

新型浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器的启动特性研究

白 玲^{1,2}, 蓝伟光^{1,3}, 万金保¹, 王敬斌¹

(1.南昌大学环境科学与工程学院教育部鄱阳湖湖泊生态与生物资源利用重点实验室,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:研究了新型浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器(SDRAnMBR)处理模拟啤酒废水的启动特性。讨论了水力停留时间、容积负荷与 COD 去除率的关系 pH、挥发酸(VFA)和碱度对启动的影响。仅用 26 d 就完成了反应器的启动和污泥的驯化。结果表明,SDRAnMBR 系统的耐冲击负荷能力强,COD 去除率高于常规厌氧生物反应器,稳定在 92%以上,反应器运行稳定,未发生酸化现象;且出水 VFA 和出水碱度可以在较大的范围变动而不会发生酸化现象。

关键词:浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器;啤酒废水;启动特性

中图分类号: X703.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2009)04-035-04

随着世界能源的日益短缺、废水污染负荷的日益加大及废水中污染物种类的日趋复杂化,废水厌氧生物技术以其投资省、能耗低、可回收利用沼气能源、负荷高、产泥少、耐冲击负荷等优点,近些年来环保工作者越来越关心该技术的发展与应用。对于高浓度有机污水处理,厌氧生物处理则是其中必不可少的一个环节。但正因为厌氧微生物世代周期均较长的特点,微生物固定化在厌氧生物处理技术中显得尤为重要。厌氧膜生物反应器(Anaerobic membrane bioreactor, AnMBR)因此应运而生。AnMBR 是一种处理高浓度有机废水的有效工艺^[1-2],已成为国外如 WERF(Water Environmental Research Foundation)等协会研究的重点之一^[3]。啤酒废水的可生化性好,属中等浓度的有机废水,适合厌氧生物处理^[4-5]。作为厌氧处理技术,和其它反应器一样,如何在短期内快速启动也是厌氧处理工程中的关键^[6-7]。对于厌氧膜生物反应器,一般均采用驯化好的厌氧污泥直接投加膜生物反应器中^[8],对直接在厌氧膜生物反应器内启动反应器的研究较少^[9]。本试验研究的主要目的在于利用自主研发的浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器(Sub-

merged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor SDRAnMBR),直接在厌氧膜生物反应器内进行启动试验,对其启动特性进行了研究。对废水处理的工程实践具有一定的指导意义。

1 试验方案

1.1 试验装置

新型浸没式厌氧双轴旋转膜生物反应器的厌氧反应器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,双轴旋转超滤膜组件为平片式圆型膜片,安装于塑料圆型支撑板的上下两面,并被固定于两根同向旋转的中空轴上,两轴的圆型膜片交叉放置。反应器有效容积 100 L,内装填最大膜面积 2.4 m²,双轴旋转最大速度为 500 r·min⁻¹。新型浸没式厌氧双轴旋转膜生物反应器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。其中双轴旋转膜组件是本新型设备的关键部分。其工艺流程示意图见图 1。

收稿日期:2008-07-28

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAB23C00);江西省环境保护局科技计划项目

作者简介:白玲(1964-),女,副教授,博士研究生,研究方向为水处理和资源化;

联系电话:0791-8732527;E-mail: bailing716@yahoo.com.cn

联系作者:万金保,联系电话:0791-2998100;E-mail: jbw@ncu.edu.cn。

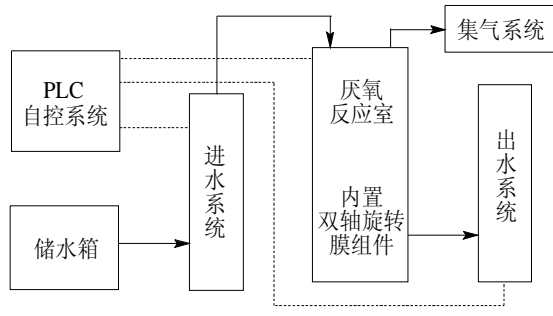


图 1 新型浸没式厌氧旋转膜生物反应器工艺流程

Fig.1 Flow chart of novel submerged anaerobic rotary membrane bioreactor process

系统的运行过程为：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 SAnRMBR 内的水位恒定，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。双轴旋转膜组件在一定的转速下，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。

该新型工艺的特点是：旋转膜组件采用双轴同向旋转，交叉膜片之间的水力流动形成了相反的运动，这个区域的水力扰动程度加大，膜的自清洁效应也得到提高。通过膜组件的可控旋转以及组件间的交错旋转，在膜表面产生一定强度的剪切力来削弱膜表面的浓差极化及凝胶层的形成，同时也能有效地阻止膜片高速旋转时产生的复合涡流，从而有效地控制膜污染。

1.2 试验用水和膜材料

在本研究中，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。同时添加 NH_4Cl 作为氮源，磷酸盐为磷源，加入硫酸镁和氯化钙等作为微量元素。配制的啤酒废水 COD 在 $1\ 200\sim 2\ 900\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。在进水中加入一定量的碳酸氢钠以维持进水的 pH 在 $6.5\sim 7.5$ 之间。试验采用的平片膜材质为聚醚砜 (PES)，截留分子量为 $50\ \text{kDa}$ ，膜的有效膜面积为 $0.32\ \text{m}^2$ 。

1.3 接种污泥

关于厌氧反应器启动时的接种污泥有很多人做过研究，Vereijken 等人^[10]在启动 UASB 厌氧反应器时，采用现有污水厌氧处理系统的颗粒污泥，比任何厌氧反应器的启动都要快得多。本试验的接种污泥取自南昌某啤酒厂 UASB 的底部颗粒污泥。

1.4 分析项目

COD：重铬酸钾法；悬浮固体 (MLSS) 和挥发性悬浮固体 (MLVSS) 标准重量法；pH：酸度计；挥发酸和碱度：酸碱联合滴定法。

1.5 试验过程

直接将取来的新鲜污泥过筛后，按一定比例投加到浸没式厌氧旋转膜生物反应器接种，加入人工配制模拟啤酒废水至 $100\ \text{L}$ 接种后，反应器内的平均污泥浓度 MLSS 为 $11.5\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，MLVSS 为 $5.28\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ （均按反应器有效体积计算）。设置起始温度为 28°C （投加污泥的温度为 18°C ），膜旋转速度为 $100\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ （初始采用较低的转速为了节能，又能达到稳定运行的目的），当系统膜通量下降时，应逐渐加大转速直至系统运行稳定。HRT 为 $24\ \text{h}$ ，容积负荷为 $1.2\ \text{kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ ，开始启动反应器。为使厌氧微生物适应温度的变化，按每天升高 2°C 至 32°C 不变，以后反应器的维持在 32°C 。污泥在反应器中浸泡 $24\ \text{h}$ 后，开始连续进、出水。观察和测定过膜压差、出水流量的变化。反应器开始启动运行。然后逐步缩短水力停留时间至 $18\ \text{h}$ ，提高容积负荷为 $4.35\ \text{kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

为保证系统的稳定运行，需每天监测其进水、出水和反应器内的 COD；进水、出水和反应器内的 pH；监测出水的挥发酸 (VFA) 和碱度。每隔 $5\sim 7\ \text{d}$ 分别测定污泥浓度 MLSS 和 MLVSS 及 SVI；镜检观察污泥中的微生物生长情况，通过显微镜观察、监测污泥的驯化过程。

2 结果与讨论

2.1 水力停留时间、容积负荷与 COD 去除率的关系

随着系统运行时间的推进，HRT 的缩短，COD 容积负荷的逐渐提高，COD 去除率都相应地发生变化。其变化情况见图 2、图 3。

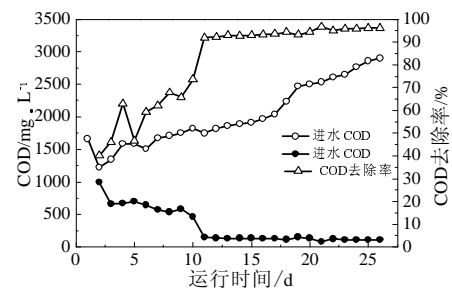


图 2 SDRAnMBR 中进、出水 COD 和 COD 去除率随运行时间变化
Fig.2 Variation of influent COD, effluent COD and COD removal rate with running time in SDRAnMBR

反应器启动初始阶段，使出水流量维持在 $69.3\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ，使水力停留时间维持在 $24\ \text{h}$ ，目的是希望

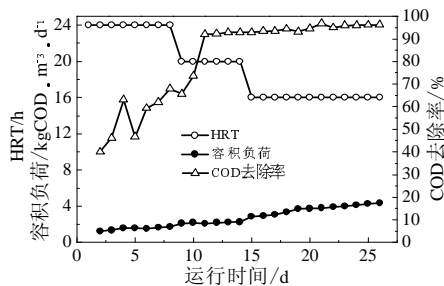


图3 HRT、容积负荷和COD去除率随运行时间变化

Fig.3 Variation of the hydraulic retention time, COD loading rate and COD removal rate with running time

通过较长的 HRT 获得更好的出水效果。运行 9 d 后开始降低 HRT,在第 1 天、第 9 天、第 15 天的 HRT 分别为 24、20、16 h。同时 COD 浓度也又 $1200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐提高到 $2900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。但随 HRT 的降低, COD 浓度的增加,反应器的容积负荷增加,反应器内未发现酸化现象, COD 去除率稳定上升。运行 9 d 后, COD 去除率就由初始的 40.08% 上升到 65.75%。在第 11 天, COD 去除率就由 65.75% 上升到 91.98%。运行的第 15 天, COD 去除率上升为 92.91%。以后 COD 去除率一直稳定在 92.91%~96.75% 范围内。在提高负荷时,对 COD 去除率的影响不大。在第 11 天到第 26 天,出水 COD 在 $81.36\sim 152.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 变化, COD 去除率一直稳定在 92% 以上,最大为 96.75%。比常规厌氧反应器的 COD 去除率 80%^[9] 要大得多。表明已完成反应器的启动和污泥的驯化。此时容积负荷达到 $4.35 \text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。因此本系统的启动完成时间为 26 d。这比任艳双^[9]研究的采用啤酒厂 UASB 的厌氧颗粒污泥, PES 平板超滤膜组件,外置式 UASB-AnMBR 处理实际啤酒废水的启动时间为 58 d 要快的多。分析原因是系统内双轴旋转形成了良好的水力学条件,加强了混合和传质,加快了厌氧微生物的生长,使得 VFA 不易积累在反应器中,加上膜的稳定性作用,使启动速度加快。并且能在短期内达到较高的负荷 ($4.35 \text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)。

2.2 反应器内污泥的变化

本次试验过程中,没有排泥。随着试验的进程以及试验的不同过程,污泥特性发生了变化。启动开始时反应器内的平均污泥浓度启动时的 MLSS 为 $11.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS 为 $5.28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS/MLSS 比值为 0.46, SVI 为 $52.17 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。接种初期驯化阶段的第 8 天,再检测 MLSS 为 $12.35 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS 为 $6.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS/MLSS 比值为 0.51。和原来相比略有增加。分析为由于驯化初期,厌氧微生物为适应新

环境,生长较为缓慢的缘故。

经过 8 d 的运行后,微生物逐步适应环境,且获得了啤酒废水的较为稳定的降解。随后检测 MLVSS 逐渐增加, MLVSS/MLSS 比值上升为 0.60~0.65。表明污泥中无明显无机物累积,且得到了一定的增加,分析为厌氧环境能够有效的截留微生物,另一方面,容积负荷的变化提高,可以提高微生物的增长速率,使得的 MLVSS/MLSS 比值得到了提高。启动过程中污泥的 MLVSS/MLSS 随时间的变化见图 4。MLVSS/MLSS 由 0.46 提高到 0.65。污泥的活性增大。COD 去除率明显升高并稳定。此变化与外置式 AnMBR 处理垃圾渗滤液相似^[11]。随着反应器的运行,污泥浓度逐渐增大,启动完成时 MLSS 为 $14.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。同时污泥沉降性能变差, SVI 由接种时的 $52.17 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 变为 $55.17 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这是因为反应器的污泥浓度和黏度均逐渐增大,导致沉降性能变差。

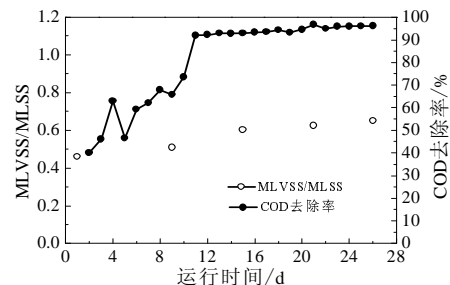


图4 污泥的 MLVSS/MLSS 随时间的变化及与 COD 去除率的关系

Fig.4 Variation of MLVSS/MLSS of sludge with running time and relation of COD removal rate

2.3 VFA、碱度和 pH 对启动过程的影响

2.3.1 pH 对启动过程的影响

在厌氧发酵过程中,环境的 pH 对产甲烷菌的活性影响很大,通常情况下厌氧处理所应控制的 pH 范围是 6.5~7.5。启动后,污泥的进、出水 pH 随时间的变化见图 5。启动初期进水 pH 控制在 6.9~7.4 左右。经过 11 d 的运行, COD 去除率由 40.08% 上升为

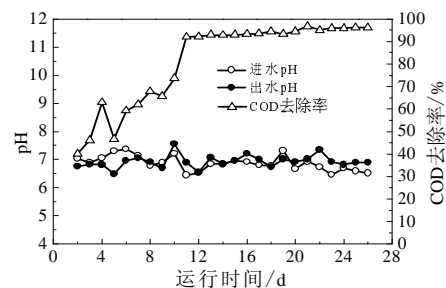


图5 进、出水 pH 和 COD 去除率随运行时间的变化

Fig.5 Variation of influent pH, effluent pH and COD removal rate with running time

91.98% ,出水 pH 在 6.56~7.56 之间 ,反应器未发生酸化现象。这表明接种污泥已基本适应模拟废水水质。随着容积负荷的逐渐提高 ,出水 pH 未发现大的波动在 6.82~7.35 之间变化。此后 ,反应器运行稳定 ,COD 去除率稳定在 92% 以上。在本试验中当出水的 pH 在 7.0 左右时 ,处理效果最佳。一般来说 ,在厌氧反应器启动运行中 ,容积负荷的每次变化都使 pH 发生明显的变化 ,但在本试验中 pH 变化不明显。此结果表明 ,此 SDRAnMBR 系统的耐冲击负荷能力强。

2.3.2 VFA 和碱度对启动过程的影响

在厌氧反应器启动运行中 ,出水挥发酸 (VFA ,以乙酸计) 浓度的变化可以判断产甲烷菌活性的好坏 ,出水中碱度 (以碳酸钙计) 的变化反映着处理效果好坏 ,因此 ,它们是厌氧反应器运行过程中的重要监控指标。图 6 给出了试验在启动后 ,厌氧反应器出水 VFA 浓度、出水碱度、出水碱度与 VFA 的比值与 COD 去除率随运行时间的变化情况。从图 6 可以看出 ,在前 10 d 的运行初期 ,反应器出水 VFA 浓度维持在较高的水平 ,在 317.28~687.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。出水的碱度也较高 ,为 1 456.0~2 645.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水碱度与 VFA 的比值为 4.0 左右 ,系统的缓冲能力较强。为 COD 去除率却由 40.08% 上升为 91.98% ,表明出水 VFA 浓度升高并不一定表示 COD 去除率的降低 ,因此可以理解为反应器内产甲烷菌数量出现了不足 ,即没有足够数量产甲烷菌来代谢所产生的 VFA。随后随着负荷的提高 ,VFA 浓度降低为 190.38~540.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水的碱度为 1 201.36~2 568.35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水碱度与 VFA 的比值提高为 4.14~7.29 之间 ,系统的缓冲能力加强。COD 去除率稳定在 92% 以上。表明反应器有供厌氧菌增值繁衍的空间 ,则随着运行时间的延长 ,负荷的提高 ,VFA 浓度得到一定程度的降低 ,同时 COD 去除率也会随之升高。

上述研究表明 ,正常运行情况下 ,出水碱度为 1 200~2 600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;出水 VFA 在 190~540 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内 ,比常规厌氧反应器的出水 VFA 和出水碱度^[6] 范围要宽得多。出水碱度/VFA 的比值在 4.14~7.29 之间 ;当出水的 pH 在 7.0 左右时 ,处理效果最佳。因此本系统能在负荷提高较快的情况下 ,不发生酸化现象。进一步证实了系统内双轴旋转形成的良好水力学条件 ,加强了混合和传质 ,使得 VFA 不易积累在反应器中 ,加上膜的稳定性作用 ,使系统不易发生

酸化现象 ,耐冲击负荷能力加强。

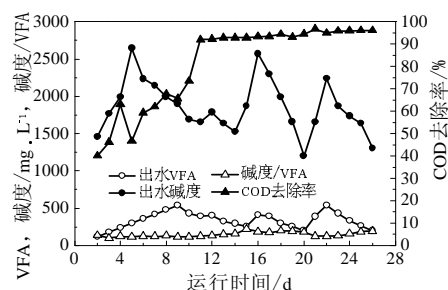


图 6 出水 VFA、出水碱度、碱度/VFA 和 COD 去除率随运行时间的变化

Fig.6 Variation of the effluent volatile fatty acid ,the effluent alkalinity ,the rate of alkalinity on volatile fatty acid and COD removal rate with running time

3 结 论

采用厌氧颗粒污泥在中温下能快速启动本厌氧 MBR。仅用 26 d 就可以完成反应器的启动和污泥的驯化。启动完成时 ,容积负荷达到 4.35 $\text{kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

SDRAnMBR 系统的耐冲击负荷能力强。且 COD 去除率高 ,稳定在 92% 以上 ,最高为 96.75% ,反应器运行稳定。

出水 VFA 和出水碱度范围要宽 ,出水碱度/VFA 的比值较大 ,因此不易发生酸化现象。研究表明 ,本系统在正常运行情况下 ,出水的碱度为 1 200~2 600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;出水 VFA 在 190~540 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内 ;出水碱度/VFA 在 4.14~7.29 之间 ;当出水的 pH 在 7.0 左右时 ,处理效果最佳。

新型 SAnRMBR 系统启动特性的优势主要应归功于双轴旋转膜组件的加入。建议直接采用膜生物反应器启动厌氧反应器。

参考文献 :

- [1] William P Barber, David C Stuckey. The use of the anaerobic baffled reactor for wastewater treatment: a review [J].*Wat Res.*, 1999,33(7):1559-1578.
- [2] Elmaleh S, Abdelmoumni 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] 何立惠,台明青,邓李玲,等.用厌氧+缺氧+好氧组合工艺处理啤酒废水[J].*水处理技术*,2006,32(2):74-76.
- [5] 韩洪军,徐春艳.升流式厌氧污泥床处理啤酒废水的试验研究

(下转第 56 页)

STUDY ON REMOVAL OF ATRAZINE IN RAW WATER BY MEMBRANE BIOREATOR

LI Shao-feng¹, QIN Zhen-zhen², CHEN Lei²*(1.School of Construction and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China;**2.School of Civicism and Environmental Engineering, Jilin Institute of Architecture and Civil Engineering, Changchun 130012, China)*

Abstract: Membrane bioreactor (MBR) and PAC-MBR have been used to remove the atrazine which is one of the Endocrine disrupting chemicals (ED-Cs). The results showed that, atrazine in PAC-MBR system is 54.16% and it is higher than that of MBR system. Also two factors which influence the elimination rate of atrazine during water leakage are analyzed in the research. The elimination rates of atrazine are 17.75%, 27.32%, 38.08% of the MBR system under the condition of different atrazine concentrations for $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the raw water and 2 h of hydraulic retention time. And the elimination rates of atrazine are 36.68%, 41.23%, 42.78% of the PAC-MBR system under the same condition. The elimination rates of atrazine are 16.71%, 20.62%, 37.95% of the MBR system under the condition of different concentrations of organic for $6.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the same hydraulic retention time. And the elimination rates of atrazine are 38.76%, 40%, 40.02% of the PAC-MBR system under the same condition. The results indicate that anti-impact elevating capacity of the PAC-MBR is better than the MBR system obviously. Also it confirmed that the biological action is the main factor in the elimination of atrazine.

Keywords: membrane bioreactor; PAC-MBR; endocrine disruptor; Atrazine

(上接第 38 页)

- [J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(4):440-443.
- [6] 郭永福, 储金宇. 厌氧序批式反应器处理啤酒废水的快速启动研究[J].工业用水和废水,2006,37(2):34-37.
- [7] Diresaen W Y speert P. Anaerobic treatment to flow, medium and high strength effluent in the agro-industry[J].Wat Sci Tech.,1999, 40(8):221-228.
- [8] 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.
- [9] 任艳双. 厌氧膜生物反应器与离子交换工艺组合处理啤酒废水试验研究[D].天津:天津大学,2005:24-28.
- [10] T Vereijkev, P Ljspeert. Biotechnological wastewater anaerobic industrial wastewater treatment: seminar treatment [M].The Netherlands:Paques BV,1992,25-156.
- [11] 冯斐. 厌氧处理垃圾渗滤液的试验研究[D].南昌:南昌大学, 2007:23-24.

STUDY ON THE START-UP CHARACTERISTICS OF A NOVEL SUBMERGED DOUBLE-SHAFT ROTARY ANAEROBIC MEMBRANE BIOREACTOR

BAI Ling^{1,2}, LAN Wei-guang^{1,3}, WAN Jin-bao¹, WANG Jing-bin¹*(1.Key Laboratory of Poyang Lake Ecology and Bio-resource Utilization, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, 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: The start-up characteristic of a new type submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor treating synthetic brewery wastewater was studied. The influence of HRT, COD loading rate, pH, volatile fatty acid, alkalinity and COD removal efficiencies on start-up process was investigated. The reactor was started up during 26 days. Experiment results showed that the SDRAnMBR had strong ability of endurance impact loading, high COD removal which stabilizes at above 92%, higher than conventional anaerobic bioreactor. The reactor can run steadily and the acidification phenomenon has not happened. Furthermore, effluent VFA and alkalinity can change in the larger scope and acidification phenomenon will not happen.

Keywords: submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor; brewery wastewater; start-up characteristics

保护水资源 ,促进西部大开发 ;
节约每一滴水 ,共同创建节水城