

论述与研究

PVC 合金超滤膜运行 7 年效能及膜污染特性研究

连震雷¹, 李 星¹, 于海宽¹, 杨艳玲¹, 纪洪杰², 蔡传义²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 东营自来水公司, 山东 东营 257091)

摘 要: 为研究长期运行的超滤膜污染特性及污染物组成, 采用东营南郊水厂一期超滤膜工艺中已运行 7 年的旧超滤膜与新超滤膜进行对比, 分析了膜通量、跨膜压差及运行成本的变化, 对膜断面形态及膜丝内部的有机物和无机物种类进行了解析。结果表明, 经长期运行后超滤膜的过滤性能明显变差, 出现了累积性的膜通量下降、跨膜压差增长速率变大等现象, 更换超滤膜更符合经济性。亲水性的低分子质量有机物、腐殖酸类、蛋白质类和色氨酸类等是截留的主要污染物。长期运行的超滤膜附着的 CaCO_3 、铝和硅含量明显高于新膜, 化学清洗分别仅可去除约 62%、28% 和 37%, 造成 CaCO_3 、铝和硅在超滤膜表面及内部的持续性沉积; 化学清洗过程无法彻底消除长期运行超滤膜的不可逆污染, 化学清洗后附着在膜表面和膜孔内的污染物颗粒数量显著减少, 但仍有部分污染物颗粒残留在膜孔内。

关键词: 给水处理; 超滤膜; 长期运行; 不可逆污染; 污染物特性

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)13-0001-06

Performance Evaluation and Membrane Fouling Characteristics of Long-term Operation of PVC Alloy Ultrafiltration Membrane

LIAN Zhen-lei¹, LI Xing¹, YU Hai-kuan¹, YANG Yan-ling¹, JI Hong-jie²,
CAI Chuan-yi²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Dongying Waterworks Company, Dongying 257091, China)

Abstract: The first-stage UF membrane process has operated for seven years in Dongying Nanjiao Waterworks. In order to study the fouling characteristics and contaminant composition of the long-term ultrafiltration membrane, a comparison was made between the old UF membrane and the new one. The transmembrane pressure (TMP) difference, flux change, running cost, the organic and inorganic compounds on these membranes were analyzed. The results showed that the old membrane had the problems of the membrane flux decreasing gradually and larger growth rate of TMP, and it was more economical to replace the ultrafiltration membrane. Humic acids, proteins, tryptophan and low molecular weight organic matter were the main pollutants causing membrane fouling. CaCO_3 , Al and Si in the old membrane was obviously higher than that of the new membrane. Chemical cleaning could only remove 62% of CaCO_3 , 28% of Al and 37% of Si on the old membrane. After cleaning, the number of membrane pores in-

creased and the amount of pollutant particles decreased significantly. However, some of the particles remained in the membrane pores, which was the important reason leading to irreversible fouling of the old membrane.

Key words: drinking water treatment; ultrafiltration membrane; long-term operation; irreversible fouling; pollutant characteristics

超滤技术作为“第三代城市饮用水净化工艺”,近年来已经在市政给水厂以及建筑小区终端用户中得到越来越广泛的应用,但是在超滤技术应用过程中存在膜污染、膜使用寿命等问题^[1],造成超滤膜性能变差、运行成本增加^[2],严重影响了超滤技术的推广应用。目前已经开展的膜污染等方面研究表明,难溶盐类、溶解性有机物、胶体和颗粒物以及生物在超滤膜表面附着及膜孔内堆积是引起膜污染的重要原因^[3],其中的部分污染物会对超滤膜造成显著的不可逆污染,导致膜通量下降、跨膜压差升高^[4]。化学清洗等手段也无法使不可逆污染得到完全恢复,这些污染物在膜上长期积累会造成累积性的不可逆膜污染,使得长期运行的超滤膜的运行通量不断减小、跨膜压差持续增加,极大地缩短了膜的使用寿命,通常具有5年使用寿命的超滤膜运行2~3年就因为运行通量过小或跨膜压差过大而无法稳定运行^[5]。由于超过5年长期运行的大型超滤给水厂就很少,而超过5年运行期限的超滤膜更是难得,因此研究长期运行的超滤膜的膜污染特性,对超滤膜的长期稳定运行及延长使用寿命具有非常重要的意义和应用价值。

笔者采用东营南郊水厂一期工程(设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)已运行7年的浸没式PVC合金帘式超滤膜,研究了膜通量、跨膜压差及运行成本的变化规律,表征了长期运行的超滤膜污染特性和主要污染物类型,分析了长期运行的超滤膜与新超滤膜的不可逆污染特点,以期为膜污染控制及更换超滤膜提供参考。

1 材料与方法

1.1 膜来源及特性

采用某膜滤工艺给水厂已运行7年的PVC合金超滤膜和同等材质的新超滤膜,新膜公称孔径为 $0.01 \mu\text{m}$,截留分子质量为50 ku,单根膜丝长度为2 m;旧膜的平均孔径为 $0.014 \mu\text{m}$,单根膜丝长度为2.172 m。试验时分别将两种膜制成面积为 0.01 m^2 的膜组件。

1.2 试验装置

试验装置如图1所示,主要由膜池及膜组件构成,膜池顶部设置的压力传感器与电脑数据采集终端连接,膜池底部设置的空气扩散器与曝气泵连接。装置运行过程包括化学清洗阶段与过滤阶段,化学清洗时,将清洗药剂倒入膜池,同时将产水管接到膜池中,化学药剂经过蠕动泵循环抽吸对超滤膜进行化学清洗,化学清洗时间为4 h,清洗结束后,将产水管接到产水水箱中,然后进入正常过滤阶段;过滤时,以常规工艺滤后水作为进水,经过超滤膜过滤后出水通过蠕动泵抽吸进入产水水箱,过滤时间为27 h。试验装置在过滤阶段前先对旧膜组进行化学清洗,过滤阶段结束后再对新旧膜组进行化学清洗。整个运行过程中用压力传感器实时记录跨膜压差,通过流量值和膜面积得出膜通量。所有运行阶段结束后取膜组材料进行相关测定分析。

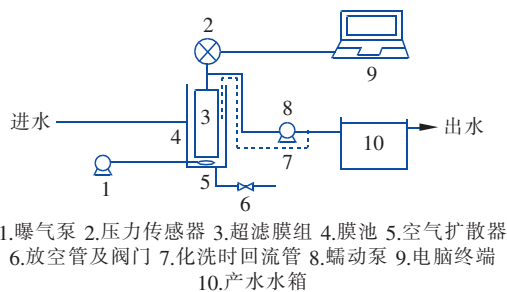


图1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of UF device

1.3 分析方法

UV_{254} 采用紫外分光光度仪测定,精度为 0.001 cm^{-1} ;DOC采用总有机碳分析仪测定,精度为 0.01 mg/L ;蛋白质和腐殖质类有机物采用荧光光谱仪测定,激发波长范围为220~450 nm,发射波长范围为220~550 nm;膜丝断面结构形态采用扫描电子显微镜(SEM)测定;膜丝断面元素种类及含量采用能量色散光谱(EDS)仪检测。膜污染物采用化学清洗方式得到,化学清洗方式分为4种,其中方式a是用NaClO清洗4 h;方式b先用NaClO+NaOH清洗2 h,再用HCl清洗2 h;方式c先用NaClO+NaOH清

洗2 h,再用柠檬酸清洗2 h;方式d先用NaOH清洗2 h,再用HCl清洗2 h。化学清洗过程中始终保持曝气,曝气量为 $100 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2 结果与讨论

2.1 新旧超滤膜运行特性差异

2.1.1 膜通量差异

图2为新膜组、未化学清洗旧膜组以及经4种方式清洗后旧膜组的膜通量变化情况。在0~27 h过滤阶段,新膜组的膜通量由 $30.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降为 $30.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,相比初始通量降低了0.66%;未清洗的旧膜组的膜通量由 $30.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 下降至 $28.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,相比初始通量降低了6.6%,其膜通量降低明显,与新膜相比,旧膜的膜通量下降速率增加了近10倍,这主要是由于旧膜的抗污染性能变差,更易导致膜通量降低。在水厂的实际运行过程中,旧膜的膜通量也由最初的 $32.50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降为 $25.61 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,降低了21.2%。旧膜组经过4种不同化学清洗方式清洗后,膜通量得到明显改善,膜通量由 $28.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 最高可增至 $30.1 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,过滤阶段结束时的膜通量比初始膜通量分别降低了4.60%、5.20%、1.81%和2.19%。可以看到,长期运行的超滤膜会出现明显的累积性膜通量下降问题,造成超滤膜的产水能力持续降低,采取合适的化学清洗方式能够有效缓解膜污染,使得膜通量得以恢复。

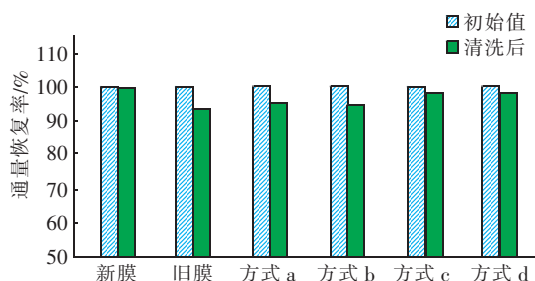


图2 膜组膜通量恢复差异对比

Fig.2 Change of membrane flux before and after cleaning

2.1.2 跨膜压差差异

图3为新膜组、未化学清洗旧膜组以及经4种方式清洗后旧膜组的跨膜压差变化情况。在0~27 h的过滤阶段,新膜组的跨膜压差由5.11 kPa增长到5.85 kPa,未清洗旧膜组的跨膜压差由16.55 kPa增长至28.50 kPa,与新膜组相比,旧膜组不仅初始跨膜压差增大了11.44 kPa,其跨膜压差增长速率也

提高了11.49倍。在过滤期间,新旧膜组的跨膜压差增长速率出现了增加与变缓交替变化,表明膜污染过程也存在初始污染、缓慢污染和膜压跃升污染阶段,这与Zhang^[6]和Ng^[7]等人对膜污染阶段变化的研究结果类似。在水厂2 h的实际运行过程中,旧膜的跨膜压差增加了15.06 kPa,新膜仅增加了5.65 kPa,旧膜的跨膜压差增长速率是新膜的2.67倍,过滤周期由6 h降至3.5 h,缩短了41.67%,表明旧膜的抗污染性能明显变差。

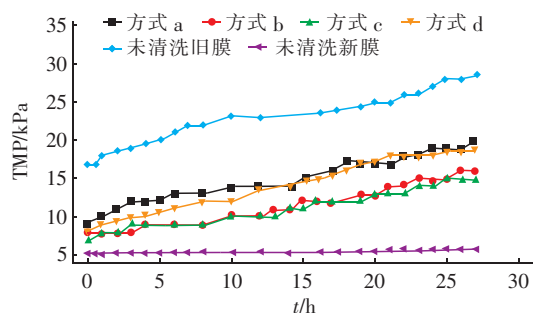


图3 膜组跨膜压差变化差异

Fig.3 Variation characteristics of TMP of membrane

从图3还可以看出,经过化学清洗的旧膜组跨膜压差最低可降至7.00 kPa,但仍低于新膜组的5.11 kPa,之后经过27 h的过滤后,跨膜压差增至17.00 kPa,表明化学清洗能够有效地缓解膜污染,但仍无法完全去除膜上的污染物,不同清洗药剂以及清洗方式对膜上的污染物洗脱效能是有差异的,需要根据膜污染物的种类和特性对清洗药剂进行优化,长期采用一种化学清洗方式可能会造成某些膜污染物的长期和大量积累,使得化学清洗后的跨膜压差恢复率持续降低。

2.1.3 运行成本差异

超滤膜不同运行阶段的运行参数见表1,可知随着运行年数的增加,膜通量逐渐降低,反洗周期逐渐缩短,以夏季为例,膜通量由第1年的 $32 \sim 37 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降至第7年的 $18 \sim 22 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,反洗周期也由360 min降至120 min。第1年仅对2个膜池进行试验性清洗,第5年进行6次/年的维护性清洗和1次/年的化学清洗,运行至第7年,清洗次数更加频繁,已经需要对运行中的超滤膜组件进行24次维护性清洗和2次化学清洗。

超滤膜不同运行阶段的运行成本见表2。第1年的运行成本为0.053 5元/ m^3 ;运行至第5年(设计年限),运行成本增加至0.081 2元/ m^3 ,按运行成

本平均增长的趋势,设计年限内运行成本费用增长率为 10.36%,其中电耗、维修费明显增加^[8];超过设计年限后运行至第 7 年时,运行成本增加至 0.106 8 元/m³,年运行成本增长率达到 23.93%,是设计年限内的 2.31 倍,其中维修费、化学清洗费、活性炭费用呈现陡增。按 5~7 年的成本增长速率计算,旧膜继续运行 5 年,总运行成本高达 2 660 万元,而设计年限内的总运行成本仅为 1 178 万元,则旧膜继续运行 5 年的总运行成本已远高于设计年限成本与更换新膜的成本(1 100 万元)之和,因此,更换新膜更为经济。

表 1 超滤膜运行参数

Tab. 1 Operation parameters of ultrafiltration membrane

项 目	第 1 年	第 5 年	第 7 年
反洗周期/min	320/360	120/150	90/120
维护洗次数/(次·a ⁻¹)		6	24
化学洗次数/(次·a ⁻¹)	—	1	2
膜通量控制/ (L·m ⁻² ·h ⁻¹)	28~32/ 32~37	18~21/ 22~26	15~18/ 18~22
注:斜杠前后分别为冬季和夏季参数;在第 1 年仅试验性地对 2 个膜池进行维护性清洗。			

表 2 运行成本估算

Tab. 2 Operation cost estimation 元·m⁻³

项 目	第 1 年	第 5 年	第 7 年
电耗	0.007	0.02	0.023
反洗水费	0.002	0.002 7	0.003 3
化学清洗费	0.000 3	0.003	0.01
维修费	0.001 7	0.013	0.02
高锰酸盐复合药剂	0.004 5	0.004 5	0.004 5
二氧化氯	0.016	0.016	0.016
活性炭	0.022	0.022	0.03
注:电价以 0.81 元/(kW·h)计;反洗水价格为 2.35 元/m ³ ;化学清洗药剂为氢氧化钠、次氯酸钠和柠檬酸;高锰酸盐复合药剂价格为 22 000 元/t;二氧化氯价格为 5 800 元/t;第 1~5 年和第 7 年的活性炭价格分别为 5 800 和 7 800 元/t。			

2.2 新旧超滤膜的污染物特性

2.2.1 有机污染物特性

对采用不同清洗方式清洗后洗脱液的 DOC、UV₂₅₄、SUVA 进行测定,结果见表 3。在相同的化学药剂洗脱液中,旧膜组的 DOC 和 UV₂₅₄ 含量均高于新膜组;就不同化学药剂的清洗效果而言,NaClO 和 NaOH 联合清洗的洗脱液中 DOC 和 UV₂₅₄ 含量最高,盐酸的洗脱液中 DOC 和 UV₂₅₄ 含量最低,因此,NaClO 和 NaOH 联合清洗的洗脱液最能表征新旧膜

组的有机污染物特性,旧膜组洗脱液的 DOC 和 UV₂₅₄ 分别为 6.47 mg/L 和 0.074 cm⁻¹,新膜组洗脱液的分别为 1.96 mg/L 和 0.032 cm⁻¹,表明长期运行的旧膜组膜污染程度明显高于新膜组,污染物更易在旧膜上累积。采用酸洗的洗脱液 SUVA 值>3 L/(mg·m),由于酸洗只能去除少量有机物,表明膜污染物中含有少量的疏水性腐殖酸;采用碱洗的洗脱液 SUVA 值<3 L/(mg·m),表明污染物中的大部分是亲水性、低分子质量的有机物。

表 3 新旧膜洗脱液成分

Tab. 3 Component of new and old membrane eluent

项 目		UV ₂₅₄ / cm ⁻¹	DOC/ (mg·L ⁻¹)	SUVA/(L· mg ⁻¹ ·m ⁻¹)
NaOH + NaClO	新膜	0.032	1.96	1.633
	旧膜	0.074	6.47	1.144
HCl	新膜	0.008	0.21	3.81
	旧膜	0.026	0.39	6.667
柠檬酸	新膜	0.013	0.35	3.714
	旧膜	0.045	0.65	6.923

新旧膜组的洗脱液 EEM 图显示,在新膜组各化学药剂洗脱液的 EEM 图中没有检测到明显的 C(腐殖酸类)、A(富里酸类)、T(色氨酸类)、B(酪氨酸类)区域的荧光响应,表明新膜未大量截留上述污染物,这些污染物可能穿过超滤膜进入到出水中,并没有造成明显的膜污染;旧膜的洗脱液中均有 C 区荧光响应值,NaOH 洗脱液的 C 区荧光响应值最高,为 997.17,且响应区域也最大,说明 NaOH 能够去除绝大部分的腐殖酸类污染物,NaOH 洗脱液最能表征超滤膜上的腐殖酸含量,且腐殖酸类物质是旧膜的主要污染物。NaClO 和 NaOH 联合清洗的洗脱液中富里酸类、色氨酸类和酪氨酸类有机污染物荧光响应值最大,分别为 489.45、514.62 和 327.92,说明 NaClO 和 NaOH 最能表征该类有机污染物的含量。综上所述,腐殖酸类、富里酸类、色氨酸类和酪氨酸类有机污染物是旧膜的主要污染物。

2.2.2 无机污染物特性

采用不同方式清洗膜组后的能谱分析结果见表 4。未清洗旧膜组内部 CaCO₃ 含量达到 64.13%,明显高于新膜组的 31.21%;旧膜组内部的铝和硅的含量分别为 0.39% 和 2.43%,而新膜组的含量分别为 0.19% 和未检测出,表明 CaCO₃、铝和硅是造成旧膜组污染的主要无机污染物。旧膜组经过化学清洗后,膜内部的氯含量增加,主要是因为化学清洗液

中的氯离子进入膜孔内部造成的; CaCO_3 的去除率最高可达到 61.78%,但对铝和硅的去除效果不显著,相对较好的去除率分别为 28.21% 和 36.63%,说明铝、硅会在长期运行的超滤膜表面附着,形成稳定的铝和有机物的络合物或是铝、硅的无机氧化物残留^[9],这些在膜上附着的污染物易与腐殖酸类和胞外聚合物中含羧酸基团的有机物形成结构致密的螯合物,从而加剧膜污染程度^[10,11]。超滤膜经过长期运行后,该螯合物易在膜丝内部被逐步压实^[12],并附着在超滤膜的膜孔内,造成膜孔孔径变小、膜透水性变差、膜通量降低、跨膜压差增加,导致超滤膜的过滤性能降低。

表4 化学清洗后膜丝内部元素含量

Tab.4 Content of elements inside membrane %

项 目	CaCO_3	SiO_2	KCl	Al_2O_3	其他
新膜	31.21	0	66.77	0.19	1.82
清洗前旧膜	64.13	2.43	32.58	0.39	0.47
清洗后旧膜	24.51 ~ 25.61	1.54 ~ 1.98	71.70 ~ 73.75	0.28 ~ 0.38	0.36 ~ 0.46

2.2.3 超滤膜丝膜孔内表面形态

图4为采用不同方式清洗后新旧膜组膜孔内表面 SEM 图,可以清晰地看到膜丝膜孔形状及污染颗粒物的堆积形态。新膜丝的膜孔层次分明,表面顺滑,可明显地看到有很多的孔口,几乎看不到污染物颗粒,这与 Saha 等人^[13]的检测结果类似;旧膜丝的膜孔之间明显有污染物附着和沉积,污染物甚至覆盖了整个膜孔,可见的膜孔数量显著减少,膜孔内部附着了大量污染物颗粒。由以上研究可知,这些污染物颗粒主要由 CaCO_3 与腐殖酸结合而成,膜丝表面被这些污染物颗粒紧密附着,导致膜通量降低。

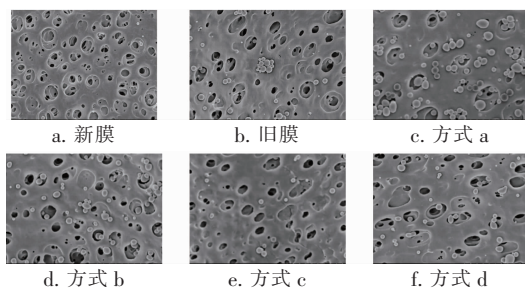


图4 膜孔内表面 SEM 图

Fig.4 SEM diagram of inner surface of membrane hole

经过化学清洗后,很多污染物颗粒从旧膜内部脱离,但可见的膜孔数量仍比新膜少,有少量的污染物颗粒覆盖在膜孔之间,说明化学清洗能够去除旧

膜上的大部分污染物颗粒,显著消除了不可逆膜污染,但仍无法完全恢复到新膜的状态。

3 结论

① 与新膜相比,长期运行的超滤膜膜通量下降速率增加了近 10 倍,跨膜压差增长速率提高了 11.49 倍,产水量减少了 21.2%,过滤周期缩短了 41.67%,运行成本增至 0.106 8 元/ m^3 ,已经不能满足经济性要求。

② 长期运行后超滤膜上的有机物含量高于短期运行的新膜,DOC 含量达到 6.47 mg/L,腐殖酸类及亲水性、低分子质量有机物是造成该膜不可逆污染的主要污染物,腐殖酸类污染物的荧光响应值达到了 997.17,富里酸类、色氨酸类和酪氨酸类也是长期运行的超滤膜截留的污染物,荧光响应值分别为 489.45、514.62 和 327.92。

③ CaCO_3 是长期运行的超滤膜的主要无机污染物,含量达到了 64.13%,比新膜高出近 33 个百分点;铝和硅也是重要的无机污染物,含量分别为 0.39% 和 2.43%;化学清洗仅分别去除了 61.78%、28.21% 和 36.63% 的 CaCO_3 、铝和硅,造成 CaCO_3 、铝和硅在超滤膜表面及内部的持续沉积和附着。

④ 经长期运行后,超滤膜表面及膜孔阻塞程度严重,膜孔内及周围沉积和附着了大量污染物颗粒;化学清洗可以显著减少附着在膜表面和膜孔内的污染物颗粒数量,但仍有少量残留,这是造成化学清洗也不能完全消除长期运行的超滤膜不可逆污染的重要原因。

参考文献:

- [1] Huang W, Wang L, Zhou W Z. Effects of combined ozone and PAC pretreatment on ultrafiltration membrane fouling control and mechanisms [J]. J Membr Sci, 2017, 533(1): 278-289.
 - [2] Shi X F, Galit T, Nicholas P, et al. Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2014, 1: 121-138.
 - [3] 杨海燕,王灿,赵焱,等. 东江水膜污染物质的确定及污染机理研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(8): 1-7.
- Yang Haiyan, Wang Can, Zhao Yan, et al. Identification of foulants and fouling mechanisms for ultrafiltration of Dongjiang River water [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(8): 1-7 (in Chinese).

- [4] Hilal N, Ogunbiyi O O, Miles N J, *et al.* Methods employed for control of fouling in MF and UF membranes: A comprehensive review [J]. *Sep Sci Technol*, 2005, 40 (10):1957-2005.
- [5] 汪琳, 胡克武, 冯兆敏, 等. 自来水厂超滤膜技术的研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2011, 31(5):107-111. Wang Lin, Hu Kewu, Feng Zhaomin, *et al.* Research progress in ultrafiltration membranes technology for waterworks[J]. *Membrane Science and Technology*, 2011, 31(5):107-111 (in Chinese).
- [6] Zhang J, Chua H C, Zhou J, *et al.* Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors[J]. *J Membr Sci*, 2006, 284(1):54-66.
- [7] Ng T C, Ng H Y. Characterisation of initial fouling in aerobic submerged membrane bioreactors in relation to physico-chemical characteristics under different flux conditions[J]. *Water Res*, 2010, 44(13):2336-2348.
- [8] 于淑花, 蔡传义, 于海宽, 等. 东营南郊超滤膜水厂五年运行效果评价[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(18):28-30. Yu Shuhua, Cai Chuanyi, Yu Haikuan, *et al.* Evaluation of five-year operation effect of Nanjiao Waterworks in Dongying [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(18):28-30 (in Chinese).
- [9] 陈益清, 李凤, 乔铁军, 等. 基于化学清洗的超滤膜污染研究[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(17):51-54. Chen Yiqing, Li Feng, Qiao Tiejun, *et al.* Research on ultrafiltration membrane fouling based on chemical cleaning[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(17):51-54 (in Chinese).
- [10] Katsoufidou K, Yianntios S G, Karabelas A J. Experimental study of ultrafiltration membrane fouling by sodium alginate and flux recovery by backwashing [J]. *J Membr Sci*, 2007, 300(1):137-146.
- [11] Costa A R, Pinho M, Elimelech M. Sugarcane juice ultrafiltration: FTIR and SEM analysis of polysaccharide fouling [J]. *J Membr Sci*, 2007, 306(1):287-297.
- [12] 李永红, 张伟, 张晓健, 等. 超滤膜的污染控制研究进展[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(2):1-4. Li Yonghong, Zhang Wei, Zhang Xiaojian, *et al.* Research progress in fouling control of ultrafiltration membrane [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(2):1-4 (in Chinese).
- [13] Saha N K, Balakrishnan M, Ulbricht M. Mechanisms of colloidal natural organic matter fouling in ultrafiltration [J]. *J Membr Sci*, 2006, 281(1):716-725.



作者简介: 连震雷(1992-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事给水处理工艺及理论研究工作。

E-mail: lianzhenlei5@163.com

收稿日期: 2018-03-22

完善水利基础设施网络
增强水安全保障能力