

分体式膜-好氧颗粒污泥反应器的运行及膜污染特性

徐立荣,黄丹,李小宁,竺建荣*

(北京师范大学环境学院,北京 100875)

摘要 :采用分体式 MSBR 和人工合成配水,对处理系统在进料高负荷变化条件下的运行特性和膜污染表现特征进行了研究。结果表明,MSBR 系统连续运行 150 d 以上,在进水 COD 200 ~ 1 200 mg · L⁻¹ 时,COD、TP、TN 和 NH₄⁺ -N 的平均去除率分别为 90%、80%、60% ~ 80% 和 95%。MSBR 中可实现污泥完全颗粒化,在 70 d 时 350 μm 左右的颗粒占 90% 以上,之后污泥继续长大且平均粒径达 394 μm。MSBR 形成颗粒后,膜系统的清洗周期达 65 d,是絮体污泥清洗周期的 3 倍以上,也大大高于一般活性污泥膜反应器的清洗周期,说明好氧颗粒污泥形成有助于提高 MSBR 的抗冲击负荷能力及减缓膜污染发生并维持较长时间的稳定运行。

关键词 :分体式膜反应器;好氧颗粒污泥;膜污染;MSBR;进料负荷

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)03-0750-06

Characteristics of Operational Performance and Membrane Fouling in a Sidestream Membrane Sequencing Batch Reactor with Aerobic Granule

XU Li-rong, HUANG Dan, LI Xiao-ning, ZHU Jian-rong

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract : The characteristics of operational performance and membrane fouling were investigated using synthetic wastewater as feed in a sidestream membrane sequencing batch reactor (MSBR) system. The experimental results showed that the average removal efficiencies of COD, TN, TP and NH₄⁺ -N were 90%, 60%~80%, 80% and 95% respectively under the influent COD of 200 mg · L⁻¹ to 1 200 mg · L⁻¹ during more than 150 days' operation. It was possible to achieve a complete granulation of sludge. In 70th day, sludge particles around 350 μm were detected more than 90%. From then, sludge grew up continuously and finally reached to 394 μm in diameter. With the formation of granular sludge in MSBR, the cleaning time of membrane system was prolonged to 65 days, which was larger than three times compared with flocculent sludge MSBR. It was also much better than conventional MBR. These results clearly demonstrated that the formation of granular sludge was good for improving the resistance to organic loading shock and retaining the membrane fouling of the system, and maintaining the stable operation for a long time.

Key words : sidestream membrane reactor; aerobic granule; membrane fouling; membrane sequencing batch reactor (MSBR); feed loading

近几年,膜生物反应器(MBR)的研究报道和工程应用日渐增多^[1-4]。从工艺上来说,MBR 可分为浸没式(一体式)和外置式(分体式)2 种类型。与一体式膜生物反应器相比,分体式膜生物反应器具有膜组件易于清洗、膜污染较轻、膜通量较大等优点^[5,6],更适合于成分复杂、易发生膜污染、需要频繁清洗膜组件的废水处理。因此,分体式 MBR 的研究相当普遍,而且目前有国内城市污水处理厂出水再经分体式 MBR 处理回用的实例。另一方面,将 SBR 与 MBR 结合起来的膜序批式生物反应器(MSBR)^[7-10],在日益严格的水质标准下,也成为一种极具潜力的处理方法,逐渐得到大家的关注。

MSBR 系统的最大优势是去除 COD 的同时还可以去除氮磷营养元素,提供很好的出水水质^[8-10]。Bae 等^[9]采取序批式 MBR 运行 110 d,考察反应器处理乳品有机废水的效果,达到了 BOD 去除

率 97% ~ 98%,氮去除率 96%,磷去除率为 80%。白晓琴等^[10]研究了中试规模的膜序批式生物反应器处理生活污水的效果,取得了理想的脱氮效果,可长期稳定运行。但已有的这些研究大多进水浓度较低,且进料浓度基本不变,而实际废水处理中进料浓度会较高且变化波动较大。

此外,为了控制膜污染的发生,在 MSBR 的研究过程中,已有部分学者进行了好氧颗粒污泥膜生物反应器的开发和研究^[11-15]。反应器中好氧颗粒污泥的培养使污泥结构更加密实^[16],并认为对减缓膜污染有利^[17]。目前的研究大多关注浸没式好氧颗粒膜生物反应器。Tay 等^[18]研究了一体式膜序批式生物

收稿日期 2009-04-22;修订日期 2009-11-05

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z318)

作者简介:徐立荣(1983~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制与治理工程,Email xulirongla@gmail.com

* 通讯联系人,E-mail zjrtshua@sohu.com

反应器运行形成颗粒污泥膜生物反应器的运行情况和过滤特性. Li 等^[12,13]进行了利用颗粒污泥膜生物反应器处理生活废水及膜污染控制的研究. 初步结果表明,颗粒污泥形成对膜污染有减缓作用,但对于系统的长期稳定运行还有待更多更深入的研究.

为了更好地了解并发挥好氧颗粒污泥对减缓膜污染的优势,本实验选择分体式 MSBR 为研究对象,通过运行控制在反应器中培养颗粒污泥,并考察处理系统在进料高负荷变化条件下的运行特性和膜污染表现特征,探讨 SBR 运行方式下形成好氧颗粒污泥对膜过滤过程的影响和污泥性状的变化.

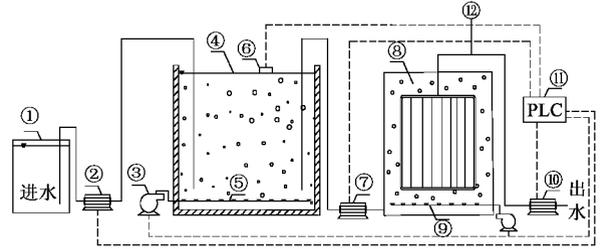
1 材料与方 法

1.1 试验装置

MSBR 系统采用有机玻璃制成的反应器,体积为 60 L,由 SBR 生物反应器和膜组件组成,SBR 反应器出水接膜组件;反应器采用时间程序控制器对反应器周期实现自动控制,液位通过传感器来控制;反应 1 个周期为 6h,厌/好氧交替进行;接种北京市高碑店污水处理厂的厌/好氧混合活性污泥絮体,室温下运行. 图 1 为实验装置示意.

SBR 反应器 1 d 运行 4 个周期,厌/好氧交替进行,每周期 360 min 分为:厌氧段 120 min,包括进水 5 min,进料 20 min,曝气搅拌 5 min;好氧段 240 min.

膜组件采用日本三菱公司生产的聚乙烯 (polyethylene, PE) 多孔非对称有机膜片,膜孔径为 0.4 μm ,加工成有效面积为 1 m^2 的膜组件. 膜组件采用恒流过滤,膜通量 12.5 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,间歇式出水运行,开停比为 5:2. 在 1 d 运行 4 个周期,每个周期出水 200 min.



1. 进水箱 2. 进水提升泵 3. 空气压缩机 4. SBR 反应器
5. 曝气头 6. 液位传感器 7. 出水泵 8. 膜组件
9. 曝气头 10. 出水抽吸泵 11. PLC 控制器 12. 压力计

图 1 分体式膜序批式生物反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental sidestream MSBR system

1.2 进水水质

试验进水采取实验室人工模拟配水,配水主要成分为($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$):葡萄糖 100 ~ 600,乙酸钠 80 ~ 480,碳酸氢钠 60 ~ 300,蛋白胨 30 ~ 70,氯化钠 25 ~ 50,硫酸铵 60 ~ 230,磷酸二氢钾 40 ~ 110, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 90 ~ 94, $\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. 在运行阶段采用进料负荷调控培养颗粒污泥^[19],分阶段变化的水质条件如表 1 所示.

表 1 MSBR 的反应系统进水水质

Table 1 Composition of influent in experimental MSBR system

阶段	时间/d	COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
A	1 ~ 20	500	25	5
B	21 ~ 57	400 ~ 1 200	20 ~ 60	4 ~ 12
C	58 ~ 101	400 ~ 1 000	50	20
D	101 ~ 155	200 ~ 800	40	10

1.3 测定项目及方法

(1) COD、 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 、TN、TP、MLSS、SVI 等采用标准方法测定^[20].

(2) 曝气强度采取空气泵加气体流量计控制. 浊度测定采用 HACH-2001P 浊度测定仪,污泥平均粒径测定采用英国 Mastersizer 2000 测定. 使用 Olympus B41 光学显微镜和数码照相机观察和记录颗粒形态. DO、pH 采用 HACH 在线检测仪器实时检测. 使用 FEI QUANTA 200 扫描电子显微镜 (SEM) 观察好氧颗粒结构.

(3) SEM 观察样品制备方法:①戊二醛-锇酸双固定 2.5% 戊二醛固定过夜,0.1 mol/L 磷酸钠缓冲液 (pH 7.2) 漂洗 3 次,15 min/次,1% 锇酸 (OsO_4) 固定 3 h,0.1 mol $\cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸钠缓冲液 (pH 7.2) 漂洗 3 次,15 min/次;②乙醇脱水:30% ~ 50% ~ 70% ~ 85% ~ 95% 乙醇梯度脱水,各 1 次,15 min/次,100% 乙醇脱水 3 次,15 min/次;③乙酸异戊酯置换;④二氧化碳临界点干燥 (BAL-TEC CPD030);⑤离子溅射金 (BAL-TEC SCD005);⑥将处理好的样品放入样品盒待检.

2 结果与讨论

2.1 MSBR 运行特性

为了考察反应系统对不同浓度进水的处理效果及对抗冲击负荷的能力,在整个运行期间采取了分阶段不同的进水水质(表1)。反应器系统的总体运行特性见图2。可以看出,开始运行阶段进水浓度较低,COD 500 mg/L,此时 COD 去除率在 95% 以上,TP 在 85% 以上,TN 在 75% ~ 80%。系统一直保持稳定运行,污泥性状得到改善,污泥浓度 MLSS 稳定在 7.0 ~ 8.5 g/L,污泥沉降指数 SVI 由 45 mL · g⁻¹ 逐渐下降至 20 mL · g⁻¹ 左右稳定(图3)。之后采取 COD 负荷交替高波动变化的运行方式,进水 COD 200 ~ 1 200 mg · L⁻¹,结果发现 COD 去除率仍然稳定在 90% 甚至 95% 以上。TP 在进水 10 mL · g⁻¹ 以下时去除率在 85% 以上。随后为了考察系统在去除 COD 同时的脱氮除磷效果,在 COD 负荷变化的基础上,提高进水 TP 至 20 mg · L⁻¹,在这些负荷波动条件下 MSBR 可以很快适应进料参数的改变,TP 去

除率可保持在 80% 以上,TN 去除率在 60% ~ 80%,氨氮去除率 > 95%,表现出系统具有良好的脱氮除磷效果。整个运行过程中出水浊度均保持在 0.5 NTU 以下,浊度去除率在 99% 以上。

本试验的分体式 MSBR 系统具有较强的抗冲击负荷能力,COD 容积负荷在 0.4 ~ 2.4 kg · (m³ · d)⁻¹ 变化时,可以在很短的时间内适应进水水质变化并保持较好的稳定出水水质,这体现了分体式 MSBR 系统的优越性。这种抗冲击负荷能力一方面来自于 SBR 和膜截留作用,另一方面,部分原因是反应器内形成了好氧颗粒污泥。孟耀斌等^[5]在 COD 300 ~ 800 mg · L⁻¹ 的冲击负荷条件下,探讨了分体式 MBR 的抗冲击负荷能力。与此相比,本研究反应器系统所表现出的技术指标更好。

2.2 污泥颗粒化

在 150 d 的运行中,SBR 反应器中污泥状态处于不断变化中,污泥平均粒径变化如图4所示。接种污泥经过空曝 1 周和恒定进料负荷条件的稳定运行后,污泥性状有了很大改善。在变负荷调控下,絮状

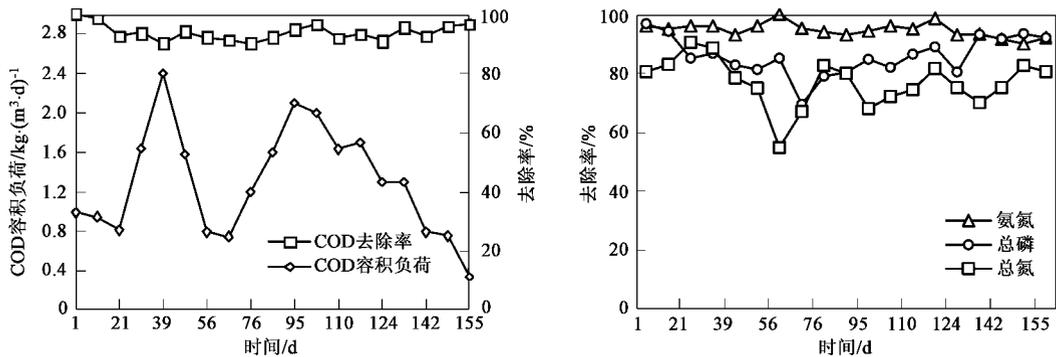


图2 MSBR 对污染物的去除效果

Fig.2 Pollutants removal in MSBR system

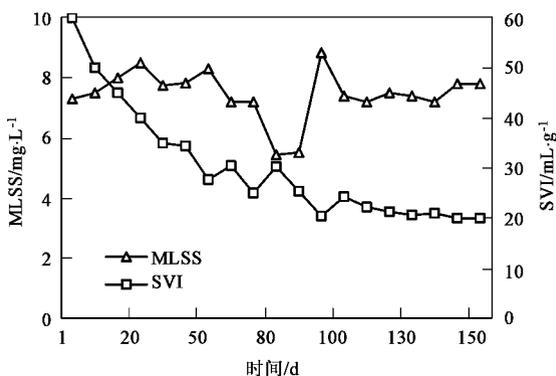


图3 MSBR 中 MLSS 及 SVI 的测定结果

Fig.3 Measurements of SVI and MLSS in MSBR system

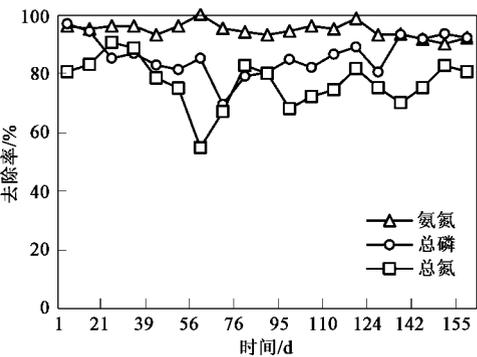


图4 MSBR 中污泥平均粒径的变化

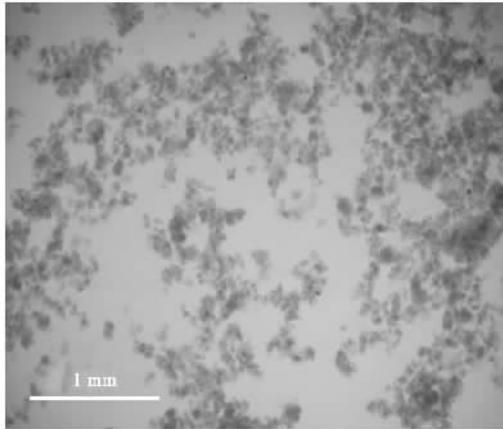
Fig.4 Profile of average sludge size in MSBR system

污泥逐渐生长聚集成微小的污泥颗粒,在 30 d 时,颗粒平均粒径从 50 μm 生长到 100 μm 。通过调控污泥生长后,进料负荷的控制加上 SBR 的特殊运行方式使微生物经历富-贫营养基质的变化,污泥中微生物出现聚集生长并不断长大,污泥粒径显著增大,污泥平均粒径在 45 d 时达到 200 μm 左右。在 70 d 时平均粒径在 300 μm 左右,350 μm 左右的颗粒占 90% 以上运行阶段 B/C,反应器实现污泥完全颗粒化。在 70 ~ 150 d 中,污泥稳定保持颗粒化状态并缓慢长大,颗粒粒径从 345 μm 增加到 394 μm 。在已有的好氧颗粒污泥膜生物反应器中,大多采取接种好氧颗粒污泥的浸没式膜生物反应器,对反应器系统中有关颗粒污泥的培养及采用分体式膜反应器运行方式的考察研究较少。以上结果说明,在分体式膜生

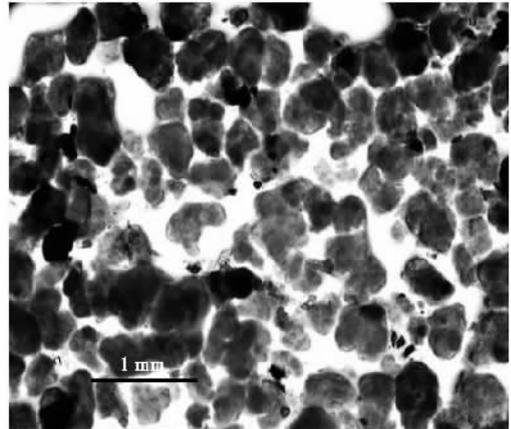
物反应器中采取 SBR 的厌氧交替运行方式可实现好氧颗粒污泥的培养形成和不断长大,对于分体式好氧颗粒污泥 MSBR 的实际应用有重要意义。

通过显微镜观察表明长期运行的 MSBR 系统污泥出现了颗粒化,粒径逐渐增加到肉眼可见。颗粒间边界轮廓清晰,周围存在着原、后生动物。同时,形成的颗粒污泥结构密实,SVI 值仅在 $20\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,而且形态稳定(图 5)。SEM 检验的结果表明颗粒中以球状菌为主,有少量丝状菌(图 6),这与文献报道的一般膜生物反应器中污泥由于泥龄较长易导致污泥中丝状微生物过度生长而最终加速膜污染的结果不同^[14],并且污泥中存在丰富的游泳型纤毛虫、轮虫、线虫等原、后生动物。

2.3 膜过滤及膜污染特征



(a) 运行初期的絮体污泥



(b) 运行 70 d 的颗粒污泥

图 5 MSBR 不同阶段的污泥形态

Fig. 5 Microscope observation of sludge in MSBR system

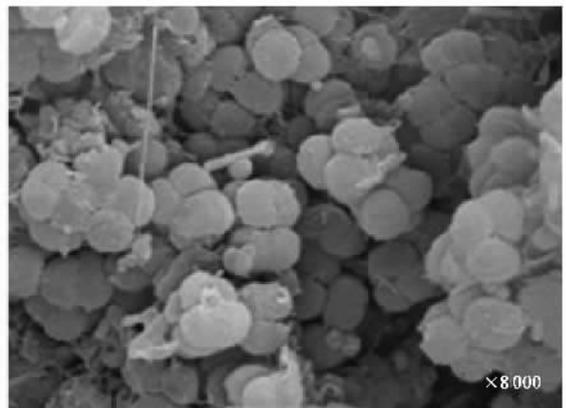
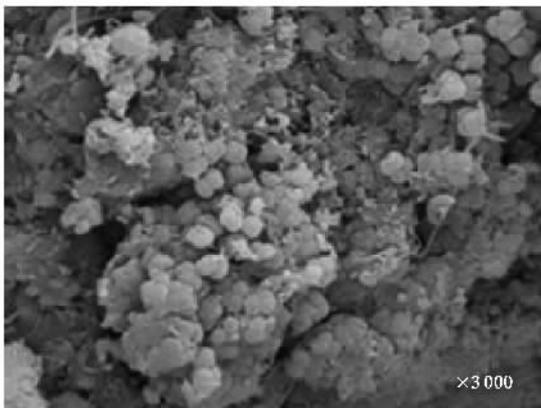


图 6 MSBR 系统中形成的好氧颗粒污泥 SEM 观察

Fig. 6 SEM observation of aerobic granular in MSBR

图 7 是反应器在 150 d 左右的运行期内压力的变化情况. 当压力上升至 50 kPa 左右视为需要清洗. 可以看出, 150 d 中可以分为 4 个清洗周期, 阶段 A 可以看出压力一直呈直线上升状态, 20 d 压力就升至 50 kPa; 之后对膜进行清洗, 膜通量恢复 96% 以上, 同样采用恒流过滤, 可以发现阶段 B 压力呈三段式缓慢上升, 运行周期长达 65 d 以上; 阶段 C 由于清洗不彻底, 初始过滤压力比其他周期高, 因此过滤压力变化情况有别于阶段 B, 很快上升至 50 kPa, 清洗周期有所缩短, 但仍优于阶段 A; 阶段 D 应特别注意彻底清洗, 在经过水洗、药洗之后通量恢复到 95% 以上时才继续运行. 在 30 d 运行中压力上升缓慢, 基本与阶段 B 相符, 在压力上升至 20 kPa 时有一个平稳阶段, 还未达到压力限值. 整个过程可以看出, 清洗周期为阶段 A < 阶段 C < 阶段 B/阶段 D.

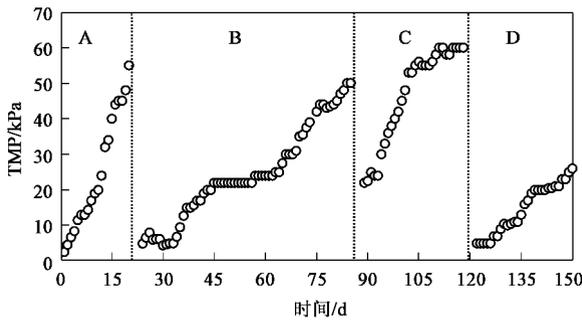


图 7 MSBR 在不同运行阶段的 TMP 变化

Fig. 7 Profile of TMP during different phases in MSBR

在 4 个阶段中, 反应器的污泥由絮状不断聚集生长到污泥颗粒完全形成, 是 TMP 呈现不同特点的主要原因. 阶段 A 污泥处于絮状和部分形成细小颗粒状态, 污泥粒径与接种的常规絮体污泥接近, 颗粒大都在 30 ~ 60 μm 范围(图 8), 出水含有的悬浮颗粒主要是极细小的污泥, 一般为 10 μm 以下(图 9). B、C 和 D 阶段污泥形成颗粒, 粒径平均大小为 200 ~ 394 μm (图 8), 此时出水含有的悬浮颗粒平均粒径在 50 ~ 60 μm 左右(图 9), 比一般反应器的污泥粒径还要大, 这种颗粒分布对减缓膜污染的发生并维持较长时间的稳定运行很有帮助. SBR 的运行方式及污泥颗粒的培养, 使得出水所含的细小污泥含量下降, 因此减小了污泥对膜的堵塞及附着, 这是膜污染减缓的原因之一.

以上结果表明, 污泥的形态变化及污泥颗粒化对膜的过滤性能和膜污染有很大影响. 膜污染是膜反应器系统运行的主要关注问题之一^[21, 22]. 文献中普通浸没式 MBR 的清洗周期通常在 10 ~ 15 d 左

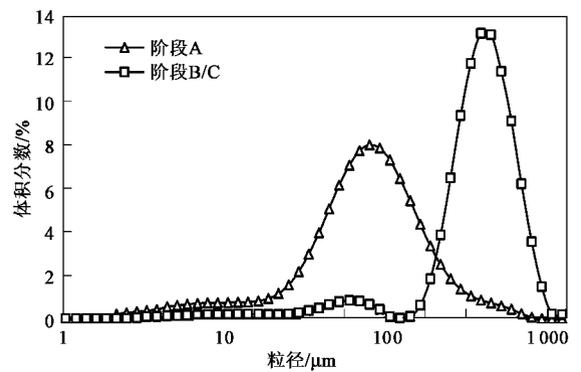


图 8 MSBR 中颗粒污泥在不同阶段的粒径分布

Fig. 8 Size distribution of sludge particles during different phases in MSBR

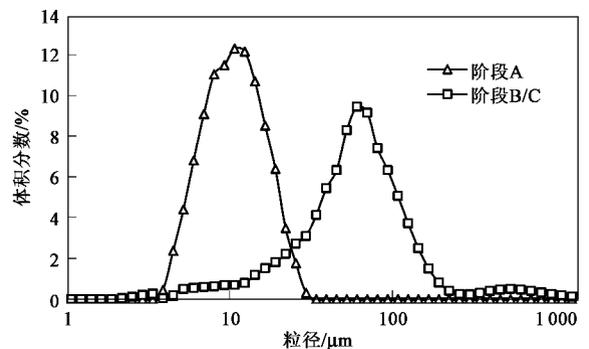


图 9 MSBR 上清液中悬浮颗粒的粒径分布

Fig. 9 Size distribution of suspended particles in supernatant of MSBR

右, 例如李旭东等^[23]在研究间歇曝气 MBR 的压力变化情况时, 前 2 个周期只进行水力清洗时过膜压力急速上升, 在运行第 10 d 就达到临界值 50 kPa, 当采取水力清洗加药洗时, 清洗周期也只延长到 20 d 左右. 张传义等^[24]在通量 $12 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的运行条件下 23 d 时 TMP 急速上升, 清洗周期不到 30 d. 本实验中反应器形成颗粒后, 清洗周期可明显延长至 65 d, 是颗粒形成前清洗周期的 3 倍以上, 也大大高于一般活性污泥膜反应器的清洗周期. 以上结果充分说明了好氧颗粒污泥与分体式膜反应器的结合对减缓膜污染有显著的改善作用.

3 结论

(1) 在进水 COD 200 ~ 1 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, TP 去除率可保持在 80% 以上, TN 去除率在 60% ~ 80%, 氨氮去除率 > 95%, 出水浊度保持在 0.5 NTU 以下, 分体式 MSBR 系统可获得并保持较好的稳定出水水质.

(2)MSBR 中可实现污泥完全颗粒化,在 70 d 时 350 μm 左右的颗粒占 90% 以上,之后污泥继续长大且平均粒径最高达 394 μm 。颗粒的形成对提高 MSBR 的抗冲击负荷能力及减缓膜污染的发生并维持较长时间的稳定运行作用明显。

(3)MSBR 形成颗粒后,膜系统的清洗周期达 65 d,是絮体污泥清洗周期的 3 倍以上,也大大高于一般活性污泥膜反应器的清洗周期,说明好氧颗粒污泥与分体式膜反应器的结合对减缓膜污染有显著的改善作用。

参考文献:

- [1] Pierre L C , Chen V , Fane T A G , *et al.* Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment [J]. *J Membrane Sci* , 2006 , **284** : 17-53.
- [2] Schmit C G , Kauser J , Schmit K H , *et al.* Activated sludge and other aerobic suspended culture processes [J]. *Water Environ Res* , 2009 , **71**(5) : 1127-1193.
- [3] Bailey A D , Hansford G S , Dold P L. The use of crossflow microfiltration to enhance the performance of an activated sludge reactor [J]. *Water Res* , 1994 , **28**(2) : 297-301.
- [4] 桂萍 , 黄霞 , 陈颖 , 等. 膜-生物反应器运行条件对膜过滤特性的影响 [J]. *环境科学* , 1999 , **20**(3) : 38-41.
- [5] 孟耀斌 , 文湘华 , 钱易 , 等. 分置式膜-生物反应器处理生活污水的抗冲击负荷能力 [J]. *环境科学* , 2000 , **21**(5) : 22-26.
- [6] 卜庆杰 , 文湘华 , 黄霞. 新型膜生物反应器在不同通量下的膜污染特性研究 [J]. *环境污染治理技术与设备* , 2005 , **6**(3) : 85-90.
- [7] Vargas A , Ivan M A , German B. Controlled backwashing in a membrane sequencing batch reactor used for toxic wastewater treatment [J]. *J Membrane Sci* , 2008 , **320**(1-2) : 185-190.
- [8] Geng Z , Hall E R , Berube P R. Membrane fouling mechanisms of a membrane enhanced biological phosphorus removal process [J]. *J Membrane Sci* , 2007 , **296** : 93-101
- [9] Bae T H , Han S S , Tak T M. Membrane sequencing batch reactor system for the treatment of dairy industry wastewater [J]. *Process Biochem* 2003 , **39**(2) : 221-231.
- [10] 白晓琴 , 赵英 , 张颖 , 等. 好氧 MBR 与序批式 MBR 处理生活污水的比较 [J]. *中国给水排水* , 2006 , **22**(3) : 28-31.
- [11] Juang Y C , Lee D J , Lai J Y. Fouling layer on hollow-fibre membrane in aerobic granule membrane bioreactor [J]. *J Chin Inst Chem Eng* , 2008 , **39**(6) : 657-661.
- [12] Li X F , Li Y J , Chen J , *et al.* Characteristics of aerobic biogranules from membrane bioreactor system [J]. *J Membrane Sci* , 2007 , **287**(2) : 294-299.
- [13] Li X F , Gao F S , Chen J , *et al.* Treatment of synthetic wastewater by a novel MBR with granular sludge developed for controlling membrane fouling [J]. *Separ Purif Technol* , 2005 , **46**(1-2) : 19-25.
- [14] 朱振中 , 周艳 , 李秀芬 , 等. 好氧颗粒污泥膜生物反应器的运行特性 [J]. *环境科学* , 2006 , **27**(1) : 57-62.
- [15] 王景峰 , 王暄 , 季民 , 等. 颗粒污泥膜生物反应器同步硝化反硝化 [J]. *中国环境科学* , 2006 , **26**(4) : 436-440.
- [16] 竺建荣 , 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究 [J]. *环境科学* , 1999 , **20**(2) : 38-41.
- [17] 张颖 , 吴忆宁 , 任南琪. 污泥膨胀对 SMBR 系统脱氮性能影响的试验研究 [J]. *中国给水排水* , 2007 , **23**(5) : 65-68.
- [18] Tay J H , Yang P , Zhuang W Q *et al.* Reactor performance and membrane filtration in aerobic granular sludge membrane bioreactor [J]. *J Membrane Sci* , 2007 , **304**(1-2) : 24-32.
- [19] 史晓慧 , 刘芳 , 刘虹 , 等. 进料负荷调控培养好氧颗粒污泥的试验研究 [J]. *环境科学* , 2007 , **28**(5) : 1026-1032.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京 : 中国环境科学出版社 , 2002.
- [21] Miura Y , Yoshimasa M , Yoshimasa W , *et al.* Membrane biofouling in pilot-scale membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater : impact of biofilm formation [J]. *Environ Sci Technol* , 2007 , **41** : 632-638.
- [22] Khongnakhorn W , Wisniewski C , Pottier L , *et al.* Physical properties of activated sludge in a submerged membrane bioreactor and relation with membrane fouling [J]. *Separ Purif Technol* , 2007 , **55**(1) : 125-131.
- [23] 李旭东 , 何小娟 , 邱江平. 间歇曝气 MBR 处理低碳高氮磷城市生活污水研究 [J]. *环境科学* , 2008 , **29**(6) : 1533-1537.
- [24] 张传义 , 黄霞 , 王丽萍. 长期运行条件下膜-生物反应器的膜污染特性 [J]. *水处理技术* , 2005 , **31**(5) : 42-45.