

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 07. 008

浸没式超滤膜处理高藻水的反冲洗影响因素研究

史慧婷¹, 邓良², 叶林雄², 梁家辉², 荣宏伟², 余华荣²,
瞿芳术²

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060; 2. 广州大学 土木工程学院,
广东 广州 510006)

摘要: 膜污染是制约浸没式超滤膜高效处理高藻水的关键,合理优化超滤反冲洗策略有助于改善系统整体运行性能。为此,采用截留分子质量为150~300 ku的超滤膜过滤高藻水,探究不同反冲洗方式及排空周期等条件下跨膜压差的变化情况。结果表明,单独气洗在控制跨膜压差增长方面比单独水洗表现得更好;气洗强度越大,跨膜压差的增长速度越慢,当气洗强度为 $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时对跨膜压差的控制效果最佳。增加反冲洗强度可能会加剧藻细胞的破裂,造成膜池中蛋白质类物质和溶解性微生物代谢产物的增加。增加膜池排空周期可减缓跨膜压差的增长,当排空周期为12 h时对跨膜压差的控制效果最优。低强度的气水联合冲洗一定程度上能够有效缓解膜污染,这可能与膜表面黏附的污垢减少以及膜池中颗粒物的尺寸增大有关。

关键词: 超滤; 高藻水; 反冲洗; 跨膜压差; 膜污染

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0050-07

Influence Factors of Immersed Ultrafiltration Membrane Backwash for Algae-laden Water Treatment

SHI Hui-ting¹, DENG Liang², YE Lin-xiong², LIANG Jia-hui², RONG Hong-wei²,
YU Hua-rong², QU Fang-shu²

(1. Guangzhou Urban Planning Survey Design Research Institute, Guangzhou 510060, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Membrane fouling is the bottleneck that restricts immersed ultrafiltration membrane for efficient treatment of algae-laden water. Optimization of ultrafiltration backwash strategy is helpful to improve the overall operational performance of the system. Therefore, this paper used the ultrafiltration membrane with the interception molecular weight of 150–300 ku to treat algae-laden water, and investigated the change of transmembrane pressure under different backwash strategies and emptying cycle. Air backwash alone performed better than hydraulic backwash alone in controlling the increase of transmembrane pressure. Higher air backwash intensity resulted in slower increasing rate of the transmembrane pressure. When the air backwash intensity was $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, the best transmembrane pressure control performance was achieved. Increasing the backwash intensity might aggravate the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878211); 广东省自然科学基金资助项目(2019A1515012232)

通信作者: 瞿芳术 E-mail: qufs@gzhu.edu.cn

breakage of algal cells, resulting in increased concentrations of protein-like substances and soluble microbial products in the membrane tank. The increase of the membrane tank emptying cycle slowed down the increase of the transmembrane pressure, and the optimal control performance was achieved when the emptying cycle was 12 hours. The low-intensity combined air and water backwash effectively alleviated membrane fouling to some extent, which might be related to the reduction of fouling scale on the membrane surface and the increase of particulate size in the membrane tank.

Key words: ultrafiltration; algae-laden water; backwashing; transmembrane pressure; membrane fouling

随着饮用水水质标准日趋严格,以超滤为核心的膜分离技术得到广泛应用^[1]。在超滤处理含藻水的应用中,藻体(即藻细胞和藻屑)和藻源有机物(包括胞外和胞内有机物)在膜表面的积累会造成严重的膜污染,这会对膜工艺的渗透性和能量消耗产生负面影响,导致超滤技术的工程应用受限^[2-3]。

定期进行膜清洗是缓解膜污染的有效策略。物理清洗是一种消除膜表面和孔隙中可逆污染的过程,其中,水洗和气洗分别通过反洗和松弛作用使污垢从膜表面剥离。但是,由于膜系统的渗透液本身被用于冲洗膜的介质,频繁的反冲洗会造成产水量的损失;此外,曝气设备的长时间运行会增加能耗,导致运行成本提升。已有研究表明,气水联合反冲洗对膜表面污染物的清洗能力强于单独的水力反冲洗^[4-5]。目前关于超滤膜系统处理高藻水的反冲洗研究尚少,还未总结出普遍性规律。为探究高藻水超滤处理系统中不同反冲洗方式对膜污染的控制效能,笔者考察了反冲洗方式、水洗强度、气洗强度以及排空周期对膜污染的影响,同时通过分析膜池内部藻源污染颗粒粒径分布、藻源污染物沉积路径以及出水中荧光组分分布对膜污染情况进行了研究。

1 材料与方法

1.1 原水水质

试验原水采用实验室培养的藻液调配的高藻水,以藻类作为主要目标污染物,选择的是在藻类暴发中最常见的铜绿微囊藻。藻种由中国科学院水生生物研究所淡水藻种库提供(No. HB909),藻类的培养采用无菌培育法,选用BG11培养基为藻类的生长提供营养物质,采用玻璃水槽构建人工恒温培养箱,温度设定在25℃左右,每日光照时间为14 h,光照度为5 000 lx。试验原水选取成熟期的高藻

水母液,稀释至 $OD_{685}=0.1$,保持藻细胞的浓度约为 1×10^8 个/L,并调节其pH=7.0左右。

1.2 试验装置与超滤膜

试验用超滤膜为帘式增强型聚偏氟乙烯复合亲水膜,平均膜孔径为0.05 μm ,膜丝内、外径分别为1.00、2.00 mm,具体性能参数如下:产水量为2~2.8 m^3/d ,截留分子质量为150~300 ku,操作压力为0~0.03 MPa,设计通量为10~25 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,出水方式为负压抽吸,适用的温度范围为5~35℃,pH范围为1~10。所用膜组件为实验室自制,膜面积约为0.01 m^2 ,各膜组件在正式运行前先用纯水过滤约24 h以清洗管路,减少管路污染对出水水质的影响。

试验装置由进水箱、蠕动泵、真空表、超滤膜池、压力传感器、可编程控制器、计算机等部件组成,如图1所示。膜池直径约为32 mm、高度为500 mm,有效水深拟定为350 mm,故有效容积为 $2.81 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。膜组件竖直安装在膜池中,采用死端过滤方式,跨膜压差(TMP)通过压力传感器及信息收集系统监测。反冲洗阶段,水洗时将蠕动泵反转抽吸清水箱中的净水对膜组件进行冲洗。膜组件下方设置曝气装置,为防止液体倒流,曝气泵置于膜池液面之上。气洗阶段,启动曝气泵,通过气泡石产生微气泡,去除超滤膜表面的污染物。

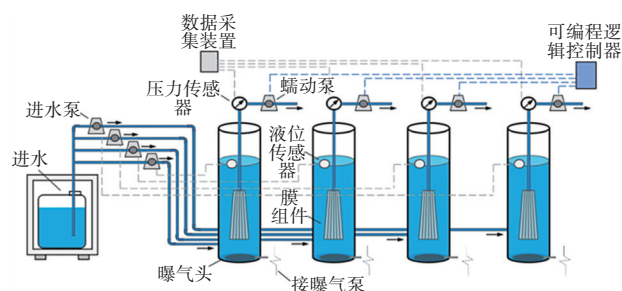


图1 超滤膜系统示意

Fig.1 Diagram of ultrafiltration membrane system

1.3 试验方法

试验采用直接过滤的方式,高藻水直接进入超滤膜系统,以藻细胞颗粒作为主要污染物指标,模拟净水厂直接处理高藻水的超滤过程。

试验分别在不同的反冲洗方式包括单独水力反冲洗、单独曝气反冲洗、气水联合反冲洗以及增设排空周期等工况下进行96 h的连续超滤运行。在各工况下,超滤运行的抽吸通量均为 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,反洗周期为2 h(超滤抽吸118 min、反洗2 min),不同反冲洗方式运行工况的排空周期均为24 h;研究排空周期对膜污染的影响时,排空时间分别设置为12、24、36、48 h。超滤系统通过压力装置及计算机系统收集压力数据,压力数据的增长反映超滤膜的污染情况;超滤运行过程中检测膜池溶液中颗粒物粒径和有机物分布情况,并在超滤结束后测定膜组件表面残留污染物的质量,用以进一步反映不同反冲洗条件下的膜污染情况。

1.4 分析项目与检测方法

试验使用蠕动泵恒定通量抽吸膜池溶液,通过跨膜压差的变化来评价膜污染的严重程度,超滤试验全程在实验室内进行,周期较短,温差较小,环境温度对压力监测的影响较小,而在实际生产过程中对跨膜压差的分析是需要进行温度校正的,温度校正可以减少部分由于温差带来的压力误差。本试验的跨膜压差由压力传感器采集数据传输至电脑,最终可绘制成超滤膜污染跨膜压差分析图。

藻液浓度采用紫外-可见分光光度计测定;膜池溶液的有机物采用三维荧光光谱分析仪进行检测分析;采用激光粒度分析仪检测膜池溶液中颗粒物的粒径,判定膜池中颗粒物的分散情况;采用高速冷冻离心机对膜组件表面沉积的污染物进行冷冻离心称重,对膜表面的污染情况进行定量分析。

2 结果与讨论

2.1 水洗与气洗强度对跨膜压差的影响

不同水洗与气洗强度下跨膜压差变化见图2。

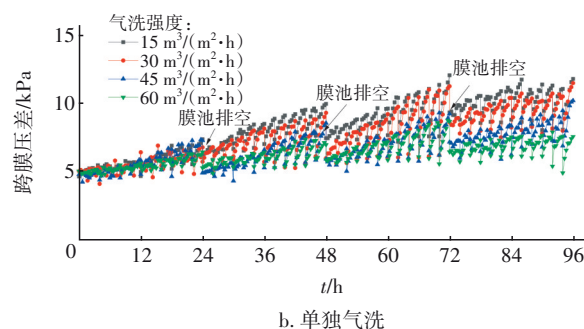
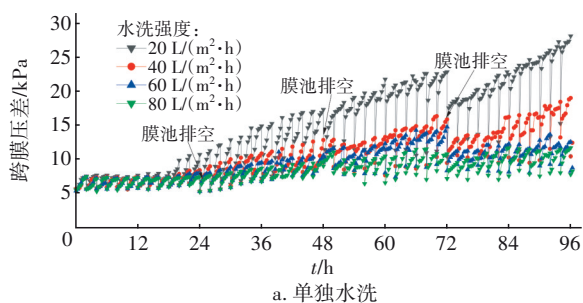


图2 不同反冲洗强度下跨膜压差的变化

Fig.2 Variation of transmembrane pressure under different backwash intensities

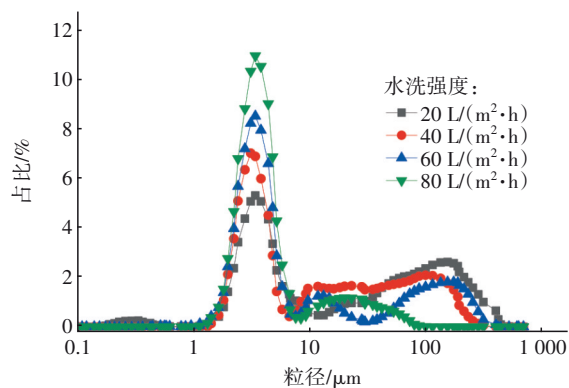
如图2(a)所示,随着超滤处理高藻水试验的进行,跨膜压差持续增大,这是藻源膜污染累积的结果。运行初期(0~24 h),不同水洗强度对跨膜压差的增长没有明显影响;但当运行时间超过24 h后,各不同水洗强度下跨膜压差的增长趋势存在明显差异,随着水洗强度的增加,跨膜压差的增长趋势逐渐放缓。运行96 h后,水洗强度为 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时跨膜压差约为28 kPa;当水洗强度增至 $40 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,膜污染得到缓解,跨膜压差降至18 kPa左右;当水洗强度继续增至60和 $80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,膜表面污染物基本被冲刷干净,跨膜压差最终稳定在11 kPa左右,综合考虑,水洗强度控制在 $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 为宜。在水压的作用下,污染层不断膨胀,致使其从膜表面剥离,导致膜表面形成的污染层更松散,从而减少了膜系统的过滤阻力,提高了膜系统的可渗透性。藻类微生物分泌的生物聚合物(胞外聚合物或者溶解性微生物代谢产物)和有机物会在膜表面及孔表面积累,形成高过滤阻力和强黏性的生物凝胶层,导致严重的膜污染^[6]。因此,增加水洗强度有助于提高水流对污垢的冲击力,从而限制生物凝胶层的形成,使得跨膜压差的增长得到缓解。随着运行时间的增加,膜系统的跨膜压差很难恢复到初始状态,这可能是由于藻源污染物在膜孔内部沉积引起的,形成了不可逆的膜污染。在连续过滤高藻水过程中,唐小斌等人^[7]也发现水力不可逆膜污染会快速(7~14 d)形成,跨膜压差增长到40~50 kPa,采用次氯酸钠强化水力反冲洗,超滤膜长期运行中其跨膜压差可保持稳定(水力不可逆膜阻力增长速率约为 $0 \text{ kPa}/\text{d}$),水力不可逆膜污染得到了有效缓解。因此,在过滤高藻水过程中需结合其他膜清洗策略,比如化学强化清洗,对藻类有机物引起的水力

不可逆膜污染进行有效控制。

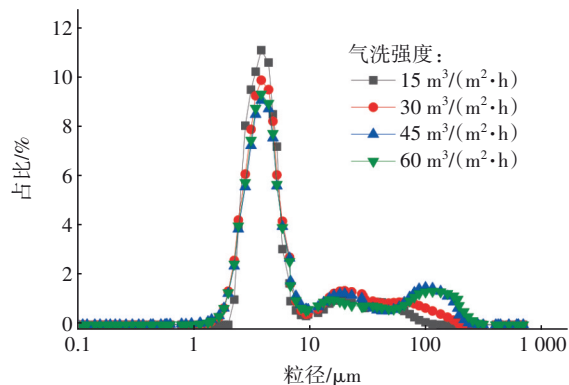
图2(b)显示,随着过滤的持续进行,膜系统的跨膜压差不断升高,表明单独气洗对膜污垢的去除作用亦有限。增大气洗强度可减缓跨膜压差的增长速度,有效降低膜污染,在本试验条件下,气洗强度控制在 $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 为宜。在单独气体反冲洗条件下,气泡与膜表面的污染杂质颗粒摩擦,气泡产生的剪切力拖拽颗粒物进入膜池,悬浮颗粒通过引力作用不断聚集成粒径较大的团聚物,在重力的作用下沉淀到膜池底部,然后通过膜池排空排出系统。从本试验结果来看,与单独水洗相比,单独气洗在控制膜污染方面表现较好,跨膜压差的增长速度更缓慢。曝气器产生的气泡不断冲刷和摩擦膜表面,与水洗相比,产生的剪切力可能更强,致使黏附在膜表面的污垢更容易被剥离。

2.2 水洗和气洗强度对膜污染物迁移规律的影响

图3为不同水洗和气洗强度下膜池溶液中颗粒物的粒径分布情况。



a. 不同水洗强度下膜池颗粒物的粒径分布



b. 不同气洗强度下膜池颗粒物的粒径分布

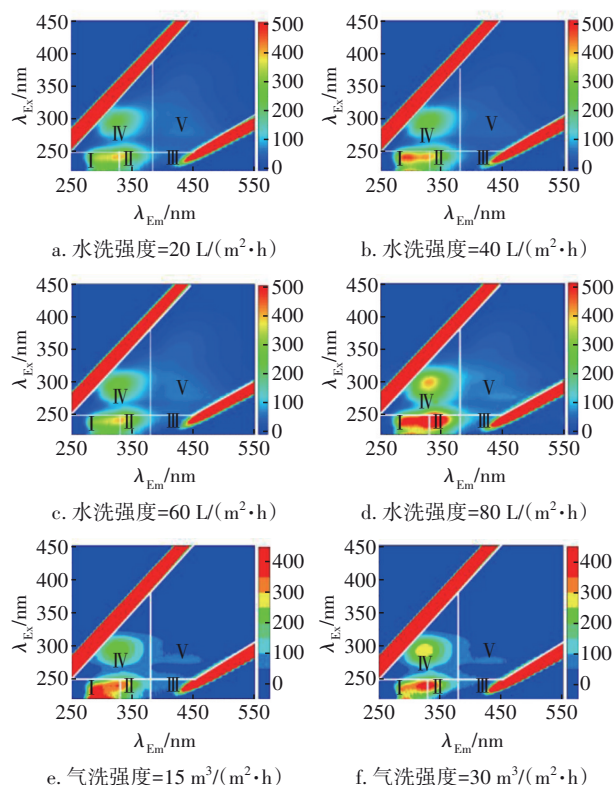
图3 不同水洗和气洗强度下膜池颗粒物的粒径分布

Fig.3 Particle size distribution in membrane tank under different water and air backwash intensities

从图3可以看出,不同反冲洗方式和反冲洗强度下膜池颗粒物的粒径分布相似,粒径主要集中在 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 处,其中粒径为 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 的体积占比最大。随着水洗强度的增大,粒径为 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积占比逐渐增大,而粒径在 $100 \mu\text{m}$ 处的颗粒物体积占比逐渐减小。这是因为,受到射流的冲击后,大尺寸的滤饼污垢在剪切力的作用下破碎,形成粒径较小的颗粒物。气洗强度对膜池颗粒物粒径的影响与水洗强度相似,但粒径为 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积占比更多,这表明气洗对藻类物质形成的团聚物的破坏程度强于水洗,导致膜池颗粒物的尺寸更小。

另外。随着水洗和气洗强度的增加,沉积在膜表面的污染物质量逐渐降低(水洗工况下分别为 0.70 、 0.43 、 0.32 、 0.26 g ,气洗工况下分别为 0.25 、 0.21 、 0.17 、 0.12 g)。加大水洗和气洗强度能够限制膜表面污染物的积累,从而缓解膜污染。与水洗相比,气洗工况下膜表面的污染物质量更小,表明气洗能更好地冲刷膜表面的污染物。

为进一步分析不同水洗和气洗强度对藻源污染物的影响,采用三维荧光光谱对膜池溶液中的有机物进行检测分析,结果如图4所示。



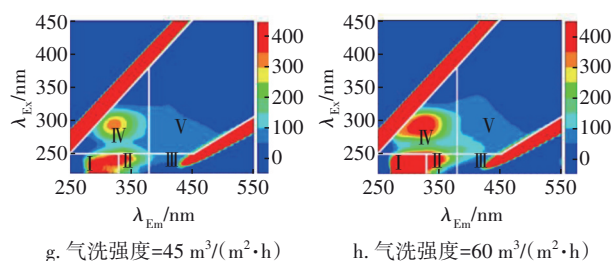


图4 不同水洗和气洗强度对膜池有机物的影响

Fig.4 Effect of different water and air backwash intensities on organic matter in membrane tank

不同反冲洗方式和反冲洗强度下膜池溶液的三维荧光光谱表现出相似的分布特征, I、II和IV区域的荧光强度较高, I、II区域代表的是芳香性蛋白质类物质(如酪氨酸和色氨酸), IV区域主要与溶解性微生物代谢产物(SMPs)类物质有关, 这表明膜表面黏附的藻源污染物主要由蛋白质类和SMPs类物质组成。当水洗和气洗强度增加时, I、II和IV区域的荧光强度逐渐增大。水洗和气洗强度的增大可能会破坏藻细胞结构的完整性, 导致更多的蛋白质类和SMPs类物质从藻细胞内溶出。此外, 与水洗相比, 气洗条件下I、II和IV区域的荧光强度更高, 说明气洗更容易破坏藻细胞, 导致其内更多的生物质有机物溶出。

2.3 反冲洗方式与排空周期对跨膜压差的影响

为优化反冲洗策略, 考察不同反冲洗方式与排空周期下的跨膜压差变化, 结果如图5所示, 其中, 水洗强度为 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 气洗强度为 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。由图5(a)可知, 水洗对膜污染的清洗效果较差, 气水联合反冲洗次之, 气洗效果较好。在初始阶段(0~48 h), 气水联合反冲洗的跨膜压差明显高于单独气洗, 表明气水联合反冲洗反而不利于清除超滤膜表面的藻源污染物。瞿芳术认为, 气水反冲洗会引起藻细胞的重新悬浮以及破裂, 加重藻源有机物引起的膜污染^[8]。在水、气反洗共同作用下, 藻体污染颗粒被重新分散悬浮于膜池中形成粒径较小的悬浮物, 这可能会堵塞膜孔。此外, 气泡会强烈扰动膜池内的浓缩液, 形成很强的冲击力, 从而有可能造成藻源有机物的释放, 加剧污染物在膜表面沉积。在72~84 h期间, 气水联合反冲洗的跨膜压差低于单独气洗, 膜通量恢复率更高, 表明在长时间运行情况下, 气水联合反冲洗在缓解膜污染方面具有一定优势。

膜池溶液也会影响膜结垢, 为此, 在单独水洗

强度为 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的条件下, 通过设置不同的排空周期来考察膜池溶液对膜污染的影响, 结果如图5(b)所示。当排空周期由12和24 h逐渐延长至36、48 h时, 运行96 h后跨膜压差由25 kPa左右逐渐升至40、85 kPa左右。排空周期会显著影响膜表面的污染物累积情况, 排空周期越长, 膜池溶液中的污染物浓度越高。在长排空周期条件下, 悬浮分散于膜池内的污染物会重新积聚在膜丝表面, 形成低渗透性能的致密凝胶层, 导致跨膜压差迅速增加。膜池放空能够及时将洗脱的污垢排出膜池, 从而减少污垢重新积聚导致膜污染加剧的风险。但是, 频繁的排放会造成水资源的浪费以及水处理负荷的增加。因此, 在保证合理的功耗与产水量条件下, 需要适当控制膜池的排空频率。

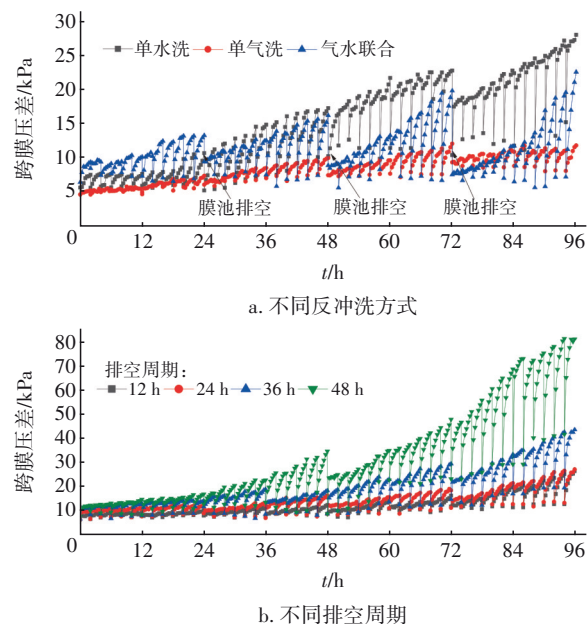


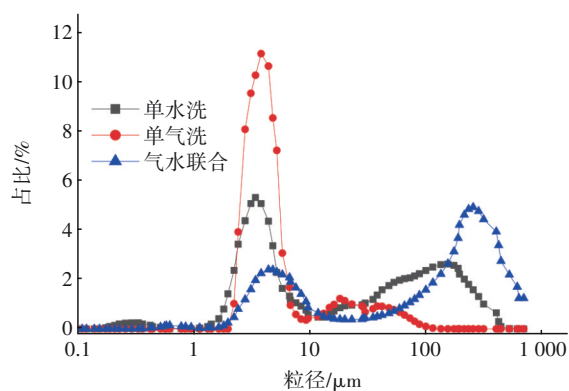
图5 不同运行条件下跨膜压差的增长情况

Fig.5 Growth of transmembrane pressure under different operation conditions

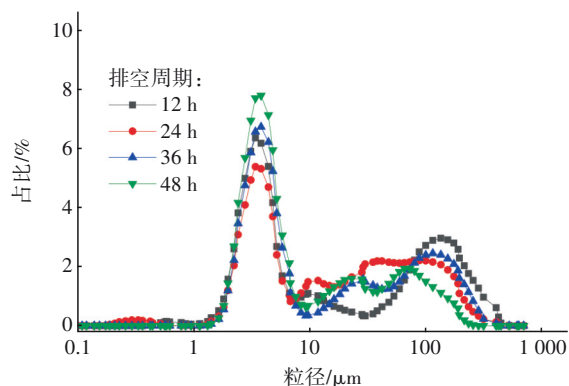
2.4 不同工况下膜污染物粒径分布及沉积路径

图6为不同反冲洗方式和排空周期下膜池颗粒物的粒径分布情况。膜池溶液中的藻细胞团聚物粒径主要分布在 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 和 $>10 \mu\text{m}$ 范围内。当采用单独水洗时, 小粒径($2 \sim 8 \mu\text{m}$)和大粒径($>10 \mu\text{m}$)范围的占比分别约为43.1%和52.8%;当采用单独气洗时, 两者的占比分别约为77.0%和15.8%。与单独水洗相比, 单独气洗的大粒径物质显著减少, 表明气洗产生的破坏力更强;当采用气水联合反冲洗时, 两者的占比分别约为24.9%和72.8%, 大粒径

物质最多,水流的扰动增加了破碎的藻细胞聚集体之间的相互作用,破裂的藻细胞分泌的黏性生物聚合物可能有助于膜污染物的重新凝聚,形成具有抵抗破碎能力的密实絮体,这有助于增强污染物在膜池内的沉降性能,减少与膜表面的直接接触。另外,测定膜表面沉积的污染物质量,结果显示,单独水洗时膜表面的污染物最多(0.45 g),单独气洗时次之(0.23 g),气水联合反冲洗时膜表面的污染物最少(0.18 g),表明单独水洗时对滤饼层的洗脱效果一般,单独气洗和气水联合反冲洗效果相近,这与跨膜压差的变化情况一致。



a. 不同反冲洗方式下膜池颗粒物的粒径分布



b. 不同排空周期下膜池颗粒物的粒径分布

图6 反冲洗方式和排空周期对膜池颗粒物粒径分布的影响

Fig.6 Effect of backwash methods and emptying cycles on particle size distribution in membrane tank

如图6(b)所示,随着排空周期的增大,膜池内的停留时间延长,在2~8 μm 粒径范围的颗粒物占比增多。随着过滤的进行,小尺寸的颗粒物逐渐在膜表面聚集压实,形成透过性较差的密实滤饼层,增加了过滤阻力。另外,随着排空周期的增大(从12 h到48 h),运行结束后膜表面残留的污染物质量从0.13 g逐渐增至0.29 g。

2.5 高藻水超滤的反冲洗优化策略

图7反映了不同反冲洗方式下藻源膜污染物的迁移过程。在恒定出水流量的条件下,超滤处理高藻水的运行初期,在抽吸压力的推动下,藻细胞污染物逐渐向膜表面迁移,跨膜压差快速增大,藻细胞集团堆叠,直到后期形成稳定的滤饼层结构后,跨膜压差相对平衡。此时,采用不同的反冲洗方式清除膜表面的污染层,进而缓解膜污染。

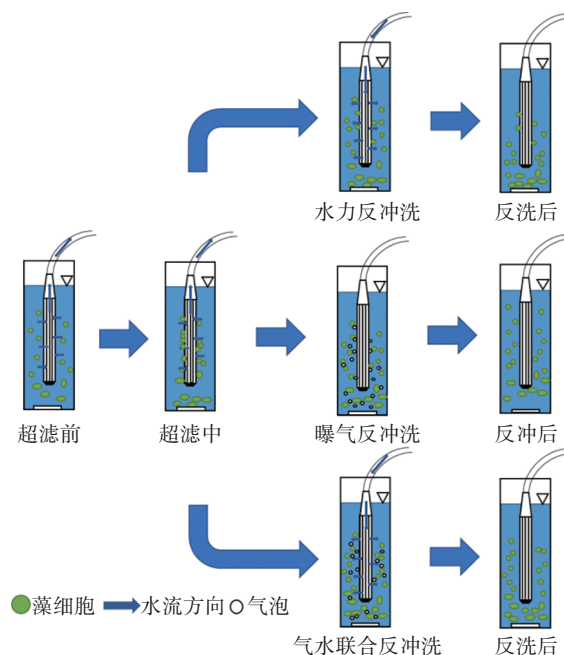


图7 不同反冲洗方式下藻源膜污染物的迁移过程

Fig.7 Migration process of algal membrane pollutants under different backwash methods

当采用单独水力反冲洗时,水流从膜孔内喷射出,不均匀地洗脱掉膜丝表面的滤饼层,相当大的藻屑随后沉降至膜池底部,再次过滤时又会快速地形成密实的滤饼层。而当采用单独曝气反冲洗时,膜池底部的曝气泵释放气体扰动膜组件,膜表面的污染物被气体充分擦洗下来,小的藻屑分散在膜池内,在底部气体的不断扰动循环下悬浮在浓缩液中,再次过滤时又会重新形成新的滤饼层。当采用气水联合反冲洗时,污染物在水流冲刷和气体的扰动下从膜组件上洗脱下来,部分大的藻屑沉降到膜池底部,小的藻屑在浓缩液中悬浮。值得注意的是,气体的扰动会增加藻细胞破裂的风险,在重新过滤的过程中,藻细胞的破碎泄漏物可能会重新聚集在膜表面,加剧膜污染。增加膜池排空频率有助于延缓跨膜压差的增长。采用低强度的气水联合

反冲洗时,膜表面黏附的污染物更少,膜池污染物的粒径更大,这可能有助于改善膜污染物的沉降性能,减少其在膜表面的沉积。因此,在选择超滤膜清洗策略时应充分考虑运行能效,可选用低强度的气水联合反冲洗方式以及适当增加浓缩液排空频率,这将有效减少膜污染带来的能耗损失。

3 结论

① 采用超滤处理高藻水时,在一定范围内,曝气清洗能局部洗脱膜表面的滤饼层,减少可逆膜污染,而且气洗强度越大,对膜表面污染物的洗脱效果越好,试验条件下,气洗强度为 $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时洗脱效果最佳。

② 曝气反冲洗能充分擦洗打散滤饼层,使其重新分散悬浮于膜池内,但气洗的扰动会增加藻细胞破裂的风险。

③ 增加膜池排空频率有助于减少膜表面污染物的沉积,使跨膜压差保持在较低的水平,在本试验条件下,当膜池排空周期为 12 h 时,膜表面残留污染物较少。

④ 采用气水联合反冲洗有助于增加膜池内藻源污染物的粒径尺寸,并减少污染物在膜表面的黏附,在较低的冲洗强度下即可达到较好的膜清洗效果。

参考文献:

- [1] 朱学武,成小翔,谢柏明,等.超滤/纳滤组合工艺的运行与优化研究[J].中国给水排水,2017,33(5):10-15.
ZHU Xuwu, CHENG Xiaoxiang, XIE Baiming, *et al.* Operation and optimization of ultrafiltration/nanofiltration hybrid membrane process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (5): 10-15 (in Chinese).
- [2] LIU B, QU F S, LIANG H, *et al.* Algae-laden water treatment using ultrafiltration: individual and combined fouling effects of cells, debris, extracellular and intracellular organic matter [J]. Journal of Membrane Science, 2017, 528: 178-186.
- [3] QU F S, LI X L, HE J G, *et al.* A new backwash strategy for reducing the cost of an immersed

ultrafiltration system by restricting cake layer breakage [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2020, 20(3/4): 1453-1462.

- [4] 鄢忠森,瞿芳术,梁恒,等.肇庆高新区超滤膜水厂示范工程运行分析[J].中国给水排水,2017,33(7):46-49.
YAN Zhongsen, QU Fangshu, LIANG Heng, *et al.* Operational analysis of ultrafiltration membrane water treatment demonstration project at Zhaoqing High-tech Industrial Development Zone [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(7): 46-49 (in Chinese).
- [5] 陈杰,黄汝英,朱春伟,等.浸没式超滤膜净化西江水试研究[J].中国给水排水,2017,33(3):46-49.
CHEN Jie, HUANG Ruying, ZHU Chunwei, *et al.* Pilot study on application of immersed ultrafiltration membrane to purify Xijiang water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 46-49 (in Chinese).
- [6] LIAO Y C, BOKHARY A, MALEKI E, *et al.* A review of membrane fouling and its control in algal-related membrane processes [J]. Bioresource Technology, 2018, 264: 343-358.
- [7] 唐小斌,郭铁成,岳霄,等.化学强化水力反冲洗缓解藻源膜污染机制及优化研究[J].给水排水,2020,46(S2):142-149.
TANG Xiaobin, GUO Tiecheng, YUE Xiao, *et al.* Mechanism and optimization of chemically enhanced backwashing in alleviating the algae derived membrane fouling [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (S2): 142-149 (in Chinese).
- [8] 瞿芳术.超滤处理高藻水过程中膜污染特性及控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
QU Fangshu. Study on Membrane Fouling Characteristics and Its Control during the Treatment of Algae-rich Water by Ultrafiltration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).

作者简介:史慧婷(1985-),女,山西运城人,硕士,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事市政规划与水处理研究工作。

E-mail:574712098@qq.com

收稿日期:2022-08-12

修回日期:2022-11-23

(编辑:刘贵春)