软化预处理对RO浓缩液MVR蒸发结晶结垢特性的研究

石瑞峰

国能包头煤化工有限责任公司，中国·内蒙古 包头 014060

摘要：本文依托工业现场高盐废水处理装置，设置未软化、常规软化、深度软化三种梯度预处理工况，系统探究不同软化深度对 RO 浓缩液蒸发结晶阶段结垢速率、垢层结构特征、换热稳定性及设备能耗的影响规律，并进一步分析硬度离子对结垢抑制的阈值效应。试验结果表明：软化预处理可显著去除水体中成垢离子，有效降低蒸发析晶驱动力；随着软化深度提升，蒸发器换热温差增幅持续收窄，垢层厚度显著降低，设备运行周期大幅延长。其中，未软化进水总硬度高达 3120 mg/L，经常规软化后降至 65 mg/L，深度软化可控制在 18 mg/L 以内；当残余硬度低于 20 mg/L 时，MVR 结垢速率出现明显拐点，防垢增益效果显著提升。本研究明确了适配 RO 浓缩液 MVR 系统的软化控制阈值，可为同类高盐废水零排放工程的预处理优化与结垢防控提供工程参考。

关键词：RO 浓缩液；软化预处理；MVR 蒸发结晶；结垢防控；硬度阈值

Study on the Fouling Characteristics of RO Concentrate in MVR Evaporation Crystallization through Softening Pretreatment

Shi Ruifeng

Guoneng Baotou Coal Chemical Co., Ltd., China Inner Mongolia Baotou 014060

Abstract: The three gradient pretreatment conditions for the industrial high-salinity wastewater treatment plant are non-softened, conventionally softened and deeply softened; thus, it is necessary to know how different softening depths affect the scaling rate, structure of the fouling layer, heat-exchange stability and equipment energy consumption during the evaporation-crystallisation stage of RO concentrate systematically. The Threshold Effect of Hardness Ions on Scaling Inhibition has also been studied. According to the above experiments, pre-treatment softening can reduce the concentration of scaling ions in the water and thus prevent evaporation-crystallisation. Increase the softening depth to reduce the temperature difference in the heat exchanger of the evaporator, decrease the thickness of the fouling layer considerably, and thus extend the service life of the equipment. The total hardness of the influent water without softening was 3120 mg/L; after conventional softening, it dropped to 65 mg/L, and with deep softening, it was less than 18 mg/L. If the residual hardness is less than 20 mg/L, there will be a noticeable change in the slope of the MVR curve, and the scale inhibition will be relatively good. Determine the softening control threshold of the MVR system for RO concentrate in this paper and provide engineering support for the optimisation of pretreatment and scaling prevention in other high-salinity wastewater zero-liquid discharge projects.

Keywords: RO concentrate; Softening pretreatment; MVR evaporation crystallization; Scale prevention and control; Hardness threshold

0 引言

随着国内工业污水排放标准日趋严格，高盐废水资源化减量与近零排放成为企业环保刚需。反渗透 −MVR 蒸发结晶技术因水资源回收率高、盐分固化彻底等优势，多用于化工、新能源、电镀等高盐废水处理。

工程实践表明，反渗透会富集钙、镁、碳酸氢根等结垢组分，RO 浓缩液硬度、碱度偏高。该高过饱和度物料进入 MVR 蒸发器，碳酸盐易在换热管壁析出结垢，增大传热热阻，抬高药耗与电耗，缩短运行周期，提升运维成本。

现有研究多聚焦 MVR 参数、阻垢剂及分盐工艺，缺少不同软化深度下 MVR 结垢的梯度现场对照，硬度阈值与结垢速率关联分析不足。为此，本文开展 28 d 现场梯度软化对照试验，量化进水硬度对结垢、能耗及稳定性的影响，探究软化阈值，为工艺优化提供数据支撑[1]。

1 试验材料与方法

1.1 试验水质与装置

本次试验水样取自厂区工业废水反渗透浓缩液，水体

经多级反渗透富集浓缩，TDS、总硬度、总碱度指标较高，属于典型易结垢高盐浓缩水体。试验装置由软化预处理单元、精密过滤单元、MVR 蒸发结晶单元及水质检测取样系统组成，整套设备为工业在用成套装置，试验数据真实贴合实际生产工况。

1.2 试验工艺流程

本次试验工艺流程如下：

RO 浓缩液储池水体→软化预处理单元（梯度软化调控）→精密过滤器→ MVR 蒸发器进料系统→蒸发结晶浓缩→盐渣分离、产水回用。

所有的对照试验都在同一个设备上进行，试验期间保持 MVR 蒸发温度、进料流量、系统真空度、浓缩倍率等主要参数不变，只改变前端软化预处理工艺，保证试验的单一变量原则，使对比数据科学有效。

1.3 试验工况设置

为系统探究软化深度对蒸发结垢的影响，本次研究设置三组梯度对照工况，整体试验周期为 28 d：

工况一：无软化预处理，RO 浓缩液原液直接进入 MVR 系统；

工况二：常规软化预处理，通过药剂投加去除大部分钙镁离子，实现中度降硬；

工况三：深度软化预处理，改进药剂的配比以及反应沉降时间，彻底清除残留的成垢离子。

试验期间每天固定时间取样检测水质指标，并记录蒸发器换热温差、设备能耗、垢层生长状况等运行数据。

1.4 检测与评价指标

本次试验所用的检测指标为工程化常规检测指标，不涉及复杂的微观表征，主要评价内容如下所示：

水质指标：总硬度、钙镁硬度、总碱度、TDS；

结垢指标：垢层厚度、结垢生长速率、换热温差增幅、垢层附着特性；

运行指标：单位产水能耗、设备连续运行时长、停机清洗频次。

2 试验结果与分析

2.1 不同软化工况对成垢离子的去除效果

三组工况进水水质检测平均值如表 1 所示。

表 1 不同软化预处理工况水质指标对比

工况	总硬度（mg/L）	总碱度（mg/L）	TDS（mg/L）
工况一（无软化）	3120	2460	58600
工况二（常规软化）	65	310	57900
工况三（深度软化）	18	92	57400

由表 1 可知，原始 RO 浓缩液成垢离子含量极高，具备强烈的析晶结垢条件。经常规软化处理后，水体总硬度由 3120 mg/L 降至 65 mg/L，硬度去除率可达 97.9%，可去除绝大部分成垢金属离子。深度软化可进一步将残余总硬度控制在 18 mg/L，大幅降低水体成垢潜力。

同时可以看出，软化工艺对水体整体含盐量影响较小，三组工况 TDS 基本持平，说明软化工艺主要针对性去除钙镁结垢离子，不改变主体盐组分，符合高盐废水预处理工艺特征。

从数据规律分析可知，软化对成垢离子的去除效果不是线性的。常规软化可以去除大部分硬度，继续提高软化深度，硬度去除率只提高 1.5% 左右，但是对后续蒸发结垢的抑制效果明显提高。这表明：残余低硬度离子是诱发 MVR 缓慢结垢的关键因素，深度软化的核心价值不在于大幅降盐，而在于压低离子过饱和度、抑制换热壁面异相成核，存在明显的工程阈值效应[2]。

2.2 软化预处理对 MVR 系统结垢速率的影响

经过 28 d 连续运行观测，三组工况结垢速率差异显著。

无软化工况下，MVR 换热管壁结垢生长速度最快，试验第 7 天即可观测到白色薄垢，垢层持续硬化增厚，运行至 21 d 时换热效率严重衰减，系统被迫停机酸洗。

常规软化工况结垢速率明显放缓，试验周期结束后垢层厚度约 0.22 mm，结垢趋势可控。

深度软化工况全程结垢极微弱，最终垢层厚度仅 0.06 mm，换热面整体洁净度良好。

根据水质数据对比可知，结垢速率和进水残余硬度存在明显正相关关系，但是并不是简单的正比关系。当水体残余硬度降到 20mg/L 以下的时候，结垢生长速度出现明显的下降拐点，防垢效果得到显著提高，说明这个数值是 RO 浓缩液 MVR 蒸发系统软化控制的阈值。可以为现场准确控制软化工艺、平衡药剂成本和防垢效果提供量化的依据。

2.3 软化预处理对垢层结构与附着特性的影响

现场拆解观察结果表明，由于软化工况的不同而形成的垢层结构也存在较大差别。

无软化预处理工况下，垢层厚度最大、质地坚硬、结构致密，与换热管壁附着力强，普通在线冲洗不能去除，必须停机酸洗，清洗难度大、损耗高。

常规软化预处理形成的垢层厚度小、结构比较疏松，附着强度有所下降。

深度软化工况下只有少量的松散浮垢产生，没有硬质

垢层堆积，日常冲洗就可以保持设备的干净，不需要经常停机维修。

由此可见，软化预处理不仅可以降低结垢生长速度，还能改变垢层物理结构与附着特性，从根本上降低设备清洗难度与运维损耗。

2.4 软化预处理对 MVR 能耗与运行稳定性的影响

三组工况 MVR 系统运行性能统计如表 2 所示。

表 2 不同软化工况 MVR 运行参数对比

工况	单位产水能耗（kW・h/t）	28d 换热温差增幅（℃）	最长连续运行时间（d）
工况一（无软化）	42.6	11.4	21
工况二（常规软化）	34.2	4.7	＞ 28
工况三（深度软化）	30.5	1.6	＞ 28

由运行数据可知，未软化进水造成蒸发器结垢持续累积，换热效率快速衰减，系统能耗大幅升高，设备运行周期短、稳定性差。常规软化可有效改善设备运行状态，降低能耗波动。深度软化工况换热状态最为稳定，能耗最低，换热温差增幅极小，设备可实现长期连续稳定运行。

综合经济性分析，深度软化虽小幅增加前端药耗成本，但可显著降低蒸发能耗、减少停机损失、延长设备清洗周期，整体综合效益最优[3]。

3 结垢机理分析

RO 浓缩液经过反渗透富集之后，钙镁离子、碳酸盐的含量明显增加，水体处在高过饱和的状态。MVR 蒸发器高温、负压、连续浓缩时，水分迅速蒸发，盐类溶解平衡被破坏，成垢离子很容易在换热管壁高温界面产生异相成核、不断沉积，逐渐形成致密硬质垢层，阻碍热量传递，使设备工况不断恶化。

软化预处理是通过化学反应把水体中的游离钙镁离子变成沉淀物来去除，大幅度降低水体离子饱和度，减弱蒸发析晶的主要驱动力。尤其是深度软化把残余硬度控制在阈值内，可以明显减慢晶体成核速率，延缓垢层生长堆积，保证 MVR 蒸发系统长时间高效稳定运行。

4 工程运行优化建议

结合本次对照试验数据与阈值分析结果，针对 RO 浓缩液 MVR 蒸发结晶系统提出以下优化建议：

（1）RO 浓缩液不可直接进蒸发系统，必须配套软化预处理单元，从源头削减成垢离子，降低结垢风险；

（2）连续运行的高负荷零排放装置，建议采用深度软化工艺，将出水总硬度控制在 20 mg/L 阈值以内，最大化抑制结垢生长；

（3）软化系统需配套精密过滤装置，拦截絮体悬浮物，避免固体杂质诱发局部结垢；

（4）根据软化出水水质动态调整 MVR 清洗周期，推行预防性运维模式，减少硬质垢层累积。

5 结语

本文采用 28d 现场梯度对照试验，对 RO 浓缩液 MVR 蒸发结晶系统结垢特性、能耗水平和运行稳定性等进行系统研究，根据数据阈值分析得到如下结论：

（1）软化预处理可以去除 RO 浓缩液中的成垢钙镁离子，大大降低水体的过饱和度，从源头上抑制 MVR 蒸发结垢，是改善蒸发系统运行工况的有效前置工艺。

（2）残余硬度对 MVR 结垢存在显著阈值效应，进水总硬度控制在 20 mg/L 以下时，结垢速率大幅降低，防垢效果提升显著，可为现场工艺调控提供量化标准。

（3）深度软化预处理可以改善垢层结构，减少硬质垢的产生，降低设备清洗的难度，提高换热效率，降低运行能耗，明显改善整套零排放系统连续性和经济性，适合同类工业工程推广应用[4]。

参考文献：

[1] 王浩. 反渗透浓水 MVR 蒸发结晶结垢控制技术研究[J]. 水处理技术，2023,49 (08):112-115.

[2] 李建军. 高盐废水膜浓缩 - 蒸发结晶零排放系统运行优化[J]. 工业水处理，2024,44 (02):89-92.

[3] 张磊. 化学软化预处理对 MVR 蒸发器稳定运行的影响分析[J]. 环境工程，2023,51 (05):78-81.

[4] 陈阳. 工业高盐废水蒸发结垢机理及防控措施研究[J]. 净水技术，2024,43 (03):102-106.

作者简介：石瑞峰（1997.07-），男，汉族，内蒙古包头人，本科，助理工程师，研究方向：从事工业水处理研究。