

DOI: 10.19666/j.rlfed.202205099

## 某电厂废水零排放系统污堵分析

李亚娟, 卢剑, 余耀宏, 韩锐, 张宁

(西安西热水务环保有限公司, 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 某电厂采用“两级软化澄清+介质过滤+超滤+纳滤+反渗透”组合工艺处理循环水排污水, 采用“化学软化+管式微滤+纳滤+海水淡化反渗透+电渗析+蒸发结晶”组合工艺处理末端废水, 以实现全厂废水“零排放”。工程投运 1 年后, 循环水处理系统出现纳滤出力不足, 末端废水处理系统存在微滤膜有机污堵严重、电渗析硅结垢等问题。分析了膜污堵原因, 对脱硫工艺用水进行了优化, 从源头降低了脱硫废水化学需氧量 (COD); 同时优化了微滤运行方式, 从而减缓了微滤有机污堵现象; 此外, 调整了循环水反渗透浓水处理方式, 将全硅质量浓度降至 1 mg/L 以后再进入电渗析设备, 解决了电渗析硅结垢的问题。

**[关键词]** 燃煤电厂; 零排放工程; 膜浓缩; 蒸发结晶; 有机污堵; 硅结垢

[引用本文格式] 李亚娟, 卢剑, 余耀宏, 等. 某电厂废水零排放系统污堵分析[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 177-182.  
LI Yajuan, LU Jian, YU Yaohong, et al. Membrane fouling analysis for zero liquid discharge treatment system in a power plant[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 177-182.

## Membrane fouling analysis for zero liquid discharge treatment system in a power plant

LI Yajuan, LU Jian, YU Yaohong, HAN Rui, ZHANG Ning

(Xi'an TPRI Water-Management & Environmental Protection Co., Ltd., State Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to realize zero liquid discharge, a power plant treated circulating wastewater by the combination process of two stage softening and clarification, media filtration, ultrafiltration, nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO), and treated terminal wastewater by the combination process of chemical softening, tubular microfiltration (MF), NF, seawater desalination reverse osmosis, electro dialysis (ED) and evaporative crystallization. After the above measures were taken for 1 year, insufficient NF output was found in the circulating wastewater treatment system, and serious MF membrane organic fouling and ED silicon scaling was observed in the terminal wastewater treatment system. Thus, the causes of the membrane fouling was analyzed and the desulfurization process water was optimized to reduce the chemical oxygen demand (COD) of desulfurization wastewater from the source. Moreover, the MF operation mode was optimized, so as to slow down the MF organic pollution phenomenon. In addition, the RO concentrated water of circulating water treatment mode was adjusted, and the total silicon mass concentration was reduced to less than 1 mg/L before being fed into the ED equipment, to solve the problem of the ED silicon scaling.

**Key words:** coal-fired power plant; zero liquid discharge project; membrane concentration; evaporation crystallization; organic fouling; silicon scaling

电力行业属于我国高耗水行业之一<sup>[1]</sup>, 其用水量约占全国工业用水总量的 40%<sup>[2]</sup>。近年来随着废水梯级使用、循环水高浓缩倍率运行控制技术、膜法水处理技术等的应用, 火电厂节水减排工作取得

了显著成效。2019 年全国火电厂发电量耗水量降至 1.21 kg/(kW·h), 废水排放量降至 0.054 kg/(kW·h)<sup>[3]</sup>。此外, 部分环保敏感地区要求火电厂实现全厂废水零排放, 末端废水浓缩减量及固化处理技术难度最

收稿日期: 2022-05-15 网络首发日期: 2022-10-06

第一作者简介: 李亚娟 (1983), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火电厂水处理技术, liyajuan@tpri.com.cn。

大,投资和运行费用最高,是废水零排放电厂面临的重大难题<sup>[4]</sup>。

目前,粤电广东河源电厂、佛山三水恒益电厂、华能长兴电厂、国电汉川电厂、华能黄台电厂等均已实施了废水零排放工程。其中,粤电广东河源电厂为国内首个实现废水零排放的电厂,脱硫废水零排放处理采用“两级软化+强制循环蒸发结晶”工艺,结晶盐达到了二级工业盐标准。佛山三水恒益电厂采用“两级卧式机械蒸汽再压缩(MVR)+两级卧式强制循环蒸发+结晶干燥”工艺,由于未设置预处理单元,其产品为混合盐,送专业固体废弃物处理中心处置,而且蒸发器结垢严重、清洗频繁。华能长兴电厂采用“两级软化+离子交换+反渗透+正渗透+蒸发结晶”工艺,实现了脱硫废水零排放,是国内首个将正渗透用于废水处理的电厂<sup>[5-6]</sup>。国电汉川电厂脱硫废水处理采用“化学软化+管式微滤+纳滤+碟管式反渗透+蒸发结晶”工艺,采用纳滤分盐及蒸发结晶,获得了高品质的结晶盐<sup>[7]</sup>。华能黄台电厂脱硫废水处理采用“两级软化+超滤+海水反渗透+旁路烟道干燥”工艺,蒸发器热源取自空气预热器前的 330 °C 热烟气,废水析出的盐分和飞灰混合后以粉煤灰的形式实现综合利用<sup>[8-9]</sup>。旁路烟道干燥技术投资低、运维简单,目前已在浙能长兴电厂、华能铜川电厂、临汾热电等多家电厂得到了应用。

某电厂设有 2 台超超临界 600 MW 国产凝汽式燃煤机组,采用城市中水作为生产水源,废水零排放处理工程包括循环水排污水处理系统和末端废水处理系统 2 部分,工程于 2019 年 5 月投入运行。本文主要对该废水零排放工程投运后出现的膜污堵问题进行分析,并提出解决措施。

## 1 系统概述

### 1.1 废水水质

表 1 为循环水排污水和脱硫废水水质分析结果。由表 1 可见,循环水排污水含盐量、Cl<sup>-</sup>质量浓度、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度、硬度、化学需氧量(COD)等均较高,结垢和腐蚀性较强,而且排水量约 460 m<sup>3</sup>/h,除少量可回用于脱硫和灰渣系统外,富裕水量无法直接厂内回用。脱硫废水含盐量达到 40 000 mg/L 以上,Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度偏高,对金属设备及混凝土的腐蚀性极强;硬度极高,尤其是镁硬比例高,约占总硬度的 85%,属于强结垢性水

质。此外,脱硫废水 COD 偏高,达到 1 200 mg/L,主要为有机物和还原性无机物质,其中 SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>质量浓度约 400 mg/L;全硅为 138 mg/L,活性硅占比约 89%。由此可见,脱硫废水水质极差,回用处理难度高。

表 1 废水水质分析结果  
Tab.1 Quality analysis data for wastewater

项目	循环水排污水	脱硫废水
$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	431.00	942.00
$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	172.00	5 360.00
总硬度/(mmol·L <sup>-1</sup> )	35.93	493.77
$\rho(\text{Cl}^{-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1 184.00	15 240.00
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1 217.00	14 845.00
$\rho(\text{SO}_3^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		398.00
全硅质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	19.85	138.00
胶体硅质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.47	15.26
pH 值	8.36	8.79
电导率/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	5 986.00	34 740.00
含盐量/(mg·L <sup>-1</sup> )	4 820.00	43 120.00
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	63.00	1 206.00
氨根离子质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.36	22.00

### 1.2 工艺流程

#### 1.2.1 循环水排污水处理系统

采用“两级软化澄清+介质过滤+超滤(UF)+纳滤(NF)+反渗透(RO)”组合工艺处理循环水排污水和末端废水处理系统电渗析产水,设计处理量为 440 m<sup>3</sup>/h,工艺流程如图 1 所示。

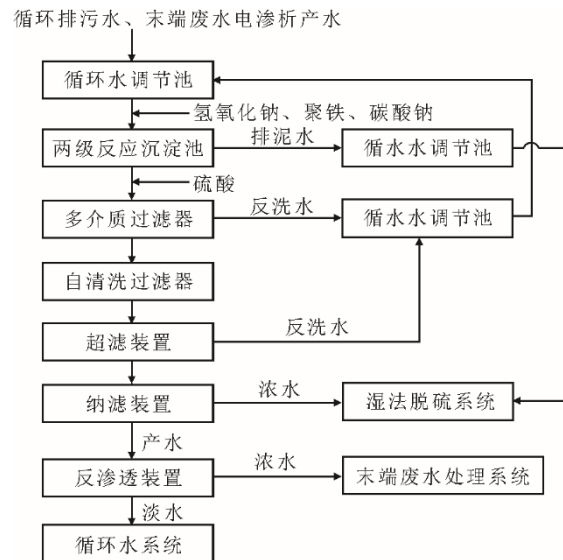


图 1 循环水排污水处理工艺流程  
Fig.1 Flow chart of the circulating wastewater treatment process

循环水排污水和脱硫废水电渗析产水排至循环水调节池进行均质后,经提升泵进入两级反应沉

淀池，投加 NaOH、混凝剂 PFS、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 降低循环水的硬度、碱度、悬浮物、有机物等含量；沉淀池出水采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 调节 pH 值后，经多介质过滤器和超滤进一步降低悬浮杂质后进入纳滤装置；NF 设计回收率为 95%，NF 浓水作为脱硫工艺用水，NF 产水再经反渗透脱盐处理，RO 设计回收率为 90%，RO 淡水作为循环水补水回用，RO 浓水排至末端废水处理系统。反应沉淀池污泥排至中水污泥浓缩池，最后回用至脱硫吸收塔，多介质过滤器及 UF 反洗水收集至调节池，继续循环处理。

1.2.2 末端废水处理系统

采用“化学软化+管式微滤(MF)+NF+海水淡化反渗透(SWRO)+电渗析(ED)+蒸发结晶”组合工艺处理末端废水，末端废水包括脱硫废水和循环水反渗透浓水，设计处理量为 75 m<sup>3</sup>/h，工艺流程如图 2 所示。

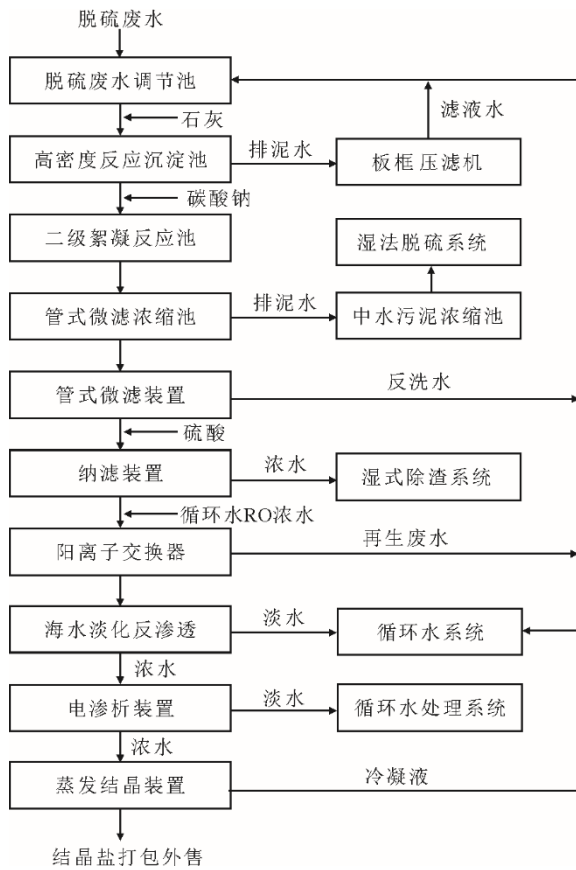


图 2 末端废水处理工艺流程  
Fig.2 Flow chart of the terminal wastewater treatment process

脱硫废水经调节池进行水质均质后进入一级反应沉淀池，投加石灰去除脱硫废水中的 Mg<sup>2+</sup>、SiO<sub>2</sub>、悬浮物和部分 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及有机物，污泥经

污泥缓冲罐和板框压滤机进行处理。一级反应沉淀池出水进入二级絮凝反应池，池内投加 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>，充分反应后其出水进入管式微滤浓缩池，MF 采用错流运行方式，MF 浓水回至浓缩池，浓缩池排泥水经中水污泥浓缩池后回用至脱硫吸收塔，MF 产水采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 调节 pH 值后进入纳滤装置；NF 设计回收率为 75%，NF 浓水作为捞渣机补水，NF 产水及循环水 RO 浓水经阳离子交换器进一步去除硬度离子后进入海水淡化反渗透装置进行脱盐处理；SWRO 设计回收率为 60%，SWRO 淡水回用至循环水系统，SWRO 浓水排至电渗析装置；ED 回收率设计为 80%，ED 产水排至循环水排污水处理系统，ED 浓水进入蒸发结晶装置；蒸发器设计处理量为 6 m<sup>3</sup>/h，采用 MVR 工艺，MVR 浓缩液进结晶器，MVR 和结晶器的冷凝液回用至循环水系统，结晶盐经离心脱水机和干燥流化床处理，盐分达到二级工业盐的要求后打包外售。

2 问题及原因分析

2.1 循环水纳滤出力不足

循环水排污水纳滤处理装置分为 NF1 和 NF2 2 个单元，超滤产水进 NF1，NF1 回收率设计为 80%，NF1 浓水进 NF2，NF2 回收率设计为 75%，NF2 浓水作为脱硫工艺用水。纳滤系统淡水进反渗透装置。纳滤系统整体回收率设计为 95%，出力为 346 m<sup>3</sup>/h，但实际运行回收率只能达到 85%，出力降低至 310 m<sup>3</sup>/h。现场运行结果表明，当 NF 回收率提高至 95%时，压差增长过快，系统运行不稳定。表 2 为纳滤回收率分别为 85%和 95%时，NF 浓水水质分析结果。

表 2 循环水排污水纳滤处理系统 NF 浓水水质  
Tab.2 Quality of the NF concentrated water in the circulating wastewater treatment system

项目	回收率 85%	回收率 95%
ρ(Ca <sup>2+</sup> )/(mg·L <sup>-1</sup> )	24.00	59.00
ρ(Mg <sup>2+</sup> )/(mg·L <sup>-1</sup> )	12.00	32.00
总硬度/(mmol·L <sup>-1</sup> )	2.20	5.62
ρ(Cl <sup>-</sup> )/(mg·L <sup>-1</sup> )	1 216.00	1 248.00
ρ(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )/(mg·L <sup>-1</sup> )	9 738.00	29 450.00
全硅/(mg·L <sup>-1</sup> )	15.64	16.24
pH 值	7.47	7.56
电导率/(mS·cm <sup>-1</sup> )	12 140.00	34 420.00
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	248.00	662.00

由表 2 可见，由于纳滤基本不截留一价离子和

$\text{SiO}_2^{101}$ ，所以在回收率为 85% 和 95% 2 种运行工况下，NF2 浓水中的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SiO}_2$  质量浓度变化不大。纳滤对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的截留率达到 80% 以上，但循环水在两级反应沉淀池部分通过投加  $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  确保出水总硬度  $\leq 0.5 \text{ mmol/L}$ ，NF2 浓水中总硬度较低，避免了 NF 膜出现  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  结垢的可能性。NF 对  $\text{SO}_4^{2-}$  截留率  $\geq 90\%$ ，NF2 浓水中  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度偏高，尤其是在回收率为 95% 时，浓水中  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度达到 29 450 mg/L。

根据计算在回收率为 85% 和 95% 时  $\text{CaSO}_4$  的离子积分别为  $6.09 \times 10^{-5}$ 、 $4.54 \times 10^{-4}$ ，均大于  $\text{CaSO}_4$  溶度积  $4.93 \times 10^{-5}$ 。由于 NF 运行过程中投加了整合钙离子的阻垢剂，因此在 85% 回收率时纳滤膜形成  $\text{CaSO}_4$  垢的风险很低；但在 95% 回收率时， $\text{CaSO}_4$  的离子积达到其溶度积的 10 倍左右，纳滤膜极易形成  $\text{CaSO}_4$  结垢。此外，纳滤对 COD 的截留率也在 80% 左右，纳滤进水中的 COD 大部分截留在了浓水侧，在回收率控制为 95% 时，NF2 浓水 COD 偏高，达到 663 mg/L，大分子有机物容易在 NF 膜

表面累积形成滤饼层，小分子有机物也容易堵塞膜孔导致膜孔窄化。综上所述，在 95% 回收率条件下，纳滤膜存在  $\text{CaSO}_4$  结垢和有机物污染，从而导致系统压差增长快，运行不稳定。

## 2.2 末端废水管式微滤污堵

管式微滤采用美国 Duraflow 公司生产的 PVDF 烧结 MF 膜元件，设计处理量为  $2 \times 34 \text{ m}^3/\text{h}$ 。运行结果表明，MF 膜污堵严重，基本每天要进行 1 次离线化学清洗，清洗药剂采用的是质量分数 2%~5% 的  $\text{NaClO}$ ，清洗后 MF 膜通量基本可以恢复。由于 MF 膜污堵严重、频繁清洗，导致运维工作量和成本均很高，而且存在自用水率偏高、清洗废水难以处置等问题。此外，也导致整个末端废水处理系统不能实现连续运行，设备投运率不足 40%。根据系统运行情况分析，导致 MF 膜污堵的主要原因是进水有机物含量过高。运行初期，脱硫废水 COD 约 1 200 mg/L，随着运行时间延长，COD 增长至 1 800~2 000 mg/L。图 3 为脱硫系统水量平衡示意。

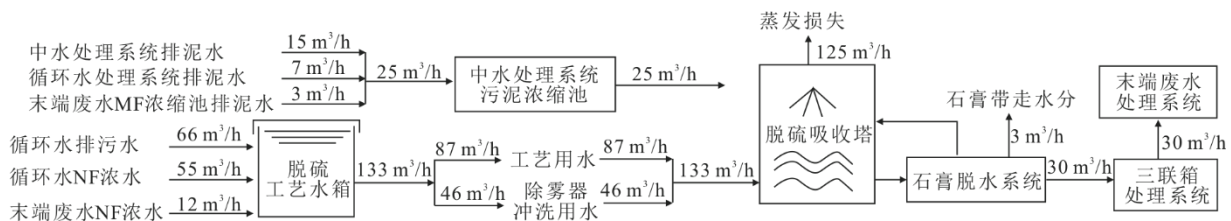


图 3 脱硫系统水量平衡示意  
Fig.3 Water balance diagram of the desulfurization system

由图 3 可见，电厂将中水、循环水以及末端废水处理系统产生的排泥水以及纳滤浓水均作为脱硫工艺用水，脱硫补水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  多以石膏的形式资源化利用，但补水中的有机物被石膏带走的量很小，大部分进入脱硫废水中，然后脱硫废水中的有机物再进入末端废水排泥水以及纳滤浓水中（纳滤浓水去除渣系统实际运行补入了脱硫工艺水箱），这 2 股水又补入脱硫系统，导致有机物在脱硫系统中不断循环和富集。此外，电厂生产水源为城市中水，中水有机物质量浓度在 40~60 mg/L，中水用水量达到 2 000  $\text{m}^3/\text{h}$ ，中水石灰处理排泥水补入脱硫吸收塔，石灰处理出水作为循环水补水。循环水经 4 倍浓缩后的排污水一部分补入脱硫系统，另一部分进入循环水排污水处理系统，循环水处理系统排泥水和纳滤浓水也补入了脱硫系统。由此可见，电厂中水以及废水中的绝大多数 COD 都在脱

硫系统内循环，整个流程下来 COD 无法排出，致使脱硫废水 COD 不断增高，从而严重影响了末端废水处理系统的运行。

## 2.3 末端废水电渗析污堵

电渗析设备采用的是日本旭硝子公司生产的碳氢高分子均相膜，设计处理量为  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ，浓水含盐量控制在 20% 左右。实际运行结果表明，ED 存在膜电阻增大、离子迁移量下降等问题，分析认为主要是因为 ED 膜堆内存在硅结垢现象所致，现场采用 HF 溶液进行清洗后可以恢复系统性能。表 3 为循环水和末端废水处理各工艺单元全硅分析结果。由表 3 可见，循环水排污水  $\text{SiO}_2$  质量浓度约 20 mg/L，两级软化处理仅去除了胶体硅，其出水  $\text{SiO}_2$  质量浓度为 16.27 mg/L，纳滤基本不截留  $\text{SiO}_2$ ，RO 回收率控制为 90%，RO 浓水  $\text{SiO}_2$  质量浓度达到 152 mg/L。脱硫废水  $\text{SiO}_2$  质量浓度为 138 mg/L，但脱硫废

水  $Mg^{2+}$  质量浓度高达 5 000~6 000 mg/L, 这在高密度反应池投加石灰提高 pH 值在 11.5 以上的情况下, 形成了大量的  $MgSiO_3$  沉淀, 使出水  $SiO_2$  质量浓度在 1 mg/L 以下。高密度反应池出水经 MF、NF 处理, NF 浓水和循环水 RO 浓水混合后进入阳离子交换器, 混合水  $SiO_2$  质量浓度为 78 mg/L。阳离子交换器基本不截留硅, 其出水进入 SWRO, SWRO 回收率设计为 60%, 其浓水  $SiO_2$  质量浓度达到 186 mg/L, SWRO 浓水再进入 ED 设备。由于进水  $SiO_2$  质量浓度过高, 且 ED 处理废水不是一次性通过, 而是通过不断循环来实现脱盐和浓缩, 进水在 ED 设备停留时间较长, 从而导致 ED 设备出现  $SiO_2$  结垢。

表 3 各工艺单元全硅质量浓度 单位: mg/L  
Tab.3 The total silicon mass concentration in each process unit

项目	循环水排污水处理系统	末端废水处理系统
进水	19.85	138.00
反应沉淀池出水	16.27	0.59
纳滤产水	15.64	0.47
反渗透浓水	152.00	186.00

### 3 解决措施

#### 3.1 降低脱硫废水 COD

由于电厂将废水处理系统产生的废水以及排泥水全部回用至脱硫系统, 导致脱硫废水 COD 不断富集。为确保末端废水处理系统稳定运行, 需从源头降低 COD。目前, 中水、循环水以及末端废水处理系统排泥水均排至中水处理系统的污泥浓缩池, 需要对污泥浓缩池排泥进行脱水处理, 将泥渣外运处置。此外, 电厂将循环水和末端废水处理系统的 NF 浓水也全部作为脱硫工艺用水, 考虑到循环水 NF 浓水 COD 相对较低, 可不作改造, 但需要将 COD 较高的末端废水 NF 浓水按设计作为除渣系统用水。

#### 3.2 管式微滤运行方式优化

由于 MF 有机污堵严重, 清洗频繁, 根据电厂实际情况, 需要对现有 MF 运行方式进行优化:

1) MF 增设在线维护性化学清洗, 清洗药剂采用  $NaClO$ , 维护性清洗为每天 1 次; 2) 增加反洗频次, 将现在的反洗周期 45 min/次改为 30 min/次。通过降低脱硫废水 COD 和优化 MF 运行方式, 可延长 MF 化学清洗周期至 5~7 天。

#### 3.3 循环水 RO 浓水处理调整

电厂设计将循环水 RO 浓水以 31  $m^3/h$  排至阳离子交换器前, 由于这部分废水全硅质量浓度很高, 建议将其排至脱硫废水储水池和脱硫废水混匀后  $Mg^{2+}$  质量浓度约 2 600~2 800 mg/L,  $SiO_2$  质量浓度约 145 mg/L。经过高密度反应沉淀池在投加石灰的强碱性环境下, 利用脱硫废水  $Mg^{2+}$  质量浓度高的特点, 在除硬度的同时协同去除硅酸盐类物质。根据试验结果, 出水全硅质量浓度可降低至 1 mg/L, 避免了 ED 设备在运行过程中发生硅结垢的问题。

### 4 结论及建议

1) 采用“两级软化澄清+介质过滤+超滤+纳滤+反渗透”组合工艺处理循环水排污水, 除纳滤回收率设计过高, 实际运行无法满足外, 其他各工艺单元运行良好, 满足设计要求。

2) 末端废水管式微滤处理系统运行存在有机污堵严重、化学清洗频繁的问题。通过从源头降低脱硫废水 COD、优化 MF 运行方式, 可将清洗周期由 1 天提高至 5~7 天。

3) 末端废水电渗析设备在运行中存在硅结垢问题。通过将循环水 RO 浓水处理位置提前至脱硫废水调节池, 以实现同步除硅除硬度, 从而解决 ED 硅结垢的问题。

4) 反渗透、纳滤等膜处理工艺用于高难度废水处理时, 回收率、膜通量等参数需根据进水水质特点慎重选择, 不宜过高。废水、排泥水等回用于电厂下游用户, 尤其是脱硫系统时, 需要统筹考虑上下游, 避免污染物质在系统内不断循环和富集。

5) 进水有机物和  $Mg^{2+}$  质量浓度高均易导致 MF 污堵。本案例设置了高密度反应池, 投加石灰去除  $Mg^{2+}$  后出水进 MF, 但这会导致工程投资、运行费用以及占地面积均偏高。有机物和  $Mg^{2+}$  质量浓度高的水质不宜采用管式微滤技术, 建议采用传统的“双碱法软化+混凝澄清工艺”。

#### [参考文献]

- [1] 马淑杰, 朱黎阳, 王雅慧. 我国高耗水工业行业节水现状分析及政策建议[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(2): 43-47.  
MA Shujie, ZHU Liyang, WANG Yahui. Analysis and suggestions on water conservation of high water-intensive industries in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(2): 43-47.
- [2] 潘荔, 刘志强, 张博. 中国火电节水现状分析及措施建议[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 158-163.

- PAN Li, LIU Zhiqiang, ZHANG Bo. Comprehensive analysis and related measures on current situation of water saving of thermal power generation in China[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 158-163.
- [3] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2020[R/OL]. (2020-06-12)[2022-05-10]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?1-284218>.  
China Electricity Council. China power industry annual development report 2020[R/OL]. (2020-06-12)[2022-05-10]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?1-284218>.
- [4] 杨宝红. 新形势下火电厂节水减排工作特点及关键[J]. 热力发电, 2016, 45(9): 95-99.  
YANG Baohong. Features and key process of water saving and wastewater discharge reduction in thermal power plants at current situation[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(9): 95-99.
- [5] 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.  
SUN Zhenyu, SHEN Mingzhong. Case study on zero discharge engineering of desulfurization wastewater in coal-fired power plants[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(10): 102-105.
- [6] 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.  
SHAO Guohua, FANG Li. Application of MBC zero liquid discharge technology to desulfurization wastewater treatment in a power plant[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(8): 109-112.
- [7] 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.  
WAN Yonggang, XU Feng, TIAN Xufeng, et al. Analysis on desulfurization waste water evaporative crystallization project process in Guodian Hanchuan Power Generation Company Limited[J]. Huadian Technology, 2017, 39(10): 74-76.
- [8] 杨宝红, 王璟, 许臻, 等. 火电厂深度节水及废水零排放[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 294-299.  
YANG Baohong, WANG Jing, XU Zhen, et al. Deep water saving and wastewater zero discharge technology for thermal power plants[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 294-299.
- [9] 姚子麟, 袁伟中, 陈彪, 等. 燃煤电厂末端废水调质与干化技术研究及其工程示范[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 48-53.  
YAO Zilin, YUAN Weizhong, CHEN Biao, et al. Technical study and demonstration project on the quality control and drying of terminal wastewater in coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 48-53.
- [10] 李亚娟, 申建汛, 武忠全, 等. 火电厂循环水排污水纳滤处理试验[J]. 热力发电, 2016, 45(12): 137-142.  
LI Yajuan, SHEN Jianxun, WU Zhongquan, et al. Experimental study on circulating water treatment in coal-fired power plant using nanofiltration process[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(12): 137-142.

(责任编辑 杨嘉蕾)

## 广告目次

《热力发电》.....	封三
南京苏夏工程设计有限公司.....	后彩插 1
北京柏兰达环境工程有限公司.....	后彩插 2
浙江顺豪科技有限公司.....	后彩插 3
西安热工研究院有限公司.....	后彩插 4—7
《热力发电》订阅.....	后彩插 8
上海冠龙阀门机械有限公司.....	后彩插 9
上海凯泉泵业(集团)有限公司.....	后彩插 10