

微絮凝-金属膜净水组合工艺中膜污染机理探析

李伟英^{1,2}, 吴璇¹, 亓万琦¹, 杨峰³, 丁凯³, 向嫒⁴

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海威派格智慧水务股份有限公司, 上海 201806; 4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 采用微絮凝-金属微滤膜组合工艺处理微污染水, 借助 X 射线能谱、电镜扫描等微观表征以及动态膜污染数学模型等方法, 对微絮凝-金属膜组合工艺运行方式与膜污染机理进行研究。试验结果表明组合工艺对微污染水的浊度、UV₂₅₄ 以及 COD_{Mn} 平均去除效率分别为 97.6%、80.0% 和 63.1%。选用 0.3 μm 金属膜滤芯时, 采用恒通量过滤模式, 膜比通量随着通量的增加逐渐从 44.44 L·(m²·h·kPa)⁻¹ 增至 58.33 L·(m²·h·kPa)⁻¹; 采用恒压过滤模式, 膜比通量随着压力的增加逐渐从 47.91 L·(m²·h·kPa)⁻¹ 降至 17.63 L·(m²·h·kPa)⁻¹, 金属膜在恒通量运行时的膜比通量高于恒压运行, 说明恒通量运行时膜阻力增长较为缓慢。通过 X 射线能谱分析膜表面污染物中含有 O、Al 和 Si 等元素, 推断膜表面主要污染物是硅酸铝盐; 通过电镜扫描与动态膜污染数学模型模拟的结果表明, 金属膜膜污染的主要形式为滤饼层污染。

关键词: 金属膜; 微絮凝; 膜比通量; 膜污染

中图分类号: TU991.2

文献标志码: A

Fouling Mechanism in Water Treated by Micro-coagulation Filtration with Metallic Membranes

LI Weiying^{1,2}, WU Xuan¹, QI Wanqi¹, YANG Feng³, DING Kai³, XIANG Yuan⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environmental Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. WPG(Shanghai) Smart Water Public Co., Ltd., Shanghai 201806, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Micro-polluted water was treated by micro-coagulation filtration with metallic membranes. The operation and fouling mechanism of micro-coagulation filtration with metallic membranes were investigated by electronic differential system (EDS), scanning transmission electro

(SEM) and membrane fouling model. The highest removal rates in turbidity, UV₂₅₄ and COD_{Mn} were 97.4%, 80.9% and 64.6% respectively by using 0.3 μm metallic film. The specific flux (S) was increased gradually from 44.44 L·(m²·h·kPa)⁻¹ to 58.33 L·(m²·h·kPa)⁻¹ with constant flux operation and S was decreased from 47.91 L·(m²·h·kPa)⁻¹ to 17.63 L·(m²·h·kPa)⁻¹ with constant pressure operation. The result shows S of constant flux operation is higher than that of the constant pressure operation, indicating lower membrane fouling in constant flux operation. O, Al and Si increase obviously in polluted metallic membrane, suggesting that the main component of the contaminant may be aluminum silicate. The main fouling is cake layer pollution in metallic membrane by SEM and fouling model.

Key words: metallic membrane; micro-coagulation; specific flux; membrane fouling

近年来我国大部分地表水水源都受到了不同程度的污染, 水中的重金属离子、环境内分泌干扰物(EDCs)、持久性有机物(POPs)、医药与个人护理品(PPCPs)、微囊藻毒素(MC)、等都对人类身体健康造成威胁, 然而传统常规给水处理工艺无法对微污染原水中痕量有机物等进行有效去除, 因此, 膜处理等饮用水深度处理技术得到了广泛应用。膜材料按材质分为有机膜和无机膜, 目前有机膜在膜处理技术中应用广泛, 但是高分子复合材料制备的有机膜具有不易清洗、寿命短且受外界因素影响较大等缺点, 使得人们注意对膜材料的开发; 而无机膜尤其是金属膜以其高渗透性, 分离效率高, 耐高压, 不易被腐蚀, 稳定性好, 使用寿命长以及维修方便等优点^[1-5], 在水处理领域得到广泛关注。

部分学者已将金属膜在水处理中进行一定尝试

收稿日期: 2018-03-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0700200)

第一作者: 李伟英(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为金属膜过滤在水处理中的应用研究。

E-mail: liweiying@tongji.edu.cn

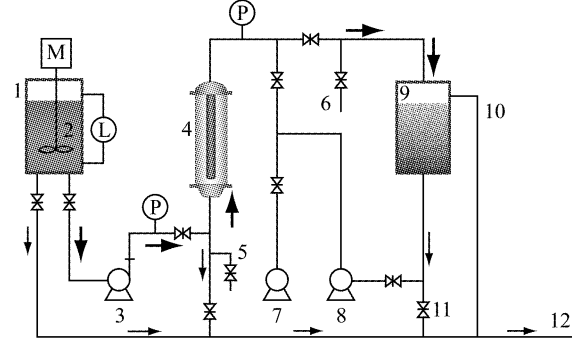
和应用, Kim 等^[6]采用 1 μm 和 5 μm 金属膜过滤屋面雨水以实现可持续利用; 1 μm 和 5 μm 金属膜对大肠杆菌的去除率分别为 98%、78%, 对颗粒物质的去除率分别为 95% 和 80%, 并认为金属膜主要污染模式为膜孔堵塞. 李松^[7]在油田污水过滤工艺中增设了金刚砂与金属膜工艺, 去除大颗粒悬浮物, 取得了较好的应用效果. 李伟英等^[8-9]采用粉末烧结金属膜在高滤速下 ($19\sim120\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$) 对隐孢子虫的去除率可达到 99.999% (5log) 以上, 出水浑浊度低于 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对粒径 $>2\text{ }\mu\text{m}$ 的微粒去除效果较好. 向嫻等^[10]采用臭氧-生物活性炭 ($\text{O}_3\text{-BAC}$) 金属膜联用工艺去除水中污染物, 能够有效去除水中的浑浊度、菌落总数和 DOC. 总体来说, 国内外研究者们大多数都是研究金属膜的净水效果, 目前鲜有文献对金属膜过滤过程中膜污染现象及机理进行研究.

因此, 本文提出微絮凝-金属膜组合工艺对微污染水源水进行处理, 采用膜比通量, 并且结合 EDS、SEM 等微观表征以及动态膜污染数学模型等方法, 对微絮凝-金属膜组合工艺在处理微污染水源水时的膜运行方式以及膜污染机理进行深入探究, 研究结果可为金属膜的实际应用提供具有参考价值的理论依据和技术指导.

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

采用自主设计并委托德瑞克化工设备有限公司制作的金属膜小试装置, 进行试验, 如图 1 所示, 粗箭头为过滤时的水流方向, 细箭头为排水方向; M 表示电动机; L 表示电子显示屏; P 表示压力传感



1. 原水罐; $\varnothing 350\times 350\text{ mm}$; 2. 搅拌桨; 3. 原水泵; 4. 金属膜过滤罐; $\varnothing 60\times 400\text{ mm}$; 5, 6. 取样口; 7. 风机; 8. 反洗泵; 9. 产水罐; $\varnothing 250\times 250\text{ mm}$; 10. 溢流口; 11. 产水罐出水口; 12. 排污口

图 1 微絮凝-金属膜过滤小试装置

Fig.1 Laboratory scale setup of micro-coagulation metallic membrane filtration

器. 金属膜滤芯为德国 GKN 烧结金属公司生产, 参数见表 1 及图 2.

表 1 金属膜滤芯相关参数

Tab.1 Parameters of metallic filters			
项目	参数	项目	参数
膜材料	316 不锈钢粉末 Fe/Cu/Ni	滤芯形状	管式
公称孔径	0.3 μm /0.5 μm /1 μm	膜有效过滤面积	0.015 93 m^2
滤芯类型	不对称、浸没式	最大跨膜压差	0.2 MPa
长度	20 cm	过滤方式	终端过滤
内径/外径	2.2 cm/2.5 cm	加压方式	外压式

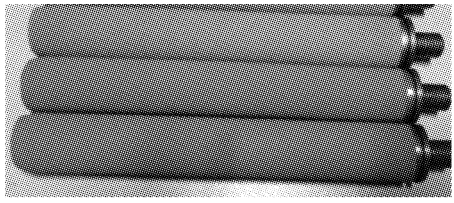


图 2 金属膜滤芯

Fig.2 Metallic filters

1.2 试验原水

微污染水源水一般是指水体受到有机物污染, 部分水质指标超过地表水环境质量标准 (GB3838—2002) III 类水体标准的水体^[11], 因此试验原水采用腐殖酸和高岭土配制而成, 模拟微污染水源水. 每次使用时, 在原料箱中投加一定量的高岭土和腐殖酸储备液稀释在自来水中, 使原水含高岭土 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和腐殖酸 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.3 试验方法

1.3.1 微絮凝-金属膜工艺不同操作方式膜比通量计算

试验采用微絮凝-金属膜组合工艺, 进行金属膜恒压恒通量过滤, 记录金属膜在恒压和恒通量过滤条件下膜通量的变化. 根据式 (1) 进行金属膜恒压和恒通量运行的膜比通量计算, 间接反映两种运行方式膜阻力的变化和膜污染的情况^[11-12], 即

$$S = \frac{J}{\Delta P} = \frac{Q}{A \cdot \Delta P} \tag{1}$$

式中: J 为膜通量, $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; Q 为膜出水流量, $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$; A 为膜面积, m^2 ; ΔP 为操作压力, kPa ; S 为单位操作压力下的膜通量, 即比压力通量, $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})^{-1}$.

1.3.2 检测设备

检测设备主要有哈希便携式浑浊度计 2 100Q, UV-2550 型分光光度计, SEM S-4800 日立 (Hitachi) 扫描式电子显微镜以及 X 射线能谱仪 (EDS).

2 结果与讨论

2.1 微絮凝-金属膜组合工艺出水水质指标分析

选用的混凝剂为聚合氯化铝 PACl (Al 含量

27%,天津),通过烧杯试验确定 PACl 最佳投加量为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。0.3 μm 、0.5 μm 以及 1.0 μm 孔径的金属膜在 $700 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 通量下运行 30 min,过滤时每 5 min 取一次膜滤后水样测定相关水质指标。试验期间原水及出水水质指标均值见表 2。

表 2 试验原水及出水水质指标

Tab.2 Raw water and effluent indexes in experiments

	浑浊度/NTU	去除率/%	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	去除率/%	COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	去除率/%
原水	15.21~16.98	—	0.114~0.119	—	2.47~3.03	—
0.3 μm	0.43	97.4	0.022	80.9	0.96	64.6
0.5 μm	0.44	97.3	0.024	79.2	0.98	63.7
1.0 μm	0.34	97.9	0.024	79.8	1.06	60.8

注:试验原水 pH 7.91 温度 13~14.5℃。

结果表明,组合工艺出水水质基本都能达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)的要求。3 种不同孔径的金属膜组合工艺对水中浊度去除最好,去除率均在 97%~98%,说明微絮凝-金属膜组合工艺能够对水中的悬浮颗粒进行有效地去除;其次组合工艺对水中腐殖质有良好的去除效果,去除率在 79%~81%之间;最后是对水中有机物的去除相对较低,0.3 μm 金属膜对有机物去除率为 64.6%,并随着金属膜孔径的增加,对有机物的处理能力有所下降,采用 1 μm 金属膜组合工艺的去除率仅为 60.8%。

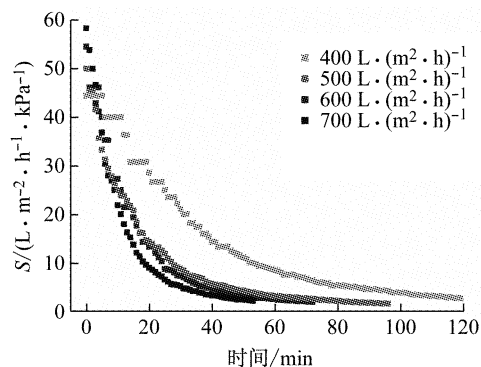
试验水质指标分析表明选用 0.3 μm 孔径金属膜的组合工艺对水中污染物质的去除效果最佳且运行最为稳定,因此后续膜污染试验均以 0.3 μm 孔径金属膜进行研究。

2.2 金属膜不同操作方式膜比通量分析

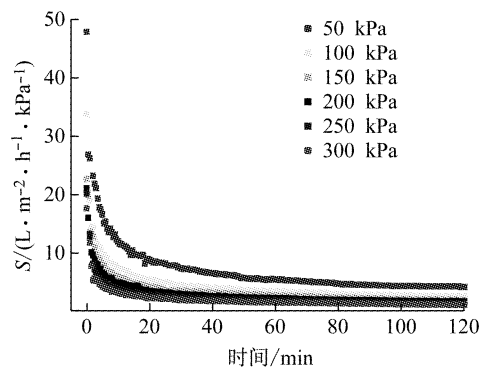
膜比通量 S ^[12] 能间接反映膜阻力的变化和膜污染的情况,比通量越低,说明膜污染越严重。本试验分别测定金属膜在恒通量和恒压过滤方式下的膜比通量,分析微絮凝-金属膜组合工艺的膜污染变化情况。膜比通量 S 随运行时间的变化情况如图 3 所示。

图 3 表明恒通量和恒压这两种过滤方式下,膜比通量 S 值均会在过滤初期快速下降,而后趋于平缓,表明在过滤初期金属膜表面迅速截留了大量污染物,逐渐形成一层滤饼层,膜孔也发生不同程度的堵塞,因此金属膜的膜比通量 S 快速降低;之后由于滤饼层和金属膜表面联合过滤作用,使得通量趋于稳定。恒通量过滤时 S 随着通量的增加($400 \sim 700 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$) 逐渐增加($44.44 \sim 58.33 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})^{-1}$),恒压过滤时 S 随着压力的增加($50 \text{ kPa} \sim 300 \text{ kPa}$) 逐渐降低($47.91 \sim 17.63 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})^{-1}$),且恒通量过滤条件下 S 的下降速率低于恒压过滤条件下 S 的下降速率。因此,微絮

凝-金属膜过滤工艺更适合采用恒通量过滤操作方式。



a 恒通量运行模式



b 恒压运行模式

图 3 金属膜在恒通量和恒压运行时的 S 变化

Fig.3 S changes of metallic membranes under constant flux operation and constant pressure operation

2.3 膜表面污染特性表征

2.3.1 能谱分析

X 射线能谱仪(EDS)可以分析金属膜表面物质的元素种类与含量。取新膜(尚未使用过的金属膜)及污染后的金属膜表面污染物分别进行 EDS 扫描检测,金属膜材料组成成分及其表面污染物元素分别见表 3,EDS 图像分析见图 4 与图 5。

表 3 新膜及污染膜元素含量
Tab.3 Elements in new membrane and polluted membrane

元素	新膜		污染膜	
	重量 百分比/%	原子 百分比/%	重量 百分比/%	原子 百分比/%
C	27.15	42.23	14.83	20.72
O	35.77	41.76	62.54	65.62
Al	5.39	3.73	14.23	8.85
Si	4.00	2.66	7.70	4.60
S	0.80	0.47	/	/
Cr	7.19	2.58	/	/
Fe	18.82	6.30	0.70	0.21
Ni	0.89	0.28	/	/
总量	100.00	100.00	100.00	100.00

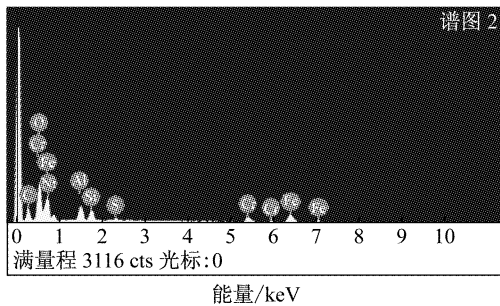


图 4 新膜 EDS 响应
Fig.4 EDS response of new membrane

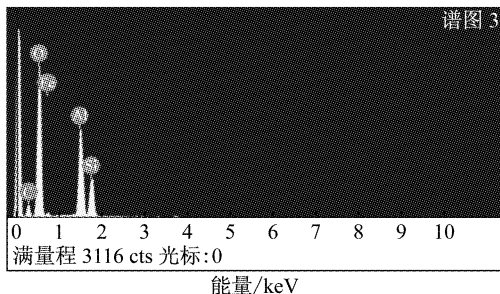


图 5 污染膜 EDS 响应
Fig.5 EDS response of foulants

由图 4 可以发现,新膜表面元素比较丰富,其中 C、O 和 Fe 元素的含量较多,原子百分比 $C>O>Fe$;同时还包含了 Al、Si、S、Cr 和 Ni 等元素. 其中 C 元素含量最高,这是由金属膜不锈钢材质决定的. 此外在金属膜的制备过程中,由于热喷涂工艺使不锈钢粉末在高温条件下氧化生成金属氧化物,因此新膜中 O 原子百分也比较高.

由图 5 发现,污染后的金属膜表面主要元素为 C、O、Al 和 Si. 与新膜表面组成元素相比,污染后的膜表面 O 元素含量显著增加,Al 和 Si 含量也有不同程度的增加,由于原水中投加混凝剂 PACl 成份为聚合氯化铝、原水中所含高岭土的成分 $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O$,过滤时含 Al 絮凝体及高岭土颗粒在

膜表面聚集,从而造成污染膜中 O、Al 和 Si 的增加.

Al 和 Si 是无机污染物的主要来源,对膜表面滤饼层的形成起到重要作用^[13],根据每个元素的响应值说明膜表面主要污染物是硅酸铝盐.

2.3.2 电镜扫描

扫描式电子显微镜(SEM)可以测定金属膜表面形态及内部结构. 取新膜(尚未使用过的金属膜)及污染后的金属膜表面污染物分别进行电镜扫描检测,SEM 图像分析如图 6 所示.

图 6a 和图 6b 是污染前的金属膜 SEM 图像,放大倍数分别为 1 000 倍和 2 000 倍,根据检测结果可知,金属膜表面是由金属粉末颗粒喷涂而成,粉末颗粒之间的间隙构成了大量开放的膜孔和相对均匀的表面结构,保证了膜的通透性,从而实现对污染物的筛分. 图 7 是 Aalami-Aleagha^[14]等采用电弧喷涂技术制备而成的,与本文使用的金属膜表面形态有所不同.

图 6c 和图 6d 是污染后的金属膜 SEM 图像,放大倍数分别为 1 000 倍和 2 000 倍. 通过检测结果可知,在微絮凝-金属膜过滤工艺条件下,细小絮凝体及颗粒物在金属膜表面沉积,形成一层明显的深棕色滤饼层,几乎所有的膜孔都被膜表面形成的密实的滤饼层覆盖或堵塞,明显降低了膜表面的过滤性能.

3 膜污染机理研究

国内外已有许多学者对膜污染机理建立模型进行研究,Zhang 等^[5]基于达西定律和阻力串联模型,计算出酒厂废水导致的金属膜污染阻力为 $1.77 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$,并发现滤饼层污染是膜污染的主要机制. 本文基于 Kan 等^[15]采用 Lim 和 Bai 提出的膜孔窄化、膜孔堵塞、滤饼层形成等三种理论模型研究膜污染机理. 恒压过滤操作模式下,3 种理论模型的方程见表 4.

表中: J 为渗透通量; J_0 为初始渗透通量; t 为过滤时间,参数 K_M 、 K_P 和 K_C 分别代表膜阻力、膜孔堵塞阻力、滤饼层阻力. 式(2)和式(5)用于描述纯水通过干净膜时的阻力,式(3)和式(6)用于描述膜孔堵塞模型,此时颗粒物会沉积在膜孔中. 式(4)和式(7)用于描述膜表面污染物的积聚和滤饼层的形成.

采用恒压(100 kPa、200 kPa 和 300 kPa)运行的操作方式运行,进行膜污染试验. 根据上述膜污染模型,对金属膜膜污染进行分析,如图7所示. 根据模

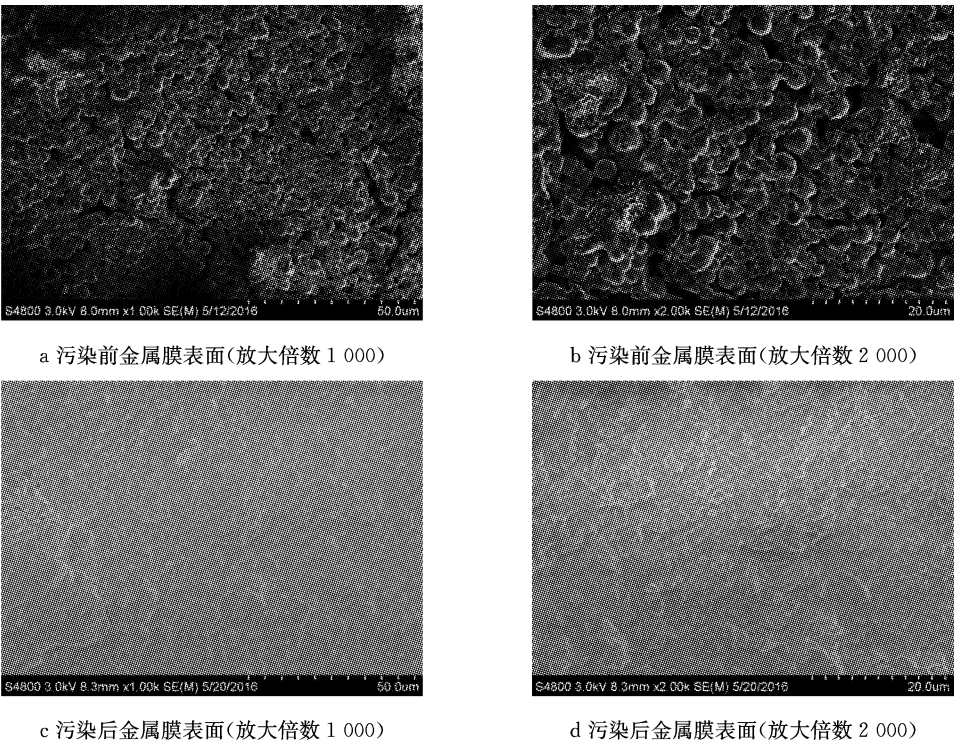


图 6 金属膜电镜扫描

Fig.6 Scanning electron microscopy of metallic membranes

表 4 恒压过滤模型方程

污染机制	模型方程式	线性形式
膜孔窄化	$J=\frac{J_0}{1+J_0K_Mt}$ (2)	$\frac{1}{J}=\frac{1}{J_0}+K_Mt$ (5)
膜孔堵塞	$J=J_0\exp(-K_Pt)$ (3)	$\ln J=-K_Pt+\ln J_0$ (6)
滤饼层形成	$J^2=\frac{J_0^2}{1+J_0^2K_Ct}$ (4)	$\frac{1}{J^2}=\frac{1}{J_0^2}+K_Ct$ (7)

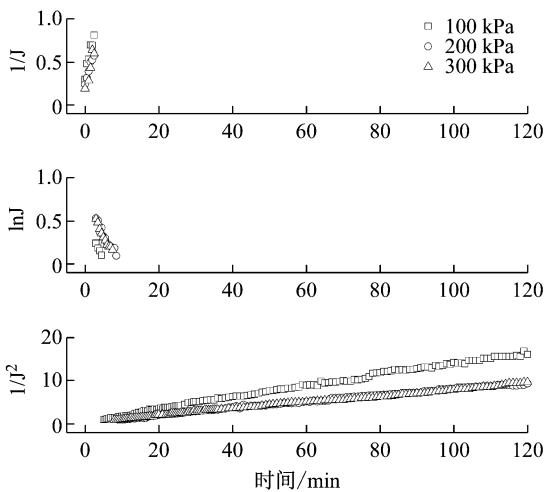


图 7 不同恒压条件的过滤机制

Fig.7 Filtration mechanisms at different constant pressures

拟结果计算出 3 种污染机制下的的膜阻参数,见表 5.

表 5 不同恒压条件的过滤模型参数

污染机制	参数	操作压力		
		100 kPa	200 kPa	300 kPa
膜孔窄化	K_M	0.192 5	0.137 8	0.189 9
	J_0	2.917 5	4.016 9	6.203 9
	R^2	0.931 9	0.965 4	0.851 2
膜孔堵塞	K_P	0.096 80	0.077 94	0.086 86
	J_0	1.586 5	1.986 3	2.034 8
	R^2	0.985 3	0.927 1	0.950 7
滤饼层形成	K_C	0.133 0	0.076 40	0.074 44
	J_0	1.093 7	1.326 7	1.287 8
	R^2	0.996 1	0.993 7	0.995 5

从图 7a 可看出,初始过滤 2 min 内拟合曲线呈线性分布,3 种操作压力条件下,膜自身阻力均为膜阻组成部分,并且操作压力越低,膜自身阻力对膜阻的影响越大. 过滤 2 min 后,膜自身阻力已不再占主导地位,膜孔开始堵塞,从图 7b 可看出,过滤 3~7 min 后,3 种操作压力条件下金属膜孔发生不同程度的堵塞,操作压力较高时膜孔阻塞越严重, K_p 和 J_0 随着操作压力的增加而增加. 随着过滤时间的增加,膜孔堵塞时期的 K_p 和 J_0 减少,是因为有效膜过滤孔径的减少和孔隙堵塞使得孔隙可用性降低. 根据图 7c 可看出,过滤 7min 后,滤饼层过滤机制逐渐占据主导地位,拟合曲线的斜率 K_c 和 J_0 随着操作压力增加而减少,形成的滤饼层越致密,但滤饼层阻力

随着操作压力增加而增加的影响低于操作压力增加对渗透通量产生的影响。

4 结论

(1) 微絮凝-金属膜组合工艺出水水质均能达到标。其中组合工艺联用的 $0.3\ \mu\text{m}$ 孔径金属膜对浊度、 UV_{254} 以及 COD_{Mn} 去除效果最好,分别为 97.4%、80.9% 以及 64.6%。

(2) 膜比通量 S 的计算结果,膜比通量 S 值均会在过滤初期快速下降,而后趋于平缓。在过滤过程中,恒通量操作的 S 始终高于恒压操作的 S ,过滤效果更好。

(3) 新膜中 C、O 和 Fe 的含量较高。污染膜中, O 含量最高,其次是 C、Al 和 Si,推断污染物的主要成分可能是硅酸铝盐。

(4) 电镜结果显示,金属膜表面为金属粉末颗粒,颗粒之间的间隙构成了膜孔,实现对污染物的筛分。过滤后膜表面形成一层致密的滤饼层,增加了过滤阻力。

(5) 对 $0.3\ \mu\text{m}$ 孔径金属膜在 3 种恒压(100 kPa、200 kPa、300 kPa)条件下运行结果进行数学拟合,结果表明整个过滤过程中,滤饼层过滤机制快速占据主导地位。

致谢:本工作得到“多水源格局下水源-水厂-管网联动机制及优化调控技术(2017ZX07108-002)”、“二次供水系统水质保障及其运行维护技术研究(20183231)”、“成都川力高品质饮用水水质安全与保障技术研究(20182078)”等课题项目提供的支持,特此感谢。

参考文献:

- [1] SUÁREZ M A, GUTIÉRREZ G, MATOS M, *et al.* Emulsification using tubular metallic membranes[J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2014, 81:24.
- [2] PHELPS T J, PALUMBO A V, BISCHOFF B L, *et al.* Micropore-sized metallic filter tube membranes for filtration of particulates and water purification [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2008, 74(1):10.
- [3] XING Y, BAUMANN S, UHLENBRUCK S, *et al.* Development of a metallic/ceramic composite for the deposition of thin-film oxygen transport membrane[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33(2):287.
- [4] GHOU B, HARABI A, BOUZERARA F, *et al.* Elaboration and characterization of ceramic membrane supports from raw materials used in microfiltration [J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 254/256(12):67.
- [5] ZHANG S, YANG F, LIU Y, *et al.* Performance of a metallic membrane bioreactor treating simulated distillery wastewater at temperatures of 30° to 45°C [J]. *Desalination*, 2006, 194(1/3):146.
- [6] KIM R H, LEE S, KIM J O. Application of a metal membrane for rainwater utilization: filtration characteristics and membrane fouling[J]. *Desalination*, 2005, 177(1):121.
- [7] 李松. 金属膜过滤装置在油田污水处理中应用[J]. *石油矿场机械*, 2013, 42(8):48.
LI Song. Application of metal membrane filter technology in oilfield waste water treatment[J]. *Oil Field Equipment*, 2013, 42(8):48.
- [8] 李伟英, 汤浅晶, 董秉直, 等. 超高流速金属膜过滤性能及其微粒子去除特性[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(2):202.
LI Weiying, TANG Qianjing, DONG Bingzhi, *et al.* Filtration characteristic of metallic membrane under superhigh flux and its removal of micro-particle from surface water[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2008, 36(2):202.
- [9] 李伟英, 汤浅晶, 李富生, 等. 金属过滤膜去除微粒子的研究[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(10):1.
LI Weiying, TANG Qianjing, LI Fusheng, *et al.* Micro-particle removal using metallic membrane[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(10):1.
- [10] 向嫻, 李伟英, 许晨, 等. 臭氧-生物活性炭-金属膜联用工艺在水处理中的应用[J]. *净水技术*, 2017, 36(2):69.
XIANG Yuan, LI Weiying, XU Chen, *et al.* Application of combined processes of ozone-biological activated carbon-metallic membrane in water treatment[J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(2):69.
- [11] SUN C, XIE L, LI X, *et al.* Study on different ultrafiltration-based hybrid pretreatment systems for reverse osmosis desalination[J]. *Desalination*, 2015, 371:18.
- [12] 张光辉. 膜混凝反应器(MCR)制备饮用水和去除氟化物的研究[D]. 天津:天津大学, 2004.
ZHANG Guanghui. Study on membrane coagulation reactor (MCR) for drinking water production and removal of fluoride [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [13] 王朝朝, 李军, 王昌稳, 等. 强化除磷型膜生物反应器的膜污染特性[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(13):1.
WANG Zhaozhao, LI Jun, WANG Changwen, *et al.* Study of characteristic of membrane fouling in EBPR-MBR[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(13):1.
- [14] AALAMI-ALEAGHA M E, MADAENI S S, DARAEI P. A new application of thermal spray in preparation of metallic membrane for concentration of glucose solution[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, 18(4):519.
- [15] KAN C C, GENUINO D A D, RIVERA K K P, *et al.* Ultrasonic cleaning of polytetrafluoroethylene membrane fouled by natural organic matter[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 497:450.