

斜板式 ABR 水力特性及生活污水的处理

张寿通^{1, 2*} 郭海燕¹ 费庆志¹ 杨凤林³ 张 鑫¹ 孟璐鹭¹

(1 大连交通大学环境与化学工程学院, 大连, 116028; 2 大连理工大学化学工程与技术博士后流动站, 大连, 116024;

3 大连理工大学环境与生命学院, 大连, 116024)

摘 要 采用六隔室斜板式厌氧折流反应器 (ABR) 对生活污水进行处理, 考察了反应器水力特性、化学需氧量 (COD) 去除效果、挥发性脂肪酸 (VFA) 和反应器内污泥性状的变化. 与传统 ABR 相比, 斜板式 ABR 能够有效防止污泥流失. ABR 对生活污水有良好的处理效果, 耐冲击负荷强, COD 去除率可以达到 70% 左右. VFA 含量随着进水 COD 的提高而增加, 主要成分为乙酸, 浓度沿流程降低. 不同隔室污泥性状差异表明产酸发酵段由于污泥有机负荷较高, 厌氧颗粒污泥会发生解体.

关键词 厌氧折流反应器, 生活污水, 厌氧

Grobicki 和 Stuckey^[1] 通过对厌氧折流反应器 (ABR) 的水力停留时间分布 (RTD) 函数的研究, 发现 ABR 的死区远低于其它厌氧生物反应器, 死区容积分数要小得多 (一般为 5%—20%, 平均为 8% 左右). 目前国内外对 ABR 反应器处理高浓度有机废水做了大量的实验研究^[2], 但缺少对低浓度生活污水处理的工程应用研究. 生活污水水量大, 可生化性好, 采用好氧工艺处理成本较高, 研究生活污水厌氧处理工艺具有很大意义.

本论文针对 ABR 反应器运行中存在的污泥流失的问题, 设计了斜板式 ABR 反应器, 与普通 ABR 反应器相比, 污水上流室流速由大变小, 可以有效防止污泥的流失. 本实验对其水力动力学特性进行了研究. 采用该反应器对学校生活污水进行了处理, 考察了反应器的工艺特性.

1 实验方法

1.1 实验装置

反应器的长、宽、高分别为 540mm, 100mm, 320mm, 有效容积 11.5L, 有机玻璃制造. 分为 6 个隔室, 每个隔室由上下两个流室组成. 针对 ABR 反应器存在的污泥容易流失的问题, 本实验设计了斜板式 ABR, 折流挡板是倾斜的, 改变了上流室流速, 能够有效防止污泥流失. 折流挡板与水平夹角 85°, 折流板底部与水平夹角 50°, 下边缘距反应器底板 10mm. 反应器顶部设有排气孔, 侧面上部设有污水取样口, 下部和底部设有污泥取样口. 为了控制系统的温度在中温厌氧条件, 在反应器外设夹套, 用电加热器控制夹套水温在 $34 \pm 1^\circ\text{C}$.

实验进水取自某学校生活污水处理站, 由于水量变化大, 调节时间短, 导致该废水水质波动较大, 总 COD 范围 $500\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ — $2100\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 7.0—7.2, 碱度为 28 — $35\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 进水由恒流泵从贮水槽抽进. 控制水力停留时间 $\text{HRT} = 24\text{h}$, 反应器容积负荷 0.5 — $2.1\text{kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$.

接种污泥采用长期处理人工配制生活污水的三隔室 ABR 反应器厌氧颗粒污泥. 该污泥呈现黑色, 前两个隔室污泥颜色较浅, 微有酸味, 粒径范围在 0.5—1.0mm. 颗粒具有较好的沉降性能, 沉降速率为 $25.4\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$. 单位质量污泥的有机质含量与干重的比值为 75.3%. 将该污泥依照隔室次序大致平均分配到六隔室 ABR 反应器, 即六隔室 ABR 隔室 1、2 接受来自三隔室 ABR 隔室 1 的污泥, 依此类推. 污泥接种量约占隔室有效容积的 1/3. 记录污泥床高度.

1.2 分析方法

定期测定进出水及各隔室混合液化学需氧量 (COD)、碱度和氨氮. 采用蒸馏法测定挥发性脂肪酸

2009 年 1 月 9 日收稿.

* 通讯联系人, E-mail: z_s@hmail.com

©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

(VFA)含量, 采用气相色谱仪 (GC14C, 岛津)测定 VFA 含量和组成. 总氮 (TN)采用 Micro N /C 2000 型 TOC 分析仪测定. pH 采用精密 pH 试纸测定. 污泥形态结构及微生物采用显微镜观察.

采用脉冲信号的示踪实验法进行停留时间分布 (RTD)的测定. 采用氯化钠作为示踪剂, 清水实验采用 电导率仪测定氯离子浓度, 加入污泥后, 由于其它物质影响, 改为硝酸汞滴定法测定氯离子浓度.

参考文献 [3 4] 的方法研究 ABR 的停留时间分布、死区分布等水力特性.

2 结果与讨论

2.1 停留时间分布

清水实验是在反应器内不加污泥的条件下, 采用自来水作为进水, 加入示踪剂进行实验, 考察不同水力停留时间下, 反应器内的水力变化特性. 实验分别在有无污泥条件和不同水力停留时间 (HRT)下运行, 以隔室 1, 3, 6为对象, 研究 HRT对 ABR反应器流态的影响.

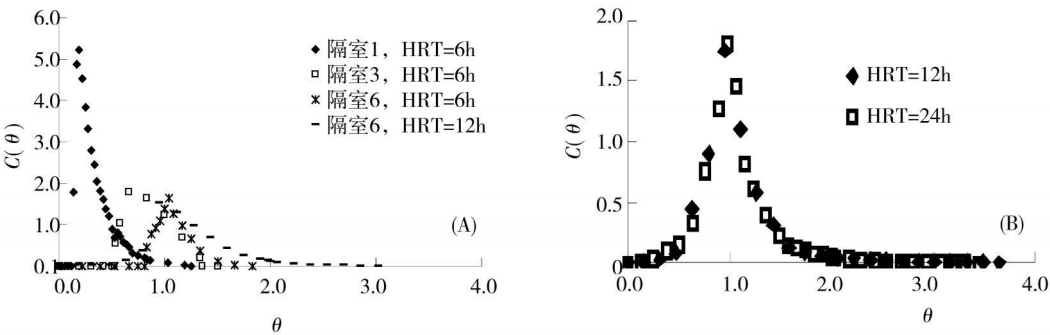


图 1 $C(\theta)$ - θ 曲线 (A: 清水实验, B: 反应器加入污泥条件. $C(\theta)$: 无量纲浓度; θ : 无量纲时间)
Fig 1 $C(\theta)$ - θ curve

由图 1(A)可以看出, $C(\theta)$ - θ 曲线变化规律都是浓度随着时间先变大再变小, 为单峰曲线, 由于死区的影响, 曲线是不对称的; 各个隔室最大浓度出现时间基本与其水力停留时间对应, 即 HRT 决定出峰时间. 但是由于死区分布等因素的影响, 最大浓度实际出现时间与理论上有一定差异. 前面隔室 (例如隔室 1)相较于后面隔室 (例如隔室 6)由于离散程度小, 示踪剂浓度集中, 因而最大浓度值较大, 峰宽较小. 两个 HRT 条件下的隔室 6 曲线比较相似, 说明归一化后的曲线对反应器结构的影响程度是一致的, 这也反映出在没有污泥时反应器停留时间分布只与反应器本身构造相关. 但是在较大停留时间下 (12h)离散程度明显强于较小停留时间 (6h), 在 $C(\theta)$ - θ 曲线上表现为浓度峰较宽.

将污泥填入反应器, 待反应器稳定运行 (COD 去除基本稳定, 时间至少 7d左右)后, 进行不同 HRT 条件下的含污泥反应器的停留时间分布曲线测定. 考察了 HRT 分别为 12h和 24h隔室 6的停留时间分布函数. 实验条件下, 各隔室污泥处于固定床状态, 第 1至第 6隔室污泥床体积占隔室体积百分比为 50%—64%. 从图 1(B)可以看出, 在隔室含有污泥的条件下, HRT对 $C(\theta)$ - θ 曲线的影响不大.

2.2 反应器推流效果

表 1所示为不同实验条件下 ABR反应器的离散数计算结果.

表 1 ABR水力特性参数
Table 1 Hydraulic characteristics parameters of the ABR

实验条件	隔室号	HRT /h	离散数 $D/\mu 1$	实验条件	隔室号	HRT /h	离散数 $D/\mu 1$
清水	1	6	0.272	清水	6	12	0.016
清水	3	6	0.227	污泥	6	12	0.101
清水	6	6	0.087	污泥	6	24	0.123

注: HRT代表反应器整体理论水力停留时间.

由表 1可知,在清水实验条件下,不同 HRT 下反应器的离散数 D/μ 都远小于 1,说明混合液流动方式接近于完全推流.随着 HRT 的增大,混合液流速减小,离散数 D/μ 减小,表明 ABR 反应器的流态随着 HRT 的增大推流效果增强.ABR 隔室数增大,离散数减小,表明增大反应器流向上隔室数目,能提高推流程度.

实验考察了加入污泥的隔室 6在 HRT 分别为 12h和 24h时的相关参数计算结果.与清水实验结果不同的是,HRT 增大, D/μ 也增大,说明污泥床存在条件下,污泥间隙中混合液流速增大且受到厌氧颗粒污泥的阻力影响,导致反应器离散程度增强而推流程度减弱.

根据公式计算隔室特征截面的流速和雷诺数.

$$Re=\frac{Q}{\sqrt{\pi A \mu}} \quad v=\frac{Q}{A}$$

(1)

式中, Re 雷诺数, Q : 流量, A : 截面积, v 截面流速, μ 运动粘滞系数.

式 (1)可以看出,在试验的流量范围内,废水在折板边缘处截面积较小 (10cm^2),流速突然增大 ($0.49\text{--}0.915\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$), Re 为 2.689,以较快流速进入上流室,避免了堵塞问题,在上流室中截面积 (70cm^2) 突然增大,使流速减少 ($0.07\text{--}0.131\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$), $Re=1.015$,大量的污泥在此被截留.

2.3 死区分析

死区的大小不仅与反应器构造有关,还与污泥的状态、存在形式等因素有关.随着 HRT 的增大,反应器内部水流变慢,水流对污泥床的冲击作用变小,就会导致整体死区有变大的趋势.

从表 2的计算结果可以看出,由于生物死区的存在,含污泥条件下反应器死区普遍高于清水条件,而且两种条件下死区分布比例随 HRT 的变化呈相反的变化趋势: HRT 增大,污泥条件下反应器死区容积率增大,而清水条件下减小.这是因为随着 HRT 的增大,反应器内部水流的流速变慢,污泥条件下对污泥床的冲击作用变小,就会导致整体死区有变大的趋势,而清水条件下流速慢返混现象减弱,死区减小.总体来说,斜板式 ABR 由于折流挡板的倾斜,增大了反应器死区容积率.

表 2 不同 HRT 条件下的死区情况

Table 2 Dead zone under different HRT

实验条件	HRT/h	死区容积率 /%	实验条件	HRT/h	死区容积率 /%
污泥	12	21.4	清水	6	10.4
污泥	24	23.4	清水	12	5.6

2.4 VFA 和碱度变化

实验测定了各隔室 VFA 含量随进水 COD 的变化情况 (如图 3).

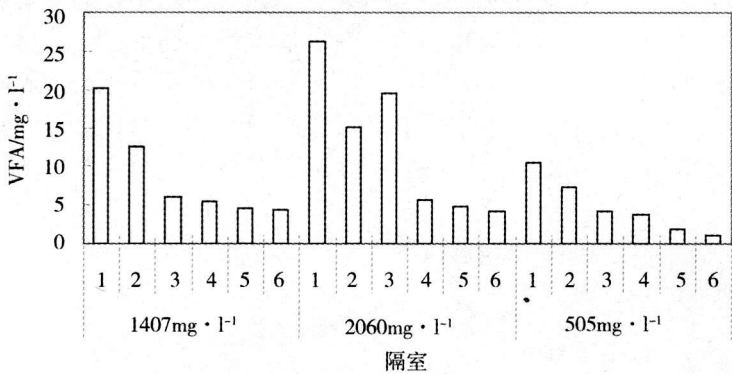


图 2 不同进水 COD 下各隔室 VFA 含量

Fig 2 Concentration ofVFA under d ifferen t influen t COD

在进水 COD 为 $505\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 时,水解酸化作用主要在第 1,2 隔室完成,它贡献了反应器绝大部分 VFA 含量.进水 COD 为 $1407\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 和 $2060\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 时,由于负荷较大,第 1,2 隔室不能完全水解

酸化进水中有机物，反应器第 3 隔室的产酸作用得到加强。这表明当进水 COD 增大时，ABR 以产酸相隔室的增多和产气作用后移来抵抗负荷的冲击以维持反应器稳定运行。

通过气相色谱法分析 VFA 组成，发现其成分基本为乙酸，仅含有少量（不足 1%）丙酸，说明本试验过程中 ABR 内主要发生乙酸发酵，有机物分解的主要产物为乙酸，同时含有少量的丙酸，也反映了产甲烷化过程是生活污水厌氧处理限速步骤。

具有足够的碱度使混合液 pH 值维持在中性范围，对产甲烷菌保持较高的活性是非常重要的。整个反应过程 pH 值均可以保持在 6.6 以上，实验中未添加其它物质调节水体碱度，说明实验所用生活污水具有一定的酸碱缓冲能力。

2.5 COD 去除效果

本实验以进出水及隔室 2、4、6 为研究对象，考察了 ABR 对生活污水 COD 的去除能力。从图 3 中可以看出，在进水 COD = 620mg·l⁻¹ 阶段（1—7d），厌氧菌群已经适应进水，降解活性比较强。进水 COD 分别为 936 mg·l⁻¹，1407 mg·l⁻¹，2060 mg·l⁻¹（8—27d），总容积负荷分别为 0.645 kgCOD·(m³·d)⁻¹，0.787 kgCOD·(m³·d)⁻¹，1.40 kgCOD·(m³·d)⁻¹ 时，每个隔室 COD 去除率基本上都保持稳定，总去除率可达 70% 左右。大部分 COD 主要是在前两个隔室和后两个隔室中被去除（约占总去除量的 90%），这是由于第 1、2 隔室对水中悬浮物的截留，并利用产酸菌实现对有机物的水解，后两个隔室处于产甲烷阶段，对污水中 COD 的去除贡献较大。实验中 ABR 反应器污泥床体积约占反应器有效体积 50%—60%，总去除率显然与此亦有密切关系。

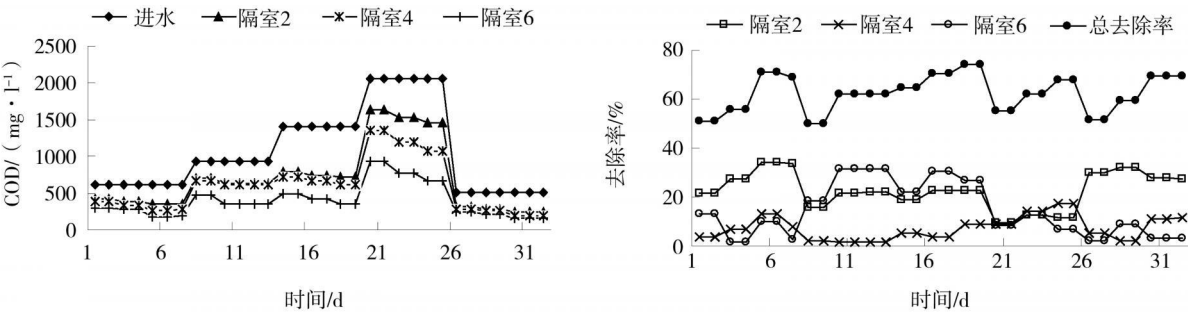


图 3 COD 浓度及去除率的变化
Fig 3 Changes of concentration and removal efficiency of COD

2.6 污泥特性

实验期间由于水力负荷较小，厌氧颗粒污泥在各隔室呈固定床状态。反应器产甲烷量较少，无明显产气现象，气体冲击作用对污泥影响可以忽略。颗粒污泥初接种时呈黑色，实验后期与前期比较，第 1、2 隔室颗粒污泥颜色变浅，粘度增大，有严重酸味。其余隔室呈亮黑色，污泥无粘稠感，有臭味。通过显微镜观察（如图 4），第 1、2 隔室污泥颗粒周围均产生了絮状微生物菌群附着物，并且有解体趋势。这是因为前两隔室污泥负荷高，污泥表面的发酵细菌过度生长，产酸较多，并分泌大量胞外多聚物，降低了颗粒污泥的密实性，甚至导致颗粒污泥分解。

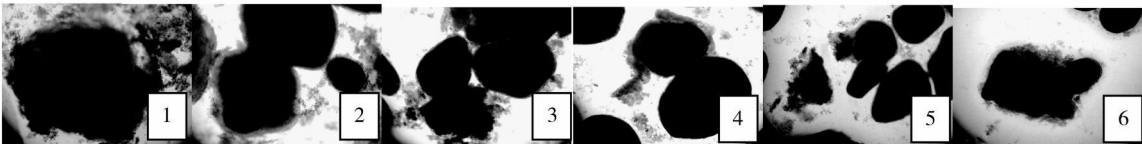


图 4 反应器各隔室厌氧污泥照片（1—6 分别为隔室 1 到 6 内的污泥颗粒）
Fig 4 Microscope photos of anaerobic sludge in different compartments

同一隔室试验后期的颗粒污泥粒径比反应器启动后的粒径大，并且颗粒污泥的粒径沿着水流方向逐渐减小，呈现明显的分级现象，这主要是由于各隔室负荷沿水流方向递减造成的。第 1、2 隔室中出现粒径 > 5mm 的颗粒污泥，粒径 > 0.2mm 的污泥占到三分之二左右，絮状物增多，呈粘稠状。第

3 4 5 6隔室粒径 $> 2.0\text{mm}$ 的颗粒污泥也有二分之一左右, 而 $< 0.5\text{mm}$ 的颗粒污泥只有四分之一.

3 结论

(1) 在没有污泥的情况下, ABR反应器的结构对它的水力特性有重要影响. ABR 隔室数增大, 反应器推流效果增强. ABR反应器的流态随着 HRT的增大由完全混合流向推流转变. 含污泥条件下, HRT增大, 反应器混合程度增强而推流程度减弱. 两种条件下死区分布比例随 HRT的变化呈相反的变化趋势, HRT增大, 污泥条件下反应器死区容积率增大, 而清水条件下减小. 总体来说, 与传统 ABR相比, 斜板式 ABR由于折流挡板的倾斜, 增大了反应器死区容积率, 有效防止了污泥流失.

(2) ABR对生活污水有良好的处理效果, 耐冲击负荷强, 本实验中生活污水 COD去除率可以达到 70% 左右, 绝大部分 COD在前两个隔室和后两个隔室中去除. VFA 组成分析表明, 反应器各隔室混合液中主要 VFA为乙酸. 甲烷化过程是生活污水厌氧处理的限速步骤.

(3) 显微镜观察结果和出水 TSS增大现象表明, 高污泥负荷条件下厌氧颗粒污泥会发生解体.

参 考 文 献

- [1] Grobicki A, Stuckey D C, Hydrodynamic Characteristics of the Anaerobic Baffled Reactor [J]. *Water Research*, 1992, 26 (3) : 371—378
- [2] 王健, 沈耀良, 废水厌氧反应器工艺的未来发展方向 [J]. *污染防治技术*, 2002, 15 (2) : 13—15
- [3] 胡细全, 刘大银, 蔡鹤生, ABR 反应器结构对水力特性的影响 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2004, 3 : 369—374
- [4] Levenspiel O, Chemical Reaction Engineering [M]. New York: Wiley, 1974

HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PERFORMANCE OF AN INCLINED-BAFFLE ABR

ZHANG Shou-tong^{1, 2} GUO Hai-yan¹ FEI Qing-zhi¹ YANG Feng-lin³ ZHANG Xin¹ MENG Lu-lu¹

(1 School of Environmental and Chemical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

2 Postdoctoral Research Centre of Chemical Engineering and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

3 School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT

An inclined-baffle anaerobic baffled reactor (ABR) with six compartments was applied to treat domestic wastewater. The hydraulic characteristics of the reactor, COD removal efficiency, content of volatility fatty acid (VFA) and sludge performance were investigated. As compared with conventional ABR, percentage of dead zone generally increased in the inclined baffled ABR, but sludge loss was effectively avoided. Domestic wastewater could be efficiently treated in the ABR, with less impact by the shock of COD fluctuation. The COD removal efficiency could reach about 70%. The content of VFA in ABR increased with the increase of the influent COD. The main component of VFA was acetic acid. The concentration of VFA decreased with the flow. The phenomena observed by microscopes and the increase of TSS in effluent showed that anaerobic granular sludge could disaggregate under high sludge load rate. The research showed that ABR is an economically stable and efficient process for domestic wastewater treatment.

Keywords anaerobic baffled reactor; domestic wastewater; anaerobic