

污泥龄对膜生物反应器性能的影响

张景丽^{1,2}, 曹占平¹, 张宏伟¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津城市建设学院环境与市政工程系, 天津 300384)

摘要:研究了膜生物反应器污泥龄对胞外聚合物(EPS)含量、污泥特性、污泥颗粒粒径分布及膜过滤阻力的影响. 结果表明, 污泥龄(SRT)为 30 d 时混合液中胞外聚合物(EPS)和膜面上的 EPS 含量分别约为 90 mg/g、0.8 g/m², 随污泥龄的延长二者同步增加, EPS 在膜面上几乎没有积累; 混合液 EPS 含量的增加改变了细菌表面电荷且增大了细菌表面亲水基和疏水基的比例, 使细菌存在状态由不稳定型(R 型)向稳定型(S 型)转变, 造成污泥的沉降困难; 在长污泥龄运行中, 混合液中污泥颗粒呈现双峰分布, 泥龄 30 d 时在 0.5 μm 和 16 μm 处有 2 个峰且平均粒径约 14 μm , 污泥龄延长双峰分布向颗粒小的方向移动; 混合液中微细颗粒含量及粒径分布对膜污染起决定性作用. 综合考虑膜污染和污泥特性, 膜生物反应器的污泥龄应控制在优势菌最小世代时间(运行温度下的最大比增长速度)的 120 倍以下.

关键词:膜生物反应器; 污泥龄; 粒径分布; 胞外聚合物; 污泥特性; 过滤阻力

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2788-06

Effects of Sludge Retention Time (SRT) on the Characteristics of Membrane Bioreactor (MBR)

ZHANG Jing-li^{1,2}, CAO Zhan-ping¹, ZHANG Hong-wei¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: The effects of sludge retention time (SRT) on extracellular polymeric substances (EPS) content, the characteristics of sludge, the size distribution of sludge particles and the membrane resistance of filtration in the membrane bioreactor were studied. The results indicate that the EPS content is about 90 mg/g in the mixed liquor and 0.8 g/m² on the membrane surface at 30 d of SRT. And EPS contents increase simultaneously with the extension of SRT, but EPS is hardly accumulated on the membrane surface. In addition, the electric charge on the surface of bacteria change and the proportion of hydrophilic group and hydrophobic group enhance with the rise of the EPS content, then the bacteria are transformed from the unstable (R) from to the stable (S) and the sludge is difficult to settle. The size-distribution profile of particles in the mixed liquor presents a bimodal shape at the long SRT and the peak values shift to the smaller range with SRT extension, at 30 d of SRT the average size of particles is about 14 μm and the two peaks occur at 0.5 μm and 16 μm , respectively. It shows that the content and the size distribution of small particles in the mixed liquor are crucial to the membrane fouling. It is found that it is suitable to control the SRT of membrane bioreactor below 120 times of the shortest generation-time of dominant bacteria (at the highest specific growth rate under the operation temperature) considering the membrane pollution and the characteristics of the mixed liquor.

Key words: membrane bioreactor (MBR); sludge retention time (SRT); size distribution; extracellular polymeric substances (EPS); sludge characteristics; filtration resistance

膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)是一种将高效膜分离技术与活性污泥生物处理单元相结合的新型水处理技术. MBR 去除污染物是活性污泥生化作用和膜过滤物化作用的耦合, 活性污泥的代谢作用是去除污染物的中心环节. 膜的截留使膜生物反应器形成了一个相对封闭的环境, 使膜生物反应器具有一些不同于传统活性污泥系统的特性.

目前, 污泥龄(SRT)对 MBR 的影响还没有理论性的研究结论, 原则上 MBR 的运行对 SRT 没有限制. 一些学者认为较长的 SRT 使 MBR 中细菌增殖减慢^[1]. 还有学者研究了不排泥运行的 MBR, 发现其出水水质好、降解效率稳定、耐冲击性能好、污泥产率低^[2,3], 但氧的传递阻力和膜阻力的增加大幅度提

高了运行费用^[1]. 污泥絮体大小、混合液污泥浓度 (MLSS)、胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 含量等都是影响 MBR 膜污染的重要因素^[4], 且与 MBR 的 SRT 密切相关^[5], 过去对 SRT 和 EPS 的关系研究较多, 有人报道 EPS 含量随着 SRT 延长而增大^[5], 有人则认为减小^[6,7]. EPS 的存在不利于污泥沉降^[8], 目前有关 EPS 含量对微生物存在形态以及微生物形态对膜污染的影响则研究较少^[9].

收稿日期: 2007-09-29; 修订日期: 2007-12-03

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(08JCZDJC24300); 天津市科技创新基金项目(06FZZDSH00900)

作者简介: 张景丽(1970~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水污染治理理论与技术, E-mail: jinglizhangczp@gmail.com

本试验主要研究膜生物反应器的污泥龄对 EPS 含量、污泥颗粒粒径分布特性、过滤阻力及 EPS 含量对细菌存在状态等因素的影响,并探讨这些因素之间的关系,结合试验结果对膜生物反应器污泥龄提出控制依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置为一体式膜生物反应器,容积为 100 L,采用中空纤维膜组件 2 支(天津工业大学提供),材质为改性 PVDF,膜面积 0.2 m²/支,纤维外径 1.0 mm,内径 0.65 mm,膜孔径 0.22 μm,试验工艺流程见图 1.采用间歇抽吸出水,抽吸 12 min,停 3 min,停抽阶段仍由曝气装置持续曝气提供反应器中所需氧气.运行中反应器的温度为(20±5)℃,DO 为(2±1) mg/L,水力停留时间(HRT)为 6 h.活性污泥取自天津某污水处理厂二沉池回流污泥,一次接种 MLSS 为3 500 mg/L后开始运行,连续运行了 90 d,第 1 阶

段运行 60 d 未排泥,调整反应器 SRT 与运行时间同步,第 2 阶段运行 30 d,SRT 保持 30 d.

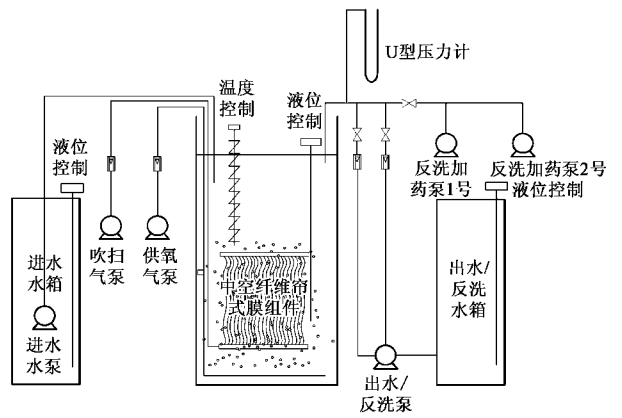


图 1 MBR 工艺流程示意
Fig.1 Schematic diagram of MBR

1.2 试验水质

试验用水采用天津某污水处理厂初沉池出水,水质指标如表 1 所示。

表 1 试验用水水质¹⁾/mg·L⁻¹

Table 1 Characteristics of influent in experiment/mg·L⁻¹

pH 值	COD	NH ₄ ⁺ -N	TP	TN	SS	色度/度	总硬度
8.1~7.1(7.5)	485~147(198)	63.2~31.3(48)	5.5~13.4(10.56)	66.8~38.5(58)	400~20(150)	80~160(100)	(395.5)

1)括号内数据为均值

1.3 分析方法

SV、SS、COD、NH₄⁺-N、MLVSS 和 MLSS 等采用标准方法测定^[10];微生物相采用光学显微镜观察;EPS 的测定^[11]:向离心试管加入待测样品 5 mL,加 2% EDTA 溶液 2 mL,定容至 10 mL,在振荡器中 20℃下萃取 5 h,然后在转速为 6 880 r/min 的离心机内离心 20 min,取上清液用 0.45 μm 膜过滤后测定,以多糖、蛋白质和核酸总量表征;膜表面 EPS 的测定:将膜组件取出,在膜组件不同位置选取 30 根膜丝,将膜丝上的污泥刮下,用蒸馏水清洗膜丝,洗脱液称重并搅拌均匀后,再按照悬浮 EPS 提取方法测定,测定结果换算成 g/m²;污泥粒径分布采用激光粒度仪(Bi9300H)测定。

2 结果与讨论

2.1 SRT 对 EPS 含量的影响

EPS 是微生物在一定环境下分泌于体外的高分子聚合物.许多学者认为 EPS 对活性污泥絮凝和沉降性能影响很大,对于 MBR 工艺 EPS 的含量对污泥

的沉降性能起决定性的作用^[12].MBR 工艺中膜的无选择截留作用,使大量 EPS 保留在反应器中,导致 EPS 在曝气池中积累^[13].

反应器混合液中 EPS 浓度用 P_v 表征,膜表面 EPS 含量用 P_u 来表征, P_v 和 P_u 随运行时间变化如图 2 所示.在运行 30 d 内,混合液中 EPS 浓度变化不大,在 70~90 mg/g 之间;混合液 EPS 浓度在 30~40 d 内快速增长,由 83 mg/g 增加到了 128 mg/g,60 d 时混合液 EPS 浓度累积到 143 mg/g,推测 EPS 的增加是内源呼吸加剧的结果.第 2 阶段开始后混合液中 EPS 浓度快速下降,保持在 90 mg/g 左右,这主要是因为排泥将部分 EPS 排出系统,同时使污泥微生物的内源代谢作用减弱所致.试验发现,单位膜面上 EPS 的量随着反应器内混合液 EPS 浓度同步变化,在膜面上几乎没有积累,分析认为试验所用的改性 PVDF 膜材料呈中性,具有亲水性,润湿角为 55°,膜表面可与水分子间形成氢键,在膜表面形成一层有序的水分子层^[14],使 EPS 中的蛋白质和多糖等物质与膜表面的作用力(电性力及范德华力)减弱,

无法在膜表面积累(这也是亲水性膜抗污染能力强的原因).第2阶段膜表面EPS的含量基本保持在 0.8 g/m^2 ,可见控制合适的SRT可使混合液和膜面上的EPS含量保持在较低的水平.

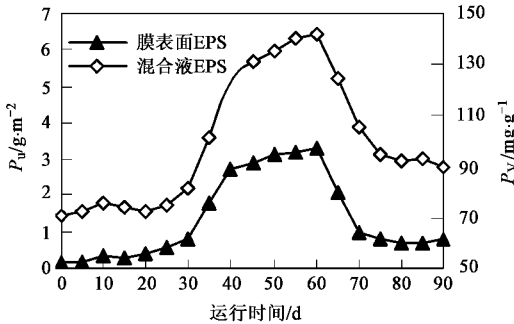


图2 MBR混合液和膜表面EPS含量随运行时间的变化
Fig.2 Content variations of EPS in mixed liquid and EPS on membrane surface with operation time

2.2 SRT对MLSS、MLVSS及SV的影响

试验中混合液的MLVSS、MLSS、MLVSS/MLSS及SV随运行时间的变化如图3所示.

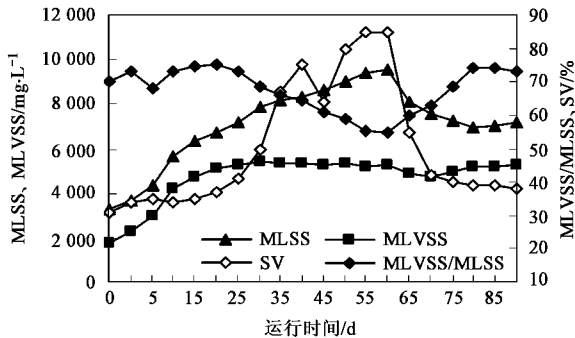


图3 MLSS、MLVSS、MLVSS/MLSS及SV随运行时间的变化
Fig.3 Profiles of MLSS, MLVSS, MLVSS/MLSS and SV with operation time

试验前30 d内MLVSS和MLSS值随SRT延长逐渐增大.30 d后MLVSS趋于一稳定值,基本在 $4\,800\text{ mg/L}$ 左右,说明细菌的增殖量和死亡量相当;而进水中难降解SS的积累以及微生物代谢产物的积累使MLSS继续增加,在60 d时达到 $9\,180\text{ mg/L}$.从图3可见,30 d后随SRT的延长MLVSS/MLSS值减小,60 d时下降至59%,即污泥活性不断降低.第2阶段MLSS、MLVSS及MLSS/MLVSS很快趋于稳定,分别约为 $4\,800\text{ mg/L}$ 、 $6\,600\text{ mg/L}$ 和0.73.

第1阶段运行30 d后,SV值由42%迅速升高至81%且出现大的波动,这表明污泥的沉降性能恶化.显微镜观察到污泥絮体解体残片增多,细菌主要

以球菌和杆状菌为主,原生动物和后生动物很少.试验第2阶段SV%稳定在40%左右.

2.3 EPS含量对微生物存在形态的影响

随着SRT延长,微生物代谢特征及细菌存在形态呈现出独特的规律.泥龄的延长、营养的缺乏,微生物的内源呼吸加剧,产生大量微小细胞壁碎片并释放出大量EPS,代谢产物不断积累,微生物多样性迅速下降.EPS的主要成分为蛋白质和糖类,而腐殖酸、尿酸和DNA等较少,蛋白质和糖类分别带负、正电荷.因细菌表面带有负电荷,可使糖类在细菌表面的EPS中占主导地位,直接覆盖于细菌细胞壁外的EPS的成分组成及数量必然影响着污泥的表面特性^[15].最近研究发现,蛋白质、腐殖酸和尿酸等是提供疏水性的主要成分,而糖类则是提供亲水性的成分^[16,17].随着泥龄的延长,混合液中EPS的含量增加,相应地糖类含量也增多,细菌表面EPS中糖类随之增加,细菌表面亲水基和疏水基的比例变大,即细菌的亲水性增加使细菌存在状态由不稳定型(R型)向稳定型(S型)转变,增大了微生物稳定型(S型)和不稳定型(R型)的比例,造成微生物的沉降困难.Liao等^[18]认为对于污泥沉降性能,细菌表面EPS中的蛋白质与糖类的比值比表面电荷的影响更直接.

细菌表面EPS的含量及糖类与蛋白质的比例的增加引起了细菌存在状态的改变,另外细菌表面多糖类大分子物质向外延伸,当其含量较高时,其位阻的作用^[19]可阻止细菌间相互的进一步接近,絮凝作用减弱,使絮体结构松散、易破碎,微细颗粒增多.

对比图2和图3,EPS和SV的变化具有同步性,EPS在30~60 d的快速增加与污泥沉降性能的恶化相吻合,EPS含量的增加改变了细菌存在形态,而细菌存在形态影响其沉降性能.EPS积累时,SV也处于高数值,当泥龄保持30 d时,EPS和SV都保持相对稳定.

2.4 SRT对MBR中污泥颗粒粒径的影响

MBR工艺中曝气强度所造成的剪切力会减小污泥颗粒粒径,污泥颗粒被剪切得越小,混合液中的EPS会越高^[20],这直接影响了污泥的沉降性能.小颗粒污泥虽有利于增强传质效果,但会恶化污泥沉降性能,增加膜的过滤阻力.

图4为不同SRT下污泥颗粒平均粒径分布情况.试验第1阶段随着SRT的延长,平均污泥粒径由运行初期的 $72\text{ }\mu\text{m}$ 减小到60 d时的 $4.3\text{ }\mu\text{m}$,特别是运行前30 d污泥平均粒径迅速减小,30 d后污泥平

均粒径 $< 15\ \mu\text{m}$, 污泥平均粒径随 SRT 的延长而减小的趋势明显. 在运行的第 2 阶段, 保持 SRT 为 30 d, 污泥平均粒径基本保持在 $15\ \mu\text{m}$ 左右. Henriques 等^[21] 探讨了 MBR 和传统活性污泥系统中污泥粒径大小, 发现 MBR 中平均污泥粒径为 $(29.6 \pm 0.8)\ \mu\text{m}$, 而传统活性污泥系统中则为 $(72.6 \pm 1.4)\ \mu\text{m}$, 其认为不可降解 COD 的积累是造成 MBR 中污泥粒径偏小的主要原因. 污泥颗粒粒径的变小一方面是曝气在膜面产生的剪切力阻止了大颗粒絮体的形成, 更主要的是泥龄的延长增加了 EPS 的含量, 使细菌存在状态由不稳定型(R 型)向稳定型(S 型)转变, 造成微生物的絮凝困难, 颗粒粒径减小.

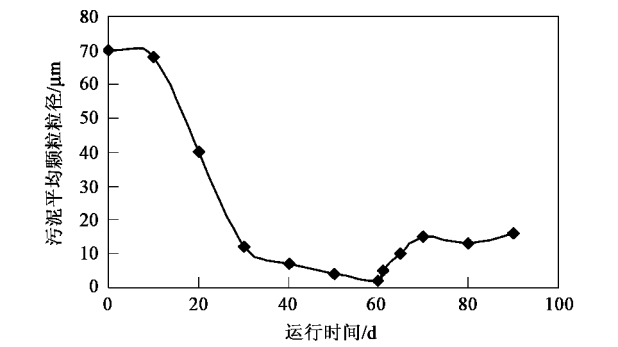


图 4 MBR 中污泥颗粒平均粒径随运行时间的变化
Fig.4 Profile of average particle size of sludge with operation time in MBR

试验还对 MBR 中活性污泥粒径分布及粒径颗粒累计百分比进行了测定. SRT 为 30 d 时的结果如图 5 所示, 混合液中的污泥颗粒平均粒径约 $14\ \mu\text{m}$, 在 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $16\ \mu\text{m}$ 处有 2 个峰. 从图 5 可看出, $< 40\ \mu\text{m}$ 的颗粒占颗粒总数的 96.1%, $< 0.2\ \mu\text{m}$ 的颗粒占 0.4% 左右. 试验中还发现 SRT 更长时, 颗粒分布的 2 个峰依然存在, 但峰值向颗粒小的方向移动; 当泥龄 $< 30\ \text{d}$ 时, 污泥颗粒向大的方向移动且双峰分布变得不明显. 在 MBR 中长泥龄的污泥颗粒粒径呈双峰分布, 这可能是由于微生物代谢产物(EPS 和细胞碎片颗粒部分)和微生物共同作用, 部分细菌以几个或十几个细菌相结合存在, 部分细菌以单个悬浮状态存在的缘故.

2.5 过滤阻力随运行时间的变化

多年来混合液污泥颗粒的粒径作为影响膜污染的重要指标得到了广泛关注. Bai 等^[22] 发现混合液中小颗粒物质对膜污染起主要作用.

MBR 运行中膜阻力随时间的变化如图 6 所示, 流量恒定为 $15\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 试验第 1 阶段的前 30 d,

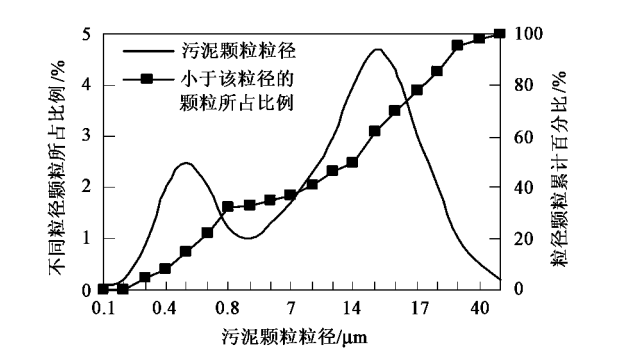


图 5 MBR 中污泥颗粒粒径分布
Fig.5 Distribution of particle size of sludge in MBR

膜阻力较小, 在 $1.2 \times 10^{13} \sim 2.0 \times 10^{13}\ \text{m}^{-1}$ 之间, 阻力增加较慢; 30 ~ 40 d 时膜过滤阻力增长较快, 之后随着 SRT 的延长, 阻力逐渐上升并趋向稳定值. 在试验第 2 阶段, 定期排泥使过滤阻力快速降低, 并稳定在 $2.0 \times 10^{13}\ \text{m}^{-1}$ 左右.

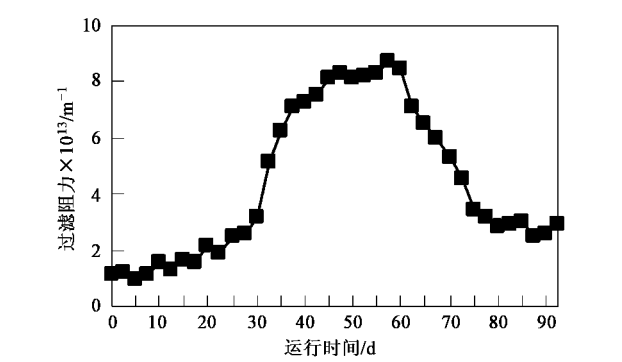


图 6 过滤阻力随运行时间的变化
Fig.6 Profile of filtration resistance with operation time

在过滤过程中, 较大的污泥絮体在滤饼层中形成较大的空隙, 从而形成阻力较小的污染层; 微小颗粒能够导致滤饼层或过滤介质的堵塞, 使过滤性能下降. Lim 等^[23] 研究了颗粒尺寸分布不同的 2 种污泥颗粒对膜污染的影响, 结果表明较小污泥颗粒对于膜污染影响较大. 随 SRT 的延长, 污泥平均粒径减小, 微细颗粒数增多, 当有一定量污泥颗粒大小接近膜孔直径后, 颗粒堵塞膜孔, 膜阻力开始增大^[21]. 泥龄为 30 d 时, $< 1\ \mu\text{m}$ 的颗粒占颗粒总数的 35.5%, $< 0.2\ \mu\text{m}$ 的颗粒占 0.4% 左右, 微细颗粒的含量已成为膜过滤阻力的控制因素, EPS 在 30 ~ 40 d 的明显增加, 改变了细菌的存在形态, 使得 MBR 反应器中污泥的絮凝性变差, 吸附能力弱, 同时泥龄的延长使微生物内源代谢、自身氧化残留物增加, 使混合液中细微颗粒大量增加, 大量微细颗粒特别是

与膜孔径在同一个数量级的微细颗粒更容易造成膜的堵塞^[24,25]使过滤阻力急剧增加.40~60 d 期间微细颗粒数已不再是膜孔堵塞的限制条件了,过滤阻力基本稳定.另外,从 EPS 在膜的表面不富集来看,微细颗粒的含量和粒径分布,对膜过滤阻力有重要影响,颗粒粒径越小^[26]则颗粒越易在膜孔及膜表面沉积吸附,造成严重的膜污染,可以判定该部分颗粒是膜孔堵塞的最主要因素之一.当污泥龄控制合理时,污泥性状较好,吸附能力强,可减少混合液中微粒数,减缓膜过滤阻力.

2.6 SRT 对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除效果

运行期间进水和膜出水的 COD、 NH_4^+ -N 浓度随时间的变化如图 7 所示.

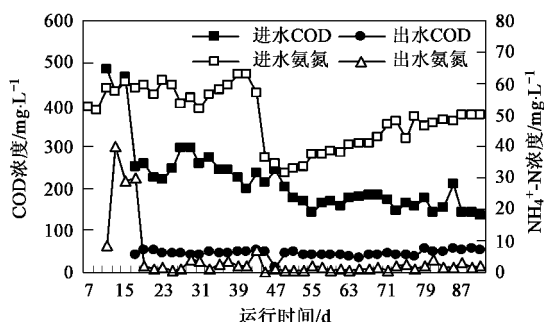


图 7 MBR 进、出水 COD 和 NH_4^+ -N 浓度随运行时间的变化

Fig.7 Concentration profiles of COD, NH_4^+ -N in influent and effluent of MBR with operation time

从图 7 可以看出,进水 COD 为 485~155 mg/L,出水 COD 为 57.5~14.1 mg/L,平均出水 COD 为 44.5 mg/L,去除率为 60.8%~95.8%.进水氨氮浓度 63.2~31.3 mg/L,出水氨氮浓度为 6.1~0.3 mg/L,去除率在 77%~99%.从试验数据上看,延长泥龄对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除率几乎没有影响.尽管随着 SRT 的延长使微生物形态改变,部分微生物处于内源呼吸期,产生大量的 EPS 及难降解的细胞壁等微细颗粒物,但由于 MLVSS 较为稳定,对污染物的降解能保持较高的效率,再加上膜组件的截留作用将高分子量的 EPS 和细胞壁等物质都截留在反应器内,所以保证了出水效果的稳定.

2.7 SRT 与优势微生物的关系

污泥龄是目前生化系统设计的基础性参数,具有理论性的指导意义.SRT 的延长使 EPS 含量增加、细菌存在形态发生改变、污泥的絮凝性降低、微生物代谢过程中产生的细胞残留微粒增多.微细颗粒分布和含量是膜过滤阻力产生的主要原因,因此 SRT

是 MBR 的主要控制参数,适宜的 SRT 是 MBR 稳定运行的关键,SRT 的确定与 MBR 中的优势菌的比增长密切相关.

试验用水为市政污水,有机物及氨氮的去除是主要目标,在这一过程中,异养菌占主要地位,异养菌最大比增长速率 μ_{mH} 表现为比耗氧速率 (specific oxygen uptake rate, OUR) 的最大值,因此 μ_{mH} 的测定以氧吸收为基础.采用 Chudoba 法^[27]测定占优势的异养菌比增长率为 4 d^{-1} ,在 30 d 泥龄时,异养菌约繁殖 120 代;自养菌(硝化菌)的比增长率为 0.8 d^{-1} ,在 SRT 为 30 d 时,约繁殖 24 代.试验条件下保持泥龄在 30 d 以内系统运行稳定,这时膜生物反应器中 EPS 含量、微生物存在形态、污泥絮体的大小和微生物代谢颗粒含量能保持在一定的范围内,可维持较低的膜过滤阻力.本试验初步确定 SRT 应控制在优势菌最小世代时间(运行温度下最大比增长速率)的 120 倍以下.

3 结论

(1)在 MBR 系统中,混合液和膜表面的 EPS 含量同步变化,EPS 在膜表面没有发生积累现象.

(2)EPS 含量增加改变了细菌表面的电荷,增加了细菌表面亲水基和疏水基的比例,细菌存在状态由不稳定型(R 型)向稳定型(S 型)转变,因此提高了稳定型(S 型)和不稳定型(R 型)细菌的比例,污泥沉降性能变差.

(3)膜生物反应器中随泥龄的延长污泥平均粒径减小的趋势明显,在长泥龄条件下,污泥颗粒呈现双峰分布,微细颗粒的含量及粒径分布是造成膜污染的重要原因.

(4)考虑膜污染和污泥特性,本试验初步确定膜生物反应器泥龄应在优势菌最小世代时间(运行温度下最大比增长速率)的 120 倍以下.

参考文献:

- [1] Rosenberger S, Witzig R, Manz W, *et al.* Operation of different membrane bioreactors: experimental results and physiological state of the micro-organisms[J]. Water Science and Technology, 2000, **41**(10-11): 269-277.
- [2] Laera G, Pollice A, Saturno D, *et al.* Zero net growth in a membrane bioreactor with complete sludge retention[J]. Water Research, 2005, **39**(20): 5241-5249.
- [3] Pollice A, Laera G, Blonda M. Biomass growth and activity in a membrane bioreactor with complete sludge retention[J]. Water Research, 2004, **38**(7): 1799-1808.
- [4] Reid E, Liu X R, Judd S J. Sludge characteristics and membrane fouling in full-scale submerged membrane bioreactors [J].

- Desalination, 2008, **219**(1-3): 240-249.
- [5] Masse A, Sperandio M, Cabassud C. Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time[J]. Water Research, 2006, **40**(12): 2405-2415.
- [6] Ng H Y, Hermanowicz S W. Membrane bioreactor operation at short solids retention times: performance and biomass characteristics[J]. Water Research, 2005, **39**(6): 981-992.
- [7] Lee W, Kang S, Shin H. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors[J]. Journal of Membrane Science, 2003, **216**(1-2): 217-227.
- [8] 周健, 龙腾锐, 苗利利. 胞外聚合物 EPS 对活性污泥沉降性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(2): 613-318.
- [9] Ahmed Z, Cho J, Lim B R, *et al.* Effects of sludge retention time on membrane fouling and microbial community structure in a membrane bioreactor[J]. Journal of Membrane Science, 2007, **287**(2): 211-218.
- [10] 国家环保局. 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.
- [11] 康春莉, 董德明, 李忠华, 等. EDTA 萃取法分离自然水体中生物膜胞外聚合物[J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 2003, **35**(2): 120-122.
- [12] Wingender J, New T R, Flemming H C, *et al.* Microbial Extracellular Polymeric Substances: Characterization, Structure and Function[M]. Berlin: Springer, 1999.
- [13] Nagaoka H, Ueda S, Miya A. Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(9): 165-172.
- [14] 李军, 张刚, 江定国, 等. 延缓膜生物反应器中膜污染的措施探讨[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(10): 9-13.
- [15] 李绍峰, 崔崇威, 黄君礼. 胞外聚合物 EPS 对 MBR 膜污染的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, **39**(2): 266-269.
- [16] Wilen B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties [J]. Water Research, 2003, **37**(9): 2127-2139.
- [17] Jahn A, Nielsen P H. Cell biomass and exopolymer composition in sewer biofilms[J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(1): 17-24.
- [18] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, *et al.* Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settle ability [J]. Water Research, 2001, **35**(2): 339-350.
- [19] Jin B, Wilen B M, Lant P. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, **95**(1-3): 221-234.
- [20] Shimizu Y, Uryu K, Ohuno Y I, *et al.* Effect of particle size distributions of activated sludge on crossflow microfiltration flux for submerged membranes[J]. Ferment Bioengineering, 1997, **83**(6): 583-589.
- [21] Henriques D S, Holbrook R D, Kelly II R T, *et al.* The impact of floc size on respiration inhibition by soluble toxicants-a comparative investigation[J]. Water Research, 2005, **39**(12): 2559-2568.
- [22] Bai R B, Leow H F. Microfiltration of activated sludge wastewater: the effect of system operation parameters [J]. Separation and Purification Technology, 2002, **29**(2): 189-198.
- [23] Lim A L, Bai R B. Membrane fouling and cleaning in microfiltration of activated sludge wastewater[J]. Journal of Membrane Science, 2003, **216**(1-2): 279-290.
- [24] Yamato N, Kimura K, Watanabe Y. Influence of operating condition and suspension characteristics on membrane fouling in membrane bioreactors[J]. Journal of Japan Society on Environment, 2005, **28**(11): 663-669.
- [25] 吴金玲, 黄霞. 膜生物反应器混合液性质对膜污染影响的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, **7**(2): 16-24.
- [26] Defrance L, Jaffrin M Y, Gupta B, *et al.* Contribution of various constituents of activated sludge to membrane bioreactor fouling[J]. Bioresource Technology, 2000, **73**(2): 105-112.
- [27] Chudoba J, Cech J S, Farkac J, *et al.* Control of activated sludge filamentous bulking: experimental verification of a kinetic selection theory[J]. Water Research, 1985, **19**(2): 191-196.