

新型压力驱动高倍膜浓缩技术在废水零排放处理中的应用研究

徐峰^{1*}, 徐应星¹, 何灿²

(1. 国能水务环保有限公司南京分公司, 江苏南京 210004;
2. 北京纳思利万环保科技有限公司, 北京 102211)

摘要:采用高倍膜浓缩技术对燃煤电厂脱硫废水零排放系统反渗透浓水进行深度浓缩处理中试试验研究。通过 168 h 连续运行测试, 验证了高倍膜浓缩技术在 6~7 MPa 的运行压力下将浓盐水浓缩至 100 g/L 以上的可行性。现场连续运行测试结果表明, 高倍膜浓缩工艺具有浓缩极限高、操作压力低、系统运行稳定的特点, 可用于废水零排放反渗透浓水的减量化处理。

关键词: 反渗透; 高倍膜浓缩; 零排放; 减量化

中图分类号: X-1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)08-0221-03

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.08.040

Study on application of novel pressure-driven advanced membrane concentration technology in wastewater treatment with zero discharge

XU Feng^{1*}, XU Ying-xing¹, HE Can²

(1. Nanjing Branch, China Energy Water Industry Environmental Protection Co., Ltd., Nanjing 210004, China;
2. Beijing Nasliwan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: A pilot study on the advanced membrane concentration process (AMCP) is conducted for the treatment of reverse osmosis concentrate brine in a zero discharge system of desulfurization wastewater from coal-fired power plants. Through 168 hours of continuous operation, the feasibility of concentrating brine salinity to over 100 g·L⁻¹ using AMCP at an operating pressure of 6-7 MPa is verified. It is revealed by the spot continuous pilot-scale test that AMCP has the features such as high concentration limit, low operating pressure, and stable system operation, and can be used for the reduction treatment of reverse osmosis concentrated brine.

Key words: reverse osmosis; advanced membrane concentration; zero discharge; reduction

随着全球水资源的紧张, 废水零排放逐渐成为废水处理行业的重要发展方向。废水零排放处理是指工业用水经过全方位反复利用后, 将含有较高盐分和污染物的废水, 进行 99% 以上的浓度浓缩和回收再利用。使废水中的盐类和污染物经过浓缩结晶或压滤处理, 以固体形态排出工厂, 送往垃圾处理厂进行填埋或回收利用, 转化为有价值的化工原料^[1]。

目前, 废水处理行业已进入高盐废水处理发展阶段, 废水零排放技术在此背景下得到了迅速发展^[2-3]。废水零排放技术可以有效节约水资源, 减轻对环境的负担, 缓解我国地表水和地下水的污染现状。在未来的工业用水处理中, 废水零排放技术将发挥越来越重要的作用。

1 膜浓缩技术

高盐废水属于危险废物, 高昂处理成本大大压

缩了企业的利润空间, 严重影响了企业的可持续发展。经过近年来不断的技术开发和工业应用, 国内已基本形成了“预处理-膜浓缩-蒸发结晶”的典型浓盐水零排放处理技术路线。在废水零排放处理中, 膜浓缩技术扮演着举足轻重的角色, 不仅能实现资源的高效利用, 还能确保水质的提升^[4]。通过膜浓缩装置对废水的减量化处理, 可以大幅度降低工业废水零排放处理末端蒸发结晶单元的处理负荷, 从而控制零排放处理整体投资和运行成本。

反渗透技术是一项成熟的脱盐浓缩技术, 可在允许操作压力下(不超过 7 MPa), 将原水的含盐量浓缩至约 70 g/L^[5]。然而, 在零排放处理的全工艺流程中, 传统反渗透的浓缩极限低, 浓排水水量依然很大, 导致后端的蒸发结晶单元规模依然较大^[6]。为进一步控制零排放整体的投资运行成本, 需要对传统反渗透浓水进行深度浓缩, 以进一步降低后续蒸发结晶单元的处理规模^[7-8]。

收稿日期: 2023-10-27; 修回日期: 2024-05-29

作者简介: 徐峰(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水处理技术研发、工程咨询、设计工作, 通讯联系人, 12078630@ceic.com。

高倍膜浓缩工艺技术是一项新型压力驱动型膜法浓缩技术,打破了不断提高压力以追求更高浓缩极限的传统技术路线,采用自主研发的膜组件和工艺设计,在传统海水淡化反渗透的操作压力下(不超过 7 MPa),可根据浓缩倍率的需求设计膜系统级数,将浓缩极限由传统反渗透的 70 g/L 提高到 150 g/L 以上。相较于需要在 10~12 MPa 运行的超高压反渗透技术^[9],高倍膜浓缩工艺技术通过调控盐通量,以控制膜两侧的渗透压差,使其可以在相对低的运行压力下实现更高的浓缩极限^[10]。

本研究采用两级膜系统设计,考察高倍膜浓缩工艺技术在不超过 7 MPa 运行压力下,将浓盐水含盐量浓缩至 100 g/L 以上,同时保证产水含盐量小于 1 g/L 的可行性及经济性。

2 试验部分

2.1 试验背景

湖北某电厂脱硫废水零排放处理装置包括化学软化、超滤、纳滤分盐、反渗透、超高压反渗透、机械蒸汽压再压缩结晶等处理单元,最终实现火电厂脱硫废水废固的“零排放”。其中,脱硫废水经预处理和纳滤分盐处理之后,纳滤产水先后经两段反渗透浓缩后,浓水盐度达到 45~50 g/L。之后,通过超高压反渗透装置在 9~10 MPa 对二段 RO 浓水进行进一步浓缩,浓水含盐量达到 90 g/L。

本研究高倍膜浓缩中试系统,以脱硫废水零排放处理系统二段反渗透装置浓水(超高压反渗透原水)作为原水,旨在达到以下目的:①验证高倍膜浓缩技术处理高盐废水的可行性;②验证系统浓缩极限等关键性能指标;③验证高倍膜浓缩膜元件性能稳定性;④验证高倍膜浓缩系统连续稳定运行能力;⑤获得运行能耗数据;⑥验证系统设计参数,积累运行经验,为工业示范提供可靠依据。

2.2 试验用水

中试试验以电厂脱硫废水处理零排放系统为研究对象,该零排放处理系统及中试侧线工艺流程如图 1 所示。

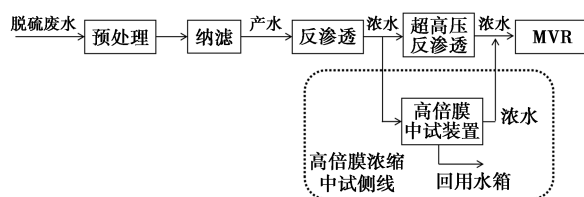


图 1 脱硫废水零排放系统及中试侧线工艺流程

2.3 试验装置

高倍膜浓缩中试试验装置工艺流程如图 2。原水通过输料泵经高压泵(扬程 700 m 柱塞泵)升压后送入高倍膜浓缩系统。高倍膜浓缩中试系统采用两级设计,一级高倍膜浓缩单元配备串联的 2 个 2 芯膜壳,装配 NSLW-100-8040 膜元件;二级高倍率膜浓缩单元配备 1 个 2 芯膜壳,装配 NSLW-70-8040 膜元件。一级高倍膜浓缩单元产水送入二级高倍膜浓缩单元进一步脱盐处理,得到系统产水;一级高倍膜浓缩单元浓水作为系统浓水排出系统。二级高倍膜浓缩单元浓水回流至进水箱与原水混合。中试试验装置配备进水、浓水、产水的流量计与电导率仪,膜前膜后配备压力传感器。

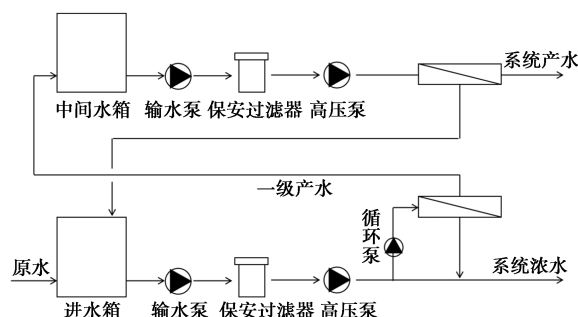


图 2 高倍膜浓缩中试装置工艺流程

试验开始时,首先对一级高倍率膜浓缩单元进行调试,待该单元运行稳定,且中间水箱水量充足后,开启二级高倍率膜浓缩单元。通过调节变频器以及浓水阀门开度,使高压泵压力维持在 5.5~6.5 MPa;通过冷却循环水控制系统进料温度为 23~27℃。

3 结果与讨论

3.1 水质分析

表 1 所示为高倍膜浓缩中试试验系统连续运行稳定时,原水、系统产水和系统浓水的主要离子分析结果。从原水分析结果可以看出,脱硫废水经过化学软化预处理以及纳滤分盐处理,经过两段反渗透

表 1 中试试验原水、产水、浓水主要离子浓度 mg/L

水质参数	原水	产水	浓水
钠	1.63×10^4	244	4.12×10^4
钾	285	3.30	629
钙	3.24	<0.02	6.95
氯化物	2.33×10^4	311	6.05×10^4
硫酸盐	1.85×10^3	0.712	4.77×10^3
碳酸氢根	3.57×10^3	0.231	1.12×10^4

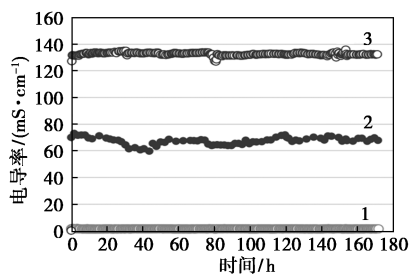
浓缩后的浓缩液硬度含量较低,结垢风险较小。从产水和浓水水质分析结果可以看出,经过高倍膜浓缩工艺两级脱盐处理,系统产水含盐量约 600 mg/L,系统浓水含盐量 100~110 g/L,达到预期浓缩和脱盐的目标。

3.2 高倍膜浓缩系统运行情况

表 2 所示为中试主要运行参数。连续运行过程中系统进水电导、产水电导、浓水电导随时间变化趋势如图 3 所示。在 168 h 的连续运行测试过程中,原水电导在 60~70 mS/cm 之间波动,平均值约为 65 mS/cm;系统产水电导在 1.3~1.8 mS/cm 之间波动,平均值约为 1.5 mS/cm;系统浓水在 131~139 mS/cm 之间波动,平均值约为 134 mS/cm。在 168 h 连续运行期间,高倍膜浓缩装置对原水实现稳定浓缩。样品分析结果表明,高倍膜浓缩中试系统浓水盐度为 100~110 g/L。

表 2 高倍率膜浓缩中试试验主要工艺参数

工艺参数	数值
原水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1.7~1.8
原水温度/ $^{\circ}\text{C}$	23~28
一级高倍膜浓缩单元运行压力/MPa	6.1~6.2
二级高倍膜浓缩单元运行压力/MPa	6.0~6.1
系统浓水排放流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.95~0.99
系统产水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.87~0.93



1—产水;2—原水;3—浓水

图 3 高倍膜浓缩中试装置连续运行电导率变化趋势

3.3 膜污染及清洗

图 4 所示为连续运行过程中一级高倍膜浓缩单元产水量随时间变化趋势。在 168 h 的连续运行测试过程中,原水水量在 1.7~1.8 t/h 间波动,平均值约为 1.75 t/h;一级高倍膜浓缩单元产水水量在 1.66~1.70 t/h 间波动,平均值约为 1.68 t/h。此外,如图 5 所示,在 168 h 连续运行期间,操作压力稳定,在 5.7~6.3 MPa 间波动。剔除流量仪表和压力仪表计量波动误差,高倍膜浓缩中试实验系统运行较为稳定。中试实验过程中,高倍膜浓缩装置膜

元件产水量以及进出口压差维持稳定,未出现膜污堵现象,因此未进行任何药洗操作。

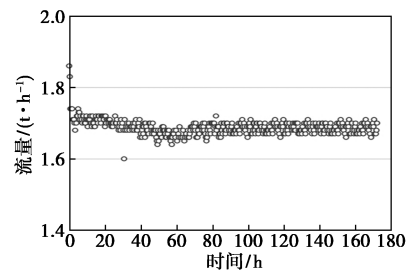


图 4 高倍膜浓缩中试装置一级处理单元连续运行流量变化趋势

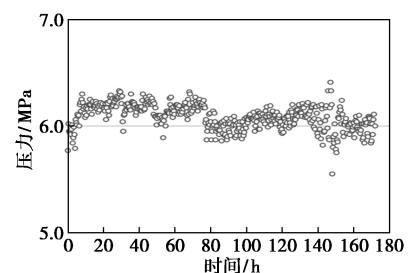


图 5 高倍膜浓缩中试装置一级处理单元连续运行压力变化趋势

3.4 运行成本

高倍膜浓缩中试试验总共耗电 1 293 kWh(含冷却循环水控温、照明、空调等用电),平均吨水电耗约 7.7 kWh(以进水计)。而在实际应用中,通常采用一次通过式膜系统设计,这样就降低了内循环造成的能量浪费。更重要的是,当采用一次通过式设计时,由于不存在浓水内循环,膜壳进水盐度将大幅度降低,从而提高了能量利用效率。经计算,实际生产中,高倍率膜浓缩装置(进水含盐量 70 g/L)吨水电耗约 4.9 kWh(以进水计)。

4 结论

中试试验研究采用高倍膜浓缩工艺,以脱硫废水零排放处理系统反渗透浓缩为研究对象,处理规模 1.8 t/h,运行压力 5.7~6.3 MPa,浓水盐度达 100~110 g/L,吨水电耗 7.7 kWh(以进水计)。中试现场连续运行测试结果表明,高倍膜浓缩工艺浓缩极限高,操作压力低,系统运行稳定,膜元件性能稳定。

参考文献

- [1] 熊日华,何灿,马瑞,等.高盐废水分盐结晶工艺及其技术经济分析[J].煤炭科学技术,2018,46(9):42-48.

(下转第 227 页)