

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.005

氧化-阻垢工艺对纳滤复合膜污染的缓解效果

刘文恺¹, 柳斌², 周石庆³, 吴若希³, 施周³

(1. 清华大学环境学院 区域环境安全全国重点实验室, 北京 100084; 2. 北京师范大学未来技术学院 环境与生态前沿交叉研究院, 广东 珠海 519000; 3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 以我国东南沿海某地区海水为试验对象,系统研究氧化-阻垢短程联用工艺对纳滤膜无机-有机-生物复合膜污染的缓解效果。结果表明,在有机物和细菌的影响下,低浓度阻垢剂无法起到良好的阻垢效果;高浓度绿色有机阻垢剂会加重纳滤膜的有机负荷,降低有机物的去除率并导致消毒副产物浓度增大;经联用工艺处理后,膜污染得到有效缓解的同时提高了有机物和消毒副产物的去除效能,过滤600 min后膜比通量仍能维持在 0.534 ,不可逆阻力降至 $0.16 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$,料液中钙离子、镁离子和硫酸根离子去除率均维持在95%左右;氧化-阻垢联用工艺相较于单独氧化工艺,其有机物和消毒副产物去除率有所下降;在实际应用过程中,需根据现场水质情况合理安排药剂投加顺序。联用工艺极大地改善了膜表面结晶现象,有效抑制微生物在膜表面生长,形成较为平滑的滤饼层结构,增强了纳滤膜抵抗污染物吸附的能力,可为缓解海水淡化过程中纳滤复合膜污染提供技术支撑。

关键词: 氧化-阻垢联用工艺; 纳滤膜; 无机-有机-生物复合膜污染; 海水淡化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0037-07

Performance of Oxidation-Antiscale Integrated Process for Mitigating Nanofiltration Composite Membrane Fouling

LIU Wen-kai¹, LIU Bin², ZHOU Shi-qing³, WU Ruo-xi³, SHI Zhou³

(1. National Key Laboratory of Regional Environmental Safety, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Advanced Interdisciplinary Institute of Environment and Ecology, School of Technology for Sustainability, Beijing Normal University, Zhuhai 519000, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This study systematically evaluated the effectiveness of a short-range integrated process involving oxidation and antiscale in mitigating inorganic-organic-biological composite membrane fouling in a nanofiltration system for desalination of seawater in a specific region along the southeast coast of China. Under the influence of organic matter and bacteria, low-concentration antiscalant was ineffective in achieving satisfactory scale inhibition. The application of high-concentration green organic antiscalant, on the other hand, increased the organic load of nanofiltration membrane, decreased the removal rate of organic matters, and consequently led to a higher concentration of disinfection by-products. After the integrated process treatment, membrane fouling was significantly mitigated, and the removal efficiencies

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100103)

通信作者: 柳斌 E-mail: ahxclb@163.com

of organic matters and disinfection by-products were notably enhanced. Following 600 minutes of filtration, the membrane maintained a specific flux of 0.534, while the irreversible resistance was reduced to $0.16 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$. Additionally, the removal efficiencies of calcium ions, magnesium ions, and sulfate ions in the feed solution remained consistently at approximately 95%. Compared to the oxidation process alone, the integrated process combining oxidation with antiscaling resulted in a lower removal efficiencies of organic matters and disinfection by-products. During practical implementation, the sequence of chemical dosing should be appropriately arranged based on the specific water quality conditions at the site. The oxidation-antiscaling integrated process significantly enhanced the crystallization phenomenon on the membrane surface, effectively suppressed microbial growth, facilitated the formation of a relatively smooth filter cake layer structure, improved the nanofiltration membrane's resistance to pollutants adsorption, and could provide technical support for mitigating membrane fouling during the seawater desalination process.

Key words: oxidation-antiscaling integrated process; nanofiltration; inorganic-organic-biological composite membrane fouling; seawater desalination

随着人口增加及城镇化速度加快,淡水资源越来越受到国家和社会的重视。我国主要城市淡水资源人均占有率为世界第109位,被联合国列为13个贫水国之一^[1]。尤其在东南沿海地区,海水的侵蚀严重影响了人们的日常生活和农业劳作。海水淡化势在必行,且已逐渐成为解决淡水资源短缺问题的有效途径。

纳滤技术以其优异的分离性能广泛应用于海水淡化,然而,海水中金属阳离子浓度较高,极易在膜表面结晶,从而造成无机污染。此外,天然有机物和微生物的存在不仅会加强金属阳离子的结晶行为,而且会吸附于膜表面造成有机污染和生物污染。膜表面极为复杂的污染过程严重阻碍了纳滤工艺在海水淡化过程中的应用^[2]。

阻垢剂的使用可以有效抑制无机晶体的结垢行为。聚天冬氨酸是一种高效可降解的新型绿色阻垢剂^[3],其由 α -天冬氨酸残基和 β -天冬氨酸残基聚合而成,每个残基均含有一个羧基官能团。羧基可以与钙离子络合,发挥络合增溶效应,有效减少钙垢的形成^[4],还可以与氨基反应生成侧链以抑制结垢。聚天冬氨酸具有良好的凝聚与分散作用,在与钙垢结晶(碳酸钙、硫酸钙)碰撞后发生物理吸附效应,包裹在结晶体表面形成双电子层。聚天冬氨酸还具有链状结构,可以同时吸附多个带有相同电性的微晶体,这些微晶体间存在的静电斥力阻碍了相互的碰撞和连接,从而限制晶体生长。此外,氧

化法被证明能够有效去除有机物并抑制细菌繁殖^[3],目前国内主要研究聚天冬氨酸及其衍生物的无机晶体阻垢效果,而有关无机-有机-生物复合膜污染缓解的研究尚属罕见。

笔者对我国东南沿海某地区的海水水质特点进行调研,并以此为研究对象构建一种氧化与阻垢耦合的短流程工艺,考察其在不同处理条件下对纳滤膜无机-有机-生物复合膜污染的缓解效果。同时,考察其对细菌、常见有机污染物和消毒副产物(DBPs)的去除效果,旨在为该工艺的大规模应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 原水水质

笔者对福建省沿海某地区的海水水质特点进行调研,其中,水温为21~27℃,pH为4.5~5.5, UV_{254} 为0.050~0.602 cm^{-1} ,TOC为0.76~4.73 mg/L,钙离子浓度为107.66~539.58 mg/L,电导率为3.85~5.35 mS/cm,水质波动较大。采用实验室配制试验原水的方法模拟海水,其中,腐殖酸浓度为5 mg/L,电导率为5 mS/cm,pH为5.0 $\pm$ 0.5。选取嗜盐芽孢杆菌为目标菌种,考察生物污染情况,投加量为100 CFU/mL。试验原水中,钠离子、钙离子、镁离子、钾离子、硫酸根离子以及氯离子的投加浓度分别为10 000、400、480、250、1 920和16 450 mg/L。

1.2 试验材料与装置

试验用纳滤膜为陶氏NF270聚酰胺膜,截留分

子质量为300 ku,膜有效面积为42 cm²;采用氯化钠、氯化钙、氯化钾及硫酸镁模拟海水,所选用试剂均为分析纯且购买自国药公司;腐殖酸纯度为99%,购买自阿拉丁试剂公司;嗜盐芽孢杆菌购买自中国工业微生物菌种保藏管理中心(编号:10442),细菌培养在无菌操作台中进行,于37℃培养箱中培养24 h后取出计数。纳滤过滤系统由低温恒温槽、磁力驱动齿轮泵、流量计、压力表、纳滤膜池、电子天平和计算机组成。原水罐中水体温度通过低温恒温槽控制为(25±1)℃;氧化剂和阻垢剂在原水罐中充分混合并反应5 min后,通过磁力驱动齿轮泵进入纳滤膜池;膜池采用恒压错流过滤的运行方式,压力维持在0.8 MPa,流量维持在30 L/h;将烧杯置于电子天平上端用以计量纳滤产水体积,并记录于计算机中。纳滤试验装置如图1所示。

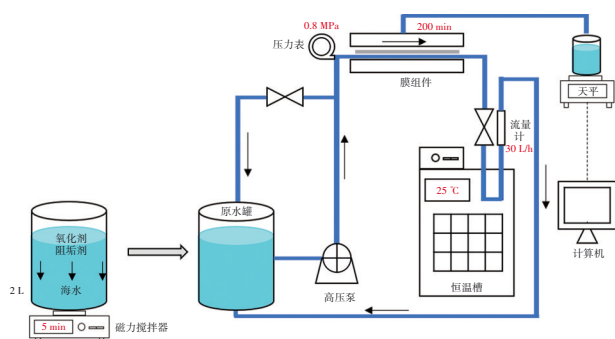


图1 纳滤试验装置示意

Fig.1 Schematic of nanofiltration experiment set-up

1.3 膜阻力计算

试验开始前,滤膜需提前使用超纯水浸泡24 h以上并在膜池中压实,纳滤膜的超水平均通量记为 J_0 ,单位为L/(m²·h)。试验开始后,最后10 mL原水平均通量记为 J_1 。采用海绵在流动的超纯水下轻轻擦去膜表面滤饼层,随后将膜反置于膜池中并使用超纯水对其进行反冲洗。反冲洗过程中压力与过滤过程保持一致,即0.8 MPa,流量维持在30 L/h,持续冲洗30 min。将清洗后的纳滤膜重新置于膜池中,使用超纯水过滤从而得到通量 J_2 。根据膜污染串联阻力模型,纳滤膜污染总阻力(R_{tot})可由式(1)计算得到。 R_{tot} 又可划分为膜固有阻力(R_m)和滤饼层阻力(R_s),前者可由式(2)算得,而后者可进一步划分为不可逆阻力(R_{ir})和可逆阻力(R_r),可分别由式(3)和式(4)计算得到。

$$R_{tot} = \frac{\Delta P}{\mu J_1} \quad (1)$$

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_0} \quad (2)$$

$$R_{ir} = \frac{\Delta P}{\mu J_2} - \frac{\Delta P}{\mu J_0} \quad (3)$$

$$R_r = \frac{\Delta P}{\mu J_1} - \frac{\Delta P}{\mu J_2} \quad (4)$$

式中: ΔP 为操作压力,Pa; μ 为水的动力黏度系数,Pa·s。

1.4 分析项目和方法

采用紫外分光光度计测定UV₂₅₄;采用Multi N/C 2100S型总有机碳分析仪测定溶解性有机碳(DOC),由于离子浓度较高,全部水样需在测定前稀释一倍;采用AA7000型原子吸收仪测定试验前后金属阳离子浓度,采用赛默飞Dionex型离子色谱测定阴离子浓度;采用平板计数法测定细菌总数;采用扫描电镜(SEM)观察膜表面滤饼层形貌;采用安捷伦209-6890型气相色谱仪测定消毒副产物。

2 结果与分析

2.1 阻垢剂比选

目前国内常见的阻垢剂包括天然聚合物阻垢剂、有机磷酸盐类阻垢剂、共聚物类阻垢剂和绿色环保阻垢剂。试验从氧化-阻垢工艺大规模应用的角度考虑,选取较为常见的羟基亚乙基二膦酸(HEDP,组别简称HP)、聚天冬氨酸(PASP,组别简称PP)和聚环氧琥珀酸(PESA,组别简称PA)进行阻垢剂比选。膜通量和跨膜阻力是衡量膜污染程度的关键指标。在过滤过程中,由于金属离子的结晶以及有机物、微生物的吸附,膜表面会形成滤饼层,堵塞膜孔的同时大幅降低膜通量,严重影响膜使用寿命,提高工艺成本。因此,采用膜通量和膜阻力分析不同阻垢剂对膜污染缓解效果的差异具有实际应用意义。各组别的膜比通量及膜阻力如图2所示。其中,对照组不投加阻垢剂或氧化剂,1表示投加浓度为5 mg/L,2表示投加浓度为10 mg/L,MIX表示三种阻垢剂混合使用。

图2(a)显示,当聚环氧琥珀酸浓度较低时,膜污染程度明显加剧。对照组膜比通量在200 min后降至0.356,而当投加5 mg/L聚环氧琥珀酸后,过滤结束时膜比通量降至0.074。先前有研究证明5 mg/L聚环氧琥珀酸对碳酸钙的阻垢率达95%以上^[5],4

mg/L 聚天冬氨酸在 45 °C 下反应 20 h 后阻垢率同样达到 90%^[6], 上述差异表明天然有机物和细菌的存在严重影响了阻垢剂的阻垢性能。然而, 当阻垢剂投加浓度增至 10 mg/L 时, 膜比通量出现明显提升。其中, 10 mg/L 聚天冬氨酸性能最优, 过滤 200 min 后膜比通量提高至 0.591。分析原因如下: 腐殖酸表面含有多种官能团, 其中羧基和酚基均能与金属离子发生络合反应, 而细菌表面较高的比表面积同样也会吸附部分金属离子。当阻垢剂浓度较低时, 腐殖酸、嗜盐芽孢杆菌和阻垢剂之间竞争性地与金属离子结合, 极大削弱了阻垢剂的阻垢性能, 导致未作用的阻垢剂反而作为一种污染性物质在膜表面形成致密的滤饼层, 从而加剧膜可逆污染。

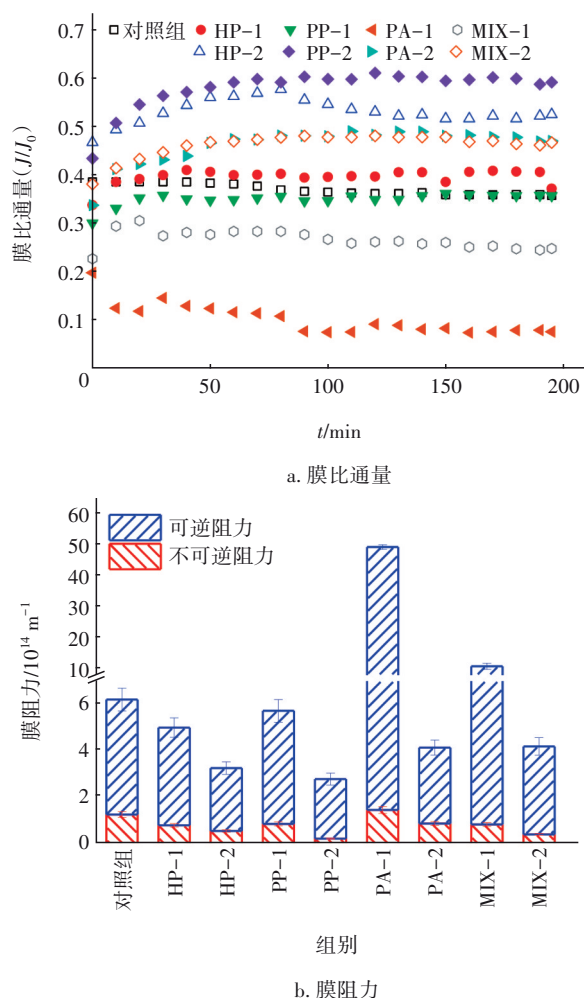


图2 不同阻垢剂条件下的膜比通量及膜阻力

Fig.2 Membrane specific flux and membrane resistance under different antiscalants

膜阻力分析同样证明了这一论断, 由图 2(b) 可知, 对照组可逆阻力为 $4.94 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$, 而 5 mg/L 聚环

氧琥珀酸的可逆阻力增至 $47.53 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$ 。当阻垢剂浓度增至 10 mg/L 时, 其与金属离子有效结合, 由于静电斥力的作用导致晶体-阻垢剂络合物在膜表面均匀分布, 形成较为疏松的滤饼层, 从而降低膜可逆阻力。例如, 10 mg/L 聚天冬氨酸的可逆阻力为 $2.56 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$, 而不可逆阻力仅为 $0.86 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$ 。投加阻垢剂后, 膜比通量呈现出先上升后稳定的趋势, Lin 等^[7]的研究表现出相似的规律, 他们将这一现象归因于原水中晶核的形成, 认为在海水过滤过程中, 整个结晶过程包括成核和后续的晶体生长。而原水中离子需要足够的时间产生足够的晶核, 导致过滤前期膜表面主要形成较为疏松的滤饼层, 从而使得膜比通量上升。

2.2 膜污染缓解效果

2.1 节的试验结果表明 10 mg/L 聚天冬氨酸具有良好的膜污染缓解效果。笔者从氧化-阻垢工艺大规模应用角度考虑, 选取较为常见的过氧化氢、次氯酸钠、高锰酸钾和臭氧作为氧化剂, 考察联用工艺对无机-有机-生物复合膜污染的缓解效果, 结果如图 3 所示。其中, PPO 表示聚天冬氨酸与臭氧联用, PPK 表示聚天冬氨酸与高锰酸钾联用, PPN 表示聚天冬氨酸与次氯酸钠联用, PPH 表示聚天冬氨酸与过氧化氢联用, 氧化剂浓度均为 10 mg/L。

由图 3 可知, 当聚天冬氨酸与臭氧联用时, 膜污染明显加剧, 相较于对照组, PPO 组别的可逆阻力提高至 $14.34 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$, 不可逆阻力提高至 $4.17 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$ 。这可能归因于臭氧氧化性过强导致嗜盐芽孢杆菌细胞膜完整性受损, 部分胞内有机物释放, 疏水性的胞内有机物吸附于膜表面形成致密的滤饼层^[6]。当单独使用聚天冬氨酸时, 膜比通量呈先上升、后稳定的趋势。这可能是因为聚天冬氨酸较为亲水, 在过滤初期由于晶核形成需要足够的时间, 膜通量不会下降, 而亲水性的聚天冬氨酸可能吸附于膜表面影响其亲疏水性质, 膜表面亲水性增强使膜通量得到提升^[3]。因此, 过滤初期膜比通量呈上升趋势。当使用臭氧、次氯酸钠或高锰酸钾作为氧化剂时, 这种趋势受到影响, 可能是因为臭氧和高锰酸钾氧化性过强, 对聚天冬氨酸的结构造成破坏。此外, 滤膜存在一定耐氯性, 次氯酸钠的加入可能会影响纳滤膜本身的透水性能。而使用过氧化氢作为氧化剂时, 这一趋势并未受到影响, 过滤 200 min 后膜比通量提升至 0.621, 较单独投加聚天

冬氨酸提高 4.83%; 过滤 600 min 后膜比通量为 0.534, 膜不可逆阻力降至 $0.16 \times 10^{-14} \text{ m}^{-1}$, 表明膜污染得到有效缓解。

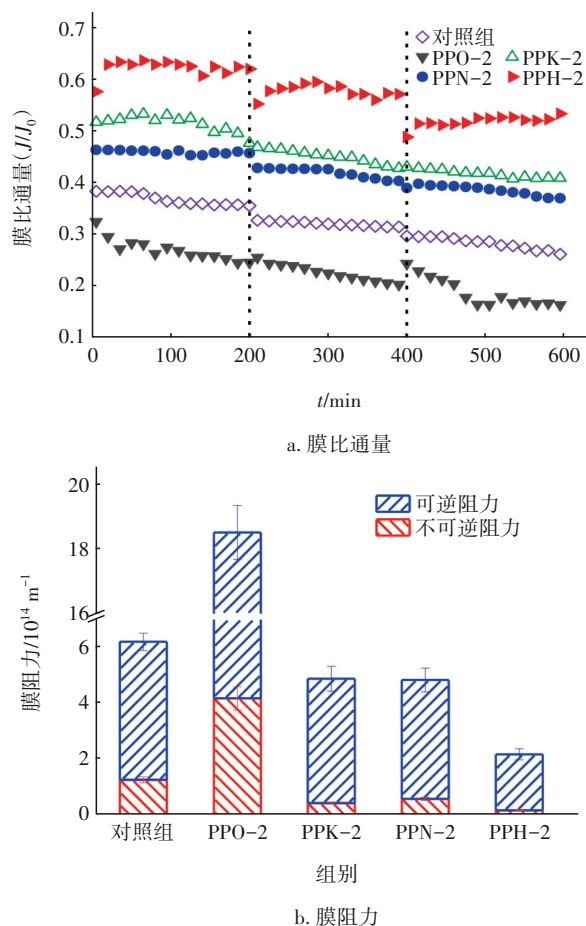


图3 不同处理条件下的膜污染缓解效果

Fig.3 Membrane fouling mitigation effects under different treatment conditions

2.3 有机物去除与微生物抑制效果

有机物中部分官能团及不饱和结构与氧化剂反应时可能会生成致癌、致畸、致突变的消毒副产物,同时,有机物的存在也会影响供水管网的生物稳定性,对水质造成影响。因此,有必要监控氧化-阻垢工艺对有机物的去除效果。其中, UV_{254} 能够表征水中芳香族化合物和不饱和键的含量,而DOC能够更为全面地表征水中溶解性有机污染物浓度。图4为联用工艺对 UV_{254} 和DOC的去除效果。

由图4可知,未经处理时,DOC为3.73 mg/L, UV_{254} 为0.59 cm^{-1} 。而当聚天冬氨酸加入后,DOC上升至4.54 mg/L, UV_{254} 提高到0.63 cm^{-1} 。这可能是因为聚天冬氨酸作为新型绿色有机阻垢剂,其中含

增大。这也说明虽然单独使用聚天冬氨酸可以有效缓解膜污染,但同样会导致处理后料液中有有机物浓度增大。当聚天冬氨酸和过氧化氢联用时,料液中DOC降至2.81 mg/L, UV_{254} 降至0.33 cm^{-1} ,去除率较单独使用聚天冬氨酸分别提高了46.38%和50.85%。这一现象表明氧化-阻垢联用工艺在提高膜通量的同时也能显著增强有机物的去除效能,克服了单独使用阻垢剂在缓解膜污染实际应用中的阻碍。然而,笔者同样注意到氧化-阻垢短程联用工艺对有机物的去除率较单独氧化工艺有所下降。因此,氧化-阻垢工艺在应用过程中应根据实际情况合理安排氧化剂和阻垢剂的使用顺序。

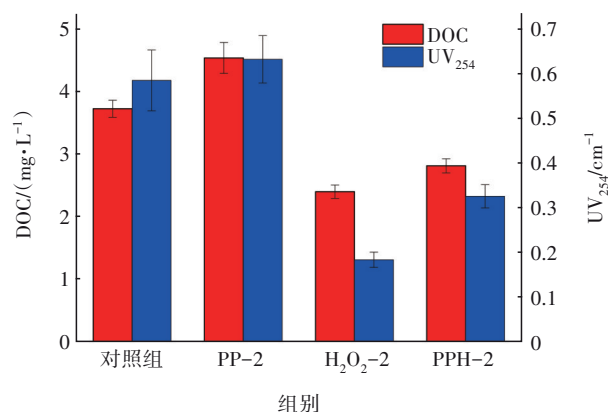


图4 不同处理条件下DOC和 UV_{254} 的去除效能

Fig.4 Removal efficiencies of DOC and UV_{254} under different treatment conditions

微生物总数是评价净水效能的重要指标。由不同处理条件下嗜盐芽孢杆菌的生长情况可知,对照组过滤200 min后,料液中嗜盐芽孢杆菌去除率为47%,这可能是过滤试验过程中水力剪切等外力因素所致。同时,笔者推测部分细菌可能吸附于纳滤膜表面。当投加10 mg/L过氧化氢后,微生物去除率高达98%,料液中微生物生长受到极大限制。令笔者意外的是,聚天冬氨酸的投加同样能够起到良好的微生物抑制效果,嗜盐芽孢杆菌去除率为88%。氧化-阻垢工艺的使用虽然在一定程度上削弱了过氧化氢对微生物生长的抑制效果,但微生物去除率同样高达95%,表明联用工艺具有良好的微生物去除性能,具备大规模推广应用的可能。

2.4 消毒副产物控制效果

有机物中芳香环结构与不饱和键是消毒副产物的重要前体物。图5为不同处理条件下消毒副产物的去除效能。其中,DCAN和TCAN分别为二氯

乙腈和三氯乙腈,TCNM为三氯硝基甲烷,TCM为三氯甲烷,TCP为三氯丙酮。可知,未经处理时,料液中卤乙腈含量明显高于其他消毒副产物,这可能是因为细菌富含蛋白质,而蛋白质是有机氮的主要来源,在氯化过程中,有机氮被转化为卤乙腈类消毒副产物^[5]。当单独使用聚天冬氨酸时,各组分消毒副产物含量均出现明显上升,可能是由于部分聚天冬氨酸在氯化过程中被转化为消毒副产物,这一现象表明单独使用阻垢剂在缓解膜污染的应用上仍存在一定阻碍。而当采用氧化-阻垢联用工艺处理后,各组分消毒副产物浓度均呈下降趋势。相较于对照组,PPH-2组别中DCAN、TCNM、TCM和TCAN的去除率分别达到52.77%、48.08%、27.06%和59.81%,表现出良好的消毒副产物去除效能。

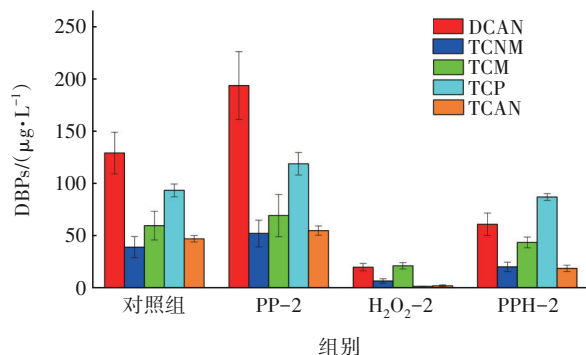


图5 不同处理条件下的消毒副产物去除效能

Fig.5 Removal efficiencies of disinfection by-products under different treatment conditions

2.5 氧化-阻垢工艺的二价离子截留效果

图6为不同处理条件下的离子截留率。可知,未经处理时,钙镁离子截留率在70%左右,硫酸根离子截留率仅为31.4%,这与先前的研究结果截然相反。笔者推测,这一现象可能是料液中腐殖酸和嗜盐芽孢杆菌所致。一方面,海水中的金属阳离子(如钙离子)对腐殖酸上羧基具有良好的亲和力,钙镁离子优先与羧基结合;另一方面,细菌具有较大的比表面积,也导致部分金属离子吸附沉降在细菌表面,从而影响金属阳离子截留率。此外,由道南效应可知,纳滤膜会优先截留与其带相同电荷的离子^[6]。未经处理时,料液中部分疏水性有机物吸附于膜表面,影响膜表面亲疏水和带电性质,进而影响纳滤膜的道南效应,导致硫酸根离子截留率降低。当加入氧化剂后,疏水性物质的结构受到攻击,膜表面污染缓解,带电性恢复正常使得硫酸根

离子截留率恢复至62.3%。氧化-阻垢工艺联用时,氧化剂对有机物的降解以及阻垢剂对无机晶体结构的破坏共同导致离子截留率的提高。其中,钙离子、镁离子和硫酸根离子的截留率分别达到96.7%、94.8%和98.1%,离子截留效果较好,这表明氧化-阻垢联用工艺在缓解无机-有机-生物复合膜污染的应用中具有良好前景。

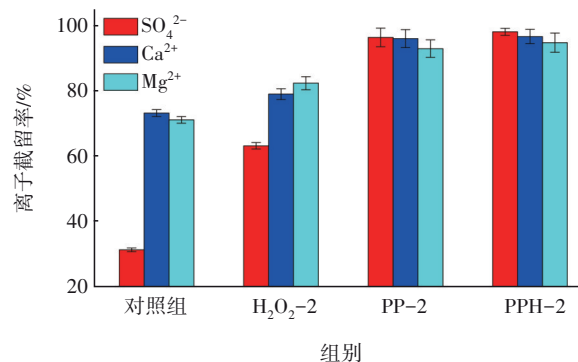


图6 不同处理条件下的离子截留率

Fig.6 Ions rejection rates under different treatment conditions

2.6 氧化-阻垢工艺对膜表面形貌的影响

图7为不同处理条件下的膜表面形貌。其中,红框内为嗜盐芽孢杆菌,黄框内为结晶体。

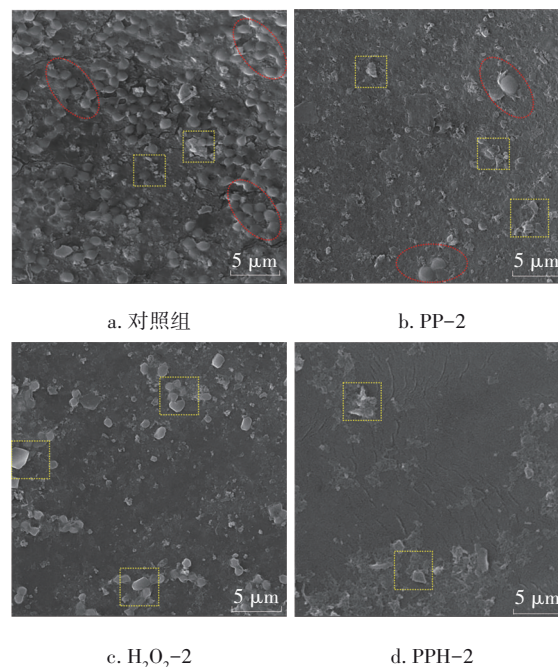


图7 不同处理条件下的膜表面形貌

Fig.7 Membrane surface morphology under different treatment conditions

由图7可知,未经处理时,纳滤膜表面含有大量嗜盐芽孢杆菌细胞和无机晶体,并形成了一层致密的滤饼层结构,笔者推测这种滤饼层结构可能会阻碍溶质从膜表面向料液的反向运输,从而加剧浓差极化现象。同时,膜表面存在大量的细菌也证实了2.3节中有关对照组细菌去除率的推测。随着过氧化氢的投加,膜表面嗜盐芽孢杆菌的密度明显下降,但膜表面的结晶沉积依然严重。而采用氧化-阻垢工艺处理后,膜表面基本看不到大块的结晶和细菌,滤饼层也变得较为平滑。先前有研究报道^[8],粗糙的滤饼层会导致膜表面形成厚度较小的“山谷”区域,该区域水流剪切力较弱,有利于污染物质的沉积吸附。笔者认为,氧化-阻垢联用工艺能够有效改善膜表面结晶情况,形成一种较为平滑的滤饼层结构,从而缓解膜污染。

3 结论

① 由于原水中有有机物和细菌的影响,当阻垢剂投加浓度较低时(5 mg/L),未能起到良好的阻垢效果,膜污染加剧。当阻垢剂投加浓度为10 mg/L时,较为亲水的聚天冬氨酸能够改善膜表面亲疏水性,从而使过滤初期膜通量呈上升趋势。同时,当仅使用过氧化氢作为氧化剂时能够出现相似趋势。在氧化-阻垢联用工艺处理下,过滤600 min后膜比通量提升至0.534,膜不可逆阻力降至 $0.16 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$,表明膜污染得到有效缓解。

② 氧化-阻垢联用工艺可以有效降低料液中有机物和消毒副产物浓度,但相较于单独使用氧化剂,两者的去除率均有所下降。在实际应用中应根据情况合理安排氧化剂和阻垢剂的使用顺序。

③ 氧化-阻垢联用工艺不仅可以提高二价金属阳离子和硫酸根离子的去除率,还可以有效改善膜表面结晶情况,抑制微生物生长,形成较为平滑的滤饼层,从而有效缓解膜污染。

参考文献:

- [1] 柳斌. 超滤处理含藻水的藻源混合污染特性与工艺调控研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
LIU Bin. The Characteristic of Combined Fouling and Operation Regulation during Ultrafiltration of Algae-

laden Water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).

- [2] YANG H, XUE W, LIU M, *et al.* Carbon doped Fe_3O_4 peroxidase-like nanozyme for mitigating the membrane fouling by NOM at neutral pH [J]. *Water Research*, 2020, 174: 115637.
- [3] AL-AMUDI A S. Factors affecting natural organic matter (NOM) and scaling fouling in NF membranes: a review[J]. *Desalination*, 2010, 259(1/3): 1-10.
- [4] PRAMANIK B K, GAO Y, FAN L, *et al.* Antiscalting effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination [J]. *Desalination*, 2017, 404: 224-229.
- [5] ZHOU S, SHAO Y, GAO N, *et al.* Characterization of algal organic matters of *Microcystis aeruginosa*: biodegradability, DBP formation and membrane fouling potential[J]. *Water Research*, 2014, 52: 199-207.
- [6] 张正磊, 张俸志, 周伟伟, 等. 纳滤工艺深度净化微污染水源水厂出水中试研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(15): 37-42.
ZHANG Zhenglei, ZHANG Fengzhi, ZHOU Weiwei, *et al.* Advanced purification of effluent from micro-polluted source water waterworks by nanofiltration [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(15): 37-42 (in Chinese).
- [7] LIN D, BAI L, GAN Z, *et al.* The role of ferric coagulant on gypsum scaling and ion interception efficiency in nanofiltration at different pH values: performance and mechanism [J]. *Water Research*, 2020, 175: 115695.
- [8] DING J, WANG S, XIE P, *et al.* Chemical cleaning of algae-fouled ultrafiltration (UF) membrane by sodium hypochlorite (NaClO): characterization of membrane and formation of halogenated by-products[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 598: 117662.

作者简介:刘文恺(1997-),男,安徽阜阳人,博士研究生,主要研究方向为水质安全保障技术。

E-mail:lwk002668@163.com

收稿日期:2024-09-02

修回日期:2024-10-17

(编辑:沈靖怡)