膜-生物反应器运行条件对膜过滤特性的影响*

桂 萍 黄 霞 陈 颖 文湘华 钱 易

(清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084 E-mail: shc-den@mail.tsinghua.edu.cn)

摘要 试验采用膜抽吸压力的上升速率表征运行过程中膜过滤性能的变化. 正交试验结果表明, 缩短抽吸时间或延长暂停时间和增加曝气量均有利于减缓膜污染, 但过短的抽吸时间、过长的暂停时间和过大曝气量不能进一步地减轻膜污染, 因此应在保证一定产水量的前提下确定适宜的抽、停时间和曝气量. 在污泥龄 40d, 污泥浓度稳定在 5g/L 左右的条件下, 最佳组合操作条件为抽吸 10min, 停抽 5min, 曝气量 4m³/h. 3 个因素中抽吸时间对膜抽吸压力上升速率的影响最大, 曝气量其次, 停抽时间影响最小.

关键词 膜-生物反应器, 膜过滤, 运行条件, 膜污染, 抽吸时间, 停抽时间, 曝气量.

Influence of the Operation Parameters on Membrane Filtration*

Gui Ping Huang Xia Chen Ying Wen Xianghua Qian Yi

(State Key Lab of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: shc-den@mail.tsinghua.eud.cn)

Abstract The increasing rate of suction pressure of membrane was used to evaluate the membrane filtration characteristics of membrane bioreactor process. Through a group of test by means of orthogonal table, influence of suction time, suction suspended time and aeration rate on membrane filtration was investigated. Shorter suction time, longer suction suspended time and larger aeration rate could alleviate membrane fouling, which influenced accumulation and back transportation of pollutants on and from membrane surface. The optimum operation parameters were 10 minutes of suction time, 5 minutes of suction suspended time and aeration rate of 4m³/h under the condition of SRT = 40d and MLSS = 5g/L. Suction time was the key factor among these three factors, and suction suspended time had the least impact on membrane fouling.

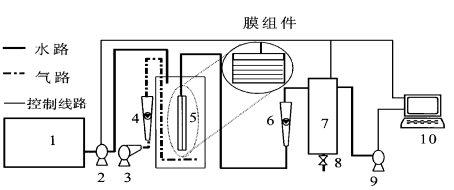
Keywords membrane bioreactor, membrane filtration, operation parameters, membrane fouling, suction time, suction suspended time, aeration rate.

膜-生物反应器是一种新型、高效污水回用工艺[1~5]. 但是, 由于膜在运行过程中容易受到污染, 造成膜通量下降, 甚至造成膜无法继续使用[6, 7], 致使膜-生物反应器处理水量有限, 阻碍了其在实际中的广泛应用. 操作运行条件是影响膜过滤及污染的重要因素[8~10]. 本文针对一体式中空纤维膜-生物反应器负压抽吸、间歇运行以及反应器紊流的特点, 选取影响反应器流态的曝气量及影响膜污染积累的膜抽吸与停抽时间为变量, 采用正交试验, 考察了各因素对膜过滤特性的影响, 并分析了试验结果.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验装置的工艺流程如图 1 所示.



1. 配水箱 2. 进水泵 3. 曝气泵 4. 气体流量计
5. 膜组件 6. 出水流量计 7. 真空罐 8. 出水阀
9. 真空泵 10. HP 75000 工控机

图 1 试验装置工艺流程

* 国家自然科学基金资助项目(Project Supported by National Natural Science Foundation of China): 59478019
桂萍: 女, 27 岁, 博士生
收稿日期: 1998-09-09

(1) 进水管路系统 由0.5mm 滤网、进水箱、进水蠕动泵组成. 原水先经0.5mm 滤网除去其中对膜过滤及活性污泥有影响的粗大颗粒后进入水箱. 再由蠕动泵送入生物反应器.

(2) 生物反应器 采用完全混合式活性污泥反应器, 尺寸为: 850mm × 100mm × 1100mm. 反应器由隔板分成容积相等并且相通的2个部分. 隔板的一侧设有穿孔曝气管, 其正上方装有中空纤维膜组件. 通过曝气管的曝气可以使反应器中的活性污泥混合液维持一定循环流动速度, 形成对膜表面的冲刷作用, 同时供给微生物分解有机物所需的氧气. 试验中采用的膜组件为日本三菱公司生产的聚乙烯中空纤维膜. 膜组件形状为板状, 长0.8m, 宽0.5m, 膜孔径为0.1μm, 中空纤维膜外径0.42mm, 内径0.27mm, 膜面积为4m^2. 反应器中的水位通过液位计控制进水泵的启停来保持恒定.

(3) 出水管路系统 出水由自动控制系统控制. 系统包括HP 75000 控制器、真空罐、真空泵、出水阀和放气阀. 系统采用间歇抽吸的方式出水.

1.2 试验方法

(1) 膜-生物反应器的运行 试验用水采用清华大学北区泵站的生活污水, 其水质类似于典型的城市污水. 在生物反应器污泥龄40d 条件下, 系统运行80d 基本达稳定后, 进行了运行操作条件对膜过滤影响的正交试验. 在正交试验阶段, 生物反应器污泥浓度为5g/L 左右.

(2) 正交试验 以曝气量、膜的抽吸时间及停抽时间为试验因素, 设计了3因素、3水平的正交试验, 详见表1. 每一条件下, 膜-生物反应器运行2～4d, 监测了膜抽吸压力的时间变化.

2 试验结果及讨论

2.1 膜过滤特性的表征方法

由过滤理论可知:

$$J = \Delta p / (\mu R) \quad (1)$$

式中, J: 膜通量(L/(m^2 · h)), Δp: 膜抽吸压力(kPa), μ: 粘度(Pa · s), R: 过滤阻力(m^{-1}).

试验中膜通量恒定在5L/(m^2 · h). 在运行过程中, 随着污染物在膜表面的积累, 膜过滤阻力发生变化, 膜抽吸压力也会随之自动增加. 因此, 通过监测试验过程中膜抽吸压力时间的变化就可以了解膜过滤阻力, 即膜过滤特性的变化情况. 当改变运行条件时, 如果其对膜过滤的影响不同, 膜抽吸压力上升速率也将不同. 因此可用某一运行期间膜抽吸压力的平均上升速率来反映该运行条件对膜过滤的影响. 为避免改变运行状态后系统的控制程序造成的抽吸压力波动的影响, 每组试验结果均以过滤压力数据波动低于一定值后的计算结果为准.

表1 正交试验方案

试验序号	抽吸时间/min	停抽时间/min	曝气量/$m^3 \cdot h^{-1}$
1	13	8	6
2	13	5	4
3	13	2	2
4	10	8	4
5	10	5	2
6	10	2	6
7	8	8	2
8	8	5	6
9	8	2	4

2.2 正交试验结果

在表1设计的正交试验条件下, 测得每一条件下膜抽吸压力的上升情况, 并计算了相应的膜抽吸压力上升速率, 如表2所示.

表2 各操作条件下的膜抽吸压力上升速率

实验序号	抽吸时间/min	停抽时间/min	曝气量/$m^3 \cdot h^{-1}$	膜抽吸压力增长率/kPa · d^{-1}
1	13	8	6	1.497
2	13	5	4	1.490
3	13	2	2	2.685
4	10	8	4	0.452
5	10	5	2	0.913
6	10	2	6	0.790
7	8	8	2	1.172
8	8	5	6	0.703
9	8	2	4	0.746

对于每一个变化因素, 其余因素对试验的影响基本相同或接近. 因此, 可认为各因素在每一水平下膜抽吸压力上升速率的平均值则可以反映该因素本身对膜过滤特性的影响.

(1) 抽吸时间的影响 对抽吸时间为8min、10min 和13min 的3次试验所得的抽吸压力上升速率之和求平均, 得抽吸压力上升速率和抽吸时间的关系(见图2).

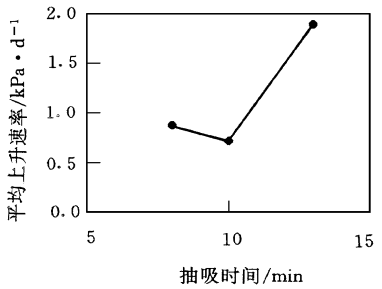


图 2 抽吸时间对膜抽吸压力平均上升速率的影响

由图 2 可知, 抽吸时间为 5min 和 8min 时的膜抽吸压力平均上升速率非常接近, 而抽吸时间 13min 时的膜抽吸压力上升快得多. 说明抽吸时间不能超过一定的范围, 否则会造成膜的快速污染和过滤阻力的急剧上升.

(2) 停抽时间的影响 停抽时间为 2min、5min 和 8min 时, 每一条件下膜抽吸压力上升平均速率与停抽时间之间的关系见图 3.

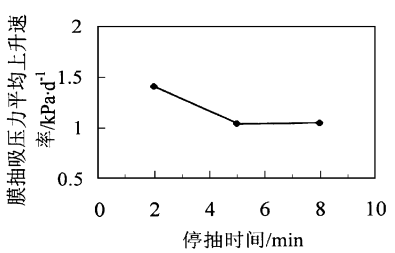


图 3 停抽时间对膜抽吸压力平均上升速率的影响

当停抽时间为 5min 和 8min 时, 膜抽吸压力上升速率非常接近, 而当停抽时间只有 2min 时, 膜抽吸压力上升速率比前 2 者有较大的增长. 这说明在一定范围内, 延长停抽时间有利于污染物质脱离膜表面. 但停抽时间增长到一定程度后, 效果会变得不显著.

(3) 曝气量的影响 影响见图 4. 从结果看, 曝气量为 $2m^3/h$ 时, 膜抽吸压力平均上升速率为 1.59kPa/d; 当曝气量增加到 $4m^3/h$ 时, 膜抽吸压力上升速率减小到原来的一半; 当曝气量增至 $6m^3/h$ 时, 膜抽吸压力上升速率略有上升. 这说明, 曝气量的增加加快了反应器内混合液的循环速率, 使污染物不容易在膜表面积累, 而且可以加速污染物从膜表面的脱离. 但曝气量进一步增加时, 效果变得不明显. 而且, 曝气量过大可能会导致混合液粒径减小, 影响膜过滤, 从而使膜抽吸压力上升速率有所增加.

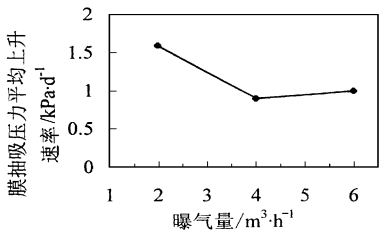


图 4 曝气量对膜抽吸压力平均上升速率的影响

(4) 试验因素的主次关系及最佳组合条件的确定 根据不同水平试验的结果的最大值与最小值的差, 也就是极差来判断因素的主次. 由试验结果得到各因素的极差如表 3 所示.

表 3 各试验因素的极差

试验因素	抽吸时间/min	停抽时间/min	曝气量/$m^3 \cdot h^{-1}$
极差	1.173	0.367	0.694

从表 3 可以看出, 3 种因素对膜抽吸压力上升速率影响程度的大小排序为: 抽吸时间> 曝气量> 暂停时间.

综合考虑产水量的大小和膜运行的长期稳定性, 得到最佳组合条件: 抽吸时间 10min, 停抽时间 5min, 曝气量 $4m^3/h$.

2.3 讨论

生物反应器中的混合液成分一般可以分成悬浮固体和溶解性有机物 2 大类. 悬浮固体对膜面的污染主要与其在膜面的沉积和脱离过程有关. 本试验采用间歇抽吸的方式运行. 反应器混合液不断通过膜过滤形成过滤液. 此时存在一个从反应器指向膜面的流速 v_f, 使混合液中的悬浮固体向膜表面运动, 并在膜表面沉积. 另一方面, 由于曝气在膜表面造成剪切力的作用, 也存在一个使沉积污泥从膜面脱落下来的脱离速度 v_b(如图 5 所示)。当 v_f 大于 v_b 时将会产生悬浮固体在膜表面的沉积; 当 v_f 小于或等于 v_b 时, 混合液中的悬浮固体不会沉积在膜表面, 同时沉积在膜面的污泥也会从膜面脱落下来[11]. 采用间歇抽吸的操作模式旨在通过定期地停止膜过滤, 使 $v_f=0$, 以便沉积在膜面上的污泥在 v_b 的作用下从膜面上脱落下来, 使膜的过滤性能得以恢复.

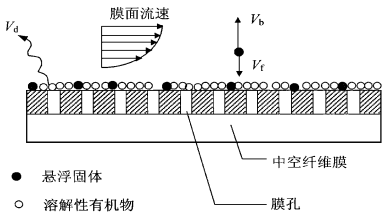


图 5 膜污染过程示意图

抽吸过程越长, 悬浮固体在膜表面的积累程度越大; 停抽时间越长, 膜表面沉积污泥脱落越大, 膜过滤性能的恢复也就越多. 抽吸时的沉积和停抽时的脱落是影响悬浮固体对膜面污染的 2 个重要环节. 曝气量由于影响混合液在膜面的循环剪切力的大小, 其越大, 无论是抽吸过程还是停抽过程都将有利于悬浮物从膜面的脱落, 以减缓悬浮固体在膜面的污染.

在膜的抽吸过滤过程中, 混合液中溶解性有机物由于膜的截留作用, 会在膜的表面沉积、浓缩, 就是所谓的浓差极化现象, 发生在任何过滤条件下[10]. 在停抽过程中, 由于扩散作用, 膜表面沉积的有机物也会脱离膜表面向反应器内扩散, 扩散的速度为 v_d. 溶解性有机物的沉积程度与抽吸时间有关, 而从膜面的脱落程度与曝气量和停抽时间有关.

综上所述, 减短抽吸时间, 延长停抽时间, 适当增大曝气量有利于减缓悬浮固体和溶解性有机物在膜面的沉积和污染.

悬浮固体脱离膜表面的速率较快, 而溶解性有机物的脱离则由有机物在水中的扩散系数决定, 是一个更加缓慢的过程. 因此当停抽达到一定时间后, 停抽时间对膜过滤阻力的影响减小. 同样, 当抽吸时间低于一定程度后, 悬浮固体形成的污染会很快得到恢复, 此时膜污染的恢复主要取决于与溶解性有机物有关的污染的恢复, 即抽吸时间的缩短对膜抽吸压力上升速率的影响不再明显. 与停抽时间相比, 抽吸时间是影响膜抽吸压力上升的更重要的因素. 在一定范围内, 缩短抽吸时间会比延长暂停时间更能有效地减缓膜污染.

同样, 在一定范围内, 增加曝气量会使膜抽吸压力上升速率减小, 但曝气量增加到一定程度, 这种改善作用就不再明显了. 因此, 从经济的因素来讲, 曝气量以满足恢复膜污染的最小值为妥.

3 结论

(1) 采用膜抽吸压力的上升速率可以表征在运行过程中膜过滤阻力, 即膜过滤性能的变化情况.

(2) 缩短抽吸时间或延长暂停时间和增加曝气量均有利于减缓膜污染, 但过短的抽吸时间、过长的暂停时间和过大曝气量不能进一步地减轻膜污染, 因此应在保证一定产水量的前提下确定适宜的抽、停时间和曝气量.

(3) 在本试验条件下最佳组合操作条件为抽吸 10min, 停抽 5min, 曝气量 $4m^3/h$. 曝气量、抽吸时间及停抽时间对膜抽吸压力上升速率的影响大小为: 抽吸时间> 曝气量> 停抽时间.

参 考 文 献

1 Trouve E, Urbainand V, Manem J. Treatment of municipal wastewater by a membrane pilotscale study. Wat. Sci. Tech., 1994, **30**(4): 151～157
2 Ronald Z et al. Membrane bioreactor treatment of oily wastes from a metal transformation mill. Wat. Sci. Tech., 1994, **30**(9): 21
3 黄霞, 桂萍等. 膜生物反应器废水处理工艺的研究进展. 环境科学研究, 1998, **11**(1): 40
4 桂萍等. 膜-复合式生物反应器组合系统操作条件及稳定运行特性. 环境科学, 1998, **19**(2): 35～38
5 刘锐等. 影响一体式好氧膜生物反应器清洗周期的几个因素. 环境科学, 1998, **19**(4): 26～28
6 刘昌胜等. 膜的污染及其清洗. 膜科学与技术, 1996, **16**(2): 25
7 黄策等. 微孔滤膜及其应用. 上海: 上海科技文献出版社, 1986
8 Yasutoshi Shimizu et al. Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment. Wat. Res., 1996, **30**(10): 2385
9 Tatsuki Ueda et al. Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor. Wat. Res., 1997, **31**(3): 489
10 Yasutoshi S et al. Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment. Wat. Res., 1996, **30**(10): 2385～2392
11 高以恒等. 膜分离技术基础. 北京: 科学出版社, 1989. 16