

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.007

基于微气泡阻垢的纳滤制备直饮水工艺优化

孙宇¹, 王永磊¹, 沈虎², 刘宝震¹, 于海洋³, 安呈泰⁴,
聂荣飞⁵, 李晓峰¹

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 济南市市政工程设计院
<集团>有限责任公司, 山东 济南 250003; 3. 山东海邦水务科技有限公司, 山东 济南
250013; 4. 山东建筑大学设计集团有限公司, 山东 济南 250013; 5. 山东省丝路投资发
展有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 针对纳滤工艺制备高品质直饮水技术存在的工艺参数复杂、膜污染等突出问题,引入了微气泡阻垢的方法对该技术进行参数优化和中试验证。结果表明,最优工况的进水pH为7.34、进水压力为0.50 MPa、回收率为13.501%。在中试过程中,纳滤技术对电导率与浊度的去除率分别达到80%和50%以上,对TOC和UV₂₅₄的去除率分别为67%~71%、75%~81%,对二价离子的去除率在94%以上。同时微气泡的阻垢作用可以减少纳滤膜的清洗频率,有利于维持纳滤膜的完整性并延长膜的使用寿命,降低管道直饮水处理成本。

关键词: 纳滤膜; 直饮水; 微气泡; 运行优化; 阻垢作用

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0043-07

Optimization of Nanofiltration for Preparation of Direct Drinking Water Based on Microbubble Scale Inhibition

SUN Yu¹, WANG Yong-lei¹, SHEN Hu², LIU Bao-zhen¹, YU Hai-yang³,
AN Cheng-tai⁴, NIE Rong-fei⁵, LI Xiao-feng¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Jinan Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Jinan 250003, China; 3. Shandong Haibang Water Technology Co. Ltd., Jinan 250013, China; 4. Shandong Jianzhu University Design Group Co. Ltd., Jinan 250013, China; 5. Shandong Silk Road Investment and Development Co. Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: In light of the significant challenges associated with nanofiltration for producing high-quality direct drinking water, such as complex process parameters and membrane fouling, this study introduced the microbubble scale inhibition method to optimize the technological parameters and carried out a pilot test. The optimal operating conditions were as follows: the influent pH was 7.34, the influent pressure was 0.50 MPa, and the recovery rate was 13.501%. The pilot test results indicated that the nanofiltration achieved removal efficiencies exceeding 80% for conductivity and 50% for turbidity. The removal efficiencies for TOC and UV₂₅₄ were in the ranges of 67% to 71% and 75% to 81%, respectively.

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023TZXD019); 国家重点研发计划项目(2022YFC3203704、2022YFC3203705)
通信作者: 王永磊 E-mail: wyl1016@sdjzu.edu.cn; 李晓峰 E-mail: lixiaofeng1@sdjzu.edu.cn

Additionally, the rejection rate for bivalent ions surpassed 94%. Simultaneously, the scale inhibition effect of microbubbles could decrease the cleaning frequency of nanofiltration membranes, thereby preserving their integrity, extending their service life, and reducing the operational costs associated with pipeline direct drinking water treatment.

Key words: nanofiltration membrane; direct drinking water; microbubble; operation optimization; scale inhibition effect

随着经济社会的发展,高品质直饮水成为许多新建小区、公共建筑的标准配置^[1-2]。纳滤作为高效、无害的深度处理工艺,目前已被广泛用于制备直饮水。相较于常规净水工艺,纳滤在有效去除硬度和无机盐的同时可以保留钙、镁等对人体有益的矿物离子,提升出水口感,有利于居民长期饮用^[3-5]。然而纳滤膜污染和运行参数差异会造成产水率低、运行维护成本高,制约了纳滤制备直饮水技术的应用与推广^[6]。因此,如何优化运行参数和减缓膜污染对提升纳滤制备直饮水效率具有重要意义。

近年来,微气泡在饮用水处理方面受到了广泛关注^[7-8],其具有尺寸小、传质效率高、可以黏附絮体污染物等特点,与预处理阻垢和添加阻垢剂阻垢等常规控制膜污染方法相比,可以有效延缓膜污染,且不会对膜表面及水质产生影响^[9-11]。但由于微气泡单独运行时费用高,因此提出其与纳滤工艺联合使用,同时补充缺乏的相关工艺参数。

笔者在纳滤膜制备直饮水工艺体系中通入微气泡,探究污染物去除的最优运行参数,并利用中试验证系统运行和微气泡膜污染控制策略的效能,旨在为缓解纳滤膜污染及纳滤高效制备高品质直饮水的工程应用提供技术支撑。

1 材料与方法

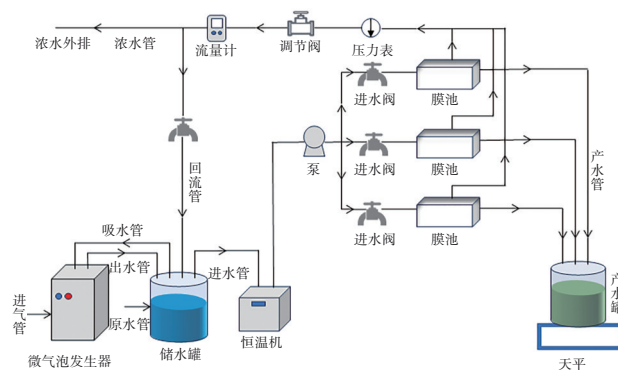
1.1 试验水质

试验用水共两种,其中纳滤工艺运行优化试验采用小区管网出水,中试采用水厂管网出水。其中,运行优化试验进水的总硬度为276~283 mg/L, pH为6.9~8.1,电导率为270~279 $\mu\text{S}/\text{cm}$,浊度为0.16~0.32 NTU,溶解性总固体(TDS)为331~375 mg/L,总碱度为94~117 mg/L, UV_{254} 为0.020~0.030 cm^{-1} , TOC为1.0~1.4 mg/L,余氯(游离氯)为0.16~0.31 mg/L;运行优化试验出水的总硬度为15~16 mg/L, pH为7.1~8.3,电导率为25.60~26.45 $\mu\text{S}/\text{cm}$,浊度为0.09~0.18 NTU,溶解性总固体为22~25

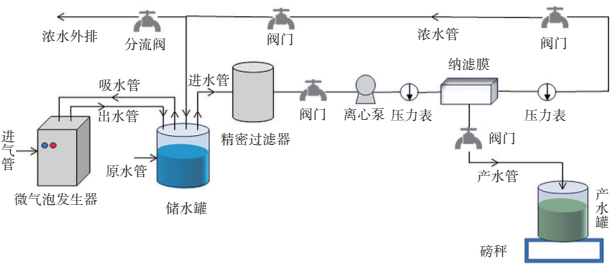
mg/L,总碱度为14~17 mg/L, UV_{254} 为0.004~0.007 cm^{-1} , TOC为0.32~0.39 mg/L,余氯(游离氯)<0.01 mg/L。中试进水的总硬度为273~284 mg/L, pH为7.2~7.9,电导率为293~312 $\mu\text{S}/\text{cm}$,浊度为0.24~0.31 NTU,溶解性总固体为357~416 mg/L,总碱度为103~116 mg/L, UV_{254} 为0.037~0.046 cm^{-1} , TOC为1.03~1.44 mg/L,余氯(游离氯)为0.21~0.34 mg/L;中试出水的总硬度为11~17 mg/L, pH为7.4~8.1,电导率为40.16~63.92 $\mu\text{S}/\text{cm}$,浊度为0.15~0.20 NTU,溶解性总固体为23~28 mg/L,总碱度为16~21 mg/L, UV_{254} 为0.007~0.010 cm^{-1} , TOC为0.31~0.46 mg/L,余氯(游离氯)<0.01 mg/L。

1.2 试验装置

本研究构建了两种不同的工艺流程,工艺参数优化试验在实验室规模下进行,为保证该工艺在实际应用过程中运行的稳定性,又在此基础上进行了中试验证。工艺参数优化试验装置见图1(a),其主要由采用3个膜池并联的平板膜试验设备、微气泡发生器和100 L储水罐组成,膜型号为陶氏NF90,微气泡发生器所产微气泡的尺寸为0.1~200 μm ,其中0.5~100 μm 的含量为82.49%。同时微气泡对游离氯有较好的去除作用^[12],通入微气泡后水中的游离氯可稳定在0.05 mg/L以下,有效避免了水中游离氯对纳滤膜的潜在损害。



a. 参数优化试验装置



b. 中试装置

图1 试验装置流程

Fig.1 Flow chart of test device

搭建的中试装置如图1(b)所示,主要由型号为NF90-4040的聚酰胺纳滤膜组件和微气泡发生器组成,在进入纳滤前设有精密过滤器进行预处理。其中精密过滤器的过滤精度为10 μm,由于精度较小,滤芯对微气泡粒径分布的影响较小,因此纳滤膜进水的微气泡尺寸为0.1~270 μm。

1.3 试验设计

工艺参数优化试验采用响应曲面法,利用Design Expert 8.0 软件,采用中心组合试验设计(BBD)方法,通过控制进水pH、压力和回收率三个因素,定时取样进行检测,探究纳滤工艺对脱盐率和膜通量的影响,探究和验证最优试验工况,中试采用响应曲面试验所确定的最优条件进行。

1.4 检测指标及方法

TDS、浊度、pH 等指标按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行检测;水中阴离子和阳离子浓度采用离子色谱法测定;总有机碳浓度使用TOC-Ve (日本岛津)分析仪检测;水中总硬度采用EDTA 滴定法测定;总碱度采用酸碱指示剂滴定法测定;跨膜压差(TMP)由纳滤装置上的压力表直接读数记录。

2 结果与讨论

2.1 耦合工艺参数优化

2.1.1 响应曲面试验设计

试验采用三因素三水平BBD设计,分析了pH(A)、压力(B)和回收率(C)三个因素对纳滤工艺脱盐率(Y_1)和膜通量(Y_2)的影响。其中回收率的选择受处理水量及水质需求的影响,由于中试装置的处理水量仅为0.25 m³/h,规模较小,为达到更好的试验效果,采用较低的回收率进行试验,见表1。确定了15组试验,测定每组试验后的脱盐率和膜通量,结果见表2。

表1 响应曲面分析因素及水平

Tab.1 Factors and levels of response surface analysis

因素	水平		
	-1	0	1
A	6	7	8
B/MPa	0.40	0.45	0.50
C/%	10	20	30

表2 响应曲面分析方案及结果

Tab.2 Scheme and results of response surface analysis

编号	A	B/MPa	C/%	$Y_1/\%$	$Y_2/(\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$
1	6	0.40	20	93.21	26.01
2	8	0.40	20	93.61	26.17
3	6	0.50	20	96.17	27.31
4	8	0.50	20	96.94	27.63
5	6	0.45	10	97.33	25.94
6	8	0.45	10	97.96	26.23
7	6	0.45	30	94.46	26.14
8	8	0.45	30	94.98	26.27
9	7	0.40	10	96.73	25.99
10	7	0.50	10	97.82	27.44
11	7	0.40	30	94.11	25.73
12	7	0.50	30	95.83	27.28
13	7	0.45	20	97.17	26.47
14	7	0.45	20	96.83	26.73
15	7	0.45	20	97.31	26.52

2.1.2 回归模型分析

对表2中显示的响应值和各因素进行深入分析,采用推导出的二次多项式回归方程评估pH、压力和回收率对脱盐率和膜通量的影响。

$$Y_1 = -42.645 + 13.938A + 39.605B - 0.297C + 0.185AB - 0.003AC + 0.032BC - 1.030A^2 - 4.362B^2 + 0.001C^2 \tag{1}$$

$$Y_2 = 41.438 + 1.641A - 11.310B + 0.123C + 0.080AB - 0.004AC + 0.005BC - 0.129A^2 + 1.343B^2 - 0.003C^2 \tag{2}$$

根据上述公式进行回归模型方差分析,模型的显著性和失拟项见表3。可以看出,脱盐率模型显著,其P值为0.0104。此外,自变量B、C、A²和B²为模型的显著项。失拟项不显著,P值为0.0983,表明该模型可靠且不受失拟的影响。膜通量模型具有统计显著性,其P值为0.0009。自变量B²和C²为模型的显著项,B为极显著项。失拟项不显著,P值为0.5119,进一步确定了模型的可靠性。因此可用回归方程代替其他试验点进行预测分析。

表 3 回归模型方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression model

项 目	平方和		均方		F 值		P 值	
	脱盐率	膜通量	脱盐率	膜通量	脱盐率	膜通量	脱盐率	膜通量
模型	32.81	5.14	3.65	0.571 3	9.97	28.52	0.010 4	0.000 9
A	0.672 8	0.101 2	0.672 8	0.101 2	1.84	5.05	0.232 9	0.074 5
B	10.35	4.15	10.35	4.15	28.31	207.01	0.003 1	<0.000 1
C	13.68	0.004 1	13.68	0.004 1	37.41	0.202 2	0.001 7	0.671 8
AB	0.034 2	0.006 4	0.034 2	0.006 4	0.093 6	0.319 5	0.772 0	0.596 3
AC	0.003 0	0.006 4	0.003 0	0.006 4	0.008 3	0.319 5	0.931 1	0.596 3
BC	0.099 2	0.002 5	0.099 2	0.002 5	0.271 4	0.124 8	0.624 6	0.738 3
A ²	3.92	0.061 6	3.92	0.061 6	10.72	3.08	0.022 1	0.139 9
B ²	4.39	0.416 4	4.39	0.416 4	12.0 1	20.79	0.017 9	0.006 1
C ²	0.044 3	0.330 5	0.044 3	0.330 5	0.121 3	16.50	0.741 8	0.009 7
残差	1.83	0.100 2	0.365 6	0.020 0				
失拟项	1.71	0.062 1	0.568 7	0.020 7	9.33	1.09	0.098 3	0.511 9
纯误差	0.121 9	0.038 1	0.060 9	0.019 0				
总变异	34.64	5.24						

注: $P \leq 0.000 1$ 为高度显著; $P \leq 0.05$ 为显著; $P > 0.05$ 为不显著。

2.1.3 响应曲面分析

通过等高线和三维响应曲面将预测模型方程的结果进行可视化^[13],并以此来判断运行工况对脱盐率影响的显著程度。在本研究中,各因素对脱盐率影响的等高线和响应曲面如图 2 所示。由图 2(a)和(b)可以看出,pH 和进水压力的等高线呈椭圆状,表明 pH 与进水压力之间存在密切的相互作用。脱盐率随着进水压力的增加而增大,且随着 pH 的增加其变化幅度较进水压力的小,表明进水压力对脱盐率的影响大于 pH。

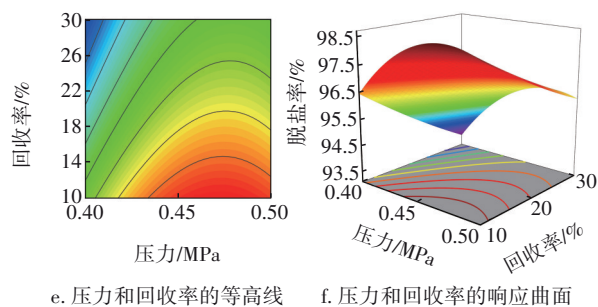
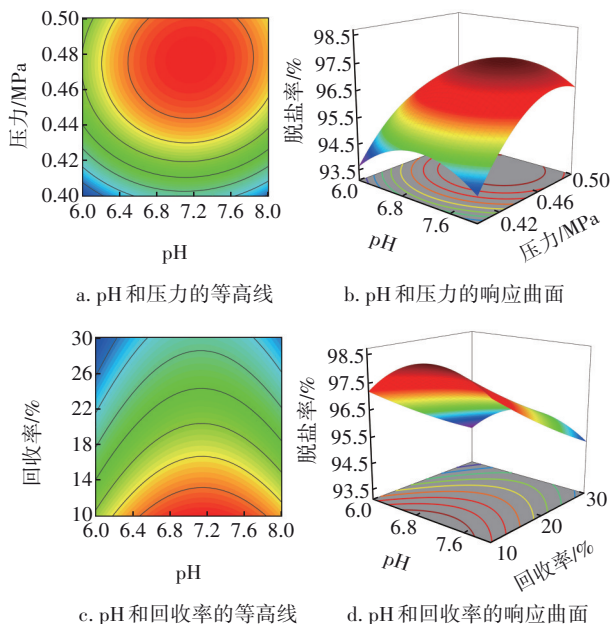
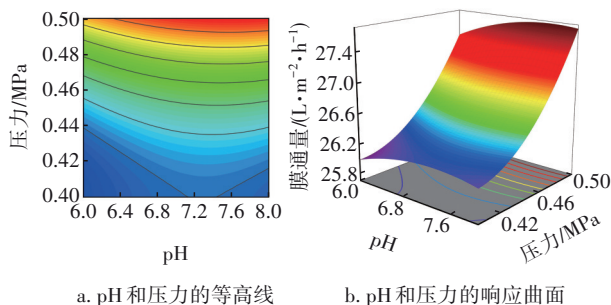


图 2 各因素对脱盐率影响的等高线和响应曲面

Fig.2 Contour plots and response surfaces of influence of various factors on desalting rate

从图 2(c)~(f)可以看出,pH 和回收率及压力和回收率的等高线呈纺锤状,表明 pH 和压力与回收率之间存在相互作用,且脱盐率随回收率增加的趋势较随 pH 及压力增加的大,表明回收率对脱盐率的影响大于 pH 和压力。因此,对脱盐率影响的显著程度为:回收率>压力>pH。

同时还分析了运行工况对膜通量影响的显著程度,结果如图 3 所示。



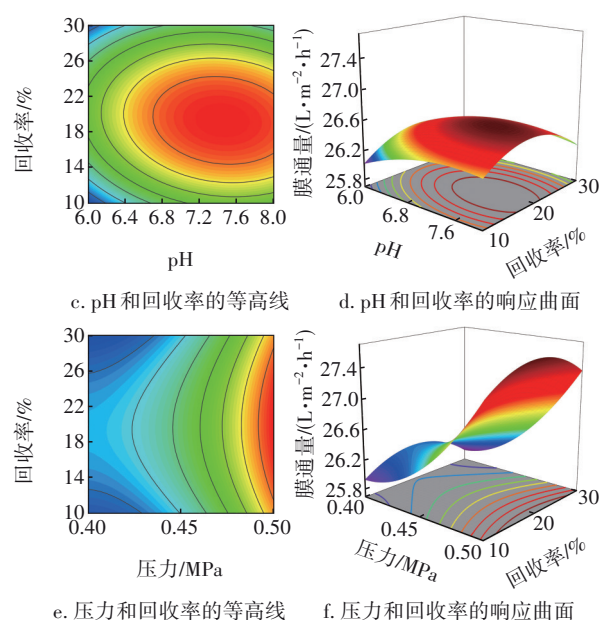


图3 各因素对膜通量影响的等高线和响应曲面

Fig.3 Contour plots and response surfaces of influence of various factors on membrane flux

由图3(a)、(b)、(e)、(f)可知,其等高线呈纺锤状,表明pH和回收率与进水压力之间存在相互作用。且膜通量随进水压力增加的变化幅度较随pH及回收率增加的大,表明压力对膜通量的影响大于回收率和pH。由图3(c)和(d)可知,等高线呈椭圆状,表明pH与回收率之间存在密切的相互作用。膜通量随回收率增加的变化幅度较随pH增加的大,说明回收率对膜通量的影响大于pH。因此,对膜通量影响的显著程度为:压力>回收率>pH。

2.1.4 最优工况与模型验证

研究发现,随着回收率的升高,膜通量和脱盐率均下降,这与其他文献^[14]报道一致。由于中试装置处理水量小,为缓解膜污染并保证出水水质稳定达标,确定最优工况如下:pH为7.34、进水压力为0.50 MPa、回收率为13.501%。在此条件下进行3次试验,取平均值得到脱盐率的真实值为97.516%、预测值为97.960%,膜通量的真实值为27.316 L/(m²·h)、预测值为27.547 L/(m²·h)。实际脱盐率与预测值的相对误差小于0.7%,实际膜通量与预测值的相对误差小于0.9%,模型较为可靠。

使用最优工况进行了纳滤工艺生产管道直饮水效能与膜污染分析,结果显示纳滤对电导率和浊度的去除率分别为90.52%和44.20%;对Ca²⁺、Mg²⁺和SO₄²⁻等二价离子的去除率稳定在90%以上,对

Na⁺、Cl⁻的去除率稳定在85%以上;对TOC和UV₂₅₄的去除率分别为69.1%~74.6%和78%~82%,出水水质可以满足《健康直饮水水质标准》(T/BJWA 01—2021)。在运行的28 d中,膜通量降低了5.08 L/(m²·h),跨膜压差在0.49 MPa左右,变化幅度较小。扫描电子显微镜(SEM)分析结果表明,膜污染程度较轻,且主要为无机结垢,有机物较少。

2.2 纳滤耦合微气泡工艺生产直饮水中试分析

本试验主要通过监控跨膜压差和膜通量的变化来判断纳滤工艺的稳定性。在装置运行前使用超纯水稳定设备12 h,然后接入微气泡发生器继续运行12 h,测定膜的初始通量和通入微气泡后的通量。通入微气泡前的初始膜通量为27.13 L/(m²·h),通入微气泡后为27.46 L/(m²·h),比膜通量为1.012,说明由于微气泡的通入,初始通量有所上升^[15]。

图4为比膜通量和跨膜压差的变化。可知,随着运行时间的延长,纳滤膜的比膜通量逐渐下降,并在60 d后下降速度趋于稳定,至运行结束前,比膜通量下降至0.79,膜通量下降至21.49 L/(m²·h),减少的膜通量为5.97 L/(m²·h)。可见,微气泡的通入导致膜通量下降的速度减缓,阻垢效果较好。而跨膜压差随着装置的运行逐渐增大,由初始的452.89 kPa增至469.33 kPa,增长速度较慢,说明膜表面的污染物堆积速度缓慢,膜污染较轻,这与微气泡不断通入起到的阻垢作用有关^[16]。

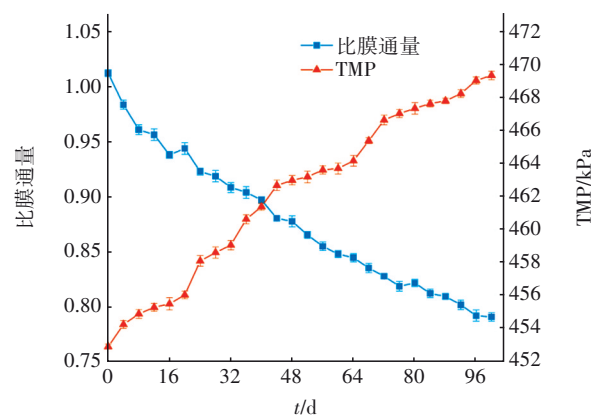


图4 比膜通量和跨膜压差的变化

Fig.4 Change in specific membrane flux and TMP

2.3 中试除污效能分析

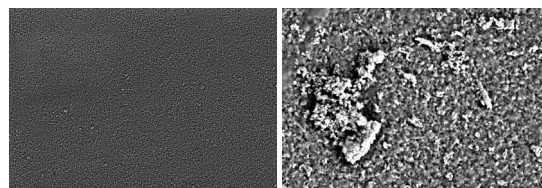
在连续运行的100 d中,经纳滤处理后出水电导率不超过70 μS/cm,与进水相比降低了80%左右,去除效果稳定。同时出水浊度稳定在0.2 NTU以下,去除率达到50%以上。微纳米溶气水回流至

进水罐,虽然混合了罐内水流使得进水浊度出现小幅波动,但是对出水浊度的影响不大,表明该耦合工艺能有效去除水中浊度,应对水质波动。进水TOC浓度为1.03~1.44 mg/L,出水为0.31~0.46 mg/L,纳滤工艺对TOC的去除率为67%~71%;进水 UV_{254} 为0.037~0.046 cm^{-1} ,出水为0.007~0.010 cm^{-1} ,对 UV_{254} 的去除率为75%~81%。可见,中试规模的纳滤耦合微气泡工艺能够有效去除有机物。而TOC去除率低的原因是进水TOC浓度较低。耦合工艺对二价离子的去除率较高,如对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的去除率分别为96.31%、94.03%、96.81%,均在94%以上,而对于一价离子的去除率较低,对 K^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 F^- 的去除率分别为74.17%、76.39%、74.43%、79.24%,均低于80%。同时,对 Na^+ 、 Cl^- 的去除率分别为86.11%、88.46%,也未达到很好的去除效果。这主要与纳滤膜能有效截留200 u以上组分有关,同时也与其具有可选择性截留二价及以上的离子并可使大部分对人体有益的低价盐离子通过的特性有关。微气泡带来的阻垢效果导致纳滤对无机盐中各离子的去除效果保持了稳定状态,在延缓膜污染的同时也能保证出水水质稳定达标。

2.4 膜污染控制效果分析

采用SEM对连续运行100 d后的纳滤膜进行检测分析,结果如图5所示。可以看出,运行100 d后,膜表面存在较大尺寸且有一定厚度的颗粒沉积物,但总体上看,颗粒沉积物的平均尺寸不大,且未发现明显凹凸不平的片状物质,说明膜表面污染较轻。同时未发现覆盖膜表面的生物膜,表明微气泡的通入能够有效降低有机膜污染与生物膜污染^[17]。大颗粒沉积物表面附着的颗粒沉积物尺寸较小且结垢松散,结垢现象不明显,同时膜表面的孔隙堵塞程度较低,说明在不添加任何化学剂的情况下,微气泡可有效控制膜表面的无机结垢。研究表明,微气泡的带电特性使其在界面吸引反离子从而抑制膜表面结晶,并且微气泡在坍塌过程中会产生羟基自由基等活性氧类物质^[18],积聚在膜表面的污垢可通过活性氧的氧化作用及水力冲刷等方式实现减少或去除^[19]。因此可以采用微气泡控制膜污染,以代替化学阻垢剂达到阻垢的效果,从而减少纳滤膜清洗频率。能量色散谱仪(EDS)分析结果表明,膜表面的主要元素为C和O,占90%以上,大多数是纳滤膜表面的聚酰胺层及无机结垢组分中碳酸盐

的组成成分,表明纳滤膜结垢中以无机垢为主。微气泡的阻垢作用可以减少纳滤膜的清洗频率从而降低对膜表面的不利影响,延长膜的使用寿命,进而降低运行维护成本。



a. 原始膜

b. 运行100 d的膜

图5 纳滤膜表面的SEM照片

Fig.5 SEM images of nanofiltration membrane surface

3 结论

① 基于BBD中心组合试验优化纳滤耦合微气泡阻垢工艺运行参数,确定最佳运行参数如下:pH为7.34、进水压力为0.50 MPa、回收率为13.501%,最优参数下耦合工艺能有效去除电导率、浊度、无机盐离子、TOC和 UV_{254} 等,去除率分别为90.52%、44.20%、85%以上、69.1%~74.6%和78%~82%。

② 中试规模耦合工艺连续运行100 d后,对电导率和浊度的去除率分别达到80%和50%以上,对TOC和 UV_{254} 的去除效率分别为67%~71%和75%~81%,对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等二价离子的去除率均在94%以上,对一价离子的去除率较低。

③ 通过SEM对纳滤膜进行表征发现,膜表面有大尺寸颗粒沉积物,但这些颗粒沉积物上的附着物较小且结垢松散,表明膜表面的无机污染较轻。同时没有发现明显的有机膜污染和生物膜污染。

④ 微气泡的通入可以控制膜污染,延长膜的使用寿命,具有一定工程应用价值。后续可以继续扩大装置规模,使其更加贴合实际生产。

参考文献:

- [1] 吕石磊,曾捷. 健康建筑的主要水质保障技术[J]. 科学通报, 2020, 65(4): 256~262.
LÜ Shilei, ZENG Jie. Main water quality safeguard of healthy building [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(4): 256~262 (in Chinese).
- [2] 赵珍仪,高峰,郑军朝. 基于可直饮目标的城市二次供水改造经验探讨[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 129~133.

- ZHAO Zhenyi, GAO Feng, ZHENG Junzhao. Discussion on urban secondary water supply reconstruction experience based on the goal of fine drinking water [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 129-133(in Chinese).
- [3] FUJIOKA T, NOG M T T, MAKABE R, *et al.* Submerged nanofiltration without pre-treatment for direct advanced drinking water treatment [J]. *Chemosphere*, 2021, 265:129056.
- [4] 敬双怡,刘杨,张列宇,等. 纳滤膜在直饮水终端系统中的应用[J]. *水处理技术*, 2016, 42(10): 117-120. JING Shuangyi, LIU Yang, ZHANG Lieyu, *et al.* Study on NF membrane for using on direct drinking water terminal system [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(10): 117-120(in Chinese).
- [5] COORAY T, WEI Y S, ZHANG J Y, *et al.* Drinking-water supply for CKDu affected areas of Sri Lanka, using nanofiltration membrane technology: from laboratory to practice[J]. *Water*, 2019, 11(12): 2512.
- [6] 魏永,吴宏. 纳滤处理太湖水的膜污染中试研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(7): 66-70. WEI Yong, WU Hong. A pilot study on membrane fouling in the treatment of Taihu Lake water by nanofiltration[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(7): 66-70(in Chinese).
- [7] BATAGODA J H, HEWAGE S D A, MEEGODA J N. Nano-ozone bubbles for drinking water treatment [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2019, 14(2): 57-66.
- [8] REUTER F, LAUTERBORN S, METTIN R, *et al.* Membrane cleaning with ultrasonically driven bubbles [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 37:542-560.
- [9] GHADIMKHANI A, ZHANG W, MARHABA T. Ceramic membrane defouling (cleaning) by air nano bubbles[J]. *Chemosphere*, 2016, 146:379-384.
- [10] 黄林. 膜前预处理工艺对缓解纳滤膜污染的研究 [D]. 南昌:华东交通大学, 2022. HUANG Lin. Study on Membrane Pretreatment Process to Mitigate Nanofiltration Membrane Contamination [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022 (in Chinese).
- [11] SPITSOV D, AUNG H Z, PERVOV A. The selection of efficient antiscalant for RO facility, control of its quality and evaluation of the economical efficiency of its application[J]. *Membranes*, 2023, 13(1): 85.
- [12] PETROULA S, NICOLAS K. Disinfection applications of ozone micro- and nanobubbles [J]. *Environmental Science*, 2021, 8(12): 3493-3510.
- [13] 许斐. 纳滤处理复合硬度水工艺优化及中试研究 [D]. 济南:山东建筑大学, 2019. XU Fei. Optimization and Pilot-scale Study of Nanofiltration Process for Treatment of Composite Hardness Water [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019(in Chinese).
- [14] 朱学武,成小翔,谢柏明,等. 超滤/纳滤组合工艺的运行与优化研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(5): 10-15,21. ZHU Xuwu, CHENG Xiaoxiang, XIE Baiming, *et al.* Operation and optimization of ultrafiltration/nanofiltration hybrid membrane process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(5): 10-15, 21 (in Chinese).
- [15] DAYARATHNE H N P, JEONG S, JANG A. Chemical-free scale inhibition method for seawater reverse osmosis membrane process: air micro-nano bubbles[J]. *Desalination*, 2019, 461:1-9.
- [16] DAYARATHNE H N P, CHOI J, JANG A. Enhancement of cleaning-in-place (CIP) of a reverse osmosis desalination process with air micro-nano bubbles [J]. *Desalination*, 2017, 422:1-4.
- [17] JANE K. Biofouling of polyamide membranes: fouling mechanisms, current mitigation and cleaning strategies, and future prospects [J]. *Membranes*, 2019, 9(9): 111.
- [18] LIU S, OSHITA S, KAWABATA S, *et al.* Identification of ROS produced by nanobubbles and their positive and negative effects on vegetable seed germination [J]. *Langmuir*, 2016, 32(43): 11295-11302.
- [19] AHMED K A A, SUN C Z, LIKUN H, *et al.* Colloidal properties of air, oxygen, and nitrogen nanobubbles in water: effects of ionic strength, natural organic matters, and surfactants [J]. *Environmental Engineering Science*, 2018, 35(7):720-727.

作者简介:孙宇(2000-),女,山东济南人,硕士研究生,研究方向为饮用水处理理论与技术。

E-mail:1942779213@qq.com

收稿日期:2023-11-07

修回日期:2024-02-20

(编辑:任莹莹)