

混凝/沉淀/PVC 复合膜工艺处理受污染源水的中试

陈 杰, 陈 康, 朱春伟, 袁 宵

(苏州立升净水科技有限公司, 江苏 苏州 215152)

摘 要: 针对北方受污染水源水的水质特点,基于“混凝/沉淀/PVC 复合膜”工艺,通过中试考察了 PVC 复合膜的水质净化效果和膜系统运行情况。在 PVC 复合膜出水中未检测到总大肠菌群,出水浊度平均为 0.054 NTU;复合膜对 COD_{Mn} 、余铝和藻类的平均去除率分别为 27.4%、68%、99%。以 25、30 和 35 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的膜通量运行时,TMP 均在 30 kPa 以下,PVC 复合膜的运行压力较低。气水反洗和维护性清洗能明显降低 PVC 复合膜的 TMP,缓解膜污染。膜通量为 25 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,其 TMP 基本稳定在 7.7~15 kPa;膜通量为 30 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,在加氯预处理条件下膜污染较轻;以 35 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的膜通量运行时,过滤 60 min 反洗 1 次能够有效降低膜污染;建议维护性清洗周期为 14 d。

关键词: 饮用水处理; PVC 复合膜; 膜通量; 中试

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0007-05

Pilot Study on Combined Process of Coagulation, Sedimentation and PVC Composite Membrane for Treating Polluted Source Water

CHEN Jie, CHEN Kang, ZHU Chun-wei, YUAN Xiao

(Suzhou Litree Purifying Technology Co. Ltd., Suzhou 215152, China)

Abstract: The pollutants removal efficiencies and operating characteristics of PVC composite membrane were investigated in pilot-scale experiments based on the combined process of coagulation, sedimentation and PVC composite membrane for purifying the polluted source water in northern China. The results showed that the total coliforms were not detected in membrane effluent, the effluent turbidity was 0.054 NTU on average, and the average removal rates of PVC composite membrane for COD_{Mn} , residual aluminum ion and algae were 27.4%, 68% and 99%, respectively. The trans-membrane pressure (TMP) of PVC composite membrane were always below 30 kPa when the membrane was operated at flux of 25 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 30 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and 35 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, respectively, which suggested that the PVC composite membrane was operated with low pressure. Regular air-water backwash and EFM could obviously reduce TMP and alleviate membrane fouling at the same time. The TMP was between 7.7 and 15 kPa when PVC composite membrane was operated at flux of 25 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. However, membrane fouling was lower with chlorination pretreatment at flux of 30 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and it could be effectively mitigated by a backwash after filtration duration of 60 min when PVC composite membrane was operated at the flux of 35 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Also, it suggested that the EFM period cycle was 14 days for once.

Key words: drinking water treatment; PVC composite membrane; membrane flux; pilot test

唐山市某净水厂以陡河水库为水源,陡河水库 由于受到周边生活和农业污染源以及一些开发活动

的影响,近年来营养盐含量不断增多,水库水质不断恶化,富营养化问题突出^[1],特别是夏季水库水中藻类和有机物含量较高。根据唐山市政府水专项规划要求,该水厂处理规模于2015年从现有的 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加到 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。然而,处理规模的增加,导致水厂现有“混凝/沉淀/砂滤”工艺的出水水质难以达到《生活饮用水卫生标准》的要求。

超滤膜技术是绿色物理分离技术,被称为第三代城市饮用水净化工艺的核心技术^[2]。相对于内压式膜,浸没式超滤膜占地面积小、能耗低、抗污染能力强^[3],且易于与其他工艺结合^[4,5],近年来在水处理中的应用逐渐增多。因此,该水厂拟采用浸没式PVC复合膜技术对原有的处理工艺进行升级改造,以提升水厂的处理能力和产水水质。而关于PVC复合膜在市政水厂的实际应用效果鲜有报道,为此以唐山市某净水厂的沉淀池出水(沉后水)作为研究对象,考察PVC复合超滤膜的实际应用效果,以期为该水厂的升级改造提供参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

中试装置见图1,由浸没式膜池、膜组件、抽吸泵、鼓风机、反洗泵、曝气系统、控制系统等组成。

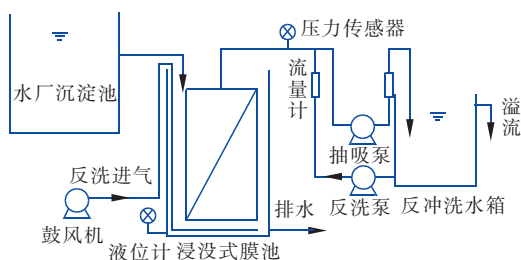


图1 中试工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale plant

PVC复合膜的公称孔径为 $0.02 \mu\text{m}$,总有效膜面积为 120 m^2 。PVC复合膜采用外压式过滤,即沉后水在抽吸泵的作用下进入膜丝内部,然后进入反冲洗水箱,即为净化水;反洗时,在反洗泵的作用下净化水从膜丝内向外流出,同时开启鼓风机,采用气水联合反洗的方式清洗膜丝。

试验装置的运行程序为“过滤→气水反洗→补水→过滤”,运行数个周期后排污,当跨膜压差(TMP)达到 50 kPa 或达到设定的运行条件时,对膜丝进行维护性清洗(EFM)。维护性清洗是将膜丝浸泡在 200 mg/L 的次氯酸钠溶液中 $30 \sim 60 \text{ min}$ 。

整个过程在PLC的控制下自动运行。

1.2 原水水质

唐山市某净水厂的原水为陡河水库水,主要存在有机物、藻类、大肠菌群等水质指标超标问题。试验于2014年7月10日—2015年1月30日进行,装置进水采用该水厂的沉后水,其主要水质指标如下:水温为 $2 \sim 31 \text{ }^\circ\text{C}$,pH值为 $7.4 \sim 8.0$,菌落总数为 $1 \sim 200 \text{ CFU/mL}$,总大肠菌群为 $0 \sim 5400 \text{ CFU}/100 \text{ mL}$,浊度为 $0.85 \sim 8.20 \text{ NTU}$, COD_{Mn} 为 $2.40 \sim 6.40 \text{ mg/L}$,氨氮为 $0.176 \sim 0.512 \text{ mg/L}$,藻类为 $(214.5 \sim 707.2) \times 10^4 \text{ 个/L}$,铝离子为 $0.038 \sim 0.240 \text{ mg/L}$ 。

1.3 试验设计

以水厂沉淀池出水作为超滤膜设备的进水,旨在考察不同运行通量下,超滤膜系统的运行情况以及出水水质,以确定混凝/沉淀/PVC复合膜组合工艺处理北方受污染水源水的适宜运行参数。运行通量分别设置为 $25, 30$ 和 $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (记作工况1~3),其他运行参数均相同:过滤时间为 90 min ,曝气时间为 30 s ,气水反洗时间为 60 s ,水洗强度为 $70 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,气洗强度为 $50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,维护性清洗时间为 $7 \sim 14 \text{ d}$ 。

1.4 检测项目及方法

水温:水银温度计;pH值:电极法;菌落总数:平板计数法;大肠杆菌:多管发酵法;浊度:浊度仪; COD_{Mn} :酸性高锰酸钾氧化法;氨氮:纳氏试剂光度法;藻类:显微镜计数法;铝离子:铬天青S分光光度法;跨膜压差:系统自动监测并记录。

2 结果与讨论

2.1 对微生物的去除效果

试验期间检测了沉后水和膜出水中细菌总数和总大肠菌群的变化,结果如表1所示。

表1 沉后水和膜出水中细菌总数和总大肠菌群数

Tab. 1 Concentration of total bacterial count and coliforms in effluent of sedimentation and membrane unit

项 目	细菌总数/ (CFU · mL ⁻¹)		总大肠菌群/ (CFU · 100 mL ⁻¹)	
	沉后水	膜出水	沉后水	膜出水
工况1	57 ± 57	1 ± 1	1060 ± 557	未检出
工况2	47 ± 42	1 ± 1	1038 ± 677	未检出
工况3	59 ± 33	未检出	1016 ± 827	未检出

沉后水中细菌总数和总大肠菌群数均波动较大,但膜出水中细菌总数为个位数或未检出、总大肠菌群均未检出,PVC复合膜对细菌总数的去除率在

99% 以上,大肠菌群基本上 100% 被去除。可见,PVC 复合膜对细菌和大肠杆菌具有较高的去除率。

2.2 对浊度的去除效果

试验期间,沉后水的浊度基本维持在 1.0 NTU 以上,且具有一定的波动性;而 PVC 复合膜出水浊度稳定在 0.1 NTU 以下,平均为 0.054 NTU,平均去除率达 95% 以上。由此可见,PVC 复合膜对浊度的去除率高且去除效果稳定。由于被去除的悬浮物、胶体是水中各种细菌和病毒等微生物的载体,所以超滤几乎能去除全部致病微生物。由于出水浊度低,在对滤后水进行消毒时可大幅度降低氯消毒剂的用量,这使得消毒副产物的生成量大大减少,从而提高了出厂水的化学安全性。

2.3 对 COD_{Mn} 的去除效果

PVC 复合膜对 COD_{Mn} 的去除效果见图 2。沉后水中 COD_{Mn} 的含量为 (3.93 ± 0.65) mg/L,膜出水中 COD_{Mn} 的含量为 (2.84 ± 0.40) mg/L,PVC 复合膜对 COD_{Mn} 的平均去除率为 27.4%,这表明,PVC 复合膜对 COD_{Mn} 有一定的去除效果但去除能力有限。主要原因在于 COD_{Mn} 反映的是较小分子质量的有机物,膜对 COD_{Mn} 的去除主要是依靠膜丝表面的滤饼层以及膜自身的吸附截留作用,当膜孔径相对较大时,对这类有机物的过滤截留效果则较差^[6]。

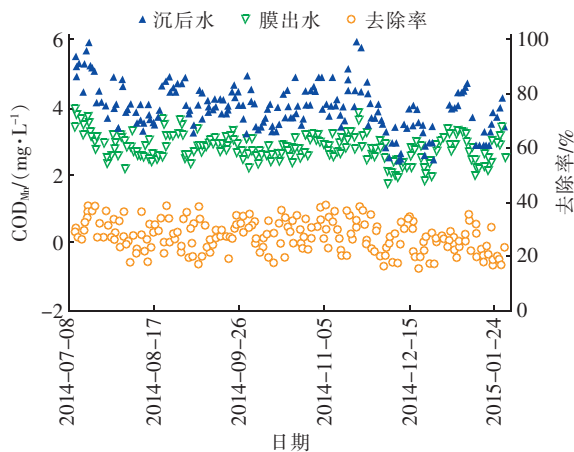


图 2 PVC 复合膜对 COD_{Mn} 的去除效果

Fig. 2 COD_{Mn} removal by PVC composite membrane

2.4 对氨氮的去除效果

试验期间,沉后水中氨氮浓度大多低于 0.5 mg/L,经 PVC 复合膜处理后,氨氮浓度变化不大,膜出水氨氮浓度在 0.3 mg/L 左右,PVC 复合膜对氨氮的去除率平均约为 9%。这是由于受 PVC 复合膜孔

径的限制,使其对氨氮等小分子物质的去除能力有限。但是,该水厂沉淀池出水中氨氮含量已基本达到国标要求,因此,采用 PVC 复合膜技术对该水厂进行提标改造,对水厂出水氨氮浓度没有任何影响。

2.5 对藻类的去除效果

由于陡河水库水夏季存在藻类问题,因此,研究了 PVC 复合膜对藻类的去除效果,沉后水和膜出水中藻类含量的变化如图 3 所示。沉后水中藻类的含量在 200×10^4 个/L 以上,尤其是膜通量为 35 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,藻类平均为 640×10^4 个/L,但经 PVC 复合膜过滤后,藻类的含量基本在 5 个/L 以下,PVC 复合膜对藻类的去除率平均为 99%。

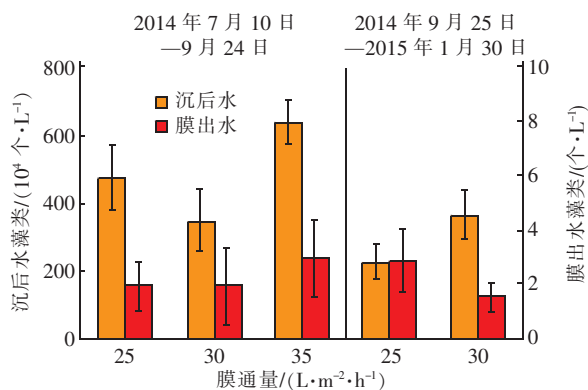


图 3 PVC 复合膜对藻类的去除效果

Fig. 3 Algae removal by PVC composite membrane

2.6 对余铝的去除效果

试验期间,分别测定了沉后水和膜出水中余铝的含量,结果如图 4 所示。

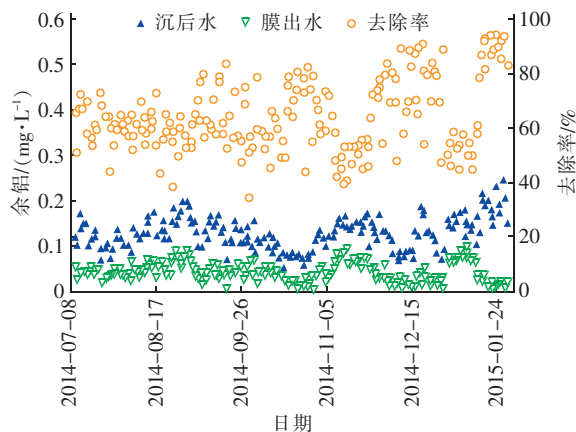


图 4 PVC 复合膜对余铝的去除效果

Fig. 4 Residual aluminum ion removal by PVC composite membrane

水厂因絮凝剂的投加,在沉后水中偶尔会有余

铝值超标的现象。沉后水中余铝的含量为 0.038 ~ 0.240 mg/L,膜出水中余铝含量为 0.008 ~ 0.097 mg/L,PVC 复合膜对余铝的去除率平均为 68%。PVC 复合膜对余铝的去除,可能是由于铝离子吸附于胶体等大分子有机物中而被膜截留。

2.7 膜污染情况分析

采用恒通量出水模式,通过观察跨膜压差(TMP)的变化来衡量 PVC 复合膜的污染情况。

2.7.1 膜通量为 25 L/(m²·h)

膜通量为 25 L/(m²·h)时,PVC 复合膜在进水温度为 26 ~ 31 °C 和 2 ~ 5 °C 的情况下分别运行了 13、31 d,TMP 的变化如图 5 所示。膜系统进水温度在 26 ~ 31 °C 时,TMP 基本维持在 7.7 ~ 15 kPa,且仅在水反洗的情况下即可恢复初始的跨膜压差,说明膜污染情况不明显;当膜系统进水温度为 2 ~ 5 °C 时,TMP 开始在 14 ~ 30 kPa 之间,运行 14 d 并进行维护性清洗后,TMP 有所降低,最后稳定在 15 kPa 左右。由此可见,PVC 复合膜以 25 L/(m²·h)的膜通量运行时,运行压力较低,膜污染较轻;在低温条件下,以 14 d 为周期进行维护性清洗,有利于缓解膜污染情况。

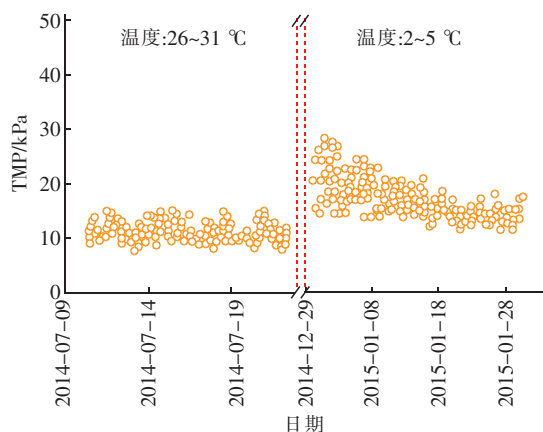


图5 膜通量为 25 L/(m²·h)时 TMP 的变化

Fig. 5 TMP variations of PVC composite membrane at flux of 25 L/(m²·h)

2.7.2 膜通量为 30 L/(m²·h)

PVC 复合膜以 30 L/(m²·h)的膜通量运行时,TMP 的变化如图 6 所示。其中,在膜系统进水温度为 24 ~ 30 °C 时,共运行 41 d,期间复合膜的 TMP 在 7 ~ 16 kPa 之间变化,但值得注意的是,由于水厂原水中 COD_{Mn}和藻类含量的增加,在该运行阶段增加了前加氯工艺。研究表明^[7],加氯消毒有助于缓解

超滤膜污染。

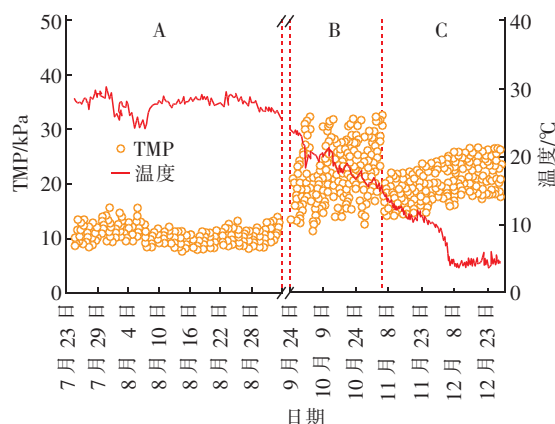


图6 膜通量为 30 L/(m²·h)时 TMP 的变化

Fig. 6 TMP variations of PVC composite membrane at flux of 30 L/(m²·h)

当膜系统进水温度为 15 ~ 24 °C 时,PVC 复合膜共运行 41 d,期间共进行 3 次维护性清洗,TMP 的变化如图 6 中的 B 区所示。可以看出,当进水温度持续性降低且没有前加氯工艺时,TMP 迅速上升,说明膜污染较严重,但经过维护性清洗后,TMP 基本能够恢复到 10 kPa 左右。

为进一步考察膜通量为 30 L/(m²·h)时 PVC 复合膜的运行情况,将原有的过滤 90 min 反洗 1 次更改为过滤 60 min 反洗 1 次,其他运行参数不变,期间膜进水温度为 4 ~ 14 °C,共运行 54 d,TMP 的变化如图 6 中的 C 区所示。可以看出,当进水温度在 10 ~ 14 °C 时,TMP 在 13 ~ 24 kPa 之间;当进水温度降到 10 °C 以下时,TMP 有所升高,但基本维持在 15 ~ 27 kPa。说明在低温条件下 PVC 复合膜以 30 L/(m²·h)的膜通量运行时,降低过滤时间能在一定程度上缓解膜污染。

综上所述,膜通量为 30 L/(m²·h)时,增加前加氯工艺或降低过滤时间均有利于 PVC 复合膜的运行。

2.7.3 膜通量为 35 L/(m²·h)

PVC 复合膜以 35 L/(m²·h)的膜通量运行期间,膜系统进水温度为 21 ~ 25 °C。在过滤 90 min 反洗 1 次的条件下运行时,TMP 呈现出持续增长趋势(如图 7 所示),说明 PVC 复合膜的污染情况较为严重,主要原因可能包括:①夏季高温条件下,沉后水中藻类的含量较高,藻类附着于膜丝表面造成膜污染加重;②膜组件的运行通量较高、反洗周期较

长,膜丝表面易形成滤饼层,也有利于颗粒在滤饼层的聚集,导致滤饼层的孔径越来越小。在将过滤周期缩短至 60 min 反洗 1 次时,TMP 明显降低且基本稳定在 14.7 ~ 25.2 kPa。由此可见,膜通量为 35 L/(m² · h)时,PVC 复合膜在过滤 60 min 反洗 1 次的条件下运行更稳定。

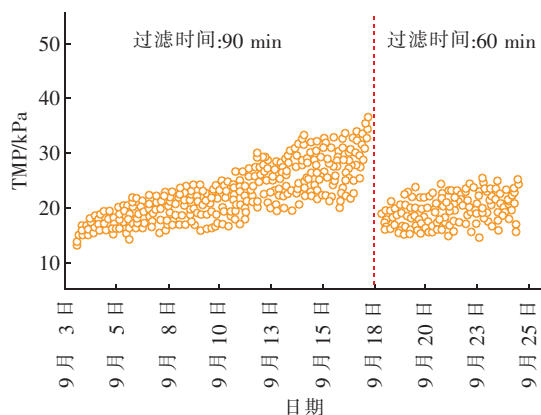


图 7 膜通量为 35 L/(m² · h)时 TMP 的变化

Fig. 7 TMP variations of PVC composite membrane at flux of 35 L/(m² · h)

3 结论

① PVC 复合膜的出水水质稳定性高,其中,膜出水浊度平均为 0.054 NTU、细菌总数为个位数、总大肠菌群始终未检出;PVC 复合膜对有机物具有一定的去除效果,膜出水 COD_{Mn} 含量平均为 2.84 mg/L,对 COD_{Mn} 的去除率平均为 27.4%。此外,PVC 复合膜对余铝的去除率达到 68%,对藻类的去除率达到 99%。

② PVC 复合膜的运行压力低,膜通量为 25 L/(m² · h)时,TMP 基本维持在 7.7 ~ 15 kPa;膜通量为 30 和 35 L/(m² · h)时,TMP 基本在 30 kPa 以下。此外,维护性清洗能明显降低 PVC 复合膜的 TMP,缓解膜污染情况。

③ 在工程化应用中,PVC 复合膜以 25 L/(m² · h)的膜通量运行时,建议过滤时间为 90 min;以 30 L/(m² · h)的膜通量运行时,建议增加前加氯处理工艺;以 35 L/(m² · h)的膜通量运行时,建议过

滤时间为 60 min;维护性清洗周期建议为 14 d 左右。

参考文献:

- [1] 郑辉,许文超. 陡河水库浮游植物群落特征及水质评价[J]. 水生态学杂志,2011,32(2):47-51.
- [2] 李圭白,杨艳玲. 第三代城市饮用水净化工艺——超滤为核心技术的组合工艺[J]. 给水排水,2007,33(4):1-2.
- [3] Tian J Y,Xu Y P,Chen Z L,et al. Air bubbling for alleviating membrane fouling of immersed hollow-fiber membrane for ultrafiltration of river water[J]. Desalination, 2010,260:225-230.
- [4] Huang H,Schwab K,Jacangelo J G. Pretreatment for low pressure membranes in water treatment;a review[J]. Environ Sci Technol,2009,43(9):3011-3019.
- [5] 夏圣骥,李圭白,张军,等. 混凝/超滤去除地表水中颗粒物[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(10):1567-1660.
- [6] 张艳,李圭白. 混凝沉淀—浸没式超滤膜处理东江水的中试研究[J]. 中国给水排水,2009,25(11):37-39.
- [7] 叶挺进,梁恒,曹国栋,等. 二氧化氯和超滤组合处理微污染水[J]. 给水排水,2010,36(8):20-24.



作者简介:陈杰(1978-),男,安徽界首人,博士,高级工程师,研究方向为饮用水安全保障、膜法水处理工艺的研发与工程化应用。

E-mail:hitchenjie@163.com

收稿日期:2016-10-08