

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.014

电渗析技术处理脱硫废水的效果分析

周明飞¹, 连坤宙¹, 王璟¹, 刘亚鹏¹, 毛进¹, 颜秉诚², 李尊峰²,
王永前²

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 华能济宁运河发电有限公司, 山东
济宁 272000)

摘要: 脱硫废水水质复杂、含盐量高,是目前火电企业节水减排工作的难点。针对脱硫废水的特点,研究电渗析(ED)工艺处理脱硫废水的效果。结果表明,当循环流量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 、电流密度为 $160\text{ A}/\text{m}^2$ 时,电渗析工艺可将溶解固形物(TDS)浓度约为 50 g/L 的脱硫废水浓缩至 200 g/L 左右,脱盐能耗最低为 $8.78\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$;倒极可有效去除膜表面的沉积垢层,降低ED脱盐能耗;通过联合RO工艺可实现脱硫废水的两步脱盐,RO系统在50%回收率下脱盐率高于98%,产水中TDS为 0.4 g/L ,可用作循环水补充水、脱硫工艺用水等电厂其他系统的补水。

关键词: 脱硫废水; 电渗析; 反渗透; 浓缩

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0080-07

Efficiency Analysis of Desulfurization Wastewater Treated by Electrodialysis Technology

ZHOU Ming-fei¹, LIAN Kun-zhou¹, WANG Jing¹, LIU Ya-peng¹, MAO Jin¹,
YAN Bing-cheng², LI Zun-feng², WANG Yong-qian²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng Jining Canal Power Generation Co. Ltd., Jining 272000, China)

Abstract: Desulfurization wastewater has the characteristics of complex water quality and high salinity, which is the difficulty of water saving and emission reduction in thermal power enterprises. According to the characteristics of desulfurization wastewater, the treatment effect of electrodialysis (ED) process on desulfurization wastewater was explored. When circulating flow and current density were $10\text{ m}^3/\text{h}$ and $160\text{ A}/\text{m}^2$, ED could concentrate desulfurization wastewater with total dissolved solids (TDS) content of about 50 g/L to about 200 g/L , and the minimum desalting energy consumption was $8.78\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$. The inverted pole could effectively remove the deposited scale layer on the membrane surface and reduce ED desalting energy consumption. Its combination with RO could achieve two-step desalting of desulfurization wastewater. The desalting rate of RO system was higher than 98% and TDS in effluent was 0.4 g/L under the condition of 50% recovery rate, which could be used as supplement water of the circulating water, desulfurization process water and other supplement water of the power plant.

Key words: desulfurization wastewater; electrodialysis; reverse osmosis; concentration

脱硫废水作为电厂的末端废水,具有水质复杂、高可溶盐、高悬浮物等特性,难以直接回用^[1-2]。排污许可证和日趋严格的地方环保政策要求越来越多的燃煤电厂需要实现废水零排放,这对火电企业形成了巨大的挑战和压力^[3]。因此,做好脱硫废水浓缩减量的研究工作,不仅可以减少电厂废水的排放量、回收利用处理后的废水,还可以降低末端固化处理的浓水量,具有很好的环境和社会经济效益。

目前,针对脱硫废水常用的浓缩工艺主要有膜法浓缩和热法蒸发工艺^[4]。热法蒸发工艺较高的投资和运行费用以及能耗,是限制其大规模应用的主要原因^[5-7];而膜法浓缩技术在处理高盐废水方面相对经济有效,其中反渗透(RO)和电渗析(ED)技术应用最为广泛,但前者存在对水质要求较高、膜易结垢等缺点,尤其是 RO 技术受膜元件耐压极限的限制,很难实现溶解固形物(TDS)浓度在 100 g/L 以上的盐水浓缩。而 ED 技术具有抗污染能力强、对进水水质的要求低以及浓缩倍率高等优点,不过相较于 RO,ED 存在脱盐率较低、无法去除水中电中性粒子及有机物等缺点^[8]。笔者针对脱硫废水水质复杂的特点,重点探索电渗析装置循环流量、电流密度及进水 TDS 等因素对电渗析浓缩性能的影响,并分析 ED—RO 联合脱盐性能。

1 材料与方法

1.1 实验用水

某电厂脱硫废水经氢氧化钠-碳酸钠双碱软化和砂滤、超滤等工艺预处理后,出水作为电渗析实验用水,软化后钙、镁等离子浓度均控制在 2 mmol/L 以下。实验期间连续取水监测,脱硫废水水质波动较大,预处理后水质情况如下: Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 分别为 1 250 ~ 2 260、16 ~ 65、5 ~ 22、11 020 ~ 16 290 和 10 650 ~ 13 310 mg/L, pH 值为 6.7 ~ 7.6, 电导率为 42.2 ~ 53.2 mS/cm, 浊度为 1.2 ~ 3.2 NTU, TDS 为 42.84 ~ 61.95 g/L。

1.2 实验装置及工作原理

实验装置包括 ED 装置和 RO 装置。ED 单元采用中型一体化电渗析装置,主要由 3 个独立的流道组成,其中每一个流道包括离心泵、流量计和水箱;直流电源由稳压电源提供;电渗析膜堆由两个电极极板、250 对阴阳离子膜和隔板以及夹紧装置等组成,实验所用 ED 膜为聚乙烯异相离子交换膜,型号分别为 IONSEP® - AM - A 阴离子交换膜(AEM)

和 IONSEP® - AM - C 阳离子交换膜 (CEM), 有效膜面积为 0.5 m^2 。主要性能参数: 阴膜, 离子交换基团为 $\text{R} - (\text{CH}_3)_3\text{N}^+$ 季胺基, 干膜厚度为 $(0.4 \pm 0.02) \text{ mm}$, 交换容量 $> 2.0 \text{ mol/kg}$, 选择透过率 $> 95\%$, 膜面电阻为 $5 \sim 8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, pH 值范围为 $1 \sim 12$; 阳膜, 离子交换基团为 $\text{R} - \text{SO}_3^-$ 磺酸基, 干膜厚度为 $(0.33 \pm 0.02) \text{ mm}$, 交换容量 $> 2.2 \text{ mol/kg}$, 选择透过率 $> 95\%$, 膜面电阻为 $4 \sim 7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, pH 值范围为 $1 \sim 12$ 。

RO 单元采用陶氏海水反渗透膜元件,膜壳为 8 寸(1 寸约为 3.33 cm)3 芯 FRP 材质,最大操作压力为 8.3 MPa,膜片材料为聚酰胺复合薄膜,单支有效膜面积为 32 m²,进水流量为 1~2 m³/h,设计膜通量为 16~20 L/(m²·h),脱盐率不低于 98%。

实验装置的工作原理如图 1 所示。软化后的脱硫废水进入 ED 单元进行处理,电渗析膜堆内阴、阳离子交换膜交替排列,在直流电场作用下,溶液中阴、阳离子分别向阳极和阴极作定向迁移,阳膜只允许阳离子通过,阴膜只允许阴离子通过,从而达到对溶液浓缩、淡化、提纯等目的。同时采用“ED—RO”两级脱盐系统处理,将 ED 淡水作为 RO 系统的进水进行深度脱盐处理,RO 产水水质较好可进行回用,RO 浓水则返回 ED 进水管路继续进行脱盐处理,从而将 ED 技术的高浓缩倍率和 RO 技术高脱盐率的优势互补,提高系统产水水质和回收率,最大限度地实现脱硫废水的浓缩减量和回收利用。其中,耦合 RO 装置的目的是使电渗析淡水达到回用标准,实验过程中通过调节 RO 装置的回收率使输送至 ED 进水管路 RO 浓水的 TDS 与实验用水 TDS 一致,维持 ED 系统进水水质相对稳定。

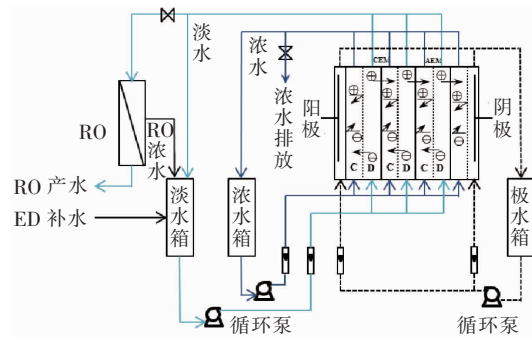


图 1 电渗析工作原理

Fig. 1 Working schematic diagram of electrodialysis

1.3 实验方法

实验用水为软化澄清后的脱硫废水,采用一级

一段循环式操作模式,在恒电流密度条件下,向极水箱中加入 200 L 的 NaCl 溶液(1 mol/L)作为极水进行独立循环,向浓水箱和淡水室加入一定量实验用水,实验时浓水箱不补水、淡水室持续补给实验用水,浓、淡水循环并分别调节排水量以维持各水箱液位稳定。实验中每 10 min 取样测定浓、淡水的相应水质指标,并记录电流、电压、浓淡水室液位、通量和压力等。

电渗析实验分别选取循环流量、电流密度、进水 TDS 等 3 个因素进行优化,研究不同因素对电渗析系统脱盐率、单膜传质通量及脱盐能耗的影响,筛选出最优工况条件进行连续稳定实验、倒极实验和联合 RO 脱盐实验。

1.4 分析项目及检测方法

pH 值和电导率采用便携式多参数水质测试仪测定;硬度(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})采用 EDTA 滴定法测定; Cl^- 采用硝酸银滴定法测定;溶解固形物、硫酸根(SO_4^{2-})采用重量法测定;浊度采用浊度仪测定。

2 结果与讨论

2.1 操作条件优化实验

2.1.1 循环流量对电渗析浓缩性能的影响

控制电流密度为 200 A/m^2 (电流 $I=100 \text{ A}$),进水 TDS 保持在 60 g/L 左右,不同循环流量条件下 ED 浓淡水电导率及电压、电流的变化如图 2 所示。由图 2(a)可知,不同循环流量条件下,浓水电导率逐渐升高,淡水电导率逐渐下降,并且淡水侧电导率变化速率较快。在电渗析过程中,渗透压差随着浓淡比的增大而逐渐增大,导致离子迁移所受阻力增大,同时渗透压差导致水迁移加剧,使得浓水侧电导

率上升速率较慢。由图 2(b)可知,当循环流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时电压最低,表明在该循环流量条件下离子迁移阻力最小,膜堆总电阻最低。

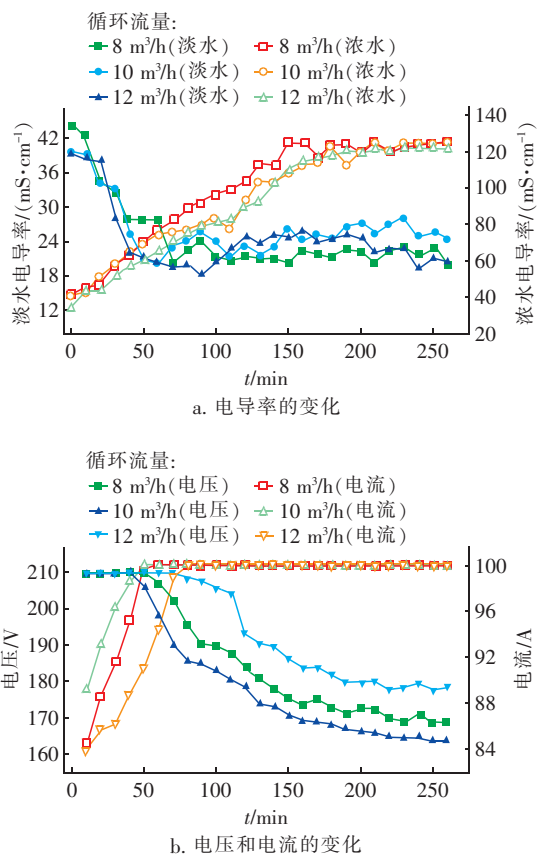


图2 不同循环流量下浓淡水电导率及电压、电流的变化

Fig. 2 Changes of conductivity of concentrated and fresh water and voltage, current in different circulating flow

表 1 为不同循环流量下电渗析系统稳定运行参数及性能指标。

表 1 不同循环流量下电渗析系统稳定运行参数及性能指标

Tab. 1 Stable operation parameters and performance index of ED system in different circulating flow

循环流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	淡水出水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	浓水出水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	TDS/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)			单膜传质通量/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	脱盐能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)
			补水	淡水出水	浓水出水		
8	1.3	0.2	60.42	23.49	204.48	125.07	12.08
10	1.3	0.2	61.85	25.49	206.64	125.25	11.71
12	1.3	0.2	59.38	24.86	202.30	115.06	12.73

由表 1 可知,随着循环流量的增加,浓水侧出水 TDS 与 ED 单膜传质通量均先增后减、脱盐能耗为先减后增,进一步说明在循环流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,ED 系统性能最佳。王大新等^[9]研究发现,通过提高循环流量可以改变膜表面的流体力学条件,减小浓差极化边界层厚度,提高传质系数。但若循

环流量过高会使膜表面原液切向速率加快,水力停留时间变短,致使离子还未来得及透过膜便进入循环系统,导致单膜传质通量降低。因此,ED 系统的最佳循环流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.1.2 电流密度对电渗析浓缩性能的影响

控制循环流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,不同电流密度条件

下浓淡水电导率及电压、电流的变化如图3所示。由图3(a)可知,电流密度越高,淡水侧电导率下降速率越快,表明此时单膜传质通量越大,系统达到平衡所用时间越短。由图3(b)可知,电压随着电流密度的升高而增大,使离子驱动力、离子迁移量及迁移速率均增大,因此系统能够较快地达到平衡。

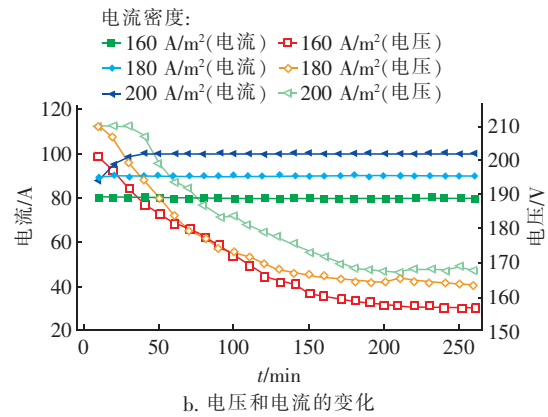
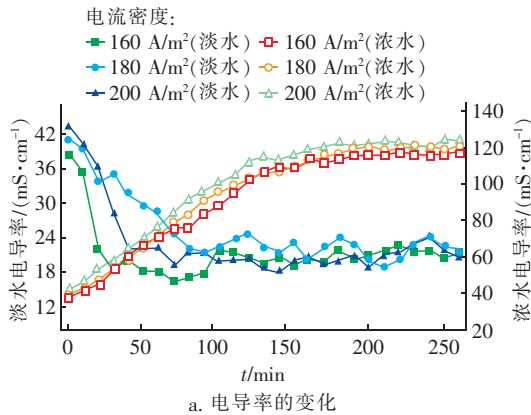


图3 不同电流密度下浓淡水电导率及电流、电压的变化
Fig.3 Changes of conductivity of concentrated and fresh water and voltage, current in different current densities

表2为不同电流密度下电渗析系统稳定运行参数及性能指标。

表2 不同电流密度下电渗析系统稳定运行参数及性能指标

Tab.2 Stable operation parameters and performance index of ED system in different current densities

电流密度/ ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)	淡水出水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	浓水出水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	TDS/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)			单膜传质通量/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	脱盐能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)
			补水	淡水出水	浓水出水		
160	1.37	0.13	52.21	23.93	198.13	101.18	8.78
180	1.36	0.14	53.20	24.11	203.89	104.47	9.91
200	1.30	0.20	54.88	22.98	213.42	116.55	12.00

由表2可知,浓水侧出水 TDS 随着电流密度的增加而增大,不过脱盐能耗及水迁移量(浓水排水量)也随之升高。水迁移现象是水合离子电迁移(主要)和浓差渗透迁移(次要)共同作用的结果,而ED的迁移水量主要与离子单膜传质通量有关,传质通量越大,水合离子所携带的水分子数越多。当电流密度为 200 A/m^2 时,浓水侧 TDS 及单膜传质通量均最大,这导致浓差扩散现象最突出、电迁移水合离子量也最大,两者共同作用导致水迁移速率显著升高,不利于ED的浓缩。

由于脱硫废水水质波动较大,为保证ED系统良好的脱盐性能、较低的透水率及能耗,同时考虑到高电流密度时易发生浓差极化导致膜结垢,因而优选电流密度为 160 A/m^2 ,此时浓水出水 TDS 为 198.13 g/L ,脱盐能耗最低为 $8.78 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ 。

2.1.3 进水 TDS 对电渗析浓缩性能的影响

控制循环流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 、电流密度为 160 A/m^2 ,不同进水 TDS 条件下浓淡水电导率的变化如图4所示。可知,进水 TDS 越高,系统平衡时浓、淡水

侧出水电导率越大,但电压呈逐渐降低的趋势。离子浓度与膜堆总电阻成反比,相同电流密度条件下膜堆总电阻随着进水 TDS 的增大而减小,此时传质阻力减小;并且高进水 TDS 条件下浓、淡水室浓淡比较低,离子迁移阻力较小。因此,在高进水 TDS 条件下,传质阻力在电位差和浓度差共同作用下减小,使离子单膜传质通量升高,脱盐能耗降低(如表3所示)。

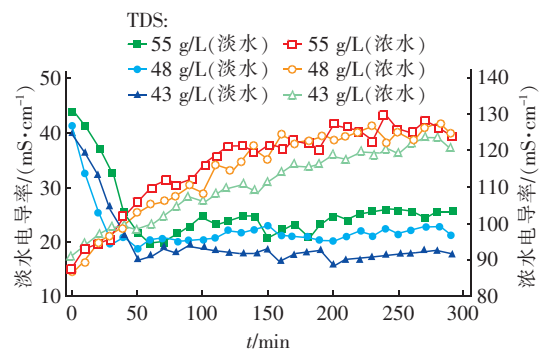


图4 不同进水 TDS 时浓淡水电导率的变化

Fig.4 Change of conductivity of concentrated and fresh water in different influent TDS

表3 不同进水TDS下电渗析系统稳定运行参数及性能指标

Tab.3 Stable operation parameters and performance index of ED system in different influent TDS

进水 TDS/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	淡水出水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	浓水出水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	TDS/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		单膜传质通量/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	脱盐能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)
			淡水出水	浓水出水		
55	1.3	0.2	25.60	208.72	109.38	9.23
48	1.3	0.2	21.40	197.10	98.18	9.56
43	1.3	0.2	18.60	195.50	89.60	9.74

2.2 连续稳定性实验

在电流密度为 160 A/m^2 、循环流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,ED 系统运行时电压随浓、淡水电导率及进水 TDS 的变化如图 5 所示。可以看出,脱硫废水水质波动较大,进水 TDS 在 $42 \sim 58 \text{ g/L}$ 之间波动,但浓、淡水出水电导率比较稳定,表明 ED 能够处理水质波动较大的高盐废水。

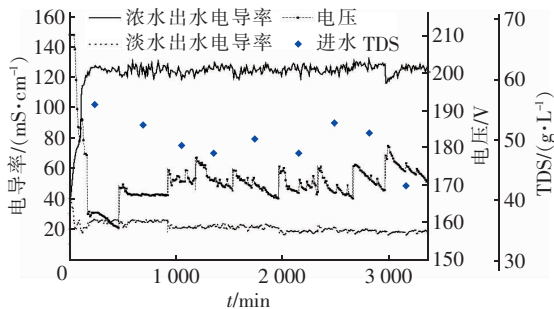


图5 ED 系统运行时电压随浓淡水电导率及进水 TDS 的变化

Fig.5 Changes of voltage with conductivity of concentrated and fresh water and influent TDS

根据上述分析,进水 TDS 与膜堆总电阻紧密相关。进水 TDS 升高,膜堆总电阻减小,恒电流密度条件下运行时电压较低,能耗有所下降。当实验进行至 900 min 左右时,ED 进水 TDS 降低至 50 g/L 左右,ED 淡水侧电导率减小,运行电压则有所升高,增幅约为 10 V ;在 3 300 min 时 ED 进水 TDS 降至 42 g/L 附近,此时运行电压为 177 V 。

2.3 倒极实验

在循环流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 、电流密度为 160 A/m^2 条件下,连续运行一段时间后 ED 系统电压由 168 V 逐渐升高至 178 V 左右,在恒电流模式下,电压升高表明膜堆总电阻增大,这是由于膜表面所形成的沉积垢层使电阻增大,因此进行倒极实验,倒极前后 ED 浓、淡水电导率及电压的变化如图 6 所示。可以看出,倒极后 ED 系统的运行电压降幅明显。倒极前的电流为 80 A 、平均电压为 178 V 、ED 浓水出水 TDS 为 202.50 g/L 、脱盐能耗为 $9.49 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$;倒

极后电流不变,平均电压为 154 V 、ED 浓水出水 TDS 为 211.30 g/L 、脱盐能耗为 $8.21 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ 。可以看出,倒极前后 ED 系统平均运行电压的降幅约为 24 V ,脱盐能耗也有所降低。

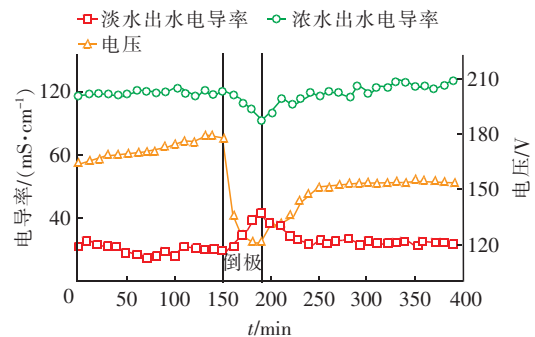


图6 倒极前后 ED 浓淡水电导率及电压的变化

Fig.6 Changes of conductivity of concentrated and fresh water and voltage before and after inverted pole

分析可知,在恒电流模式下,ED 系统运行电压与膜堆电阻成反比,而膜堆电阻与溶液离子浓度、温度和膜面结垢有关。在系统稳定运行过程中,浓、淡水室中溶液浓度、温度、流量等参数基本稳定,但钙、镁无机盐与有机物等都会逐步富集在 ED 膜表面形成不稳定的结垢沉淀层,使离子的传质阻力增加、传质效率降低,导致膜堆电阻增大,进而致使运行电压升高。倒极操作则通过周期性改变直流电压的极性来实现浓水室与淡水室的切换,原 ED 淡水室由脱盐过程变为浓缩过程,原浓水室由浓缩过程变为脱盐过程,ED 系统长时间运行在单侧膜表面所形成的垢层因倒极后的反向作用力而被脱除排出系统,减缓了致垢离子与胶体物质对 ED 膜的结垢风险。倒极后系统运行电压下降(电流恒定),说明膜堆电阻减小,证明倒极可脱除膜表面沉积的不稳定垢层,降低膜堆能耗^[9]。门立娜等^[10-12]的研究也发现,采用倒极的运行模式可有效脱除 ED 运行中产生的沉淀结垢,提高电渗析脱盐效率,降低系统能耗。

2.4 ED—RO 组合工艺实验

实验用水为经 ED 初级脱盐处理后的水,水质

情况如表 4 所示。可以看出,ED 淡水的 TDS 仍然较高,无法满足电厂各系统的回用要求。为此,采用 ED—RO 两级脱盐系统进行处理,运行结果如图 7 所示。当 RO 系统回收率为 50% 时,其产水脱盐率达到 98% 以上,RO 产水的 TDS 为 0.4 g/L,可用作

循环水补充水、脱硫工艺用水等电厂其他系统的补水;RO 浓水的 TDS 为 49.3 g/L,与电渗析进水 TDS 基本一致。通过 ED 系统浓水和淡水的电导率变化情况可知,该组合工艺未对原运行系统产生影响,表明组合工艺可行。

表 4 RO 系统在 50% 回收率条件下的水质情况

Tab.4 Water quality of RO system under 50% recovery rate

项 目	pH 值	电导率/ (mS · cm ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg · L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg · L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg · L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg · L ⁻¹)	TDS / (g · L ⁻¹)
实验用水	6.9	49.5	59.2	18.2	13 900.0	11 430.0	50.7
ED 浓水	7.1	133.4	187.4	90.3	56 010.0	53 900.0	209.4
ED 淡水	6.8	23.2	40.3	5.7	10 080.0	2 751.0	24.1
RO 浓水	7.0	43.1	60.7	13.5	19 400.0	6 100.0	49.3
RO 产水	6.9	0.4	23.7	未检出	168.6	118.0	0.4

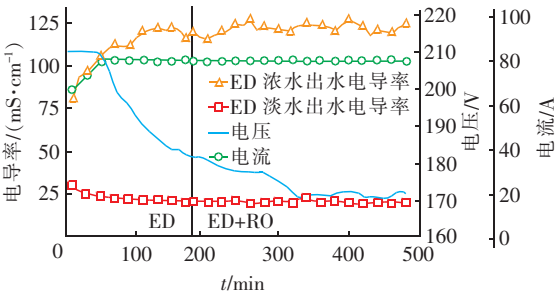


图 7 ED—RO 联合脱盐时各参数的变化

Fig.7 Changes of each parameter when ED – RO combined desalination

ED—RO 联合工艺的水量平衡情况见图 8。RO 浓水返回至电渗析进一步进行脱盐处理,整体系统的废水回收率达到 76% 以上,产水水质较好。通过对比 ED 初级脱盐出水与联合工艺 RO 出水水质可知,采用 ED—RO 工艺联合处理脱硫废水时,不但能够实现废水的高倍率浓缩、减少最终废水(ED 浓水)的处理量,还能提高回用水水质及复利用率。

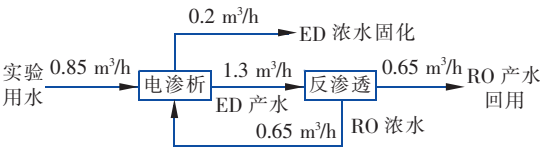


图 8 ED—RO 联合工艺水量平衡情况

Fig.8 Water balance diagram of ED – RO combined process

2.5 讨论

综上所述,电流密度对电渗析脱盐效果的影响最显著,电流密度越高,单膜传质通量越大,但脱盐能耗也相应增大。适当的循环流量有利于维持膜堆流道内废水适宜的紊流程度,提高系统单膜传质通

量。但循环流量过高会导致隔室内原液流速过大、离子脱盐效率降低,过低则致使膜表面附近流体边界层内的传质系数降低、增大浓差极化与结垢风险。在电渗析系统达到平衡状态后,操作电压的大小主要受淡水侧电导率的影响。进水 TDS 越高,系统单膜传质通量越高,但进水 TDS 过高会使脱盐率降低,淡水出水 TDS 升高,不利于后续回收利用。

电渗析技术在高含盐废水处理方面仍存在一些瓶颈,比如如何在提高浓缩倍率的同时降低系统能耗。另外,电渗析运行过程中需要合理控制浓、淡水室溶液的浓淡比,浓淡比过大易导致发生浓差极化而结垢。同时,水合离子电迁移过程(即水迁移现象)会降低电渗析系统的效率,因此研究离子交换膜的改性和膜性能对水迁移速率的影响很有必要。

3 结论

采用电渗析处理脱硫废水过程中,当循环流量为 10 m³/h 时,膜表面流速适当,离子传质速率及单膜传质通量较高;在电流密度为 160 A/m² 条件下,脱盐能耗最低,为 8.78 kW · h/m³,ED 浓水 TDS 可达到 198.13 g/L。利用倒极操作可有效减小运行过程中膜堆电阻,从而降低膜堆电耗。采用 ED—RO 联合处理脱硫废水的过程中,RO 系统在 50% 回收率时产水 TDS 为 0.4 g/L,实现了脱硫废水的回收利用,浓水循环回流至电渗析继续脱盐,废水总的回收率达到 76% 以上。该组合工艺克服了单一工艺的缺点,系统运行稳定,具有很好的处理效果。

参考文献:

[1] 庞胜林,陈戎,毛进,等. 火电厂石灰石 – 石膏湿法脱

- 硫废水分离处理[J]. 热力发电, 2016, 45(9): 128 - 133.
- Pang Shenglin, Chen Rong, Mao Jin, *et al.* Separation treatment process for limestone-gypsum wet FGD wastewater from coal-fired power plants [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45 (9): 128 - 133 (in Chinese).
- [2] 康勇, 余纪成, 鲁佳, 等. 纳滤膜深度处理火电厂脱硫废水实验[J]. 热力发电, 2017, 46(7): 12 - 19.
- Kang Yong, Yu Jicheng, Lu Jia, *et al.* Experimental study on FGD wastewater advanced treatment by nanofiltration method [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(7): 12 - 19 (in Chinese).
- [3] 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 (in Chinese).
- [4] 王丹, 蒋道利. 蒸发结晶技术在高含盐废水零排放领域的应用[J]. 中国井矿盐, 2014, 45(4): 7 - 10.
- Wang Dan, Jiang Daoli. The application of evaporation crystallization technology in zero discharge area of high salt wastewater [J]. China Well and Rock Salt, 2014, 45 (4): 7 - 10 (in Chinese).
- [5] 刘海洋, 江澄宇, 谷小兵, 等. 燃煤电厂湿法脱硫废水零排放处理技术进展[J]. 环境工程, 2016, 36(4): 33 - 36, 41.
- Liu Haiyang, Jiang Chengyu, Gu Xiaobing, *et al.* Development of zero liquid discharge technologies for desulfurization wastewater from coal-fired power plant [J]. Environmental Engineering, 2016, 36(4): 33 - 36, 41 (in Chinese).
- [6] 龙国庆. 燃煤电厂湿法脱硫废水蒸发结晶处理工艺的选择[J]. 中国给水排水, 2013, 29(24): 5 - 8.
- Long Guoqing. Selection of evaporation crystallization treatment process of wastewater from wet FGD in coal-fired power plant [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(24): 5 - 8 (in Chinese).
- [7] 伊学农, 王玉琳, 闫志华, 等. 反渗透特种膜处理湿法脱硫废水中试研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 67 - 70.
- Yi Xuenong, Wang Yulin, Yan Zhihua, *et al.* Pilot study on reverse osmosis membrane for treatment of wet desulfurization wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 67 - 70 (in Chinese).
- [8] Strathmann H. Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications [J]. Desalination, 2010, 364(3): 268 - 288.
- [9] 王大新, 苏萌, 王晓琳. 液体分离膜过程中的浓差极化及其评价方法[J]. 膜科学与技术, 2005, 25(6): 64 - 68, 79.
- Wang Daxin, Su Meng, Wang Xiaolin. How to evaluate concentration polarization in the process of liquid membrane separation [J]. Membrane Science and Technology, 2005, 25(6): 64 - 68, 79 (in Chinese).
- [10] 门立娜. 膜分离技术在工业含盐废水处理中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Men Lina. The Study on Membrane Separation Technology Applied in Industrial Saline Wastewater Treatment [D]. Changchun: Jilin University, 2012 (in Chinese).
- [11] 杨晓伟, 王丁, 齐麟, 等. 电渗析膜污染与清洗技术研究进展[J]. 清洗世界, 2015, 31(3): 23 - 26.
- Yang Xiaowei, Wang Ding, Qi Lin, *et al.* Recent advance in membrane fouling and cleaning technology [J]. Cleaning World, 2015, 31(3): 23 - 26 (in Chinese).
- [12] 章晨林, 张新妙, 郭智, 等. 电渗析法处理含盐废水的进展[J]. 现代化工, 2016, 36(7): 13 - 16.
- Zhang Chenlin, Zhang Xinmiao, Guo Zhi, *et al.* Research progress of the electro-dialysis in treatment of saline wastewater [J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36 (7): 13 - 16 (in Chinese).



作者简介: 周明飞 (1990 -), 男, 陕西西安人, 硕士, 工程师, 从事火电厂末端废水零排放研究。

E-mail: zhoutingfei@tpri.com.cn

收稿日期: 2019 - 12 - 23