

燃煤电厂脱硫废水处理技术路线选择分析

王靖宇^{1*}, 陈 成², 高志刚², 罗纯仁², 钟振成¹

(1. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211;

2. 内蒙古国华呼伦贝尔发电有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021025)

摘要: 综述了传统三联箱技术和新型零排放处理技术在燃煤电厂脱硫废水处理中的应用现状。介绍了传统三联箱处理的技术原理及厂区消纳存在的问题; 结合工程案例, 详细分析了不同零排放处理技术的原理、适用条件及优缺点; 最后对燃煤电厂脱硫废水具体技术路线选择提出了建议。

关键词: 脱硫废水; 厂区消纳; 零排放; 预处理; 膜浓缩; 固化

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)07-0044-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.07.009

Analysis on technical route selection for treatment of desulfurization wastewater in coal-fired power plants

WANG Jing-yu^{1*}, CHEN Cheng², GAO Zhi-gang², LUO Chun-ren², ZHONG Zhen-cheng¹

(1. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, CHN Energy, Beijing 102211, China;

2. Inner Mongolia Guohua Hulunbuir Power Generation Co., Ltd., Hulunbuir 021025, China)

Abstract: Application status of traditional triple-tet-tank technology and novel zero emission treatment technology in the treatment of desulfurization wastewater in coal-fired power plants are summarized. Technical principle of traditional triple-tet-tank technology is expounded, and the existing problems for in-plant consumption are introduced. Combined with engineering cases, the principles, applicable conditions, advantages and disadvantages of different zero emission treatment technologies are analyzed in detail. Finally, some suggestions are given for specific technical route selection of desulfurization wastewater from coal-fired power plants.

Key words: desulfurization wastewater; in-plant consumption; zero discharge; pretreatment; concentration by membrane; solidification

燃煤发电在未来相当一段时期仍将占我国电力供应的主导地位, 为了降低烟气中二氧化硫满足国家排放要求, 需配置烟气脱硫系统。我国约 92% 的燃煤电厂烟气脱硫机组采用石灰石-石膏法^[1], 该技术运行稳定、维护简单、脱硫效率高, 已成为燃煤电厂烟气脱硫技术的首选^[2]。该技术在脱硫过程中需要定期排出一定量的脱硫废水, 将脱硫系统内的氯离子控制在 20 000 mg/L 以下, 以防止设备腐蚀和保证脱硫效率^[3]。

脱硫废水水质复杂、污染物种类多、处理难度大, 随着国家环保政策对脱硫废水提出更加严格的要求, 对于脱硫废水的技术探索和工艺创新不断加强, 不同的脱硫废水处理技术应运而生。本文中将在分析脱硫废水传统处理技术和新型零排放技术基础上, 对目前已实现工程化应用的处理技术进行归

纳总结, 分析各工艺的特点及适用条件, 以期对燃煤电厂经济合理地选择脱硫废水技术路线提供一定的借鉴。

1 传统脱硫废水处理技术

目前燃煤电厂普遍采用传统三联箱工艺来处理脱硫废水, 脱硫废水三联箱包括中和箱、沉降箱和絮凝箱, 分别投加石灰乳、有机硫和絮凝剂、助凝剂, 经过充分搅拌反应后自流进入澄清池, 以去除废水中悬浮物、重金属、COD 等有害物质, 清水经盐酸调节 pH 至 6~8 进入出水池^[4]。

脱硫废水经三联箱处理后, 虽然可以满足《燃煤电厂石灰石-石膏湿法脱硫废水水质控制指标》(DL/T 997—2020), 但由于高含盐量、高硬度、高腐蚀性等特征, 无论直接排放还是排入市政污水厂都

收稿日期: 2022-07-11; 修回日期: 2023-05-05

基金项目: 国家能源集团科技创新资助项目(KJ9300000562)

作者简介: 王靖宇(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事燃煤脱硫废水处理技术研究, 通讯联系人, 18201474198@163.com。

会造成不利影响,一般在厂区内消纳不外排^[5],主要途径有:①干灰拌湿消纳,该方法会增加粉煤灰中氯离子,对粉煤灰的品质产生潜在影响,内蒙某电厂采用干灰拌湿消纳脱硫废水,干灰和废水质量比为 7:1,拌湿后的粉煤灰从产品变成固废,需运往固废场填满处置。采用干灰拌湿消纳脱硫废水,应核算氯离子从废水中转移至粉煤灰中造成氯离子的增量,以保证其不影响粉煤灰品质,该法适用于水量小、氯离子含量低的脱硫废水^[6]。②炉渣系统消纳,电厂除渣分为湿除渣系统和干除渣系统,湿除渣系统可采用脱硫废水作为炉渣冷却水,用于补充因高温炉渣而大量蒸发的水分,炉渣孔隙结构发达且含有大量碱性金属化合物,可吸附脱硫废水中有毒物质和中和酸性的脱硫废水,但需解决氯离子对除渣系统的腐蚀问题^[7]。干除渣系统可采用脱硫废水作为排渣时的除尘水,通过排渣带走一定量的脱硫废水,但该方法消耗的脱硫废水量非常有限^[8]。③煤场喷洒和输煤皮带冲洗,脱硫废水中高氯离子对锅炉、输煤皮带等存在腐蚀的风险,脱硫废水经煤场喷洒,废水中无机盐黏附到煤粒表面,进入锅炉燃烧会降低煤灰熔点,影响煤灰的结渣性能,可能造成锅炉结焦。

2 新型脱硫废水零排放技术

目前,深能河源、重庆万州、焦作万方、华能长兴、国电汉川、国电西宁等电厂均已实施了脱硫废水零排放^[9],综合分析这些脱硫废水零排放工程案例,可将脱硫废水零排放技术归纳为 3 个关键环节:预处理、浓缩减量和固化。

2.1 预处理

传统三联箱工艺仅对脱硫废水进行达标处理,出水钙镁等硬度离子、悬浮物和浊度较高,无法达到后续浓缩减量及固化结晶单元的水质要求,需对三联箱进行改造优化作为零排放预处理系统,改造主要涉及 2 个方面:①完全软化去除钙镁等硬度离子;②深度过滤降低悬浮物和浊度。

2.1.1 完全软化

为了达到完全软化的目的,需要改变三联箱加药方案,软化加药方案主要有以下 4 种: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ 。

“ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ”的加药方案具有软化效果好、工艺成熟、停留时间短等优点,同时石灰的投加

可以去除废水中部分硫酸根,目前脱硫废水零排放的工程案例中普遍采用此加药方案,但该方案存在以下问题:①石灰主要作用是除镁,需加入大量的石灰乳以去除镁离子,由于氢氧化钙微溶于水且过高的钙离子会抑制石灰的溶解,存在氢氧化钙未反应完全直接沉淀的情况,造成污泥含水率高,板框压滤机的压泥效果差^[10];②氢氧化钙引入大量钙离子,需加入大量碳酸钠溶液沉淀钙离子,而碳酸钠价格偏高,典型脱硫废水的吨水软化成本可达 40~80 元。

采用“ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ”加药方案,用氢氧化钠代替少量石灰调节 pH 至 11.3,可有效避免石灰反应不完全的问题;采用“ $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ”加药方案,用氢氧化钠全部代替石灰,该加药方案可避免引入钙离子,降低碳酸钠加药量,且 NaOH 加药设备简单,污泥产生量小,但氢氧化钠价格远高于石灰,总体药剂成本同“ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ”相差不大。为了降低“ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ”法的药剂费用,可采用硫酸钠代替部分碳酸钠,即“ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ”加药方案,硫酸钠价格为碳酸钠价格的 20%~30%,采用此加药方案药剂成本可降低 30%~40%。由于 CaSO_4 的 K_{sp} 为 3.16×10^{-7} ,远大于 CaCO_3 的 2.8×10^{-9} ,钙离子优先与碳酸根反应,因此该方案需要设计两级反应沉淀系统分别投加 Na_2SO_4 和 Na_2CO_3 ,才能达到节省碳酸钠投加量的目的。赵飞等^[11]针对同一脱硫废水水质,对比了以上 4 种加药方案的药剂成本,如表 1 所示,表明“ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ”加药方案具有明显的成本优势。

表 1 不同加药方案处理脱硫废水药剂成本

加药方案	药剂成本/(元·t ⁻¹)
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$	42.4
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$	48.6
$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$	47.2
$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3$	27.0

2.1.2 深度过滤

为了达到后续浓缩减量单元对悬浮物和浊度要求,需对废水进行深度过滤,主要工艺有传统沉淀过滤和管式膜过滤。

传统沉淀过滤是对加药软化后的泥水混合液进行沉淀、砂滤和超滤处理,这些技术运行稳定且较为

成熟,已得到广泛应用。废水经过沉淀、砂滤和超滤处理后,出水浊度可达 1 NTU 以下,SDI 值降低到 3 以下,达到后续膜浓缩的进水要求。

管式膜过滤采用错流过滤方式,加药软化后的泥水混合物在压力驱动下流经膜管内表面,固体颗粒被浓缩液带出而不会在膜表面积聚造成污垢,膜透过液被净化,出水浊度可降低至 1 NTU 以下^[12]。

与传统沉淀过滤法相比,管式膜超滤工艺可替代沉淀、过滤和超滤,工艺流程短,占地面积小^[13],适用于项目建设场地紧张或北方寒冷地区室内工程,但关键膜元件需要采用进口品牌,设备投资高,为防止固体颗粒在膜表面积聚污垢,要求循环液在膜表面流速较高,循环泵流量一般为进水量的 7~10 倍,吨水运行费用高。以处理 15 m³/h 废水为例,传统沉淀过滤法和管式膜超滤法比较分析见表 2,在深度预处理工艺选择上,应综合考虑占地面积、投资及运行费用。

表 2 传统沉淀过滤法和管式膜超滤法的对比

项目	传统沉淀过滤法	管式膜过滤
占地面积/m ²	60	25
投资/万元	65	115
直接运行费用/(元·t ⁻¹)	1.2	2.3

2.2 浓缩减量

浓缩减量是对预处理后的废水进行减量处理,减少固化结晶单元的处理量,降低能耗与运行成本。根据浓缩方式的不同,可分为膜浓缩和热浓缩,热浓缩通过热源加热产生相变实现废水的浓缩,能耗较高;膜浓缩技术因投资及运行成本低、运行可靠、操作简单等优点^[14],在脱硫废水浓缩应用较为广泛。

目前已在脱硫废水处理领域实现工业应用的膜浓缩技术有纳滤(NF)、海水淡化反渗透(SWRO)、碟管式反渗透(DTRO)、电渗析(ED)、正渗透(FO)。

2.2.1 纳滤(NF)

脱硫废水中盐主要成分为 Na₂SO₄ 和 NaCl,为最终获得高纯度的盐产品,一般采用纳滤技术进行选择分离,纳滤对多价盐离子具有很高的截留率^[15],经纳滤处理后,淡水中主要成分是 NaCl,经浓缩后结晶回收高纯度的 NaCl;浓水中氯离子含量与原水相近,SO₄²⁻、硬度离子及其他污染物等被浓缩,需要进一步处理,浓缩后才能结晶固化回收 Na₂SO₄,处理流程长,投资费用高。一般将纳滤浓

水返回脱硫塔或进水调节池,以 CaSO₄ 沉淀方式去除硫酸根,但会造成脱硫废水的总处理量增加 30%~50%。

2.2.2 海水淡化反渗透(SWRO)

海水淡化膜是设计和开发用于海水淡化的反渗透膜,SWRO 浓缩极限仅能达到 6%~8%,需要与其他技术耦合联用,实现高倍浓缩,目前已在脱硫废水实现工业化的高倍浓缩耦合技术有 SWRO-DTRO、SWRO-ED 和 SWRO-FO,当废水盐含量在 2%~4% 时,与海水盐含量类似,如图 1(a) 所示工艺,先通过 SWRO 进行淡化,再通过高倍浓缩技术对浓水进行浓缩,高倍浓缩产生的淡水进一步通过 SWRO 进行淡化。当废水盐含量 4%~6% 时候,盐含量大于海水,如图 1(b) 所示工艺,先利用高倍浓缩技术进行浓缩,浓缩后的淡水由 SWRO 脱盐淡化。耦合浓缩工艺充分利用了 DTRO/ED/FO 的高浓缩极限和 SWRO 高脱盐率的优势,可获得高品质、高产水率淡水和高浓缩倍数浓水(12%~20%),实现脱硫废水的低成本浓缩与淡化。

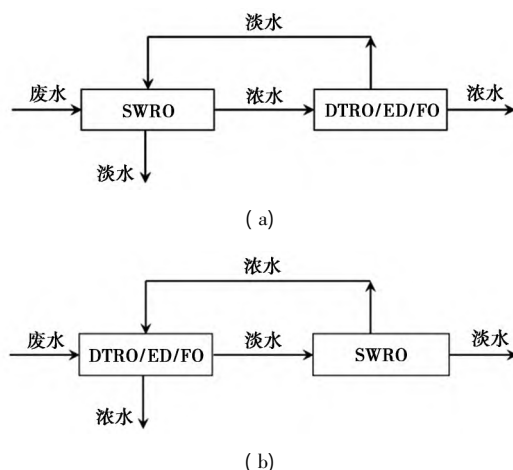


图 1 耦合浓缩工艺流程

2.2.3 碟管式反渗透(DTRO)

碟管式反渗透(DTRO)膜组件采用开放式流道设计,有效流道宽,导流盘表面有一定方式排列的凸点,使料液处于湍流状态,增加透过速率和具有自清洗功能,对进水浊度和有机物耐受程度高,易于清洗^[16]。DTRO 最高操作压力可达到 15 MPa,浓缩液 TDS 可达到 150 g/L。国电汉川电厂^[17]脱硫废水采用 SWRO 与 DTRO 联用的膜浓缩工艺,SWRO 浓缩后浓水量为 16 m³/h,盐含量约 59 g/L,经 DTRO 进一步浓缩后,盐含量达到 118 g/L,浓缩后水量约 8 m³/h,减量效果显著。然而,较高的操作压力对管

路、阀门和泵的材质提出了更高的要求,同时膜组件装填密度低且价格十分高昂,造成了投资和运行成本的大幅度增加。

2.2.4 电渗析(ED)

电渗析(ED)是在两端电极外加直流电场的作用下,阴、阳离子分别透过具有选择性的阴膜和阳膜向阳极和阴极移动,在两极之间形成交错排列的淡水室和浓水室,从而实现含盐废水的浓缩和淡化,ED可以实现废水的高倍浓缩,浓缩液可达 150~200 g/L。国神集团河曲电厂采用 ED-RO 组合工艺对脱硫废水进行浓缩,进入 ED-RO 的盐水量为 32 m³/h,经 ED-RO 组合浓缩,浓水 TDS 达到 170 g/L,浓缩后水量为 6 m³/h,大幅度降低了后续蒸发器的处理规模。电渗析技术具有浓缩倍数高、运行能耗低等优点,但对进水水质要求高,设备结构较为复杂,投资成本高,易结垢,需要在流道设计和极板材料等方面进行改进^[18]。

2.2.5 正渗透(FO)

正渗透(FO)以渗透压为驱动力,溶液中的水从较高水化学势一侧透过选择透过性膜流向较低水化学势一侧,是一种自发的过程^[19],FO 浓缩极限可达 15%~20%。FO 技术已在华能长兴电厂脱硫废水零排放项目中投产运行,为国内首套 FO 系统,采用 SWRO-FO 组合技术进行浓缩和淡化,将 22 m³/h 废水浓缩至 1.5~2 m³/h,将含盐量 25~40 g/L 浓缩至 200 g/L^[20]。FO 技术无需外界压力驱动,能耗低,浓缩极限高、膜污染低。但需选取合适的汲取液,汲取液的再生过程复杂,需额外能量,FO 膜浓差极化严重、水通量低、成本高,在含盐废水浓缩领域应用案例较少,稳定性和可靠性等需进一步验证。

2.3 固化

2.3.1 蒸发结晶

蒸发结晶技术在工业高盐废水领域应用较为成熟,在脱硫废水领域应用较多的蒸发结晶技术主要有多效蒸发和机械蒸汽再压缩蒸发。蒸发结晶技术是对浓缩减量后的脱硫废水进行蒸发浓缩,浓缩液在过饱和状态下析出结晶盐,水蒸汽经冷凝后回用。

(1) 多效蒸发(MED)

多效蒸发(MED)是利用水在不同压力沸点不同这一原理来设计的,各效的操作压力、相应的加热蒸汽温度与溶液沸点依次降低,多效蒸发中的每一个蒸发器称为一效,效数越多,蒸汽的热能利用效率

越高,但随着蒸发器的效数增大,设备投资高、占地面积大,实际应用需要对蒸汽费用与设备投资进行对比分析,以选取最经济的效数,工业上常采用的为三效或四效蒸发^[21]。广东河源电厂是国内首家实现脱硫废水零排放的电厂,脱硫废水量为 22 m³/h,经预处理后直接进入固化单元,采用四效立管强制循环蒸发结晶工艺,得到固体混盐,由于未经膜浓缩,蒸发结晶处理水量大,投资及运行成本均较高^[22]。

(2) 机械蒸汽再压缩技术(MVR)

机械蒸汽再压缩技术(MVR)是利用自身产生的二次蒸汽,通过压缩机做功把电能转换成热能,提高二次蒸汽的焓,转化为高品质热源,从而循环使用蒸汽。该技术正常运行消耗电能,不需要外部新鲜蒸汽,仅在设备启动时需要蒸汽,处理每吨含盐废水耗电 20~30 kWh,即蒸发每千克水仅需 117 kJ 或更少的热能,理论上相当于 20 效的多效蒸发系统^[23]。MVR 与 MED 技术相比,工艺流程短,设备少,占地面积小,运行能耗低,但一次性投资成本较高。国电汉川是国内首家采用 MVR 技术实现脱硫废水零排放的电厂,脱硫废水产生量为 36 m³/h,通过膜浓缩减量至 8 m³/h,通过 MVR 蒸发结晶处理,回收高纯度的 NaCl^[24]。

2.3.2 烟道蒸发技术

烟道蒸发技术是利用锅炉高温烟气的热量将雾化后的脱硫废水液滴迅速蒸发,蒸发后析出的固体物质随粉煤灰一起进入电除尘器被捕捉,按照选择的烟道不同,可以分为主烟道蒸发技术和旁路烟道蒸发技术。

(1) 主烟道蒸发技术

主烟道蒸发技术是将脱硫废水雾化后喷入空预器和电除尘器之间的烟道内,利用低温烟气(110~130℃)使废水完全蒸发,析出的结晶盐黏附在粉煤灰表面一起被电除尘器收集下来进入灰库,从而实现废水零排放^[25]。主烟道蒸发技术工艺流程简单,系统投资费用低,占地面积小,华能上都电厂和华电土右电厂曾使用该处理技术,存在废水蒸发不完全,盐渍易沉积在烟道底部而造成烟道堵塞,以及设备腐蚀等问题,不能与主机系统隔离,会增加机组正常安全运行风险。目前主烟道蒸发技术正逐步淘汰^[26]。

(2) 旁路烟道蒸发技术

旁路烟道蒸发是设置与空气预热器并联的烟

道,再将空预器前热烟气(约 350℃)引入旁路烟道,脱硫废水经雾化后与高温烟气充分接触实现快速干燥蒸发,蒸发产生的固体产物被电除尘器捕集。该技术由于旁路烟道系统与主系统独立,因此对主系统影响较小,可避免主烟道蒸发烟道堵塞腐蚀的问题^[27],但采用高温烟气作为热源,会造成系统发电煤耗增加,蒸发后产生的结晶盐进入粉煤灰中,造成粉煤灰氯离子升高,可能对粉煤灰的利用产生潜在影响^[28]。该技术已在同煤临汾热电 300 MW 机组得到工业应用,该机组脱硫废水设计处理量为 5 t/h,将 3%~5%的预热器前的烟气引出至喷雾干燥塔,将旋转雾化后的废水蒸发,投运后锅炉效率下降 0.2%~0.3%,煤耗升高 0.6~0.9 g/kWh,粉煤灰中氯离子升高至 0.139%,按照最大值 40%作为硅酸盐水泥成分,满足水泥中氯离子小于 0.06%的要求^[29]。

3 脱硫废水处理技术路线选择建议

近年来,随着燃煤价格的上涨,机组运行负荷持续偏低,燃煤电厂普遍处于亏损状态,经济合理地选择脱硫废水技术路线有助于缓解电厂沉重的经济负担。

脱硫废水技术路线选择的关键是末端处理,决定着预处理和浓缩减量的工艺选择,末端处理按照最终产物去向可分为厂区消纳、烟道蒸发飞灰固化和蒸发结晶回收 NaCl。从投资和运行成本分析,厂区消纳<烟道蒸发粉煤灰固化<蒸发结晶回收 NaCl。厂区消纳方式包括干灰拌湿、炉渣系统消纳、煤场喷洒和输煤皮带冲洗,需对各消纳点用水量做全面规划管理,依据可消纳的水量,选择性设计预处理和浓缩减量的具体工艺,厂区消纳还需解决设备腐蚀问题,通过阴极保护和涂刷防腐涂料的方法可有效缓解 Cl⁻对设备的腐蚀。对于脱硫废水无法采用厂区消纳处理时,建议采用旁路烟道飞灰固化,为保证锅炉燃烧稳定性,一般控制抽取烟气量在 5% 范围内,根据锅炉烟气量和废水量核算是否需要浓缩以及选择合适的浓缩倍数,对于 300 MW 机组而言,最大废水处理量不宜超过 6 t/h,600 MW 机组不宜超过 10 t/h,1 000 MW 机组不宜超过 15 t/h^[30]。对于脱硫废水厂区内无法消纳,且采用烟道蒸发飞灰固化会影响粉煤灰出售的电厂,建议采用蒸发结晶工艺回收 NaCl,但应提前规划 NaCl 的出路问题,避免产生额外的固废,NaCl 可作为氯碱厂原料或融雪

剂,适用于周边有氯碱厂或雪资源丰富的地区。

对于末端处理采用厂区消纳或烟道蒸发飞灰固化方式,浓缩减量工艺路线依据末端可处理的水量来确定,当 $Q_{\text{脱硫废水}} \leq Q_{\text{末端处理}}$,则仅需通过三联箱工艺进行达标处理,调整废水 pH、去除重金属和悬浮物,送往厂区消纳点或烟道蒸发,当 $Q_{\text{脱硫废水}} > Q_{\text{末端处理}}$,根据末端可处理水量确定浓缩倍数,当浓缩倍数<4 倍且原水含盐量 2%~4%,采用 SWRO 工艺浓缩,相对 DTRO、ED 和 FO 浓缩运行稳定、投资及运行成本低,当浓缩倍数为 4~10 倍,需以 SWRO 为基础耦合高倍浓缩技术,由于 ED 对进水水质要求高,FO 技术不成熟且投资高,采用 SWRO-DTRO 的耦合浓缩工艺更具优势。对于末端处理采用蒸发结晶回收 NaCl,为了得到高纯度的 NaCl 产品,采用 NF 工艺将硫酸根、硬度离子及其他污染物截留至浓水侧,NF 浓水返回烟气脱硫系统,以 CaSO₄ 沉淀方式去除硫酸根,NF 淡水建议采用 SWRO-ED 组合工艺浓缩,ED 相对于 DTRO 可实现更高的浓缩倍数,有效降低蒸发结晶的处理量、投资和运成成本。

膜浓缩工艺对进水水质的普遍要求为硬度 ≤ 250 mg/L,浊度<1 NTU,因此在膜浓缩之前必须设置预处理进行完全软化和深度过滤,完全软化关键是选择合适的软化药剂,“Ca(OH)₂+Na₂SO₄+Na₂CO₃”加药方案相对于其他加药方案,药剂成本更低。深度过滤优先选择传统沉淀过滤即“沉淀+砂滤+超滤”,相对于管式膜过滤,运行稳定且投资、运行成本低,仅当项目用地紧张时考虑采用管式膜过滤。

4 结语

针对燃煤电厂脱硫废水处理,通过结合实际生产中各类技术的典型工程案例,详细阐述了不同技术的特点及适用条件,对于具体脱硫废水技术路线的选择应坚持一厂一策的原则,从全厂角度出发,首先确定最终产物的去向即选择经济合理的末端处理技术,根据末端处理的水量水质要求,进一步确定浓缩减量和预处理技术。随着近年来燃煤电厂经济压力不断增大,工艺路线的选择不仅要关注技术的先进性,更需要关注技术路线的投资和运行成本,技术经济性决定着技术路线的最终选择。

参考文献

- [1] Chao F, Gao X N, Tang Y T, et al. Comparative life cycle environ-

- mental assessment of flue gas desulphurization technologies in China[J]. *Journal of Cleaner Production* 2014 68(2): 81-92.
- [2] 郑利兵, 魏源送, 焦贻仪, 等. 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.
- [3] 李飞. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术应用与研究进展[J]. *水处理技术* 2020 46(12): 17-24.
- [4] 郭志文, 刘军军, 高志佳, 等. 新型石灰石湿法烟气脱硫废水处理工艺[J]. *洁净煤技术* 2018 24(4): 126-130.
- [5] 贾西部. 脱硫废水零排放技术路线遴选原则解析[J]. *水处理技术* 2021 47(8): 14-19.
- [6] 张建华, 池毓菲, 邵宜金, 等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术工程应用现状与展望[J]. *工业水处理* 2020 40(10): 14-19.
- [7] 林晓锋, 钟永华, 林俊勇, 等. 利用渣水系统处理脱硫废水的工程案例[J]. *环境工程学报* 2022 16(2): 645-650.
- [8] 毛承慧. 脱硫废水煤场喷洒处理对锅炉运行的影响[J]. *热力发电* 2019 48(11): 102-107.
- [9] 孙振宇, 沈明忠. 燃煤电厂脱硫废水零排放工程案例研究[J]. *工业水处理* 2018 38(10): 102-105.
- [10] 张娟, 刘平元, 吉顺健, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放预处理工艺选择与实践[J]. *动力工程学报* 2019 39(10): 840-846.
- [11] 赵飞, 石中喜, 张净瑞, 等. 适应水质波动性的燃煤电厂脱硫废水软化工艺研究[J]. *工业水处理* 2021 41(4): 97-101.
- [12] 刘亚鹏, 王金磊, 陈景硕, 等. 火电厂脱硫废水预处理工艺优化及管式微滤膜实验研究[J]. *中国电力* 2016 49(2): 153-158.
- [13] 王冬梅, 程家庆, 孔繁军. 脱硫废水零排放技术与工艺路线[J]. *工业水处理* 2017 37(8): 109-112.
- [14] 连坤田, 陈景硕, 刘朝霞, 等. 火电厂脱硫废水微滤、反渗透膜法深度处理试验研究[J]. *中国电力* 2016 49(2): 148-152.
- [15] 何灿, 刘兆峰, 熊日华. 膜浓缩技术在高盐废水零排放处理中的应用[J]. *现代化工* 2019 39(10): 42-45 50.
- [16] 左俊芳, 宋延冬, 王晶. 碟管式反渗透(DTRO)技术在垃圾渗滤液处理中的应用[J]. *膜科学与技术* 2011 31(2): 110-115.
- [17] 徐志清, 赵焰, 陆梦楠. 燃煤电厂脱硫废水零排放工程案例解析[J]. *电力科技与环保* 2020 36(2): 6-12.
- [18] Andrade B E, Borba R P, Seckle M M, et al. Water recovery from saline streams produced by electrodialysis[J]. *Environmental Technology* 2015 36(3): 386-394.
- [19] Valladares L, Li Z, Sarp S, et al. Forward osmosis niches in seawater desalination and wastewater reuse[J]. *Water Research* 2014 66: 122-139.
- [20] 邵国华, 方棣. 电厂脱硫废水正渗透膜浓缩零排放技术的应用[J]. *工业水处理* 2016 36(8): 109-112.
- [21] 吕武学, 于燕飞, 曲保忠, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术现状与发展[J]. *洁净煤技术* 2020 26(4): 11-20.
- [22] 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.
- [23] 杨跃伞, 苑志华, 张净瑞, 等. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术研究进展[J]. *水处理技术* 2017 43(6): 29-33.
- [24] 万勇刚, 徐峰, 田旭峰, 等. 国电汉川发电有限公司脱硫废水蒸发结晶项目工艺解析[J]. *华电技术* 2017 39(10): 74-76.
- [25] 马双忱, 于伟静, 贾绍广, 等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术研究与应用进展[J]. *化工进展* 2016 35(1): 255-262.
- [26] Ma S C, Chai J, Chen G D, et al. Research on desulfurization wastewater evaporation: Present and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016 58: 1143-1151.
- [27] 袁国全, 陈渝楠, 胡特立, 等. 某热电厂脱硫废水旁路烟道蒸发系统工程设计开发[J]. *工业水处理* 2021 41(10): 145-150.
- [28] 熊日华. 常温结晶分盐零排放脱硫废水处理技术[J]. *水处理技术* 2019 45(6): 10-14.
- [29] 杜艳玲, 柴启华, 员在斌. 旋转喷雾干燥法在火电厂脱硫废水零排放改造中的应用[J]. *内蒙古电力技术* 2018 36(2): 50-53.
- [30] 李永连, 张艳楠, 陈梓玉. 燃煤电厂脱硫废水固化工艺技术分析[C]. 天津: 中国环境科学学会环境工程分会 2021. ■
- (上接第43页)
- [15] Yang J, Sun H, Peng T, et al. Separation of alumina from aluminum-rich coal fly ash using NaOH molten salt calcination and hydrochemical process[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2022 24(5): 1507-1519.
- [16] 白光辉, 滕玮, 孙亦兵, 等. 粉煤灰酸法提镓探索研究[J]. *应用化工* 2008 37(7): 757-759.
- [17] 徐梦, 辛志峰, 李婷, 等. 微波碱溶法对粉煤灰中镓浸出效果的影响研究[J]. *轻金属* 2016 51(6): 16-20.
- [18] Font O, Querol X, Juan R, et al. Evaluation of the possibilities for the recovery of Gallium and Vanadium from gasification fly ash[J]. *Journal of Hazardous Materials* 2007 139(3): 413-423.
- [19] 文朝璐, 孙振华, 李少鹏, 等. LX-92树脂对硫酸体系低浓度镓离子的动态吸附[J]. *过程工程学报* 2021 21(5): 567-578.
- [20] 河北工程大学. 一种从粉煤灰中综合提取铝和锂的方法: CN102923742A[P]. 2013-02-13.
- [21] 中国科学院过程工程研究所. 一种粉煤灰中铝硅锂镓联合法协同提取的方法: CN201610681114.6[P]. 2018-03-06.
- [22] 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. *煤炭学报* 2014 39(8): 1707-1715.
- [23] Taggart R K, Hower J C, Dwyer G S, et al. Trends in the rare earth element content of U.S.-based coal combustion fly ashes[J]. *Environmental Science & Technology* 2016 50(11): 5919-5926.
- [24] Wen Z, Zhou C, Pan J, et al. Recovery of rare-earth elements from coal fly ash via enhanced leaching[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 2022 42(7): 2041-2055.
- [25] 李慧琴, 魏迪, 刘全, 等. NH_4HCO_3 沉淀分离还原反萃余液中的稀土与锌工艺研究[J]. *中国稀土学报* 2018 36(5): 602-607.
- [26] Wang Z H, Ma G X, Lu J, et al. Separation of heavy rare earth elements with extraction resin containing 1-hexyl-4-ethyloctyl isopropylphosphonic acid[J]. *Hydrometallurgy* 2002 66(1/2/3): 95-99.
- [27] 尚志标, 黄小凤, 马丽萍, 等. 粉煤灰和自然冷却黄磷炉渣协同制备微晶玻璃[J]. *硅酸盐通报* 2017 36(2): 533-538.
- [28] 彭长浩, 卢金山. 利用废玻璃和粉煤灰制备钙铝硅微晶玻璃及其性能[J]. *材料热处理学报* 2012 33(10): 32-36.
- [29] Kumar J V, Prasad B G. Synthesis of geopolymer from coal fly ash[J]. *Journal of Nepal Chemical Society* 2013 30: 24-28.
- [30] Bhandari R B, Pathak A, Kumar V. A laboratory scale synthesis of geopolymer from locally available coal fly ash from brick industry[J]. *Journal of Nepal Chemical Society* 2012 29(1): 18-23. ■