

燃煤电厂脱硫废水选择性电渗析 浓缩处理中试研究

徐浩然^{1,2*}, 封立林³, 李强⁴, 欧阳丰⁴, 冯向东^{1,2}, 吕佳慧^{1,2}

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121;

2. 浙江省工业新水源工程中心, 浙江 杭州 311121;

3. 浙江浙能电力股份有限公司, 浙江 杭州 310007;

4. 浙江浙能绍兴滨海热电有限责任公司, 浙江 绍兴 312073)

摘要:开发了选择性电渗析中试系统, 浓缩处理某燃煤电厂湿法脱硫系统排污水。研究了电流密度、进水水质和浓淡水产水量对脱硫废水浓缩效果的影响, 考察了系统连续运行期间的稳定性和经济性。结果表明, 选择性电渗析系统能够高效处理并资源化回用不同水质的脱硫废水, 使 Cl^- 等污染物在浓水富集, 且不会使 SO_4^{2-} 发生大量迁移, 连续运行 6 个月以来膜堆未发生结垢或污堵。高电流密度条件下减小淡水产水量能够有效提高淡水产水水质, 浓水产水量的控制需综合考虑浓缩效果、离子迁移效率和结垢情况。连续运行期间, 淡水产水回收率达到 70%~80%, 吨水平均处理电耗为 11.0 kWh, 吨水平均处理成本为 4.4 元, 有效降低了燃煤电厂废水“零排放”工艺运行成本。

关键词:选择性电渗析; 中试; 脱硫废水; 燃煤电厂; 浓缩

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)07-0236-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.07.045

Pilot study on selective electro dialysis concentrating treatment of desulfurization wastewater from coal-fired power plant

XU Hao-ran^{1,2*}, FENG Li-lin³, LI Qiang⁴, OUYANG Feng⁴, FENG Xiang-dong^{1,2}, LV Jia-hui^{1,2}

(1. Zhejiang Energy Group R&D Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China;

2. Zhejiang Provincial Engineering Center for New Industrial Water Resources, Hangzhou 311121, China;

3. Zhejiang Zheneng Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

4. Zhejiang Zheneng Shaoxing Binhai Thermal Power Co., Ltd., Shaoxing 312073, China)

Abstract: A selective electro dialysis pilot system is developed to concentrate and treat with the wastewater from the wet desulfurization system of a coal-fired power plant. The effects of current density, influent water quality and water yield on the concentration effect of the system to desulfurization wastewater are studied, and the stability and economy of the system during continuous operation are investigated. It is shown that the selective electro dialysis system can efficiently treat and reuse desulfurization wastewater with different water quality, make Cl^- and other pollutants accumulate in the concentrated water, but does not cause large amount of SO_4^{2-} migration. There has been no fouling in the membrane stack for 6 months of continuous operation. Under high current density, reducing fresh-water yield can effectively improve the quality of produced water, and the control of concentrated water yield should consider the concentration effect, ion migration efficiency and scaling condition. During the continuous operation period, the recovery rate of fresh water reaches 70%~80%, the average power consumption per ton wastewater is 11.0 kWh, and the average treatment cost per ton wastewater is CNY4.4, which effectively reduces the operation cost of “zero discharge” process of wastewater from coal-fired power plant.

Key words: selective electro dialysis; pilot; desulfurization wastewater; coal-fired power plant; concentrate

脱硫废水是燃煤电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统的外排废水, 具有水量大、含盐量高、成分复杂、处理困难的特点^[1-3]。在“十四五”规划中提出的“深入开展污染防治行动, 大力发展绿色经济”背景下, 燃煤电厂废水“零排放”势在必行。近年来通过对废水“零排放”工艺的不断探索, 形成了以“预处理-浓缩减量-蒸发固化”为共同基本路线的多种不同处理工艺^[4-6]。其中对脱硫废水进行浓缩减量

处理能够有效减少末端蒸发固化处理的水量, 降低综合处理成本, 实现水资源的梯级利用, 是废水“零排放”的重点工作^[7-8]。

电渗析技术作为膜浓缩技术的一种, 在废水处理方面有着广泛的应用^[9-10]。在已有的电渗析技术用于脱硫废水浓缩处理的工艺中, 必须对脱硫废水进行软化预处理去除其中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 以防止电渗析极板和离子交换膜表面结垢^[11-13], 消耗大量沉

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2022-05-06

作者简介: 徐浩然(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 从事工业废水处理技术研究, 通讯联系人, 919714384@qq.com。

淀剂的同时也增大了处理成本。选择性电渗析技术利用单价选择性离子交换膜实现电渗析过程中各离子的选择性迁移,浓缩效率高,处理成本低,设备不易结垢,系统运维简单,不产生二次污染^[14-15]。本研究开发了以选择性电渗析技术为核心的脱硫废水浓缩减量处理系统及配套运行工艺,考察了未经软化的脱硫废水直接进行电渗析处理的浓缩效果,研究了进水水质条件和设备运行工况对产水水质的影响,并评估了该技术在废水“零排放”中的应用前景。

1 实验部分

1.1 实验用水

实验用水选自沿海某燃煤电厂(以下简称燃煤电厂)石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统的外排废水(以下简称脱硫废水)。在2020年5月1日—2020年10月30日的实验期间,脱硫废水水质发生一定程度的波动,典型水质条件见表1。

表1 实验期间燃煤电厂典型脱硫废水水质

取样时间	电导率/ (mS· cm ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg· L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg· L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg· L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg· L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg· L ⁻¹)
2020年5月21日	21.6	8006	1214	3646	401	648
2020年7月11日	27.7	10598	1307	4408	1192	651
2020年9月25日	12.8	4079	1139	1705	412	577

1.2 选择性电渗析中试系统

选择性电渗析中试系统由电渗析部分(包括电渗析膜堆、控制柜、机架等)、淡水循环(包括淡水水箱、淡水泵、淡水换热器等)、浓水循环(包括浓水箱、浓水泵、浓水换热器等)、极水循环(极水箱、极水泵、极水换热器、酸雾吸收器、漩涡气泵等)和清洗部分(清洗水箱及配套管路)组成。其中电渗析膜堆由阳离子选择性交换膜和单价阴离子选择性交换膜交替排列,分隔成极水通道、浓水通道和淡水通道,有效总膜面积为20 m²。电渗析极板材料为钛涂钎铌。

选择性电渗析系统能够以连续补排水的方式实现燃煤电厂脱硫废水的浓缩处理(图1)。经微滤系统去除悬浮物的脱硫废水作为浓水补水和淡水补水分别进入浓水箱和淡水水箱,经由换热器冷却后进入电渗析膜堆处理。电渗析系统的浓水产水和淡水产水以溢流的方式分别从浓水箱和淡水水箱顶部溢流口排出,浓水产水进入末端废水处理系统深度处理,淡

水产水回用至脱硫吸收塔区域浆液池。电渗析处理过程中,以3.0%氯化钠溶液作为极水在极水通道中保持循环,通过持续投加1.0%盐酸保持极水溶液pH在3.0~5.0范围内。极水循环外溢的酸性尾气利用酸雾吸收装置完全吸收。

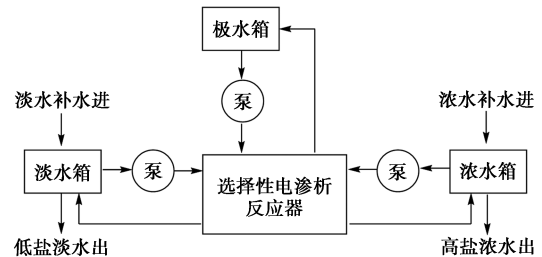


图1 选择性电渗析中试系统运行工艺

1.3 数据处理

浓淡水中的阴离子和阳离子浓度采用离子色谱法测定(Thermo Fisher, ICS-600),浓淡水溶液pH采用电极法测定(WTW inoLab pH7310),其他数据均通过在线表计在就地控制柜读取。

浓缩倍率(C_F^A)^[16]按式(1)计算:

$$C_F^A = C_{A,t} / C_{A,0} \quad (1)$$

式中, $C_{A,t}$ 为 t 时刻A的浓度,mg/L; $C_{A,0}$ 为初始时刻A的浓度,mg/L。

离子交换膜的选择透过性以选择性系数(S_B^A)表示^[16],按式(2)计算:

$$S_B^A = (C_F^A - C_F^B) / [(1 - C_F^A) + (1 - C_F^B)] \quad (2)$$

电流效率(η)^[17]以Cl⁻迁移量按式(3)计算:

$$\eta = \Delta n F / (N I t) \quad (3)$$

式中, Δn 为Cl⁻迁移量, mol; F 为法拉第常数, 96 485 C/mol; N 为膜对数; I 为电流, A; t 为时长, s。

2 结果与讨论

2.1 电流密度影响

以相同水质脱硫废水作为电渗析初始淡水和初始浓水,Cl⁻浓度7 967 mg/L,SO₄²⁻浓度1 165 mg/L, pH=8.7。控制淡水产水流量0.06 t/h,浓水产水流量0.12 t/h。设置极板电流密度分别为24、32、40 A/m²,研究电流密度对脱硫废水浓缩效果的影响。

如表2所示,随着电流密度增大淡水侧至浓水侧的Cl⁻迁移速率也不断增大,从24 A/m²时的0.41 kg/h增大至40 A/m²时的0.70 kg/h。不同电流密度下,SO₄²⁻迁移效率基本保持不变,以小于0.01 kg/h的极低速率由浓水侧缓慢迁移至淡水侧,不会影响系统对单价和多价阴离子的选择性分离效果。

表 2 电流密度对电渗析效果的影响

电流密度/ ($A \cdot m^{-2}$)	淡水出水 Cl^{-} 浓度/($g \cdot L^{-1}$)	Cl^{-} 迁移速率/ ($kg \cdot h^{-1}$)	膜堆功率/ kW	电流效率/ %
24	3.871	0.41	0.120	64
32	2.427	0.55	0.283	65
40	1.004	0.70	0.605	66

在膜堆电阻(包括溶液电阻和设备电阻)几乎不变的情况下,选择性电渗析系统极板电流密度的增大(24~40 A/m^2),导致了膜堆功率由 0.120 kW 增大至 0.605 kW,使电流效率由 0.64 增大至 0.66。该结果说明在额定电流密度范围内,电流密度变化对膜堆功率影响显著,对电流效率的影响很小。

综合考虑脱硫废水浓缩效果和离子迁移效率,

表 3 进水水质条件对中试系统浓缩效果的影响

指标	工况 1(6月8日)	工况 2(6月11日)	工况 3(6月12日)
进水脱硫废水水质	Cl^{-} :13078 mg/L SO_4^{2-} :1457 mg/L Ca^{2+} :4025 mg/L 电导率:33.1 mS/cm	Cl^{-} :12058 mg/L SO_4^{2-} :1532 mg/L Ca^{2+} :3845 mg/L 电导率:29.7 mS/cm	Cl^{-} :11171 mg/L SO_4^{2-} :1455 mg/L Ca^{2+} :3897 mg/L 电导率:29.4 mS/cm
淡水产水水质	Cl^{-} :8014 mg/L SO_4^{2-} :1432 mg/L Ca^{2+} :2514 mg/L 电导率:23.0 mS/cm	Cl^{-} :7109 mg/L SO_4^{2-} :1534 mg/L Ca^{2+} :2224 mg/L 电导率:19.7 mS/cm	Cl^{-} :5962 mg/L SO_4^{2-} :1414 mg/L Ca^{2+} :2159 mg/L 电导率:18.9 mS/cm
浓水产水水质	Cl^{-} :33589 mg/L SO_4^{2-} :1533 mg/L Ca^{2+} :11227 mg/L 电导率:67.8 mS/cm	Cl^{-} :31706 mg/L SO_4^{2-} :1583 mg/L Ca^{2+} :10388 mg/L 电导率:65.5 mS/cm	Cl^{-} :30533 mg/L SO_4^{2-} :1493 mg/L Ca^{2+} :10502 mg/L 电导率:65.0 mS/cm
浓水产量/($t \cdot h^{-1}$)	0.1	0.1	0.1
淡水产量/($t \cdot h^{-1}$)	0.4	0.4	0.4
电源电压/V	62	62	62
电源电流/A	24	23	23
膜堆功率/kW	1.49	1.43	1.43
系统总功率/kW	3.3	3.2	3.1
Cl^{-} 浓缩倍率	2.57	2.63	2.73
选择性系数(Cl^{-}/SO_4^{2-})	-0.94	-0.96	-0.98
电流效率	0.806	0.808	0.796
淡水脱氯率/%	39	41	47

随着进水脱硫废水 Cl^{-} 浓度降低,浓水产水和淡水产水的 Cl^{-} 浓度也减小,浓水 Cl^{-} 浓缩倍率和淡水脱氯率增大, Cl^{-} 迁移速率略有降低但差异不显著,膜堆实际功率减小,电流效率始终保持在 0.796~0.808 的稳定范围内。在电压恒定情况下,进水盐浓度的降低使浓水电阻减小(膜堆整体电阻也稍有减小),使膜堆实际功率增大。极板间电流密度几乎没有发生变化,使膜堆电流效率保持稳定。在

应尽量采用高电流密度使 Cl^{-} 更快地从淡水侧转移至浓水侧,以确保淡水和浓水的产水水质。在后续研究中,均在恒电压模式下采用最大可调电流密度进行选择性电渗析脱硫废水浓缩实验。

2.2 进水水质条件影响

连续运行期间,燃煤电厂脱硫废水水质波动较大, Cl^{-} 浓度在 5 000~13 000 mg/L 范围内波动, SO_4^{2-} 在 500~1 500 mg/L 范围内波动。研究不同进水水质条件下的脱硫废水浓缩效果,能够考察选择性电渗析中试系统对燃煤电厂实际水质波动的适应性。

在中试系统连续运行过程中,以脱硫废水作为浓水补水和淡水补水,在浓淡水产量不变的运行条件下,3 种不同水质脱硫废水处理效果如表 3 所示。

膜堆电流密度和电流效率接近的条件下, Cl^{-} 迁移率差别不大,进水 Cl^{-} 浓度成为淡水产水水质的决定性因素。在实际应用中,应综合考虑离子迁移速率和系统能耗之间的关系,确定最佳的运行条件。

此外,进水脱硫废水水质变化不会影响系统对 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 的选择性迁移能力,3 种工况下 Cl^{-}/SO_4^{2-} 的选择性系数均保持在 -0.98~-0.94 范围内,大多数 SO_4^{2-} 都保留在原溶液中,少量 SO_4^{2-} 从浓水循环

迁移至淡水循环中。

2.3 产水量影响

以脱硫废水作为浓水补水和淡水补水,控制浓水产水量 0.06~0.10 t/h,淡水产水量 0.12~0.40 t/h,研究选择性电渗析系统在不同产水量条件下对脱硫废水的浓缩效果,能够有效提高系统的综合运行水平。

由表 4 的实验数据可知,在脱硫废水进水水质基本不变的条件下,浓水和淡水产水流量不会影响 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的选择性迁移效果,4 个工况下 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的选择性系数始终保持在极低值(-1.15~-1.05)。浓水产水量和淡水产水量比值一定时(1:4或1:2),总产水量越小淡水产水水质越能够保证(即淡水 Cl^- 浓度越低)。

表 4 产水量对中试系统浓缩效果的影响

指标	工况 1(6月3日)	工况 2(6月13日)	工况 3(7月8日)	工况 4(7月10日)
脱硫废水水质	Cl^- :9611 mg/L SO_4^{2-} :1455 mg/L Ca^{2+} :3697 mg/L 电导率:28.2 mS/cm	Cl^- :9455 mg/L SO_4^{2-} :1263 mg/L Ca^{2+} :3716 mg/L 电导率:27.9 mS/cm	Cl^- :9014 mg/L SO_4^{2-} :1183 mg/L Ca^{2+} :3600 mg/L 电导率:25.1 mS/cm	Cl^- :9402 mg/L SO_4^{2-} :1197 mg/L Ca^{2+} :3710 mg/L 电导率:26.0 mS/cm
淡水产水水质	Cl^- :5562 mg/L SO_4^{2-} :1464 mg/L Ca^{2+} :2359 mg/L 电导率:17.9 mS/cm	Cl^- :5093 mg/L SO_4^{2-} :1315 mg/L Ca^{2+} :2190 mg/L 电导率:16.23 mS/cm	Cl^- :5011 mg/L SO_4^{2-} :1281 mg/L Ca^{2+} :2025 mg/L 电导率:15.67 mS/cm	Cl^- :4724 mg/L SO_4^{2-} :1272 mg/L Ca^{2+} :1885 mg/L 电导率:14.38 mS/cm
浓水产水水质	Cl^- :26533 mg/L SO_4^{2-} :1393 mg/L Ca^{2+} :9102 mg/L 电导率:65.0 mS/cm	Cl^- :27867 mg/L SO_4^{2-} :1129 mg/L Ca^{2+} :10555 mg/L 电导率:68.4 mS/cm	Cl^- :17703 mg/L SO_4^{2-} :1031 mg/L Ca^{2+} :6698 mg/L 电导率:51.4 mS/cm	Cl^- :19027 mg/L SO_4^{2-} :1020 mg/L Ca^{2+} :7946 mg/L 电导率:53.3 mS/cm
浓水产量/(t·h ⁻¹)	0.1	0.07	0.1	0.06
淡水产量/(t·h ⁻¹)	0.4	0.28	0.2	0.12
电源电压/V	62	62	62	62
电源电流/A	23	21	18	17
膜堆功率/kW	1.43	1.30	1.12	1.05
系统总功率/kW	3.06	3.05	2.73	2.76
Cl^- 浓缩倍率	2.76	2.95	1.96	2.02
选择性系数($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$)	-1.05	-1.13	-1.14	-1.15
电流效率	0.66	0.55	0.44	0.30
淡水脱氯率/%	42	46	44	50

淡水产水量越大,膜堆在额定电压下的最大电流越大,膜堆功率也越大, Cl^- 迁移速率越大,电流效率也越高。与此同时,淡水产水中的 Cl^- 浓度也越高,淡水脱氯率越低。淡水产水量增大时,一方面补入淡水循环的离子总量增多,另一方面在额定电压下膜堆最大电流随之增大,即离子迁移速率也同时增加。综合 2 方面因素,淡水产水 Cl^- 浓度仍然有所增大,所以在要求淡水产水低盐浓度时,可适当降低淡水产水量。较低的浓水产水量能够有效提高系统浓缩效率,但当浓水产水盐浓度极高时,浓水通道和淡水通道的浓差极化将降低离子迁移效率,且容易发生因多价金属离子结垢导致的通道污堵和离子迁移效率降低。因此需要根据脱硫废水进水水质情况和处理实际需求调整选择性电渗析系统运行时的浓淡水产水量。

2.4 系统稳定性

选择性电渗析中试系统连续运行 6 个月后,检查膜堆结垢情况。发现阴离子交换膜和阳离子交换膜表面均洁净无结垢,隔网和排水孔无不溶物堵塞。该结果说明仅富集单价阴离子与重金属阳离子污染物,保持 SO_4^{2-} 不发生大量迁移的策略能够有效防止电渗析膜堆结垢和通道污堵,选择性电渗析中试系统适用于处理未软化的燃煤电厂脱硫废水。

2.5 效益分析

根据上述实验结果提出了燃煤电厂脱硫废水浓缩减量工艺流程(图 2)。经过澄清和过滤处理的原脱硫废水经过选择性电渗析系统处理后,占总水量 20%~30%(可根据实际运行工况调整)的浓水产水含有极高浓度的 Cl^- 和重金属离子,进入末端处理系统深度干化处理;占总水量 70%~80%的淡水产

水中 Cl^- 和重金属离子浓度低、 SO_4^{2-} 浓度较高,作为补水回用至湿法脱硫系统。中试系统连续运行期间,浓缩减量工艺吨水处理平均电耗为 11.0 kWh,平均处理成本为 4.4 元/t。应用该工艺不仅减小了末端废水处理量,也减少了综合处理成本,优化后的燃煤电厂废水“零排放”工艺吨水处理成本由 19.7 元下降至 9.0 元。不仅如此,该系统的投运回用了大量废水并减少了燃煤电厂取用水量,增加了湿法脱硫系统经济性副产物脱硫石膏的产量,完善并优化了燃煤电厂全厂废水“零排放”工艺。

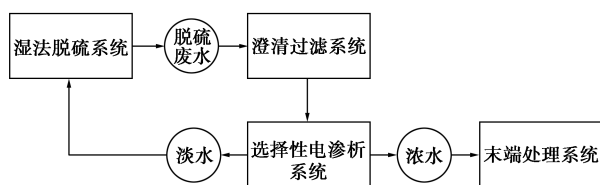


图 2 基于选择性电渗析技术的脱硫废水浓缩减量工艺

3 结论与建议

(1) 以选择性电渗析技术为核心的脱硫废水浓缩中试系统能够用于燃煤电厂脱硫废水减量处理,有效减少 70%~80% 的末端废水量,制得的淡水产水可回用至湿法脱硫系统。

(2) 电渗析极板电流密度的增大能够有效提高浓缩效率,中试系统在 40 A/m^2 电流密度下 Cl^- 迁移速率可达 0.70 kg/h 。一定范围内的进水水质变化不会显著影响离子迁移效率(电流效率保持在 $0.796\sim 0.808$ 范围内),但会影响产水水质。降低淡水产水量能够保证淡水产水较低盐浓度,控制浓水产水量时需统筹考虑浓缩效果、离子迁移效率和结垢情况。

(3) 中试系统连续运行 6 个月,脱硫废水浓缩效果稳定,电渗析膜堆未发生结垢和污堵。

(4) 中试系统浓缩处理得到总水量 20%~30% 的浓水产水进入末端干化系统,处理得到总水量 70%~80% 的淡水产水作为补水回用至湿法脱硫系

统。在燃煤电厂废水“零排放”工艺中,使脱硫废水吨水处理成本由 19.7 元下降至 9.0 元,提高水利用率的同时也有较好的经济性。

参考文献

- [1] Ye Xinglian, An Xizhong, Zhang Hao, *et al.* Process simulation on atomization and evaporation of desulfurization wastewater and its application[J]. Powder Technology, 2021, 389: 178-188.
- [2] Zhang Xinmiao, Zhang Chenlin, Meng Fanning, *et al.* Near-zero liquid discharge of desulfurization wastewater by electrodialysis-reverse osmosis hybrid system[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101962.
- [3] 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.
- [4] 蒋路漫,周振,田小测,等.电厂烟气脱硫废水零排放工艺中试研究[J].热力发电,2019,48(1):103-109.
- [5] 卢剑,李亚娟,许臻,等.海水直流冷却电厂烟气脱硫废水处理工艺的研究[J].中国电力,2018,51(11):179-184.
- [6] 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.
- [7] 晋银佳,刘泽宇,尤良洲,等.RESALT 技术在燃煤电厂脱硫废水浓缩处理中的应用[J].中国电力,2019,52(7):154-160.
- [8] 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,2016,34(4):33-36,41.
- [9] 胡承志,刘会娟,曲久辉.电化学水处理技术研究进展[J].环境工程学报,2018,12(3):677-696.
- [10] 韦锋涛,贾铭椿,王晓伟,等.高含盐废水浓缩处理技术研究进展[J].现代化工,2019,39(9):21-25.
- [11] 杨露,祝海涛,吴雅琴,等.电渗析用于高含盐葡萄糖溶液的脱盐处理[J].水处理技术,2021,47(5):47-51,56.
- [12] 苏慧超,张田明,吴云奇,等.电渗析-超滤耦合技术研究进展[J].化工进展,2020,39(S2):1-7.
- [13] 周明飞,连坤宙,王璟,等.电渗析技术处理脱硫废水的效果分析[J].中国给水排水,2020,36(21):80-86.
- [14] Yang Ye, Sun Yuzhu, Song Xingfu, *et al.* Separation of mono- and di-valent ions from seawater reverse osmosis brine using selective electrodialysis[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(15): 18754-18767.
- [15] Ying Jiadi, Luo Mengjie, Jin Yan, *et al.* Selective separation of lithium from high Mg/Li ratio brine using single-stage and multi-stage selective electrodialysis processes[J]. Desalination, 2020, 492: 114621.
- [16] 张涛.基于单价离子交换膜浓海水处理工艺优化研究[D].天津:河北工业大学,2015.
- [17] 孙小寒,苏成龙,王建友.离子选择性电渗析处理海水淡化浓海水[J].水处理技术,2015,41(11):86-91. ■

(上接第 235 页)

- [2] 陈齐新,魏佳.工业废盐资源化利用典型工艺及前景分析[J].节能与环保,2021,(6):78-80.
- [3] 郭小玲.工业废盐处理综述[J].江西化工,2021,37(1):1-3.
- [4] 陆王琳.废轮胎回转窑热解油油品分析及加氢精制研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [5] 李新禹.城市生活垃圾热解设备与特性的研究[D].天津:天津大学,2007.

- [6] 曹敏,付国燕,刘苏宁,等.含 COD 高盐废水冷冻脱硝-蒸发浓缩技术的开发研究[J].中国有色冶金,2021,50(3):85-90.
- [7] 万雅曼.硫酸蒸发结晶的工艺研究与优化[D].上海:华东理工大学,2014.
- [8] 王进.机械蒸汽再压缩蒸发结晶系统的模拟与性能分析[D].包头:内蒙古科技大学,2019.
- [9] 石冰.硫酸铵法制备硫酸钾过程研究-硫酸钾精制与低能耗母液蒸发结晶模拟[D].上海:华东理工大学,2019. ■