

# 好氧颗粒污泥膜生物反应器污泥性状研究

王景峰<sup>1,2</sup>, 王暄<sup>3</sup>, 季民<sup>2\*</sup>, 卢姗<sup>2</sup>, 刘卫华<sup>2</sup>, 杨造燕<sup>2</sup>

(1. 军事医学科学院卫生学环境医学研究所, 天津 300050; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 3. 天津工业大学中空纤维膜材料与膜过程教育部重点实验室, 天津 300160)

**摘要:** 采用厌氧-好氧运行方式的颗粒污泥膜生物反应器(GMBR), 连续运行近 120 d 表现出良好的有机物去除及同步硝化反硝化能力. 对 GMBR 中污泥粒径分布变化研究表明, GMBR 中污泥浓度的增加主要是由于粒径 0.18 ~ 0.45 mm 的小颗粒污泥及小于 0.18 mm 的絮状污泥的增加造成的, 粒径大于 0.45 mm 的颗粒污泥能够基本稳定维持其颗粒形态, 反应器运行末期, GMBR 中颗粒污泥(粒径大于 0.18 mm 的污泥)含量稳定在污泥总量的 60% ~ 65% 以上. 污泥表面电荷量随着污泥组成形态的变化电负性逐渐增加, 80 d 后稳定在  $-0.42 \sim -0.80 \text{ meq} \cdot \text{g}^{-1}$  之间. 污泥表面电荷的负电性增加主要是由小于 0.45 mm 的污泥造成的, 其中小于 0.18 mm 的絮状污泥对其影响最大. 并且, 污泥粒径越大污泥表面负电荷量越少, 两者具有较好的线性关系. 另外, GMBR 中 SVI 稳定在 60 ~ 90 mL/g 之间, 并且随着污泥表面电荷负电性的增加污泥 SVI 值增加, 两者之间具有一定的相关性.

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 颗粒污泥膜生物反应器; 污泥表面电荷; 粒径分布

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)05-1033-06

## Sludge Characteristics in an Aerobic Granular Sludge Membrane Bioreactor

WANG Jing-feng<sup>1,2</sup>, WANG Xuan<sup>3</sup>, JI Min<sup>2</sup>, LU Shan<sup>2</sup>, LIU Wei-hua<sup>2</sup>, YANG Zao-yan<sup>2</sup>

(1. Institute of Hygiene and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Key Laboratory of Hollow Fiber Membrane Materials and Membrane Process of Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract:** Granular sludge membrane bioreactor(GMBR), operated with alternating anaerobic-aerobic mode, showed good organics removal and simultaneous nitrification and denitrification(SND) performances during 120 days operation. Moreover, sludge size distribution examination showed that the increase of sludge concentration in GMBR was mostly due to the increase of small granular sludge with diameter between 0.18 ~ 0.45 mm and flocculent sludge smaller than 0.18 mm, and most of granular sludge larger than 0.45 mm was stably existed in GMBR, at the end of operation granular sludge with diameter larger than 0.18mm remained 60% ~ 65% in GMBR. Sludge surface negative charge increased with the sludge size distribution variation, and surface charge remained  $-0.42 \sim -0.80 \text{ meq} \cdot \text{g}^{-1}$  after 80 days operation. The increase of sludge surface negative charge was mostly caused by sludge smaller than 0.45 mm, thereinto sludge smaller than 0.18 mm had the greatest effect. Moreover, results revealed that the sludge surface negative charge decreased as the sludge size increased, and a linear correlation can be obtained between sludge surface negative charge and sludge size. Sludge in GMBR had good settleability, and SVI was about 60 ~ 90 mL/g. Furthermore results showed that sludge surface charge was correlated with SVI, sludge SVI increased with surface negative charge increased.

**Key words:** aerobic granular sludge; granular sludge membrane bioreactor(GMBR); sludge surface charge; size distribution

膜生物反应器(MBR)作为 1 种高效、紧凑的处理技术在污水处理与回用领域得到了广泛的研究与应用<sup>[1~4]</sup>. 近年来好氧颗粒污泥因其沉降速度快、反应活性高, 利用其空间尺寸可以形成具有多种功能的微环境等特点而倍受关注, 甚至有研究者指出, 好氧颗粒污泥技术因其诸多优点可能会逐渐替代活性污泥技术成为污水生物处理的主流<sup>[5]</sup>.

本研究将好氧颗粒污泥技术与膜技术相结合, 在序批式厌氧-好氧运行的 MBR 中接种好氧颗粒污泥建立颗粒污泥膜生物反应器(granular sludge membrane bioreactor, GMBR), 不仅实现了长期运行下有机物、氮的同步去除, 同时颗粒污泥较大的粒径以及致密的结构也提高了混合液的过滤特性从而减缓

了膜污染. 在此基础上针对 GMBR 中发挥核心优势的颗粒污泥形态及性状的变化特征进行研究, 并对污泥粒径、污泥表面电荷以及 SVI 之间的关系进行讨论.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与运行方式

试验装置如图 1 所示, 反应器有效体积 10 L, U 型聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜组件浸没于反应

收稿日期: 2006-04-14; 修订日期: 2006-06-27

基金项目: 教育部天津大学-南开大学合作项目

作者简介: 王景峰(1974 ~ ), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水生物处理理论与技术.

\* 通讯联系人

器中下部,膜孔径  $0.22\text{ }\mu\text{m}$ ,膜面积  $0.3\text{ m}^2$ .MBR 系统采用序批式运行方式,由时间继电器控制进水、厌氧搅拌、曝气、曝气排水及闲置等全过程,按照图 2 所示程序运行,根据需要选定运行周期以及各操作阶段的启闭时间.进水采用潜水泵进水,厌氧采用电动搅拌机搅拌,好氧采用微孔曝气器曝气,供气量由转子流量计控制.出水采用恒流泵抽吸出水,出水水量由恒流泵调节控制,采用  $8\text{ min}$  出水/ $2\text{ min}$  停的出水方式.1 个周期内出水在出水水箱中混合即为出水水样.

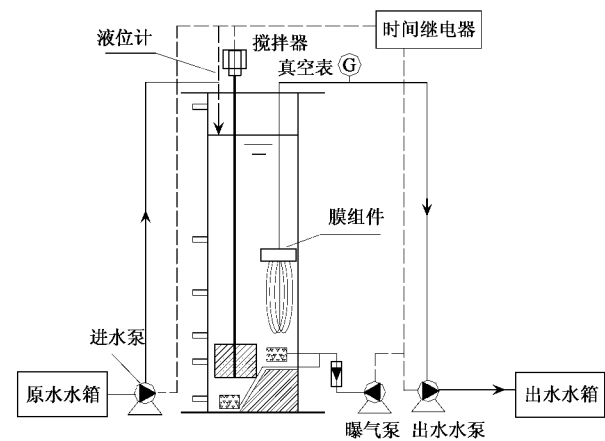


图 1 MBR 反应器系统示意  
Fig.1 Schematic diagram of MBR system

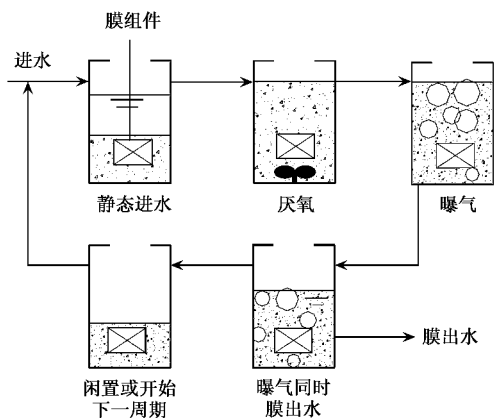


图 2 MBR 系统运行程序  
Fig.2 Operation program of MBR system

反应器具体运行参数为:进水  $5\text{ min}$ ,厌氧搅拌  $60\text{ min}$ ,曝气  $90\text{ min}$ ,曝气并膜出水  $180\text{ min}$ ,闲置  $25\text{ min}$ ,周期总长  $360\text{ min}$ .反应器体积交换率在运行  $1\sim 30\text{ d}$  控制为  $37.4\%$ , $31\sim 60\text{ d}$  增加为  $48.2\%$ , $61\sim 120\text{ d}$  控制在  $51.8\%$ ,相应的膜通量由最初的  $5.2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  增加至  $6.7\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  而后增至  $7.2$

$\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ .反应器运行  $115\text{ d}$  膜组件没有进行任何水力或化学清洗.反应器运行  $15\text{ d}$  后开始排泥,周末于反应器中部排泥,平均 SRT 为  $35\sim 45\text{ d}$ .

1.2 进水水质及接种颗粒污泥

反应器进水以乙酸钠为有机基质,配水主要成分为 ( $\text{mg}/\text{L}$ ):乙酸钠  $400\sim 700$ , $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{N}$   $30\sim 100$ , $\text{KH}_2\text{PO}_4-\text{P}$   $5\sim 15$ , $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $50$ , $\text{CaCl}_2$   $20$ , $\text{KCl}$   $20$ , $\text{MnCl}_2$   $0.1$ , $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.1$ , $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $0.1$ , $\text{ZnSO}_4$   $0.1$ .

以本实验室培养的具有一定同步硝化反硝化能力的聚糖菌颗粒污泥为接种污泥<sup>[6]</sup>,颗粒污泥呈灰黑色细砂状外观,粒径为  $0.8\sim 1.5\text{ mm}$ .光学显微镜下观察污泥呈球形或椭球形、密实且轮廓清晰,环境扫描电镜下污泥多由球菌组成.污泥沉降性能良好,SVI 为  $30\sim 40\text{ mL}/\text{g}$ .

1.3 分析项目及方法

TOC 采用催化氧化法测定 (Shimadzu TOC-V<sub>CPI</sub>).氨氮采用纳氏试剂法测定<sup>[7]</sup>,硝酸盐氮、亚硝酸盐氮采用多离子测定仪 (Hanna C200) 测定,总氮采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定.MLSS 及 SVI 采用标准方法测定<sup>[7]</sup>,溶解氧采用溶氧仪测定 (Hanna HI-9145).污泥表面电荷采用胶体滴定法测定<sup>[8]</sup>,污泥结构及生物相的观察采用光学显微镜 (江南 XS-18) 及环境扫描电镜 (Philips XL30).颗粒污泥粒径分布采用不同孔径 ( $0.18\text{ mm}$ 、 $0.45\text{ mm}$ 、 $0.6\text{ mm}$ 、 $0.9\text{ mm}$ ) 的标准筛筛分,收集相应粒径的污泥分别测定 TSS,并最终确定各组分的比例<sup>[9]</sup>.

2 结果与讨论

2.1 GMBR 中污染物去除效果

序批式颗粒污泥膜生物反应器连续运行近  $120\text{ d}$ ,在 GMBR 运行过程中对有机物、氨氮、总氮等污染物均具有较好的去除效果.由于 GMBR 采用厌氧-好氧循环的运行方式,因此,有机物大部分在厌氧阶段被吸收,并在胞内以 PHB 形式储存;好氧阶段由于氧传质的限制颗粒污泥内部形成的缺氧微环境为反硝化菌提供了适当的反硝化条件,颗粒污泥 MBR 系统中发生同步硝化反硝化,反硝化所需碳源由胞内储存物质 PHB 提供.

其中反应器进水 TOC 为  $160.9\sim 308.4\text{ mg}/\text{L}$ ,GMBR 的 TOC 去除率为  $65.7\%\sim 98.6\%$ ,实际上 GMBR 运行第  $11\text{d}$  时 TOC 去除率即达  $91.6\%$ .另外,颗粒污泥 MBR 始终保持良好的硝化效果,进水氨氮为  $29.8\sim 83.6\text{ mg}/\text{L}$  时,氨氮去除率始终保持在

85.4%~98.9%之间,同步反硝化的总氮去除率为66.1%~95.1%。

2.2 GMBR 中颗粒污泥形态变化特征

粒径是颗粒污泥的重要参数特征之一,对于污泥的沉降性能、传质特性以及生物活性具有显著的影响.显然,GMBR 中颗粒污泥形态的变化对于系统的稳定运行(污染物去除效果、混合液可过滤特性、膜污染状况等)具有重要的影响.因此在 GMBR 运行过程中定期采用筛分法监测污泥粒径变化,并根据接种污泥特征将污泥按照粒径划分为 5 个区间: < 0.18 mm; 0.18 ~ 0.45 mm; 0.45 ~ 0.6 mm; 0.6 ~ 0.9 mm; > 0.9 mm. 目前关于好氧颗粒污泥的粒径尺寸划分还没有明确的定义.因此结合活性污泥微生物聚集体自身特点,以及 MBR 反应器中污泥尺寸相对较小的特点<sup>[10]</sup>,将粒径小于 0.18 mm 的污泥称为絮状污泥,而将粒径大于 0.18 mm 的污泥定义为颗粒化污泥。

GMBR 运行过程中不同粒径范围的污泥占总污泥的质量分数及其污泥浓度变化如图 3、4 所示. GMBR 接种污泥浓度为 3 010 mg/L,从图 4 可以看出,反应器中污泥浓度随着运行时间的延长逐步增加,80 d 后趋于稳定,第 111 d 时总污泥浓度为 7 267 mg/L.其中,粒径大于 0.9 mm 的颗粒污泥初始浓度为 2 387 mg/L,运行初期部分颗粒解体造成其浓度有所降低,运行 20 d 后该粒径范围的污泥浓度趋于稳定,第 111 d 其污泥浓度为 1 794 mg/L,但是由于 GMBR 中总污泥浓度的增加,粒径大于 0.9 mm 的颗粒污泥占总污泥的质量分数在运行前期快速下降(如图 3),至 50 d 左右趋于稳定并维持 25%~35% 之间.粒径为 0.6~0.9 mm 以及 0.45~0.6 mm 的颗粒污泥接种浓度分别为 452 mg/L 及 102 mg/L,运行初期随着粒径大于 0.9 mm 颗粒的部分解体,这 2 个粒径范围的颗粒污泥浓度均有所增加(如图 4),相应地占总污泥的质量分数在运行初期经历了先增加后降低的过程,20 d 后基本趋于稳定,第 111 d GMBR 中粒径为 0.6~0.9 mm 以及 0.45~0.6 mm 的颗粒污泥浓度分别为 672 mg/L 及 449 mg/L,质量分数分别为 9.2% 及 6.2%.粒径为 0.18~0.45mm 的小颗粒污泥初始浓度为 54 mg/L,随着运行过程其污泥浓度和质量分数均缓慢增加,第 50 d 之后增加幅度加大,至 111 d 污泥浓度及质量分数分别为 1 562 mg/L 及 21.5%.粒径小于 0.18 mm 的絮状污泥在 GMBR 中的变化趋势最为明显,运行初期污泥浓度迅速增加,50 d 后趋于稳定,污泥浓度为 2 200 ~

2 800 mg/L,质量分数维持在 35%~40% 之间. 可以看出,在 GMBR 运行过程中,除了粒径大于 0.9 mm 的颗粒污泥在运行初期有小部分解体外,粒径 0.45~0.9 mm 的颗粒污泥基本可以维持形态稳定.另外,反应器接种粒径 > 0.18 mm 的颗粒污泥浓度为 2 995 mg/L,而运行末期粒径 > 0.18 mm 的颗粒污泥浓度增加到 4 476.5 mg/L.由此可知,反应器中污泥浓度的增加主要是由于粒径 0.18~0.45 mm 的小颗粒污泥及小于 0.18 mm 的絮状污泥增加造成的.这意味着在 GMBR 采取的运行方式下,不仅能够基本维持接种颗粒污泥的形态,还能够形成细小的颗粒污泥.运行末期,GMBR 中不同粒径污泥的浓度及质量分数均趋于稳定,粒径 0.18 mm 以上的颗粒污泥约占污泥总量的 60%~65%。

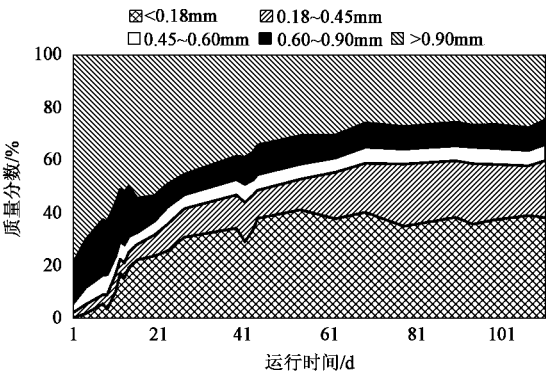


图 3 GMBR 中不同粒径污泥占总污泥的质量分数

Fig.3 Percentage variation of different size sludge in GMBR during operation

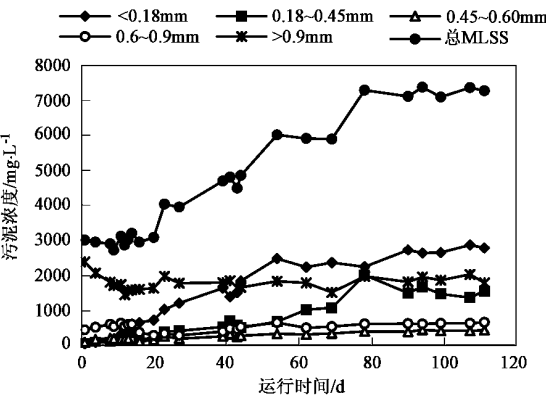


图 4 GMBR 运行过程中不同粒径污泥浓度

Fig.4 Concentration variation of different size sludge in GMBR during operation

2.3 污泥表面电荷特征

2.3.1 GMBR 中污泥表面电荷变化

活性污泥系统体系是 1 个复杂的、不均匀的分散体系,其中约 90%是由亲水性超胶体颗粒和其他颗粒的凝集体组成.通常细菌的  $\xi$  电位在  $-30 \sim -70$  mV 之间,其他憎水胶体如粘土胶体的  $\xi$  电位一般在  $-15 \sim -40$  mV 之间,而藻类的  $\xi$  电位一般在  $-10 \sim -15$  mV 范围内<sup>[11]</sup>.

活性污泥微生物聚集体所带电荷,能够与介质中的离子、质子、电子相互作用,使得污泥中的各种化学反应以及传质过程在污泥絮体与混合液的界面或其相邻的溶液中发生,因此,从某种角度上讲,污泥所带的表面电荷是活性污泥微生物聚集体发挥其代谢功能的重要前提.此外,由 DLVO 理论可知<sup>[11]</sup>,在微生物菌群以及污泥粒子之间的相互凝聚作用中,表面电荷特征也至关重要.当具有相同电荷的污泥颗粒相互靠近到一定程度就会发生双电层重叠,产生静电斥力,形成斥力势能,阻碍污泥粒子接近,而斥力势能的大小与粒子所带电荷数量呈正相关关系.因此,微生物聚集状态又与污泥表面电荷特征密切相关.在 GMBR 中,不同粒径区间的微生物聚集体出现了或凝集或解体的相互转化,因此,伴随着污泥形态的变化,污泥表面电荷特性也发生了明显的变化,如图 5 所示.随着反应器的运行污泥表面电荷从  $-0.213 \text{ meq}\cdot\text{g}^{-1}$  负电性逐渐增加,在 GMBR 运行的 1~30 d 稳定在  $-0.2 \sim -0.35 \text{ meq}\cdot\text{g}^{-1}$  之间,此后到 80 d 在  $-0.3 \sim -0.8 \text{ meq}\cdot\text{g}^{-1}$  范围内变化;80 d 以后污泥表面电荷又略有降低保持在  $-0.42 \sim 0.7 \text{ meq}\cdot\text{g}^{-1}$  之间.

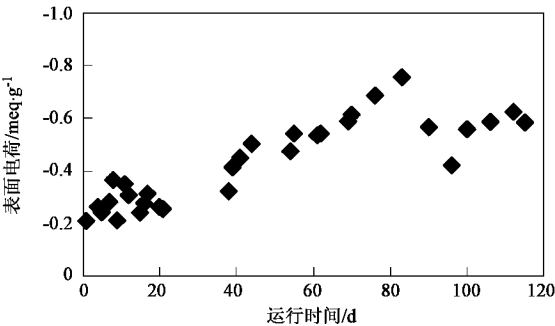


图 5 GMBR 运行过程中电荷变化特征

Fig.5 Surface charge variation of granular sludge in GMBR during operation

2.3.2 污泥形态变化对污泥表面电荷影响

图 6 为单位污泥表面电荷与 GMBR 中不同粒径污泥质量分数变化的相对关系.由于 GMBR 中污泥形态在不断地变化,因此,不同的粒径区间污泥对污泥整体所带负电荷的影响存在着明显的差别.图 6

所示可以看出,污泥以大粒径的颗粒污泥为主时,单位污泥负电荷较小.当粒径  $>0.9 \text{ mm}$  的颗粒污泥占污泥质量分数的 60% 以上,而絮状污泥在 5% 以下时,单位污泥电荷为  $-0.2 \text{ meq}\cdot\text{g}^{-1}$  左右.而随着单位污泥负电荷量达到  $-0.5 \text{ meq}\cdot\text{g}^{-1}$  以上时,粒径  $>0.9 \text{ mm}$  的颗粒污泥占污泥质量分数下降到 30% 左右,絮状污泥的含量则上升到 35%,  $0.18 \sim 0.45 \text{ mm}$  的小颗粒污泥也从最初的 5% 以下上升到 15% 以上.并且,随着这 2 个粒径区间污泥含量的增加,污泥负电荷量仍有所增加,由此可知,  $<0.45 \text{ mm}$  的污泥是造成单位污泥负电荷数量增加的主要因素,其中絮状污泥影响最大.

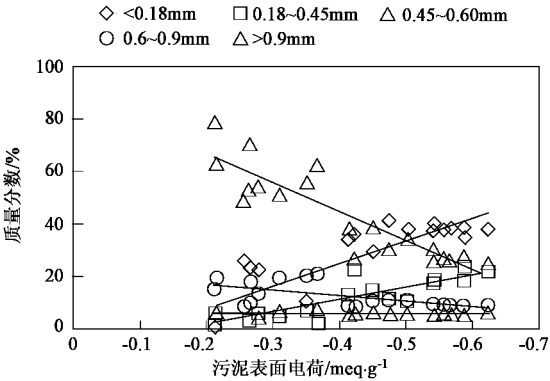


图 6 污泥各粒径区间含量与表面电荷的相关关系

Fig.6 Relation of percentage of different size sludge and surface charge of granular sludge in GMBR during operation

污泥的形态结构与其表面特性往往是相互影响的,通常絮状污泥结构疏松且含水率较高,而颗粒污泥结构相对致密,微生物菌体要克服彼此之间的静电斥力保持稳定的颗粒结构,因此会使污泥表面电荷有所改变.图 7 所示为 GMBR 运行第 109 d 不同粒径区间污泥所带电荷量情况,可以看出,絮状污泥的负电荷量是颗粒污泥的 1.57~3.89 倍,而颗粒污泥

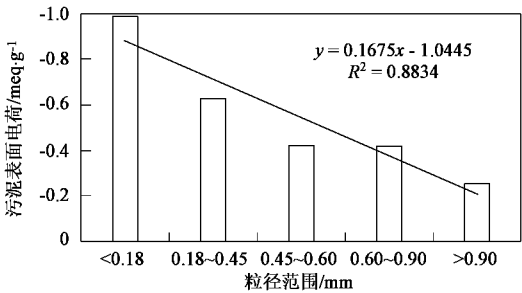


图 7 污泥粒径与污泥电荷量的相关关系

Fig.7 Relation of sludge size and surface charge of granular sludge in GMBR

随着污泥粒径的增加负电量逐渐减小,拟合污泥粒径与污泥电荷量可知两者具有较好的线性关系, $R^2$  值为0.883 4.

2.4 GMBR 中污泥沉降性能

污泥沉降性能是污泥自身性状的综合表现,污泥沉降性能的好坏是由微生物聚集体形态结构特征、污泥胞外聚合物数量和成分以及污泥表面电荷特征等多种因素决定的.同时污泥沉降性能的好坏也与生物代谢造成的膜污染之间有着某种密切的联系<sup>[12]</sup>.GMBR 中 SVI 与 MLSS 的变化如图 8 所示.在 GMBR 中随着运行初期小于 0.18 mm 絮状污泥的增加,第 20 d 时 SVI 从 29.9 mL·g<sup>-1</sup> 增加到 64.7 mL·g<sup>-1</sup>.此后随着污泥各粒径组分逐渐稳定的变化趋势,SVI 值在 60 ~ 90 mL·g<sup>-1</sup> 之间变化.在 GMBR 运行到第 89 d 液位计出现问题,造成 2 个周期没能进水,致使膜暴露在空气中,第 2 d 排除故障后污泥 SVI 值上升至 119 mL·g<sup>-1</sup>,随后 SVI 又开始逐渐下降,大约在 10 d 左右,SVI 值又降至 90 mL·g<sup>-1</sup> 以下.

目前对于污泥表面电荷特征与污泥沉降性能的关系尚无定论,通常情况下,随着污泥表面的负电荷增加微生物体之间的斥能就会有所增加,从而使 SVI 值增加.但也有研究认为,SVI 从 100 mL·g<sup>-1</sup> 增加到 725 mL·g<sup>-1</sup>,而污泥表面电位几乎无变化.在 GMBR 整体运行过程中,污泥电荷特性与污泥的沉降性能 SVI 具有较好的相关性,如图 9 所示, $R^2$  值为0.694 5.

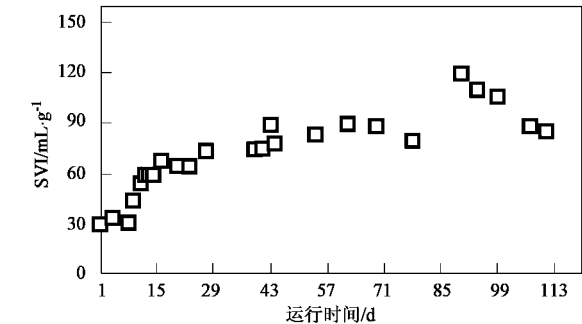


图 8 GMBR 运行过程中污泥 SVI 变化特征

Fig.8 SVI variation of granular sludge in GMBR during operation

3 结论

(1)采用厌氧/好氧循环运行方式的好氧颗粒污泥膜生物反应器连续运行近 4 个月,除对有机物具有良好的去除效果外,还实现了好氧阶段基于胞内储存物质的同步硝化反硝化.其中 TOC、氨氮、总氮

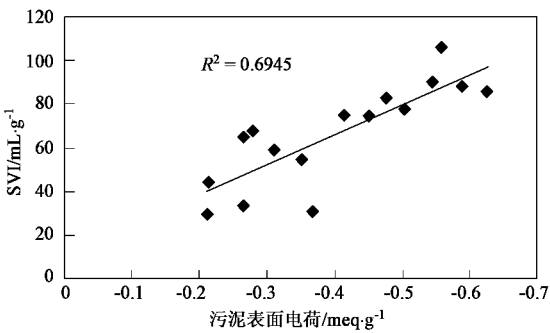


图 9 污泥表面电荷与 SVI 的相关关系

Fig.9 Relation of SVI and surface charge of granular sludge in GMBR

周期去除率分别为 65.7% ~ 98.6%, 85.4% ~ 98.9%和 66.1% ~ 95.1% .

(2)对 GMBR 中污泥粒径分布变化的监测结果表明,运行初期粒径 > 0.9 mm 的大颗粒污泥有小部分解体,其余粒径大于 0.45 mm 的颗粒污泥基本可以维持形态稳定.反应器中污泥浓度的增加主要是由于粒径 0.18 ~ 0.45 mm 的小颗粒污泥及小于 0.18 mm 的絮状污泥的增加造成的.运行末期,GMBR 中不同粒径污泥的浓度及质量分数均趋于稳定,粒径 0.18 mm 以上的颗粒污泥约占污泥总量的 60% ~ 65% .

(3)随着反应器的运行污泥表面电荷从 - 0.213 meq·g<sup>-1</sup> 逐渐增加,在 GMBR 运行的 1 ~ 30 d 稳定在 - 0.2 ~ 0.35 meq·g<sup>-1</sup> 之间,此后到 80 d 左右污泥表面电荷量在 - 0.3 ~ - 0.8 meq·g<sup>-1</sup> 范围内变化;80 d 以后污泥表面电荷又略有降低保持在 - 0.45 ~ 0.7 meq·g<sup>-1</sup> 之间.GMBR 中污泥表面电荷的负电性增加主要是由小于 0.45 mm 的污泥造成的,其中小于 0.18 mm 的絮状污泥对其影响最大.

(4)GMBR 中污泥的沉降性能较好,SVI 基本稳定在 60 ~ 90 mL·g<sup>-1</sup> 之间.并且污泥表面电荷与 SVI 值之间具有一定的相关性,即随着污泥表面电荷负电性的增加污泥 SVI 值增加.

参考文献:

[ 1 ] Han S S, Bae T H, Jang G G, *et al.* Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system[J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(7): 2393 ~ 2400.

[ 2 ] 张捍民,肖景霓,成英俊,等.强化膜生物反应器脱氮除磷性能对比试验研究[J].*环境科学学报*, 2005, **25**(2): 242 ~ 248.

[ 3 ] Yeom I T, Nah Y M, Ahn K H. Treatment of household wastewater using an intermittently aerated membrane bioreactor [ J ]. *Desalination*, 1999, **124**: 193 ~ 204.

[ 4 ]

Jun B H, Miyanaga K, Tanji Y, *et al.* Removal of nitrogenous and carbonaceous substances by a porous carrier-membrane hybrid process for wastewater treatment[J]. J Biochem Eng, 2003, **14**(1): 37 ~ 44.

[ 5 ]

de Bruin L M M, de Kreuk M K, van der Roest H F R, *et al.* Aerobic granular sludge technology: An alternative to activated sludge? [J]. Wat Sci Technol, 2004, **49**(11/12): 1 ~ 7.

[ 6 ]

王景峰, 王暄, 季民, 等. 聚糖菌颗粒污泥基于胞内储存物质的同步硝化反硝化[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 473 ~ 477.

[ 7 ]

国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.

[ 8 ]

Jia X S, Fang Herbert H P, Furumai H. Surface charge and extracellular polymer of sludge in the anaerobic degradation process [J]. Wat Sci Technol, 1996, **34**(5 ~ 6): 309 ~ 316.

[ 9 ]

Laguna A, Ouattara A, Gonzalez R O, *et al.* A simple and low cost technique for determining the granulometry of upflow anaerobic sludge blanket reactor sludge[J]. Wat Sci Technol, 1999, **40**(8): 1 ~ 8.

[ 10 ]

张树国, 顾国维, 吴志超. 膜生物反应器中污泥特性对膜污染的影响研究[J]. 工业水处理, 2003, **23**(12): 8 ~ 11.

[ 11 ]

严煦世, 范瑾初. 给水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 254 ~ 258.

[ 12 ]

王勇, 孙寓姣, 黄霞. 膜-生物反应器中活性污泥沉降性能与膜污染相关性研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(3): 396 ~ 400.

# 欢迎订阅 2007 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年, 由中国科学院主管, 中国科学院生态环境研究中心主办, 是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来, 始终坚持“防治污染, 改善生态, 促进发展, 造福人民”的宗旨, 报道我国环境科学领域内具有创新性高水平, 有重要意义的基础研究和应用研究成果, 以及反映控制污染, 清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想, 理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行, 并在国内外科技界有较大影响, 被国内外一些重要检索系统收录, 如美国医学索引 MEDLINE; 美国工程索引 EI; 美国化学文摘 CA; 俄罗斯文摘杂志 AJ; 美国生物学文摘预评 BP; 美国医学索引 IM; 日本科学技术情报中心数据库 JICST; 英国动物学记录 ZR; 剑桥科学文摘 (CSA): Environmental Sciences; 剑桥科学文摘 (CSA): Pollution Abstracts; 剑桥科学文摘 (CAS): Life Sciences Abstracts 等; 国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库 (CSTPCD); 中文科技期刊数据库 (维普); 中国期刊全文数据库 (CNKI); 数字化期刊全文数据库 (万方); 中国科学引文数据库 (CSCD); 中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅, 如有漏订的读者可直接与编辑部联系, 办理补订手续.

《环境科学》2007 年为 16 开本, 40 元/册, 全年 12 期.

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 0205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号 (2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn