

白玲, 刘超, 胡侃, 等. 2009 浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器处理啤酒废水试验 [J]. 环境科学学报, 29(9): 1813– 1819
Bai L, Liu C, Hu K, *et al*. 2009 Treatment of synthetic brewery wastewater by a submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(9): 1813– 1819

浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器处理啤酒废水试验

白玲^{1*}, 刘超², 胡侃¹, 王身相¹

1 江西农业大学理学院, 南昌 330045
2 江西师范大学 计算机信息工程学院, 南昌 330027

收稿日期: 2008-12-03 修回日期: 2009-03-20 录用日期: 2009-06-16

摘要: 研究了新型浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器 (SDRAMBR) 处理模拟啤酒废水的运行性能. 研究表明, SDRAMBR 对啤酒废水有较好的处理效果, 处理过程负荷提高快, 有机物去除率高, 系统耐冲击负荷的能力强, 而且运行非常稳定. 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%. 膜截留和三相旋转流的作用, 加强了在高污泥浓度 (MLSS) 和高负荷条件下运行时的混合和传质, 从而强化了 SDRAMBR 在高 MLSS 和高容积负荷下运行的稳定性和出水水质.
关键词: 浸没式厌氧膜生物反应器; 双轴旋转膜组件; 啤酒废水; 运行性能

文章编号: 0253-2468 (2009) 09-1813-07 中图分类号: X703 文献标识码: A

Treatment of synthetic brewery wastewater by a submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor

BAI Ling^{1*}, LIU Chao², HU Kan¹, WANG Shenxiang¹

1 College of Natural Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045
2 College of computer Science and Technology, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027

Received 3 December 2008 **received in revised form** 20 March 2009; **accepted** 16 June 2009

Abstract The operation performance of a submerged double-shaft rotary anaerobic membrane bioreactor (SDRAMBR) for treatment of synthetic brewery wastewater was investigated. The results showed that the SDRAMBR could effectively treat synthetic brewery wastewater, and the system not only ran steadily but rapidly enhanced organic loading, had strong impact resistance and a high rate of organic substrate removal. During normal operation, when influent COD was in the range 2900~5200 mg L⁻¹ and the volume loading rate was in the range 4.97~12.48 kg m⁻³ d⁻¹ (calculated based on COD), an average of 95.15% COD was removed. Because of the combination of membrane interception and the three-state rotating fluid, the effluent quality and operation stability were strengthened significantly at high mixed liquor suspended solids (MLSS) and high volume loading rate.
Keywords submerged anaerobic membrane bioreactor; double-shaft rotary membrane module; brewery wastewater; operation performance

1 引言 (Introduction)

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工艺 (William *et al*, 1999; Elmakhlouf *et al*, 1998), 并已成为国外如 WERF (Water Environmental Research Foundation) 等协会的研究重点之一 (Choo *et al*, 1996). 浸没式 MBR 由于能耗低、过膜压差 (TMP) 低和占地面积小等优点而得到了广泛的应用, 但目前国内外 AnMBR 的运行方式几乎以外置

式为主, 这主要是因为浸没式 AnMBR 的膜污染控制始终无法真正得到有效解决, 从而限制了它的应用. 因此, 为了控制、解决浸没式 AnMBR 中的膜污染问题, 本研究小组研发了一套浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器 (Submerged Double-shaft Rotary Anaerobic Membrane Bioreactor, SDRAMBR), 利用双轴旋转膜组件在 AnMBR 中动力学流场中产生的均匀化效应、交错振动效应和三相旋转流效应, 最大限度地减轻和控制浸没式 AnMBR 的膜污染, 使 SDRAMBR 得以稳定运行. 啤酒废水属中等浓度的

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (No. 2008GJJ08175)
Supported by the Science and Technology Project of Education Office of Jiangxi Province (No. 2008GJJ08175)
作者简介: 白玲 (1964—), 女, 博士, E-mail: bailing716@yahoo.com.cn, Tel: 0791-8732527; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: BAILING (1964—), female, Ph.D., E-mail: bailing716@yahoo.com.cn, Tel: 0791-8732527; * **Corresponding author**
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有机废水, 由于其可生化性好, 因而适合厌氧生物处理(何立惠等, 2006; 韩洪军等, 2004). 但目前国内外大多采用浸没式好氧 MBR 对啤酒废水进行处理(张立秋等, 2004; 刘旭东等, 2004; 王连军等, 2000), 采用浸没式 AnMBR 处理啤酒废水的研究相对较少(任艳双, 2005), 而采用 SDRAnMBR 处理啤

酒废水的研究尚未见报道. 综合比较 3 种反应器的优缺点比较(表 1), 本试验在自主研发的 SDRAnMBR 基础上, 对其处理模拟啤酒废水的运行效能和有机物的去除效果进行研究, 以期 SDRAnMBR 的推广应用提供技术依据.

表 1 好氧 MBR、AnMBR 和 SDRAnMBR 的比较
Table 1 Comparison of aerobic MBR and anaerobic MBR and SDRAnMBR

反应器类型	优点	缺点
浸没式好氧 MBR	处理效果好, 运行稳定	工艺复杂, 需进行前处理, 膜污染较轻
浸没式 AnMBR	处理效果好, 工艺简单	膜污染严重, 需频繁地清洗
SDRAnMBR	处理效果好, 工艺简单, 运行稳定	膜污染较轻, 清洗时间间隔长

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 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 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 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, 其工艺流程如图 1 所示.

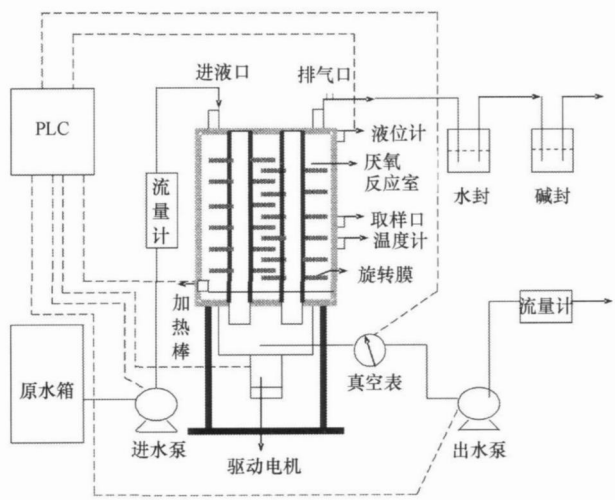


图 1 浸没式双轴旋转厌氧膜生物反应器工艺流程图
Fig. 1 Flow chart of the SDRAnMBR process

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; 由温度控制仪维持反应器内温度, 并控制双轴旋转膜组件的转速. 在一定的转速下, 可保证反应

器内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, 被收集于中空轴内并排于反应器底部的储水池中, 最终由出水蠕动泵排出, 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南昌某啤酒厂 UASB 底部浓缩的厌氧颗粒污泥.

试验采用的模拟啤酒废水由啤酒混合自来水人工配制而成, 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和繁殖需要, 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 (质量浓度比, 其中, C 以 COD 计, N、P 以元素含量计) 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.

2.3 膜材料

实验采用的平片膜材质为聚醚砜 (PES), 由厦门三达膜科技有限公司提供, 截留分子量为 50 kDa, 膜的有效膜面积为 0.32 m^2 .

2.4 试验方法

2.4.1 SDRAnMBR 的运行 整个试验运行期间, 系统没有做任何清洗, 也未排泥. 整个试验过程历时 146 d, 可分为 3 个阶段. 第 1 阶段为启动阶段, 历时 26 d, 控制温度为 32°C , 控制进水 COD 和 HRT 使容积负荷 (COD 负荷率) 为 $1.22\sim 4.35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ (以 COD 计, 下同), 膜旋转速度为 $100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. 第 2 阶段为工艺考察 (负荷提高) 阶段, 运行 60 d, 控制温度为 32°C , 控制进水 COD 和 HRT 使反应器容积负

荷为 $5 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 膜旋转速度为 $100 \sim 150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 考察膜生物反应器的运行效能. 第 3 阶段为稳定运行阶段, 运行 60d, 控制温度为 32°C , 控制进水 COD 和 HRT 使反应器容积负荷为 $10 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, 膜旋转速度为 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 进一步考察膜生物反应器的运行效能.

为保证系统的稳定运行, 需每天监测系统进水、膜出水及反应器内滤纸过滤出水的 COD 和 pH, 同时, 监测能够迅速地反映出反应器的运行状态和甲烷菌活性的膜出水中的挥发酸 (VFA, 以乙酸计) 和碱度 (以碳酸钙计).

2.4.2 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: pH-S-25 型酸度计; 浊度: WZS-180 低浊度仪 (上海雷磁厂, 上海).

3 试验结果 (Experimental results)

3.1 SDRAnMBR 的去除效果

反应器启动运行 146d 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如图 2 所示. 由图 2 可知, 启动阶段的平均 COD 去除率较低, 这是因为启动初期的 COD 去除率低, 但在第 11d 就达到了 91.98%, 此后一直稳定在 92% 以上, 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 94.59%. 在稳定运行阶段, 虽然在较高的负荷 ($11.36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右) 下运行, 平均 COD 去除率依然维持在较高水平 (95.75%). 在第 87~140d 的时间里, COD 的去除率一直稳定在 95% 以上, 只是在运行至 141d 时, COD 去除率才略有下降. 这可能是由于长期的运行使污泥活性有所下降, VFA 上升, 同时, 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%.

在 3 个试验阶段, 对出水浊度进行了检测, 发现出水的浊度稳定在 4NTU 以下. 因此, SDRAnMBR 对浊度有很好的去除效果. 这一方面是 MBR 对浊度物质的生化降解作用, SDRAnMBR 中高浓度生物量的存在, 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, 因而膜对胶体和悬浮物质具有很强

的去除效果.

总体而言, SDRAnMBR 处理模拟啤酒废水, 具有启动迅速、负荷提高快和有机物去除率高的特点, 而且运行非常稳定. 这主要是由于 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.

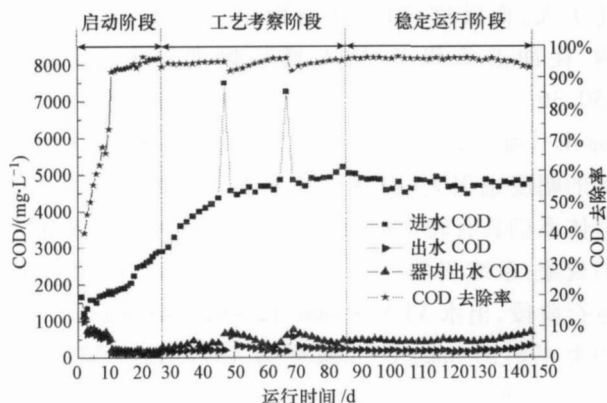


图 2 SDRAnMBR 的去除 COD 效果

Fig 2 The COD removal by the SDRAnMBR

3.2 整个试验过程的污泥浓度变化

本次实验过程中没有排泥, 运行期间的混合液挥发性悬浮固体 (MLVSS)、MLSS 和 MLVSS/MLSS 比值变化如图 3 所示. 由图 3 可知, 在 3 个试验阶段, 随着容积负荷的提高 (由 $1.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 增至 $12.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), MLSS 由 $10.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $19.55 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MLVSS 由 $3.78 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $14.17 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MLVSS/MLSS 比值在 0.36~0.73 之间. 这表明 MLSS 和污泥活性都得到了一定程度的提高, 污泥中无明显无机物累积, 且 SDRAnMBR 中的污泥活性较其他 AnMBR 要高.

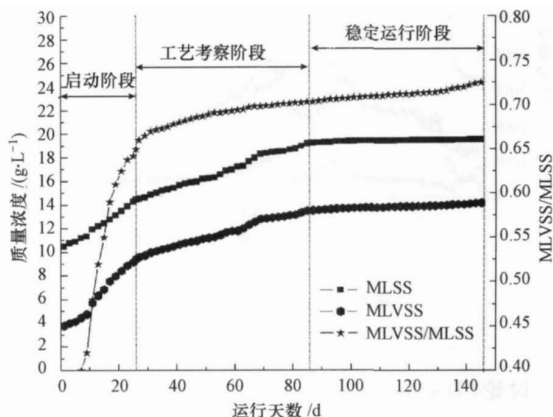


图 3 整个试验期间 MLSS 和 MLVSS 随时间的变化

Fig 3 MLSS and MLVSS in the bioreactor over time

3.3 整个试验过程的碱度、VFA 和碱度/VFA 的变化

图 4 给出了 3 个试验阶段出水碱度、出水 VFA 和碱度/VFA 比值随运行时间的变化关系。由图 4 可知,在启动和工艺考察阶段,随着容积负荷的增加(由 $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 升至 $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$),出水 VFA 缓慢地增加(冲击负荷点除外),出水碱度则变化不大,而碱度/VFA 比值稳定在 3.5~6.5 范围内。在冲击负荷点,VFA 增加幅度较大(分别由 $650.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $865.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $1200.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1320.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而碱度/VFA 比值下降的幅度也很大(分别由 5.35 降为 2.627),但体系仍具有较强的缓冲能力,此时并未出现酸化的现象,系统仍然处于稳定运行状态之中。在稳定运行阶段,出水 VFA 为 $400.12 \sim 625.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均为 $476.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;碱度为 $1597.12 \sim 3529.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均为 $2370.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;碱度/VFA 比值为 3.9~5.3 平均为 4.14。此阶段容积负荷变化幅度较小,出水 VFA 随运行时间的延长而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。这是由长期的运行使污泥活性下降造成的。碱度/VFA 比值稳定在 4.0 左右,在较高的负荷($10 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)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,进一步说明 SDRaMBR 具有处理效果稳定的特点。

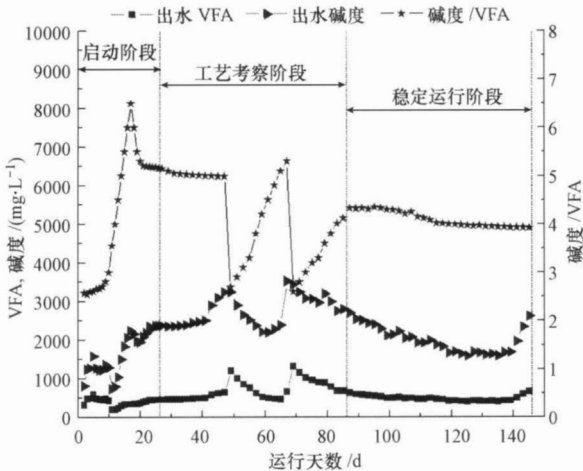


图 4 VFA 与碱度的关系

Fig 4 Relation of VFA and alkalinity

4 讨论 (Discussion)

4.1 进水 COD 及 HRT 的影响

试验采用 HRT 逐渐减少和进水 COD 逐渐增加

同时进行的方法,在较快地提高容积负荷的条件下,考察进水 COD 及 HRT 对 COD 去除率的影响。3 个试验阶段 HRT 和容积负荷对 COD 去除率的影响见图 5

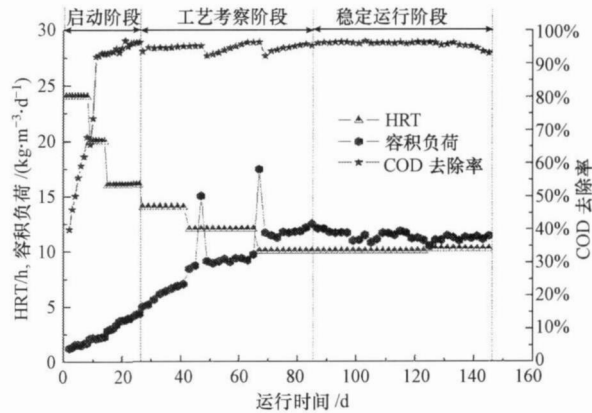


图 5 3 个试验阶段 HRT 和容积负荷对 COD 去除率的影响

Fig 5 COD removal rate at different HRT and COD loading rate during stages 1~3

由图 5 可知,在启动阶段 HRT 较长为 16~24h,进水 COD 的增加幅度较小(由 $1223 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $2900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),对 COD 去除率基本无影响,COD 去除率在运行 12d 后,一直稳定在 92% 以上。当 HRT 分别为 20h 和 16h 时,进水 COD 为 $1750 \sim 2900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 COD 较低,为 $81.36 \sim 152.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在工艺考察阶段,进水 COD 为 $2900 \sim 5200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进一步缩短 HRT 以提高容积负荷至 $11.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,HRT (运行天数)分别设置为 14h (16d)、12h (24d) 和 10h (20d)。随着 HRT 的降低和进水 COD 的增加,反应器的容积负荷增加较快,但反应器运行稳定,COD 去除率一直稳定在 92.0%~96.5% 范围内,COD 平均去除率为 94.55%。只是在提高负荷时,COD 去除率才略有降低,一般降低 1%~2%。在稳定运行阶段,进水 COD 为 $4506 \sim 5036 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,HRT (运行天数)分别设置为 10h (38d) 和 10.2h (22d),反应器运行稳定,COD 去除率一直稳定在 93.0%~96.5% 范围内,COD 平均去除率为 95.75%。

由此可见,在 SDRaMBR 系统中,进水 COD 的变化和 HRT 的波动对 COD 去除率的影响不大,系统的稳定性能强。这主要是因为试验过程中的容积负荷处于 $5 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,可认为是在中高负荷条件下运行,厌氧微生物可以充分降解其中的有机物,因此,在不同进水 COD 下由生物降解造

成的 COD 去除率不会有明显的差别. 另外, 膜滤作用和 SDRAmBR 独有的均匀化效应及三相旋转流效应所导致的优良的动力学特性和传质特性, 加强了高 MLSS 下的混合和传质, 进而高度强化了生物处理后的出水水质, 保证了 COD 去除率不会明显地受到进水 COD 变化的影响. 本实验系统的最佳 HRT 为 10h 左右, 此时 COD 去除率可稳定在 95% 左右.

4.2 污泥活性和 COD 去除率

由试验结果可知, SDRAmBR 的污泥活性比外置式 AmBR 中的污泥活性 (冯斐, 2007) (一般 MLVSS/MLSS 比值在 0.6 左右) 要高得多. 这是因为在本反应器里的厌氧污泥主要由污泥絮体组成, 减少了对底物的扩散阻碍; 另一方面, 由于厌氧生物膜和颗粒污泥的外层才具有活性 (Alphenaar *et al.*, 1993), 使其在 SDRAmBR 中减少了内部传质的限制, 增加了活性生物的含量, 并产生更高的比活性. 这就反过来允许更高的容积负荷和获得高的微生物浓度, 这也正是处理高浓度工业废水所需要的. 同时, 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, 从而提高了 COD 去除率.

在运行后期, MLVSS/MLSS 比值有微小的上升, 但 COD 去除率却有所下降 (图 2 图 3). 这是因为随着污泥龄 (SRT) 延长, 污泥浓度增加而营养物质相对贫乏, 从而加剧了非活性有机成分的产生, 来自腐败细菌的残骸和来自内源呼吸所产生的大量溶解性代谢产物 (多为大分子) 均被膜截留作为 MLVSS, 但这些物质并无活性. 因此, 从表观上体现为 MLVSS 升高, 而 COD 去除率却有所下降, 建议此时应进行排泥.

4.3 碱度、VFA 和碱度/VFA 与 SDRAmBR 的运行性能

SDRAmBR 具有出水 VFA 和碱度范围宽, 处理效果稳定的特点. 这主要是由于 SDRAmBR 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 下的混合和传质, 使 VFA 不易积累. 此 SDRAmBR 的运行性能明显优于王志伟等 (2006) 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 $10 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, VFA 严重积累, 系统酸化, 处理效果严重下降).

4.4 容积负荷和冲击负荷的影响

4.4.1 容积负荷对 COD 去除率的影响 整个试验

运行阶段, 容积负荷对出水 COD 和 COD 去除率的影响如图 6 所示. 由图 6 可知, 反应器在启动阶段容积负荷变化相对比较小 ($1.22 \sim 4.35 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$), 系统平均 COD 去除率为 81.13%, 这是因为此时污泥正处在驯化阶段, 还没有充分适应新的环境. 而在负荷提高阶段, 随着进水 COD 及进水量的增加, 反应器的容积负荷变化较大 ($4.97 \sim 12.48 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$), 但对 COD 去除率的影响不大, COD 去除率一直处在较高的水平, 系统平均 COD 去除率为 94.55%. 在稳定运行阶段, 反应器的容积负荷变化虽小但维持在较高水平, 在 $10.52 \sim 12.09 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 之间, COD 去除率稳定, 平均去除率为 95.75%.

COD 去除率随容积负荷的增加而增加. 容积负荷为 $1.22 \sim 4.35 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 时, COD 去除率增加较快; 容积负荷为 $4.97 \sim 12.48 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 时, COD 去除率增加缓慢, 并趋于稳定; 容积负荷为 $10.52 \sim 12.09 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 时, COD 去除率最终稳定在 95% 水平. 从图 6 中还可以看出, 当容积负荷小于 $4.0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 时, 膜出水 COD 小于 100 mg L^{-1} ; 而当容积负荷在 $4.0 \sim 12.5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 时, 膜出水 COD 大于 100 mg L^{-1} , 并随着容积负荷的升高而增大. 因此, 本研究最佳的容积负荷为 $10 \sim 12 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, 此时 SDRAmBR 工艺很容易适应增加的负荷, 并能在较高容积负荷下稳定运行.

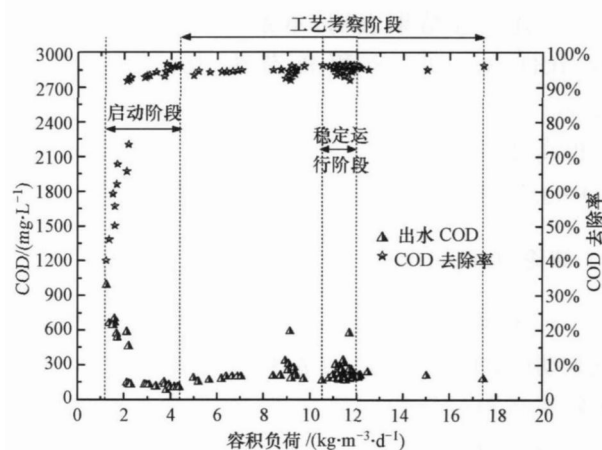


图 6 容积负荷对 COD 去除率的影响

Fig. 6 Effect of volume loading rate on COD removal rate

4.4.2 冲击负荷对 COD 去除率的影响 由图 2 和图 5 可明显看出, 在运行的第 47 和 67d, 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. 在反应器运行过程中, 由于进水水质的变

化分别在运行的第 47 和 67d 时形成了两次冲击负荷. 这两次冲击过程中反应器容积负荷增幅虽然很大, 但膜出水 COD 去除率仍然大于 92%, 比前一运行日降低了 4% 左右, 两次冲击负荷 COD 去除率均在 12d 后就上升至 93% 以上. 由此可见, 冲击负荷均未对膜生物反应器的运行效果产生大的影响.

实验结果表明, SDRAnMBR 处理啤酒废水具有较强的抗冲击负荷能力. 分析原因如下: ①厌氧反应器内污泥浓度高、生物持有量大, 从而充分发挥了 AnMBR 的潜力; ②膜的高效截留作用保证了出水水质的稳定; ③SDRAnMBR 动力学流场所具有的均匀化效应和三相旋转流效应, 特别加强了高 MLSS 下的混合和传质, 因而增强了系统的耐冲击负荷能力. 总体而言, SDRAnMBR 系统的耐冲击负荷能力很强, 且具有能很快恢复稳定运行的性能, 系统适合的容积负荷为 $11 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 左右.

对于 AnMBR 处理人工废水, 一般采用的 HRT 为 12~184 8h, 容积负荷的范围为 $2.0 \sim 10 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, 此时的 COD 去除率大于 92%; 当 HRT 大于 12h 即成为高效厌氧反应器系统 ($10 \sim 20 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$), 可达到很高的 COD 去除率的研究还未见报道(林红军等, 2007). 本工艺在稳定运行阶段的 HRT 为 10h, 反应器的容积负荷为 $10.52 \sim 12.09 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, 成为高效厌氧反应器系统, 此时 COD 去除率稳定, 平均 COD 去除率为 95.75%.

上述试验结果表明, 本系统的最佳操作参数为: HRT 为 10h, 容积负荷为 $10.52 \sim 12.09 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, MLSS 为 $18 \sim 19.5 \text{ g L}^{-1}$. 此时, 系统可获得高质量的出水和较高的 COD 去除率 (平均 COD 去除率高达 95.75%).

5 结论 (Conclusions)

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、有机物去除率高和运行稳定等特点. 在正常运行的 120d 里, 当进水 COD 为 $2900 \sim 5200 \text{ mg L}^{-1}$, 容积负荷为 $4.97 \sim 12.48 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 时, COD 的去除率为 92.13%~96.30%, 平均去除率为 95.15%. 同时, 本系统对浊度有较好的去除效果, 出水浊度稳定在 4NTU 以下.

2) 系统进水 COD 的变化、HRT 的波动和容积负荷的提高对 COD 去除率的影响不大, SDRAnMBR 运行非常稳定, 系统的耐冲击负荷能力

强, 且很容易适应增加的负荷, 并能在较高容积负荷下稳定运行. 本系统的最佳操作参数为: HRT 为 10h, 容积负荷为 $10.52 \sim 12.09 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, MLSS 为 $18 \sim 19.5 \text{ g L}^{-1}$, 此时, 可获得高质量的出水和较高的 COD 去除率 (平均 COD 去除率高达 95.75%).

3) SDRAnMBR 能在较高的负荷 ($10 \sim 12 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) 下长期稳定运行, 不会发生酸化现象, 出水 VFA 和碱度范围宽, 处理效果好且稳定. 在稳定运行期间, 出水 VFA 为 $400.12 \sim 625.48 \text{ mg L}^{-1}$, 平均为 476.57 mg L^{-1} ; 碱度为 $1597.12 \sim 3529.89 \text{ mg L}^{-1}$, 平均为 $2370.65 \text{ mg L}^{-1}$; 碱度/VFA 比值为 $3.9 \sim 5.3$ 平均为 4.14.

致谢: 衷心感谢三达膜科技(厦门)有限公司蓝伟光教授和南昌大学环境科学与化学工程学院万金保教授, 对本课题及完成本文提供的帮助.

责任作者简介: 白玲 (1964—), 女, 副教授 (博士), 硕士生导师. 主要从事膜生物反应器废水处理研究, 发表学术论文 30 余篇.

参考文献 (References):

- Alphenaar A, Pérez M, Lettinga G. 1993. The influence of substrate transport limitation on porosity and methanogenic activity of anaerobic sludge granules [J]. *Appl Microbiol Biotechnol* 39: 276—280.
- Choo K H, Lee C H. 1996. Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor [J]. *Wat Res* 30(8): 1771—1780.
- Ehaleh S, Abdelmouni I. 1998. Experimental test to evaluate performance of an anaerobic reactor provided with an external membrane unit [J]. *Wat Sci Tech* 38(8-9): 385—392.
- 冯斐. 2007. 厌氧 MBR 处理垃圾渗滤液的试验研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 45—48.
- Feng F. 2007. Research on the treatment of landfill leachate by the anaerobic membrane bioreactor [D]. Nanchang: Nanchang University, 45—48 (in Chinese).
- 韩洪军, 徐春艳. 2004. 升流式厌氧污泥床处理啤酒废水的试验研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 36(4): 440—443.
- Han H J, Xu C Y. 2004. Treatment of brewery wastewater with UASB anaerobic reactors [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology* 36(4): 440—443 (in Chinese).
- 何立惠, 台明青, 邓李玲, 等. 2006. 用厌氧+缺氧+好氧组合工艺处理啤酒废水 [J]. *水处理技术*, 32(2): 74—76.
- He L H, Tai M Q, Deng L L, et al. 2006. Treatment of brewery wastewater by anaerobic + oxygen-deficient + aerobic combined technique [J]. *Technology of Water Treatment* 32(2): 74—76 (in Chinese).

Chinese)

林红军, 陆晓峰, 梁国明, 等. 2007 厌氧膜生物反应器的研究和应用进展 [J]. 净水技术, 26(6): 1—7

Lin H J, Lu X F, Liang G M, *et al*. 2007 Research and application progress of anaerobic membrane bioreactors in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 26(6): 1—7 (in Chinese)

刘旭东, 王恩德. 2004 膜生物反应器处理啤酒废水中试研究 [J]. 净水技术, 23(2): 4—6

Liu X D, Wang E D. 2004 A pilot experiment of MBR carried out to treat the beer wastewater [J]. Water Purification Technology, 23(2): 4—6 (in Chinese)

任艳双. 2005 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, 24—28

Ren Y S. 2005 Studying on treatment beer wastewater by the combined system of anaerobic membrane bioreactor and ion exchange [D]. Tianjin: Tianjin University, 24—28 (in Chinese)

王连军, 蔡敏敏, 荆晶, 等. 2000 无机膜-膜生物反应器处理啤酒废水及其膜清洗的试验研究 [J]. 工业水处理, 20(2): 32—34

Wang L J, Cai M, Jing J *et al*. 2000 Beer wastewater treatment with inorganic membrane bioreactor and the cleaning of the membrane [J]. Industrial Water Treatment, 20(2): 32—34 (in Chinese)

王志伟, 吴志超, 顾国维, 等. 2006 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, 32(2): 51—53

Wang Z W, Wu Z C, Gu G W, *et al*. 2006 Study on integral flat-sheet style membrane coupled anaerobic bioreactor for treatment of alcohol distillery wastewater [J]. Feedwater and Drainage, 32(2): 51—53 (in Chinese)

William P, Barber D, Stuckey C. 1999. The use of the anaerobic baffled reactor for wastewater treatment: A review [J]. Wat Res, 33(7): 1559—1578

张立秋, 封莉, 吕炳南, 等. 2004 淹没式 MBR 处理啤酒废水的净化效能 [J]. 环境科学, 25(6): 117—122

Zang L Q, Feng L, Lv B N, *et al*. 2004 Treatment performance of submerged membrane bioreactor treating brewery wastewater [J]. Environmental Science, 25(6): 117—122 (in Chinese)