

鲍任兵, 龙霞武, 镇祥华, 等. 饮用水处理中的超滤膜污染及其控制[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 41-49,94.

BAO R B, LONG X W, ZHEN X H, et al. Membrane fouling and the control of UF in drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 41-49,94.

饮用水处理中的超滤膜污染及其控制

鲍任兵¹, 龙霞武², 镇祥华^{1,*}, 邹磊¹, 章诗璐¹, 李鹏程¹, 张少辉²

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070)

摘要 【目的】随着现代社会对饮用水水质要求的不断提高,超滤膜工艺凭借其高效的净水能力,成为饮用水深度处理领域的前沿技术。然而,膜污染问题的凸显不仅导致膜通量衰减、水质安全风险升高,还造成运行能耗攀升,严重制约了该技术的规模化应用。【方法】文章通过深入分析超滤膜处理工艺的净水效能与膜污染形成机理,探讨有机膜和陶瓷膜的抗污染性能,从预氧化处理、强化常规处理、强化深度处理等多个维度提出了系统性的控制策略。【结果】针对不同污染类型可采取差异化的膜污染控制措施。无机污染物可通过混凝-沉淀(砂滤)工艺实现截留去除;铁、锰及藻类污染需结合预氧化技术与混凝沉淀协同作用强化分离。针对有机污染物,可采用生物接触氧化法或臭氧-活性炭组合工艺,实现高效去除。【结论】超滤膜处理已成为实现高品质饮用水以及现代化水厂升级的重要方向。未来,开发新型的抗污染性能好、制备成本低的膜材料及改性措施,探索新型高效的膜清洗方式以及探索更加精准和高效的膜污染控制模型,是推动膜处理技术持续进步与广泛应用的发展方向。

关键词 饮用水处理 超滤(UF) 膜污染控制 膜清洗 膜污染预测模型

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0041-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.005

Membrane Fouling and the Control of UF in Drinking Water Treatment

BAO Renbing¹, LONG Xiawu², ZHEN Xianghua^{1,*}, ZOU Lei¹, ZHANG Shilu¹, LI Pengcheng¹, ZHANG Shaohui²

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract [Objective] In response to the increasing demand for high-quality drinking water in modern society, ultrafiltration(UF) membrane treatment technology has emerged as a frontier technology in the field of advanced drinking water treatment due to its efficient water purification capabilities. However, the prominent problem of membrane fouling not only leads to membrane flux attenuation and increased water quality safety risks, but also causes an increase in operating energy consumption, seriously restricting the large-scale application of this technology. [Methods] Through an in-depth analysis of the water purification efficiency of UF membrane treatment processes and the formation mechanisms of membrane fouling, this study explores the fouling resistance performance of organic membranes and ceramic membranes. Systematic control strategies are proposed in multiple dimensions, including pre-oxidation treatment, enhanced conventional treatment, and intensified advanced treatment. [Results] Different membrane pollution control measures are taken according to different pollution types. Inorganic pollutants can be intercepted and purified by coagulation sedimentation (sand filtration) process. Iron, manganese and algae pollution should be combined with preoxidation technology and coagulation sedimentation to strengthen the separation. For organic pollutants, biological contact oxidation or ozone activated carbon combined process can be used to achieve efficient removal. [Conclusion] UF has become an important direction for achieving high-quality drinking water and upgrading modern water plants. In the future, the development of new membrane materials and modification measures with good anti-fouling performance and low preparation cost, the exploration of new and efficient membrane cleaning method,

[收稿日期] 2024-11-01

[基金项目] 湖北省建设科技计划项目(KY-S-S-2023-007)

[作者简介] 鲍任兵(1992—),研究方向为水污染控制理论与技术,E-mail:rbingbao@163.com。

[通信作者] 镇祥华(1997—),研究方向为水污染控制理论与技术,E-mail:gongda1996@163.com。

and the exploration of more accurate and efficient membrane pollution control models are the development directions to promote the continuous progress and wide application of membrane treatment technology.

Keywords drinking water treatment ultrafiltration (UF) membrane fouling control membrane cleaning prediction model of membrane fouling

随着社会进步及人民生活水平的提高,供水水质标准持续提升。2022年,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)发布实施。同时,上海、深圳、浙江等地也纷纷出台了地方标准,要求出厂水浑浊度、高锰酸盐指数均远优于国标要求。传统的“混凝+沉淀+过滤+消毒”4段处理无法有效实现上述指标的高效去除,增加深度处理是今后水厂提标的必然要求和发展趋势。

超滤(UF)凭借其高效的物理筛分特性,能够高效去除水中的细菌和微生物,显著降低饮用水的浑浊度和色度,大幅降低细菌、微生物及“两虫”(隐孢子虫和贾第鞭毛虫)泄漏风险,为饮用水的健康安全性提供了更加坚实的保障^[1]。通过集约化建设,UF能够大大减少占地,通过完善的自动化运行实现无人值守,有效降低运维难度,这成为现代化水厂升级的重要方向。张家港市第四水厂是国内最早采用双膜短流程工艺的水厂,处理规模为20万m³/d,该厂直接将沉淀池出水通入超滤单元^[2],这对膜处理工艺的推广具有重要意义。

然而,UF技术规模化应用仍面临多重挑战。膜污染引发的通量衰减问题会导致运行能耗攀升、水质波动等问题^[3]。同时,UF无法有效应对低相对分子质量的溶解性有机物、溶解性铝等污染物,需通过进一步耦合氧化、吸附等工艺实现污染物协同去除。现有研究虽在预处理优化、膜材料改性等方面取得一定进展,但在污染动态预测、跨尺度污染控制及工艺协同优化等核心环节仍存在技术短板。

文章通过分析超滤处理工艺的净水性能、膜污染行为和机制,深入探讨强化常规处理、预氧化处理和强化深度处理3类膜污染控制技术,梳理总结了以膜清洗优化和膜污染预测为主的膜通量恢复技术,为今后膜处理工艺的应用和发展提供技术支持。

1 UF膜研究现状

UF起源于1748年,第1张人工UF膜出现于1896年,到20世纪70年代,UF开始高速发展。我国起步较晚,直至20世纪80年代末才开始工业化生产和应用。随着膜应用的高速发展,对膜污染的

关注也随之产生。如图1所示,基于Web of Science (WOS)数据库在1985年—2023年发表的“膜污染”和“超滤”为关键词搜索的收录论文情况。自膜技术发展之初,我国就开始关注膜污染问题,随着21世纪初膜技术的迅速发展,膜污染相关研究急剧增多,近5年来达到峰值,成为了水处理关注的热点。

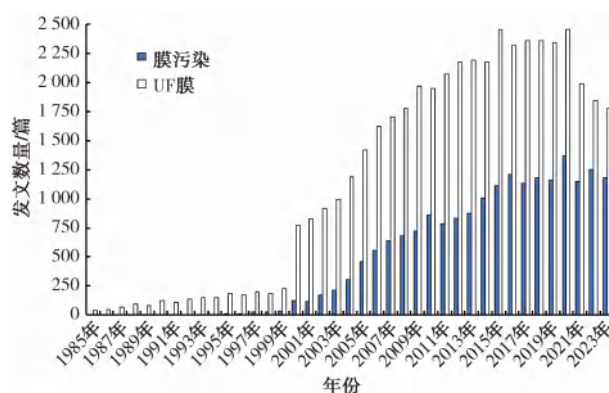


图1 1985年—2023年膜技术领域年度新增论文数量变化趋势

Fig. 1 Changing Trend of Annual Number of New Papers in the Field of Membrane Technology during 1985 to 2023

2 UF膜净水性能

UF主要通过筛分效应将大于膜孔径尺寸的污染物拦截,能有效去除水中颗粒物、悬浮物以及水体中的致病生物“两虫”,同时可分离部分大的相对分子质量有机物,成为保障水质生物安全的核心屏障^[4-5]。

不同预处理工艺对UF膜出水水质的影响十分显著。如表1所示,在不同预处理工艺下,UF可稳定实现出水浑浊度低于0.2 NTU,即便是格栅后直接过滤也能实现较好的浑浊度去除效果^[6]。然而,UF对于高锰酸盐指数和总硬度的去除效果相对有限,而增加臭氧-活性炭单元则可有效去除水中的有机物,出水高锰酸盐指数可低于2.0 mg/L,但对总硬度几乎没有去除效果。生物预处理工艺对于有机物有一定的去除效果,以饮用水生态湿地水为例,经过生物接触氧化处理后,高锰酸盐指数从

(3.5 ± 0.25) mg/L 降至 (2.31 ± 0.19) mg/L, 但效果弱于臭氧-活性炭工艺, 且浑浊度去除效果在很大程度上依赖后续的混凝沉淀工艺, 仅适用于微污染水源。

表 1 不同预处理条件下超滤工艺的出水水质
Tab. 1 Finished Water Quality of UF Processes under Different Pretreatment Conditions

水源类型	预处理工艺 (膜前处理工艺)	浑浊度/NTU		高锰酸盐指数/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		总硬度(以 CaCO_3 计)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		溶解性总固体/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		参考文献
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	
南水北调微污染水	混凝沉淀气浮+臭氧-活性炭	19.0~25.5	<0.1	3.86~5.19	1.50~1.94	324~340	324~340	/	/	[7]
梁子湖水	混凝沉淀	6.3±3.4	<0.2	4.4±2.1	/	/	/	93±17	98.00	[8]
梁子湖水	混凝沉淀+臭氧-活性炭	6.3±3.4	<0.2	4.4±2.1	/	/	/	93±17	97.40	[8]
西江水系水	混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭	6.26~193.8	0.033~0.054	1.28~2.96	0.44~0.72	77.1~113.1	97.1~126.1	/	/	[9]
饮用水生态湿地水	生物接触氧化+混凝沉淀+砂滤	12.08±2.87	0.06	3.5±0.25	2.31±0.19	148.77±10.13	138.0±7.3	/	/	[10]
饮用水生态湿地水	生物接触氧化+混凝沉淀+砂滤+臭氧-活性炭	12.08±2.87	0.05	3.5±0.25	1.84±0.08	148.77±10.13	134.0±6.2	/	/	[10]
东太湖水	格栅	20~140	0.10~0.15	3.5~5.0	1.5~2.0	134.6	/	200~260	160~240	[6]
东苕溪水	混凝沉淀+砂滤	11.3~68.2	0.05	2.08~4.94	1.8~2.0	58(砂滤后)	58	/	/	[11]
微污染引黄水库水	生物接触氧化+沉淀	2.2~7.5	<0.1	2~3	1.5~2.0	275	275	561	561	[12]
东太湖水	在线混凝	55.41±19.26	0.09±0.03	4.40±0.49	1.92±0.09	/	/	/	/	[13]
长江水	混凝沉淀	65	0.10	1.44~3.36	1.48	/	128~138	150~180	150~180	[14~15]

注:在线混凝指混凝剂直接加入到 UF 进水管中,经进水泵混合后进入 UF 膜过滤。

可见,水源类型与特征污染物在很大程度上决定了预处理工艺的选择。对于高浑浊度水源,如南水北调微污染水,混凝沉淀是必不可少的预处理步骤;而对于有机污染较为严重的水源,如梁子湖水,臭氧活性炭工艺能够有效降低水中的有机负荷;对于硬度较高的水源,如南水北调微污染水,仅仅依靠臭氧-活性炭或 UF 工艺无法有效降低硬度,因此,需要考虑其他软化措施。

3 膜污染机制

3.1 膜污染分类与过程

(1) 污染物分类

UF 由于孔径较大,容易受到大颗粒无机物和微生物的污染,在处理含有大量悬浮固体和微生物的水源时,膜污染问题较为突出。根据污染物的性质,膜污染物可划分为无机污染、有机污染和微生物污染 3 大类。

无机污染主要由无机颗粒物、胶体、金属离子及盐类等构成。无机物污染是指各种有害的金属离

子、盐类、酸、碱性物质及无机悬浮物等沉积在膜的表面因而造成的膜表面结垢现象,属于膜表面的物理破坏。超滤膜在受到无机物污染后,污垢会造成不可逆的孔阻塞且清洗困难。造成 UF 膜无机物污染的主要是碳酸盐类,其中金属类碳酸盐(如 Fe、Mg 和 Ca 等)能使膜结垢的强度增大^[16]。

有机污染则主要源于天然有机物,如藻类、腐殖质、多糖和外源有机物等,其成分复杂多样,由不同种类、不同分子量大小和不同化学性质的有机物构成。其中,亲水性的生物聚合物(主要由蛋白质和多糖组成)和疏水性的腐殖质,能够降低膜表面的 Zeta 电位,增大膜接触面积^[17],造成严重膜污染。有机物污染通常会受到各种因素的影响,包含膜表面及其结构等自身性质,溶液的 pH、离子强度等化学性质,压力、浓度极差、流体边界层性质及性能等操作条件和动力学影响等。

微生物污染则涉及细菌、病毒、藻类等多种微生物及其代谢产物。微生物对膜的污染是指在膜过滤

过程中,微生物及其代谢产物附着到膜表面,在膜表面沉淀生长和新陈代谢,与膜之间产生比较大的附着力,而不至于被反冲洗去除。一旦微生物黏附在膜上,就开始分泌胞外聚合物而加重污染^[18]。

在实际应用中,膜污染并非单一类型存在,而是多种污染物相互作用,展现出复合污染的特性。如多糖在微生物作用和金属离子络合作用下,形成的聚合物凝胶层,更会促进微生物的生长,进一步加速膜污染进程^[19]。

(2)膜污染过程

膜污染过程主要涉及水中的颗粒物、胶体及溶解性物质与膜之间的物理、化学和生物相互作用。这些相互作用导致污染物在膜表面或膜孔内吸附、沉积,进而减少膜孔径或造成堵塞,最终使膜通量减小并降低其分离性能。膜污染的机制多样,主要包括吸附、膜孔堵塞、凝胶层形成、滤饼层形成以及浓差极化等^[4]。

膜污染机制与膜的类型及过滤进程紧密相关。在超滤膜表面预先沉积吸附剂后进行过滤时,滤饼层的形成往往成为主要的污染机制^[20]。因此,为了有效控制膜污染,应在污染初期即采取及时的清洗措施,减缓污染进程并保证膜通量的稳定。

3.2 膜材质与抗污染性能

如表 2 所示,UF 膜的材质主要分为有机膜和陶瓷膜 2 类,其中有机膜包括聚偏氟乙烯(PVDF)、聚丙烯腈(PAN)、聚苯乙烯塑料(PS)、聚丙烯(PP)、醋酸纤维素(CA)、聚醚砜(PES)、聚砜(PSF)、聚乙

烯醇(PVA)等材质。目前以 PVDF 为主要材质的有机膜因其投资成本低、制备工艺成熟的优势,应用范围最广,但存在通量恢复性差、断丝率高和易污染等问题,对产水率造成了一定影响。相比之下,PAN、PVC 和 PVA 材料的膜因其亲水性和化学稳定性表现出了更好的抗污染性能,但存在制备工艺复杂、使用寿命短和稳定性差等问题,导致应用范围较小。近年来,随着膜材料的发展,通过化学改性,或采用复合膜材料,能有效减轻膜污染。表面改性技术主要通过添加羟基、羧基等亲水性基团^[21],与水分子形成氢键,增加膜表面的湿润性以及光催化改性等^[22]措施,从而提高膜的亲水性。

研究^[23-24]表明,陶瓷膜材料化学稳定性强、亲水性好,可承受苛刻的化学清洗条件,具备耐污染性、高适应性、分离效率高的特点。通过对比 2 种膜材质对进水水质的要求,发现陶瓷膜对进水浑浊度有更大的适用范围,而对硬度要求却高于有机膜,这是因为硬度过高会导致钙、镁离子在陶瓷膜孔道内结晶,形成水垢;而这些结晶通常发生在有机膜表面,可通过清洗有效去除。随着陶瓷膜制备技术的升级,对陶瓷膜进行表面改性或采用有机-陶瓷复合材料^[23],以及通过在膜表面或内部负载催化剂,耦合高级氧化技术^[25],能够实现抗污染性能的进一步强化。目前,受限于改性及制备工艺,抗污染性能好的膜材质仍然存在成本高、产量低的难题。因此,今后探索亲水性好、制备成本低的膜材质是发展方向。

表 2 不同膜材质的抗污染性能

Tab. 2 Anti-Fouling Performance of Different Membrane Materials

膜材质	抗污染性能	机械性能	投资成本	适用范围	优化方式
有机膜	差	机械性能较差、化学稳定性差	生产成本低、操作简单	适用范围广,对进水水质要求: 浑浊度 < 1 NTU, 硬度 < 300 mg/L	表面改性、复合材料、光催化改性
陶瓷膜	好	化学稳定性强、耐高温、抗腐蚀、硬度大	全寿命周期投资成本略高	适用范围广,对进水水质要求: 一般不超过 10 mg/L(以悬浮物计), 硬度 < 100 mg/L	表面改性、有机-陶瓷复合材料、催化作用

4 膜污染控制技术

为了提升 UF 膜的处理效能并降低膜污染,预处理(即膜前处理)可降低 UF 进水的浑浊度,缓解 UF 膜污染程度。在众多的预处理技术中,混凝、吸附、氧化及其组合工艺因其可行性和实用性而广泛应用。这些技术大致可分为预氧化处理、强化常规处理和强化深度处理 3 类。

4.1 预氧化处理

当原水中的有机物及铁、锰、藻含量较高时,预处理不当常常导致膜污染加剧。常规处理对有机物去除能力较弱,预氧化技术则能有效降低原水有机物,降低后续处理单元的运行负荷,也是减少膜污染的有效途径。常用的预氧化工艺有预氯化、预臭氧、高锰酸钾、生物接触氧化等。

研究^[26]表明,通过投加 2.5 mg/L 的高锰酸钾,

高藻水中的铁、锰、藻的去除率均可实现 90% 以上, UF 系统运行时间延长了近 90 min, 显著缓解了膜污染。但过量的高锰酸钾易导致颜色问题及 MnO_2 胶体问题, 需注重投加量优化。同样的, 预氯化也能有效应对藻类, 同时降低水的嗅味、色度, 但也存在消毒副产物问题^[27]。

在混凝沉淀单元前增设生物接触氧化, 也能够有效减少进入膜单元的有机物和金属盐含量, 减轻膜污染。根据相关研究^[10], 增设生物接触氧化后, 组合工艺对常规污染物和特征污染物均有良好的去除效果, 总有机碳 (TOC) 去除率得到大幅提升, 膜通量提高 3.86~8.41 倍。这说明原水中的疏水性物质通过生物降解得到大量去除, 有效增强了膜污染控制效果。超过 30 d 的连续运行中, 通过参数变化及扫描式电子显微镜-X 射线能谱仪 (SEM-XPS) 分析, 可以看出膜表面结垢多以钙盐为主, 膜污染情况得到有效改善, 运行性能良好。

臭氧氧化与 UF 结合不仅有利于藻类和有机污染物的氧化去除, 还通过臭氧微泡冲刷和氧化作用有效地缓解了膜污染。成小翔等^[28]发现, 在陶瓷膜 UF 过程中耦合臭氧氧化技术, 能够显著提升膜的通量, 并有效缓解膜污染。Wei 等^[29]以陶瓷膜过滤含藻水时, 持续通入 1 mg/L 的臭氧可使跨膜压差降低 75.8%。新加坡蔡厝港水厂耦合了臭氧氧化与陶瓷膜 UF, 通过连续加入臭氧, 臭氧不仅能氧化除藻还能清洗膜, 使陶瓷膜的回收率提高到 99% 以上, 并节省了消毒剂投加^[30]。尽管陶瓷膜耦合臭氧氧化可缓解膜污染和提高膜通量, 还能去除有机物和抗生素等新型污染物, 但易导致出水中溶解性有机物浓度升高^[28]。膜阻力分析揭示, 臭氧氧化对陶瓷膜可逆污染阻力的缓解尤为显著, 是减轻膜污染的有效途径。这一发现不仅为陶瓷膜在 UF 领域的应用提供了有力支持, 也为提升 UF 工艺的整体效能提供了新思路。另外, 将臭氧氧化应用于 UF 膜清洗需注意选用耐氧化膜 (如陶瓷膜) 作为 UF 膜。尽管臭氧氧化预处理技术在去除有机物和提高水质方面表现出色, 但其投加设备相对复杂、运行成本较高。

4.2 强化常规处理

“混凝+沉淀+砂滤”是典型的常规处理流程, 也是 UF 工艺最常见的预处理技术。根据处理流程的长短, 可分为混凝、混凝+沉淀以及混凝+沉淀+砂滤 3 种预处理方式。

研究^[9]表明, 3 种预处理方式下浑浊度和高锰酸盐指数去除效果相近, 均能达到低于 0.1 NTU 和 1.5 mg/L 的要求。虽然 UF 膜对浑浊度和大分子有机物具有较好的去除性能, 但预处理步骤能够有效去除进水中的大部分悬浮物和胶体物质, 减少在膜表面的吸附和沉积, 降低膜污染风险。因此, 采用前述 3 种预处理方式时的膜污染情况差异巨大。“混凝+UF”相比“混凝+沉淀+UF”, 膜污染明显加重, 跨膜压差增长速率提高了 2.9 倍^[31]。在混凝沉淀之后增加砂滤单元, 能够进一步去除混凝沉淀后残留的细小颗粒物, 提升进水水质, 进而减轻超滤膜的污染负荷。因此, 当原水浑浊度常年较高时, 推荐采用“混凝+沉淀+砂滤+UF”流程建设, 并采取多模式运行方式, 在高浑浊度期采取全流程运行, 在低浑浊度期采取超越砂滤措施, 降低运行成本; 当原水浑浊度常年较低时, 推荐采用“混凝+沉淀+UF”流程建设, 实现供水水质和建设、运行成本的有效控制。另外, 混凝剂的投加量也是影响膜污染的关键因素之一。以液体碱式氯化铝 (PAC) 为例, 适量投加 PAC 能够有效缓解超滤膜污染, 而过量的 PAC 会形成更多的絮体, 部分絮体可能未能有效沉淀或过滤, 而是随水流附着于膜表面, 增加膜污染风险。因此, 确定 PAC 的适宜投加量对于优化预处理工艺、减轻膜污染具有重要意义。研究^[9]指出, PAC 的适宜投加量受源水水质影响, 如处理西江水系源水时, 最佳 PAC 投加量约为 15 mg/L。

随着水厂对残余铝的控制提出了更高的要求, 如苏州出台的《苏州市自来水厂出厂水水质指标限值》中将铝质量浓度由国标中的 0.2 mg/L 提升至 0.15 mg/L。试验^[32]表明, 通过在原水投加二氧化碳可以有效减少 PAC 投加量, 降低出水铝浓度, 减少膜污染, 成为提高供水水质和膜处理单元运行稳定性的有效策略。

4.3 强化深度处理

臭氧-活性炭处理也可用作 UF 的前处理单元。相比混凝沉淀, “混凝沉淀+臭氧-活性炭”的膜前处理工艺对 UF 膜污染的缓解作用更强, 可实现 UF 膜在 10 d 内的跨膜压差增长速率降低 54% 以上^[7], 不仅延长了膜的使用寿命, 还显著提升了系统的运行效率。同时, 臭氧-活性炭处理对水中的多环芳烃、有机氯农药和卤乙酸等持久性有机物具有较好的去除效果, 提高了出水水质的安全性。相比“生物接

触氧化+混凝沉淀”的膜前处理工艺,“生物接触氧化+混凝沉淀+臭氧-活性炭”的膜前处理工艺也能更有效地缓解膜污染;相同条件下运行 10 d 后发现,采用前一种膜前处理工艺时的通量仅为采用后一种膜前处理工艺时的 45%^[10]。这表明增加臭氧-活性炭环节能够更有效地维护膜性能,减少因污染导致的流量衰减。

然而,增加臭氧-活性炭的膜前处理工艺,延长了整个处理流程,增加了建设和运营的成本投入。尽管如此,该工艺在有机物去除方面的广泛适用性,包括对藻类、致嗅物质及抗生素等的高效去除^[33],仍使其成为提升水质和保障饮用水安全的重要技术手段。因此,在实际应用中需综合考虑成本效益与水质需求,作出科学合理的选择。

4.4 膜污染控制措施

如表 3 所示,在膜污染控制中,需针对不同污染类型采取差异化控制措施。对于无机污染,针对悬浮物和胶体,可通过混凝-沉淀(砂滤)工艺有效截留;铁、锰污染需通过预氧化工艺(高锰酸钾、臭氧或氯氧化)将二价金属离子转化为难溶的三价氢氧化物,再结合混凝沉淀去除;若残余铝偏高则采用二氧化碳投加调节原水 pH,促使氢氧化铝沉淀形成并通过混凝沉淀分离。对于有机污染,微污染水体可通过生物接触氧化法实现降解去除,而高浓度有机污染需采用臭氧-活性炭组合工艺,臭氧发挥分解作用后由活性炭进行深度吸附。针对微生物污染中的藻类问题,采用预氧化(高锰酸钾、臭氧或氯)破坏藻细胞结构,再通过混凝沉淀实现氧化去除。

表 3 膜污染控制措施
Tab. 3 Measures for Membrane Fouling Control

膜污染种类	典型污染物	控制机制	控制措施
无机污染	浑浊度	去除水中的悬浮物和胶体物质	混凝+沉淀+(砂滤)
	铁、锰	将二价铁、锰氧化为三价,使其形成难溶性的氢氧化物,进而通过混凝沉淀去除	预氧化(高锰酸钾、预氯化、预臭氧)+混凝沉淀
	铝	调整原水 pH,促进沉淀	二氧化碳投加+混凝沉淀
有机污染	微污染	微生物的代谢作用	生物接触氧化
	有机污染严重	臭氧分解、活性炭吸附	臭氧-活性炭
微生物污染	藻类	氧化去除	预氧化(高锰酸钾、预氯化、预臭氧)+混凝沉淀

5 膜通量恢复技术

5.1 膜清洗优化

(1) 常规清洗

膜清洗是恢复膜过滤性能的关键步骤,能彻底清除膜表面及孔隙中累积的污染物,确保膜持续发

挥高效的过滤与分离作用。如表 4 所示,根据是否采用化学药剂,膜清洗策略可分为物理清洗与化学清洗 2 大类,而在实际工程应用中,为达到最佳清洗效果,这 2 种方法常被联合应用于超滤的维护中^[14]。

表 4 UF 膜清洗方式
Tab. 4 Cleaning Methods of UF Membrane

清洗方式	清洗周期	药剂	清洗程序
物理清洗	2 h	/	气洗时间为 30 s,气水联合反洗时间为 90 s
维护性化学清洗	20~25 d	40 000 mg/L 氢氧化钠、	碱洗 4 h+碱洗曝气+柠檬酸酸洗
恢复性化学清洗	1 年	4 000 mg/L 次氯酸钠、1.5% 柠檬酸	

物理清洗策略主要依托流体动力学的原理,包括水力强力冲洗、空气脉冲冲洗、机械振动/旋转辅助、超声波振荡清洗以及直接机械擦拭等。物理清洗对膜材料及其组件的损伤性较低,但对膜污染缓解的效力往往有限,难以应对顽固性污染。

当物理清洗无法有效恢复膜通量或控制跨膜压差时,化学清洗便成为必要的补充手段。常用的化

学清洗药剂有酸性溶液(如盐酸、柠檬酸)、碱性溶液(如氢氧化钠)、氧化剂(如过氧化氢、次氯酸钠)等。化学清洗过程进一步细化为维护性清洗与恢复性清洗 2 个层次。维护性清洗采用较低浓度的化学药剂,预防污染累积,减少对恢复性清洗的依赖;恢复性清洗则动用较高浓度的化学药剂处理严重污染情况,尤其是在维护性清洗间隔显著缩短时采用,确

保膜性能得到全面恢复。通过灵活运用这 2 种清洗策略,可以在确保膜系统稳定运行的同时,最大化延长膜的使用寿命并提升整体操作效率。

(2)膜污染清洗策略

原水水质差异导致不同污染物造成的膜污染。如表 5 所示,膜清洗通常不是单一方法,而是多种方式的综合运用,以实现最佳的清洗效果。一般水厂膜单元化学清洗后的浓缩液常常含有金属离子、微生物代谢产物、腐植酸、氯酸盐等洗脱物质,具备一定的腐蚀性,可能会导致水体和土壤污染,因此,需中和、沉淀、过滤等处理后回用或排入污水系统。

综合考虑清洗效果、操作复杂性、维护成本、环境影响和安全性,臭氧清洗在经济性和环保性方面具有一定的优势。然而,臭氧清洗设备的购置和维护成本较高,且需要专业的操作和监控。相比之下,常规膜清洗在成本上可能更为经济,但操作复杂性高、产水率低,且可能对环境造成一定影响。因此,在选择清洗方法时,需要根据具体的水质情况、膜材

料、操作条件和经济预算进行综合考虑。

表 5 膜污染清洗策略

Tab. 5 Solutions of Membrane Fouling Cleaning		
膜污染物种类	膜清洗方式	臭氧清洗适用性
大颗粒无机物	物理清洗	有限
无机盐	化学清洗	低
残余铝	化学清洗	中
有机物	化学清洗	高
微生物	非氧化杀菌剂、化学清洗	高

5.2 膜污染预测

精确预测与模拟膜污染行为,对于构建高效的污染防控策略至关重要。近年来随着人工智能(AI)兴起,AI 模型有望成为提升预测精度的强大工具。如表 6 所示,目前应用于膜污染控制的主要有人工神经网络(ANNs)、模糊逻辑(FLs)和遗传编程(GPs)等方法^[34]。其中,人工神经网络(ANNs)因其强大学习能力,应用广泛且预测精度高,成为了构建膜污染预测模型的主流选择,在 UF 系统^[35]中的应用探索已展现出显著成效。

表 6 膜污染预测模型

Tab. 6 Prediction Models of Membrane Fouling

模型类型	优点	缺点	适用范围
ANNs	强大的学习能力、广泛的应用基础、多样的网络结构、高精度预测	受结构影响大、训练算法的选择复杂	适用于各类膜分离过程中膜污染的模拟和预测,尤其是在数据量较大、膜污染过程复杂且非线性关系明显的情况
FLs	高精度预测、控制系统开发潜力大、处理模糊信息能力强	在处理大规模数据或复杂系统时可能面临效率问题	适用于对膜污染过程中模糊信息处理要求较高的场景,如膜分离系统进水特性波动较大、运行条件不稳定的情况,以及需要开发智能控制系统来优化膜分离过程的情况
GPs	函数关系明确、良好的预测一致性、建模难度低	预测精度低于 ANNs	适用于膜污染机理研究初期,用于快速探索变量之间的关系,以及在一些对物理过程了解有限但需要进行初步预测和分析的情况

研究^[36]表明,对于 UF 膜污染,跨膜压差、pH 和过滤周期是理想的预测变量。然而,若训练数据匮乏或模型结构过于复杂,AI 模型可能陷入过拟合的困境,虽然在训练集上表现优异,却无法有效泛化至新样本。鉴于当前 UF 工艺在饮用水处理领域的工程应用尚不广泛,且数据积累有限,这无疑对 AI 模型的准确性构成了挑战。

随着膜技术的广泛应用和数据资源的不断累积,基于 AI 的膜污染预测模型将迎来更加广阔的发展空间。通过持续优化模型结构、调整输入变量(即膜工艺操作参数),有望实现对膜污染行为的更加精准预测。

6 未来发展方向

未来膜技术发展将聚焦膜材料创新与清洗优化,以应对膜污染挑战。一方面,通过研发高亲水性、强化学稳定性及机械性能的新型抗污染膜材料,提升膜在复杂水质中的抗污堵能力,延长使用寿命;同步推进表面改性技术,减少污染物吸附并降低制备成本,实现高效能、低成本的规模化应用;另一方面,改进清洗工艺,开发高效环保型化学清洗剂,结合超声波等物理清洗技术,深度清除膜孔及表面污染物,有效恢复膜通量及过滤性能,降低运行维护费用。

针对膜污染智能防控,需加速预测模型优化升

级。当前膜系统运行仍依赖传统时序控制与在线仪表监测,稳定性不足。随着 AI 技术突破,构建基于机器学习的膜污染预测模型成为关键方向。通过大数据分析实现污染趋势动态预警与清洗策略自适应调节,能够显著提升系统运行稳定性与智能化水平,为膜工艺高效管理提供技术支撑。

7 结语

UF 膜技术凭借其高效降低出水浑浊度、有机物浓度及控制微生物泄漏等优势,成为水处理领域的热点,但膜污染导致的通量衰减、能耗增加等问题制约其广泛应用。膜前预处理是延缓膜污染的有效途径,针对不同水质污染问题,可采取分级处理工艺:无机污染物通过混凝-沉淀(砂滤)实现截留;铁、锰及藻类污染需采用预氧化技术(高锰酸钾、臭氧或氯)联合混凝沉淀高效去除。对于铝超标问题,通过投加二氧化碳降低原水 pH,促使沉淀分离。针对有机污染,微污染水体可采用生物接触氧化法降解有机物,高浓度污染则需采用臭氧-活性炭工艺。另外,臭氧与超滤的协同应用不仅能够提升有机物去除效率,还能通过微泡冲刷延缓膜污染,有望成为新的膜清洗方式。

未来,开发抗污染性强、成本可控的膜材料及改性技术是发展方向。同时,AI 模型通过优化输入参数和算法结构,有望实现对膜污染行为的精准预测,为防控策略提供技术支撑。结合我国水源多样性特点,构建因地制宜的预处理组合与智能化控制体系,将推动膜技术在水处理中的高效应用与可持续发展。

参考文献

- [1] 石洁,姚家隆,唐娜,等. 纳滤膜工艺在太仓某水厂深度处理工程中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(1): 50-57.
SHI J, YAO J L, TANG N, et al. Application of NF membrane technology in advanced treatment project of a WTP in Taicang [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 50-57.
- [2] 贺鑫,王少华,施立宪,等. 纳滤饮用水厂的膜工艺处理效能与系统运行[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 1509-1517.
HE X, WANG S H, SHI L X, et al. Membrane process efficiency and system operation of nanofiltration drinking water plant [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(10): 1509-1517.
- [3] ZHANG R, LIU Y, HE M, et al. Antifouling membranes for sustainable water purification: Strategies and mechanisms [J]. Chemical Society Reviews, 2016, 45(21): 5888-5924.
- [4] MOHAMMAD A W, TEOW Y H, ANG W L, et al. Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects [J]. Desalination, 2015, 356: 226-254. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.043.
- [5] 甘振东. 岸滤/纳滤组合过滤技术净水特性与运行稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
GAN Z D. Study on water purification characteristics and operational stabilization of combined filtration technology constructed by bank filtration and nanofiltration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [6] 李雨轩. 超滤-纳滤双膜组合工艺在高品质饮用水处理中的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
LI Y X. Study on ultrafiltration-nanofiltration combined membrane process in high quality drinking water treatment [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [7] 王明远. 超滤-纳滤组合工艺处理南水北调微污染水源水效能及调控[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
WANG M Y. Ultrafiltration-nanofiltration combined process to treat the water efficiency and regulation of micro-polluted water sources in the South-to-North Water Diversion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [8] 田若,钟燕敏,黄嘉奕,等. 超滤+纳滤系统深度净化低温低浊期梁子湖水中试[J]. 中国给水排水, 2023, 39(17): 32-37.
TIAN R, ZHONG Y M, HUANG J Y, et al. Deep purification effect of ultrafiltration+nanofiltration double membrane system on low temperature and low turbidity surface water [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(17): 32-37.
- [9] 苏童. 超滤-纳滤组合工艺处理西江水系水源水适用性中试研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
SU T. Pilot study on the suitability of UF-NF combined process for the treatment of Xijiang River source water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [10] 沈利清,徐百龙,范海东,等. 超滤+纳滤组合工艺深度处理饮用水的中试研究[J]. 给水排水, 2023, 49(s2): 573-578.
SHEN L Q, XU B L, FAN H D, et al. A pilot study of UF+NF membrane process for advanced drinking water treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(s2): 573-578.
- [11] 姜洪涛,吴义超,叶元柳,等. 超滤-纳滤组合工艺深度处理砂滤池出水中试研究[J]. 供水技术, 2018, 12(5): 1-5.
JIANG H T, WU Y C, YE Y L, et al. A pilot study on the advanced treatment of sand filter effluent by UF-NF process [J]. Water Technology, 2018, 12(5): 1-5.
- [12] 许斐,马卫江,李桂芳,等. 接触氧化沉淀-超滤-纳滤处理引黄水库水中试[J]. 水处理技术, 2020, 46(2): 89-93, 97.
XU F, MA W J, LI G F, et al. Pilot-scale test on Yellow River

- diversion reservoir water treatment by contact oxidation precipitation-UF-NF [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(2): 89-93, 97.
- [13] 张健. 典型饮用水处理工艺影响纳滤膜运行的分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
ZHANG J. Analysis of influence of typical drinking water treatment process on NF membrane operation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [14] 王少华, 施卫娟, 贺鑫, 等. 纳滤深度处理在饮用水厂的应用与实践 [J]. *给水排水*, 2021, 47(10): 13-19.
WANG S H, SHI W J, HE X, et al. Application and practice of nanofiltration advanced treatment in water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(10): 13-19.
- [15] 李涛, 贺鑫, 王少华, 等. 张家港市第四水厂纳滤膜处理系统运行经验总结 [J]. *给水排水*, 2024, 50(6): 43-49.
LI T, HE X, WANG S H, et al. Summary of operation experience of nanofiltration membrane treatment system in Zhangjiagang No.4 water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(6): 43-49.
- [16] WANG L, HE D, CHEN W, et al. Probing the roles of Ca^{2+} and Mg^{+} in humic acids-induced ultrafiltration membrane fouling using an integrated approach [J]. *Water Research*, 2015, 81: 325-332. DOI: 10.1016/j.watres.2015.06.009.
- [17] 石皓天, 于水利, 侯立安. 饮用水处理过程中天然有机物引起的超滤膜污染机制研究进展 [J]. *水处理技术*, 2024, 50(6): 1-7, 20.
SHI H T, YU S L, HOU L A. Research progress on the mechanism of ultrafiltration membrane pollution caused by natural organic matter in drinking water treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(6): 1-7, 20.
- [18] 张大为, 徐慧, 王希, 等. 藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 [J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3281-3289.
ZHANG D W, XU H, WANG X, et al. Effects of algal morphology and AL species distribution on the coagulation-ultrafiltration process [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3281-3289.
- [19] ZHANG J X, HUANG B C, XU Q S, et al. Unexpected alleviation of transparent exopolymer particles-associated membrane fouling through interaction with typical organic foulants [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 636: 119554. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119554.
- [20] MA B, WU S, WANG B, et al. Influence of floc dynamic protection layer on alleviating ultrafiltration membrane fouling induced by humic substances [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 31(4): 10-19.
- [21] 张琪, 王泽众, 李盈莹, 等. 用于醇脱水的渗透汽化有机膜的改性研究进展 [J]. *膜科学与技术*, 2023, 43(4): 184-195.
ZHANG Q, WANG Z Z, LI Y Y, et al. Research progress in the modification of pervaporation organic membranes for alcohol dehydration [J]. *Membrane Science and Technology*, 2023, 43(4): 184-195.
- [22] 詹巍, 张军, 左薇, 等. 高分子有机膜亲水改性及光催化改性的研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(6): 114-119.
ZHAN W, ZHANG J, ZUO W, et al. Research progress in hydrophilic and photocatalytic modification of organic polymer membrane [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(6): 114-119.
- [23] 蒋淑红, 夏萍, 钱灏. 陶瓷纳滤膜水处理技术研究进展与展望 [J]. *给水排水*, 2024, 50(s1): 89-98.
JIANG S H, XIA P, QIAN H. Research progress and prospect of ceramic nanofiltration membrane in water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(s1): 89-98.
- [24] 徐振峰, 陈文松, 黎钱波, 等. 陶瓷膜工艺在浙江省农村饮用水处理中的应用 [J]. *净水技术*, 2022, 41(3): 39-45.
XU Z F, CHEN W S, LI Q B, et al. Application of ceramic membrane process in rural drinking water treatment in zhejiang province [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(3): 39-45.
- [25] 杨洁, 李旋坤, 李光辉, 等. 陶瓷膜的膜污染机制与控制技术研究进展 [J]. *工业水处理*, 2023, 43(5): 9-15.
YANG J, LI X K, LI G H, et al. Research progress of ceramic membrane fouling mechanism and control technology [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(5): 9-15.
- [26] 王志红, 植许望, 李炳萱, 等. KMnO_4 强化混凝耦合超滤去除湖库水中共存铁锰藻 [J]. *中国给水排水*, 2022, 38(5): 1-8.
WANG Z H, ZHI X J, LI B X, et al. Potassium permanganate pre-oxidation enhanced coagulation coupled with ultrafiltration to remove co-existed iron, manganese and algae in lakes and reservoirs in south China [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(5): 1-8.
- [27] 徐双成, 高熠璇, 胡昕如, 等. 预氧化耦合超滤工艺净化处理含藻水研究进展 [J]. *净水技术*, 2023, 42(6): 7-13, 21.
XU S C, GAO Y X, HU X R, et al. Research progress of pre-oxidation coupled with UF process for algae-laden water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(6): 7-13, 21.
- [28] 成小翔, 朱学武, 梁恒, 等. 臭氧/陶瓷超滤膜短流程净水工艺试验研究 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(1): 22-26, 32.
CHENG X X, ZHU X W, LIANG H, et al. Experimental study on ozonation/ceramic ultrafiltration membrane short process for water purification [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(1): 22-26, 32.
- [29] WEI D, TAO Y, ZHANG Z, et al. Effect of in-situ ozonation on ceramic UF membrane fouling mitigation in algal-rich water

(下转第 94 页)

- GAO J F, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Effects of carbon sources and dosages on the denitrification rate in SBR process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2001, 27(5): 55–58.
- [16] RODRIGUEZ L, VILLASENOR J, FERNNDEZ F J. Use of agro-food wastewater for the optimisation of the denitrification process [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55(10): 63–70.
- [17] 蔡碧婧. 反硝化脱氮补充碳源选择与研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
- CAI B J. Study on choose and optimize of extra carbon source for denitrification [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [18] 张智, 陈杰云, 李勇, 等. 处理低碳源污水的倒置 AAO 工艺强化脱氮技术研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(13): 7–12.
- ZHANG Z, CHEN J Y, LI Y, et al. Nitrogen removal from low-carbon wastewater by reversed AAO process [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(13): 7–12.
- [19] FERNNDEZ-NAVA Y, MARANON E, SOONS J, et al. Denitrification of high nitrate concentration wastewater using alternative carbon sources [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/2/3): 682–688. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.140.
- [20] 高欣东, 冯婧微, 李春华, 等. 水处理过程中外加碳源类型及其影响因素研究进展 [J]. *现代化工*, 2020, 40(s1): 26–32.
- GAO X D, FENG J W, LI C H, et al. Research progress on types of external carbon sources in water treatment process and their influencing factors [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(s1): 26–32.
- [21] 徐楠, 宋广宇, 孙治富, 等. 啤酒废水作为生物质碳源减污降碳实践 [J]. *中外酒业*, 2022(13): 1–4.
- XU N, SONG G Y, SUN Z F, et al. Practice of brewery wastewater as biomass carbon source reducing pollution and carbon emissions [J]. *Global Alinfo*, 2022(13): 1–4.

(上接第 49 页)

- treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 498: 116–124. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.09.063.
- [30] 钱灏, 张平允, 叶辉, 等. 陶瓷膜应用于饮用水处理市场的分析及展望 [J]. *给水排水*, 2023, 49(1): 142–149.
- QIAN H, ZHANG P Y, YE H, et al. The market analysis and progress of ceramic membrane application for drinking water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(1): 142–149.
- [31] 谢义忠, 段宇浩, 冯绮澜, 等. 超滤与混凝沉淀单元短流程适配的中试研究 [J]. *工业水处理*, 2015, 35(5): 19–22.
- XIE Y Z, DUAN Y H, FENG Q L, et al. Pilot study on the shortened process by ultrafiltration adapting to conventional coagulation/sedimentation for drinking water treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35(5): 19–22.
- [32] 陈艳芬, 姬志勇, 贺威, 等. 投加 CO₂ 调节原水 pH 控制铝含量的试验 [J]. *净水技术*, 2023, 42(s1): 80–85.
- CHEN Y F, JI Z Y, HE W, et al. Experiment of adding CO₂ to adjust pH of raw water to control aluminum content [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(s1): 80–85.
- [33] 武珉辉, 刘爽, 钱灏, 等. 上向流活性炭-超滤组合工艺中臭氧投加的中试优化 [J]. *环境工程*, 2021, 39(10): 72–77.
- WU M H, LIU S, QIAN H, et al. Pilot-scale optimization of ozone dosage in up flow activated carbon-ultrafiltration combined process [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(10): 72–77.
- [34] 唐和礼, 张冰, 毛鑫, 等. 人工智能在膜污染研究中的应用进展 [J]. *给水排水*, 2021, 47(7): 134–145.
- TANG H L, ZHANG B, MAO X, et al. Advance in applications of artificial intelligence in the research of membrane fouling [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(7): 134–145.
- [35] CHEW C M, AROUA M K, HUSSAIN M A. A practical hybrid modelling approach for the prediction of potential fouling parameters in ultrafiltration membrane water treatment plant [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017, 45: 145–155. DOI: 10.1016/j.jiec.2016.09.017.
- [36] NIU C, LI X, DAI R, et al. Artificial intelligence-incorporated membrane fouling prediction for membrane-based processes in the past 20 years: A critical review [J]. *Water Research*, 2022, 216: 118299. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118299.