

高盐浓水回用 RO 系统膜污染防控及 PWT 全流程解决方案

王文哲

上海赛沃环保科技有限公司

DOI:10.12238/eeep.v8i2.2523

[摘要] 针对高盐浓水处理过程中二氧化硅结垢与生物污染耦合作用导致反渗透系统运行效率低下的技术难题,本研究基于某化工厂脱盐水系统改造工程,系统分析了高盐浓水的水质特征及其膜污染机制,提出了PWT三重协同防护体系。通过使用PWT高硅阻垢剂、以及RO专用清洗剂、非氧化性杀菌剂。构建了涵盖阻垢(预防)、抑菌(控制)、清洗(恢复)的三维协同防护体系。工程实践表明:该方案使浓水RO系统化学清洗周期延长1倍,降低运行成本。研究结果为高盐废水零排放系统的稳定运行提供了创新性的技术范式,具有显著的环境效益和经济效益。

[关键词] 高盐废水回用; 反渗透膜污染; 二氧化硅结垢; 生物污染控制; 全流程防护体系

中图分类号: TQ342+.81 文献标识码: A

Membrane pollution prevention and PWT full process solution for RO system reuse of high salt concentrated water

Wenzhe Wang

Shanghai Saiwo Environmental Protection Technology Co., Ltd.

[Abstract] In response to the technical problem of low operational efficiency of reverse osmosis systems caused by the coupling effect of silica scaling and biological pollution in the treatment of high salt concentrated water, this study is based on a desalination system renovation project in a chemical plant. The water quality characteristics and membrane fouling mechanism of high salt concentrated water are systematically analyzed, and a PWT triple synergistic protection system is proposed. By using PWT high silicon scale inhibitor, RO specific cleaning agent, and non oxidizing bactericide. A three-dimensional collaborative protection system covering scale inhibition (prevention), antibacterial (control), and cleaning (recovery) has been constructed. Engineering practice has shown that this scheme extends the chemical cleaning cycle of the concentrated water RO system by 1 times and reduces operating costs. The research results provide an innovative technological paradigm for the stable operation of zero discharge systems for high salt wastewater, with significant environmental and economic benefits.

[Key words] Reuse of high salt wastewater; Reverse osmosis membrane fouling; Silicon dioxide scaling; Biological pollution control; Full process protection system

引言

随着工业用水需求的持续增长,高盐浓水回用与零排放技术已成为工业企业实现水资源循环利用的关键路径^[1]。据国家发改委统计,我国工业废水回用率每提高1个百分点,年节水潜力可达3.6亿m³^[2]。然而,高盐浓水处理过程中普遍存在的二氧化硅结垢和生物污染问题严重制约着反渗透系统的运行效率,成为制约零排放技术推广的主要技术瓶颈^[3]。在实际工业场景中,二氧化硅与微生物的协同污染机制复杂,常规处理方法难以实现系统性的长效防护^[6]。本研究基于北方某化工厂脱盐水系统改造工程,针对高硅高盐水质特征,开发了包含化学清洗、阻垢防护和生物抑制的预防-控制-恢复三维协同防护体系,为同

类项目的工程应用提供理论依据和技术参考。

1 工程概况与问题诊断

1.1 项目背景。北方某大型化工厂采用“一级RO+浓水RO”双级处理工艺,设计处理能力150m³/h。原水为地表水与地下水混合水源,其中SiO₂含量达63mg/L,显著高于常规水源(通常<30mg/L)。系统运行一年后出现产水量下降30%、脱盐率降低至80%以下等严重性能衰减现象,导致吨水处理成本增加。

1.2 工艺流程。原水→预处理→一级RO→浓水RO→回用。

浓水RO系统配置2×75m³/h装置,膜组件采用6芯压力容器,排列方式为10:5,设计回收率75%。预处理仅配置5μm保安过滤器,无软化、除硅等深度处理单元。

Ecological Environment and Protection

1.3水质特征。对浓水RO进水进行全分析(表1),发现以下关键特征:

(1)SiO₂浓度63mg/L,理论浓缩后达252mg/L,远超阻垢剂常规控制范围(通常<150mg/L);(2)COD 72mg/L,SDI15值5.0,显示显著有机物污染倾向;(3)硫酸根961mg/L,存在硫酸盐结垢风险;(4)总碱度688mg/L,pH缓冲能力较强。

表1 浓水RO进水水质分析

项目	检测数值	项目	检测数值
浊度 NTU	0.8	CODmg/L	72
SDI ₁₅	5	总碱度 mg/L	688
pH	6.94	硫酸根 mg/L	961
余氯 mg/L	<0.1	SiO ₂ mg/L	69
电导率 μS/cm	6250	总硬度 mg/L	51

1.4污染特征分析。通过膜元件拆解检测(表2)和污染物表征,确定主要污染类型(表3):

表2 二段单支膜元件称重

安装顺序	第一支	第二支	第三支	第四支	第五支	第六支
重量(Kg)	15.5	16.5	17	18	19	21

膜元件称重说明二段膜元件存在无机盐结垢,浓水侧膜元件污染最严重,膜元件重量最重。

表3 污染物EDS分析结果

元素	含量(wt%)	可能形态
Si	29.62	SiO ₂ ·nH ₂ O
O	54.93	氧化物/羟基化合物
C	10.92	有机污染物
Fe	0.48	Fe(OH) ₃ 胶体

根据污染物分析判断膜元件存在以下污染:

(1)无机污染:SiO₂占比29.62%,存在典型硅垢层状结构;(2)生物污染:检测到EPS特征成分(多糖、蛋白质);(3)胶体污染:Fe、Ca等金属氧化物胶体沉积。

2 PWT全流程解决方案设计

2.1高盐浓水处理中膜污染的“预防-控制-恢复”三维防护体系。本研究构建的“预防-控制-恢复”三维防护体系是针对高盐浓水处理中膜污染问题的系统性解决方案。该体系通过前端预防、过程控制和末端恢复三个环节的协同作用,实现对膜污染的有效防控和系统性能的稳定提升:

前端预防:通过优化阻垢剂配方,提升对二氧化硅等无机垢的抑制能力,从源头上减少无机污染物在膜表面的沉积。

过程控制:改进杀菌剂投加方式,抑制生物膜的形成和微生

物的增殖,降低生物污染对膜性能的影响。

末端恢复:开发专用清洗药剂,实现对致密垢层的有效剥离和膜通量的快速恢复,延长膜的使用寿命。

2.2关键技术。

2.2.1高硅专用阻垢剂 SpectraGuard 311:基于树状聚合物的阻垢机制。SpectraGuard 311是基于Dendrimer专有的合成技术开发的树状聚合物阻垢剂。其独特的分子结构设计使其在抑制二氧化硅结垢方面表现出色,具体作用机制如下:

由于Dendrimer树枝状聚合物分子量高达40,000,有海量的活性官能团,因此具有完全的单离子阻垢能力,超强分散能力和螯合能力,而不再是晶体修改。树枝状聚合物可以先于传统阻垢剂之前将水中的阴阳离子通过螯合、电荷吸引阻止阴阳离子相互接触的可能性,阴阳离子失去结合成微晶的机会,在离子层面上就完成了阻垢,而不是等微晶形成后在覆盖包裹^[4]。

2.2.2高盐浓水处理中的复合清洗体系开发与应用。针对高盐浓水处理过程中复杂的膜污染问题,开发了由Lavasol 2、Lavasol 7和Lavasol 1组成的复合清洗体系。该体系通过不同清洗剂的协同作用,实现对不同类型污染物的有效去除:

Lavasol 2:为碱性清洗剂,为清洗二氧化硅的膜专用清洗剂。针对反渗透膜的二氧化硅污染,可以将二氧化硅无机盐垢较好的清除,能有效的恢复膜元件的透水性能,同时避免对反渗透膜本身造成化学伤害。

Lavasol 1、7: PWT最新配方反渗透专用清洗剂Lavasol1、7,是一种复合无机及有机聚合物的产品,当反渗透被污堵时,使用本清洗剂可以安全有效的将污染清除,同时避免对反渗透膜本身造成化学伤害。Lavasol 1为酸性清洗剂,Lavasol7为碱性清洗剂。针对反渗透膜不同的污染特征,选用Lavasol1酸性清洗剂,可以将碳酸钙,碳酸镁,铁等金属氧化物这类无机盐垢洗去,而选用Lavasol7碱性清洗剂则可以有效清除、胶体,有机物,微生物甚至油脂等污染。

2.2.3生物污染控制策略。生物污染是高盐浓水处理过程中常见的问题之一,其主要由微生物在膜表面的附着和增殖形成生物膜所致。针对这一问题,针对该项目提出了以下生物污染控制策略:

投加方式优化:采用前置式冲击投加方式,将杀菌剂投加点前移至保安过滤器入口处,并以100ppm的浓度每周投加2-3次,每次投加1-2小时。这种投加方式能够确保杀菌剂在进入膜系统之前与微生物充分接触,有效抑制微生物的生长和繁殖,从而减少生物膜的形成^[5]。

药剂选型:选用非氧化性杀菌剂BioGuard SHOCK,其主要成分为高性能的DBNPA复合组分。与传统的氧化性杀菌剂相比,BioGuard SHOCK具有更强的杀菌能力和更广泛的适用性,能够在不影响膜材料性能的前提下,有效杀灭各种微生物,降低生物污染的风险。

协同作用:BioGuard SHOCK能够破坏微生物细胞外聚合物(EPS)的三维结构,降低生物膜的附着强度。EPS是生物膜的主要

成分之一,其三维网络结构为微生物提供了附着和保护的场所。通过破坏EPS结构,BioGuard SHOCK能够使生物膜从膜表面脱落,从而减少生物污染对膜性能的影响。

2.3全流程解决方案的具体实施。在实际工程应用中,PWT全流程解决方案的实施需要综合考虑系统的运行参数、水质特征和膜污染情况。以下是该方案的具体实施步骤和注意事项:

系统改造:根据全流程解决方案的要求,对现有的高盐浓水处理系统进行改造。主要包括新增阻垢剂精确计量泵,确保阻垢剂的投加精度达到 $\pm 2\%$;保安过滤器前置式冲击投加,投加浓度100ppm,投加周期每周2-3次,每次投加1-2小时。

清洗程序优化:采用阶梯式pH调节清洗工艺,根据膜污染的类型和程度,分阶段调整清洗液的pH值。例如,先使用Lavasol 2进行碱性清洗,去除硅垢;再用Lavasol 1进行酸性清洗,去除金属氧化物及碳酸盐垢;最后用Lavasol 7进行碱性清洗,增强污染物的剥离效果。这种分阶段清洗方式能够提高清洗效率,减少对膜材料的损伤。

运行参数监控与调整:在系统运行过程中,实时监控各项运行参数,如产水流量、段间压差、脱盐率等。根据参数的变化情况,及时调整药剂投加量、清洗周期等运行参数,确保系统的稳定运行。

人员培训与操作规范:对操作人员进行系统培训,使其熟悉全流程解决方案的实施细节和操作要点。制定详细的操作规范和流程,确保每个环节的操作准确无误,避免因人为因素导致系统运行不稳定或膜污染加剧。

3 工程实施与效果评估

3.1根据PWT全流程解决方案的要求,对系统进行了以下改造。药剂系统改造:新增阻垢剂精确计量泵,精度达到 $\pm 2\%$,确保阻垢剂的投加量准确稳定。同时,对杀菌剂投加系统进行升级,优化投加方式,使用CIP和冲击式相结合方式,使其能够更好地抑制生物膜的形成。

杀菌剂投加点前移:将杀菌剂投加点从原来的膜系统入口处前移至保安过滤器入口处,提前对微生物进行杀灭,减少其进入膜系统的机会,从而降低生物污染的风险。

清洗程序优化:采用阶梯式pH调节清洗工艺,根据膜污染的具体情况,合理选择清洗剂的种类和使用顺序,提高清洗效果。同时,优化清洗流程,缩短清洗时间,降低清洗成本。

3.2运行效果对比实施PWT全流程解决方案后,系统运行参数显著改善,具体对比结果如下表所示:

表4 改造前后运行参数对比表格参数

	产水流量(m^3/h)	脱盐率(%)	清洗周期(天)	二段压差(kPa)
改造前	70	96	7-10	250
改造后	83	97	15-20	150

从表中可以看出,改造后系统的产水量提高了18.6%,脱盐率提升了1.0%,清洗周期延长了100%,段间压差降低了40%。这些

数据表明,PWT全流程解决方案有效提升了系统的运行效率和稳定性,显著降低了运行成本。

3.3技术经济分析。直接经济效益:通过延长膜的使用寿命和清洗周期,节约膜更换费用;同时药剂成本也比之前降低15%,进一步减少了系统的运行成本。

环境效益:系统运行效率的提升使得废水减排量增加,并明显提升系统节水量,对缓解水资源短缺和减少环境污染具有重要意义。

技术指标:改造后的系统各项技术指标均达到了《反渗透水处理设备》(GB/T 19249-2017)的要求,为高盐浓水回用系统的稳定运行提供了可靠的技术保障。

4 结论

本项目针对高盐浓水处理过程中二氧化硅结垢与生物污染耦合作用导致反渗透系统运行效率低下的技术难题,提出了PWT全流程解决方案。通过构建“预防-控制-恢复”三维防护体系,成功解决了高盐浓水回用系统中的膜污染问题。

该项目方案的主要结论如下:

(1)揭示了高盐浓水系统中硅垢与生物污染的协同作用机制,发现二氧化硅沉积是膜污染的主要诱因,通过二氧化硅清洗剂以及高硅阻垢剂达到有效改善效果。(2)PWT SpectraGuard 311阻垢剂能够显著降低硅垢沉积速率,提升临界过饱和度,有效延长了膜的使用寿命。(3)构建的PWT全流程解决方案成功实现了无预处理浓水反渗透系统的稳定运行,为同类项目提供了可复制的技术模式。针对复杂水质特征的多污染耦合问题,需要建立系统性的防护策略,为工业高盐浓水回用与零排放技术的推广提供更有力的技术支持。

[参考文献]

- [1]王磊,李艺,张松建.高盐废水处理技术研究进展[J].水处理技术,2021,47(3):1-6.
- [2]国家发展改革委.中国水资源公报2022[R].北京:中国水利水电出版社,2023.
- [3]Sheikholeslami R,Tan S.Effects of water quality on silica fouling of RO membranes[J].Desalination,2006,196(1-3):249-259.
- [4]Zhang Y,et al.Modified antiscalants for calcium sulfate inhibition in reverse osmosis systems[J]. Journal of Membrane Science,2018,567:215-223.
- [5]Wang H,et al.Non-oxidizing biocide efficacy in biofilm control: Mechanisms and field applications[J]. Water Research, 2020,185:116234.
- [6]Vuong T,et al.Two-stage nanofiltration for high-salinity wastewater treatment:Cost and performance optimization [J].Desalination,2019,452:1-10.

作者简介:

王文哲(1981--),男,汉族,陕西西安人,本科,研究方向:环境工程。