

膜-生物反应器和传统活性污泥工艺的比较

刘锐,黄霞,刘若鹏,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联合实验室,北京 100084, E-mail: xhuang @tsinghua .edu .cn)

摘要:在运行条件一致的情况下把膜-生物反应器(MBR)和传统活性污泥工艺(CAS)进行了比较研究。试验结果表明,MBR具有比CAS更为稳定良好的出水水质,其平均出水COD浓度为55.5 mg/L,低于CAS工艺(79.7 mg/L)。MBR系统中由于膜对大分子物质的截留作用,运行前120d出现溶解性微生物产物的积累,但随着微生物的驯化,这些积累的微生物产物最后得到降解。CAS中未发生微生物产物的积累。CAS出水、MBR上清液以及MBR出水中的物质组成差别很大。CAS出水和MBR上清液中分子量大于60 000的高分子物质与小于3 000的小分子物质都占有相当大的比例,其中高分子物质在MBR上清液中的含量高于CAS系统;MBR出水中则主要是分子量小于3 000的小分子物质。MBR污泥粒径较小,使得氧扩散速率得到提高。

关键词:膜-生物反应器;活性污泥法;分子量;微生物产物;粒径分布

中图分类号:X703.3 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2001)03-05-0020

A Comparison between a Submerged Membrane Bioreactor and a Conventional Activated Sludge Process

Rui Liu, Xia Huang, Ruopeng Liu, Yi Qian (ESPC State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: xhuang @tsinghua .edu .cn)

Abstract: A comparison between a submerged membrane bioreactor (MBR) and a conventional activated sludge process (CAS) was carried out under similar operational conditions. MBR demonstrated a more stable and excellent effluent quality than CAS. Its effluent COD concentration was 55.5 mg/L on average, much lower than that of CAS (79.7 mg/L). Soluble microbial products accumulated in the MBR during the first 120 days in operation due to membrane interception of macromolecules, but these accumulated substances were degraded at last with microbial acclimation. No similar phenomenon was observed in the CAS system. Compositions of the CAS effluent, MBR supernatant and membrane permeate were found quite different. In the CAS effluent and MBR supernatant, both macromolecules with MW > 60 000 and small molecules with MW < 3 000 were dominant and macromolecules had a much larger occupation in the MBR supernatant. In the membrane permeate, however, small molecules with MW < 3 000 were the major component. The relatively small floc size in the MBR was proved favorable to improve oxygen transfer rate.

Key words: membrane bioreactor; activated sludge process; molecular weight; microbial product; floc size and distribution

膜-生物反应器(Membrane Bioreactor, MBR)是一种新型高效的污水处理工艺。它用膜组件代替传统活性污泥法(Conventional Activated Sludge, CAS)中的二沉池,大大提高了系统固液分离的能力,从而使系统出水水质和容积负荷都得到大幅度提高^[1]。但是,膜的这种高效截留作用同时在MBR中也形成了一个相对封闭的环境,给MBR带来一些不同于CAS系统的特性^[2-4]。开展MBR和CAS之间的比较研究,有

利于加强对MBR特性的理论认识并对其进行有效控制。

本文在进水水质和运行条件相同的条件下,对MBR和CAS处理生活污水的长期运行特性进行了研究,从污染物去除效果和微生物代

基金项目:国家“九五”科技攻关项目

作者简介:刘锐(1973~),女,博士研究生,主要研究方向为一体化膜-生物反应器的微生物代谢特性及膜污染控制。

收稿日期:2000-11-30

谢特性等方面对 2 者进行了比较.

1 试验装置和试验方法

1.1 试验装置

图 1 是 MBR 和 CAS 的试验流程图.

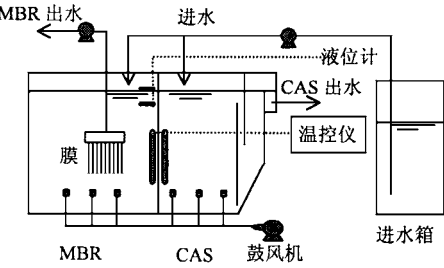


图 1 MBR 和 CAS 工艺流程

Fig.1 Diagrams of MBR and CAS

MBR 系统主要由曝气池和膜组件 2 部分组成.曝气池有效容积为 15L,内置 1 个聚丙烯中空纤维膜组件(孔径为 0.1 μm ,膜过滤面积 0.4 m^2 ,浙江大学生产).进水从进水箱用泵抽入曝气池,其中的有机物通过活性污泥的代谢作用得到分解.混合液经由膜过滤后得到处理出水.膜组件下设置有曝气头,一方面提供微生物分解有机物所需的氧气,另一方面可在膜面造成一定的紊动,减缓污泥在膜表面的沉积.液位控制计用于控制进水泵的开启以使反应器液位恒定.系统出水量由膜通量的大小确定,在整个运行过程中通过调整出水泵的转速保持恒定.

CAS 工艺由有效容积为 6.4L 的曝气池和与之相连的有效容积为 3L 的沉淀池 2 部分组成.进水来自与 MBR 系统相同的进水箱.在曝气池中经活性污泥分解后的混合液溢流到沉淀池,经沉淀后得到处理出水.沉淀污泥通过 2 者之间隔板底部的过流通道回流到曝气池.

两反应器的接种污泥均取自清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室中试基地处理清华大学生活污水的氧化沟污泥,间歇驯化培养 2 周后开始连续进水运行.在整个试验过程中两反应器内的温度通过温控仪控制在 25 ± 1 $^{\circ}\text{C}$.

其它操作参数如表 1 所示.

表 1 试验操作参数

Table 1 Operational parameters

操作参数	MBR	CAS
曝气池容积/L	15	6.4
HRT/ h	8.25	8.25
SRT/ d	20	20
温度/ $^{\circ}\text{C}$	25 ± 1	25 ± 1
DQ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5 ± 1	5 ± 1
pH	7.5 ± 1	7.5 ± 1

1.2 试验用水

MBR 与 CAS 系统并行运行,采用同一进水贮存箱供水.试验用水为人工配水,有机物浓度与城市污水的浓度相近,其组成采用葡萄糖、淀粉和蛋白胨的混合配水,如表 2 所示.

表 2 人工配水有机组成及浓度¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Organic components and concentrations of artificial compounded water

成分	浓度	成分	浓度
工业葡萄糖	278	$\text{MnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	6
玉米淀粉	278	FeSO_4	0.3
蛋白胨	28	CaCl_2	6
KH_2PO_4	52.8	$(\text{NH}_2)_2\text{O}$	167
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	66	NaHCO_3	111

1) 进水平均水质为: COD=500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, BOD₅=233 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.3 测试项目与方法

常规分析项目:进水、MBR 上清液、MBR 出水和 CAS 出水的 COD、BOD₅, MBR 上清液 TOC, 2 套反应器的 SS 和 VSS 浓度,均采用标准方法进行测定^[5]. MBR 上清液和 CAS 出水均为在 4000 r/min 下离心 15 min,再用 0.45 μm 的滤膜过滤后得到.

分子量:取一定量的待测样品,先用 0.45 μm 的滤膜去除其中的悬浮物,再用不同切割分子量的滤膜(100 000,60 000,30 000,10 000 和 3 000)进行过滤,并测定滤液的 TOC 浓度,然后通过物料恒算,计算不同分子量的有机物在总有机碳中所占的百分比^[6].

污泥粒径分布:采用马尔文颗粒直径分析仪(MALVERN 2601 LC)对曝气池中的活性污泥粒径分布进行测定.这种分析仪通过发射激光使其透过待测定样品,并通过分析样品中固体

颗粒的衍射投影来计算粒径分布。

充氧速率:采用连续开放式呼吸仪测定^[7]。

2 结果与讨论

2.1 有机物去除效果

图2显示了 MBR 和 CAS 2 系统出水 COD 浓度随时间的变化情况和 2 系统对 COD 的去除效果。MBR 比 CAS 有更强的有机物去除能力,其出水平均 COD 浓度为 55.5 mg/L,低于 CAS 系统出水的平均 COD 浓度(79.7 mg/L)。MBR 的 COD 去除率波动于 68.2%~96.6%之间,系统平均 COD 去除率达到 87.9%;而 CAS 的 COD 去除率为 68.7%~93.2%,平均值只有 82.4%。MBR 系统对有机物具有较高的去除效果归因于膜对有机物的进一步去除作用。

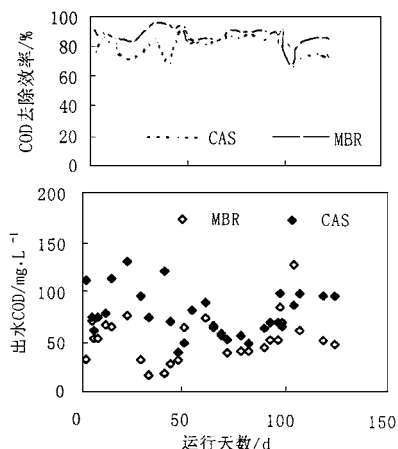


图2 MBR 和 CAS 对 COD 的去除效果及出水 COD 浓度

Fig.2 COD removal efficiency and effluent COD concentration in the MBR and CAS

2.2 反应器中溶解性微生物产物的变化

微生物在分解进水中的有机污染物的同时,还会释放出一些微生物产物,其主要成分为大分子多糖及腐殖质类物质^[6,8]。在 CAS 系统中,这些微生物产物随出水流走;而在 MBR 中由于膜的截留作用,大分子微生物产物被截留于生物反应器中。如果这些大分子物质生物降解速度很慢或者根本不能被生物降解,则将在反应器中积累。

为探讨微生物产物在 2 反应器中的行为,本试验对 CAS 出水、MBR 上清液以及 MBR 出水的 TOC 浓度变化及分子量组成进行了分析比较。由于本试验采用的是易降解的葡萄糖和淀粉配水作为进水,其在反应器中的水力停留时间很长,因此生物处理出水中残余基质的浓度不会很高,溶解性微生物产物的含量占主要地位,CAS 出水、MBR 上清液以及 MBR 出水中的有机物含量近似反映了溶解性微生物产物的浓度。

图3表示了 MBR 上清液、MBR 出水以及 CAS 出水 TOC 浓度的时间变化。

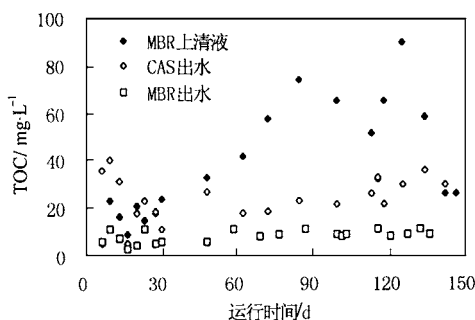


图3 溶解性微生物产物浓度的时间变化

Fig.3 Changes of soluble microbial products' concentration with time

从图3可以看出,在近5个月的运行时间里,MBR 出水 TOC 浓度始终保持稳定,低于 CAS 出水;CAS 出水 TOC 浓度随时间的变化无明显规律,只是在一定范围内波动;MBR 上清液 TOC 浓度则随时间呈先增长后下降之后在一定范围内波动的趋势。表明在运行前 120d, MBR 反应器中出现了溶解性微生物产物的积累。之后,由于微生物的不断驯化,溶解性微生物产物的降解速率加快,其生成速率开始小于降解速率,因此第 120d 后反应器中上清液 TOC 浓度又逐渐降低。

溶解性微生物产物在生物反应器中一方面发生量的变化,另一方面还可能发生组成的变化。通常直接对上清液中的溶解性微生物产物进行组成分析非常困难。因此,本试验用分子量

分布来表征有机物组成的变化。

图 4 表示了运行至第 50d 时 MBR 上清液、MBR 出水和 CAS 出水的分子量分布。

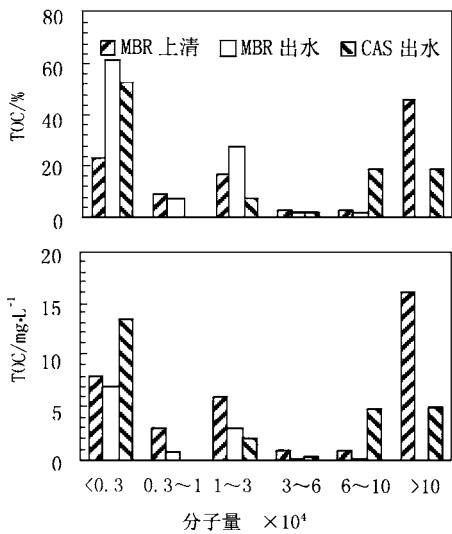


图 4 MBR 与 CAS 溶解性微生物产物的分子量分布

Fig.4 Molecular weight distribution of soluble microbial products in the MBR and CAS

MBR 上清液、MBR 出水及 CAS 出水 3 者之间的分子量分布差别很大。MBR 上清液和 CAS 出水的分子量分布有些相似,分布范围较广,且以分子量大于 60 000 和分子量小于 3 000 的物质为主。MBR 上清液中分子量高于 60 000 的物质占总 TOC 浓度的 49%,分子量小于 3 000 的物质占 23%,2 者之和占 TOC 总量的 72%;CAS 出水中分子量高于 60 000 的物质占 38%,分子量小于 3 000 的物质占 52%,2 者之和占 90%。而相比之下 MBR 出水的分子量分布就很窄,以小分子量的物质为主要组分,其中分子量小于 3 000 的物质占 60%以上,分子量大于 30 000 的物质很少,分子量高于 100 000 的物质没有出现。

与 CAS 系统相比,在 MBR 上清液 TOC 浓度随时间上升阶段,MBR 生物反应器中的高分子物质由于膜的高效截留作用越积越多,含量远高于 CAS 中相应值。膜对分子量 100 000 以上的大分子物质的阻截作用最为有效,可以使

其全部截留于反应器中;对分子量小于 100 000 的物质,膜有部分截留作用,分子量越小截留作用越差。

由于本试验所用的膜孔径为 0.1 μm,单纯靠膜本身的作用难以对分子量几万甚至 3 000 的物质有所截留,因此分析膜对小分子物质的高效截留作用与膜表面形成的凝胶层有关。Chiemchaisri 也提到膜表面形成的凝胶层能够提高出水水质,进一步去除 COD 和病毒^[9]。

2.3 污泥浓度与微生物特性

MBR 与 CAS 系统中污泥浓度随时间呈现如图 5 所示的变化。MBR 中接种污泥浓度约为 0.8 g/L,在系统投入运行后随运行时间的延长污泥发生增殖,其浓度持续增长,50d 后稳定于 3~4 g/L。MBR 中较高且稳定的污泥浓度保证了系统正常、稳定、高效地运行。而 CAS 由于很难维护管理,经常发生污泥膨胀,从而使污泥大量流失,SS 浓度波动很大,经常小于 1 g/L。

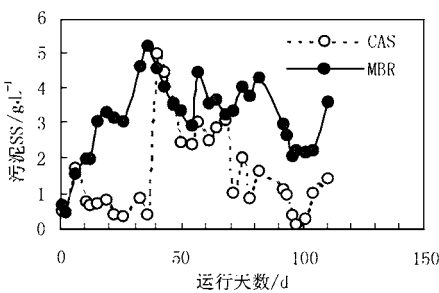


图 5 MBR 和 CAS 生物反应器中的污泥浓度变化
Fig.5 Sludge concentration in the MBR and CAS

在光学显微镜下观察污泥的生物相组成,CAS 反应器中发现大量种类繁多的原生动物,如钟虫、草履虫、线虫和藻类等;MBR 中也有很多原生动物,表现非常活跃,但是种类相对单一,以钟虫和藻类为主。

在电镜下观察污泥絮体,CAS 污泥絮体主要以球菌和短杆菌为主,丝状菌很少。这些球菌和杆菌结合紧密成长绳状菌胶团。菌胶团表面轮廓清晰,微生物产物很少。与之相比,MBR 系统污泥中丝状菌和真菌占有相当大比重。以这些丝状体为桥梁形成相互连接的球状菌胶团。

各菌胶团表面比较模糊,一些粘稠状物质附着于微生物表面。

2.4 污泥粒径分布及充氧速率

MBR 和 CAS 系统中的污泥粒径分布如图 6 所示。CAS 中污泥的平均粒径为 $104\mu\text{m}$, MBR 中污泥的平均粒径为 $85\mu\text{m}$, 比 CAS 系统的稍低。MBR 中较小的污泥粒径为加强传质提供了适宜的环境, 因此有可能提高系统的有机物去除率和抗冲击负荷能力^[10]。本试验对 MBR 和 CAS 系统的充氧速率进行了测定, MBR 系统的充氧速率为 0.51 L/min , CAS 系统的充氧速率为 0.44 L/min 。MBR 系统的充氧速率高于 CAS 系统, 较高的充氧速率能够及时补充微生物周围环境中由于有机物降解而减少的氧气, 为系统高效运行提供了良好的条件。

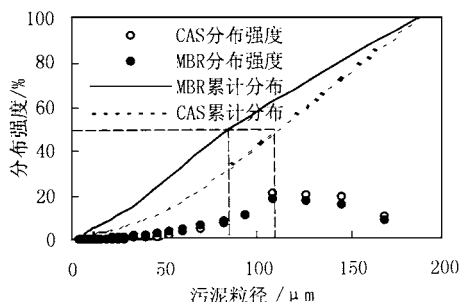


图 6 MBR 和 CAS 的污泥粒径分布

Fig. 6 Floc size and distribution in the MBR and CAS

3 结论

(1) MBR 具有比 CAS 更强的有机物去除能力。

(2) CAS 系统中溶解性微生物产物随出水流失, 不会在反应器中积累。而在 MBR 系统中由于膜的截留作用, 反应器中出现溶解性微生物产物的积累, 但随着微生物对微生物产物的适应性增强, 这些积累的微生物产物又会逐步被降解掉。

(3) CAS 出水与 MBR 上清液的主要成分都是分子量大于 $60\,000$ 和分子量小于 $3\,000$ 的物质; MBR 出水中主要是分子量小于 $3\,000$ 的物

质。与 CAS 系统相比, 在 MBR 上清液 TOC 浓度随时间上升的阶段, MBR 上清液中的高分子物质含量远高于 CAS 系统。膜对分子量 $100\,000$ 以上的大分子物质的阻截作用最为有效, 对分子量小于 $100\,000$ 的物质, 膜有部分截留作用, 分子量越小截留作用越差。

(4) CAS 污泥絮体主要以球菌和短杆菌为主, 丝状菌很少。而 MBR 系统污泥中丝状菌和真菌占有相当大比重。2 套系统中的污泥里都有大量原生动物, 但 MBR 中的种类不如 CAS 丰富。

(5) MBR 的污泥平均粒径小于 CAS 系统, 使得氧扩散速率得到提高。

参考文献:

- 1 黄霞等. 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 ~ 44.
- 2 上田达己等. 膜分离活性污泥法における溶解性代謝産物の動態と膜過性能. 水環境学会誌, 1997, 20(4): 233 ~ 237.
- 3 佐佐木慎哉, 桃井清至. 膜分離活性汚泥法における溶解性代謝産物の挙動と微生物活性への影響. 水処理技術, 1997, 38(5): 225 ~ 230.
- 4 柳根勇等. 膜分離活性汚泥法における膜透過性能に対する生物代謝成分の影響. 水環境学会誌, 1997, 20(7): 473 ~ 480.
- 5 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法, 第三版. 北京: 中国环境科学出版社, 107, 354 ~ 356, 362 ~ 368.
- 6 Josepha M, Menahe R. Organic groups and molecular weight distribution in tertiary effluents and renovated waters. Wat. Res., 1982, 116: 399 ~ 403.
- 7 Milenko R. Respirometry of Activated Sludge. TECHNOMIC publication, 1993. 46 ~ 58.
- 8 Menahe R, Josepha M. Classification of organics in secondary effluents. Environ. Sci. & Tech., 1971, 5(7): 606 ~ 609.
- 9 Chiemchaisri C et al. Organic stabilization and nitrogen removal in membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment. Wat. Sci. Tech., 1992, 25(10): 231 ~ 240.
- 10 Zhang B, Yamamoto K. Floc size distribution and bacterial activities in membrane separation activated sludge processes for small-scale wastewater treatment/ reclamation. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(6): 37 ~ 44.