

絮凝/陶瓷超滤组合工艺用于微污染地表水处理的中试研究

王宗恒, 于滨玮, 章小同, 张连健, 光亮, 沈凡凡, 万继伟,
唐志兰, 常冬杰, 徐德刊, 周 邢, 彭文博*

(江苏久吾高科技股份有限公司, 南京 211800)

摘要: 研究了以陶瓷超滤膜为核心的絮凝/超滤组合工艺用于处理微污染地表水的效果. 实验结果表明, 絮凝剂的投加量和原水温度都是影响体系处理能力的关键因素, 其中温度与产水通量呈线性变化趋势, 温度每降低 1 °C 产水通量约降低 2.98 L/(m² · h); 跨膜压力也是影响通量的关键因素, 较高的跨膜压力提升膜通量, 同时也会造成周期内膜污染的快速形成. 中试结果表明, 絮凝/超滤组合工艺出水浊度为 0.1 NTU, 浊度去除率为 98.8%, 高锰酸盐指数去除率为 14.02%, 微生物指标符合生活饮用水卫生标准, 该工艺在 60 d 连续运行中系统保持良好的工作性能, 恒压 0.1 MPa 下平均膜产水通量达到 155 L/(m² · h), 实现了絮凝/超滤组合工艺在地表水处理中的应用探索.

关键词: 陶瓷超滤膜; 絮凝; 微污染地表水; 产水通量

中图分类号: TQ051; TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2024)05-0156-09

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2024.05.019

随着我国经济水平的不断提高, 城市化工业化进程不断加剧, 生活污水和工业废水的过量排放造成了全国部分河流流域不同程度的污染^[1]. 人类对水资源的无节制开发和利用造成了水资源短缺和水源地污染, 在饮水方面传统净水工艺已经难以满足饮用水水质的要求, 给现有净水工艺提出了更高要求.

膜过滤技术是近年来新兴的深度水处理技术, 根据膜过滤精度的不同将其划分为微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)以及反渗透(RO). 在饮用水处理中应用最常见的膜处理工艺是超滤膜处理工艺, 其精度范围(0.001~0.1 μm)对浊度、大肠杆菌菌

群、菌落总数以及高锰酸盐指数都有较为良好的处理效果^[2-3]. 同时国内外众多研究指出, 絮凝/超滤工艺流程短, 占地面积小, 处理出水水质高, 抗水质波动能力强, 特别适用于微污染地表水的处理^[4-5]. 国内众多研究中主要以有机超滤膜为主, 但有机超滤膜易发生膜孔堵塞且恢复困难、易受原水水温及水质波动的影响, 严重时会出现断丝现象, 直接影响出水水质以及系统使用寿命.

近年来, 关于无机陶瓷膜的研究和讨论逐渐受到关注, 其优良的化学稳定性、耐污染性、高适应性、分离效率高等特点已经广泛应用于化工、食品以及水处理等领域^[6]. 与有机膜相比陶瓷膜的特点主要

收稿日期: 2024-03-12; 修改稿收到日期: 2024-07-03

第一作者简介: 王宗恒(1986-), 男, 山东济南人, 工程师, 主要研究方向为膜法水处理技术. * 通讯作者, E-mail: pengwenbo@jiuwu.com

引用本文: 王宗恒, 于滨玮, 章小同, 等. 絮凝/陶瓷超滤组合工艺用于微污染地表水处理的中试研究[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(5): 156-163.

Citation: Wang Z H, Yu B W, Zhang X T, et al. Combined flocculation/ceramic ultrafiltration process using in the pilot study of micro-polluted surface water treatment[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2024, 44(5): 156-163.

表现在:(1)机械强度高,可适用于高压且不容易氧化、化学腐蚀而造成老化;(2)化学稳定性好,抗水质波动能力强,能够在较为苛刻的环境下平稳运行;(3)清洗恢复性能高,陶瓷膜亲水性比有机膜更优,污染物不易在膜表面富集^[7],可采取反冲洗或化学清洗的方式使处理效果得以恢复;(4)使用寿命长,有报道指明陶瓷膜在饮用水处理领域最长使用寿命超过 20 年^[8]; (5)通量高,陶瓷膜相比于有机膜孔隙率更高、孔道分布更均匀,单位面积产量高. 并且随着技术发展和规模化生产,陶瓷膜的应用成本和生产成本均得到了大幅度下降,单位运行成本和有机膜系统基本持平,全寿命周期投资成本略高于有机膜系统. 从长期来看陶瓷膜可以形成对有机膜的优势替代,实现规模应用.

陶瓷膜与絮凝的组合工艺在处理地表水方面有诸多研究. 絮凝剂的添加可以使较小的颗粒形成大颗粒,进而形成一层多孔的滤饼,可减少膜的堵塞和使用周期,降低运行成本,而同时陶瓷膜又拥有良好的去除浊度的功能,二者结合可以很好的提高固体颗粒、有机物及消毒副产物的去除率. Lerch 等^[9]利用陶瓷膜与絮凝工艺联合处理地表水,结果表明该工艺可以在 80 L/(m² · h)的通量下稳定运行,膜污染是由于絮凝无法去除的有机物而导致的; Meng 等^[10]考察了絮凝/陶瓷膜处理系统的性能、膜污染及最佳运行条件,结果表明系统在无曝气和反冲洗的情况下运行 8 h,通量为 150 L/(m² · h). 整体而言,对于絮凝/陶瓷膜超滤工艺的探索研究已有了初步的理论基础,对于更大膜面积处理效果、更长运行周期稳定情况以及操作参数的深入探索还鲜有报道,因此针对絮凝/陶瓷膜超滤工艺的中试实验不仅可以验证之前的研究结论,同时也为陶瓷膜在地表水处理领域的工业放大提供数据支撑.

本实验以微污染地表水源为处理对象,探究絮凝/陶瓷超滤工艺在不同操作条件下的运行情况,同时验证膜在连续运行过程中的稳定性.

1 实验部分

1.1 原水水源和水质

本实验所用原水来自地表渗流和雨水收集而形成的微污染地表湖水,其主要的水质指标如表 1 所示.

表 1 原水水源水质
Table 1 Raw water source quality

| 水质指标 | 范围 | 均值 | Ⅳ 水指标* |
|--|-----------|-------|--------|
| COD _{Cr} /(mg · L ⁻¹) | 21~27 | 25 | 20~30 |
| 浊度/NTU | 5~12 | 8.3 | |
| pH | 6.8~7.2 | 7.1 | 6~9 |
| 水温/℃ | 5~22 | 13 | |
| 五日生化需氧量(BOD ₅) | 5~8 | 7 | 4~6 |
| 氨氮/(mg · L ⁻¹) | 0.25~0.38 | 0.287 | 1~1.5 |
| 铜/(mg · L ⁻¹) | 未检出 | 未检出 | ≤1 |
| 铬(六价)/(mg · L ⁻¹) | 0.01~0.03 | 0.017 | ≤0.05 |
| 高锰酸盐指数/(mg · L ⁻¹) | 3.28~8.58 | 7.15 | 6~10 |

* 数据来源于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》.

根据数据可知,该微污染地表水水质接近为Ⅳ类水,受到一定程度的有机物以及悬浮颗粒物的污染,且并未受到重金属污染及有毒物质的污染,具有一定的代表性.

1.2 膜材料和膜组件

本实验所采用的陶瓷超滤膜是由江苏久吾高科技股份有限公司制造生产的,其组件样式和膜材料电镜微观形态如图 1 所示.

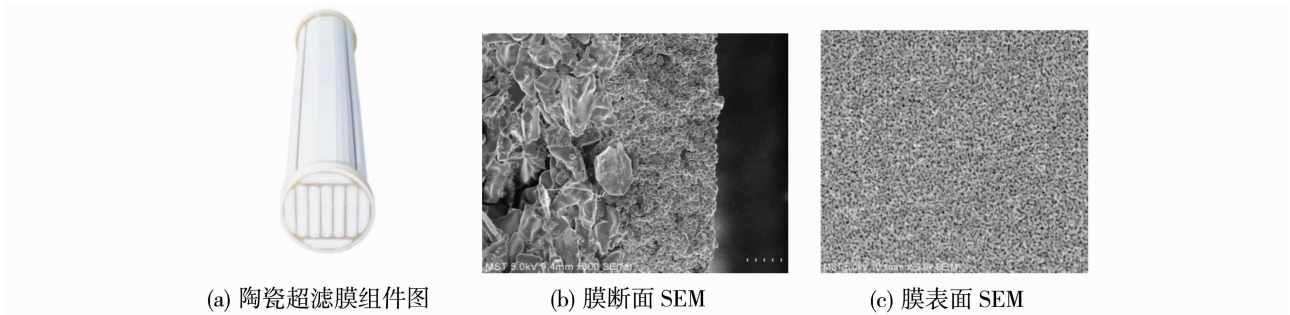


图 1 陶瓷超滤膜组件及膜扫描电镜图

Fig. 1 Diagram of ceramic ultrafiltration membrane module and SEM images of membrane

本实验所采用的陶瓷超滤膜材料具体参数如表 2 和图 2 所示,采用的是具有较高装填面积的陶瓷膜,有效过滤面积为 15 m²,主要材质为 Al₂O₃,平均孔径为 0.055 1 μm.

表 2 膜材料参数表

Table 2 Membrane material parameters

| 项目 | 膜材料参数 |
|----------------------|--------------------------------|
| 膜材质 | Al ₂ O ₃ |
| 膜孔径/μm | 0.05 |
| 膜通道直径/mm | 3.6 |
| 总装填面积/m ² | 15 |
| 截留分子量 | 1 000 000 |

1.3 实验工艺流程

本实验采用“絮凝/陶瓷膜超滤”工艺路线,陶瓷超滤膜过滤采用微错流过滤模式,控制膜面流速在 0.8~2 cm/s,絮凝方式采用在线絮凝方式,絮凝剂

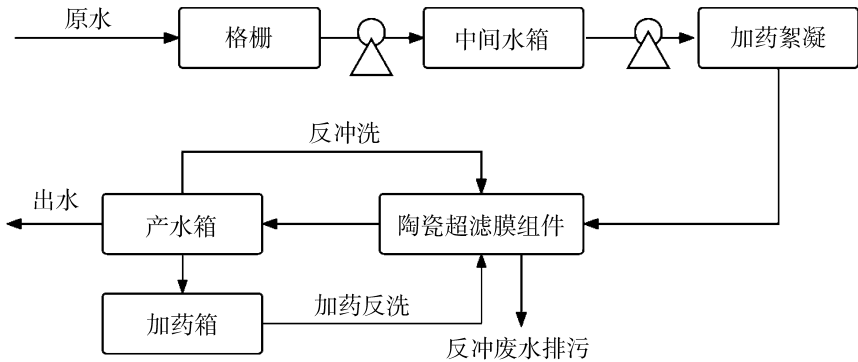


图 3 工艺流程图

Fig. 3 Process flow diagram

整个系统采用 PLC 控制,可实现全天 24 h 无人值守,具体系统运行参数如表 3 所示.

表 3 系统运行参数

Table 3 Membrane material parameters

| 系统项目 | 参数 |
|---|-------|
| 进水流量/(m ³ · h ⁻¹) | 3~4 |
| 絮凝剂投加量/(mg · L ⁻¹) | 30~60 |
| 反冲(BW)周期/min | 60~90 |
| 化学加强反洗(CEB)周期/d | 1~3 |
| 化学清洗(CIP)周期/d | 7 |

1.4 主要分析方法和仪器

- (1) 浊度测定:采用 2100P 便携式浊度仪(美国哈希公司)测定浊度;
- (2) COD_{Cr} 测定:采用重铬酸盐法进行测定 COD;
- (3) pH 测定:采用 pHS-25 型 pH 计(上海雷

采用聚合氯化铝(PAC,有效 Al 质量分数≥29%),减小了原有絮凝沉淀池的占地面积,实现短流程工艺,具体的实验工艺路线如图 3 所示.

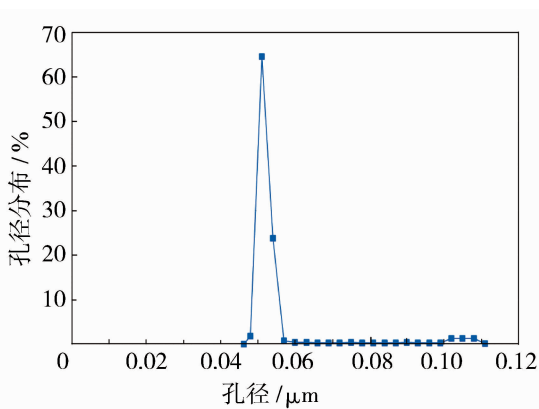


图 2 孔径分布曲线

Fig. 2 Pore size distribution curve

- 磁有限公司)分析;
- (4) 扫描电子显微镜:采用 JSM-5900 型(日本 JEOL 公司)扫描电子显微镜分析观察膜表面和断面形貌,扫描电镜采用二次电子信号成像得出表面形貌. 测样时将样品台上粘贴好导电胶带,再把样品粘到胶带上,真空喷金后,将喷金试样置于扫描电镜下,在适宜的放大倍数和扫描电压下得出样品的扫描电镜形貌.
- (5) 平均孔径测定:采用 PSDA-30 型微滤膜孔径分析仪(南京高谦功能材料科技有限公司)利用泡压法测量膜材料的平均孔径.

2 结果与讨论

本实验以微污染地表水作为实验对象,考察了絮凝剂投加量、跨膜压力、温度等操作因素对于陶瓷超滤膜通量的影响,并且通过长期实验验证

系统运行的稳定性,为后续以陶瓷超滤膜为核心的絮凝/超滤组合工艺的工程化应用提供实验数据支持。

2.1 絮凝剂的投加量对絮凝/超滤工艺通量的影响

絮凝剂的投加使得水中的胶体、颗粒物质以及带负电的疏水性大分子有机物相互凝聚吸附形成絮体,从而降低了膜表面的污染物负荷。絮体的大小和

成熟度不仅体现了絮凝效果的好坏,而且还会对陶瓷超滤膜产水通量和运行稳定性产生影响。絮凝效果不明显,水中残留的中性、亲水混合物无法沉积在结构松散的絮体结构上,与膜表面直接接触从而加重膜污染导致通量下降,处理能力降低^[11]。图4展示的是陶瓷超滤膜在跨膜压力 0.04 MPa 条件下不同絮凝剂投加量对膜产水通量的影响。

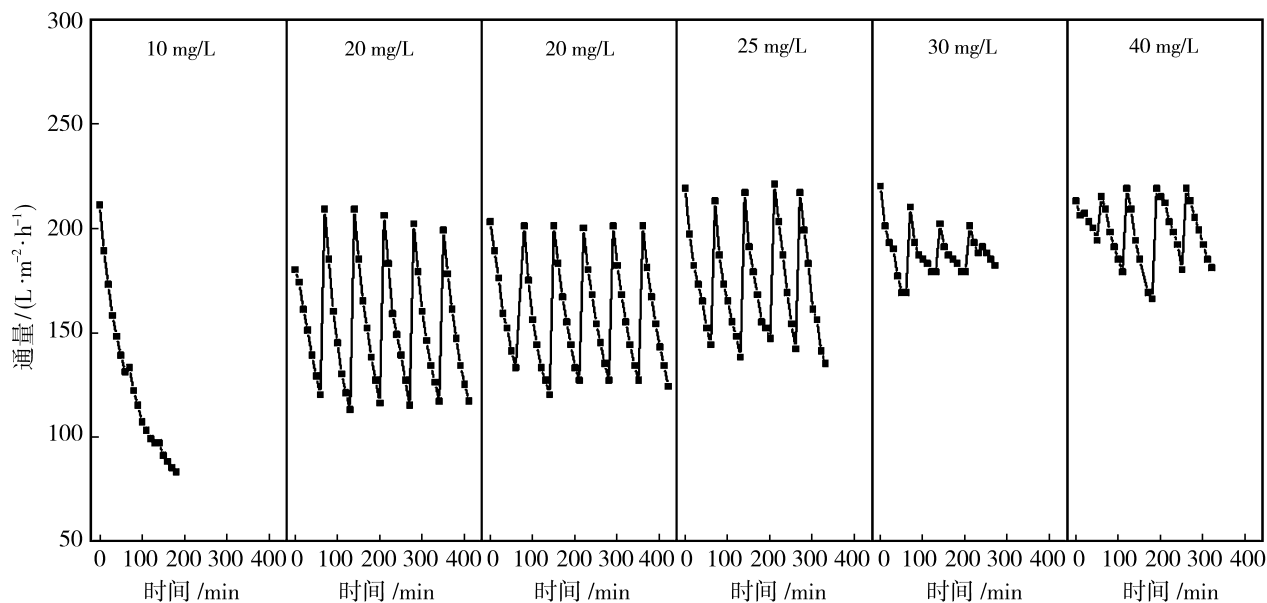


图4 不同絮凝剂投加量对产水通量的影响

Fig. 4 Influence of different dosage of flocculant on water production flux

从图4可以看出,絮凝剂投加量在10~40 mg/L内,絮凝剂投加量越少,陶瓷超滤膜每个运行周期内的平均产水通量越小。絮凝剂投加量为10 mg/L时,该运行周期内随着运行时间的增长陶瓷超滤膜的产水通量快速下降,运行180 min后产水通量由初始的210 L/(m²·h)下降至83 L/(m²·h),同时运行时间内进行了两次反冲操作,反冲后的通量分别为133和97 L/(m²·h),说明当絮凝剂投加量低时通量下降且无法通过反冲操作恢复通量。增加絮凝剂投加量,运行周期内陶瓷超滤膜平均产水通量增大,从20 mg/L增加至30 mg/L时,周期平均通量由155 L/(m²·h)增大至200 L/(m²·h)。这表明在絮凝剂投加量较低的时候,絮凝效果不明显,较小的固体颗粒和胶体通过膜过滤时会附着在膜表面或堵塞膜通道导致通量的快速下降,同时由于固体微粒造成的深层次污染无法通过反冲洗恢复,造成了通量随着运行时间持续下降的趋势。需要指出的是,当絮凝剂投加量为30和40 mg/L时两者的平

均通量相差无几。有研究指明,随着絮凝剂加入量的增加,胶体颗粒先是发生吸附脱稳而聚并沉降,当加入量增大时,胶体颗粒在脱稳之后出现了复稳状况,从而使体系絮凝效率降低^[12],胶体颗粒的脱稳也会影响膜过滤的高效运行。说明存在一个最佳絮凝剂投加量,使体系达到最佳絮凝效果,而絮凝剂的过量加入不仅使产水通量增加不明显,还会增加后期运营成本造成资源浪费。因此在实际的应用中需根据原水水质通过絮凝剂投加实验测定出合适的投加量,以保障膜系统的高效运行。

2.2 温度变化对絮凝/超滤工艺通量的影响

温度是影响膜体系高效运行的关键因素之一,本实验分别选择30℃环境气温(水温范围20~22℃)以及12℃环境气温(水温范围7~9℃)条件下探讨了陶瓷超滤膜产水通量变化趋势,结果如图5所示。

为保证数据的横向可对比性,实验均在跨膜压力0.1 MPa、絮凝剂投加量30 mg/L的条件下进

行. 在高温条件下, 运行周期内平均产水通量稳定在 170~180 L/(m² · h), 而在低温条件下平均产水通量维持在 153~161 L/(m² · h), 通量下降了约 15%~20%. 温度越低, 水的黏度越大, 则水的流动性就越差, 使得过滤时阻力变大, 阻碍膜表面溶质向膜主体方向移动, 形成浓差极化现象对膜通量产生影响, 从而降低了过滤速率^[13]. 因此温度越高越有利于陶瓷超滤膜的过滤能力.

为了探究温度-通量的相互影响关系, 实验在长期运行情况下测量了不同温度条件下的产水通量变化, 如图 6 所示.

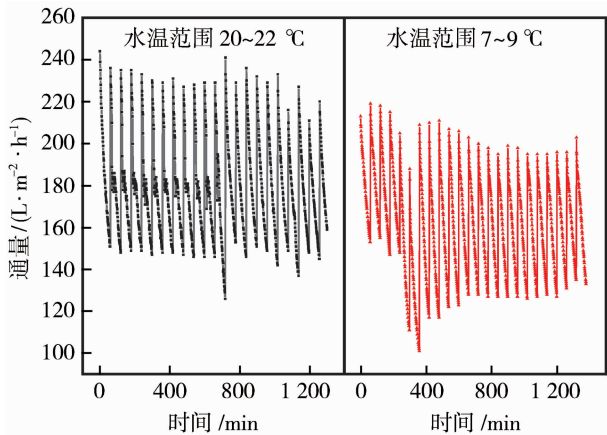


图 5 不同温度对产水通量的影响

Fig. 5 Influence of different temperature on water production flux

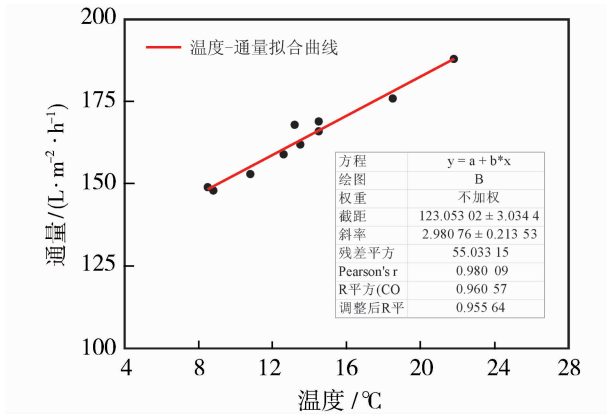


图 6 温度-通量拟合曲线

Fig. 6 Temperature-flux fitting curve

由拟合曲线可知数据呈线性分布, 且 $R^2 = 0.96$, 说明温度-通量具有一定的相关性, 该线性回归方程式为 $y = 2.98x + 123.053$, 因此在该体系下利用陶瓷超滤膜处理微污染地表水时, 温度每降低 1 °C 通量约降低 2.98 L/(m² · h), 对后续工程规模

化应用校核温度变化对膜设计通量的影响提供了有力支撑.

温度对通量的影响很大一部分原因是由于水体黏度受温度作用而变化. 图 7 所展示的是实验水体黏度在不同温度下的变化趋势. 由图 7 可知, 在温度降低的过程中黏度不断增加, 黏性大水体流动性差, 单位时间内陶瓷膜处理量降低, 同时流动性差也会导致污染物能够在膜表面进行积累, 导致膜污染现象引起通量的降低. 温度除了对水体黏度有影响以外, 还会对其组分和特性有何影响, 进而造成陶瓷膜通量的变化, 仍需后续进行研究讨论.

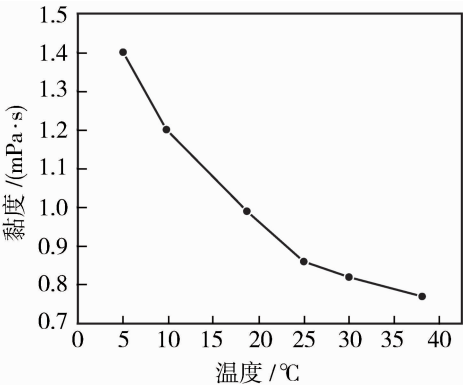


图 7 温度-黏度变化曲线

Fig. 7 Temperature-viscosity curve

2.3 跨膜压力对絮凝/超滤工艺通量变化的影响

跨膜压力也是影响陶瓷超滤膜的重要操作因素, 是膜过滤过程的推动力, 对于膜的过滤通量有着至关重要的影响. 较低的跨膜压力不利于高产水通量的实现, 而高跨膜压力又会导致膜污染的加剧, 使得膜系统运行周期变短, 同时在工程化应用方面高跨膜压力带来系统能耗的加大, 运行成本增加. 以下将讨论跨膜压力对于陶瓷超滤膜产水通量的影响.

如图 8 所示, 在其他外部操作条件相同的情况下(絮凝剂浓度 30 mg/L, 水温 18~20 °C, 回收率 > 92%), 随着跨膜压力的不断增加, 运行周期内平均通量从 163 L/(m² · h) 增加至 177 L/(m² · h), 这表明跨膜压力的增加使得水透过膜时的驱动力增加, 提高了产水水量, 增强了整体的处理能力. 同时要注意的是, 随着跨膜压力的不断增加, 周期内通量的下降幅度也在增加. 由图 9 可知, 在 60 min 的过滤周期内, 跨膜压力 0.05 MPa 条件下周期内的通量从 179 L/(m² · h) 降低至 144 L/(m² · h), 下降幅度为 35 L/(m² · h), 而在跨膜压力 0.1 MPa 下周期通量从 235 L/(m² · h) 降低至 130 L/(m² · h).

h),下降幅度为 $105\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. 由数据分析可知,增加跨膜压力可以提升初始通量,保证平均通量的增加,但较高的跨膜压力会导致周期内通量下降速率的增加. 这是因为提升跨膜压力增加产水通量的同时也会加剧浓差极化的影响,污染物通过吸附、孔隙堵塞和滤饼或凝胶等多种作用机制影响通量的稳定,随着时间的推移,在一定的跨膜压差下,陶瓷超滤膜渗透性不断下降,缩短了膜正常过滤使用时

间^[14]. 因此,在实际应用中需要探究合适的跨膜压力参数,这对于降低能耗,获得较高膜通量,以及避免膜污染造成的条件恶化都具有非常重要的意义.

2.4 絮凝/超滤工艺连续运行情况

陶瓷超滤膜组件在维持跨膜压力 0.1 MPa ,控制回收率 $>92\%$ 的条件下连续运行 60 d ,其产水通量和温度变化如图 10 所示,其中通量数据和温度数据均以平均数展现.

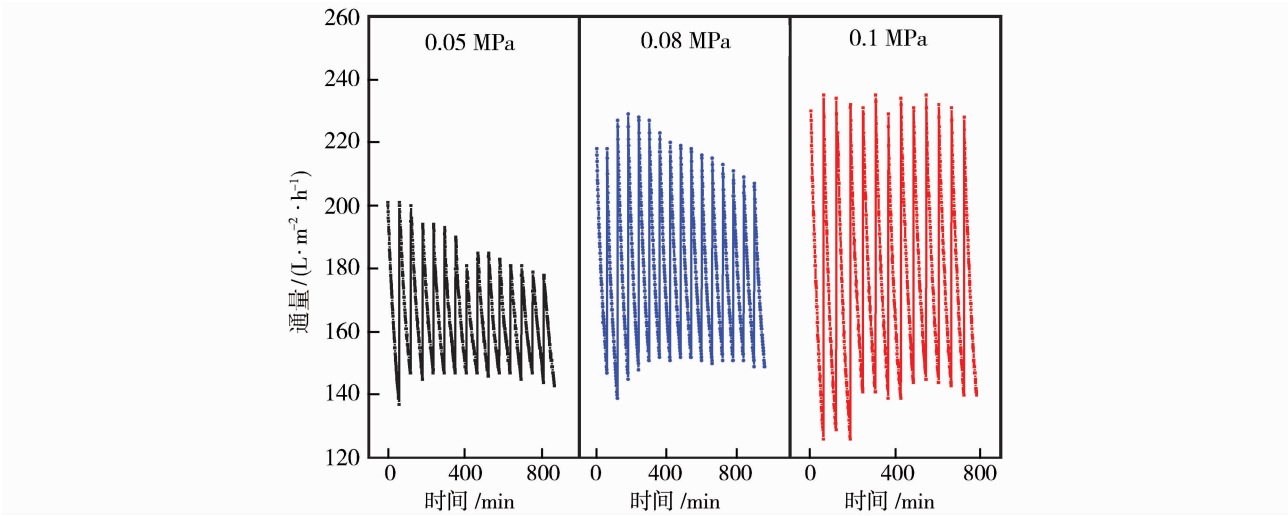


图 8 跨膜压力对产水通量的影响

Fig. 8 Influences of transmembrane pressures on water production fluxes

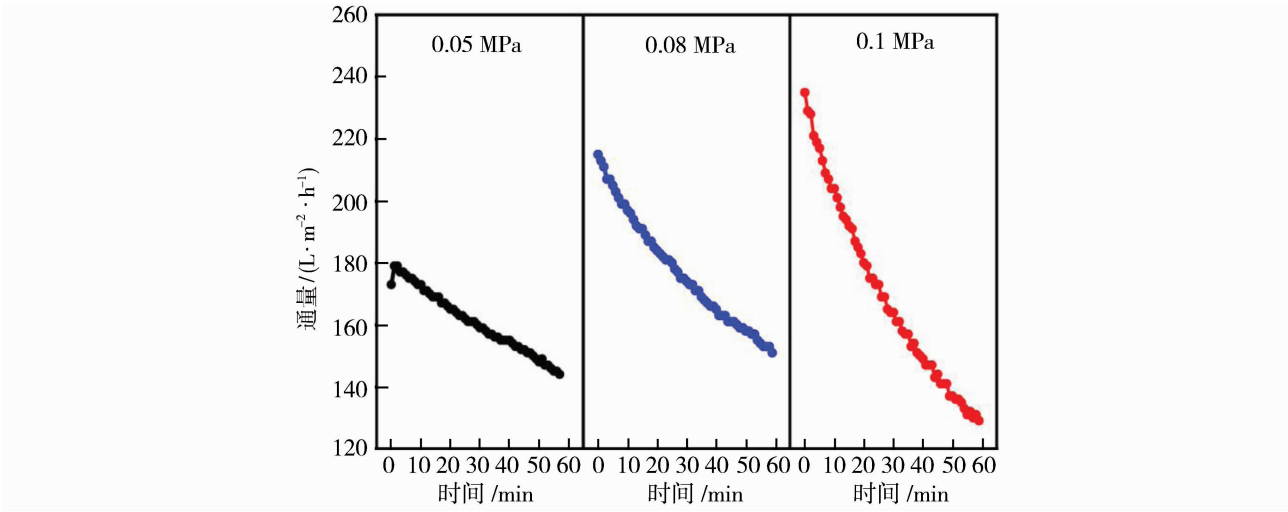


图 9 周期内跨膜压力对通量的影响

Fig. 9 Influence of transmembrane pressure on flux during a cycle

由图 10 可知,整个实验周期内温度波动范围大(温差范围 $5\sim22\text{ }^{\circ}\text{C}$),并且在运行期间经历过雨雪等恶劣天气影响,同样也可以实现平稳运行工作. 60 d 内的整体平均通量为 $155\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. 同时需

要指出的是,产水通量随着温度的变化趋势是明显的,当温度下降时通量从最高 $190\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 下降至 $120\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,说明温度变化对过滤性能的影响不能忽略. 针对恒压过滤方式,虽然在合适的跨膜

压力下能够延长使用时间和寿命,但是季节温度的影响会使得产水水量出现波动,因此在采用恒压过滤的操作方式时需要注意季节温度变化导致的产水通量的变化,必要时可添加膜组件来维持出水水量的稳定.

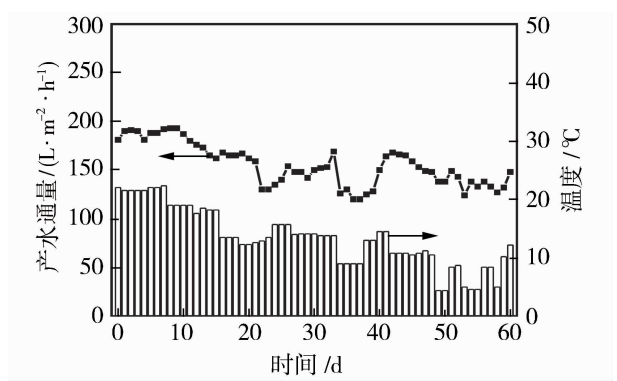


图 10 连续运行时通量及温度变化
Fig. 10 Flux and temperature changes during continuous operation

2.5 水质情况

在连续实验过程中针对原水和膜产水水质进行了比较,表 4 列出了陶瓷超滤膜的过滤水水质分析情况.

表 4 原水及产水水质分析结果

Table 4 Analysis results of raw water and produced water quality

| 分析指标 | 原水 | 过滤产水 | 饮用水指标限值* |
|--|--------|--------|-----------|
| 高锰酸盐指数(以 O ₂ 计)/(mg · L ⁻¹) | 3. 28 | 2. 82 | 3 |
| 硝酸盐(以 N 计)/(mg · L ⁻¹) | 0. 095 | 0. 084 | 10 |
| 氨氮/(mg · L ⁻¹) | 0. 287 | 0. 136 | 0. 5 |
| 硫酸盐/(mg · L ⁻¹) | 12. 37 | 12. 41 | 250 |
| 氯化物/(mg · L ⁻¹) | 19. 59 | 22. 18 | 250 |
| 总大肠杆菌/[MPN · (100 mL) ⁻¹] | 130 | 0 | 不应检出 |
| 菌落总数/(CFU · mL ⁻¹) | 45 000 | 88 | 100 |
| 铝/(mg · L ⁻¹) | 未检出 | 未检出 | 0. 2 |
| 铁/(mg · L ⁻¹) | 0. 14 | 0. 13 | 0. 3 |
| 锰/(mg · L ⁻¹) | 未检出 | 未检出 | 0. 1 |
| 铜/(mg · L ⁻¹) | 未检出 | 未检出 | 1 |
| pH | 7. 1 | 7. 5 | 6. 5~8. 5 |
| 浑浊度/NTU | 8. 3 | 0. 1 | 1 |

* 数据来源于 GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》.

结果显示,陶瓷超滤膜的产水浊度维持在 0. 1 NTU,基本符合超滤膜出水的浊度指标,且去除率达到 98. 8%,有研究指出,陶瓷膜微小孔径的筛分作用使得其对于浊度物质的去除较为明显,且不易受到原水水质的变化^[15]. 但对于高锰酸盐指数的去除效率不高,去除效率仅为 14. 02%. 高锰酸盐指数是反应水体中有机物含量的重要指标之一,经过絮凝工艺脱稳聚集的是有机高分子类的胶体物质,而地表水中也含有大量的小分子可溶性有机物污染物,絮凝过程以及膜过滤过程都无法有效地将这类物质拦截并去除,并没有展现出良好的处理效果,后续可增加活性炭以及臭氧的方式进行去除^[16].

对于重要标准微生物指标而言,絮凝/超滤组合工艺可以实现饮用水达标出水,大肠杆菌和菌落指标均在限值范围内,去除效率分别为 100% 以及 99. 8%. 需要注意的是,本次实验工艺未加入末端消毒处理工艺,在后续工艺优化中需要对膜出水进行紫外或次氯酸钠消毒,来保证出水微生物指标的长期稳定和余氯要求.

对于水体中的金属元素而言,由于原水中金属元素含量较低,无法进行絮凝/超滤工艺对其处理能力的分析. 特别指出的是,产水中未检测出 Al³⁺ 含量,一方面说明在前端添加的 PAC 中的 Al³⁺ 能够被完全截留,另一方面也说明所采用的膜材料中的 Al₂O₃ 在运行过程中不会有 Al 溶出,保证出水的安全性和稳定性.

3 结论

1) 采用“絮凝/超滤”处理工艺时要考察水源水质以选择合适的絮凝剂投加量,较低的絮凝剂浓度会影响陶瓷超滤膜产水通量,不利于膜污染的控制,而较高的絮凝剂投加会增加运行成本.

2) 在实际应用中要充分考虑温度对于陶瓷超滤膜过滤的影响,且温度与通量存在线性变化关系,温度每降低 1 °C,通量将降低约 2. 98 L/(m² · h).

3) 跨膜压力的增加使得水透过膜时的驱动力增加,而较高的跨膜压力会导致膜污染的加剧,从而影响膜正常过滤使用时间.

4) “絮凝/超滤”工艺处理微污染地表水,出水浊度可以维持在 0. 1 NTU,而对于高锰酸盐指数去除率降低仅为 14. 02%,大肠杆菌以及菌落总数指标均符合生活饮用水卫生标准. 在长期运行条件下能够实现 155 L/(m² · h) 的平均通量,且陶瓷超滤

膜在长期使用中不会有 Al 溶出,保证出水安全。

5) 后续实验可探究高级氧化与超滤的组合工艺,在提升有机物处理效率的同时来达到更高的处理能力,同时添加后端消毒工艺来实现地表水处理形成饮用水的全工艺流程。

参考文献:

- [1] 王 谦,高红杰. 我国城市黑臭水体治理现状、问题及未来方向[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 507—510.
- [2] 周正协. 超滤膜组合工艺在大型现代化桃源水厂中的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(14): 71—76.
- [3] 刘华发,于水利,高 乐,等. 超滤膜在水厂运行中分离性能变化及膜寿命评价[J]. 给水排水, 2020, 56(7): 47—53.
- [4] Dong B, Gui B, Liu J, *et al.* Analysis of organic foulants in the coagulation-microfiltration process for the treatment of Taihu Lake[J]. Environ Technol, 2019, 40(25): 3364—3370.
- [5] Teng J, Chen Y, Ma G, *et al.* Membrane fouling by alginate in polyaluminum chloride (PACl) coagulation/microfiltration process: Molecular insights[J]. Sep Purif Technol, 2019, 236: 116294.
- [6] 曹义鸣,徐恒泳,王金渠. 我国无机陶瓷膜发展现状及展望[J]. 膜科学与技术, 2013, 33(2): 1—5.
- [7] Alresheedi M T, Basu O D. Interplay of water temperature and fouling during ceramic ultrafiltration for drinking water production[J]. J Environ Chem Eng, 2020,

8(5): 104354.

- [8] Wei D, Tao Y, Zhang Z, *et al.* Effect of in-situ ozonation on ceramic UF membrane fouling mitigation in algal-rich water treatment[J]. J Membr Sci, 2016, 498: 116—124.
- [9] Lerch A, Panglisch S, Buchta P, *et al.* Direct river water treatment using coagulation/ceramic membrane microfiltration[J]. Desalination, 2005, 179 (1/2/3): 41—50.
- [10] Meng S, Zhang M, Yao M, *et al.* Membrane fouling and performance of flat ceramic membranes in the application of drinking water purification [J]. Water, 2019, 11(12): 2606.
- [11] 成小翔,梁 恒. 陶瓷膜饮用水处理技术发展展望[J]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(8): 1—10.
- [12] 刘 敏,李德良,湛含辉,等. 无机絮凝剂絮凝效率的研究[J]. 河北化工, 2007, 30(11): 30—33.
- [13] 邢卫红,范益群,徐南平. 无机陶瓷膜应用过程研究的进展[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(4): 86—92.
- [14] 徐南平,邢卫红,赵宜江. 无机膜分离技术与应用[M]//北京:化学工业出版社, 2003.
- [15] 崔俊华,王培宁,李 凯,等. 基于在线混凝-超滤组合工艺的微污染地表水处理[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2011, 28(1): 52—56.
- [16] 侯琮语,李佳宾,付宛宜,等. 臭氧/陶瓷膜-活性炭组合工艺处理农村饮用水中试[J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 38—45.

Combined flocculation/ceramic ultrafiltration process using in the pilot study of micro-polluted surface water treatment

WANG Zongheng, YU Binwei, ZHANG Xiaotong, ZHANG Lianjian, GUANG Liang, SHEN Fanfan, WAN Jiwei, TANG Zhilan, CHANG Dongjie, XU Dekan, ZHOU Xing, PENG Wenbo

(Jiangsu Jiuwu High-Tech Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

Abstract: The effect of flocculation/ultrafiltration combined process based on ceramic ultrafiltration membrane on the treatment of micro-polluted surface water was studied. The experimental results show that both the dosage of flocculant and the temperature of raw water are the key factors affecting the treatment capacity of the system. The temperature and the flux of water production show a linear trend, that is, the flux of water production decreases about 2.98 L/(m² · h) when the temperature decreases by 1 °C. The transmembrane pressure is also a key factor affecting the flux. Higher transmembrane pressure

(下转第 177 页)

Design and application of “electrolytic + reverse osmosis membrane”
in electroplating wastewater project

ZHAO Lifang , DONG Jian

(Tianjin Chuangyuan Bikai Environmental Engineering Co. , Ltd. , Tianjin 301800, China)

Abstract: The reuse project of an electroplating wastewater in Anshan city, the treatment design scale is 14.6 t/d. After the comprehensive analysis of the water quality and the common process of electroplating wastewater, the treatment process route of “electric flocculation + reverse osmosis membrane” was determined. The process flow, operation parameters, operation effect and processing cost were introduced in detail in this paper. The treated water is higher than the electroplating pollutant discharge standard (GB 21900—2008). The treatment cost saves 1~1.5 million yuan/a, saving water about 5 000 t/a, and has good economic and environmental benefits.

Key words: electroplating wastewater; wastewater reuse; reverse osmosis membrane; electric flocculation

(上接第 163 页)

increases the membrane flux, but also causes the rapid formation of periodic intimal pollution. The pilot test results show that the effluent turbidity of flocculation/ultrafiltration combined process is 0.1 NTU, the turbidity removal rate is 98.8%, the permanganate index removal rate is 14.02%, and the microbial index meets the sanitary standard of drinking water. In addition, the system maintains good performance in long-term operation, and the average membrane water production flux can reach 155 L/(m² · h) at a constant pressure of 0.1 MPa. The application of the combined flocculation/ultrafiltration process in surface water treatment is realized, and the high treatment flux and water quality are guaranteed.

Key words: ceramic ultrafiltration membrane; flocculation; micro-polluted surface water; water production flux

(上接第 171 页)

pore size was prepared. The molecular weight cut-off of the ultrafiltration membrane was 750, the rejection rate of Congo red (CR) was 95%, the rejection rate of sodium sulfate (Na₂SO₄) was as low as 10%, and the highest separation degree of CR/Na₂SO₄ was 9.4. The interfacial polymerization method proposed in this study to prepare small-aperture polyamide roll-type ultrafiltration membrane is simple and easy to promote in industry.

Key words: roll-type ultrafiltration membrane; printing and dyeing wastewater; polyamide; interfacial polymerization; Na₂SO₄ resource utilization