

文章编号: 1006-0456(2010)03-0218-05

双轴旋转膜组件应用于浸没式厌氧膜生物反应器的研究

白玲^{1a 1b 2}, 蓝伟光³, 万金保^{1a 1b}

(1. 南昌大学 a 环境与化学工程学院, 江西 南昌 330031;

b 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330047;

2. 江西农业大学 理学院, 江西 南昌 330045; 3. 三达膜科技有限公司, 福建 厦门 361022)

摘要:针对浸没式厌氧膜生物反应器的膜污染控制问题,将双轴旋转膜组件应用于浸没式厌氧生物反应器,构建了新型浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器(SDRAnMBR),并研究了SDRAnMBR处理啤酒废水的性能。研究表明,该反应器对啤酒废水有着好的处理效果,有机物去除率高。在正常运行期间,进水COD在2900~5200 mg·L⁻¹,容积负荷为4.97~12.48 kg·m⁻³·d⁻¹(以COD计)时,COD的平均去除率为95.15%。而且运行非常稳定,并具有良好的抗膜污染性能。

关键词:浸没式厌氧膜生物反应器;双轴旋转膜组件;膜污染控制

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

Research of Applying a Double-Shaft Rotary Module in a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor

BAI Ling^{1a 1b 2}, LAN Wei-guang³, WAN Jin-bao^{1a 1b}

(1a School of Environmental and Chemical Engineering Nanchang University, Nanchang 330031, China;

1b Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization

Ministry of Education Nanchang University Nanchang 330047, China;

2. College of Natural Science Jiangxi Agricultural University Nanchang 330045, China;

3. Suntar Membrane Technology Co. Ltd., Xiamen 361022, China)

Abstract: In allusion to membrane fouling problem of submerged anaerobic membrane bioreactor we constructed a set of submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor(SDRAnMBR) by applying a double-shaft rotary module in the submerged anaerobic bioreactor and the performance for treatment of synthetic brewery wastewater was investigated by SDRAnMBR. The results showed that SDRAnMBR had good treatment effect on synthetic brewery wastewater and the system run steadily and had a high rate of organic substrate removal. During the normal operation when influent COD were in the range 2900~5200 mg·L⁻¹ and volume loading rate were in the range 4.97~12.48 kg·m⁻³·d⁻¹(calculated based on COD), COD removal rate was an average of 95.15%. The system not only run very steadily but also had good anti-contamination performance.

Key Words: submerged anaerobic membrane bioreactor; double-shaft rotary membrane module; membrane fouling control

厌氧膜生物反应器(Anaerobic Membrane Bioreactor AnMBR)是一种处理高浓度有机废水的有效

的工艺^[1-2],已成为国外如 WERF(Water Environmental Research Foundation)等协会研究的重点之

收稿日期: 2010-02-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAB23C02)

作者简介: 白玲(1964-),女,副教授,博士;通讯作者: 万金保(1952-),男,教授,博士生导师, jbwai@ncu.edu.cn.

中引文格式: 白玲,蓝伟光,万金保.双轴旋转膜组件应用于浸没式厌氧膜生物反应器的研究[J].南昌大学学报:工科版,2010,32(3):218-222.

—^[3]。浸没式 MBR 由于能耗低、过膜压差 (TMP) 低和小的占地面积得到了广泛的应用。但 AnMBR 的运行方式目前在国内外几乎以外置式为主。这是因为浸没式 AnMBR 的膜污染控制始终无法真正地得以解决,从而限制了它的应用。近年来,随着膜污染控制技术发展,采用旋转膜系统和振动膜系统来控制高悬浮物含量、高浓度的料液的膜污染,是当前较有效的膜污染控制技术之一^[4]。旋转膜系统已由单轴旋转膜组件发展为双轴旋转膜组件系统^[4],其优势是由于双轴同向旋转,在交叉重叠区域就会产生一个相反的运动,从而增强了这个区域的水力扰动程度,同时也能有效地阻止膜片高速旋转时产生的复合涡流(由单轴旋转膜组件产生),使得膜组件能够在低污染情况下长期稳定运行,保持稳定的运行通量,使膜污染控制真正地得以解决。2006年以来有法国的 Ding LH 等^[5-6]对双轴旋转膜组件(为陶瓷膜)的性能进行了研究(测试流体为 CaCO_3 悬浮液)和沈飞等^[7]采用双轴旋转超滤膜组件系统处理厌氧生物反应器内泥水混合液等的报道。尽管出现了新颖的旋转膜组件形式,但在 MBR 中应用较少。2006年以来有将单轴旋转膜组件与好氧反应器结合的报道^[8-9],结果表明取得了好的膜污染控制效果。但未见将双轴旋转膜组件与厌氧生物反应器结合来控制膜污染的报道。本研究将双轴旋转膜组件应用于浸没式厌氧膜生物反应器,构建了浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器 (Submerged Double-shaft Rotary Anaerobic Membrane Bioreactor SDRAnMBR),主要研究了 SDRAnMBR 处理废水的运行性能、对有机物的去除效果和膜污染控制效果,为其应用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 工艺流程

SDRAnMBR 的桶体外壳由不锈钢材料制成,桶体高 73 cm,直径为 45.7 cm,系统容器容积 120 L 内装填双轴旋转平板超滤膜组件,双轴旋转最大速度为 500 r/min 反应器有效容积 100 L。SDRAnMBR 主要由下列几部分组成:进水系统、厌氧生物反应器系统、出水系统、内置的双轴旋转膜组件系统、集气系统和 PLC 自控系统。其工艺流程示意图见图 1。

其工作过程为:储水箱内的废水经过进水泵提升由反应器顶部进入反应器,由 PLC 控制系统,采用液位计控制 SDRAnMBR 内的水位恒定,实现间歇进水;温度控制仪维持反应器内温度一定,并控制双

轴旋转膜组件的转速一定。在一定的转速下,可保证活性污泥的均匀混合,同时使膜表面受到冲刷剪切。出水泵对膜组件抽真空运行,渗透液在过膜压差驱动下透过膜,并被收集于中空轴外排于反应器底部的储水池,由出水蠕动泵排出。为恒流出水,实现连续出水的运行方式。

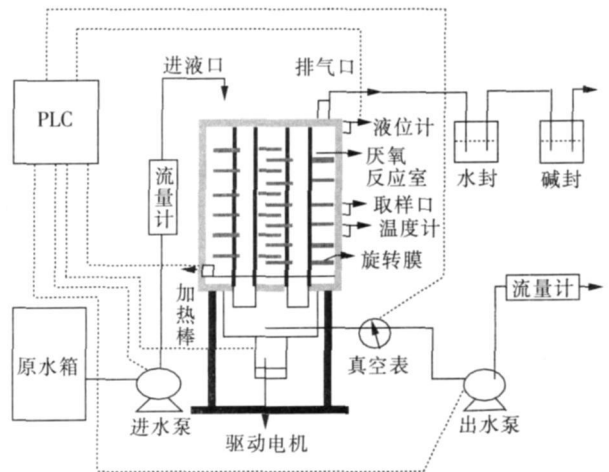


图 1 浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器工艺流程

Fig 1 Flow chart of SDRAnMBR process

1.2 接种污泥和试验用水

本试验的接种污泥取自南昌某啤酒厂升流式厌氧污泥床反应器 (UASB) 的底部浓缩的厌氧颗粒污泥。

试验用水采用人工配制模拟啤酒废水,以啤酒混合自来水配制而成。以啤酒为碳源, NH_4Cl 作为氮源,磷酸盐 (KH_2PO_4 、 K_2HPO_4) 为磷源,同时,为保证所培养的微生物生长、繁殖需要,加入适当微量元素 ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 CaCl_2 和 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 等作为补充。按 C : N : P = 250 : 5 : 1 的比例进行配制。根据运行情况在进水中加入一定量的碳酸氢钠以维持进水的 pH 值在 6.5~7.8 之间。具体进水浓度根据不同试验设计要求进行配制。

1.3 膜材料

实验采用的平片膜材质为聚醚砜 (PES),由三达膜科技(厦门)有限公司提供,截留分子量为 50 KDa 膜的有效膜面积为 0.32 m^2 。

1.4 试验方法

1.4.1 SDRAnMBR 的运行

整个试验过程历时 146 d。在整个试验运行期间,系统没有做任何清洗,也未排泥。可分为 3 个阶段。第一阶段为启动阶段,历时 26 d。膜旋转速度为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,温度为 $32 \text{ }^\circ\text{C}$,过膜压差为 2~6

kPa MLSS为 10.5~14.5 g·L⁻¹, HRT为 16~24 h 容积负荷为 1.22~4.35 kgCOD·m⁻³·d⁻¹。第二阶段为工艺考察(负荷提高)阶段,运行 60 d。膜旋转速度为 100~150 r·min⁻¹,温度为 32℃,过膜压差为 6~12 kPa MLSS为 14.53~17.98 g·L⁻¹, HRT为 10~14 h 容积负荷为 4.97~12.48 kgCOD·m⁻³·d⁻¹。第三阶段为稳定运行阶段,运行 60 d。控制温度为 32℃,膜旋转速度为 150 r·min⁻¹,温度为 32℃,过膜压差为 12~13 kPa MLSS为 17.98~19.55 g·L⁻¹, HRT为 10~10.2 h 容积负荷为 10.52~12.09 kgCOD·m⁻³·d⁻¹。

平板膜在投入运行前,用清水溶液浸洗 24 h 设置温度控制为 32℃,设置不同的膜旋转速度,测定清水通量和过滤压力。投入运行后,在一定抽吸压力下,监测膜生物反应器过膜压差、出水流量(即膜通量)的变化。同时设置不同的膜旋转速度,观察和测定过膜压差、出水流量的变化。

为保证系统的稳定运行,需每天监测其进水、膜出水和反应器内的 COD;进水、膜出水和反应器内的 pH;监测膜出水的挥发酸(VFA)和碱度,它能够迅速地反映出反应器的运行状态和甲烷菌的活性。

1.4.2 测定项目和方法

COD:重铬酸钾法(国家环保局,2002);MLSS:重量法(国家环保局,2002);挥发酸和碱度:酸碱联合滴定法(国家环保局,2002);pH值:pHS-25型酸度计;浊度:WZS-180低浊度仪。

过滤阻力的测定:膜污染一般通过膜污染过程中的过滤阻力来表征,膜通量和操作压力之间的关系可用达西 Darcy定律方程式(1)表示:

$$J = \frac{\Delta p}{\mu \cdot R} \quad (1)$$

式中, J为膜通量, L·m⁻²·h⁻¹; Δp为过膜压差(TMP), Pa; μ为渗滤液动力学黏度, Pa·s R为过滤阻力, m⁻¹。

在运行过程中测出膜生物反应器中的膜通量和 TMP及 μ可通过方程式(1)计算出 R。

2 试验结果和讨论

2.1 SDRAnMBR 的去除效果

反应器启动运行 146 d以来,其进水、膜出水 COD(简称出水 COD)、反应器内滤纸过滤出水 COD(简称器内出水 COD)和 COD去除率随运行时间的变化见图 2。

结果表明,启动阶段的平均 COD去除率较低。

是因为启动初期的 COD去除率低,但在第 11 d就达到了 91.98%,此后一直稳定在 92%以上,平均 COD去除率为 94.23%,最高为 96.75%。在工艺考察阶段,在负荷提高较快的情况下, COD去除率仍然稳定在较高水平,平均 COD去除率达 94.55%。在运行的第 47 d和 67 d进水 COD增幅很大,这是出于对膜生物反应器耐冲击负荷进行考察,将在后面讨论。在稳定运行阶段,虽然在较高的负荷(11.36 kgCOD·m⁻³·d⁻¹左右)下运行,平均 COD的去除率依然维持在较高水平(95.57%)。在第 87 d到第 140 d的时间里, COD的去除率一直稳定在 95%以上。只是在运行至 141 d时, COD的去除率才略有下降。分析原因是由于长期的运行使污泥活性有所下降, VFA上升;生物反应器容积负荷较高,微生物代谢产物积累速度快。但 COD去除率只下降了 1%~2%。

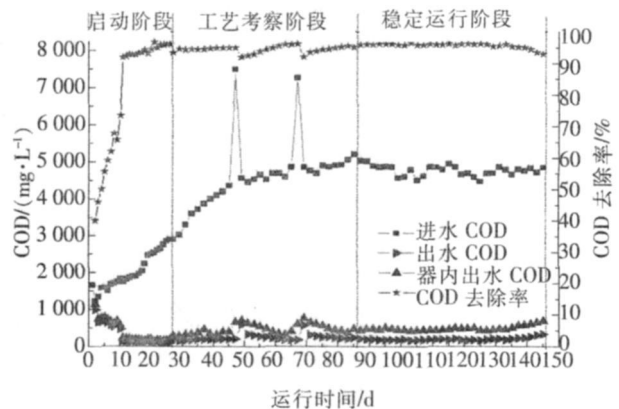


图 2 SDRAnMBR 的运行结果

Fig 2 The running results of SDRAnMBR

同时我们在三试验阶段,对出水浊度进行了检测,出水的浊度稳定在 4 NTU 以下。因此 SDRAn-MBR对浊度有很好的去除效果。分析原因一方面是 MBR对浊度物质的生化降解作用, SDRAnMBR中由于高浓度的生物量的存在,使其生化降解作用明显增强;另一方面是膜对浊度物质的截留,由于浊度物质主要以悬浮态和胶体态存在,而膜对胶体和悬浮物质具有很强的去除效果。

总体来说, SDRAnMBR 处理模拟啤酒废水,启动迅速,负荷提高快,有机物去除率高,而且运行非常稳定。分析原因是 SDRAnMBR 动力学流场所具有的均匀化效应和三相旋转流效应,加上厌氧颗粒污泥的作用,提高了 COD去除率和运行稳定性。

2.2 碱度、VFA 和碱度/VFA 与 SDRAnMBR 的运行性能

图 3给出了三试验阶段出水碱度、出水 VFA 和

碱度/VFA 比值随运行天数的变化关系。由图 3 可知,在第一、二阶段,随着容积负荷的增加(由 $1.2 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 升至 $12 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$),出水 VFA 缓慢地增加(冲击负荷点除外);出水碱度则变化不大;碱度/VFA 稳定在 $3.5 \sim 6.5$ 范围内。在冲击负荷点,VFA 增加幅度大(由 $650.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $1200.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $865.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $1320.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),碱度/VFA 下降的幅度较大(分别由 5.3 降为 2.6 和由 5.0 降为 2.7),但体系缓冲能力仍然较强,此时并未出现酸化的现象,仍然处于稳定运行之中。在第三阶段,容积负荷变化幅度小,出水 VFA 随运行时间的延长缓慢降低直至稳定在 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下;只是在后期出水 VFA 有所增加,是因为长期的运行使污泥活性有所下降造成的;碱度/VFA 比值较为稳定,在 4.0 左右;而且在较高的负荷($10 \sim 12 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)下长期运行,VFA 没有积累,且出水 VFA 和碱度范围宽,处理效果稳定。这进一步说明 SDRAnMBR 具有处理效果稳定的特点。分析原因应归咎于 SDRAnMBR 动力学流场所具有的均匀化效应、交错振动效应和三相旋转流效应,大大强化了高 MLSS 下混合和传质,使 VFA 不易积累。此 SDRAnMBR 系统的运行性能明显优于王志伟等^[10]同样采用一体式厌氧平板膜生物反应器处理酒厂废水的运行性能(当容积负荷大于 $10 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,VFA 严重积累,系统酸化,处理效果严重下降)。

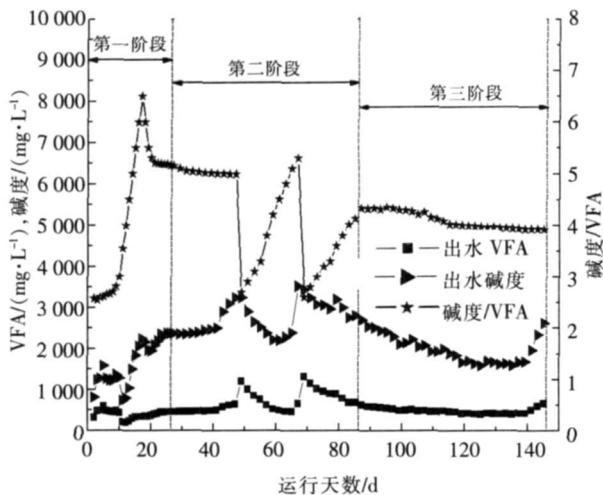


图 3 VFA 与碱度的关系

Fig 3 Relation of VFA and alkalinity

2.3 SDRAnMBR 的膜污染性能

经过 146 d 的运行,膜污染较轻,过滤阻力随时间的增大的速率非常缓慢,并在一定膜转速下,过滤

阻力保持不变。实现了高负荷下的长期稳定运行。整个试验运行期间,过滤总阻力随时间的变化趋势如图 4 所示。

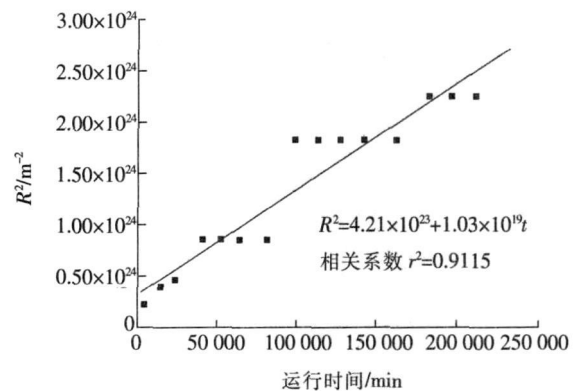
将整个试验过程的过滤阻力的平方值随时间的变化曲线进行线性拟合(见图 4),可得到整个试验过程的阻力模型为:

$$R^2 = 4.21 \times 10^{23} + 1.03 \times 10^{19} t \quad (2)$$

式中, R 为 t 时刻的过滤阻力, m^{-1} ; t 为运行时间, min 。拟合曲线的相关系数 $r^2 = 0.9115$ 。

上述阻力模型较好地符合泥饼阻力模型式($R^2 = R_0^2 + Kt$)。结果表明整个过滤过程以泥饼层控制为主。

本系统的阻力模型与王志伟等^[11]采用浸没式 AnMBR 处理酒厂高浓度有机废水时报道的阻力模型($R^2 = 4.80 \times 10^{26} + 6.71 \times 10^{25} t$, R 和 t 的单位分别为 m^{-1} 和 min) 相比较,过滤阻力随时间的增大要缓慢得多。说明本试验系统泥饼阻力随时间的增加很小,SDRAnMBR 能有效控制和避免污泥颗粒在膜表面的沉积。

图 4 R^2 随时间变化的拟合曲线Fig 4 Fit curve of R^2 with time

另一方面,有研究报道^[12]在一些流体力学分布不均衡的区域,因其局部剪切力较低,会形成局部的较厚的生物膜或是泥饼层造成膜污染。不断发展的局部污染,例如泥饼层或生物膜,也会推动膜过滤过程的膜污染。而 SDRAnMBR 内双轴旋转的流体力学分布是均衡的,因此可大大减轻膜污染速率,导致过滤阻力随时间的增大的速率非常缓慢,并在一定膜转速下,过滤阻力保持不变。

3 结论

1) 采用 SDRAnMBR 处理模拟啤酒废水,在整个试验期间,系统具有启动迅速,负荷提高快,有机物去除率高,而且运行非常稳定等特性。在正常运行

的 120 d里,进水 COD在 2 900~5 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 容积负荷为 4. 97~12. 48 $\text{kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, COD 的去除率为 92. 13~96. 30%, 平均为 95. 15%。同时对浊度有好的去除效果,出水浊度稳定在 4 NTU 以下。

2)SDRAnMBR 能在较高的负荷 ($10 \sim 12 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)下长期稳定运行,不会发生酸化现象,出水 VFA 和碱度范围宽,处理效果好并稳定。在稳定运行期间,出水 VFA 浓度为 400. 12~625. 48 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 476. 57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 碱度为 1 597. 12~3 529. 89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 2 370. 65 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 碱度与 VFA 比为 3. 9~5. 3, 平均为 4. 14。

3)SDRAnMBR 具有良好的抗膜污染性能。污染阻力主要是由泥饼层引起的,整个过滤过程以泥饼层控制为主。经过 146 d 的运行,膜污染较轻,过滤阻力随时间的增大的速率非常缓慢,并在一定膜转速下,过滤阻力保持不变。实现了高负荷下的长期稳定运行。较好地解决了浸没式厌氧膜生物反应器的膜污染控制这一难题。建立了此试验条件下,整个试验过程的阻力模型为:

$$R^2 = 4. 21 \times 10^{23} + 1. 03 \times 10^{19} t$$

式中, R 为 t 时刻的过滤阻力, m^{-1} ; t 为运行时间, min。

参考文献:

[1] William P B, David C S. The Use of the anaerobic baffled reactor for wastewater treatment: a review [J]. *Wat Res* 1999, 33(7): 1559-1578.
 [2] Elmeh S, Abdelmounni I. Experimental test to evaluate performance of an anaerobic reactor provided with an external membrane unit [J]. *Wat Sci Tech* 1998, 38(8/9):

385-392.

[3] Choo K H, Lee C H. Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor [J]. *Wat Res* 1996, 30(8): 1771-1780.
 [4] Jaffrin M Y. Dynamic shear-enhanced membrane filtration: a review of rotating disks, rotating membranes and vibrating systems [J]. *Journal of Membrane Science* 2008, 324(1/2): 7-25.
 [5] Ding L H, Jaffrin M Y, Mella M L et al. Investigation of performances of a multishaft disk (MSD) system with overlapping membranes in microfiltration of mineral suspensions [J]. *J Membr Sci* 2006, 276: 232-240.
 [6] He G, Ding L H, Paullier P, et al. Experimental study of a dynamic filtration system with overlapping ceramic membranes and non-permeating disks rotating at independent speeds [J]. *J Membr Sci* 2007, 300(1/2): 60-70.
 [7] 沈飞, 严滨, 李成, 等. 双轴旋转超滤膜组件过滤厌氧泥水混合液 [J]. *膜科学与技术*, 2008, 28(2): 54-58.
 [8] Tony J R, Jay L G, Stanley O S D. Dispersion characteristics of a rotating hollow fiber membrane bioreactor: effects of module packing density and rotational frequency [J]. *Journal of Membrane Science* 2006, 278(1/2): 144-150.
 [9] 吴桂萍, 杜春慧, 徐又一. 内置转盘式膜-生物反应器处理污水的工艺条件研究 [J]. *环境科学*, 2007, 27(11): 2217-2221.
 [10] 王志伟, 吴志超, 顾国维, 等. 一体式厌氧平板膜生物反应器处理酒厂废水的研究 [J]. *给水排水*, 2006, 32(2): 51-53.
 [11] 王志伟, 吴志超, 顾国维, 等. 厌氧膜生物反应器膜污染特性研究 [J]. *膜科学与技术*, 2006, 26(1): 11-14.
 [12] 张劲松. MBR 的膜污染机制与可持续操作原理 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 72-80.