

曹佩, 黄琴云, 张丽芳, 等. 超滤工艺处理西江原水的膜污染规律[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 57-63.
 CAO P, HUANG Q Y, ZHANG L F, et al. Rule of membrane fouling in UF process for Xijiang raw water treatment [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 57-63.

超滤工艺处理西江原水的膜污染规律

曹佩¹, 黄琴云¹, 张丽芳², 龙志宏², 薛冰超¹, 柳君侠^{1,*}

(1. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东广州 510006; 2. 广州市自来水有限公司, 广东广州 510600)

摘要 【目的】超滤在饮用水深度处理技术中具有广阔的应用前景,然而膜污染会降低产水量和增加运行能耗,是超滤推广应用的难题。【方法】文章系统研究了操作通量、原水组成、水化学条件对超滤膜污染行为以及膜污染机理。【结果】增大操作通量能够增加水动力学拖曳作用,促进污染物向膜表面沉积,严重污染超滤膜;与腐植酸、蛋白质相比,多糖类由于黏性易黏附在膜表面,对超滤膜造成的污染最为严重;当污染物 pH 靠近等电荷点,或者增加钙离子浓度会带来电荷屏蔽或吸附架桥作用,进而加重膜污染,在完全堵塞、标准堵塞、中间堵塞和滤饼层污染 4 种污染模型中,超滤膜污染类型主要以滤饼层污染($R^2>0.9$)为主。【结论】此研究工作对超滤实际应用中膜污染控制策略的制定(操作条件优化、原水预处理、水化学调配),具有重要的启发和指导意义。

关键词 超滤(UF) 膜污染 运行通量 原水特性 水化学条件

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0057-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.007

Rule of Membrane Fouling in UF Process for Xijiang Raw Water Treatment

CAO Pei¹, HUANG Qinyun¹, ZHANG Lifang², LONG Zhihong², XUE Bingchao¹, LIU Junxia^{1,*}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Water Supply Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract [Objective] Ultrafiltration(UF) has a broad application prospect in drinking water deep treatment technology, however, membrane contamination can reduce water yield and increase operational energy consumption, which is the problem of the popularization and application of UF. [Methods] In this paper, the contamination behavior of UF membranes by operating flux, raw water composition, and water chemistry conditions, as well as the mechanism of membrane contamination was systematically investigated. [Results] Increasing the operation flux could increase the hydrodynamic drag effect, promote the deposition of pollutants to the membrane surface, and seriously contaminate the UF membrane. Compared with humic acid and protein, polysaccharides were easy to be adhered to the membrane surface due to their viscosity, and caused the most serious contamination to the ultrafiltration membrane. When the pollutant pH value was close to the iso-electrolyte point, or increased the concentration of calcium ions, it would bring about the charge shielding or adsorption bridging effect, which would aggravate the membrane contamination. In the four pollution models of complete clogging, standard clogging, intermediate clogging and cake layer contamination, the type of UF membrane contamination was mainly dominated by cake layer contamination ($R^2 > 0.9$). [Conclusion] This study is an important inspiration and guidance for the development of membrane contamination control strategies (optimization of operating conditions, raw water pretreatment, water chemical mixing) in the practical application of ultrafiltration.

Keywords ultrafiltration(UF) membrane fouling operation flux raw water characteristics chemical condition of water

随着人们生活水平的提高,现有常规水处理工艺不能够满足人们对饮用水高品质的需求,这就需

[收稿日期] 2024-01-04

[基金项目] 广州市自来水有限公司校企合作项目(JC-2023043-FW-19)

[作者简介] 曹佩(1999—),女,硕士研究生,研究方向为膜法水处理理论与技术,E-mail:3011588601@qq.com。

[通信作者] 柳君侠(1983—),男,副教授,研究方向为膜法水处理理论与技术,E-mail:whjunxia@163.com。

要深度处理技术来为人类提供干净清洁的饮用水。以超滤膜为核心的第三代饮用水处理技术,可有效去除悬浮物、细菌及大分子等有机物,能够有效保证水质安全性,具有结构紧凑、不产生二次污染的特点,在饮用水深度处理领域发挥越来越重要的作用^[1]。然而,在超滤运行过程中,水体中的污染物不可避免地沉积在膜表面或堵塞膜孔,进而造成膜污染。膜污染会降低膜渗透通量、增加运行功耗和缩短膜的使用寿命,这些是限制超滤工艺高效稳定运行的瓶颈^[2-6]。

膜污染以有机污染最为典型,天然水体中腐殖类、多糖类、蛋白类是典型的有机污染物^[7-8]。一些研究^[9]认为,水中的多糖、蛋白质等大分子有机物较之其他组分更易于吸附到膜表面,进而成为主要的膜污染物质。然而,其他研究人员^[10]发现,疏水性腐殖类更易于吸附在膜孔内,在膜污染中起控制作用。目前对膜主要污染物成分的识别还未达成共识。除原水特性,水化学条件对膜污染的影响同样存在争议。比如研究^[11]发现,增加 pH 会增加静电排斥,进而减少腐植酸(HA)对膜的污染;还有研究^[12]发现,随着溶液 pH 的增加,多糖与膜之间静电排斥作用也随之增强,进而减少多糖对膜的污染;然而另一些试验^[13]观察到蛋白质污染行为并非随 pH 的增加而增大。水化学条件中 Ca^{2+} 浓度也是影响膜污染的关键因素,研究^[14]发现在低 Ca^{2+} 浓度下,污染物与膜之间表面络合作用主导膜污染行为,膜抗污染性能增强;然而在较高的 Ca^{2+} 浓度下,污染物与沉积在膜上的污染物相互作用,导致膜污染加剧。此外,操作条件比如操作通量(或应用压力)会改变水动力拖曳作用,影响污染物向膜表面的传质速度,进而影响膜污染进程。以上这些影响因素均需要系统地研究,才能提出有效的膜污染控制策略。

膜污染受水质特性、水化学条件及操作条件的影响。已有研究中,一般只对其中一二项影响因素进行研究,文章以地表水中天然有机物为超滤膜污染物,系统全面地研究操作条件(操作通量)、原水特性成分(HA、多糖、蛋白质)及其含量、水化学条件(pH、 Ca^{2+})对超滤膜污染的影响规律,揭示膜污染机理,预期成果对膜污染控制策略(操作条件优化、原水预处理及水化学调配)的制定,具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 原水与材料

试验水样取自华南地区西江原水,其 pH 值为 7.37,浑浊度为 16.3 NTU,电导率为 $278 \mu\text{S}/\text{cm}$,HA 质量浓度为 $5.73 \text{ mg}/\text{L}$,多糖类质量浓度为 $2.49 \text{ mg}/\text{L}$,蛋白类质量浓度为 $5.44 \text{ mg}/\text{L}$ 。本试验超滤膜采用美能生产的聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜,膜外径为 1.2 mm,内径为 0.6 mm,壁厚度为 0.3 mm。HA、牛血清蛋白(BSA)、海藻酸钠(SA)溶液分别用于模拟天然水中的 HA、蛋白质类和多糖类物质;HA 购于阿拉丁生化科技股份有限公司,牛血清白蛋白购于兰杰柯科技有限公司,海藻酸钠购于西格玛奥德里奇公司,HCl 购于天津福晨化学试剂有限公司,NaOH 购于广州化学试剂二厂,氯化钙购于天津市科密欧化学试剂有限公司,以上试剂均为分析纯级别。试验中配水均采用 milli-Q 生产的超纯水,氯化钠用于调节水样离子强度,盐酸和氢氧化钠用于调节 pH,氯化钙用来调节 Ca^{2+} 浓度。

1.2 试验装置

超滤试验装置由原水箱、膜组件、进水泵、压力表、流量计、反冲洗水箱、计算机等组成,如图 1 所示。采用恒通量运行,在过滤过程中,每隔 1 min 压力表将数据传输给计算机储存,通过跨膜压差的变化来表征不同超滤膜污染的程度。本试验探究在不同的原水污染物浓度、初始通量、水化学条件下,分析 PVDF 中膜污染的变化规律。

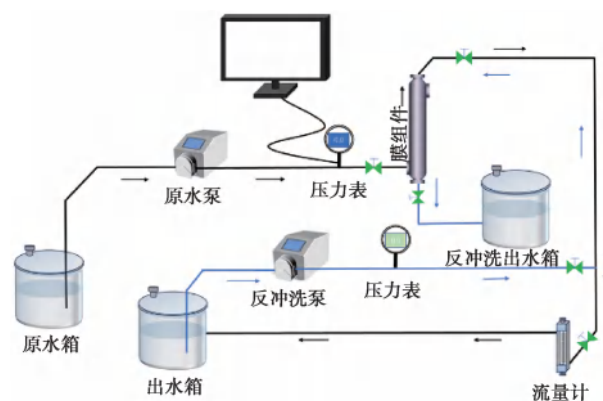


图 1 超滤试验装置

Fig. 1 Set-Up of UF Experiment

1.3 操作通量、原水特性、水化学条件的影响

操作通量的影响:以华南地区西江原水作为超滤试验进水,通过调节蠕动泵转速来实现不同的膜

通量,将膜通量调节为 70、140、210、280 L/(m²·h) 进行过滤,用压力表记录跨膜压差的变化。

原水特性成分的影响:以 HA、BSA、SA 代表原水中腐殖类、多糖类、蛋白类成分,配制不同浓度的溶液,对比研究不同特性成分污染物对跨膜压差的影响。

水化学条件的影响:以 BSA 为模拟污染物,使用 HCl 和 NaOH 将超滤进水溶液调节 pH 值分别为 3、5、7、9、11,再使用 NaCl 溶液将离子浓度调为 10 mmol/L,研究 pH 值(3~11)对超滤行为的影响。将超滤进水离子浓度调为 0、20、50、100 mmol/L CaCl₂,再用 NaCl 将离子浓度调为 10 mmol/L, pH 值调为 7,研究 Ca²⁺ 浓度(0~100 mmol/L)对超滤膜污染的影响。

1.4 污染模型分析方法

Hermia 开发了 4 种膜滤经典模型:完全堵塞、标准堵塞、中间堵塞和滤饼层污染模型,探究膜污染机理,但是在实际水处理工程中,常采用恒通量超滤过滤。Huang 等^[15]对 Hermia 的膜污染模型做了进一步改进,改进的污染模型如表 1 所示。

表 1 恒通量过滤超滤膜污染模型
Tab. 1 Model of UF Membrane Fouling with Constant Flux Filtration

污染方式	膜污染指数(<i>n</i>)	表达方程
完全堵塞	2	式(1)
标准堵塞	2/3	式(2)
中间堵塞	1	式(3)
滤饼层污染	0	式(4)

$$J_s = 1 - k_v V_s \quad (1)$$

$$J_s^{1/2} = 1 + k_v / (2V_s) \quad (2)$$

$$\ln J_s = -k_v V_s \quad (3)$$

$$1/J_s = 1 + k_v V_s \quad (4)$$

其中: J_s ——标准化的膜通量;

k_v ——膜污染系数;

V_s ——膜单位面积累积的过滤体积, L/m²。

2 结果和讨论

2.1 操作通量对超滤膜污染的影响

图 2 为不同操作通量情况下超滤膜跨膜压差变化情况。从整体上看,随着操作通量的增大,超滤膜的跨膜压差显著增加。具体来说,当初始通量为

70 L/(m²·h) 时,跨膜压差升高不太明显,在过滤 2 h 结束时仍然低于 20 kPa;然而当初始通量升到 280 L/(m²·h) 时,超滤膜的跨膜压差在过滤结束时超过 70 kPa。这可以解释为增大操作通量能够增加水动力学拖曳作用,加快污染物向膜表面的传质,增加浓差极化,促使更多的污染物沉积在膜表面^[16]。因此,为了有效控制膜污染,在实际应用中推荐采用较低的操作通量。比如超滤在实际工程中推荐采用低于临界的操作通量来运行。

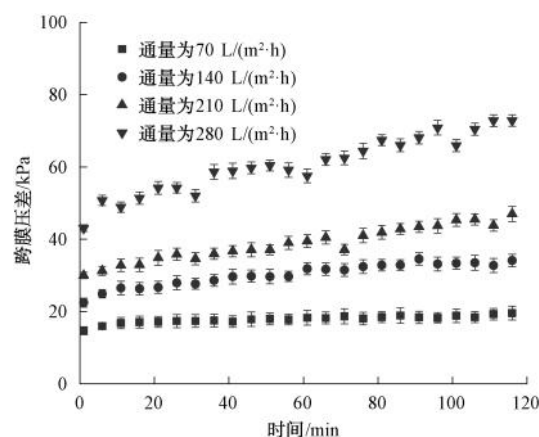


图 2 不同操作通量对超滤膜跨膜压差的影响
Fig. 2 Influence of Different Operation Fluxes on Transmembrane Pressure of UF Membrane

2.2 原水特性对膜污染的影响

为了探明地表水中天然有机物组分对膜污染的影响,分别用 HA、BSA、SA 模拟原水中蛋白类、腐殖类、多糖类物质,考察各组分对膜污染的影响规律(图 3)。图 3(a)~图 3(c)为 HA、BSA、SA 浓度变化对膜污染影响,整个来看,随着污染物浓度的增加,跨膜压差显著增大。这和报道^[17]相符:增加污染物浓度能够增加浓差极化,增大污染物向膜表面碰撞的机会,带来更多的污染物沉积。具体来看,图 3(a)为不同浓度 HA 对超滤膜污染的影响,当 HA 质量浓度从 50 mg/L 增大到 400 mg/L 时,在过滤 120 min 结束时,超滤膜跨膜压差从约 20 kPa 升高到 75 kPa 左右。HA 是一种常见的天然有机物,相对分子质量较小(10 nm 左右),与超滤膜孔尺寸相当,在超滤运行过程中 HA 溶液可能会堵塞超滤膜的孔道,影响膜的渗透性。此外,HA 的疏水性会导致超滤膜表面疏水化,降低膜的亲水性,进一步增加膜污染。图 3(b)为不同浓度 BSA 对超滤膜污染的影响。在污染物质量浓度为 50 mg/L 时,跨膜压差

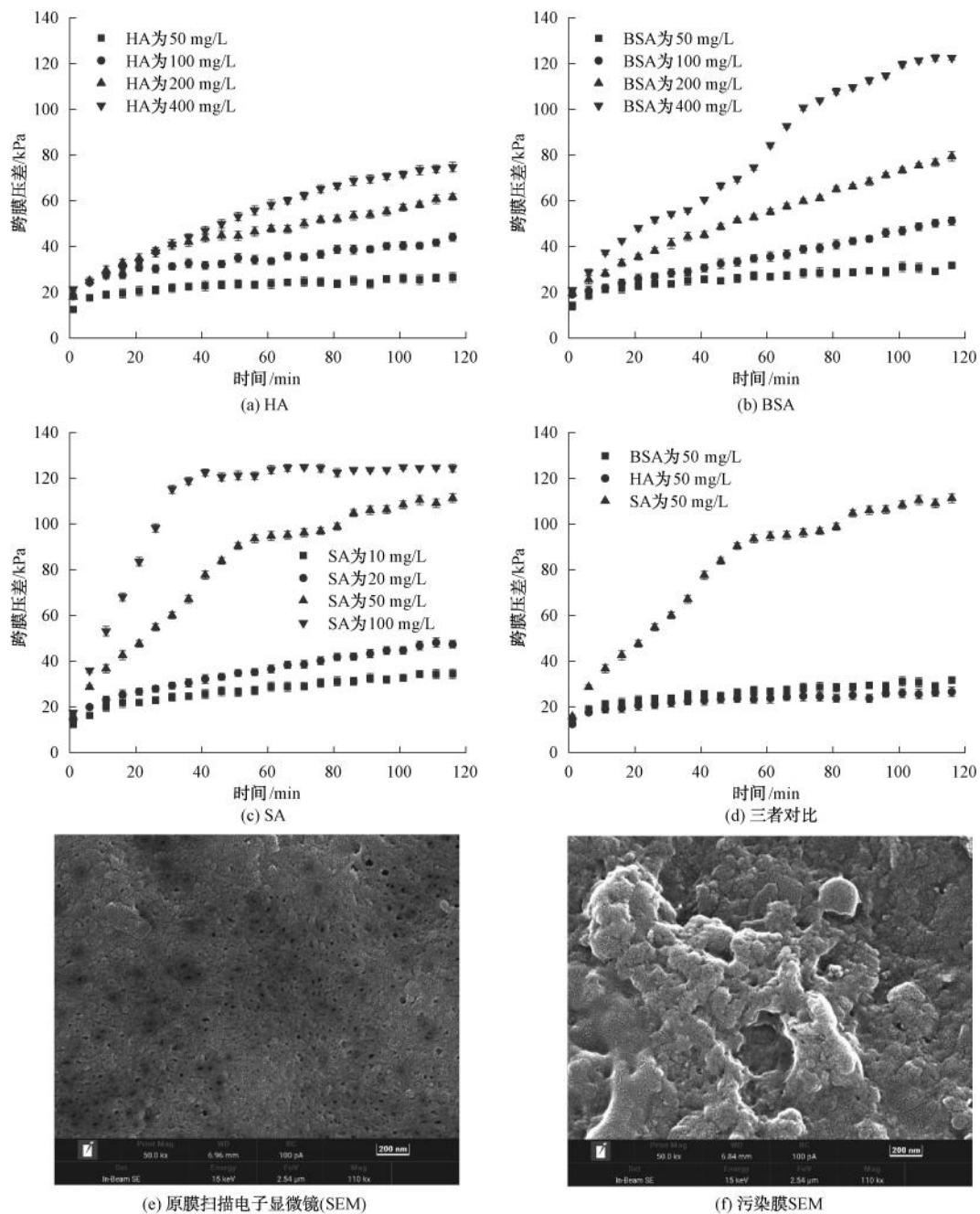


图3 水质成分(HA、BSA、SA)对超滤膜污染的影响

Fig. 3 Influence of Water Quality Components (HA, BSA, SA) on UF Membrane Fouling

变化不太显著;而当质量浓度增大到 400 mg/L 时,在超滤 120 min 后,跨膜压差上升到约为 120 kPa,膜污染十分严重。众所周知,BSA 是一类具有复杂结构和多样功能的大分子有机物。在超滤膜过滤过程中,由于 BSA 具有一定的亲水性,可以吸附在超滤膜表面,形成滤饼层,增大过滤阻力。图 3(c)为不同 SA 浓度对膜污染的影响,轻微的膜污染发生在较低浓度的 SA 溶液(10 mg/L 和 20 mg/L),而当

SA 质量浓度增大到 50 mg/L 以上时,跨膜压差显著增大。比如说,当 SA 质量浓度为 100 mg/L 时,在过滤 34 min 后超滤膜跨膜压差从 16.5 kPa 快速上升至 122.2 kPa。SA 是多糖类物质,在膜表面的黏附能力较强,能够形成较为致密的滤饼层,且不容易脱附扩散。图 3(d)展示了在同一浓度情况下,3 种污染物造成的超滤膜污染对比。当污染物质量浓度均为 50 mg/L 时,相比 HA、BSA 来说,SA 导致膜污

染最严重。在过滤 2 h 后,SA 引起的跨膜压差达到 110 kPa,而 HA 和 BSA 的跨膜压差增量几乎可以忽略。由于多糖具有一定的黏性,相比 HA 和 BSA 更容易与膜表面发生物理或化学相互作用,附着在超滤膜表面。因此,为了避免严重的膜污染,在实际应用中水质预处理应侧重考虑去除多糖类污染。图 3 (e) 为 PVDF 原膜的 SEM,膜表面平整光滑,膜孔均匀分布。经过 SA (10 mg/L) + HA (10 mg/L) + BSA (10 mg/L) 有机溶液污染膜后,如图 3(f) 所示,可以明显观察到大量污染物附着在膜面,膜面变得粗糙,膜孔被堵塞。

2.3 水化学条件对膜污染的影响

众所周知,水化学条件比如 pH、离子强度、多价阳离子会通过影响污染物与膜之间的静电作用而影响膜污染^[18]。以蛋白质为例,研究 pH 和 Ca^{2+} 对 PVDF 超滤膜的污染行为。图 4(a) 为不同 pH 值 (3~11) 条件下 BSA 的膜污染行为。整体来看,严重的污染发生在较低的 pH 情况下;但值得注意的是,跨膜压差增加较快的点发生在 pH 值 = 5,而不是 pH 值 = 3。这是由于 BSA 的零电荷点为 4.7^[19],此时 BSA 带电量最少,在水体中稳定性最差,易于脱稳沉积在膜表面。随着 pH 值由 5 增加到 11,

BSA 所带负电荷逐渐增大,而 PVDF 超滤膜带负电,由于静电排斥作用增强,能够有效缓解蛋白质分子向膜表面的沉积。BSA 在 pH 值为 3 时带正电,与膜带相反电荷;在这种情况下,虽然初始的污染由污染物与净膜的界面作用决定^[20],BSA 分子与超滤膜吸引作用会引起越来越多的污染物沉积在膜表面;然而,一旦膜表面被污染物覆盖,膜过滤后期的污染由污染物与沉积的污染物作用决定^[21];与零电荷点附近 pH 值 = 5 相比,pH 值为 3 时污染物相互之间具有较大的排斥作用,带来相对缓慢的跨膜压差上升。图 4(b) 为不同 Ca^{2+} 浓度下蛋白类的膜污染行为。不难发现,在过滤前 70 min, Ca^{2+} 浓度的增加对跨膜压差影响不大,在过滤 70 min 后, Ca^{2+} 浓度增加促进了超滤膜跨膜压差的增大。这一现象可解释为由于 Ca^{2+} 与污染物产生络合,会压缩双电层,屏蔽污染物的电荷量^[22];此外, Ca^{2+} 也会使污染物与污染物分子间形成架桥^[18];这种电荷屏蔽作用以及架桥作用使污染物脱稳,易于黏附到膜表面,对超滤膜造成的污染更为严重。在实际应用中,通过水化学调配应使污染物 pH 远离等电点,且降低多价阳离子的含量,以提高污染物与膜之间的界面排斥作用,进而有效控制跨膜压差上升。

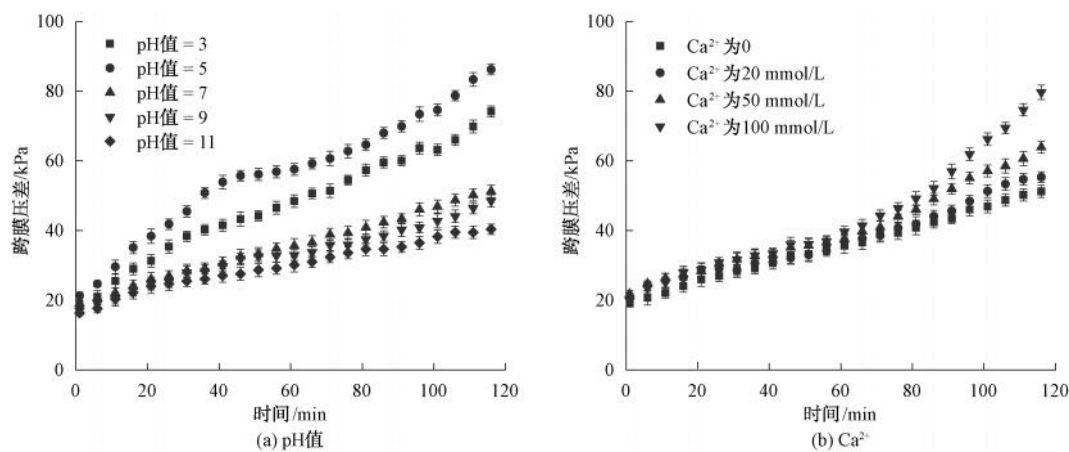


图 4 水化学条件 pH、 Ca^{2+} 对超滤膜污染的影响

Fig. 4 Influence of Water Chemistry Conditions of pH Values and Ca^{2+} on UF Membrane Fouling

2.4 膜污染机制研究

为进一步探明 HA、BSA、SA 对膜污染的影响,引入 Hermia 模型(完全堵塞、标准堵塞、中间堵塞和滤饼层污染)分析膜污染孔堵机理。针对恒通量过滤情况,Huang 等^[15]对模型中 J_s 与 V_s 存在的线性关系进行半经验拟合,拟合结果如表 2

所示。线性相关系数 (R^2) 值可以较好反映试验数据和 4 种污染模型(完全堵塞、标准堵塞、中间堵塞和滤饼层污染)的拟合关联度, R^2 值越大表明二者相关性越强,意味着此时的膜污染越趋近该污染类型。在 4 种污染模型中,BSA、HA、SA 均与滤饼污染相关性最高 $R^2 > 0.9$,这表明在超

滤运行过程中 BSA、HA、SA 会被超滤膜截留,进而形成滤饼层。滤饼层污染是 PVDF 超滤膜跨

膜压差上升、性能衰减的主要原因,Wei 等^[23]也得到相同结论。

表 2 4 种机理模型拟合对应的 R^2
Tab. 2 Corresponding R^2 of Four Mechanism Models Fitting

污染模型	公式	BSA (50 mg/L) 条件下的 R^2		HA (50 mg/L) 条件下的 R^2		SA (50 mg/L) 条件下的 R^2	
		过滤前 10 min	过滤后 110 min	过滤前 10 min	过滤后 110 min	过滤前 10 min	过滤后 110 min
完全堵塞	式(1)	0.946	0.902	0.876	0.850	0.861	0.676
标准堵塞	式(2)	0.945	0.928	0.889	0.870	0.862	0.759
中间堵塞	式(3)	0.944	0.934	0.903	0.882	0.891	0.801
滤饼层污染	式(4)	0.953	0.946	0.927	0.911	0.939	0.904

3 结论与展望

膜污染阻碍了超滤技术的推广应用。文章系统研究了操作通量、原水组成及其浓度、水化学条件对超滤膜污染的影响,结论如下。

(1)增大操作通量能够增加水动力学拖曳作用,促进污染物向膜表面沉积,增加更大的跨膜压差。

(2)增加污染物浓度能够带来更多的污染物向膜表面传输,进而加速跨膜压差的上升。

(3)与 HA、BSA 相比,SA 由于易于黏附在膜表面,对超滤膜造成的污染最为严重。

(4)当污染物 pH 靠近等电荷点或者增加 Ca^{2+} 浓度会带来电荷屏蔽或吸附架桥作用,进而导致严重的膜污染。

(5)在完全堵塞、标准堵塞、中间堵塞和滤饼层污染 4 种污染模型中,滤饼层污染($R^2>0.9$)为主要膜污染模型。

本研究对超滤实际应用中膜污染控制具有重要的启发和指导意义。

(1)对于操作条件优化方面,为了有效控制膜污染,在实际应用中推荐采用较低的操作通量。比如采用低于临界操作通量运行超滤。

(2)对于水质预处理工艺方面,由于多糖类造成的膜污染较为严重,前处理工艺应侧重考虑去除多糖类污染。

(3)对于水化学条件方面,应尽量使超滤进水 pH 远离等电点,且降低多价阳离子含量,以提高污染物与膜静电排斥作用,进而抑制跨膜压差上升。

(4)在超滤工艺中提高颗粒尺寸以及加大水力曝气可以增加滤饼层疏松性。

参考文献

[1] 班福忱,于涵同. 水处理中超滤膜污染成因及其控制方法研

究[J]. 水处理技术, 2023, 49(2): 1-5, 17.

BAN F C, YU H T. Study on causes and control methods of ultrafiltration membrane fouling in water treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(2): 1-5, 17.

[2] 王小兵,游浩荣,叶元柳,等. PAC/UF 工艺处理微污染水源水的膜污染特性[J]. 中国给水排水, 2020, 36(11): 27-32.

WANG X B, YOU H R, YE Y L, et al. Membrane fouling of PAC/UF process treating micro-polluted source water[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(11): 27-32.

[3] 郑利祥,郭中权,毛维东. 矿井水处理聚合氯化铝残留物对超滤膜污染的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 51-56, 63.

ZHENG L X, GUO Z Q, MAO W D. Influence of polyaluminium chloride residue on ultrafiltration membrane fouling in mine water treatment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 51-56, 63.

[4] FANG X F, LI J S, LI X, et al. Iron-tannin-framework complex modified PES ultrafiltration membranes with enhanced filtration performance and fouling resistance [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 505: 642-652. DOI: 10.1016/j.jcis.2017.06.067.

[5] KIRSCHNER A Y, CHENG Y H, PAUL D R, et al. Fouling mechanisms in constant flux crossflow ultrafiltration [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 574: 65-75. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.12.001.

[6] KRZEMINSKI P, LEVERETTE L, MALAMIS S, et al. Membrane bioreactors—A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects [J]. Journal of Membrane Science, 2017, 527: 207-227. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.12.010.

[7] 何林娟,邹康兵,盛云鸽,等. 预处理对东江原水超滤过程中膜污染的控制作用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 16-21, 27.

HE L J, ZOU K B, SHENG Y G, et al. Control effect of pretreatment on membrane fouling during ultrafiltration of Dongjiang River raw water [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 16-21, 27.

- [8] SHI X F, TAL G, HANKINS N P, et al. Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes; A review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2014, 1: 121–138. DOI: 10.1016/j.jwpe.2014.04.003.
- [9] LEE N H, AMY G, CROUÉ J P, et al. Identification and understanding of fouling in low-pressure membrane (MF/UF) filtration by natural organic matter (NOM) [J]. Water Research, 2004, 38(20): 4511–4523.
- [10] YUE X D, KOH Y K K, NG H Y. Effects of dissolved organic matters (DOMs) on membrane fouling in anaerobic ceramic membrane bioreactors (AnCMBRs) treating domestic wastewater [J]. Water Research, 2015, 86: 96–107. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.038.
- [11] TANG C Y, LECKIE J O. Membrane independent limiting flux for RO and NF membranes fouled by humic acid [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41 (13): 4767–4773.
- [12] LEE H, AHMAD R, KIM J. Alginate to simulate biofouling in submerged fluidized ceramic membrane reactor; Effect of solution pH and ionic strength [J]. Bioresource Technology, 2020, 302: 122813. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122813.
- [13] YIN Z Q, MA Y Q, TANIS-KANBUR B, et al. Fouling behavior of colloidal particles in organic solvent ultrafiltration [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 599: 117836. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.117836.
- [14] LIU Y W, LI X, YANG Y L, et al. Effect of ionic strength and calcium ions on humic acid fouling of hollow-fiber ultrafiltration membrane [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 54 (11): 2976–2985.
- [15] HUANG H, YOUNG T, JACANGELO J G. Novel approach for the analysis of bench-scale, low pressure membrane fouling in water treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 334 (1/2): 1–8.
- [16] LIU J, FU W, YU X, et al. Relating critical and limiting fluxes to metastable and long-term stable fluxes in colloidal membrane filtration through collision-attachment theory [J]. Water Research, 2023, 238: 120010. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120010.
- [17] LIU J X, CHEN K, ZOU K B, et al. Insights into the roles of membrane pore size and feed foulant concentration in ultrafiltration membrane fouling based on collision-attachment theory [J]. Water Environment Research, 2021, 93(4): 516–523.
- [18] TANG C Y, CHONG T H, FANE A G. Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes; A review [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 164(1/2): 126–143.
- [19] WANG Y N, TANG C Y. Protein fouling of nanofiltration, reverse osmosis, and ultrafiltration membranes—The role of hydrodynamic conditions, solution chemistry, and membrane properties [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 376 (1/2): 275–282.
- [20] LIU J, HUANG T, JI R, et al. Stochastic collision-attachment-based monte carlo simulation of colloidal fouling; Transition from foulant-clean-membrane interaction to foulant-fouled-membrane interaction [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54 (19): 12703–12712.
- [21] 余健鑫, 钟绮芸, 龙志宏, 等. 基于 XDLVO 理论的亲疏水组分对超滤膜污染的影响 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(7): 35–42.
- YU J X, ZHONG Q Y, LONG Z H, et al. Effect of hydrophobic/hydrophilic components on ultrafiltration membrane fouling based on XDLVO theory [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 35–42.
- [22] TANG C Y, KWON Y N, LECKIE J O. The role of foulant-foulant electrostatic interaction on limiting flux for RO and NF membranes during humic acid fouling—Theoretical basis, experimental evidence, and AFM interaction force measurement [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 326(2): 526–532.
- [23] WEI D Q, TAO Y, ZHANG Z H, et al. Effect of in-situ ozonation on ceramic UF membrane fouling mitigation in algal-rich water treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2016, 498: 116–124. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.09.063.

(上接第 40 页)

- catalyst with low biotoxicity for sustainable degradation of high-ionization-potential organic pollutants [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120 (29): e2305933120.
- [31] HE C, ZHANG Z G, WANG J B, et al. Mn-Ce bicenter of a dual single-atom catalyst synergistically triggers reactive oxygen species generation for efficient ozonation of emerging contaminants [J]. ACS ES&T Engineering, 2024, 4(8): 2022–2014.
- [32] YAO Y Y, WANG C H, YAN X, et al. Rational regulation of Co-N-C coordination for high-efficiency generation of $^1\text{O}_2$ toward nearly 100% selective degradation of organic pollutants [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56 (12): 8833–8843.