



再生水高标准处理与工业利用工程案例研究

李旭¹,李彩凤¹,巫寅虎²,徐雨晴²,张宏宇¹,胡洪营^{2,3}

(1.北京亦庄水务有限公司,北京100176;2.清华大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室,环境前沿技术北京实验室,北京100084;3.清华苏州环境创新研究院,江苏苏州215163)

[摘要] 从系统构成、工艺设计、运行特性等方面对北京市经济技术开发区再生水高标准处理与工业利用工程进行了系统分析。该工程采用微滤-反渗透(双膜)工艺处理城市污水厂二级出水,生产纯水供给开发区内工业企业。为了控制进水中微生物导致的反渗透膜生物污堵,再生水厂采用氯消毒作为预处理以杀灭进水中的微生物。运行数据的分析结果表明,氯消毒预处理虽然能够有效灭活进水中的微生物,但却不能有效控制反渗透膜生物污堵。将预处理工艺改造为氯-紫外线组合消毒预处理后,反渗透膜污堵得到有效控制。反渗透系统平均进水压力由改造前的1.0 MPa降低至0.9 MPa,运行最高压力由超过1.4 MPa降低至1.2 MPa以下;化学清洗间隔由1~2个月增加至2~3个月,工艺效能得到了显著提高,吨水电耗、药耗降低约22%。

[关键词] 再生水;反渗透;膜污堵;生物污堵;消毒预处理

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0183-04

Project case study on high standard treatment and industrial utilization of reclaimed water

LI Xu¹, LI Caifeng¹, WU Yinhu², XU Yuqing², ZHANG Hongyu¹, HU Hongying^{2,3}

(1. Beijing Yizhuang Water Co., Ltd., Beijing 100176, China;

2. Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control (SMARC), Beijing Laboratory for Environmental Frontier Technologies, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Research Institute for Environmental Innovation (Suzhou), Tsinghua, Suzhou 215163, China)

Abstract: The high standard treatment and industrial utilization project of reclaimed water in Beijing economic and technological development zone was analyzed systematically from the aspects of system composition, process design and operation characteristics. In this project, microfiltration-reverse osmosis (MF-RO) process was used to treat secondary effluent of municipal wastewater treatment plant, and pure water was produced for industrial enterprises in the development zone. In order to prevent biofouling of RO membranes caused by microbes in the feed water, the reclaimed water plant used chlorine disinfection to inactivate microbes. However, the analysis showed that the biofouling of RO membranes couldn't be effectively prevented by chlorine disinfection pretreatment. After using chlorine-ultraviolet combined disinfection as pretreatment, RO membrane fouling was controlled to some extent. The average value of influent pressure of RO was reduced from 1.0 MPa to 0.9 MPa, and the highest pressure was reduced from 1.4 MPa to below 1.2 MPa. The chemical cleaning interval was increased from 1-2 months to 2-3 months. The process efficiency was significantly improved, and the electricity and chemical consumption per ton of water was reduced by about 22%.

Key words: reclaimed water; reverse osmosis; membrane fouling; biofouling; disinfection pretreatment

我国水资源短缺,北京等北方城市尤为突出,导致北京市工业用自来水价格高达9.0~9.5元/m³,加重了各工业企业乃至电子信息等高精尖企业的生产成本负担。为解决水资源短缺问题,国家大力推动再生水利用,出台了《关于推进污水资源化利用的指导意见》等一系列重要文件,要求缺水地区工业企业优先使用再生水。目前,再生水(包括城市污水厂和工业园区综合污水厂出水等)已成为电子信息、电力、热力等高精尖行业和支柱行业高标准纯水制备的重要水源。

反渗透(RO)工艺对无机物、有机物和病原微生物等均能实现高标准去除,是工业纯水制备的必备单元。目前,我国工业级反渗透工艺的应用规模已经超过5 000万m³/d,以再生水作为水源的比例超过70%^[1]。该工艺最初用于海水淡化和以地表水、地下水为水源的纯水制备过程,用于再生水处理起步较晚。并且,由于再生水中有有机污染物组分复杂、浓度比海水和常规水源高5~10倍^[2-3],在工程实践中面临比海水淡化和常规水源净化更复杂、更突出的膜污堵问题,限制了其进一步发展。

笔者从系统构成、工艺设计、运行特性等方面对北京市经济技术开发区的再生水高标准处理与工业利用进行了系统分析,从工艺运行稳定性和技术经济性角度探讨了反渗透膜污堵控制的可行方案。

1 北京市经济技术开发区再生水利用概况

1.1 开发区再生水利用系统

北京市经济技术开发区,又名亦庄开发区(以下简称开发区),总规划面积46.13 km²,主要划分为核心区、路东区 and 河西区等区域。该开发区享受国家级经济技术开发区和国家高新技术产业园区双重优惠政策,目前已经集聚了一大批竞争力强、知名度高、科技领先的企业,逐步形成了电子信息、生物医药、汽车和装备制造4大主导产业。

该开发区工业用水量大,且水质要求高。由于北京市水资源短缺问题突出,市政府要求开发区工业用新水零增长。为了支撑开发区内企业的可持续发展,开发区内的东区和经开再生水厂分别以园区外污水处理厂(XHM污水处理厂)和园区综合污水处理厂的二级出水(C级再生水)^[4]为水源,采用“微滤-反渗透”(MF-RO)工艺生产A1级再生水。生产

的A1级再生水通过再生水配套管网输送给开发区内工业企业,替代自来水作为工艺生产用水和非工艺生产用水(如循环冷却用水等),实现了再生水在区域范围内的大规模应用。目前,园区内A1级再生水的用量达到1 368万m³/a,占工业用水总量的40%,已成为开发区的工业第一水源。

1.2 再生水高标准处理工艺

开发区再生水厂采用的高标准处理工艺见图1。

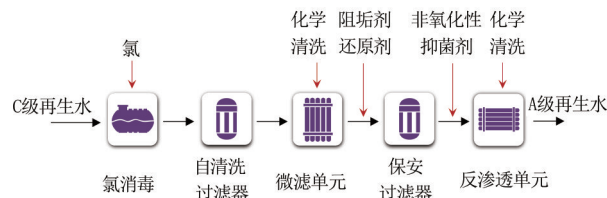


图1 传统微(超)滤-反渗透工艺

Fig. 1 Traditional microfiltration (ultrafiltration)-reverse osmosis process

该工艺以微滤和反渗透“双膜”单元为核心,利用反渗透膜对水分子的选择性透过作用,生产A1级再生水。为了维持双膜系统的稳定运行,需要在核心处理单元前设置消毒、介质过滤、保安过滤器等预处理单元。其中,各处理单元的核心功能如下:

(1)消毒预处理单元:通常采用氯消毒等灭活进水中的微生物,防控微生物生长并分泌代谢产物而导致的反渗透膜生物污堵。

(2)介质过滤预处理单元(自清洗过滤器):通常采用活性炭、石英砂等作为过滤介质,去除水中的颗粒物、部分溶解性有机物,防止对后续微滤膜和反渗透膜的污堵。

(3)微滤(超滤)单元:采用中空纤维微滤(超滤)膜截留水中细微颗粒物,防止对反渗透膜的污堵。

(4)保安过滤器单元:通常设置在反渗透单元之前,防止较大的颗粒物(通常粒径为5 μm以上)进入反渗透单元,对反渗透膜造成不可逆损伤。

(5)反渗透单元:利用反渗透膜的选择透过性,理论上可截留水中除水分子外的其余物质,从而生产纯水(A1级再生水)。

为了防控膜污堵、维持双膜工艺的稳定运行,各处理单元需要投加大量化学药剂。消毒预处理单元需要投加氯(通常是次氯酸钠)作为消毒剂,微滤单元需要采用次氯酸钠、柠檬酸、氢氧化钠等药剂进行

化学清洗,反渗透单元之前需要投加还原剂(防止反渗透膜氧化损伤)、阻垢剂(防止结垢)、非氧化性抑菌剂(防止生物污堵),反渗透膜需要采用氢氧化钠、柠檬酸等进行化学清洗。

2 反渗透处理工艺运行状况

2.1 处理效果

开发区再生水厂双膜工艺进出水水质见表1。

表1 反渗透工艺进水与产水水质(第三方检测)

水质指标	工艺进水	产水
COD/(mg·L ⁻¹)	15	<4
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	2.3	<0.5
TOC/(mg·L ⁻¹)	5.8	0.3
SS/(mg·L ⁻¹)	<5	<1
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.74	0.25
总氮/(mg·L ⁻¹)	8.37	2.56
总磷/(mg·L ⁻¹)	0.14	<0.01
TDS/(mg·L ⁻¹)	758	97
pH	7.84	7.38
浊度/NTU	<0.5	<0.5
总硬度(以CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	342	18.5
碱度(以CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	206	25.8
游离氯/(mg·L ⁻¹)	1.72	1.44
氟化物/(mg·L ⁻¹)	0.141	<0.006

由表1可知,经过反渗透处理后,产水的总有机碳(TOC)为0.3 mg/L,浊度低于0.5 NTU,TDS为97 mg/L,总硬度为18.5 mg/L(0.185 mmol/L),碱度为25.8 mg/L(0.258 mmol/L),均达到《工业锅炉水质》(GB/T 1576—2018)对锅炉水水质的高标准要求,满足了开发区各企业对工业用水水源的需求。

2.2 工艺运行稳定性

虽然开发区再生水厂的产水水质相对稳定,但反渗透工艺在运行过程中仍然面临较为严重的膜污堵问题。为了维持产水的水量水质稳定,反渗透单元的运行压力随着膜污堵程度的加重而不断升高,且定期需对反渗透膜进行化学清洗,减轻膜污堵的影响,因此系统能耗、药耗较高。除增加运行成本外,频繁的化学清洗也会对反渗透膜造成不可逆的损伤,降低系统的脱盐效率。再生水厂反渗透单元使用的清洗药剂如表2所示。

对再生水厂长期运行后发生严重污堵的反渗透膜进行解剖分析,发现微生物及其代谢分泌产物是

表2 再生水厂反渗透单元清洗药剂使用情况(2020年)

清洗方式	清洗剂主要成分	每次投加量/kg	吨水耗药量/(g·m ⁻³)
碱洗	2% NaOH(质量分数)	472.47	3.29
	1.5% EDTA(质量分数)	12.5	0.087
	0.025% SDBS(质量分数)	0.5	0.003
酸洗	1% HCl(质量分数)	26.56	0.18
	柠檬酸	200	1.39

导致膜污堵的重要原因。为防控生物污堵,再生水厂对反渗透单元的预处理工艺进行了改造,采用氯-紫外线组合消毒工艺替代了原有的氯消毒预处理。主要工艺流程如图2所示。

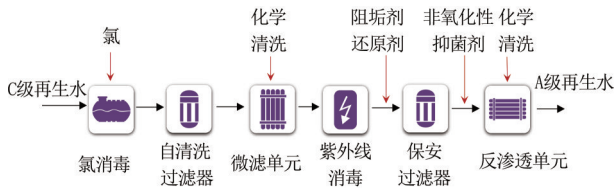


图2 改进后微(超)滤-反渗透工艺

Fig. 2 The modified microfiltration(ultrafiltration)-reverse osmosis process

预处理工艺改造前后,反渗透单元的进水压力变化如图3所示。

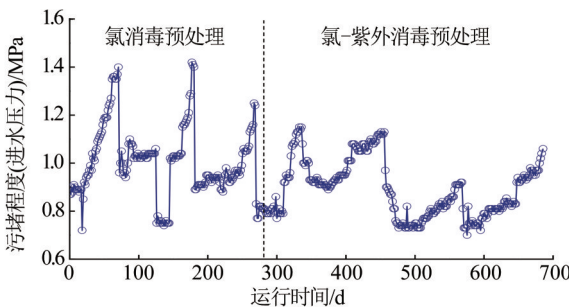


图3 不同消毒预处理工艺对反渗透膜污堵的影响
Fig. 3 Impact of different disinfection pretreatment on the fouling of RO membranes

由图3可知,采用氯消毒预处理时,易出现反渗透单元进水压力急剧升高的现象。在系统运行的第20~70天(50 d内),进水压力由约0.9 MPa升高至1.4 MPa以上,升高比例达55%;第150~180天(30 d内),进水压力由0.78 MPa升高至1.4 MPa以上,升高比例超过60%;第245~265天(20 d内),由约0.9 MPa升高至1.3 MPa,升高比例达44%。这种短时间内运行压力急剧升高的现象,是反渗透膜生物

污堵的显著特征,也表明仅采用氯消毒预处理难以有效控制生物污堵。采用氯-紫外线组合消毒预处理后,运行初期仍然出现了进水压力急剧升高的现象。第308~335天,进水压力由约0.8 MPa上升至1.19 MPa。但在进行化学清洗后(运行压力由较高值突然下跌),系统运行的稳定性显著提高,进水压力的升高速度显著减缓,且最高运行压力再未超过1.2 MPa。同时,化学清洗的间隔周期显著延长。

上述结果表明,对消毒预处理工艺进行改造后,反渗透膜污堵得到了一定程度的控制,工艺运行的稳定性提升。这可能是由于紫外线与氯对细菌细胞的损伤靶点和机制不同,部分在氯消毒后存活的耐氯细菌经过紫外线消毒后被有效灭活,从而控制反渗透膜的生物污堵。

与本研究类似的组合消毒工艺也被应用于生活污水的再生处理。目前,北京市高碑店等再生水厂采用臭氧-紫外线-氯组合消毒工艺,利用不同消毒技术对细菌的杀伤机制不同,可实现对再生水中复杂混合菌群的高效灭活。

3 反渗透处理工艺运行效能分析

图4为预处理单元改造前后反渗透工艺运行效能对比。

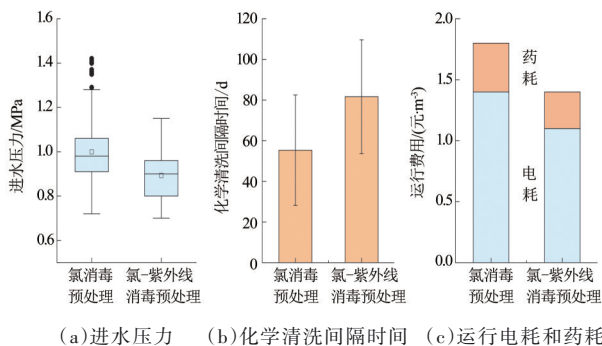


图4 预处理单元改造前后反渗透工艺运行效能对比

Fig. 4 Comparison of the efficiency of RO process before and after pretreatment modification

由图4(a)~(b)可知,工艺改造前,平均进水压力为1.0 MPa,中位数为0.98 MPa,污堵较严重时,最高运行压力可超过1.4 MPa。工艺改造后,平均进水压力和中位数均下降至0.9 MPa,且最高运行压力未超过1.2 MPa。化学清洗周期方面,工艺改造前约1~2个月(平均55 d)需要对反渗透膜进行一次大规

模化学清洗;工艺改造后,约2~3个月(平均81 d)进行一次化学清洗。

采用氯-紫外线消毒预处理后,反渗透膜污堵得到控制,工艺运行的电耗和药耗均有所下降[图4(c)]。采用氯消毒预处理时,再生水厂电耗为1.2~1.4元/m³,药耗为0.3~0.4元/m³;而采用氯-紫外线消毒预处理后,电耗下降至1.1~1.15元/m³,药耗下降至0.2~0.3元/m³。综合考虑电耗和药耗,氯-紫外线消毒预处理使再生水厂的吨水运行成本降低约22%。

4 结论

反渗透膜的生物污堵是再生水反渗透处理工程实践中最难以控制的膜污堵类型之一。通过对北京市经济技术开发区再生水厂的工程案例分析,发现常规的氯消毒预处理无法有效控制生物污堵,系统稳定运行难、能耗药耗高。将消毒预处理改造为氯-紫外线组合消毒后,反渗透膜污堵得到有效控制,再生水反渗透处理工艺的电耗、药耗显著降低。上述工程案例为反渗透膜生物污堵的控制提供了新思路和新视角。

参考文献

- [1] 中国膜工业协会. 2019—2020中国膜产业发展报告[R]. 北京: 中国膜工业协会, 2020.
Membrane Industry Association of China. 2019—2020 development report of membrane industry of China[R]. Beijing: Membrane Industry Association of China, 2020.
- [2] GREENLEE L F, LAWLER D F, FREEMAN B D, et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges[J]. Water Research, 2009, 43: 2317—2348.
- [3] 巫寅虎, 王琦, 童心, 等. 污水再生处理反渗透系统进水膜污堵潜势评价方法及指标体系[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 51—57.
WU Yinhu, WANG Qi, TONG Xin, et al. The evaluation methods and index system of reverse osmosis membrane fouling potential of the influent in wastewater reclamation process: A review[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(3): 51—57.
- [4] T/CSES 10—2020 水回用指南: 再生水分级与标识[S].
T/CSES 10—2020 Guidelines for water reuse: Reclaimed water classification and marking[S].

[作者简介] 李旭(1983—), 高级工程师。E-mail: lixu@bdawater.com。通讯作者: 巫寅虎。E-mail: wuyinhu@mail.tsinghua.edu.cn。

[收稿日期] 2021-12-27(修改稿)