

不同生物污染控制条件下对反渗透污染的控制效果

张子潇, 魏屹, 张宏宇, 李博, 顾鑫
(北京亦庄水务有限公司, 北京 100176)

摘要: 以微滤产水作为源水,建立处理水量为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 的反渗透中试装置,结合预测和表征反渗透生物污染的微生物黏膜形成率(BFR)指标,分析在不同生物污染控制措施下反渗透生物污染的程度及控制效果。结果表明,增加进水余氯浓度和非氧化杀菌剂投加频次后,反渗透系统的污染问题得到了较好的控制,3组试验的反渗透月标准化产水量下降率分别为 23.7%、15.6% 和 8.6%,微生物黏膜形成率分别为 11.37、3.87 和 $0.29 \text{ pg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 。通过分析微生物黏膜形成率与反渗透污染程度的关系可以看出,在较高微生物黏膜形成率条件下,反渗透膜标准化产水量下降趋势较快,反渗透系统污染程度增长明显。微生物黏膜形成率能较好地反映反渗透系统受污染的程度,可以作为预测反渗透生物污染趋势的有效指标。同时药剂成本只增加了 $0.033 \text{ 元}/\text{m}^3$,处理成本增加不大,可以在实际生产中得以应用。

关键词: 反渗透; 生物污染; 微生物黏膜形成率; 标准化产水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0096-04

Control Effect of RO Membrane Fouling under Different Biofouling Control Conditions

ZHANG Zi-xiao, WEI Yi, ZHANG Hong-yu, LI Bo, GU Xin
(Beijing Yizhuang Water Co. Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: A RO pilot plant feeding MF effluent with a treatment capacity of $15 \text{ m}^3/\text{h}$ was established. Combined with the prediction and characterization of the biofilm formation rate (BFR) of RO membrane biofouling, the degree and control effect of RO membrane biofouling under different biofouling control measures were analyzed. The fouling of the RO system was well controlled after increasing the concentration of residual chlorine in water and the frequency of adding non-oxidizing fungicide. The standardized monthly water yield decrease rate of RO was 23.7%, 15.6% and 8.6%, respectively, and the BFR were $11.37 \text{ pg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$, $3.87 \text{ pg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ and $0.29 \text{ pg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$, respectively. By analyzing the relationship between BFR and RO membrane biofouling, it could be found that the standardized water yield of RO declined rapidly, and the fouling of RO membrane increased obviously under the condition of high BFR. BFR could reflect the fouling degree of RO well, and could be used as an effective index to predict the trend of RO biofouling. At the same time, the chemical cost only increased by $0.033 \text{ yuan}/\text{m}^3$ with little increase in treatment cost, indicating that the technology could be applied to actual production.

Key words: RO; biofouling; biofilm formation rate; standardized water yield

随着居民生活水平的不断提高,生活用水和工业用水量不断增加,水资源短缺问题日趋严重。目

前采用膜技术对污水进行深度处理并回用已经成为解决水资源短缺的方法之一,逐渐受到人们的关注。近年来,微滤+反渗透组合工艺在处理污水厂二级出水中得到广泛的应用,微滤系统能有效地去除污水厂二级出水中的胶体和悬浮物,反渗透系统能够有效地进行脱盐,保证了产水水质。但由于膜系统采用市政污水厂出水作为源水,导致在实际运行中膜出现较为严重的污染,致使系统运行不稳定,同时也限制了膜技术在污水回用中的应用。市政污水回用中引起反渗透膜污染的因素有多种,其中生物污染较为突出^[1]。

生物污染具有其特殊性,源水中含有微生物,通常微生物通过凝聚、过滤等作用得以去除,但与无生命的颗粒不同,微生物具有很强的繁殖能力。大多数微生物都以裂殖方式繁殖后代,在合适的环境下,微生物世代时间只有 20 min,即使极少的微生物进入反渗透系统,在适宜的生存条件下就可以形成生物膜。而反渗透系统本身有较大的膜表面积,增加了黏附细菌的可能性,随着运行时间的增加,在膜表面逐渐累积的无机和有机污染物就变成了微生物繁殖的营养源,为微生物提供了丰富的营养,同时阴暗潮湿的反渗透内部环境也为微生物的生长提供了理想的环境^[2]。总之,作为一个特殊的生态环境,反渗透系统为微生物生长提供了温床,必然会导致反渗透系统发生生物污染。生物污染形成于系统的前端,之后扩展至整个系统。由于具有耐药性,使用杀菌剂后生成的生物膜较在自然条件下生成的生物膜更难以控制。

北京市某再生水厂采用微滤+反渗透工艺对污水厂二级出水进行深度处理并回用,设计产水量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在实际运行中反渗透系统出现了进水压力升高、产水量下降、跨膜压差升高现象,污堵情况严重。经前期检测,导致膜性能下降的主要原因为生物污染,为进一步研究如何有效地控制反渗透系统生物污染,并找出有效的生物污染预测指标,笔者建立了反渗透中试装置,研究在不同生物污染控制措施下反渗透生物污染的程度及污染控制效果。

1 试验材料与方法

1.1 反渗透中试装置及其参数

反渗透中试系统模拟现有再生水厂反渗透系统的排列方式,采用一级两段的设置方式,每个膜壳安装 6 支反渗透膜元件,共计安装 18 支 8 英寸(1 英

寸=2.54 cm) 反渗透膜元件。同时在中试系统进水中投加阻垢剂、还原剂和杀菌剂,中试流程如图 1 所示,试验装置如图 2 所示。

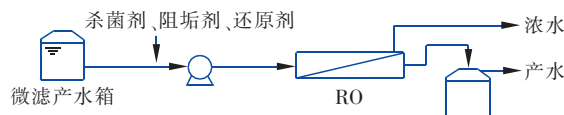


图1 反渗透中试系统工艺流程

Fig.1 Flow chart of RO pilot test



图2 反渗透中试装置

Fig.2 RO pilot device

反渗透中试系统主要参数:膜型号为 TML20-370,有效膜面积为 34 m^2 ,膜元件数量为 18 支,排列方式为 $(2:1) \times 6$,总膜面积为 612 m^2 ,设计运行通量为 $13 \sim 19 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,回收率为 $65\% \sim 75\%$,标准脱盐率为 99.7% 。

1.2 试验方法

结合中试设备的情况,设计了 3 组试验,通过控制微滤产水的余氯浓度和非氧化杀菌剂的投加频率,考察不同污染控制条件下对反渗透系统污染程度的控制情况。同时,分别测试反渗透进水的微生物黏膜形成率(BFR),并与实际反渗透中试运行数据进行对比。3 组试验中系统设定的通量均为 $17 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,进水量均为 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,产水量均为 $10.5 \text{ m}^3/\text{h}$,系统回收率均为 70% 。试验 1、试验 2、试验 3 采用的非氧化杀菌剂的浓度均为 150 mg/L ,使用频次分别为每周 1 次、2 次、2 次,每次投加 1 h;MF 产水的余氯浓度分别为 0.02 、 0.02 和 0.08 mg/L 。

2 结果与讨论

2.1 试验 1

试验 1 系统运行 39 d 后,标准化产水量下降了 30.8% ,标准化压差上升了 33% ,见表 1。通过产水量和压差的变化,说明系统发生了比较严重的生物污染。

对进水保安过滤器进行检查后发现,其中滋生

了大量的红色线虫^[3]。红色线虫一般生活在污水中,通常作为水体不干净的“指示性生物”,通过红色线虫可以预测反渗透系统的生物污染非常严重。

表 1 试验 1 运行数据

Tab. 1 Running data of experiment 1

运行天数/d	RO 回收率/%	RO 产水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	压差增长率/%	脱盐率/%
0	70.7	10.4	100	99.2
39	71.2	7.2	133	99.0

2.2 试验 2

试验 2 系统运行 15 d 后,标准化产水量下降了 7.8%,标准化压差上升了 3%,见表 2。可知,在非氧化杀菌剂投加频率增加的情况下,生物污染得到了一定的控制。

表 2 试验 2 运行数据

Tab. 2 Running data of experiment 2

运行天数/d	RO 回收率/%	RO 产水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	压差增长率/%	脱盐率/%
0	71.2	10.3	100	99.2
15	71.0	9.5	103	99.1

2.3 试验 3

试验 3 系统运行 14 d 后,标准化产水量下降了 4.0%,标准化压差上升不明显,见表 3。可见,在加强了源水杀菌和冲击杀菌的情况下,能够明显提高反渗透系统的运行稳定性,系统的生物污染得到了有效控制。

表 3 试验 3 运行数据

Tab. 3 Running data of experiment 3

运行天数/d	RO 回收率/%	RO 产水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	压差增长率/%	脱盐率/%
0	70.4	10.0	100	99.2
14	70.8	9.6	98	99.1

在不同生物污染控制措施下,试验 1、试验 2 和试验 3 的反渗透月标准化产水量分别下降了 23.7%、15.6% 和 8.6%。提高反渗透进水余氯值和非氧化性杀菌剂投加频次后,试验 3 的月标准化产水量的下降率最小,其次为试验 2,而维持现有生物污染控制措施的试验 1 最差,说明加强反渗透进水和反渗透系统杀菌能有效控制生物污染的发生,提高系统的运行稳定性。

2.4 BFR 与反渗透污染程度的关系

2.4.1 BFR 简介

由于反渗透系统生物污染产生的影响较为严

重^[4],微生物繁殖迅速,影响因素多,难以用数量控制,因此对于预测和表征反渗透膜的生物污染,尚无明确的判断指标。通常针对生物污染的评价指标主要分为两类,表征存在于反渗透进水中的微生物含量和能促进微生物生长繁殖的基质浓度。用于表征反渗透进水中微生物含量的指标包括直接细菌计数法、细菌总数、三磷酸腺苷浓度等。表征反渗透进水中能促进微生物生长繁殖的基质浓度的指标主要有 BFR 和可同化有机碳。目前大多数采用 BFR 来预测反渗透膜生物污染的趋势,BFR 指标能够较好地反映各种影响因素条件下的生物膜形成速率。

2.4.2 BFR 的测定方法

在 BFR 测定过程中,采用在线微生物检测器,控制流速为 0.2 m/s 左右,测试装置如图 3 所示。反渗透系统通水一段时间后,取圆环测试其累积的活性生物体的浓度(以 ATP 来表征),浓度越高表示生物污染趋势越明显。

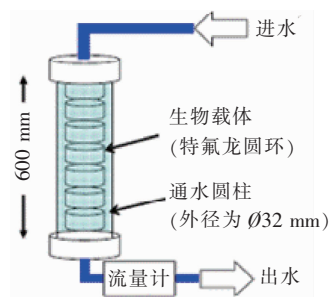


图 3 BFR 测试装置示意

Fig. 3 Schematic diagram of BFR test device

生物检测器安装在 RO 系统前面,通过检测不同试验条件下的 BFR 值来评价反渗透系统污染的程度及控制效果。

2.4.3 BFR 与反渗透污染程度的关系

在不同生物污染控制措施下,分别测试了反渗透进水的 BFR 值,当试验 1、试验 2 和试验 3 的 BFR 值分别为 11.37、3.87 和 0.29 $\text{pg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 时,对应的反渗透系统月标准化产水量的下降率分别为 23.7%、15.6% 和 8.6%。可见,BFR 值与反渗透系统污染程度的变化趋势一致,当 BFR 值较高时,反渗透膜标准化产水量下降趋势较快,膜污染增长明显;当 BFR 值较低时,反渗透膜标准化产水量下降趋势明显减缓,系统运行稳定。

BFR 值能够反映反渗透系统受污染的程度,能较好地预测反渗透系统生物污染发生的趋势和程

度,同时 BFR 也能较好地反映在不同生物污染控制条件下,反渗透系统的杀菌效果,可用于评价反渗透进水预处理杀菌措施的有效性。

2.5 药剂投加的经济性分析

尽管提高反渗透进水余氯浓度和非氧化杀菌剂投加频次能够有效抑制生物污染,控制 BFR 值的增加,但会增加药剂成本,如成本增加过高将影响实际

使用的可行性。本试验中,两种药剂在不同浓度和投加频次下的成本情况见表 4。经计算,试验 1、试验 2 和试验 3 的药剂成本分别为 0.032 4、0.064 4 和 0.065 4 元/m³。可见,试验 3 的药剂成本比试验 1 增加了 0.033 元/m³。虽然药剂投加成本有所增加,但相对于整个污水回用系统的运行成本,其所占的比例较小,对单位处理成本影响不大。

表 4 药剂投加成本对比

Tab.4 Comparison of chemical cost

项 目	投加量/ (mg · L ⁻¹)	频次	消耗量/ (kg · 月 ⁻¹)	单价/ (元 · kg ⁻¹)	费用/ (元 · 月 ⁻¹)	成本/ (元 · m ⁻³)
非氧化 杀菌剂	150	1 次/周,1 h/次	9.6	25	240	0.032
	150	2 次/周,1 h/次	19.2	25	480	0.064
NaClO (8%)	0.02	连续	2.7	1	2.7	0.000 4
	0.08	连续	10.8	1	10.8	0.001 4

3 结论

反渗透中试系统的运行通量为 17 L/(m² · h),当非氧化杀菌剂每周投加 2 次、进水余氯浓度达到 0.08 mg/L 时,反渗透月标准化产水量下降率由 23.7%降低至 8.6%,BFR 值由 11.37 pg/(cm² · d)下降至 0.29 pg/(cm² · d),提高反渗透进水余氯浓度和非氧化杀菌剂投加频次能够有效控制反渗透系统生物污染的发生。在较高的 BFR 条件下,反渗透膜标准化产水量下降趋势较快,而在较低的 BFR 条件下,反渗透膜标准化产水量下降趋势明显变低,BFR 指标能较好地反映反渗透系统受污染的程度,可以作为预测反渗透生物污染趋势的有效指标。同时药剂成本只增加了 0.033 元/m³,生产成本增加不大,可以在实际生产中应用。

参考文献:

[1] 李福勤,王宏伟,杨久坡,等. 反渗透膜微生物污染特性及影响因素研究[J]. 工业用水与废水,2008,39(2):69-71.
Li Fuqin, Wang Hongwei, Yang Jiupo, et al. Characeristics of microbial contamination of reverse osmosis membrane and impact factors thereof [J]. Industrial Water & Wastewater,2008,39(2):69-71 (in Chinese).

[2] Khan M T, Busch M, Molina V G, et al. How different is the composition of the fouling layer of wastewater reuse

and seawater desalination RO membranes [J]. Water Res,2014,59:271-282.

[3] 张子潇. 市政污水回用中反渗透进水滤芯污染分析[J]. 北京水务,2014(6):38-40.
Zhang Zixiao. Pollution analysis of RO inlet filter in wastewater reuse[J]. Beijing Water,2014(6):38-40 (in Chinese).

[4] Raffin M, Germain E, Judd S. Assessment of fouling of an RO process dedicated to indirect potable reuse [J]. Desalination & Water Treatment,2012,40(1/3):302-308.



作者简介:张子潇(1983-),男,北京人,硕士,给排水高级工程师,主要研究方向为污水、再生水处理及利用。
E-mail:zixiaochinese@163.com
收稿日期:2019-06-22