

曹效鑫,魏春海,黄 霞. 投加粉末活性炭对一体式膜-生物反应器膜污染的影响研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25 (11) :1443 - 1447

CAO Xiaoxin, WEI Chunhai, HUANG Xia. Study on effect of powdered activated carbon on the fouling in a submerged membrane bioreactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25 (11) :1443 - 1447

[免审稿件]责任编辑提示:本刊欢迎广大读者针对免审稿件提出各种意见

投加粉末活性炭对一体式膜-生物反应器膜污染的影响研究

曹效鑫,魏春海,黄 霞*

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

收稿日期:2005-05-16 修回日期:2005-07-28 录用日期:2005-08-04

摘要:通过试验考察了粉末活性炭(PAC)对一体式膜-生物反应器中膜污染的影响.在2种类型的污泥(膨胀污泥和非膨胀)中,投加适量PAC可以减轻膜污染,表现为临界膜通量的提高和连续运行中膜污染增长速率的降低.当污泥性质和浓度不同时,最佳PAC投加范围亦不同.PAC投加量过大会引起临界通量下降.PAC的投加显著降低了混合液中溶解性物质的浓度,减轻了溶解性物质的吸附和膜孔堵塞污染,并改善了絮体结构.污泥比阻与污泥混合液膜过滤性能之间有很好的相关性,可作为污泥混合液膜过滤性能的快速评价指标.

关键词:一体式膜-生物反应器;膜污染;粉末活性炭;临界通量;污泥比阻

文章编号:0253-2468(2005)11-1443-05 中图分类号:X703.3,X703.5 文献标识码:A

Study on effect of powdered activated carbon on the fouling in a submerged membrane bioreactor

CAO Xiaoxin, WEI Chunhai, HUANG Xia*

Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Received 16 May 2005; received in revised form 28 July 2005; accepted 04 August 2005

Abstract: The effect of powdered activated carbon (PAC) on the fouling in a submerged membrane bioreactor was investigated. For the two kinds of activated sludge (bulking sludge and non-bulking sludge), the addition of PAC could alleviate membrane fouling, as the increased critical flux and reduced transmembrane pressure (TMP) during long-term run. The optimal PAC dose was different upon sludge characteristics and concentration, however, overdosed PAC led to a decrease of critical flux. The addition of PAC remarkably reduced the amount of solutes, which caused membrane fouling by adsorbing to the membrane or plugging the pores, as well as improve the sludge floc structure. The specific resistance to filtration (SRF) of sludge was found to have a good correlation with membrane filterability of mixed liquor. SRF can be used as a convenient index for measurement of membrane filterability.

Key words: submerged membrane bioreactor; fouling; PAC; critical flux; specific resistance to filtration

膜污染是制约膜-生物反应器(Membrane bioreactor, MBR)在污水处理及回用中推广应用的主要因素之一,有关MBR中膜污染的机理、影响因素及控制措施是当前研究的热点.通过向MBR内投加具有某种功能的载体来改善混合液性质,从而减轻膜污染,是控制膜污染的有效方法之一.

粉末活性炭(Powered activated carbon, PAC)作为

吸附剂,被广泛应用于给水和废水处理中. Jae-Seok Kim(2003)、罗虹(2002)、李耀中(2004)等研究了投加PAC对MBR中膜过滤特性的影响,发现PAC可延缓膜过滤压力的增加,提高通量.同时他们考察了PAC投加前后膜过滤阻力的变化,认为投加PAC减少了污泥层污染的阻力,同时降低了胞外多聚物(Extracellular polymeric substance, EPS)的浓度.但对

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(No. 2002AA601220)

作者简介:曹效鑫(1983—),男,博士研究生, E-mail: caoxiaoxin@tsinghua.org.cn; * 通讯作者(责任作者)

Foundation item: National 863 High Tech Research Program of China (No. 2002AA601220)

Biography: CAO Xiaoxin (1983—), male, Ph. D. candidate, E-mail: caoxiaoxin@tsinghua.org.cn; * Corresponding author

于不同性质的污泥, PAC 投加量在什么范围内合适, 能在多大程度上减轻膜污染, 其作用机理如何, 尚有待于进一步深入研究。

本研究选择了 2 种不同性质的污泥(非膨胀污泥和膨胀污泥)开展试验, 首先通过临界通量测定试验考察了不同 PAC 投加量对膜污染的影响, 在优化 PAC 投加量的基础上进行了投加 PAC 与未投加 PAC 的连续运行对比试验, 进一步考察了 PAC 对膜污染的控制效果. 结合污泥混合液性质的分析探讨了 PAC 在 MBR 中的作用机理, 并提出了一种评价污泥混合液膜过滤性能指标。

1 试验装置和方法(Materials and methods)

1.1 试验装置

构建了 2 套完全相同的一体式 MBR, 如图 1 所示. 反应器由有机玻璃制成, 有效容积 19 L. 原水从反应器顶部进入, 经过生物降解和活性炭作用后, 在负压下由膜组件过滤出水. 进水泵的开闭由液位计自动控制. 出水泵是一个可任意调节级数的计量泵, 出水流量可通过调节级数保持恒定. 膜材料采用孔径为 $0.4 \mu\text{m}$ 的中空纤维微滤膜(日本三菱公司制造), 过滤面积为 0.2 m^2 . 膜污染发展过程由膜过滤压差(Transmembrane pressure, TMP)的上升来表征。

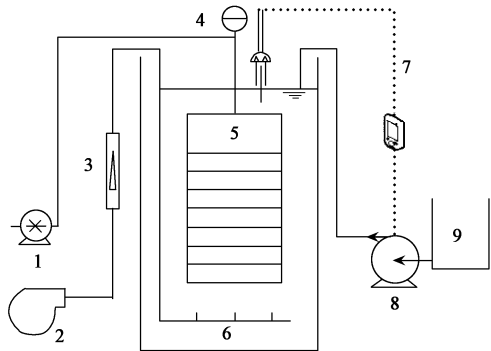


图1 试验装置示意图(1. 出水抽吸泵, 2. 空压机, 3. 气体流量计, 4. U形测压计, 5. 膜组件, 6. 穿孔曝气管, 7. 液位计, 8. 进水泵, 9. 原水箱)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up (1. Suction pump, 2. Air compressor, 3. Air rotameter, 4. Vacuum meter, 5. Membrane module, 6. Aerater, 7. Level transmitter, 8. Feed pump, 9. Raw water tank)

1.2 污泥样品

试验用活性污泥取自位于北京清河污水处理厂中试 MBR 装置的污泥. 由于膜污染发展速率与被过滤的污泥性状有关, 因此, 为考察在不同性状活性污

泥条件下投加 PAC 对膜污染的控制效果, 试验中选取了 2 种有较强代表性的污泥, 一种是正常运行时的非膨胀污泥, 比阻较低, 为 $0.24 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; 另一种是丝状菌膨胀下的污泥, 比阻较高, 为 $1.58 \times 10^9 \text{ s}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

1.3 试验方法与条件

将上述一定浓度的活性污泥置入图 1 所示的一组小试 MBR 中, 投加不同量的 PAC, 进行膜过滤试验. 另一组不投加 PAC, 进行平行对照试验. 在整个运行周期内除 PAC 投加量不同外, 其它运行条件均保持一致(装置供气量为 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 水力停留时间约为 10 h, 试验周期内不排泥)。

为保证进水稳定, 试验原水为模拟生活污水的人工配水。

1.4 分析项目与方法

MLSS 按照《水和废水监测分析方法》规定方法测定. 污泥比阻的测定采用标准过滤法(Sorensen *et al.*, 1995). 污泥和 PAC 粒径分布采用激光衍射法 Malvern Sizermaster 测定。

污泥混合液中胞外多聚物(EPS)采用甲醛碱法提取, 含量以总有机炭(TOC)表征(Liu *et al.*, 2002). 上清液胶体和溶解性物质(DOC)采用铝盐沉淀法分离测定(Bouhabila *et al.*, 2001)。

临界通量采用“阶式通量递增法”测定(Yu *et al.*, 2003). 由于步长及在每个通量下的持续时间都会影响临界通量值的判定, 在本研究中, 根据水银压差计的测量精度, 认为 1h 内水银柱一侧液面升高 1.5mm 以上时, 即 TMP 上升 0.399kPa 以上(若按此速度上升, 5d 后 TMP 将上升至 50kPa), 就认为膜污染发展较快, 认定临界通量在此通量附近。

2 试验结果(Results)

2.1 PAC 投加量对临界通量的影响

分别在非膨胀污泥和膨胀污泥条件下, 考察了 PAC 投加对于膜临界通量的影响. 在临界通量测定中, 曝气强度、温度等条件保持一致。

图 2 是膨胀污泥(初始 MLSS 浓度为 $3762 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 在 PAC 投加量分别为 0 和 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的临界通量测定结果。

根据以上临界通量的判定标准, 不投加 PAC 时膨胀污泥的临界通量为 $9 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右, 而投加 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PAC 后, 临界通量明显上升, 为 $11 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. 采用同样方法测定了其它 PAC 投加量

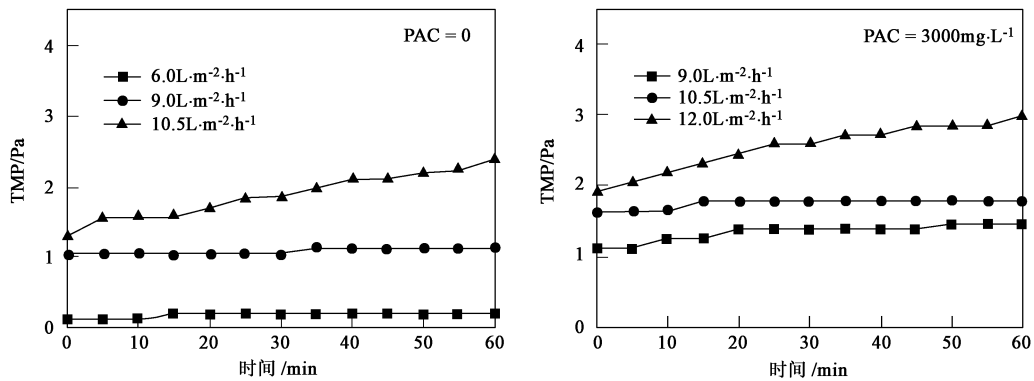


图2 膨胀污泥不投加与投加 PAC 时的临界通量

Fig. 2 Critical flux determination of bulking sludge without and with PAC addition

条件下以及非膨胀污泥(初始 MLSS 浓度为 5708 mg L⁻¹)的临界通量,结果见表 1.

表 1 两种污泥不同 PAC 投加量时临界通量的测定结果

Table 1 Critical fluxes measured with 2 kinds of sludge with different PAC addition

膨胀污泥 (初始 MLSS 为 3 762 mg L ⁻¹)		非膨胀污泥 (初始 MLSS 为 5 708 mg L ⁻¹)	
PAC 投加量/ (mg L ⁻¹)	临界通量/ (L·m ⁻² ·h ⁻¹)	PAC 投加量/ (mg L ⁻¹)	临界通量/ (L·m ⁻² ·h ⁻¹)
0	9	0	13
50	9.5	50	12
100	<9	300	14
500	9.5	500	15
2 000	10	1 000	15
3 000	11	2 000	12

临界通量试验结果表明,对于不同性状和浓度的污泥,PAC 投加量对临界通量的影响程度不同.但适量投加 PAC 都会改善膜过滤性能,提高临界通量.对于初始污泥浓度为 3762 mg L⁻¹ 的膨胀污泥,PAC 的适宜投加量为 3000 mg L⁻¹ 左右;对初始污泥浓度为 5708 mg L⁻¹ 的非膨胀污泥,PAC 的适宜投加量为 500 mg L⁻¹ 左右.但 PAC 投加量过高时,临界通量出现降低,原因后述.

2.2 连续运行时 PAC 投加对膜污染的影响

根据临界通量的测定结果,以膨胀污泥为对象,对比了 PAC 投加量分别为 0 和 3000 mg L⁻¹,固定通量为 10.5 L·m⁻²·h⁻¹,MBR 连续运行时膜过滤压差(TMP)的变化如图 3.

未加 PAC 的 MBR 的 TMP 呈直线迅速上升(约 1.84 kPa·h⁻¹),没有出现平缓的上升段,说明 10.5 L·m⁻²·h⁻¹ 的流量已经处于超临界通量区;投加

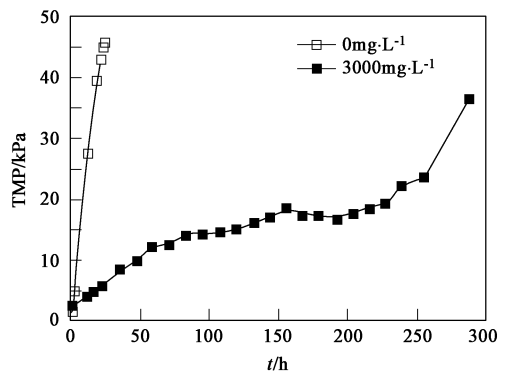


图 3 PAC 投加和不投加时 TMP 发展对比

Fig. 3 TMP changes of MBRs with and without PAC addition

PAC 的 MBR 在 150 h 之内,TMP 增加缓慢(从 1.49 kPa 上升至 18.71 kPa,约 0.11 kPa·h⁻¹),然后快速上升.未加 PAC 组只运行了 1 d,TMP 就超过了 40 kPa,试验结束;投加 PAC 组运行了 12 d.连续试验说明投加 3 000 mg L⁻¹ PAC 确实提高了膜临界通量,而且能够在连续运行中较稳定地发挥作用,降低了膜污染发展速率.

3 讨论(Discussion)

3.1 PAC 作用机理分析

上述试验结果表明,适量投加 PAC 可以改善污泥混合液膜过滤性能,过量投加会引起负面作用.分析其原因,可能包括以下两方面.

1) PAC 的投加降低了溶解性污染物质的浓度,改善了污泥絮体的结构.表 2 是 PAC 投加前后 2 种污泥混合液组成的变化.可见,PAC 投加后,不论膨胀污泥还是非膨胀污泥,都显著降低了混合液中溶解性物质(DOC)的质量浓度.PAC 投加量为 500

表 2 PAC 投加量对混合液组成的影响

Table 2 Changes of various fractions in mixed liquor after PAC addition

mg L⁻¹

膨胀污泥				非膨胀污泥			
PAC 投加量	EPS	胶体	DOC	PAC 投加量	EPS	胶体	DOC
0	1 912	23.78	17.80	0	1 441	6.7	42.9
50	1 885	24.58	16.89	300	1 578	12.7	37.3
100	1 483	18.60	19.71	500	1 459	7.5	16.0
500	890	20.50	7.69	1 000	1 728	11.7	31.1
2 000	753	20.39	5.90	2 000	1 386	19.9	12.6
3 000	1 160	18.16	7.22				

mg L⁻¹时的膨胀污泥与污泥原样相比,溶解性物质浓度降低了 56.8%;非膨胀污泥与污泥原样相比,溶解性物质浓度降低了 62.7%。混合液中溶解性物质浓度的降低有利于减少其在膜表面的附着和膜孔的堵塞,减缓膜污染。溶解性物质浓度的降低程度与膜污染的改善程度趋势一致。

另一方面,污泥中 EPS 和胶体浓度并没有随 PAC 的投加发生较大的变化。这说明,PAC 投加对 EPS 含量并没有大的影响,但 PAC 与 EPS 相互作用,对污泥絮体的形成和性状的改变起到了重要作用。在连续运行 12 d 时镜检发现,成熟 PAC 污泥絮体的尺寸比 PAC 颗粒本身大得多(表 3),每个较为独立的菌胶团中含有一颗或多颗 PAC 颗粒,镶嵌在污泥里起骨架作用。根据 PAC 及菌胶团的性质,投加到 MBR 中的 PAC 颗粒与菌胶团之间存在相互作用。最初,PAC 的吸附性和微生物的附着性使得混合液中大量的生物絮体、分散胶体迅速地包围 PAC 颗粒,形成较大的絮体;随着该絮体中微生物数量的增多,分泌的胞外聚合物也增多,当其它絮体或游离细菌接近时,各自的胞外多聚物不规则地缠绕在一起,从而使絮体进一步连接形成一个以 PAC 颗粒为骨架的大絮体(见图 4)。与不投加 PAC 的污泥絮体相比,投加 PAC 后絮体颗粒变大,空隙率增加,这一结果与 Jae-Seok *et al.* (2003) 的一致。表 3 显示了 PAC 投加后一个临界通量测定周期后非膨胀污泥絮体中位径的变化。

表 3 PAC 投加后污泥絮体中位径的变化

Table 3 Changes of the medium diameter of flocs after PAC addition μm

原污泥	PAC 本身	PAC = 500 mg L ⁻¹	PAC = 2000 mg L ⁻¹
48.80	38.98	57.43	57.62

投加 PAC 后絮体颗粒变大,有利于提高临界膜通量。同时由于 PAC 在污泥絮体中所起的骨架作用,使得絮体的抗压性增强,从而降低了过滤阻力,提高了过滤性能。

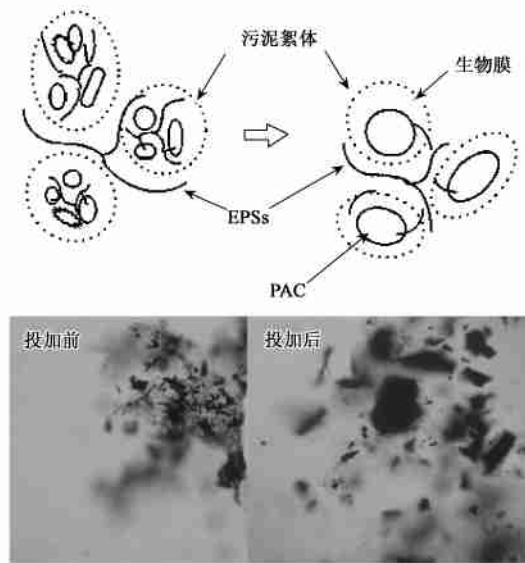


图 4 PAC 投加前后形成絮体的差异

Fig. 4 Changes of the floc structure after PAC addition

2) PAC 本身是一种颗粒物,同污泥颗粒类似,对膜存在一定程度的污染。PAC 密度为 1.34 g cm⁻³,粒径 1~80 μm,中位径为 39 μm,与污泥絮体相当,在投加到混合液以后和混合液组分一道黏附到膜表面形成污染。同时,PAC 投加量过高时,MLSS 浓度也显著增加,如表 4 所示。此时,混合液比重增大,原有的气水比造成的紊流曝气不能使混合液得到充分搅拌,膜上滤饼层的形成速度加快,综合导致临界通量下降。

3.2 污泥比阻与混合液膜过滤性能的关系

由上述机理分析可知,PAC 投加对于污泥混合液过滤性能的影响是一个综合效应,单一的指标如污泥浓度、粘度及粒径分布变化等不足以预测其效应。而如果利用临界通量和连续运行试验中膜污染发展的速度来评价污泥混合液的膜过滤性能则既费时又费力。因此,建立一套快速评价膜污染的方法十分必要。

污泥比阻(Specific resistance to filtration, SRF)是

表4 不同 PAC 投加量对反应器 MLSS 的影响

Table 4 Changes of MLSS concentration caused by different PAC addition mg L^{-1}

膨胀污泥		非膨胀污泥	
PAC 投量	MLSS	PAC 投量	MLSS
0	3 762	0	5 708
50	3 883	300	5 689
100	3 598	500	6 112
500	3 947	1 000	6 318
2 000	5 132	2 000	7 392
3 000	5 737		

表示污泥过滤特性的综合性指标,其物理意义是:单位质量的污泥在一定压力下过滤时单位过滤面积上的阻力.污泥比阻的高低可以综合反映污泥混合液过滤性能的好坏.膜过滤与在测定污泥比阻时的污泥过滤现象类似,考虑用污泥比阻来预测 PAC 投加后对膜过滤性能的影响,就其与膜过滤性之间是否存在一定的相关,以下进行了考察.

图5显示了不同 PAC 投加条件临界通量下膜过滤阻力与污泥比阻的关系.图5纵坐标为污染产生的膜阻力, $R = P/\mu J$, P 为 0.399 kPa, J 为相应的临界通量.横坐标为污泥比阻 SRF.

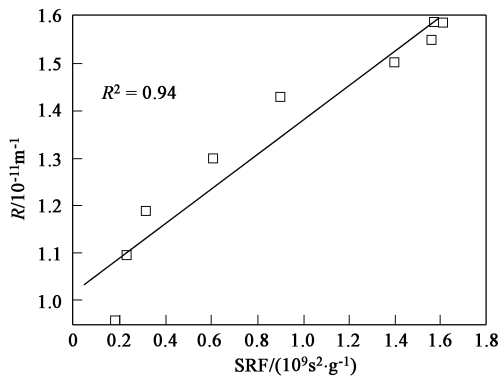


图5 污泥比阻与混合液膜过滤性能的关系

Fig. 5 Relationship between membrane filterability and SRF

从图5可知,污泥比阻与混合液膜过滤性能有较好的线性关系,污泥比阻越小,膜过滤阻力越小,即膜过滤性能越好.污泥比阻可以用于混合液膜过滤性能的快速评价.

4 结论(Conclusions)

1) 对于试验选用的两种类型污泥(非膨胀污泥和膨胀污泥),适量投加 PAC 可以减轻膜污染,表现为临界通量的提高和连续运行中膜污染发展速率的降低.污泥性质和浓度不同,最佳 PAC 投加范围亦不同.

2) PAC 投加后显著降低了污泥混合液中溶解性物质的浓度,减轻了溶解性物质的吸附和膜孔堵塞污染,并改善了污泥絮体结构,增大了污泥絮体尺寸,由此改善了混合液膜过滤性.

3) 污泥比阻与污泥混合液膜过滤性能之间有良好的线性关系,可作为污泥混合液过滤性能的快速评价指标.

参考文献(References):

- Bouhabila E H, Aim R B, Buisson H. 2001. Fouling characterization in membrane bioreactors[J]. Separation Purification Technology, 22: 123—132
- JaeSeok Kim, ChungHak Lee. 2003. Effect of powdered activated carbon on the performance of an aerobic membrane bioreactor: comparison between crossflow and submerged membrane systems[J]. Water Environment Research, 75: 300—307
- Li Y Z, He Y L, Liu Y H, et al. 2004. Influence of powdered activated carbon addition on SMBR filtration performance[J]. China water and wastewater, 20: 11—13 (in Chinese)
- Liu H, Herbert H P F. 2002. Extracting of extra cellular polymeric substances (EPS) of sludges[J]. Journal of Biotechnology, 95: 249—256
- Luo H, Gu P, Yang Z Y. 2002. Study on domestic wastewater treatment using membrane bioreactor with powdered activated carbon [J]. Chongqing Environmental Science, 24: 28—31 (in Chinese)
- Sorensen P B, Christensen J R, Bruus J H. 1995. Effect of small scale solids migration in filter cakes during filtration of wastewater solids suspensions[J]. Water Environment Research, 67: 25—32
- Yu K C, Wen X H, Bu Q J, et al. 2003. Critical flux enhancements with air sparging in axial hollow fibers cross-flow microfiltration of biologically treated wastewater[J]. Journal of Membrane Science, 224: 69—79

中文参考文献:

- 李耀中,贺延龄,刘永红,等. 2004. 投加粉末炭对 SMBR 过滤性的影响. 中国给水排水, 20(10): 11—13
- 罗虹,顾平,杨造燕. 2002. 应用投加粉末活性炭的膜生物反应器处理生活污水的研究. 重庆环境科学, 24(3): 28—31