

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.011

给水深度处理中纳滤膜的关键污染因子研究

郭莎莎, 谢鹏, 李天玉, 尹立娜, 唐娜, 范闯磊
(北京华特源科技有限公司, 北京 101407)

摘要: 采用超低压纳滤膜对长江流域某自来水厂沉淀池出水进行深度处理中试,通过分析膜面污染物类型、膜污染阻力、动态膜污染过程等,采用SPSS软件对纳滤膜多周期运行数据与进水水质进行统计学相关性分析,得出纳滤膜运行过程的关键污染因子为铝以及钙、铝与有机物的复合物。铝因膜表面的负电性而极易吸附其上,并作为污染诱导因子与有机物、硅、钙形成络合架桥作用,导致纳滤膜的快速污染。铝主要来源于混凝工艺段的絮凝剂残留,调整进水pH在6.5~7.0范围可有效降低纳滤进水中的铝浓度。根据纳滤膜污染曲线分析和中试验证,当进水中铝浓度低于50 $\mu\text{g/L}$ 时,纳滤膜运行周期比进水中铝浓度为100~150 $\mu\text{g/L}$ 时延长1倍。

关键词: 纳滤膜; 铝; 关键污染因子; 絮凝剂残留

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0077-06

Investigation of Key Fouling Factors Affecting Nanofiltration Membranes in Advanced Water Treatment

GUO Sha-sha, XIE Peng, LI Tian-yu, YIN Li-na, TANG Na, FAN Chuang-lei
(Beijing Huateyuan Technology Co. Ltd., Beijing 101407, China)

Abstract: A pilot-scale study was conducted to evaluate the advanced treatment of effluent from a sedimentation tank at a water treatment plant in the Yangtze River Basin using ultra-low pressure nanofiltration (NF) membranes. The investigation focused on analyzing membrane surface foulants, membrane fouling resistance, and dynamic fouling behavior. Furthermore, a statistical correlation analysis was performed between multi-cycle NF membrane operation data and influent quality parameters using SPSS software. The results indicated that the key fouling factors during NF membrane operation were aluminum species and complexes composed of calcium, aluminum, and organic matters. Aluminum exhibited strong adsorption onto the membrane surface due to its positive charge and served as a key fouling induction factor by forming complex bridging interactions with organic matters, silica, and calcium ions, thereby accelerating the fouling of NF membranes. The primary source of aluminum was residual flocculant from the coagulation process. Adjusting the influent pH to 6.5–7.0 effectively reduced aluminum concentration in the influent of the nanofiltration system. Based on the analysis of the NF membrane fouling curve and pilot-scale experimental validation, when the influent aluminum concentration was below 50 $\mu\text{g/L}$, the operational cycle of the NF membrane was doubled compared to conditions with an influent aluminum concentration of 100–150 $\mu\text{g/L}$.

Key words: nanofiltration membrane; aluminum; key fouling factor; flocculant residue

通信作者: 李天玉 E-mail: bsy_litianyu@126.com

膜污染是纳滤(NF)膜应用过程中经常遇到的问题^[1]。由于纳滤膜的截留机理复杂(筛分作用、道南效应、介电效应),且各使用场景的水质差别较大,不同场景下纳滤膜的污染机理和污染过程差异显著。已有的研究表明^[2-4],水体中有机物、无机物、微生物、残留絮凝剂等均会影响纳滤膜污染。但是,针对地表水体中纳滤膜关键污染因子以及诱导因子的研究较少。为此,笔者以低压纳滤膜为研究对象,将其用于长江流域某自来水厂沉淀池出水的深度处理,根据22个月的中试运行数据,通过对膜面污染物类型、膜污染阻力、动态膜污染过程等进行分析,确定该水质条件下纳滤膜污染的关键因子,并据此探讨控制措施。

1 试验装置与方法

1.1 试验原水

中试在江苏省某自来水厂进行,该厂以长江水为水源,现有净水工艺为“预臭氧→絮凝→沉淀→后臭氧→炭滤→砂滤”。本研究以该水厂沉淀池出水为原水进行超滤-纳滤中试。纳滤膜系统进水水质如下:pH为7.46~8.48,TOC为0.6~2.1 mg/L,电导率为247~433 $\mu\text{S}/\text{cm}$,浊度<0.12 NTU,总硬度(以 CaCO_3 计)为117~149 mg/L,碱度(以 CaCO_3 计)为85~100 mg/L,铝为0.02~0.15 mg/L,污染指数(SDI_{15})为2~6。

1.2 工艺流程

深度处理系统的工艺流程如图1所示。纳滤膜工段设计产水量为50 m^3/d ,运行压力为0.2~0.5 MPa,系统回收率为80%~95%,采用4支8040型号的纳滤膜串联。纳滤膜为聚哌嗪酰胺材质,单支膜面积为37 m^2 ,通量为15~20 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。运行过程中连续监测压力和通量变化,当标准化膜比通量下降超过15%时,对膜元件进行化学清洗。

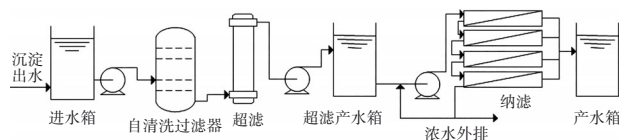


图1 中试工艺流程

Fig.1 Process flow of pilot test

1.3 分析项目及方法

1.3.1 标准化膜比通量分析方法

采用标准化膜比通量表征纳滤膜的运行稳定性,计算公式如下:

$$J_s = \frac{J_m}{\text{TMP}_s} \quad (1)$$

$$\text{TMP}_s = \left(\frac{P_f + P_c}{2} - P_p \right) \times \text{TCF} \quad (2)$$

式中: J_s 为标准化膜比通量; J_m 为实测膜通量; TMP_s 为标准化跨膜压差; P_f 为进水压力; P_c 为浓水压力; P_p 为产水压力;TCF为温度校正系数。

1.3.2 膜阻力分析方法

纳滤膜运行过程中的总阻力 R_t 主要由膜的固有阻力 R_m 、沉积阻力 R_c 和污染层导致的过滤阻力 R_f 三部分组成,其中,过滤阻力 R_f 又包括凝胶层阻力 R_{ef} 和内部污染阻力 R_{if} 两部分。各项阻力的计算方法如下:

$$R_t = \frac{\Delta P}{\mu J_1} \quad (3)$$

$$R_c = \frac{\Delta P}{\mu J_1} - \frac{\Delta P}{\mu_w J_2} \quad (4)$$

$$R_{ef} = \frac{\Delta P}{\mu_w J_2} - \frac{\Delta P}{\mu_w J_3} \quad (5)$$

$$R_{if} = \frac{\Delta P}{\mu_w J_3} - \frac{\Delta P}{\mu_w J_0} \quad (6)$$

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu_w J_0} \quad (7)$$

式中: ΔP 为跨膜压差; J_0 为新膜的纯水通量; J_1 为过滤原水的稳定通量; J_2 为纯水冲洗后的纯水通量; J_3 为化学清洗后的纯水通量; μ 为原水黏度; μ_w 为纯水黏度。

1.3.3 常规指标分析方法

总硬度参照《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2023)进行测定;总铝采用ICP-OES光谱仪测定,测定前先进行酸化处理;pH和总溶解性固体(TDS)分别采用pH计和便携式TDS仪测定;TOC采用总有机碳分析仪测定;浊度采用浊度仪基于散射法测定; SDI_{15} 采用SDI仪测定;膜污染物中的元素组成采用X射线光电子能谱(XPS)进行分析。

1.3.4 相关性分析

统计每个周期的运行数据与进水水质数据,采用SPSS软件进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 运行结果分析

本研究使用的纳滤膜脱盐率低,对硬度的截留率仅为20%~30%,对碱度的截留率低于10%,从而降低了浓水侧的浓差极化程度,可以提高系统回

收率,运行过程中纳滤膜系统的回收率为 80%~95%,减少了浓水排放量。中试运行过程中不加酸,阻垢剂投加量为 1.5~2.0 mg/L,初始回收率为 80%,后续调整回收率至 85%、90%、95%,考察不断提高系统回收率的效果,从 2018 年 12 月 13 日回收率调整为 90%,重点研究了 90% 回收率条件下纳滤膜的运行情况。

中试共运行 22 个月、19 个周期,考察了纳滤膜系统在不同温度、季节和进水水质下的运行情况。由于进水水质和温度的波动,相同运行条件下纳滤膜系统的运行周期不同(7~40 d)。纳滤膜系统的具体运行数据如图 2 所示。对比不同回收率下纳滤膜的膜比通量变化,回收率越高,污染速度越快,尤其是到 95% 回收率时,纳滤膜运行周期仅为 7 d 左右。对比相同回收率运行条件下,即膜通量为 18 L/(m²·h)、回收率为 90% 时,纳滤膜的运行周期相差也较大(10~40 d 不等),因此分析不同运行周期的纳滤膜污染原因,以期判断纳滤膜污染的关键因素。

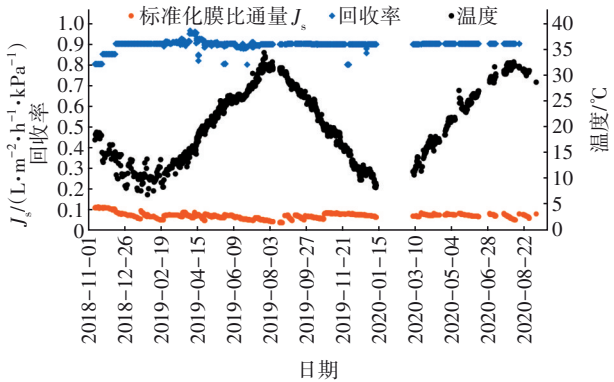


图 2 纳滤系统运行数据

Fig.2 Operational data of nanofiltration system

2.2 膜面污染物分析

2.2.1 污染物类型

对现场污染纳滤膜元件进行化学清洗,并对纯水清洗溶液、酸洗(采用 pH=2 的 HCl 溶液)溶液和碱洗(采用 pH=12 的 NaOH 溶液)溶液中膜污染物的质量进行加和,统计 3 次化学清洗的膜污染物质量,结果如表 1 所示。可知,在纳滤膜污染物中含量较高的物质主要为 Al、Ca、Si 和 TOC,说明该纳滤膜污染为有机和无机复合污染。天然水体中主要的有机物为腐殖酸和富里酸,该类有机物易与无机 Al、Ca、Si 络合,形成复合污染。而纳滤膜是较为疏松的膜,由于界面聚合反应,纳滤膜表面易出现“结节状”结

构^[5],因此表面有一定的粗糙度。而且,由于该纳滤膜的活性层为酰胺材料,聚酰胺链上含有羧基,在水溶液中,羧基会部分解离而使膜表面带负电,膜表面的羟基更易与 Al、Ca 结合,产生络合架桥作用,从而在纳滤膜表面形成凝胶层污染。纳滤膜的粗糙度会影响膜污染层的致密性以及沉积层的形成,但是不同研究者对于粗糙度得出的结论不同,例如,赵阳莹^[6]研究发现,无法被 NaOH 清洗去除的污染物的量与膜表面粗糙度呈正相关性;而石紫^[7]研究发现,PIP-2KANA/TMC 膜虽然具有更少的亲水且荷负电的羧基,膜粗糙度提高,但是表现出更好的抗污染性,这是因为,膜表面荷负电性减弱,导致膜表面与荷正电的选择溶菌酶(LYZ)间的相互作用减弱占据主导地位,从而抑制了污染物在膜表面的黏附与沉积。因此纳滤膜表面的“结节状”结构这个单一因素不能完全决定膜的污染速率,纳滤膜的污染速率是膜表面特性以及污染物性能的综合影响。

表 1 纳滤膜污染物质量

Tab.1 Foulants mass on nanofiltration membrane

项目	g							
	Fe	Al	Si	Ba	Sr	Mg	Ca	硫酸盐 TOC
第 1 次	1.73	34.12	5.96	0.40	0.10	1.33	12.04	3.29 37.72
第 2 次	1.55	46.79	1.04	0.75	0	4.09	31.98	5.60 22.30
第 3 次	0.30	50.66	12.17	0.53	0.08	0.54	2.81	3.20 9.99

在 3 次化学清洗中,主要的膜污染物 Al 和 TOC 占污染物总量的比例分别为 35.3%、41.3%、63.1%和 39.0%、19.6%、12.4%,但是进水中 TOC 浓度较高(0.6~2.1 mg/L)、而 Al 浓度较低(仅为 0.02~0.15 mg/L),进水 TOC 浓度为 Al 浓度的 4~105 倍,可见铝更易对纳滤膜造成污染。

2.2.2 膜污染阻力

对纳滤膜污染阻力进行了两次测试。结果显示, R_m 为 1.49×10^5 和 $1.56 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$, R_f 为 2.51×10^5 和 $2.13 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$, R_c 为 1.06×10^5 和 $6.87 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$, R_t 为 5.06×10^5 和 $4.37 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ 。可以看出,纳滤膜污染阻力主要为凝胶层阻力和内部污染阻力,即污染物质可能和膜表面发生静电作用等而络合在膜表面,形成不容易被物理作用去掉的阻力。 R_t (膜凝胶层阻力和内部污染阻力)占比较大,在两次测试中分别为 50% 和 49%,而膜的沉积阻力 R_c 占比较小,仅为

21%和16%。由此可知,纳滤膜污染阻力以凝胶层阻力和内部污染阻力为主,为不可逆阻力,需要通过化学清洗去除。纳滤膜表面呈负电性,导致其更易与水中污染物质结合,在纳滤膜表面形成致密的污染层。这与2.2.1节中膜污染的主要成分分析结果一致,主要是膜表面络合架桥形成的污染层,导致纳滤膜的快速污染。

2.3 膜污染相关性分析

2.3.1 污染速率与进水中污染因子的相关性

采用SPSS软件,将运行22个月的纳滤膜污染速率(以运行周期表征)与进水中各污染物浓度进行相关性分析,结果显示,纳滤膜污染速率与进水中铝浓度显著相关,Pearson相关性为0.782,且在0.01水平(双侧)上显著相关;与TOC和钙浓度也显著相关,Pearson相关性分别为0.644和0.687,在0.05水平(双侧)上显著相关。由此可知,纳滤膜污染速率与进水中铝浓度相关性更强,在纳滤膜运行过程中应重点关注铝残留对膜污染的影响。

2.3.2 铝污染控制限值

采用Origin软件对纳滤膜运行周期与浓水侧铝浓度进行拟合分析,结果见图3。可知,纳滤膜运行周期和Al浓度呈指数关系。因此从控制膜污染角度分析,由于Al为前端絮凝剂引入,降低前端混凝残留Al是比较可行的方案。根据图3的拟合公式计算不同运行周期下浓水侧Al浓度,结果见表2。可知,若满足90%回收率下运行周期>90 d,Al残留浓度至少要降到68 μg/L以下。

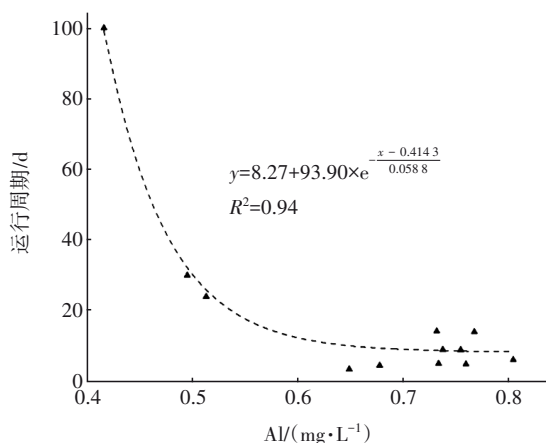


图3 纳滤膜运行周期和铝浓度的关系

Fig.3 Relationship between operation cycle and aluminum concentration

表2 根据公式拟合不同运行周期的Al浓度

Tab.2 Fitted aluminum concentrations for different operation cycles based on the formula

运行周期/d	浓水侧 Al 浓度/ (mg·L ⁻¹)	90% 回收率时超滤产水 Al 浓度/(mg·L ⁻¹)
150	0.390	0.063
120	0.404	0.065
90	0.422	0.068
60	0.449	0.072
30	0.500	0.081

2.4 膜污染过程分析

针对纳滤膜污染过程,取不同膜标准产水量衰减率(0、15%、30%、50%)的膜片进行XPS表征,结果见图4,其中,膜衰减率=0表示为新膜状态。

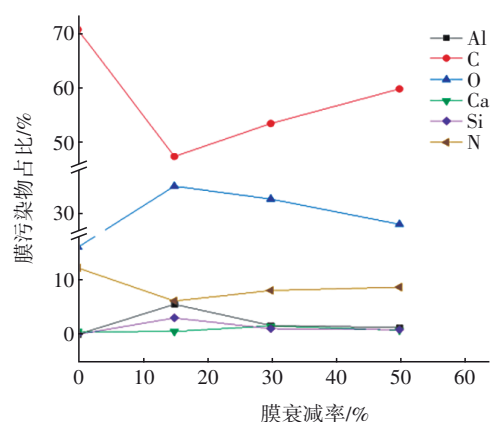


图4 纳滤膜表面污染物随污染程度的变化

Fig.4 Change in foulants on nanofiltration membrane surface with increasing fouling degree

污染前期,膜标准产水量衰减15%,元素Al、Si、O占比均出现升高趋势,根据水质分析,膜面污染物可能主要为硅铝酸盐或者铝的络合物。污染中期和后期(膜标准产水量衰减30%和50%),元素Ca、C占比出现升高趋势,说明后期主要污染物质可能为有机物及有机物与Ca络合形成的污染物。天然水体中的有机物主要为腐殖酸和富里酸,钙离子可在膜表面与腐殖酸以及腐殖酸与腐殖酸之间起到架桥作用,从而加重膜污染^[8]。中后期Al所占比例下降可能是因为Al更易与纳滤膜表面形成络合物,膜表面形成凝胶层污染后,缺少与Al络合的-COOH等官能团,减少了Al在膜表面的富集,也说明Al在纳滤膜表面的污染反应改变了膜污染过程的界面相互作用。根据以上分析,前期Al在膜表面富集速度较快,可能为膜污染的诱导因子,即铝与纳滤膜

先结合,形成表层污染;中后期纳滤膜表面被铝污染后,更易形成架桥结构,吸附、络合Ca和有机物,层层污染叠加,形成无机与有机的复合污染,表明铝的存在可能诱导纳滤膜污染。

2.5 pH对铝残留的影响

铝在环境中的存在形态和组分十分复杂,主要包括单质铝及与其他物质络合存在的铝。且在不同pH下铝的形态不同,当pH>7.0时,单核铝和溶解铝为铝的主要存在形态,且温度和pH越高,其浓度也越高。在偏酸性环境中,悬浮铝和多核铝浓度相对较高,且随温度和pH的升高呈下降趋势^[9]。因此,对于地表水源水,选择合适的絮凝剂及投加量对控制纳滤膜污染尤为重要。

调节进水pH分别为5.0、5.5、6.0、6.5、7.0和8.0,投加5 mg/L的聚合氯化铝(PAC),测定混凝沉淀后超滤产水的残留铝浓度,考察不同进水pH对铝残留的影响,结果如图5所示。当pH为6.0和6.5时混凝条件较优,残留铝浓度可以降至25 $\mu\text{g/L}$ 以下,由于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中规定pH为6.5~8.5,所以产水pH最好在6.5~7.0。根据试验结果,当进水pH为7.0时,残留铝浓度为48 $\mu\text{g/L}$ (<50 $\mu\text{g/L}$),满足要求。因此,若调节原水pH,则建议调节到6.5~7.0。

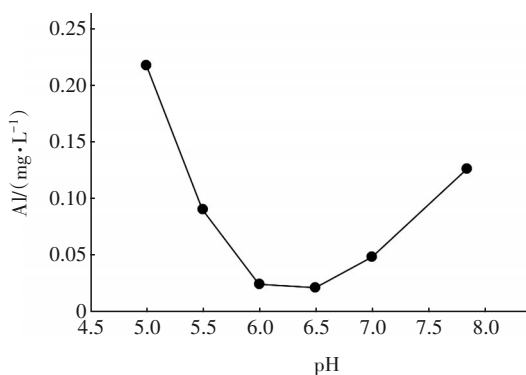


图5 pH对混凝残留铝影响

Fig.5 Effect of pH on residual aluminum

调节pH可以降低铝的残留量,主要是因为不同pH条件下铝的形态不同。根据Ferron法可表征PAC的形态,一般在样品加入比色液的瞬间所发生反应的形态称为 Al_a ,随后在一定时间反应了的形态称为 Al_b ,而将既定时间内未达到完全反应的形态称为 Al_c ^[10]。 Al_a 为单体铝及低聚态铝,主要包括 Al^{3+} 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 等; Al_b 为中聚态铝,主

要是中等尺寸多核羟基铝聚合物,包括 $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$ 、 $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_{20}^{4+}$ 、 $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ 等,分子质量为1~3 ku; Al_c 为高聚态铝及沉淀物,包括 $(\text{Al}_{13})_n$ 、 $[\text{Al}(\text{OH})_3]_n$ 等,分子质量>3 ku^[11-12]。

pH由6.0调整到5.0,溶解态的铝(Al_a)增加,不同分子质量的Al残留量均有升高^[12],在pH=6.0~7.0范围内, Al_b 中 Al_{13}^{7+} 占比较大,因高正电特性,根据电中和机制易发生混凝反应,可在水中进一步水解生成多聚态羟基络合物,再与颗粒物发生作用,表现出优异的混凝特性。pH=6.5为混凝性能的转折点,随pH升高铝形态发生解聚/再聚合,高电荷聚合物减少,混凝效果逐渐减弱。PAC中的铝形态对pH高度敏感,因此控制pH可有效减少水体中铝的残留。如图5所示,当pH=6.0~7.0时,可以有效发生混凝反应,水体中残留铝多为悬浮铝和多核铝(Al_b 、 Al_c),易沉淀或者被超滤膜拦截,因此该pH下水中残留铝较少,表明调节进水pH在6.0~7.0可以有效控制絮凝剂铝的残留。但由于纳滤产水作为生活饮用水,pH建议在6.5~7.0。

2.6 进水中减少铝浓度后的效果

在膜通量为18 L/(m²·h)、回收率为85%的运行条件下,考察较低铝浓度(<50 $\mu\text{g/L}$)和较高铝浓度(100~150 $\mu\text{g/L}$)两种进水条件下纳滤膜的污染速率,结果见图6。经中试验证,在相同过水量情况下,当进水铝浓度为100~150 $\mu\text{g/L}$ 时,纳滤膜通量衰减30%;而当进水铝浓度<50 $\mu\text{g/L}$ 时,纳滤膜通量仅衰减15%。表明降低进水铝残留后(<50 $\mu\text{g/L}$),纳滤膜的运行周期可以延长1倍。

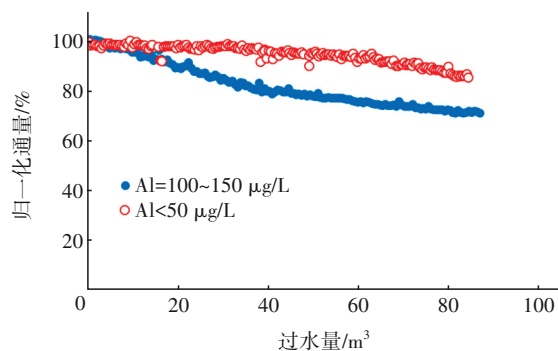


图6 降低铝残留后纳滤膜运行情况

Fig.6 Nanofiltration operation after aluminum residue reduction

3 结论

① 对于长江原水,铝及铝、钙与有机物形成

的复合物为纳滤膜污染的关键因子,建议纳滤进水铝浓度低于68 $\mu\text{g/L}$ 。

② 纳滤膜污染前期,铝为膜污染的诱导因子,至中后期纳滤膜表面被铝污染后,更易形成架桥结构,吸附、络合钙和有机物,层层污染叠加,形成无机与有机的复合污染。

③ 纳滤进水中铝残留浓度与水体pH密切相关,通过调整进水pH=6.5~7.0可有效降低铝残留浓度至50 $\mu\text{g/L}$ 以下,经中试验证,运行周期比进水中铝浓度为100~150 $\mu\text{g/L}$ 时延长1倍。

参考文献:

- [1] 陈寿彬. 超滤-纳滤双膜工艺处理乌龙江段周期性咸潮水中试[J]. 中国给水排水, 2024, 40(11): 24-30.
CHEN Shoubin. Pilot study on double membrane process in water polluted by periodic salt tides in Wulong River section[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(11): 24-30 (in Chinese).
- [2] OHNO K, MATSUI Y, ITOH M, *et al.* NF membrane fouling by aluminum and iron coagulant residuals after coagulation-MF pretreatment[J]. Desalination, 2010, 254(1/3): 17-22.
- [3] HER N, AMY G, CHUNG J, *et al.* Characterizing dissolved organic matter and evaluating associated nanofiltration membrane fouling[J]. Chemosphere, 2008, 70(3): 495-502.
- [4] LISTIARINI K, CHUN W, SUN D D, *et al.* Fouling mechanism and resistance analyses of systems containing sodium alginate, calcium, alum and their combination in dead-end fouling of nanofiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 344 (1/2): 244-251.
- [5] 张辉. 两性离子化聚酰胺纳滤膜的结构调控及其分离性能[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
ZHANG Hui. Structural Modulation of Zwitterionic Polyamide Nanofiltration Membranes and Their Separation Performance [D]. Tianjin: Tiangong University, 2023 (in Chinese).
- [6] 赵阳莹. 新型无机-有机复合纳滤膜截留和抗膜污染机理[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- ZHAO Yangying. Rejection and Antifouling Properties of Advanced Inorganic-Polymeric Composite Membranes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019 (in Chinese).
- [7] 石紫. 抗污染抗菌分盐纳滤膜制备[D]. 天津: 天津大学, 2021.
SHI Zi. Preparation of Anti-fouling and Antibacterial Salt-separating Nanofiltration Membrane [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021 (in Chinese).
- [8] 姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 等. XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1884-1890.
YAO Shudi, GAO Xinyu, GUO Benhua, *et al.* Reverse osmosis membrane fouling by humic acid using XDLVO approach: effect of calcium ions [J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 1884-1890 (in Chinese).
- [9] CHOI Y H, NASON J A, KWEON J H. Effects of aluminum hydrolysis products and natural organic matter on nanofiltration fouling with PACl coagulation pretreatment[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 120(13): 78-85.
- [10] ZHANG Y, SHI B Y, ZHAO Y Y, *et al.* Deposition behavior of residual aluminum in drinking water distribution system: effect of aluminum speciation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 42: 142-151.
- [11] TANG H X, XIAO F, WANG D S. Speciation, stability, and coagulation mechanisms of hydroxyl aluminum clusters formed by PACl and alum: a critical review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 226: 78-85.
- [12] DUAN S X, XU H, XIAO F, *et al.* Effects of Al species on coagulation efficiency, residual Al and floc properties in surface water treatment[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 459: 14-21.

作者简介: 郭莎莎(1988-), 女, 河北石家庄人, 本科, 工程师, 研究方向为纳滤膜污染机理与工程应用、盐湖资源化。

E-mail: bsy_guoshasha@126.com

收稿日期: 2025-02-24

修回日期: 2025-03-15

(编辑: 刘贵春)