

# 膜生物反应器净化微污染引黄水库水效能

高伟<sup>1</sup>, 梁恒<sup>2</sup>, 韩梅<sup>1</sup>, 常海庆<sup>1</sup>, 余华荣<sup>1</sup>, 陈杰<sup>3</sup>, 李圭白<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨, hitgaowei@163.com;

2. 城市水资源开发利用(北方)国家工程研究中心, 150090 哈尔滨; 3. 苏州立升膜分离科技有限公司, 215152 江苏 苏州)

**摘要:** 为考察膜组合工艺处理微污染原水的可行性, 研究膜生物反应器(MBR)与膜粉末活性炭生物反应器(PAC-MBR)对低温低浊微污染引黄水库水的处理效果及膜污染状况. 两者对浑浊度均能保证稳定的去除效果, 去除率保持在97%以上; 对有机物去除能力依次为 PAC-MBR > MBR > 常规处理工艺 > 单独的超滤膜(UF); 单独的超滤膜对氨氮几乎没有截留作用, 挂膜后的 PAC-MBR 和 MBR 对氨氮的去除效果比较稳定, 平均去除率分别为 3.39%、65.01%. 跨膜压差(TMP)的对比研究表明, 以 PAC 为生物载体形成的活性污泥相对自然形成的活性污泥有较高的生物活性、较好的过滤特性, 对膜污染具有一定的延缓作用.

**关键词:** 膜生物反应器; 膜粉末活性炭生物反应器; 低温; 低浊; 微污染水; 膜污染

中图分类号: TU991.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)08-0031-04

## Purification of micro-polluted reservoir water from Huanghe river by membrane bioreactors

GAO Wei<sup>1</sup>, LIANG Heng<sup>2</sup>, HAN Mei<sup>1</sup>, CHANG Hai-qing<sup>1</sup>,  
YU Hua-rong<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>3</sup>, LI Gui-bai<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment(SKLWRE), Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, hitgaowei@163.com; 2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources, 150090 Harbin, China;

3. Suzhou Litree Ultra-filtration Membrane Technology Co., Ltd, 215152 Suzhou, Jiangsu, China)

**Abstract:** To investigate the feasibility of hybrid membrane process for treating micro-polluted water, the treatment of micro-polluted reservoir water from Huanghe river, which presented low turbidity and low temperature were carried out, and the submerged membrane bioreactors without(MBR) and with(PAC-MBR) powdered activated carbon(PAC) were evaluated for drinking water production, while the fouling mechanism of the two membrane were discussed too. Both of the MBR and PAC-MBR guaranteed the turbidity removal above 97%. The ability of organic substances removal were: PAC-MBR > MBR > conventional process > ultra-filtration (UF) alone. No effect of UF alone on NH<sub>3</sub>-N removal was observed, while PAC-MBR and MBR gave an average removal rate of 73.39% and 65.01%, respectively. By comparing the trans-membrane pressure (TMP) trend of two bioreactors, it could be concluded that activated sludge, with PAC as a carrier, showed higher activity and better filterability than the activated sludge naturally formed, and PAC-MBR appeared a slower membrane fouling.

**Key words:** MBR; PAC-MBR; low temperature; low turbidity; micro-polluted water; membrane fouling

收稿日期: 2010-04-20.

基金项目: 国家科技重大专项“水专项”资助项目(2008ZX07422-005); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金青年科技创新人才项目(2009RFQXS010).

作者简介: 高伟(1984—), 男, 博士研究生;

李圭白(1931—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

微污染原水中的有机物和氨氮是饮用水处理中的一个技术难点, 通常采用的方法是预氧化, 这样增加了氧化剂(如氯)的投加量, 同时提高了三卤甲烷及其他消毒副产物的生成势. 生物处理被认为是应对有机物、氨氮污染的有效方法. 但传统

生物处理法存在泥水分离不彻底、污泥产量大等缺点.超滤膜本身作为第三代水处理工艺<sup>[1]</sup>,其筛分截留机理无法有效去除水源水中的有机物、氨氮<sup>[2]</sup>.浸没式膜生物反应器(submerged membrane bioreactor, MBR)自20世纪90年代开始受到关注<sup>[3-4]</sup>,是基于活性污泥法与膜分离技术的一项处理微污染原水的新技术<sup>[5]</sup>.MBR利用膜对活性污泥的完全截留作用,保证了出水水质,同时可以在低水力停留时间下保持较高的污泥停留时间,能够获得较高的生物量.通过在稳定运行的MBR中投加粉末活性炭(PAC),可以有效地提高MBR对有机物的去除效果<sup>[6-7]</sup>,改善过滤液的过滤性能,从而延缓MBR中的膜污染<sup>[7-8]</sup>,但PAC作为主生物载体(启动初期一次性投入定量PAC),对膜生物反应器性能的影响未见报道.

本实验通过对比研究,以常规工艺出水、单独的超滤膜出水作为参照,以低温低浊微污染水库水为处理对象,分析了PAC-MBR与MBR对有机物、氨氮的去除能力,及PAC对膜生物反应器内生物活性、过滤液的过滤性能的影响.

## 1 实 验

### 1.1 实验装置

实验装置工艺流程如图1所示.膜组件采用中空纤维膜,材质为改性PVC膜,外径为1.45 mm,截留分子量为10万u,膜面积为0.05 m<sup>2</sup>,浸没于反应器内.

实验运行3套完全相同的装置:其中1号为MBR,由运行开始到结束未投入任何水处理药

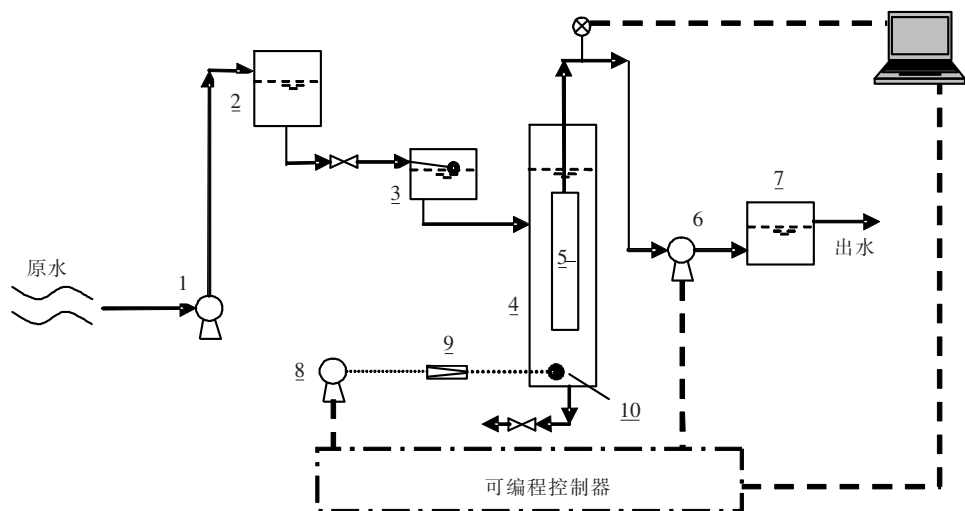
剂,且从未进行排泥;2号为PAC-MBR,在运行初期一次性投入PAC 0.5 g/L(分析纯),未进行排泥;3号实验装置为空白实验,即在MBR和PAC-MBR取样当天,提前运行3号(直接进原水)1 h,运行方式与1号、2号一致,取稳定1 h后的进、出水进行水质指标测定,并在每次取样后放空反应器内混合液,取出超滤膜组件进行水力冲洗或化学清洗使其恢复至初始状态.3套装置进水完全相同,实验通量为10 L/(m<sup>2</sup>·h),运行方式:抽吸8 min,停3 min,在停止3 min内的最后10 s进行反冲洗,反冲洗流量20 L/(m<sup>2</sup>·h),并进行连续曝气,曝气强度为20 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)(以膜池有效面积计),水力停留时间为40 min,在实验运行中未进行排泥.

### 1.2 原水水质

实验原水采用黄河下游某引黄水库水,在冬季进行.该水质呈现出低温低浊且微污染的特性,水质具体参数如下:水温4~8℃,浊浊度2.87~7.79 NTU,TOC 2.95~3.64 mg/L,氨氮0.15~0.34 mg/L,UV<sub>254</sub> 0.081~0.094, pH值7.89~8.45.3套装置实验用水与常规工艺进水水质完全一致.

### 1.3 分析项目及方法

浊浊度采用哈希2100浊浊度仪测定;总有机炭采用德国Liquid TOC仪测定;UV<sub>254</sub>采用北京普析通用仪器公司产的TU-1810紫外可见分光光度计测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法,依据国家标准方法(GB5749-2006);pH值采用HANNA pH211酸度计测定.



1—原水泵;2—高位水箱;3—恒位水箱;4—超滤膜反应池;5—超滤膜组件;6—抽吸(反洗)泵;7—产(反洗)水箱;8—鼓风机;9—气体流量计;10—空气扩散器.

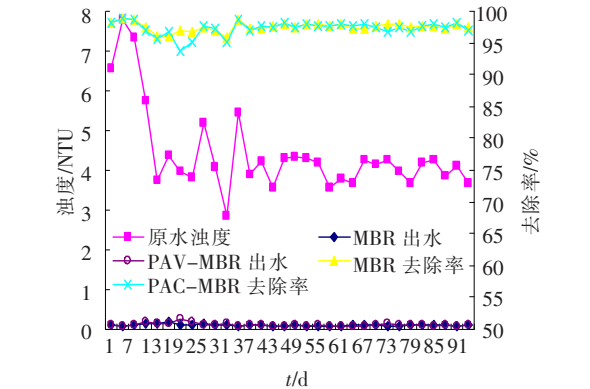
图1 实验装置示意图

2 结果与讨论

2.1 颗粒物去除效果比较

浑浊度是饮用水水质的重要指标之一,能够反应水中部分颗粒物和胶体物质. 浑浊度的去除代表水中泥土、微细有机物、无机物、浮游生物等悬浮物和胶体物质的减少. 有研究表明,控制浑浊度在 0.3 NTU 以下时,隐孢子虫和贾第虫含量均可以控制在检测限以下<sup>[9]</sup>. 随着饮用水水质标准的进一步提高,对浑浊度的控制也越来越严格.

常规工艺中,常常会出现因为混凝效果不好、滤池穿透等原因造成出水浑浊度不达标的现象. 尤其是低温低浊期,混凝效果难以控制. 如图 2 所示,在低温低浊期,无论原水浑浊度如何波动,单独的超滤膜系统、MBR 和 PAC-MBR 从挂膜启动期到整个稳定运行期,出水浑浊度均维持在 0.2 NTU 以下,去除率保持在 97% 以上. 表明超滤膜工艺对水中颗粒物和胶体物质的物理筛分作用机理完全可以保障出水浑浊度,且对浑浊度的去除与膜池内混合液性质无关. 而常规工艺出水最低仅能达到 0.3 NTU,且受原水波动较大,不能完全保证出水浑浊度.



水力停留时间:40 min;温度:4~8℃;零排泥.

图 2 MBR 和 PAC-MBR 对浑浊度的去除效果

2.2 有机物去除效果比较

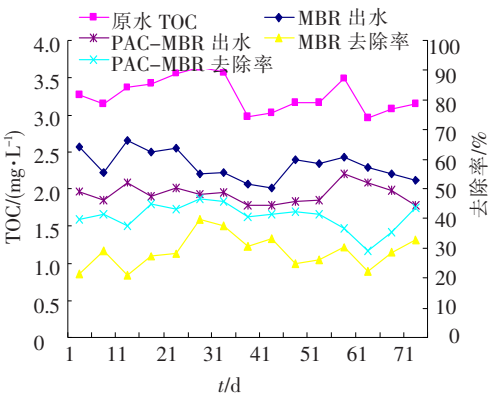
水中的有机物主要以颗粒状、胶体状和全溶液状 3 种形式存在. 水中有机物不仅是消毒副产物的前驱物,也是造成色度、臭味的重要原因.

常规工艺中,有机物的去除常常依靠化学药剂的氧化作用;超滤膜本身对大分子有机物具有一定的截留作用,但其去除效果依赖于原水中有机物的性质;膜生物反应器则是利用生物降解的作用实现对有机物的去除.

总有机炭(TOC)代表水体中含有碳元素的有机物,常用来概指水体中天然有机物的质量浓度;UV<sub>254</sub>则代表水体中含有羧酸基和羟基等带负电

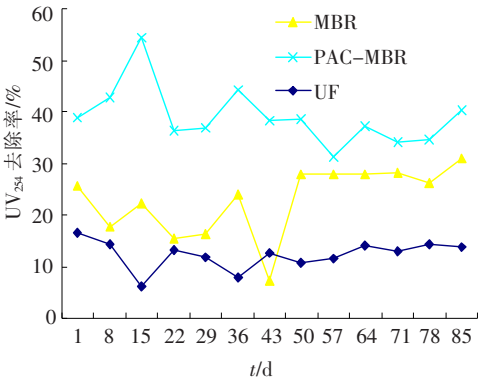
官能团的一类或多类有机物.

常规工艺通过化学混凝、平流沉淀、砂滤、消毒过程对 TOC 的平均去除率为 27.32%;单独的超滤膜系统只能依靠膜筛分作用实现对有机物的去除作用,其对 TOC 与 UV<sub>254</sub> 平均去除率分别为 20.25%、12.33%. 由图 3、4 可知,PAC-MBR 对 TOC、UV<sub>254</sub> 平均去除率分别为 40.63%、39.08%,而 MBR 的平均去除率为 28.89%、22.91%. 因此,对有机物的去除能力依次为:PAC-MBR > MBR > 常规处理工艺 > 独立的超滤膜(UF).



HRT:40 min;温度:4~8℃;零排泥.

图 3 MBR 和 PAC-MBR 对 TOC 的去除效果



水力停留时间:40 min;温度:4~8℃;零排泥.

图 4 MBR 和 PAC-MBR 对 UV<sub>254</sub> 的去除效果

自启动开始,PAC-MBR 与 MBR 均未进行排泥,保持了较高的活性污泥浓度及生物活性,稳定运行期间,通过微生物对水体中有机物的降解能力及超滤膜对活性污泥的完全截留作用,使得两种膜生物反应器对有机物的去除效果优于常规处理工艺和 UF. 膜生物反应器运行中,不添加任何水处理药剂,是应对微污染原水的一种有效、绿色措施.

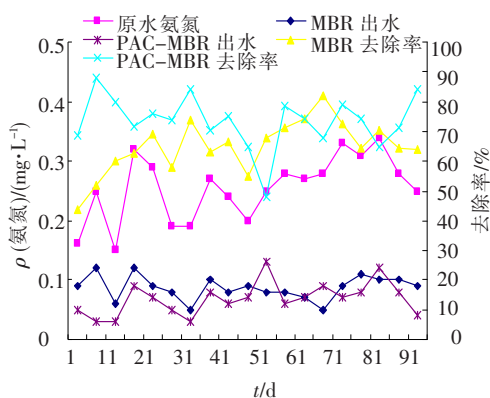
PAC-MBR 中的活性污泥以 PAC 为主体,较大的 PAC 比表面积为微生物的附着提供了基础;而 MBR 中,活性污泥中微生物的载体为原水中的固体或胶体物质,比表面积较小,微生物生长空间

较小. 因此对于 TOC、 $UV_{254}$ , PAC-MBR 都表现出了相对于 MBR 较强的生物降解能力.

### 2.3 氨氮去除效果比较

图5表明, PAC-MBR 和 MBR 对氨氮的平均去除率分别为 73.39%、65.01%, 而单独的超滤膜实验表明, 超滤膜本身对氨氮并无截留作用, 常规工艺出水中氨氮浓度虽低, 平均值为 0.05 mg/L, 但通常以加氯来完成, 而氨氮与氯反应生成的氯胺类物质却对人体有害.

分析认为, PAC-MBR 和 MBR 中氨氮的去除主要依靠硝化细菌的硝化作用. 除上述所讲的高浓度微生物的积累因素外, 笔者认为 PAC-MBR 与 MBR 能够高效去除氨氮的因素还有如下两个方面: 有机物的生物降解作用本身属于放热反应, 在高浓度硝化细菌存在的前提下, 活性污泥内部依然能够保持相对进水较高的温度, 硝化细菌的活性虽受抑制, 但其活性要比传统活性污泥法高 10~15 倍<sup>[10]</sup>; 硝化细菌本身为自养型微生物, 不受原水中有有机物质量浓度低的影响, 且膜生物反应器均在低温水中自然启动, 低温菌应该是优势菌群.



水力停留时间: 40 min; 温度: 4~8℃; 零排泥.

图5 MBR 和 PAC-MBR 对氨氮的去除效果

### 2.4 PAC 对过滤液性质的影响

PAC-MBR 与 MBR 两套反应器同时启动, 前者达到对有机物、氨氮稳定去除的时间为 20 d 以后, 而后者则用了 30 d. 稳定运行后, 对两组膜均进行了水力清洗及化学清洗至最初状态, 然后用清水浸泡 24 h 以上(中间换水 4 次), 保证膜组件上化学药剂的脱落, 避免其对微生物的影响. 随后, 将膜丝放入反应器混合液中, 进行稳定期的实验研究.

膜生物反应器中的混合悬浮液主要由微生物絮凝物组成(有载体的包括载体在内), 由于膜生物反应器中的微生物均处于高度内源呼吸相, 其

代谢产物如胞外聚合物、溶解性微生物代谢产物等胶体物质或溶解性大分子仅占相当少的分量.

如图6所示, 稳定运行过程中, 压力处于缓慢增加状态; 直至设定值 60 kPa, 跨膜压差(TMP)增长速度均比较缓慢. 形成此现象的原因为: 首先浓差极化现象引起细菌絮凝物、胶体和溶解性物质在膜表面富集, 此过程中, 有极少数溶解性物质吸附在膜表面或孔道内和悬浮物沉积在膜表面, 但大部分悬浮物被曝气所形成的剪切力与惯性提升力带走; 随后微生物絮凝污泥逐渐在膜表面沉积形成了滤饼层. 所以, 会出现图6中整个周期内 TMP 增长速率不匀的现象.

但在整个运行期间, PAC-MBR 的压力均低于 MBR 的跨膜压差, 且对于设定的膜清洗值 60 kPa, PAC-MBR 运行时间明显长于 MBR 的 73~75 h, 可达 90~93 h. 分析认为, 以活性炭为生物载体形成的活性污泥, 能够截留更多的胶体物质、溶解性有机物, 减少进入膜孔内壁或吸附在膜表面有机物的量, 这一点也进一步验证了 PAC-MBR 对有机物的去除效果优于 MBR 的现象.

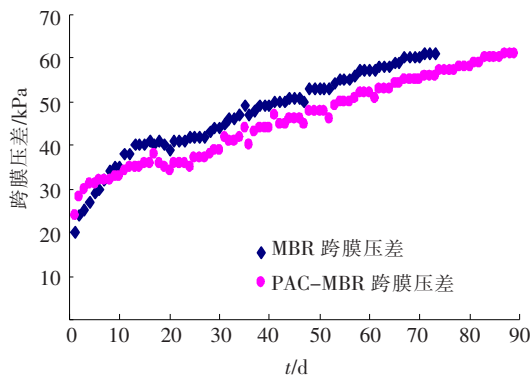


图6 达到设定压力限值(60 kPa)前 MBR 和 PAC-MBR 内 TMP 变化

## 3 结 论

1) 超滤膜对水中颗粒数有极强的截留作用, 能够有效地控制出水浑浊度, 且不受原水水质浑浊度波动的影响, 平均值远低于常规工艺的出水值.

2) 超滤膜本身对有机物的截留率较低, PAC-MBR 和 MBR 通过生物降解作用对 TOC 的平均去除率分别为 40.63%、28.89%; 对  $UV_{254}$  的平均去除率分别为 39.08%、22.91%; 对氨氮的平均去除率为 73.39%、65.01%; 其去除效果均优于常规工艺及单独的超滤膜系统, 是一种有效的绿色水处理工艺.

(下转第 93 页)