

# 处理含氨氮地表水的混凝—超滤工艺中膜清洗方法的研究

刘彩虹<sup>1</sup> 刘百仓<sup>2</sup> 林佳琪<sup>2</sup> 张梦然<sup>2</sup> 谢彦波<sup>3</sup> 王维璋<sup>3</sup> 白玉华<sup>3</sup> 马军<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150000; 2 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065;  
3 中国市政工程西南设计研究院, 成都 610081)

**摘要** 为了研究处理含氨氮地表水膜的有效清洗方法, 采用实验室配置的腐殖酸溶液为原水运行混凝—超滤膜组合工艺, 主要针对膜清洗特别是膜化学清洗进行了研究。在对 PVC 膜进行污染后的清洗时, 采用了 3 种不同的化学清洗液, 分别为 1% NaOH、2% 乙醇、依次使用 1% NaOH 和 2% 乙醇, 试验结果表明, 当顺次使用清洗剂 1% NaOH 和 2% 乙醇时产生的清洗效果最好, 再生通量大, 阻力去除强。对 PVDF 进行研究时, 采用同一种清洗剂 0.2% NaClO 和 0.1% NaOH 的混合液, 当污染液中钙离子含量不同时, 化学清洗效率也有所不同。钙离子加剧了膜污染, 它的存在使得污染膜经化学清洗后的通量恢复能力有所降低。污染液中氨氮的存在也对膜的化学清洗效率有一定的影响。膜污染进行期间若对其进行物理清洗, 在一定程度上可以使膜的过滤通量增加, 跨膜压差降低。

**关键词** 超滤膜 混凝 膜清洗 氨氮 渗透通量

## 0 前言

膜技术应用于给水处理所遇到的主要问题是膜污染。膜污染会造成通量下降或跨膜压差上升, 导致制水成本上升和最终膜的使用寿命的缩短。清洗剂的不同对清洗效率有很大的影响。采用金属螯合剂(EDTA)和阴离子表面活性剂(SDS)通过优化清洗期间的化学和物理条件, 能够有效地清洗污染的反渗透膜(RO)。但是, 用 NaOH (pH 为 11) 进行清洗时, 膜的渗透通量较难恢复<sup>[1]</sup>。当用浓度高于 CMC(critical micelle concentration 临界胶团浓度)的 SDS 对天然有机物污染的纳滤膜(NF)进行清洗时, 清洗效率明显增加。对于清洗剂 EDTA, 当 pH 提高时, EDTA 有更多的羧基官能团被去质子化, 从而使得 EDTA 通过配合基交换反应将复合钙离子从海藻酸盐—钙离子的复合物中去除的螯合能力增强<sup>[2]</sup>。Li 等人在研究谷氨酸发酵培养基污染的聚苯乙烯(PS)超滤膜的化学清洗时, 对 HCl、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、NaOH、Ultrasil 11、SDS 和 CTAB 六种清洗剂清洗 20 min 后的清洗效果进行了比较。所有清洗剂的质量分数为 0.3%。Ultrasil 11 的再生通量百分比  $r_c$  值为 99.5%, 清洗力最强, SDS 为 94.3%,

而 HCl 的百分比  $r_c$  值最低, 为 46.0%<sup>[3]</sup>。有时, 仅仅使用一种清洗剂的清洗效果并不理想, 但若将两种或三种清洗剂进行组合清洗时, 往往能使清洗效率有较大提升。Tian 等人在对超滤河水的 PVC 膜进行连续的 NaOH 和乙醇的化学清洗的研究时发现, 当用 1% 的 NaOH 对污染后的 PVC 膜进行 30 min 的清洗后, 得到的清洗效率为 -14.6%。若使用质量分数为 2% 的柠檬酸清洗 30 min, 对不可逆污染物的去除有一定的效果, 清洗效率为 10.9%。另一方面, 当清洗时使用 1% 的 NaOH 清洗 30 min 后继续用乙醇清洗 30 min, 化学清洗效率为 85.1%, 由于乙醇的单独清洗可以去除 48.5% 的不可逆污染, 这表明 NaOH 在清洗过程中对去除膜污染同样发挥了作用(36.6%)<sup>[4]</sup>。Li 等人指出与单独使用 NaOH 和 SDS 进行清洗相比, 同时使用两种清洗剂对被谷氨酸发酵培养基污染的 PS 超滤膜进行化学清洗时的清洗能力最强, 效率也最高<sup>[3]</sup>。Wui 等人在研究有机污染反渗透膜时, 使用不同的污染物海藻酸和旺尼河天然有机物 SRNOM(Suwannee River natural organic Matter)质量比例, 以研究有机污染层的不同组成对清洗效率的影响。使总污染浓度保持在 20 mg/L: ①20 mg/L 海藻酸盐; ②14 mg/L 海藻酸盐, 6 mg/L SRNOM; ③6 mg/L

国家自然科学基金资助项目(51278317)。

表 1 模拟受氨氮污染地表水试验原水主要水质指标

水质参数	TOC <sup>a</sup> /mg/L	UV <sub>254</sub> <sup>b</sup> /cm <sup>-1</sup>	SUVA <sup>c</sup> /L/(mg·m)	NH <sub>3</sub> -N <sup>d</sup> /mg/L	温度/°C	pH	浊度/NTU
平均取值	16.29	0.324	2	5.7215	28	6	2

注: a. 为通过 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜预过滤的有机组分, 以避免悬浮固体和胶体的影响。 b. 为先用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤样品, 然后采用尤尼柯紫外可见分光光度计在 254 nm 的波长下进行测量。 c. SUVA 为总有机物(TOC)的特定紫外吸收值, 定义式为  $SUVA = (UV_{254} / TOC) \times 100$ 。 d. 氨氮含量采用纳氏试剂法, 通过尤尼柯紫外可见分光光度计测定水样的吸光度, 联合标准曲线经计算得到。

海藻酸盐, 14 mg/L SRNOM; ④20 mg/L SRNOM。结果可得原溶液中污染物组成的不同导致了有机污染层形成的不同, 而这种不同使得即使使用同一种清除剂时清洗效率也会有所不同。试验表明当原水中所含 SRNOM 比海藻酸盐的比例较高时, 用 0.5 mmol/L 的 EDTA (pH 11) 清洗膜的效率更高。被 SRNOM 污染的膜(不含海藻酸盐)清洗后可得最高清洗效率(108%), 而被海藻酸盐污染的膜(不含 SRNOM)的清洗效率最低(44%)。当有机污染物海藻酸盐和 SRNOM 的比例为 3 : 7 和 7 : 3 时清洗效率分别为 102% 和 64%<sup>[1]</sup>。因此, 针对特定污染液和膜, 选择合适的清洗方法和清洗条件, 以改善被污染膜的性能, 延长膜的使用寿命, 降低制水成本, 对膜技术的广泛应用至关重要。

## 1 试验

### 1.1 仪器及膜特性

六联搅拌机(ZR4-6, 深圳市中润水工业技术发展有限公司), 电子天平(JA12002, 上海精密科学仪器有限公司), 便携式浊度仪(2100P, 美国 Hach 公司), pH 计(PHSJ-4A, 上海雷磁仪器厂), 紫外可见分光光度计(UV-2802P, 上海尤尼柯仪器有限公司), TOC 分析仪(liqui TOCII, 德国 elementar 公司), 兰格蠕动泵(BT00-300M, 河北保定恒流泵有限公司), 真空表。

超滤膜为聚偏氟乙烯(PVDF)和聚氯乙烯(PVC)的外压式中空纤维膜, 其内外径分别为 1.0/1.5 mm。每个膜组件含膜 60 根, 每根有效长度为 30 cm, 膜面积 848.23 cm<sup>2</sup>, 膜通量 50 L/(m<sup>2</sup>·h), 流量 70.7 mL/min, 截留相对分子质量 50 000。

### 1.2 试验方法

试验原水模拟受氨氮污染的地表水, 所以主要污染物为腐殖酸, 其浓度设为 5 mg/L。原水配置方法: 先配置浓度为 5 mg/L 的腐殖酸溶液, 然后加入

(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 使氨氮的含量为 0.1 mg/L, 原水水质如表 1 所示。

试验装置见图 1。采用混凝—超滤组合工艺。在混凝水箱中, 将混凝剂三氯化铁(FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)加入配置好的污染液中, 以处理水的浊度、UV<sub>254</sub> 为参数确定得到的最佳投药量为 50 mg/L, 以 200 r/min 快速搅拌 1 min, 再以 40 r/min 慢速搅拌 25 min。膜过滤在死端过滤单元中进行, 采用浸没式中空纤维膜, 使用混凝好的液体直接进行膜过滤, 依次对膜进行压缩、调节和有机污染。由电子天平记录出水质量, 传输至电脑, 从而通过计算得到膜过滤通量。膜污染后进行清洗试验, 清洗方法为先将膜组件浸泡于配置好的清洗液中 1 h, 然后用清洗液对膜进行反冲洗, 时间为 10 min。

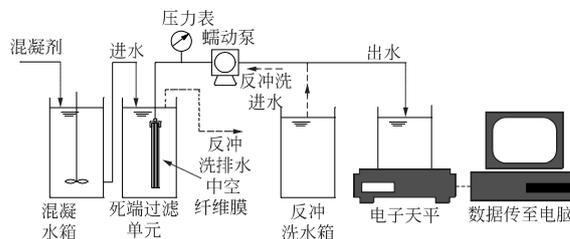


图 1 混凝—超滤组合工艺试验装置

在研究 PVC 膜时, 主要研究不同清洗液的清洗效率, 采用 3 个 PVC 膜组件, 分为 3 组进行对比分析。3 组组件的污染源组成相同, 均为 HA=5 mg/L, [Ca<sup>2+</sup>]=2 mmol/L, NH<sub>3</sub>-N=0.1 mg/L。3 组组件的膜污染时间均为 2 500 min。对 PVC 组件一, 清洗液为 2% 乙醇; 对 PVC 组件二, 清洗液为 1% NaOH; 对 PVC 组件三, 分阶段依次进行化学清洗(第一阶段: 1% NaOH, 第二阶段: 2% 乙醇)。

在研究 PVDF 膜时, 主要研究污染液组成对清洗效率的影响, 采用 2 个 PVDF 膜组件, 分 2 组进行对比分析。两组件的化学清洗液组成相同, 均为 0.2% NaClO 和 0.1% NaOH 的混合液。对 PVDF 组件一, 污染液中 HA=5 mg/L, [Ca<sup>2+</sup>]=2 mmol/L,

$\text{NH}_3\text{-N}=0.1\text{ mg/L}$ ,膜污染时间为 1 000 min;对 PVDF 组件二,污染液中  $\text{HA}=5\text{ mg/L}$ , $[\text{Ca}^{2+}]=0$ , $\text{NH}_3\text{-N}=0.1\text{ mg/L}$ ,膜污染时间为 2 500 min。

在对膜进行过滤期间为了研究两种膜的物理清洗状况,以 30 min 为一个周期,每个周期结束后进行物理清洗,以清洗时间为变量,主要采用先气冲、后纯水反冲、纯水正冲的方式。此阶段共运行了 19 个周期:1~11 周期(气冲 3 min,水冲 3 min,正冲 5 min);12~19 周期(气冲 4 min,水冲 3 min,正冲 6 min)。所用污染液主要成分: PVC 膜,  $\text{HA}=5\text{ mg/L}$ , $[\text{Ca}^{2+}]=2\text{ mmol/L}$ , $\text{NH}_3\text{-N}=0.1\text{ mg/L}$ 。PVDF 膜,  $\text{HA}=5\text{ mg/L}$ , $[\text{Ca}^{2+}]=0$ , $\text{NH}_3\text{-N}=0.1\text{ mg/L}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PVC 化学清洗

#### 2.1.1 通量恢复和再生通量

通过计算通量恢复系数和再生通量,可以对 PVC 膜在不同清洗状况下的清洗效率进行分析。

三组 PVC 膜组件膜滤前的初始渗透通量  $J_0$  分别为:  $16.80\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $18.11\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $18.11\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。采用膜的纯水通量恢复系数  $r$  来表征清洗效果,其计算式: $r=J/J_0 \times 100\%$ ,式中  $J$  为化学清洗后膜的纯水通量, $J_0$  为膜滤前的初始渗透通量。绘制图 2,并求  $r$  的均值绘柱状图于图 3。

对各膜组件计算再生通量后求均值,绘制柱状图如图 3 所示。再生通量 Flux recovery (FR):

$$FR(\%) = \frac{J_{wc} - J_{ww}}{J_{wi} - J_{ww}} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $J_{wi}$ ——膜污染前纯水通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;

$J_{ww}$ ——膜化学清洗前纯水通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;

$J_{wc}$ ——膜化学清洗后纯水通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

纯水通量恢复系数  $r(J/J_0 \times 100\%)$  可用来表征清洗效率,由图 2 可得,PVC 膜组件一和组件三的  $r$  值较稳定,随着时间的推移波动不大,其中组件一最为稳定,而组件二的波动很大,特别是开始阶段, $r$  值向下波动频繁,等到后期才逐渐趋于稳定。由图 3 可得,PVC 的三个组件的纯水通量恢复系数  $r$  均较大,说明三种化学清洗方法对污染膜的通量恢复有明显作用,其中又以顺次

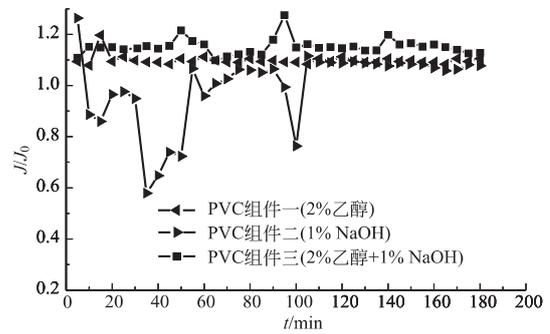


图 2 PVC 膜在不同清洗状况下的通量恢复系数  $J/J_0$

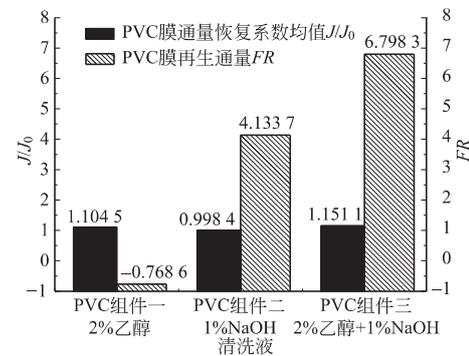


图 3 PVC 膜在不同清洗状况下的通量恢复系数均值  $J/J_0$  和再生通量

使用 1% 的 NaOH 和 2% 乙醇对膜进行化学清洗时的效率最高,清洗剂使用 2% 乙醇时次之,使用 1% NaOH 时最低,但三个值均较大,通量恢复效果明显。

就再生通量整体数值的大小比较而言,PVC 膜组件三的值最大,即清洗效率最高,组件二次之,组件一最低,这说明顺次使用清洗剂 1% NaOH 和 2% 乙醇对膜进行化学清洗时的效率最高,这与前面的分析吻合。

#### 2.1.2 阻力研究

过滤期间的阻力可将膜的污染定量化,清洗通过消除阻力具体化。抵抗力源于膜表面的饼状或凝胶污染层的形成。

由 Darcy's law,通量  $J$  定义为:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \Sigma R} \quad (2)$$

膜固有阻力:

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu \Sigma J_{wi}} \quad (3)$$

污染后的膜阻力:

表 2 不同组件PVC膜阻力计算相关参数汇总

PVC	温度(污染前)/℃	$\mu$ (污染前)/ $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$\Delta P$ (污染前)/MPa	温度(清洗前)/℃	$\mu$ (清洗前)/ $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$\Delta P$ (清洗前)/MPa	温度(清洗后)/℃	$\mu$ (清洗后)/ $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$\Delta P$ (清洗后)/MPa
组件一	28	8.39	0.024	27	8.57	0.028	28	8.39	0.028
组件二	27	8.57	0.028	29	8.21	0.032	28	8.39	0.028
组件三	27	8.57	0.028	28	8.39	0.032	28	8.39	0.028

$$R_f = \frac{\Delta P}{\mu \sum J_{ww}} - R_m \quad (4)$$

清洗后的膜阻力:

$$R_c = \frac{\Delta P}{\mu \sum J_{wc}} - R_m \quad (5)$$

阻力去除:

$$RR(\%) = \frac{R_f - R_c}{R_f} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $J_{wi}$ ——膜污染前纯水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

$J_{ww}$ ——膜化学清洗前纯水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;

$J_{wc}$ ——膜化学清洗后纯水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;

$\Delta P$ ——污染前过滤纯水的跨膜压差, MPa, 由真空表读数得到;

$\mu$ ——污染前过滤纯水的动力粘度系数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), 是温度的函数。

$$\mu = \rho \nu = 1 \times \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \times 0.11 \quad (7)$$

式中  $\nu$ ——运动粘滞系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$\rho$ ——纯水的密度,  $\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;

$t$ ——温度,  $^\circ\text{C}$ 。

代入公式, 经单位换算可得膜固有阻力:  $R_m =$

$$\frac{\Delta P}{\mu \sum J_{wi}} = 3.6 \times 10^{12} \times \frac{\Delta P}{\mu \sum J_{wi}} (\text{m}^{-1})$$

水温、粘滞系数和跨膜压差值如表 2 所示。

由图 4 可以看出, 对于三个 PVC 膜组件, 清洗后的膜阻力均明显小于污染后的膜阻力, 三种不同的化学清洗均对膜有很好的阻力去除效果, 对于阻力去除  $RR$  值而言, 三个组件分别为 0.715 59、0.835 9 和 1.206 54, 可见组件三的阻力去除值最大, 清洗效果最好, 即顺次使用清洗剂 1% NaOH 和 2% 乙醇对膜进行化学清洗时的效率最高, 使用碱 1% NaOH 进行污染膜的化学清洗时虽然效率有所降低但仍然有很好的阻力去除率, 使用 2% 乙醇进行清洗后的

阻力去除率最低, 为 71.559%, 但是清洗效率仍然较明显, 这说明三种清洗方案的清洗效率都较高, 其中又以组件三使用的顺次使用清洗剂 1% NaOH 和 2% 乙醇对膜进行化学清洗时的清洗效果最为理想, 2% 乙醇和 1% NaOH 的清洗效率相对较低一些。

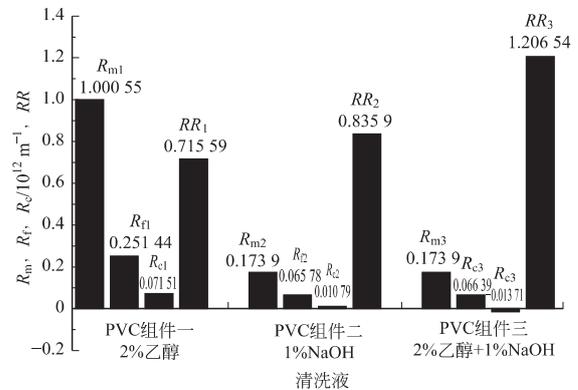


图 4 PVC 膜在不同清洗状况下的阻力与阻力去除

## 2.2 PVDF 化学清洗

### 2.2.1 通量恢复和再生通量

初始渗透通量: 膜组件一  $J_0 = 27.04 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; 膜组件二  $J_0 = 28.56 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

纯水通量恢复系数  $r(J/J_0 \times 100\%)$  用来表征清洗效率, 由图 5 可得, PVDF 膜组件一和膜组件二的  $r$  值都非常稳定, 随着时间的推移变化不大。由图 6 得, 使用同种化学清洗液 0.2% NaClO 和 0.1% NaOH 的混合液对被钙离子含量不同的污染液污染过的两组 PVDF 膜进行清洗的纯水通量恢复系数  $r$  均较大, 说明化学清洗液 0.2% NaClO 和 0.1% NaOH 的混合液对被腐殖酸污染的膜的通量恢复有明显作用, 其中又以第二组组件的效果好, 等于 1.124 7, 这说明钙离子的存在降低了化学清洗液 0.2% NaClO 和 0.1% NaOH 对有机污染 PVDF 膜的清洗效果。就再生通量整体数值的大小比较而言, 由图 6 可以看出, PVDF 膜组件一的值大, 即清洗效率高, 组件二次之, 这可能是由于组件一的

表 3 不同组件PVDF膜阻力计算相关参数汇总

PVDF	温度(污染前)/°C	$\mu$ (污染前)/ $10^{-4}$ Pa·s	$\Delta P$ (污染前)/MPa	温度(清洗前)/°C	$\mu$ (清洗前)/ $10^{-4}$ Pa·s	$\Delta P$ (清洗前)/MPa	温度(清洗后)/°C	$\mu$ (清洗后)/ $10^{-4}$ Pa·s	$\Delta P$ (清洗后)/MPa
组件一	28	8.39	0.016	27	8.57	0.019	28	8.39	0.019
组件二	27	8.57	0.008	29	8.21	0.015	28	8.21	0.012

污染时间为 1 000 min,与组件二的 2 500 min 相比来说很短,膜污染所造成的不可逆污染较少,所以虽然组件一的污染液钙离子含量为 2mmol/L,但其再生通量高于污染液中不含钙离子的组件二。

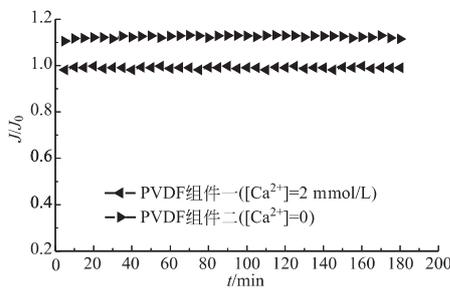


图 5 污染液组成不同对 PVDF 膜清洗后的  $J/J_0$  的影响

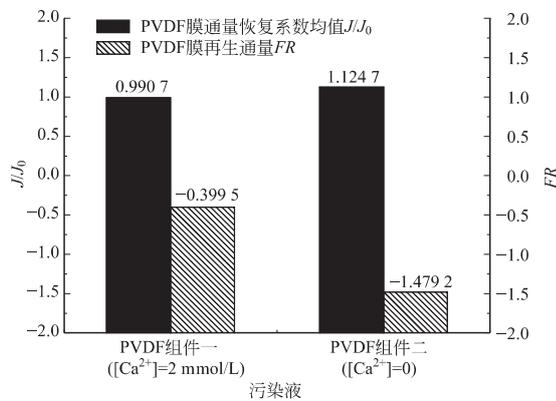


图 6 污染液组成不同对 PVDF 膜清洗后的  $J/J_0$  均值和再生通量的影响

### 2.2.2 阻力研究

关于 PVDF 膜组件的阻力计算相关参数见表 3。由图 7 可见,清洗后两个 PVDF 膜组件的膜阻力均明显小于污染后的膜阻力,0.2% NaClO 和 0.1% NaOH 混合液对有机污染的 PVDF 膜有很好的阻力去除效果,两个组件 RR 值分别为 2.696 11 和 0.538 59,可见组件一的清洗效果最好,这与再生通量的分析一致,说明长时间的污染会造成阻力去除的难度增加,污染时间如果差距较大,比污染液中钙离子的浓度对清洗效果的影响更深。

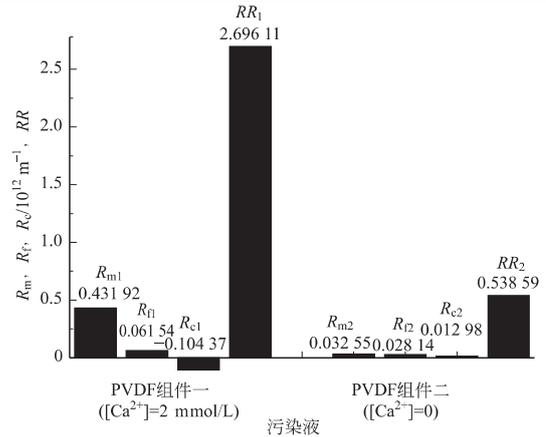


图 7 污染液组成不同对 PVDF 膜清洗后阻力与阻力去除的影响

## 2.3 物理清洗

### 2.3.1 通量概况

膜进行物理清洗期间的污染液过滤通量随时间变化情况如图 8 和图 9 所示。

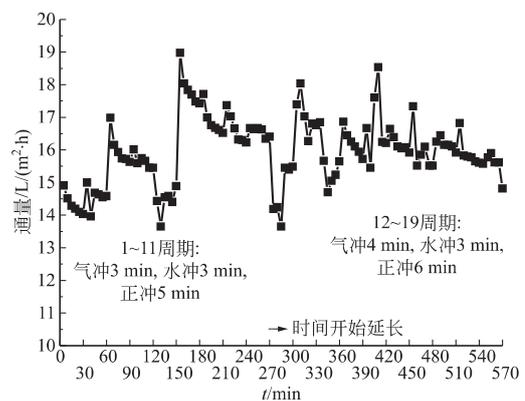


图 8 PVC 膜物理清洗期间污染液通量随时间的变化

### 2.3.2 通量比研究

每次冲洗完后过滤 10 min 的纯水,测定每一周期的纯水通量,分别计算  $J_n/J_{n-1}$ 、 $|J_n - J_{n-1}|/J_{n-1}$ 。

将相邻两个周期的纯水通量相除 ( $J_n/J_{n-1}$ ),其值  $>1$  反映的是水力清洗后,纯水通量大于前一个周期的情况,其所占比例 PVDF 膜为 50%,PVC 膜为 44.44%(见图 10)。对于  $|J_n - J_{n-1}|/$

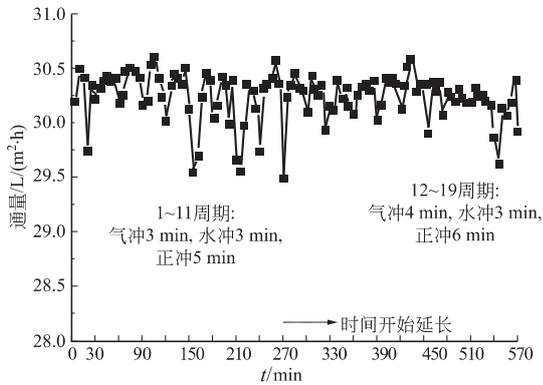


图9 PVDF膜物理清洗期间污染液通量随时间的变化

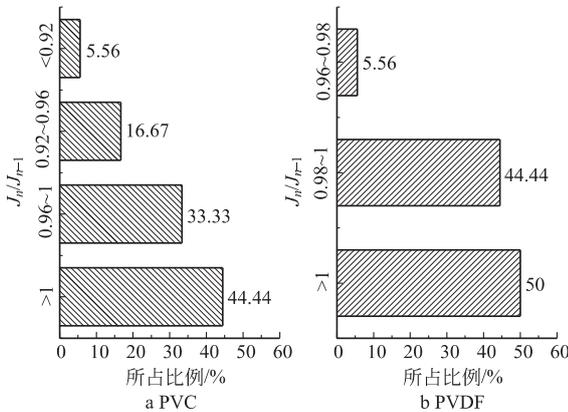


图10 膜物理清洗后的通量比分布

$J_{n-1}$ , PVC膜为11.37, 远远高于PVDF膜的1.6, 这说明PVC膜虽然纯水通量大于前一周期的数量不及PVDF膜多, 但增加的通量值较多。无论哪种膜组件, 物理清洗都对初始通量恢复有很好的效果。

### 3 结论

#### 3.1 膜化学清洗效率。

对被含氮地表水污染过的膜进行化学清洗能够有效地去除污染物, 使膜的通量明显恢复, 膜滤出水水质也有很大的改善。膜化学清洗的影响因素众多。本文主要研究了以下几个方面:

(1) 清洗剂类型。对于同一种污染膜, 当使用不同的清洗剂时, 产生的清洗效率也不同。在对PVC膜进行污染后的清洗时, 采用了3种不同的化学清洗液进行清洗。分别为1% NaOH、2%乙醇、顺次使用1% NaOH和2%乙醇, 从而产生了不同的清洗效率。对结果进行综合分析可得, 当采用顺次使用清洗剂1% NaOH和2%乙醇时产生的清洗

效果最好, 再生通量大, 阻力去除强。

(2)  $Ca^{2+}$ 。  $Ca^{2+}$  是地表水的主要二价阳离子。对PVDF进行研究时, 采用同一种清洗剂和清洗方法, 当污染液中钙离子含量不同时, 化学清洗效率也有所不同。钙离子加剧了膜污染, 它的存在使得污染膜经化学清洗后的通量恢复能力有所降低。这可能是因为膜过滤期间, 钙离子与腐殖酸(主要为羧基集团)形成分子内复合物, 腐殖酸分子表现为较小的连续构象。同时,  $Ca^{2+}$  与羧基集团形成的分子间架桥作用使得腐殖酸分子在污染层上排列为“交叉结合”的结构, 每个腐殖酸分子与其周围的腐殖酸分子紧密联系。因此,  $Ca^{2+}$  存在时形成的污染层非常紧凑且对水动力有很高的抵抗力。

#### 3.2 膜物理清洗效率

膜污染进行期间若对其进行物理清洗, 在一定程度上可以使膜的过滤通量增加, 跨膜压差降低。本研究中采用的物理清洗方法是先气冲再使用超纯水依次进行反冲洗和正冲, 清洗效果比较好, 但随着时间的增加, 效率有所降低, 说明通过物理清洗虽然对膜滤能力有所恢复, 但其作用是有限的, 不能从根本上解决膜的污染问题, 清洗后期, 延长气冲和正冲的时间对通量恢复的帮助也不大。

致谢: 感谢海南立昇公司为本试验提供的中空纤维超滤膜组件及试验技术上的支持。

#### 参考文献

- 1 Ang W S, Lee S, Elimelech M. Chemical and physical aspects of cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 2006, 272 (1/2): 198~210
- 2 Li Q, Elimelech M. Organic fouling and chemical cleaning of nanofiltration membranes: measurements and mechanisms. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38 (17): 4683~4693
- 3 Li X, Li J, Fu X, et al. Chemical cleaning of PS ultrafilters fouled by the fermentation broth of glutamic acid. *Separation and Purification Technology*, 2005, 42 (2): 181~187
- 4 Tian J Y, Chen Z L, Yang Y L, et al. Consecutive chemical cleaning of fouled PVC membrane using NaOH and ethanol during ultrafiltration of river water. *Water Research*, 2010, 44 (1): 59~68

○E-mail: bcliu@scu.edu.cn

收稿日期: 2011-10-18

修回日期: 2013-07-01