

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.006

不同清洗剂对 BF/UF 联用工艺膜污染的减缓特性

贺维鹏^{1,2}, 屈梦军^{1,2}, 施周^{1,2}, 郑飒^{1,2}, 吴慧英^{1,2}, 李波³

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 搭建了以微砂为载体的加载絮凝(BF)与超滤(UF)联用工艺的小试装置,结合微砂投量对膜滤效能和膜污染的影响,考察了采用柠檬酸、NaOH 和 NaClO 溶液单独清洗时受污染膜的通量衰减、污染可逆性和通量恢复率等特征。结果表明,BF 阶段投入适量微砂,可在超滤膜上形成一层具有特殊结构且透水性能良好的滤饼层,有利于 UF 过程中提高膜比通量、减缓水洗后膜污染及优化膜滤出水水质,但无法有效抑制不可逆膜污染的累积;选用不同类型和浓度的药剂对受污染膜进行单独化学清洗后,碱洗效果优于氧化剂清洗,而酸洗在 3 种化学清洗方法中表现最差,究其原因酸、碱及氧化剂去除不同种类污染物的能力各异,致使不可逆污染清除程度存在显著差别。此外,还初步解析了不同化学清洗条件减缓膜污染的作用机理,并指出在实际操作过程中需同时兼顾化学清洗剂的种类及浓度,以实现清洗效果的最优化。

关键词: 加载絮凝; 超滤; 膜污染; 化学清洗; 微砂

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0033-07

Characteristics of Membrane Fouling Mitigated by Different Cleaning Agents in BF/UF Combined Process

HE Wei-peng^{1,2}, QU Meng-jun^{1,2}, SHI Zhou^{1,2}, ZHENG Sa^{1,2}, WU Hui-ying^{1,2}, LI Bo³

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency <Ministry of Education>, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Changsha Planning & Design Institute Co. Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: A lab-scale experimental device was established for the combined process of ballasted flocculation (BF) and ultrafiltration (UF) using microsand as the carrier. The effect of the microsand dosage on the ultrafiltration efficiency and membrane fouling was analyzed, and the flux attenuation, fouling reversibility and flux recovery rate of the contaminated membrane were investigated when citric acid, NaOH and NaClO solutions were used for separate cleaning. A cake layer with special structure and good water permeability was formed on the UF membrane by adding appropriate amount of microsand in the BF process, which was conducive to improving the membrane specific flux, slowing down the membrane fouling after washing and improving the effluent quality during the UF process. However, it

could not effectively inhibit the accumulation of the irreversible membrane fouling. Different types and concentrations of agents were selected for separate chemical cleaning of the contaminated membranes. The performance of alkali cleaning was better than that of the oxidant cleaning, while the acid cleaning had the worst cleaning performance among the three types of chemical cleaning. The reason was that the ability to remove various kinds of pollutants for each cleaning agent was quite different, leading to a significant difference in the degree of irreversible fouling removal. In addition, the mitigation mechanisms of the membrane fouling under different chemical cleaning conditions were preliminarily revealed, and it was pointed out that the type and concentration of the chemical cleaning agent should be taken into account in the actual operation to optimize the cleaning performance.

Key words: ballasted flocculation; ultrafiltration; membrane fouling; chemical cleaning; microsand

在超滤(UF)技术日益规模化用于饮用水处理的今天,膜污染仍然是制约其运行效能的关键因素^[1]。水源水中普遍存在的悬浮物、无机盐和溶解性有机物等会与膜发生物理化学作用,引起膜孔堵塞(或变小)以及在膜表面形成附着层,造成难以避免的可逆或不可逆污染,最终致使膜通量不断下降、膜滤水质变差^[2-3]。为有效减缓超滤膜的不可逆污染,需要采用一定浓度的酸、碱或氧化剂对受污染膜进行化学清洗,依靠清洗剂与残留于膜表面及膜孔内污染物之间的溶解、置换或化学改性作用来恢复膜通量,但不合理的化学清洗可能导致膜材料的结构和性能等发生不可逆变化,甚至使其丧失功能性,故必须加以控制^[4-6]。

已有研究表明^[7],适宜条件下的混凝预处理同样可对减缓超滤膜污染起到积极作用。相较于传统化学絮凝工艺,以微砂为载体的加载絮凝(BF)技术,通过在混凝阶段投加适宜粒径的微砂颗粒,借助其较低的表面电荷密度诱导絮体迅速生长,并利用加载絮体对重金属离子、溶解性有机物等强有力的吸附作用,促使更多的污染物在絮凝体系中以悬浮态形式存在。若将其作为超滤的前置工艺,这些悬浮态污染物极易被截留于膜表面,同时微砂颗粒还可改变膜上滤饼层的孔隙率和可压缩性,进一步发挥协同吸附和截留作用,均有利于提升净水效果,并影响着联用工艺的膜通量变化和膜污染行为^[8-10]。然而,鲜有报道系统地探究化学清洗对BF/UF联用过程中减缓膜污染及通量恢复的影响机理。

为此,笔者以高岭土、腐殖酸和三价铈(Sb^{3+})的混合液为模拟原水,在研究微砂投量对BF/UF联用工艺超滤膜污染减缓特性的基础上,重点考察化

学清洗剂种类及浓度对受污染膜的通量变化、不可逆污染去除和过滤性能恢复等的影响,并初步分析了不同清洗条件下减缓膜污染的作用机理,旨在为BF/UF运行过程中合理选择化学清洗方案提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验水样:选用高岭土(分析纯)、腐殖酸(化学纯)和酒石酸锑钾(分析纯)分别模拟原水中的浊质颗粒、天然有机物和重金属等污染物,并用超纯水配制试验水样,其浊度为 (100 ± 1) NTU、 UV_{254} 为 $(0.200 \pm 0.005) \text{ cm}^{-1}$ 、 Sb^{3+} 含量为 $50 \mu\text{g/L}$ 。

加载絮凝试验材料:混凝剂采用聚硫酸铁(PFS;相对密度为1.45;分析纯),助凝剂为阳离子型聚丙烯酰胺[CPAM;分子质量为 $(800 \sim 1500) \times 10^4 \text{ u}$;分析纯],载体颗粒选用粒径为 $75 \sim 106 \mu\text{m}$ 的微砂。

化学清洗剂:用超纯水配制质量浓度为1%和5%的柠檬酸溶液、0.05%和0.2%的NaOH溶液以及0.1%和0.5%的NaClO溶液,分别作为酸性、碱性和氧化性清洗剂,以上3种清洗试剂均为市售分析纯试剂。

1.2 试验方法

依照Desjardins等^[10]提出的小试方案对传统烧杯试验步骤予以改进,并在TA6-2型六联搅拌仪上按图1(a)所示的搅拌强度(G)与时间开展单因素加载絮凝试验。除特殊说明外,均根据预先设置的条件进行加载絮凝试验,即PFS、CPAM和微砂投量分别为 10 mg/L 、 0.3 mg/L 和 3 g/L ,并采用盐酸和NaOH将水样pH值调节为7。超滤试验装置及

流程如图1(b)所示。将经加载絮凝处理的水样转移至 MSC300 型超滤杯中,其底部装有截留分子质量为 100 ku 的聚偏氟乙烯 (PVDF) 平板超滤膜,并由氮气提供驱动力(保持恒压 0.10 MPa),出水质量用与电子天平相连的计算机进行实时记录,计算恒压膜通量。

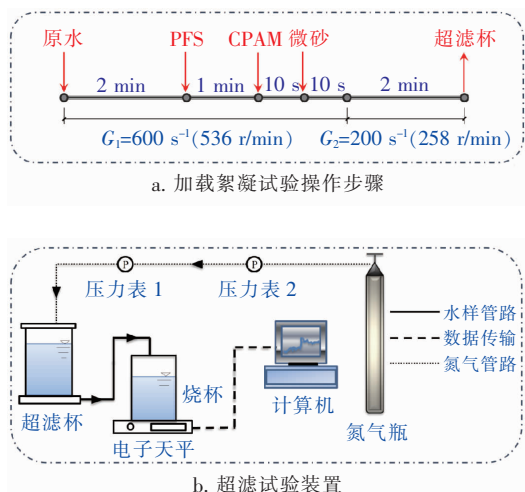


图1 加载絮凝/超滤试验示意

Fig.1 Schematics of ballasted flocculation/ultrafiltration test

不同微砂投量及化学清洗条件下的超滤过程均分为3个过滤周期,每个周期依次过滤200 mL超纯水和260 mL加载絮凝水样,分别计算并记录相应的纯水通量(J_w)和每过滤20 mL絮凝水样时的过滤通量(J_v ,其中 V 表示过滤絮凝水样的累加体积)。特别地,在各周期结束时均将膜片取出,进行水洗或采用指定浓度的酸、碱和氧化剂单独清洗受污染的膜。清洗时,首先用振荡器在固定的振幅和频率下振荡3 min,最大程度地促使膜表面的滤饼层脱落,再用洗瓶对膜正反面进行水力冲洗,以清除残留污染物。

1.3 膜污染评价方法

膜污染程度:用膜比通量(J_v/J_0 ,其中 J_0 为原始膜的纯水通量)随过滤絮凝水样体积 V 的变化表征超滤过程中膜污染的程度。膜比通量越大,意味着膜污染程度越小^[7]。

膜污染可逆性:通常可将超滤膜污染分为可逆和不可逆两类,相应的可逆污染值(RF)、不可逆污染值(IF)和总污染值(TF)均可由膜通量求得^[1]。 $RF = (J_w - J_e)/J_0$; $IF = (J_0 - J_w)/J_0$; $TF = RF + IF$ 。其中, J_0 为超滤膜的初始纯水通量, J_e 为过滤结束时的膜通量, J_w 为经指定浓度清洗剂清洗受污染膜

后的纯水通量。

化学清洗效果:采用膜通量恢复率(FRR)来评价超滤膜的化学清洗效果,其值可由相同过滤压力下清洗膜的纯水通量 J_w 与原始膜的纯水通量 J_0 的比值求得^[5],见式(1)。

$$FRR = \frac{J_w}{J_0} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 微砂投量对BF/UF工艺膜污染的影响

设定混凝剂PFS、助凝剂CPAM的投量分别为10和0.3 mg/L,原水pH值为7,选用水洗方式对超滤阶段各周期结束时的受污染膜片进行清洗,考察微砂投量为0、1、3和5 g/L时BF/UF联用工艺膜通量衰减趋势和水洗后膜通量的恢复情况,相关结果如图2所示。可以看出,各过滤周期内膜比通量均随超滤絮凝水样体积的增加呈下降趋势,变化幅度按由大到小的排序为:第1周期>第2周期>第3周期,并且下一周期膜比通量的初始值和末端值都低于前一周期的相应值。就膜通量恢复情况而言,采用超纯水对第1周期结束时受污染膜片进行清洗后,0、1、3、5 g/L微砂投量对应的膜通量恢复率分别为66.81%、72.70%、74.91%和75.01%,而第2周期的受污染膜片经水洗后不同投量下的膜通量恢复率均变得更小,与第1周期的相应值相比分别下降了26.87%、25.45%、24.14%和24.01%。初步表明,单靠水洗不仅难以有效去除膜污染,同时还极易造成累积不可逆膜污染随着过滤周期的增加而逐渐加剧。

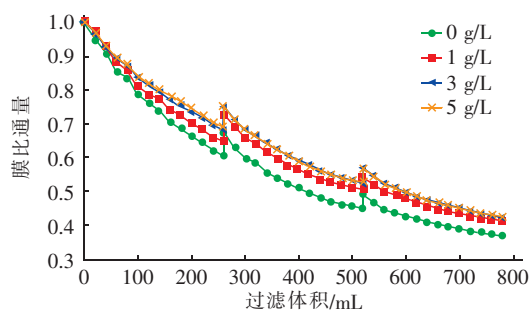


图2 微砂投量对膜比通量的影响

Fig.2 Effect of microsand dosage on membrane specific flux

由图2还可知,与不投加微砂的工况相比,加载絮凝阶段加入微砂更有益于超滤过程中取得较大的末端膜比通量和较小的膜通量下降幅度。具体而

言,微砂投量为 0 g/L 时,过滤 260、520 和 780 mL 絮凝水样后超滤膜比通量分别为 0.605 0、0.446 6 和 0.368 4,与第 1 周期的初始值相比分别下降了 39.50%、55.34% 和 63.16%,而当投量增至 1 g/L 时,3 个周期的末端膜比通量下降幅度分别减小至 35.20%、49.79% 和 58.72%;之后,随着微砂投量的增加(即 3 和 5 g/L),各周期的末端膜比通量进一步增大,分别稳定于 0.685 5、0.524 5 和 0.421 3 附近。相较于第 1 周期的初始值,相应的降幅约为 31.45%、47.55% 和 57.87%。

除借助恒压超滤过程中膜通量变化来直观反映超滤膜受污染程度外,还研究了微砂投量对第 3 个过滤周期膜污染可逆性的影响,如图 3 所示。可知,当微砂投量由 0 g/L 增至 1 g/L 时,膜不可逆污染值和总污染值分别下降了 10.46% 和 10.02%,而在微砂投量为 3 和 5 g/L 条件下,上述两个污染指标在 0.430 9 和 0.475 5 附近呈小幅波动,相较于未加微砂的工况分别各减小了 15.76% 和 14.07%。可见,向加载絮凝体系中加入适量的微砂,有助于降低超滤阶段膜不可逆污染和削弱总污染。

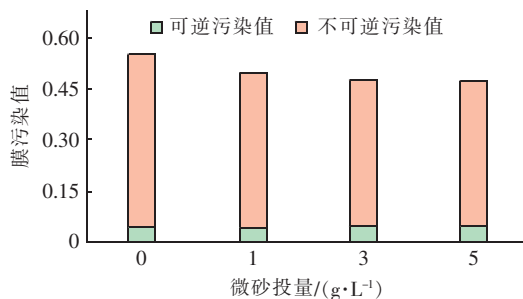


图3 微砂投量对膜污染可逆性的影响

Fig.3 Effect of microsand dosage on membrane fouling reversibility

超滤过程中形成不可逆膜污染的主要诱因通常是胶体颗粒和溶解态有机物吸附于膜孔内部或阻塞膜孔,因而如何最大化地减少这些污染物直接与超滤膜接触,对提高末端膜比通量以及改善水洗后膜通量恢复效果均有积极作用^[8]。图4为微砂投量对加载絮凝过程中污染物去除效果的影响。可以看出,当微砂投量为 1 g/L 时,经加载絮凝处理后水样的浊度、UV₂₅₄ 和 Sb³⁺ 含量分别为 36.5 NTU、0.048 cm⁻¹、22.3 μg/L,与不投加微砂相比变化显著,相应指标分别降低了 57.24%、68.51% 和 53.76%;当微砂投量增加至 3~5 g/L 时,上述各指标继续变

小,分别在 8.3 NTU、0.016 cm⁻¹ 和 13.3 μg/L 附近波动。此情况下,若将加载絮凝与超滤两工艺联用,已形成的加载絮体及未被捕获的游离态微砂颗粒将在超滤膜上逐渐形成一层具有特殊结构且透水性能良好的滤饼层,由于存在具有较低表面电荷密度的微砂,滤饼层除了发挥筛分过滤作用外,还能进一步强化吸附膜前待滤液中呈溶解态的污染物(尤其是腐殖酸),阻碍这些污染物与超滤膜表面直接接触,从而达到减缓膜污染和稳定超滤出水水质的目的。这也阐释了提高微砂投量可以促使总污染和不可逆污染呈下降趋势的原因,以及超滤出水中浊度、UV₂₅₄ 和 Sb³⁺ 浓度等均处于较低水平的原因。

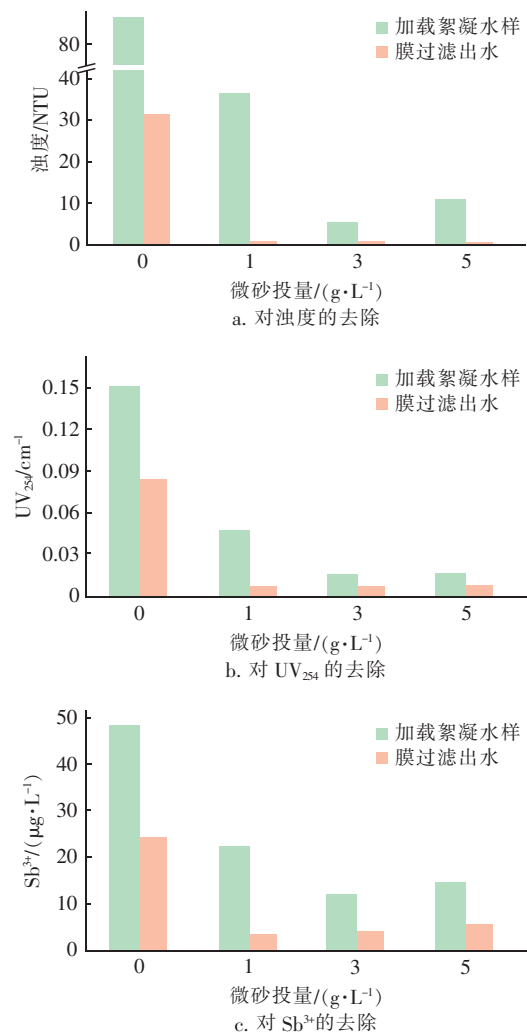


图4 微砂投量对污染物去除效果的影响

Fig.4 Effect of microsand dosage on pollutants removal

2.2 化学清洗对膜通量及污染控制的影响

根据上述分析,仅靠单独水洗无法有效清除各周期结束时膜表面和膜孔内部的污染物,致使膜通

量恢复率急剧下降,因而有必要采用化学清洗来抑制膜污染的累积。当PFS投量为10 mg/L、CPAM投量为0.3 mg/L、微砂投量为3 g/L、原水pH值为7时,加载絮凝过程中,不同清洗剂种类及浓度下膜通量的变化如图5所示。由图5可知,采用1%和5%的柠檬酸单独进行清洗时,第2周期的初期膜比通量相较于超纯水清洗时分别增加了3.92%和13.98%。采用NaOH和NaClO进行清洗时变化更显著,当采用0.05%和0.2%的NaOH以及0.1%和0.5%的NaClO进行清洗时,第2周期的初期膜比通量分别为0.932 1、1.094 1、0.955 6、0.918 3,分别是仅采用超纯水的1.24倍、1.46倍、1.28倍和1.23倍。采用化学清洗时,第3周期的各初期膜比通量也均大于水洗时的相应值,按通量由大到小排序依次为:NaOH > NaClO > 柠檬酸 > 超纯水,并且对于同一种清洗剂,浓度越高对应的初期膜比通量越大。此外,清洗剂种类及浓度对各周期末端膜比通量的影响规律与初期膜比通量的类似。

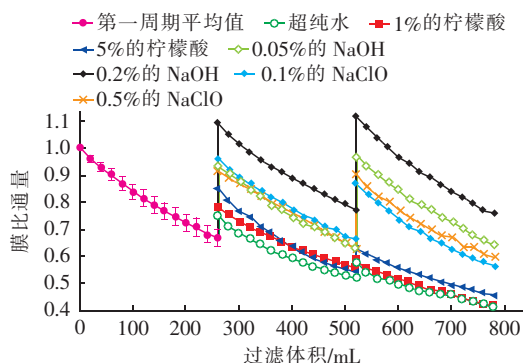


图5 不同清洗剂种类及浓度下膜通量的变化

Fig.5 Variation of membrane flux under different types and concentrations of cleaning agent

结合第3个过滤周期末端膜污染可逆性,清洗剂种类及浓度对膜污染可逆性的影响如图6所示。可知,相较于超纯水,采用化学清洗剂进行单独清洗时,均可有效减缓膜污染(尤其是不可逆污染)的发生,且碱洗效果优于酸洗和氧化剂清洗。具体而言,当采用1%和5%的柠檬酸进行清洗时,膜不可逆污染值由超纯水清洗时的0.431 7减小至0.413 3和0.367 6,降幅分别为4.26%和14.85%。而选用0.1%和0.5%的NaClO进行单独清洗时,不可逆污染值分别下降了69.89%和77.88%,此时不可逆污染所占比值也显著降低(在总污染值中的占比不足40%)。与柠檬酸和NaClO两种清洗剂相比,采用

0.05%和0.2%的NaOH对受污染膜进行单独清洗后,不可逆污染值分别仅为超纯水洗时的7.34%和4.36%,各自在同一清洗浓度对应的总污染值中占比也骤减至8.59%和5.15%。这主要是由于化学清洗通常是利用某一浓度的清洗剂与造成不可逆污染的各类物质发生反应,以分解清除残留于膜表面及膜孔内的污染物,促使受污染膜的透水性能得到有效恢复,但在进行单独化学清洗时,酸、碱及氧化剂去除不同类型污染物的能力各异^[4],故对不可逆膜污染的减缓程度也存在明显差异。

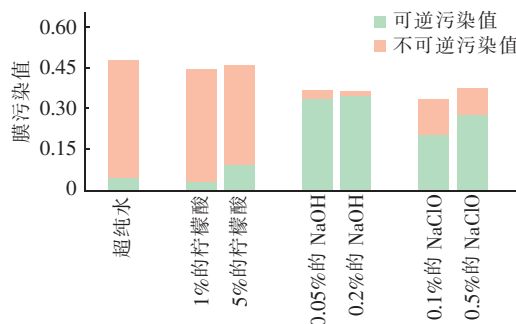


图6 清洗剂种类及浓度对膜污染可逆性的影响

Fig.6 Effects of cleaning agent type and concentration on membrane fouling reversibility

2.3 基于膜污染形成机理的化学清洗效果分析

将混凝作为超滤的预处理技术,可以在膜前最大化地去除水中引起超滤膜不可逆污染的胶体颗粒和溶解性污染物,或改变这些物质在待滤液中的存在形态,减少其与膜表面直接接触的机会,从而达到降低膜过滤负荷、优化滤饼层结构和减缓膜污染的目的^[1]。图7为BF/UF工艺膜污染生成以及清洗情况。

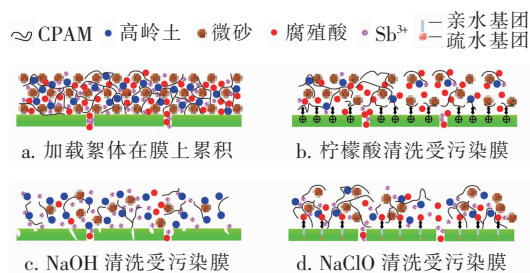


图7 BF/UF工艺膜污染生成及清洗示意

Fig.7 Schematics of formation and cleaning of membrane fouling in BF/UF process

由于加载絮凝过程中加入了具有较低表面电荷密度的微砂颗粒,有效提高了污染物在絮凝体系因吸附于絮体上而呈悬浮态的可能性^[9],并且在超滤

膜表面形成滤饼层的微砂颗粒还具有双重功能:一方面,可将微砂视为滤饼层的“骨架”,有利于提高恒压超滤过程中滤饼层的抗压缩变形能力和孔隙率,以确保其内部过滤通道的畅通;另一方面,存在于滤饼层内的微砂颗粒能够强化对膜滤液中腐殖酸和 Sb^{3+} 等溶解态污染物的再次吸附并拦截于滤饼层内,减小污染物的透过率^[8],故在控制膜污染和稳定出水水质方面比不投加微砂的工况更有优势。尽管如此,仅靠超纯水清洗仍不能有效抑制膜污染(尤其是不可逆污染)的累积,表现为在不同微砂投量条件下,第3个过滤周期末的不可逆污染所占比例均高于90%。

在加载絮凝试验条件下,清洗剂种类及浓度对膜通量恢复的影响如图8所示。

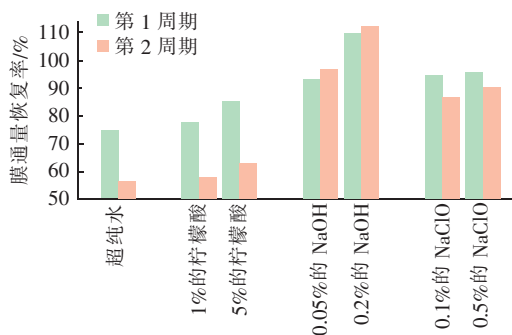


图8 清洗剂种类及浓度对膜通量恢复的影响

Fig.8 Effects of cleaning agent type and concentration on membrane flux recovery

无论是对于第1周期还是第2周期的受污染膜片,采用单独化学清洗后其膜通量恢复率均高于超纯水洗的,这意味着非常有必要采用化学清洗来实现膜通量的有效恢复;碱洗的通量恢复效果整体上要优于氧化剂清洗,而采用柠檬酸溶液清洗后各周期的通量恢复率在3种化学清洗方法中均最低。结合前人^[4-6]研究成果和图7可知,柠檬酸作为一种有机酸,已被证实不仅可通过与金属氧化物或氢氧化物等污染物的螯合效应对沉积于膜表面的此类无机污染物予以部分去除,同时经其清洗后的膜表面因正电荷数量有所增加,会与加载絮凝体系中电性相同的微小絮体颗粒之间产生排斥作用,从而降低了颗粒物进入膜孔内部的可能性,但由于柠檬酸清洗对造成不可逆污染主要物质(如腐殖酸等)的去除能力非常有限,致使膜通量恢复率要显著低于其他两种化学清洗法。 NaClO 水解产物具有较强的氧化性,可通过将存在于膜表面或膜孔内的有机物中

疏水官能团降解为亲水基团而促使这些污染物变得易溶于水,便于在清洗过程中被去除,并且 NaClO 清洗还增强了PVDF膜表面的亲水性,有助于下一个过滤周期内减少腐殖酸黏附于膜表面,这均对提高膜通量恢复效果有促进作用。相较于酸洗和氧化剂清洗, NaOH 清洗通过溶解或水解作用促使腐殖酸等有机大分子去质子化,显著增强其在水中的溶解性,使得清洗剂在短时间内即可进入膜孔内部而提升清洗效率,以达到膜清洗的目的。此外,在加载絮凝/超滤联用过程中,引起膜不可逆污染的物质除腐殖酸外,还可能有高分子聚合物^[3],关于二者对膜不可逆污染的贡献程度尚需进一步研究。

由图8还可以看出,同一种清洗剂的浓度越高,同一周期受污染膜片清洗后的通量恢复效果越好;但就特定清洗剂而言,进行单独化学清洗时还应采用适宜的浓度,如对于柠檬酸清洗剂,浓度为1%时第1、2周期的膜通量恢复率仅比水洗时的相应值分别提高了2.94%和1.84%,清洗效果改善并不明显,而采用0.2%的 NaOH 进行单独清洗时,各周期的膜通量恢复率均大于100%,这可能是由于 NaOH 与PVDF膜材质发生化学反应,造成膜原有结构的不可逆破坏^[6],如膜孔径变大或膜表面受损等。因而,在实际操作时,需根据造成膜污染的主要污染物类型考虑化学清洗剂的种类及浓度,以达到较优的清洗效果。

3 结论

① 相较于不加微砂的工况,加载絮凝阶段加入微砂更有利于提高超滤膜通量、减缓膜污染(尤其是不可逆污染),以及确保超滤出水中浊度、 UV_{254} 和 Sb^{3+} 浓度等均处于较低水平。

② 将加载絮凝作为超滤的预处理工艺,尽管具有较低表面电荷密度的微砂颗粒及形成的加载絮体可有效控制待滤液中引起不可逆膜污染物的含量与存在形态,但单靠水洗仍无法在超滤过程中取得较大的末端膜比通量和较小的膜通量下降幅度。

③ 采用指定浓度的化学清洗剂分别对第1周期和第2周期末的受污染膜片进行单独清洗后,在提高末端膜比通量、减缓膜污染(尤其是不可逆污染)和改善受污染膜的通量恢复效果方面均表现为碱洗优于氧化剂清洗,而酸洗在3种化学清洗方法中效果最差。

④ 就特定清洗剂而言,进行单独化学清洗时

若溶液浓度选择不适宜,其清洗效果与水洗相比改善可能并不明显,也有可能导致超滤膜原有结构发生不可逆破坏,因而在实际操作时,应根据引起膜污染物质的类型来同时兼顾化学清洗剂的种类及浓度,以优化清洗效果。

参考文献:

- [1] 姬晓羽,南军,王振北,等. 混凝/粉末炭组合预处理改善超滤膜污染可逆性的效能[J]. 中国给水排水, 2019,35(3):1-6.
JI Xiaoyu, NAN Jun, WANG Zhenbei, *et al.* Improving the reversibility of ultrafiltration membrane fouling by coagulation/powdered activated carbon combined pretreatment[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(3):1-6(in Chinese).
- [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 Xiaobing, YOU Haorong, YE Yuanliu, *et al.* Membrane fouling of PAC/UF process treating micro-polluted source water[J]. China Water & Wastewater, 2020,36(11):27-32(in Chinese).
- [3] HUANG Y F, FENG X S. Polymer-enhanced ultrafiltration: fundamentals, applications and recent developments[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 586:53-83.
- [4] PORCELLI N, JUDD S. Chemical cleaning of potable water membranes: a review [J]. Separation and Purification Technology, 2010,71(2):137-143.
- [5] 张晓岚,王敏,柴文,等. 混凝-超滤组合工艺中受污染超滤膜的化学清洗及其对水质的影响[J]. 给水排水, 2016,42(1):17-22.
ZHANG Xiaolan, WANG Min, CHAI Wen, *et al.* Chemical cleaning of membrane fouled in coagulation - ultrafiltration combined process and its effect on the effluent quality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016,42(1):17-22(in Chinese).
- [6] 刘璟言,卢小艳,朱燕茹,等. 低浓度 NaClO 和 NaOH 对聚偏氟乙烯超滤膜老化的影响[J]. 中国环境科学, 2017,37(2):606-612.
LIU Jingyan, LU Xiaoyan, ZHU Yanru, *et al.* Effect of NaClO and NaOH at low agent concentration on the ageing of PVDF ultrafiltration membrane [J]. China Environmental Science, 2017, 37(2):606-612(in Chinese).
- [7] WANG Z B, NAN J, YAO M, *et al.* Insight into the combined coagulation - ultrafiltration process: the role of Al species of polyaluminum chlorides [J]. Journal of Membrane Science, 2017,529:80-86.
- [8] WANG J W, CAHYADI A, WU B, *et al.* The roles of particles in enhancing membrane filtration: a review[J]. Journal of Membrane Science, 2020,595:117570.
- [9] GASPERI J, LABORIE B, ROCHER V. Treatment of combined sewer overflows by ballasted flocculation: removal study of a large broad spectrum of pollutants [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 211/212: 293-301.
- [10] DESJARDINS C, KOUDJONOU B, DESJARDINS R. Laboratory study of ballasted flocculation [J]. Water Research, 2002,36(3):744-754.

作者简介:贺维鹏(1983-),男,山西稷山人,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为膜污染分形解析及优化控制。

E-mail:heweipengwater@163.com

收稿日期:2020-09-11

修回日期:2020-10-16

(编辑:任莹莹)

深入实施乡村振兴战略,促进人水和谐