

Treatment of Printing and Dyeing Wastewater by a Submerged Double-shaft Rotary Anaerobic Membrane Bioreactor

Yan Bin¹, Li Yuangao¹, Hong Yubin², Lin Lihua², Lan Weiguang², Wen Jie¹

¹Department of Environmental Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, China

²Suntar Membrane Technology (Xiamen) CO., LTD, Xiamen, China

Email: yanb@xmut.edu.cn

Abstract: The performance of a submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor (SDR-AMBR) for treatment of printing and dyeing wastewater was investigated after the structure of this reactor was optimized. The results showed that above 92% COD was removed, while influent COD was in the range 4500-6000 mg·L⁻¹, and COD volume loading reached 20kg·m⁻³·d⁻¹. The concentration of sludge reached 20 g·L⁻¹, and the ratio MLVSS : MLSS was between 0.45 and 0.72. The reactor and rotation speed of membrane module's temperature had significant influence on membrane fouling.

Keyword: submerged anaerobic membrane bioreactor; printing and dyeing wastewater; double-shaft rotary; membrane flux

浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器处理印染污水试验

严滨¹, 李元高¹, 洪昱斌², 林丽华², 蓝伟光², 温捷¹

¹厦门理工学院环境工程系, 厦门, 中国, 361024

²三达膜科技(厦门)有限公司, 厦门, 中国, 361022

Email: yanb@xmut.edu.cn

摘要: 优化了浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器 (SDR-AMBR) 结构, 研究了它对实际印染污水的处理效能。试验结果表明, SDR-AMBR 对印染污水有较好的处理效果, 进水 COD 在 4500-6000mg·L⁻¹ 时, COD 去除率可以达到 92% 以上。容积负荷达到 20kg·m⁻³·d⁻¹。反应器内的污泥浓度达到 20g·L⁻¹, MLVSS/MLSS 在 0.45 至 0.72 之间。运行温度和膜组件旋转速度的变化对膜污染速率有显著影响。

关键词: 浸没式厌氧膜生物反应器; 印染污水; 双轴旋转; 膜通量

1 引言

从 20 世纪 50 年代至今, 膜分离作为一种新颖的分离技术, 在环境工程领域得到了长足的发展。其中用于固液分离与截留的膜生物反应器最为常见, 这类系统已经有详细的文献叙述^[1]。膜生物反应器的应用范围由处理易生化、低 COD 浓度的生活污水向难生化、高 COD 浓度的工业污水扩展。厌氧反应器对高浓度污水处理的优势是显而易见的, 因此膜分离工艺与厌氧反应器的结合和发展成为膜生物反应器研究的前沿问题, 并成为如 WERF (Water Environmental Research Foundation) 等协会的研究重点^[2]。目前工业化的厌氧膜生物反应器

(Anaerobic Membrane Bioreactor, AMBR) 在构型上都是外置式的。泵提供了外置膜组件过滤需要的动力, 这一方面增加了运行能耗, 另一方面泵的剪切作用降低了生物活性。研究的结果表明采用错流过滤的方式构建的外置式 AMBR 效果良好, 反应器的效率得到提高^[3-6]。黄霞等人证实采用超声辅助的方式, 可以有效控制 AMBR 的外置膜组件的膜污染^[7]。但 Brockmann 研究证实, 外置膜系统在运行过程中, 泵的剪切作用对微生物的活性是有害的^[8], 泵循环 20 次时污泥活性减少到原来的 50%。

采用内置式 AMBR 可以避免泵的剪切问题, 但由于无法像好氧膜生物反应器进行鼓风曝气, 导致膜表面易于污染。有科研人员通过甲烷或氮气进行曝气, 但这

资助信息: 福建省青年人才项目 2008F3106; 福建省教育厅科技项目 JA08224

一方面使反应器趋向复杂化，另一方面并未能体现厌氧反应器无需曝气，能耗低的优势^[9-12]。

我们在前期的研究过程中研发了双轴旋转式膜组件^[13]，并设计了浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器 (Submerged Double-shaft Rotary Anaerobic Membrane Bioreactor, SDR-AMBR)。通过采用双轴旋转，无需气体冲刷，利用膜面的相对运动增加双轴间膜面污染层的扰动程度，改善膜面液体流动状态，使得膜组件能够在低污染情况下长期稳定运行。并对易生化的啤酒废水进行了试验^[14]。在这里我们对反应器构型进行了进一步完善，同时研究了 SDR-AMBR 对高毒性，不易生化的印染污水的处理效能。

2 材料与方 法

2.1 工 艺 流 程

以往采用的 SDR-AMBR 经过长期试验表现出较优良的性能^[13-15]，在本次试验前，我们对反应器进行了进一步优化。主要改变了以下几个方面结构：

(1) 传动系统由底部改变为顶部横向传动。传动方式的改变使双轴的旋转速度更易精确调节，系统拆卸和组装更简便。

(2) 在旋转轴底部增加了搅拌桨，使反应器内部的污泥混合更均匀。污泥混合效率的提高缩短了反应器启动时间，增加了反应器的抗冲击性和稳定性。

(3) 将相对旋转膜板间间距减至 2mm，在无膜板交错部位增加了导流条，使膜面湍流程度增加，抗污染性增强。

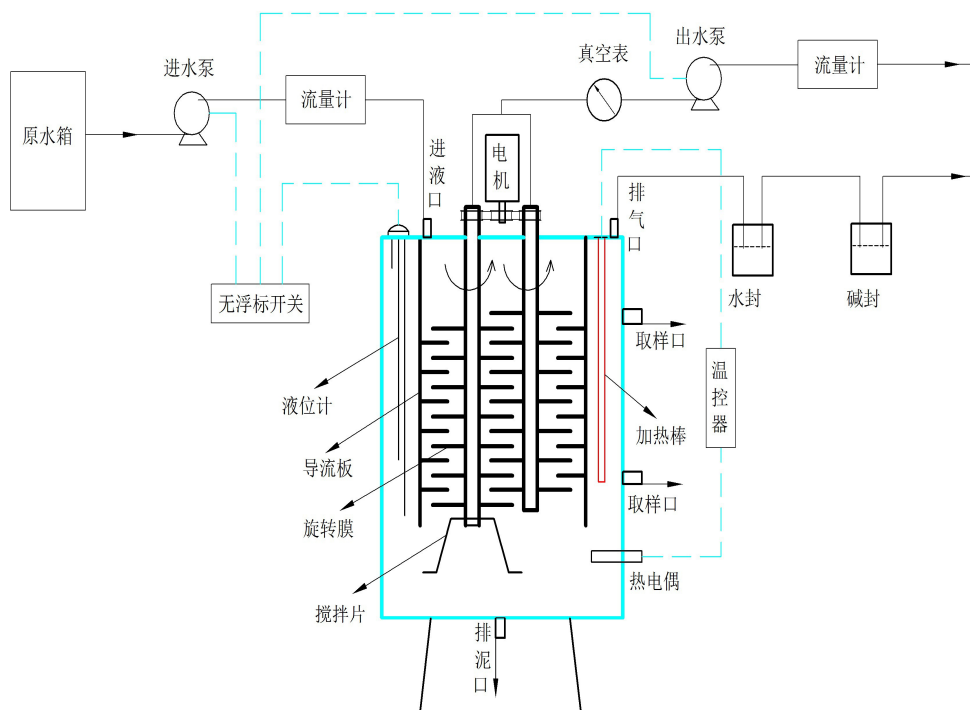


Figure 1. Flow chart of the SDR-AMBR process

图 1. 浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器工艺流程图

反应器高 62.6cm，直径为 45cm，反应器容积 100L，内装填双轴旋转平板超滤膜组件，双轴旋转最大速度为 500r·min⁻¹。SDR-AMBR 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成集气系统和 PLC 自控系统，其工艺流程如图 1 所示。

其工作过程为：原水箱内的污水经过进水蠕动泵提升，由反应器顶部连续进入反应器。蠕动泵由 PLC 控制，并与液位计联动以保证 SDR-AMBR 内的水位恒定；同时 PLC 系统控制器可设定并稳定反应器内温度及控制双轴旋转膜组件的转速。在一定的转速下，反应器内活性污泥均匀混合，同时相对旋转使膜表面

受到冲刷剪切,减缓膜污染速率。出水采用抽吸方式,通过负压提供过膜压差,透析液经中空轴收集后由蠕动泵排出,实现恒流、连续出水的运行方式。

2.2 接种污泥和试验用水

本试验的接种污泥取自厦门某印染厂 UASB 底部浓缩的厌氧颗粒污泥。试验采用实际印染污水,于该印染厂内调节池取水直接进入反应器。

2.3 膜材料

实验采用的平板膜材质为聚醚砜(PES),由厦门三达膜科技有限公司提供,截留分子量为 50kDa,膜的有效膜面积为 0.6m²。

2.4 试验方法

2.4.1 SDR-AMBR 的运行

印染污水处理试验过程中,系统没有做任何清洗,也未排泥。整个试验过程历时 160 余天,主要考察反应器稳定运行过程中的 COD 负荷、抗冲击性、系统内污泥浓度和系统对 COD 的去除效率。

系统运行期间,每天测定反应器进水、反应器出水及 VFA 等参数。同时,监测能够反映反应器污泥状

态的 MLSS 和 MLVSS。反应器启动时为冬季,运行参数设定为膜组件转速 150r·min⁻¹,操作压力(过膜压差)20kPa。反应器温度 25℃。

在污泥浓度为 15g·L⁻¹的情况下,不改变系统的操作压力,恒定膜组件旋转速度或温度,改变另一个参数,研究了温度及膜组件旋转速度对膜污染的影响。测定温度对膜通量影响时,膜组件转速 150r·min⁻¹,每次提高温度 0.5℃,稳定 3 天后,每隔 30 分钟测定一次反应器膜通量,共测 5 次后取平均值作图。测定膜组件转速对膜通量影响时,稳定反应器温度为 25℃,每次提高转速 25r·min⁻¹,稳定 1 小时后,每隔 30 分钟测定一次反应器膜通量,共测 5 次后取平均值作图。

2.4.2 测定项目和方法

COD: 重铬酸钾法(国家环保局, 2002); MLSS、MLVSS: 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); 浊度: WZS2180 低浊度仪(上海雷磁厂, 上海)。

3 试验结果

3.1 SDR-AMBR 对印染污水的处理效果

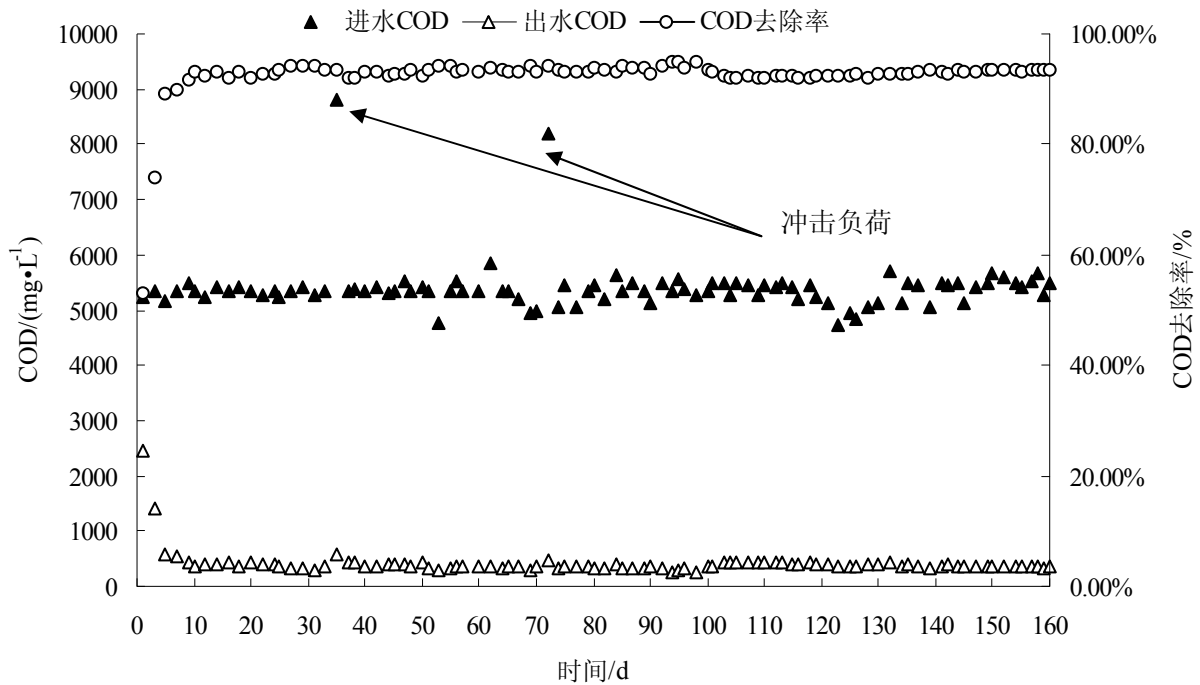


Figure 2. The COD removal by SDR-AMBR

图 2. SDR-AMBR 对 COD 去除效果

反应器启动运行 160 天以来,其进水、膜出水 COD (简称出水 COD)和 COD 去除率随运行时间的变化如图 2 所示。由图 2 可知,从启动阶段开始,反应器对印染污水的 COD 去除率表现较佳,其原因是接种污泥取自印染厂 UASB 的底泥,其菌群对印染污水水质已经比较适应。随反应器的运行,一周后 COD 去除率达到了 92%,且随后表现稳定。反应器负荷达到 $12\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。在第 35 天和 78 天进行了冲击负荷试验,冲击时进水 COD 分别为 $8800\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8200\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反应器的出水 COD 基本未受影响。在第 100 天通过缩短停留时间,提高反应器负荷至 $20\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$,反应器去除率稍有下降,但一直稳定在 92% 以上。

该反应器能够承受较高负荷的主要原因在于反应器内污泥浓度较高。在高污泥浓度下,膜通量稳定,经优化后的反应器内导流块增加了膜表面的湍流,对阻止膜污染起了较强作用。当反应器内污泥浓度达到 $20\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,膜通量稳定在 $25.4\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。反应器在后期污泥浓度达到 $28.2\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

3.2 SDR-AMBR 中污泥浓度的变化情况

反应器中污泥浓度 MLSS、MLVSS 变化情况见图 3。由图 3 可见,随着反应器的稳定运行,反应器内的污泥浓度由最初接种时的 $15\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增长至 $20\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在第 100 天反应器负荷增加至 $20\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 后,反应器内的污泥浓度继续增高,达到 $28.2\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

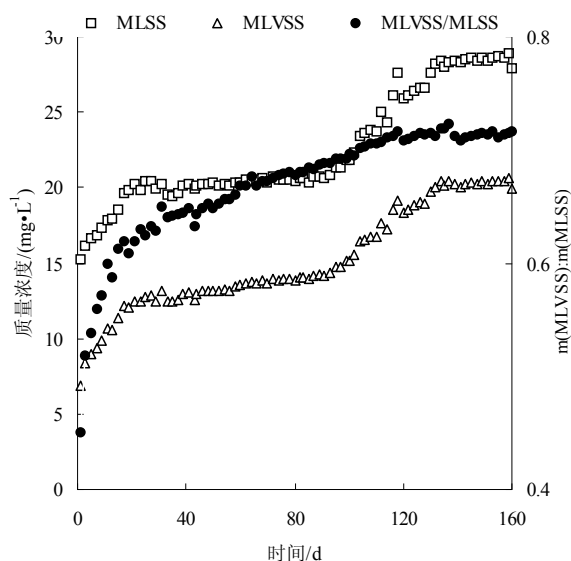


Figure 3. Variation of MLSS and MLVSS with time in SDR-AMBR

图 3. SDR-AMBR 中 MLSS、MLVSS 随时间变化曲线

反应器内的 MLVSS 也一直增长,从 $6.8\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增长至 $20\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。MLVSS 与 MLSS 之比在 0.45 至 0.72 之间,这个比值比外置式厌氧膜生物反应器中的污泥活性 (MLVSS 与 MLSS 的质量比在 0.6 左右) 要高^[6],原因可能是内置式厌氧膜生物反应器不需要泵作为推动力提供过膜压差,菌体没有经过泵的剪切,活性较高。镜检表明,反应器内颗粒污泥和絮状污泥共存,颗粒污泥未受到反应器运行影响,同时膜截留作用也保留了高絮状污泥,反应器内污泥浓度很高。厌氧膜生物反应器的高污泥浓度和高容积负荷正是处理高浓度工业废水所需要的。同时在 SDR-AMBR 中双轴旋转形成的良好水力学环境,加强了三相流体的混合和传质,也使污泥活性增大。

图 3 也体现了在提高反应器负荷后(系统运行 100 天),MLSS 和 MLVSS 都得到增长,且两者的比值也变大。反应器内 MLVSS 的升高有可能是活性污泥导致,也可能是部分污泥浓度增加而营养物质相对贫乏,加剧了非活性有机成分的产生。这个过程一方面来自腐败细菌的残骸,另一方面来自内源呼吸所产生的大量溶解性代谢产物(多为大分子),这些物质都可以被膜截留形成 MLVSS,但并无活性。此时可以关注反应器的处理效率,对 MLVSS:MLSS 比值变大的原因进行判定。本试验中反应器的 COD 去除率基本稳定于 92%,显示污泥活性保持良好。若反应器效率下降,则需要考虑适当排泥。

3.3 温度和旋转速度对 SDR-AMBR 中膜污染情况的影响

膜组件旋转速度和反应器温度对反应器的膜组件通量有影响。由于两个因子中温度的调控比较繁琐,因此未进行正交实验,采用稳定某一因子,改变另一因子的方式进行了实验,结果如图 4、图 5。

由于生化反应过程限制,试验测定的温度范围为 25°C - 31°C 。由图 4 可见,提高反应器的运行温度有利于提高膜通量。这是由于提高温度后,反应器内流体的粘度降低,有利于膜过滤过程。

由图 5 可见,提高反应器转速后,膜通量经历了一个先升高后降低的过程。这主要是由于随着转速的提高,膜间相对错流速度提高,减轻了膜表面的浓差极化,提高了膜通量;但由于旋转膜组件中膜片是周边封装于膜支撑板上,内部存在空间,使得其中存在一个反向于过滤方向的压力,即反压^[13],在恒定的抽吸压力下,转速提高加大了反压,从而减少了过膜压

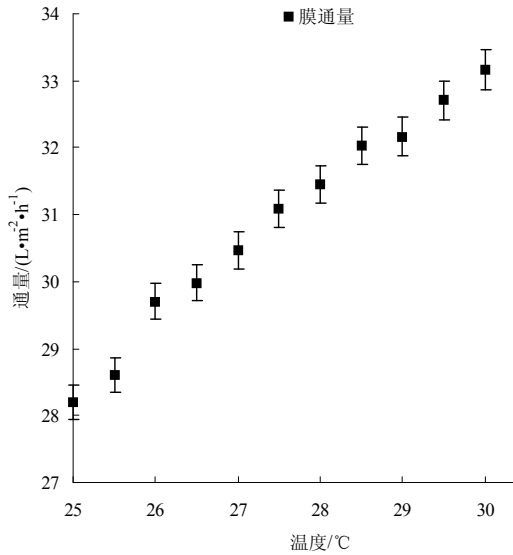


Figure 4. Variation of membrane flux with temperature in SDR-AMBR
图 4. 膜通量与反应器温度的关系

差，降低了膜通量。本试验中，低转速下浓差极化的改善和错流速率的提高对膜通量的影响较反压的增加显著，导致通量上升；高转速下，反压的影响更明显，导致通量下降，使得曲线呈先高后低的走势。如果希望通过提高组件旋转速度提高膜通量，需要在增加转速的同时，适当提高反应器的操作压力，以抵消反压对膜通量的影响。这将在以后的研究中进行探讨。

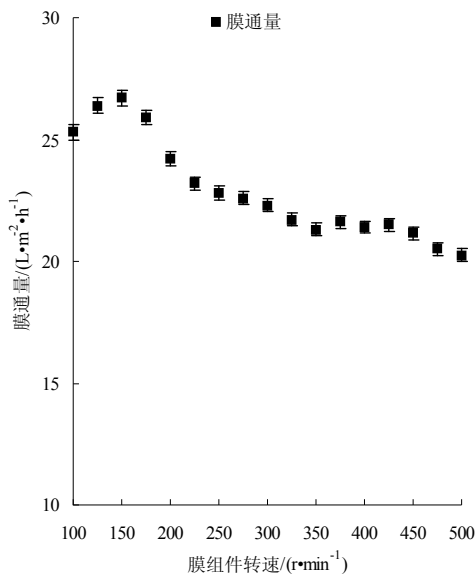


Figure 5. Variation of membrane flux with rotation speed of membrane module in SDR-AMBR
图 5. 膜通量与膜组件转速的关系

同时在试验阶段，对出水浊度进行了检测，出水的浊度稳定在 4NTU 以下，体现了膜生物反应器出水水质的优异。

4. 结论

(1) SDR-AMBR 对印染污水有较高的处理效率。当进水 COD 在 4500-6000mg·L⁻¹ 时，COD 去除率可以达到 92% 以上。容积负荷达到 20kg·m⁻³·d⁻¹。由于膜的截留，难降价的大分子污染物长期累积于反应器中，以胶体、悬浮物等形式存在，从而驯化了反应器内的菌群，使其降解污染物能力提高。另一方面是 AMBR 由于不存在污泥流失，高浓度生物量使其生化降解作用明显增强。

(2) SDR-AMBR 启动迅速、负荷提高快且有有机物去除率高，抗冲击能力强，运行非常稳定。反应器内絮状污泥和厌氧颗粒污泥共存，MLVSS/MLSS 比值达到 0.7 以上，污泥活性高。

(3) 温度的提高有利于提高反应器的膜通量，膜组件的旋转速度对膜通量有影响。

总之，与好氧膜生物反应器类似，厌氧膜生物反应器具有一体化程度高，污泥浓度高，出水水质好等优势。反应器不存在污泥流失，不需要沉淀池，占地面积小。未来必将在工业污水处理中占有重要地位。

References (参考文献)

- [1] C. Visvanathan, R. Ben Aim and K. Parameshwaran. Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2000, 30(1): P1-48.
- [2] Choo K H, Lee C H. Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor [J]. Water Research. 1996, 30(8): P1771-1780.
- [3] K.H. Choo, C.H. Lee. Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor [J]. Water Res. 1998, 32: P3387-3397.
- [4] G. Belfort, R.H. Davis, A.L. Zydney. The behavior of suspensions and macromolecular solutions in cross-flow microfiltration [J]. J. Membr. Sci. 1994, 96: P1-58.
- [5] Yiliang He, Pei Xu, Chunjie Li, Bo Zhang. High-concentration food wastewater treatment by anaerobic membrane bioreactor [J]. Water Res. 2005, 39: P4110-4118.
- [6] FANG Xu-liang, HE Yi-liang, XU Pei. Experimental investigation about the effect of membrane surface morphology on membrane fouling of anaerobic membrane bioreactor [J]. Environmental Chemistry. 2006, 25(1): P65-68(Ch). 方绪亮, 何义亮, 徐培膜. 表面形貌对厌氧膜生物反应器膜污染影响的试验研究. 环境化学. 2006, 25(1): P65-68.
- [7] Sui Pengzhe, Wen Xianghua, Huang Xia. Study on the membrane fouling control by ultrasound in anaerobic membrane bioreactor [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control. 2006, 7(4): P25-29(Ch). 隋鹏哲, 文湘华, 黄霞. 厌氧膜-生物反应器中超声控制膜污染研究. 环境污染治理技术与设备. 2006, 7(4): P25-29.
- [8] K.H. Choo, C.H. Lee. Membrane fouling mechanisms in the

- membrane-coupled anaerobic bioreactor [J]. *Water Res.* 1996, 30: P1771-1780.
- [9] T. Stephenson, S. Judd, B. Jefferson, K. Brindle. *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment* [M]. London: IWA Publishing, 2000. 231-237.
- [10] David Jeison, Jules B. van Lier. Cake formation and consolidation: Main factors governing the applicable flux in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) treating acidified wastewaters [J]. *Separation and Purification Technology.* 2007, 56 : P71-78.
- [11] Marcus V.G. Vallerio, Gatzke Lettinga, Piet N.L. Lens. High rate sulfate reduction in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBaR) at high salinity [J]. *J. Membr. Sci.* 2005, 253: P217-232.
- [12] B. Reznia, J.A. Oleszkiewicz, N. Cicekb. Hydrogen-dependent denitrification of water in an anaerobic submerged membrane bioreactor coupled with a novel hydrogen delivery system [J]. *Water Res.* 2007, 41: P1074 - 1080.
- [13] Shen Fei, Yan Bin, Li Cheng, Li Jianke, Li Qingbiao, Lan Weiguang. Filtration of anaerobic sludge mixed liquor using double-shaft rotary ultrafiltration membrane module [J]. *Membrane Science and Technology.* 2008, 28(2): P54-58(Ch).
沈飞, 严滨, 李成, 李建科, 李清彪, 蓝伟光. 双轴旋转超滤膜组件过滤厌氧泥水混合液. *膜科学与技术.* 2008, 28(2): P54-58.
- [14] BAI Ling, LIU Chao, HU Kan, WANG Shenxiang. Treatment of synthetic brewery wastewater by a submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae.* 2009, 29(9): P1813-1819(Ch).
白玲, 刘超, 胡侃, 王身相. 浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器处理啤酒废水试验. *环境科学学报.* 2009, 29(9): P1813-1819.
- [15] BAI Ling, LIU Chao, HU Kan, WANG Shenxiang. Characteristics of membrane fouling in a submerged anaerobic double-shaft rotary membrane bioreactor [J]. *Industrial Water Treatment.* 2009, 29(8): P18-21(Ch).
白玲, 刘超, 胡侃, 王身相. 浸没式厌氧双轴旋转膜生物反应器的膜污染特性研究. *工业水处理.* 2009, 29(8): P18-21
- [16] Feng fei. Study of the treatment on landfill leachate with anaerobic membrane bioreactor [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. 45-48
冯斐. 厌氧 MBR 处理垃圾渗滤液的试验研究[D].南昌:南昌大学, 2007. 45-48.