昂贵耐腐材料的依赖；浓缩效果好，浓缩倍率可达5-10倍，减少高盐废水水量，降低后续处理系统的负荷；产水品质高，冷凝水为蒸馏水，可以直接用于工艺补水。系统局限性有：系统对密封性要求高，要配装有效的真空设备；预处理不彻底容易产生硫酸钙、硅酸盐等结垢现象，造成系统无法正常工作^[4]。后经过投加晶种法加以改进后，根据脱硫废水水质情况，可以不经过预处理而直接进行低温闪蒸浓缩。部分先进的系统使用强制循环的方式提高传热效率，防止结垢^[5]。不足之处就是设备投资高，系统占地较大，需要合理的场地规划。

(3) 应用条件

低温闪蒸浓缩技术适用于有稳定的低品位余热（电厂低压蒸汽、烟气余热）的地方，主要是燃煤电厂、钢铁厂等工业部门。该技术对进水水质有一定的要求，系统设计要根据废水的

水量、水质、余热资源等确定闪蒸效数，一般3-5效闪蒸能耗和投资最佳。

2.2 低温烟气蒸发浓缩技术

(1) 技术原理

低温烟气蒸发浓缩技术是一种基于直接接触换热的脱硫废水减量化处理方法。该技术将经过预处理的脱硫废水输送至废水浓缩蒸发塔，通过循环泵将废水送入塔内的雾化系统，使其在塔内均匀雾化。同时，从锅炉引风机后抽取一部分低温烟气引入浓缩塔内，作为热源与雾化后的废水进行直接接触式换热。在此过程中，烟气被增湿并逐渐达到饱和状态，饱和湿烟气随后经气液分离器分离，最终由废水浓缩塔排出，并输送至脱硫塔入口回用作为脱硫工艺水。

废水在与烟气换热过程中部分水分蒸发，从而实现浓缩减量。浓缩后的废水含盐量显著提高，总溶解固体（TDS）通常可浓缩至约 250,000 mg/L。浓缩液可送至后续处理单元（如结晶单元或固化单元）进行最终处置。整个浓缩过程在低温条件下进行，其机理与湿法烟气脱硫工艺相似，均采用气液直接接触传质传热方式。

(2) 工艺特点

节能节水：利用锅炉系统排出的低温烟气余热作为热源，无需额外消耗高温蒸汽或电能，实现能源的梯级利用。同时，蒸发产生的水蒸气随烟气进入脱硫系统并冷凝回收，可直接作为脱硫工艺水使用，从而显著降低脱硫系统的新鲜水耗用量。

温度控制要求严格：低温烟气蒸发浓缩系统的排烟温度通常控制在 50℃ 左右。该部分烟气在与原烟气混合后，混合烟气温度应保持在 80℃ 以上，以避免整体温度低于酸露点，从而防止低温腐蚀对后续烟道及设备造成损害。

(3) 应用条件

适用于具有稳定低温烟气来源的燃煤电厂，尤其适合与湿法脱硫系统配套使用。由于处理规模受限于可用的烟气余热量，一般适用于脱硫废水排放量较小的机组，或作为高盐废水的预浓缩工艺。需配套相应的预处理系统，控制废水中的悬浮物、硬度、重金属，控制进水浊度小于 5NTU、硬度（以 CaCO₃ 计）小于 100mg/L，防止雾化喷嘴结垢堵塞。在系统设计时需充分考虑烟气参数、废水水质及后续处理单元的衔接，确保全流程稳定运行。

2.3 膜蒸馏低温浓缩技术

(1) 技术原理

膜蒸馏技术是一种基于膜分离和蒸发结合的新型低温浓缩技术，用疏水性微孔膜作为传质介质，以膜两侧由温度引起的饱和蒸汽压力差作为传质驱动力。膜一侧是加热到 40-60℃ 的脱硫废水，另一侧是低温冷凝面或者真空环境。废水在膜表

面汽化成蒸汽，经膜孔扩散到冷凝侧，冷凝后得到纯净产水，达到废水浓缩的目的。根据冷凝方式的不同可分为直接接触式膜蒸馏、空气隙式膜蒸馏、真空膜蒸馏等，其中真空膜蒸馏由于传质效率高，在脱硫废水处理中应用较多。

(2) 工艺特点

膜蒸馏技术具有独特的优点，一是操作温度低，可以利用低品位余热，能耗比传统膜分离技术低很多；二是对盐分截留率高，几乎可以截留所有的离子、胶体和有机物，产水水质好；三是膜污染程度小，疏水性膜表面不易吸附亲水性污染物，清洗周期长；四是设备占地面积小，模块化设计便于扩容。局限性为膜材料价格昂贵，耐污染、耐化学腐蚀性差，膜通量小，需通过改善膜结构和操作参数来提高处理效率，长期运行会存在膜润湿的风险，影响分离效果。

(3) 应用条件

该技术适用于日处理量为 10-50 吨的中低水量脱硫废水处理，对场地要求较高的改造项目更加合适。进水需要做预处理，去除悬浮物和大颗粒杂质，控制浊度小于 1NTU，防止膜孔堵塞。运行时要严格控制料液温度、流速和膜两侧的压力差，一般料液温度控制在 50-60℃、流速 0.5-1.0m/s 时，可得到最好的膜通量和截留效果。近些年来，新型耐高氯、抗污染膜材料的开发，又扩大了它的应用范围。

3 脱硫废水零排放工程实践

3.1 国家电投商丘电厂脱硫废水零排放工程案例

(1) 项目概况

国家电投商丘电厂脱硫废水零排放工程采用“非软化低温闪蒸浓缩+旁路干燥”技术。该项目采用城市中水作为电厂水源，相比使用地表水的常规电厂，其产生的脱硫废水水量更大、处理难度更高，因此对零排放技术提出了更严苛的要求。项目处理脱硫废水量 30t/h。

(2) 工艺设计

该项目最大特点在于采用了国内首套“非软化低温闪蒸浓缩+高温旁路干燥”技术。该工艺是一种旨在简化流程、降低成本的创新技术路线。非软化低温闪蒸浓缩直接抽取锅炉尾部低温烟气作为热源，在真空多效闪蒸系统中对脱硫废水进行蒸发浓缩，能效利用高。核心工艺“非软化”，是与传统工艺的关键区别。通常，为防止蒸发器结垢，废水在进入蒸发系统前需投加药剂进行“软化”预处理。而该技术通过调整运行参数、引入晶种控制等特殊的系统设计，取消了复杂的加药软化预处理环节。这使得系统更简洁，极大节约了药剂成本和预处理设备的投资与维护费用。第二阶段为高温旁路干燥，将经过低温闪蒸浓缩后的高含盐浓液，雾化后喷入从锅炉空预器后抽取的高温旁路烟道中。液滴在高温烟气中迅速蒸发水分，残留的盐分颗粒随烟气进入除尘器，被作为粉煤灰的一部分捕集，

最终实现废水的零液体排放。

(3) 运行效果与效益

该工程于2019年顺利通过168小时试运行。项目运行数据表明,系统处理后废水回收率大于90%。经济效益上该工艺路线因省去了预处理单元,其投资成本和运行成本具有一定优势。单位投资成本约为115万元/(立方米·小时),处理成本约25元/吨水。就环境效益而言,可以彻底消除脱硫废水的排放,每年可以减少重金属排放大约0.5吨、盐分排放大约1200吨;同时能降低烟气余热的浪费、提高能源的利用率,符合减污降碳协同增效的要求。

3.2 蒲洲热电公司零排放工程案例

(1) 项目概况

2024年蒲洲热电公司自主研发设计出的脱硫废水零排放项目投运,2024年度获得山西省电力行业协会电力创新一等奖。项目根据公司4号锅炉脱硫废水处理的要求,用锅炉尾部低温烟气对脱硫废水进行蒸发浓缩、结晶分离,单台系统每天处理脱硫废水100吨到150吨。项目核心创新点就是一种新型脱硫废水立式三相蒸发分离器,获得了国家实用新型专利,实现了脱硫废水零排放和固废协同处理的双重目的。

(2) 工艺设计

项目采用的是“预处理-低温烟气蒸发浓缩-飞灰协同处置”的工艺,先对脱硫废水做简单的预处理,去除大颗粒悬浮物,再将预处理后的废水引入新型立式三相蒸发分离器,用锅炉尾部低温烟气(120-160℃)作为热源,使废水在分离器内充分蒸发;蒸发产生的蒸汽随烟气排出,经过脱硫塔洗涤后回收利用;盐分结晶物和飞灰混合,一起被电除尘器收集。工艺设计上重

视蒸发分离器的结构,提高气、液、固三相分离效率,用静态浸泡试验选择耐腐蚀材料来降低设备的腐蚀风险。项目在3号机组引风机的中间区域完成设备第三次升级,在不影响煤耗和烟气排放达标的情况下达到高效运行的目的。

(3) 运行效果与效益

运行结果证明,该系统运行稳定,在电厂深度调峰工况下依然可以保持高效的蒸发能力,废水全量蒸发不外排,结晶物全部随飞灰回收,无固体废弃物产生。水质监测显示回用水浊度小于5NTU,硬度满足循环冷却水补水要求。经济效益好,项目年节约废水处理费约247万元,新鲜水节约成本85万元,污泥处置成本节约162万元。从推广价值上看,本项目工艺简单、投资低,更适合中小型燃煤电厂改造,该技术研发出的蒸发分离器可以给行业提供低成本零排放的解决方案。

4 结语

综上所述,脱硫废水低温浓缩减量技术依靠低能耗、低腐蚀、适配性强等特点,已经成为实现零排放目标的重要技术途径,给燃煤电厂等工业企业的绿色转型提供有力支撑。本文对低温闪蒸、低温烟气余热蒸发、膜蒸馏等主流技术进行了系统的分析,结合商丘电厂、蒲洲热电公司等最新的工程案例,证明了低温浓缩技术和末端处置技术相结合的可行性以及效益。采用哪种零排工艺,不能一概而论,需要根据不同企业自身的特点和脱硫废水的水质进行可行性验证来选择合适的脱硫废水零排放工艺。但是不论采用哪种工艺,在干燥固化之前都可以对脱硫废水进行浓缩减量,从而通过减少结晶和雾化量来降低蒸发设备的投资和运行成本。经过实践证明,零排放工程要成功实施就要依靠预处理优化、防腐设计、自动化控制等关键技术要点,从而达到环境效益和经济效益双赢的目的。

参考文献:

- [1] 李健,李亚洲,荣国强.基于烟气低温余热的水媒式脱硫废水蒸发浓缩实验研究[J].广东化工,2025,52(13):108-110+87.
- [2] 杨文毅,由长福,王海名.燃煤机组脱硫废水零排放技术分析[J].现代化工,2025,45(08):240-245.
- [3] 戚江平,杨志国,李丹,等.脱硫废水液滴低温浓缩蒸发特性[J].动力工程学报,2025,45(06):931-937.
- [4] 孟维鑫.燃煤电厂脱硫废水零排放技术研究[J].黑龙江环境通报,2025,38(06):20-22.
- [5] 杨文毅,由长福,王海名.燃煤机组变负荷运行下的脱硫废水零排放流程模拟分析[J].化工学报,2025,76(07):3468-3476.