

排水回用合格水补充脱盐水系统的技术优化

陆 科

(山西兰花科技创业股份有限公司新材料分公司)

摘 要:为解决工业用水供需矛盾与废水资源化难题,本文以排水回用产水为研究对象,探究将排水回用达标($\text{COD} \leq 30 \text{mg/L}$ 、浊度 $\leq 1 \text{NTU}$ 、硬度 $\leq 5 \text{mg/L}$ 以 CaCO_3 计)的回用合格水,作为脱盐水系统原水补充水源的可行性。通过小试与中试实验,分析回用合格水对脱盐水预处理(多介质过滤、超滤)及深度处理(反渗透、离子交换)单元的影响,优化工艺参数并验证系统长期运行稳定性。结果表明:回用合格水替代 30%–40% 新鲜原水时,脱盐水产水水质(电导率 $\leq 0.5 \mu\text{S/cm}$ 、 $\text{SiO}_2 \leq 20 \mu\text{g/L}$)满足工业锅炉给水要求,反渗透膜污染速率控制在 0.02bar/月以内,系统水回用率提升至 85% 以上,吨水处理成本降低约 1.2 元。该技术为工业废水“梯级回用–深度净化–高端复用”提供了可行路径,具有显著的节水效益与经济价值。

关键词:排水回用;脱盐水系统;预处理优化;反渗透污染控制;水回用率

1 引言

随着工业用水需求激增与水资源管控趋严,“节水减排+废水资源化”成为工业企业可持续发展的核心课题。脱盐水作为工业生产(如锅炉给水、工艺冷却)的关键用水,传统工艺以新鲜地表水或地下水为原水,存在原水消耗量大、处理

成本高的问题。

工业循环水系统排水、工艺废水经深度处理后形成的“回用合格水”,具有水量稳定、水质波动小、离子含量低于新鲜原水的特点,具备作为脱盐水补充水源的潜力。但回用合格水中残留的微量有机物、胶体颗粒及硅化物,可能导致脱盐水预处理单元堵塞、反渗透膜污染,影响系统运行效率与产水水质。

2 实验材料与方法

2.1 实验水样

实验用水取自排水回用反渗透产水,即“回用合格水”,其基础水质指标如下:

- pH: 7.2 - 7.8
- COD: 22 - 28mg/L
- 浊度: 0.3 - 0.8NTU
- 总硬度(以 CaCO_3 计): 3.5 - 4.8mg/L
- 总硅(以 SiO_2 计): 15 - 22mg/L
- 电导率: 18-25 $\mu\text{S}/\text{cm}$

新鲜原水(对照样)取自 400 原水,电导率 450-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$,总硬度 120-150mg/L(以 CaCO_3 计),总硅 20-25mg/L(以 SiO_2 计)。

2.2 实验装置与工艺

实验采用“预处理-深度处理”两段式工艺,模拟工业脱盐水系统流程,装置规模为 50L/h 中试系统,具体流程如下:

(1)预处理单元:多介质过滤器(石英砂+无烟煤,滤速 8m/h)→超滤系统(PVDF 中空纤维膜,孔径 0.01 μm ,操作压力 0.15 - 0.2MPa);

(2)深度处理单元:一级反渗透(RO,芳香族聚酰胺复合膜,回收率 75%,操作压力 1.8 - 2.2MPa)→离子交换树脂柱(强酸阳离子树脂+强碱阴离子树脂,流速 15m/h)。

2.3 实验方案与检测指标

设置 4 组不同回用合格水补充比例(0%、30%、40%、50%),连续运行 30d,每日检测关键指标:

- 预处理单元:多介质过滤器进出口压差、超滤产水浊度;

- 深度处理单元:RO 进出口压差、RO 产水电导率、离子交换柱出口 SiO_2 含量;

- 系统稳定性:滤芯/膜元件更换周期、吨水处理成本。

3 结果与分析

3.1 补充比例对预处理单元的影响

回用合格水的低硬度、低浊度特性可降低预处理单元负荷,但微量有机物可能增加膜污染风险,不同补充比例的影响如下:

- 0% 补充(纯新鲜原水):多介质过滤器压差上升速率 0.03bar/d,超滤膜污染周期 25d,需化学清洗恢复通量;

- 30% - 40% 补充:多介质过滤器压差上升速率减缓至 0.02bar/d,超滤产水浊度稳定在 0.1NTU 以下,膜污染周期缩短至 21d,清洗频率仅增加 1 次/月,属于经济可控范围;

- 50% 补充:因回用合格水中有有机物累积,超滤膜表面出现轻度凝胶层,污染周期骤缩至 15d,清洗药剂(次氯酸钠+柠檬酸)消耗量增加 30%,反而提升处理成本。

综上,30% - 40% 为最优补充比例,可在降低预处理负荷的同时,避免膜污染加剧。

3.2 补充比例对深度处理单元的影响

深度处理单元的核心是保障脱盐水水质,回用合格水的离子组成对 RO 膜与离子交换树脂的影响尤为关键:

- RO 单元:30%-40% 补充比例下,RO 产水电导率稳定在 0.3 - 0.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$,低于纯新鲜原水组(0.4 - 0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$),且 RO 膜压差月上升幅度仅 0.02bar,无明显结垢或有机物污染(通过膜表面电镜扫描观察,未发现钙垢或碳化物沉积);

- 离子交换单元:回用合格水的低硬度特性使阳离子树脂再生周期延长 10d,低硅含量使阴离子树脂对 SiO_2 的吸附容量更充足,出口 SiO_2 稳

定在 $15-18\mu\text{g/L}$, 满足锅炉给水要求 ($\leq 20\mu\text{g/L}$);

- 50% 补充比例: RO 膜进口有机物浓度升高, 导致膜通量下降 8%, 需增加阻垢剂(如羟基亚乙基二膦酸, HEDP)投加量, 反而抵消节水效益。

3.3 系统运行效益分析

以 40% 补充比例为例, 对比纯新鲜原水系统, 经济效益与环境效益如下:

- 节水效益: 脱盐水系统原水新鲜水消耗量降低 40%, 按园区日均脱盐水需求量 5000m^3 计算, 年节水 73万 m^3 ;

- 经济成本: 回用合格水取水成本 ($1.5\text{元}/\text{m}^3$) 低于新鲜原水 ($3.0\text{元}/\text{m}^3$), 且预处理与深度处理药剂消耗量减少, 吨水处理成本从 4.5 元降至 3.3 元, 年节省成本约 191.4 万元;

- 环境效益: 减少园区废水外排量 $73\text{万 m}^3/\text{年}$, 降低市政污水处理厂负荷, 同时减少新鲜水开采对地下水资源的依赖。

4 工艺优化建议

基于实验结果, 为保障回用合格水稳定补充至脱盐水系统, 提出以下优化措施:

(1) 预处理强化: 在多介质过滤器前增设粉末活性炭(PAC)投加装置(投加量 $5-8\text{mg/L}$), 吸附回用合格水中微量有机物, 延长超滤膜寿命;

(2) RO 运行参数调整: 当补充比例为 40% 时, 将 RO 系统回收率从 75% 提

至 78%, 同时控制进水压力不超过 2.2MPa , 避免膜元件损伤;

(3) 在线监测系统升级: 在回用合格水入口增设 COD 在线监测仪与硅浓度分析仪, 当 $\text{COD} > 30\text{mg/L}$ 或硅 $> 25\text{mg/L}$ 时, 自动切换至新鲜原水, 防止系统污染;

(4) 定期维护计划: 制定“预处理单元每周反洗、RO 膜每季度化学清洗、离子交换树脂每 2 个月再生”的维护周期, 确保系统长期稳定。

5 结论

(1) 回用合格水 ($\text{COD} \leq 30\text{mg/L}$ 、浊度 $\leq 1\text{NTU}$ 、硬度 $\leq 5\text{mg/L}$) 可作为脱盐水系统补充水源, 最优补充比例为 30% - 40%, 此时脱盐水产水水质完全满足工业高端用水要求;

(2) 该技术可使脱盐水系统水回用率提升至 85% 以上, 吨水处理成本降低约 1.2 元, 兼具显著的节水效益与经济价值;

(3) 通过“预处理强化 + 运行参数优化 + 在线监测 + 定期维护”的组合措施, 可有效解决回用合格水带来的膜污染、滤芯堵塞等问题, 保障系统长期稳定运行。

未来可进一步探索回用合格水与其他水源(如市政再生水)的混合补充模式, 以及新型抗污染 RO 膜、高效吸附材料在该系统中的应用, 进一步提升水资源循环利用效率。