

厌氧折流板反应器的相分离现象实验研究

杨建^{1,3}, 李东伟^{1,2}, 李斗¹, 王克浩¹, 楚文海⁴

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院 重庆 400044; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 3. 东风设计研究院有限公司 武汉 430056; 4. 同济大学环境科学与工程学院 上海 200092.)

摘要: 对厌氧折流板反应器处理以淀粉和葡萄糖为基质的人工配水进行了研究, 分析了厌氧折流板反应器的工艺特征和运行稳定性, 同时对厌氧折流板反应器实现多相分离的现象进行了研讨。研究表明: ABR 反应器在室温 33 °C~40 °C, 容积负荷 0.59~11.05 kgCOD/(m³·d) 条件下, 各格室成功培养出适应格室内环境条件的微生物群体, COD_{cr} 去除率高达 90% 以上, 反应器运行稳定。

关键词: ABR; SMPA; 微生物相

中图分类号: X502

文献标识码: A

文章编号: 1006-7329(2008)02-0121-03

Research on the Phase Separation of Anaerobic in ABR

YANG Jian^{1,3}, LI Dong-wei^{1,2}, LI Dou¹, WANG Ke-hao¹, CHU Wen-hai⁴

(1. College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044; 2. The Key Laboratory of Exploitation of Southwest Resources & Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing 400044; 3. dongfeng design institute co. ltd wuhan 430056; 4. College of Environment Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: This paper studied the ABR treating artificial water compounded with starch and glucose and analyzed the ABR technology characteristic and operation stability. In the meantime it studies and discusses the phases separation phenomenon that anaerobic ABR actualized. Under the operation conditions T= 33°C~40°C and NV = 0.59~11.05 kgCOD/(m³·d), each compartment successfully develops the microorganism community that can adapt to the corresponding environment condition, COD_{cr} removal rate reaches up to 90% and the reactor runs at a stable condition.

key words: ABR; SMPA; biology community.

厌氧折流板反应器(ABR)集合了当今在全球盛行的升流式厌氧污泥床(UASB)和极有应用前途的分阶段多相厌氧反应技术(SMPA)于一体。分阶段多相厌氧反应技术(SMPA)是由 G. Lettinga 教授提出的。SMPA 系统的基本观点是:在各级分隔的空间中培养与该空间的底物组分及环境因子(如 pH, H₂ 分压等)相适宜的微生物种群,防止各个单独空间中形成的污泥相互混合,不同部分产生的气体单独排放,不与其它部分的混合,反应器内形成推流模式,废水和微生物的接触充分,得到更高的处理效率^[1,2]。

SMPA 将厌氧处理过程中不同种群微生物对基质利用的不同生理生态原理,及以反应动力学为基础的相分离和以反应器中物料流态的水动力学为基础的

复合流态概念相结合,代表了高效新型厌氧处理工艺的研究和开发的主导方向,而在众多的高效厌氧反应器中,ABR 被认为是可以完美的实现 SMPA 工艺的思想要点的反应器^[3]。

1 实验材料和方法

1.1 实验装置和条件

实验用 ABR 反应器见图 1,反应器由玻璃制作而成,用档板将反应器分为四个主体格室,单个格室有效容积为 3.75 L,总有效容积为 15 L。实验温度在室温 33 °C~40 °C 之间,接种污泥取自重庆啤酒厂厌氧反应器内的厌氧消化污泥,接种量为反应器有效容积的 1/3。实验用水为以淀粉和葡萄糖为基质的人工配水,以尿

* 收稿日期:2007-09-22

基金项目:重庆自然科学基金资助项目(CSTC,2005BB7253)

作者简介:杨建(1982-),男,四川人,硕士生,主要从事工业有机废水治理技术和环境灾害控制工程的研究与设计,(E-mail) yangjiscy@163.com。李东伟(联系人),男,副教授,博士后,(E-mail) liltonwei@126.com。

素、 NH_4Cl 和 K_2HPO_4 为氮源和磷源, $\text{COD} : \text{N} : \text{P} = 200 \sim 250 : 5 : 1$, 用 NaHCO_3 进水调节碱度, 配水中还含有 Mg 、 Fe 、 Ca 、 Sn 、 Mn 等微生物所需的金属元素。

1.2 实验方法

污泥接种驯化数天后开始连续进水, 以低负荷启动反应器, 初始容积负荷仅 $0.59 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 待运行稳定后增加进水 COD_{cr} 浓度提高容积负荷, 在此采用高频提负的方式运行, 只要反应器 COD_{cr} 去除率超过 80% 即提高负荷, 以利于反应器更快速实现相分离, 最终 COD_{cr} 容积负荷为 $11.05 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

表征厌氧反应器是否有相分离的研究, 是通过测定反应器不同位置的 VFA 和 pH 值的变化, 因为 VFA 的产量和 pH 值的变化情况与产酸菌的活性密切相关。一方面在相同的 COD_{cr} 有机负荷下, HRT 越长, 产酸和产甲烷相的分离点明显前移; 另一方面, 在相同的 HRT 下, 受到负荷冲击越大, 所产生的 VFA 也越多^[4]。

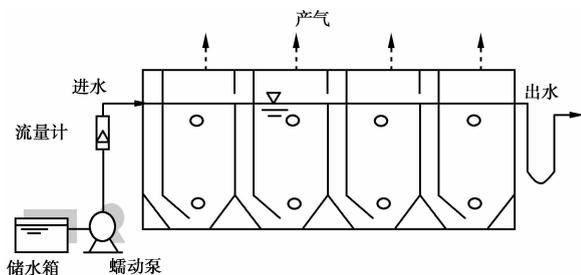


图 1 ABR 反应器的结构示意图

2 实验结果与分析

2.1 各格室 COD_{cr} 去除率的变化情况

反应器以较低的 COD_{cr} 容积负荷启动驯化, 初始容积负荷仅为 $0.59 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 启动开始后 COD_{cr} 总去除率在 $60\% \sim 80\%$ 之间, 经一段时间驯化, 接种污泥适应废水的水质后, COD_{cr} 去除率始终保持在 90% 以上, 据此提高反应器容积负荷。容积负荷的提高都会引起去除率的波动, 但是幅度不大, 稳定运行几天后去除率又能恢复原来的状况, 容积负荷达到 $11.05 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, COD_{cr} 去除率仍保持在 90% 以上。从图 2 可以看出, 在后面阶段第一格室的 COD_{cr} 去除率相对其它格室要高, 可以认为反应器 COD_{cr} 去除主要是通过通过对水中悬浮物淀粉的截留、产酸菌的利用来实现的, 后面阶段进水浓度增大, 水中悬浮淀粉浓度相应增加, 使得第一格室整体去除率较高。而随着进水浓度的增加, 由于负荷高, 以产酸菌为主的格室增多, 产气作用后移, 也就需要更多的格室来补偿对 COD_{cr} 的去除, 从而引起第二格室 COD_{cr} 去除率的下降, 进水浓度低时却正好相反。

2.2 VFA 的变化对相分离的影响

反应器 VFA 的变化可表征相分离的情况, VFA

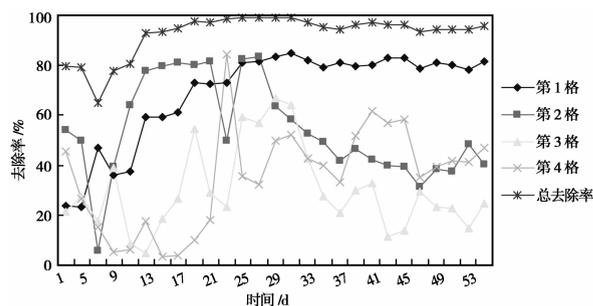


图 2 COD_{cr} 去除率随时间变化情况

的产量和产酸菌的活性密切相关, 当产酸相反应器最适合某一种群微生物生长繁殖时, 这一种群就会很快在与其他种群的竞争中取胜并成为优势种群, 此时优势种群所进行的生理代谢总体表现为以某种挥发性脂肪酸(丙、丁、乙酸)和醇类为主的发酵类型群^[5]。

从图 3 中可以看出, 在反应器运行前 10 d 由于进水浓度较低、反应器有机负荷较小, 各格室 VFA 也相应较小, 开始阶段后面格室 VFA 甚至为零, 反应器没有明显的相分离现象。运行至 25 d, 随着进水 COD_{cr} 浓度和有机负荷的提高, 反应器各格室 VFA 逐渐增大为 751 mg/L , 442.1 mg/L , 154.5 mg/L , 40 mg/L , 各格室 VFA 呈现有规律的递减趋势, 开始出现的相分离现象, 笔者认为在前两格室大分子的淀粉与葡萄糖在水解酶的作用下水解为小分子物质, 而小分子物质在以丙、丁、乙酸等为主的发酵类型的产酸菌群作用下转化为相应的挥发性脂肪酸, 同时也包含部分挥发性脂肪酸的降解作用。后面两格室 VFA 比前面格室有明显的降低, 主要发生丙、丁酸等有机酸在产氢产乙酸菌作用下转化为乙酸以及乙酸等在产甲烷菌作用下转化为 CH_4 和 CO_2 的反应。

通过热力学分析可知, 细菌对丙酸和丁酸降解只有在环境 H_2 分压较低的情况下才能进行^[6]。而 ABR 反应器有独立分隔的酸化反应室, 酸化过程产生的 H_2 以产气形式先行排除, 因此有利于后续产甲烷阶段中丙酸和丁酸的代谢过程在较低的 H_2 分压环境下顺利进行, 避免了丙酸、丁酸过度积累所产生的抑制作用^[2]。由此可以看出, 在 ABR 各个反应室中的微生物相是随流程逐级递变的, 递变的规律与底物降解过程协调一致, 从而确保相应的微生物相拥有最佳的工作活性。在厌氧消化过程中, 不同微生物种群的生存环境有很大的差异, 随着 ABR 反应器有机负荷的增加, 受微生物代谢速率的影响, 各格室内更多未能被降解的底物将逐渐向后一格室转移, 而使得格室内微生物种群作出相应变化, 因此相分离点有向后移的趋势。

34 d 以后, 随着有机负荷的提高, 出现第二格室 VFA 高于第一格室的情况。可以认为第一格室承受的负荷增加, 使得第一格室主要发生淀粉和葡萄糖在水解酶的作用下的水解作用, 而只有部分小分子物质转化为

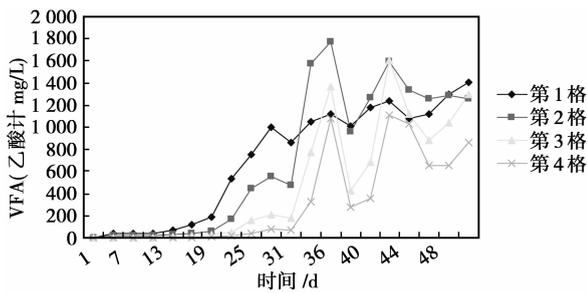


图3 VFA随时间变化图

挥发性脂肪酸,第二格室将第一格室出水中未降解的物质进一步转化为挥发性脂肪酸而使得VFA比第一格室有所增加,前面两格室几乎不产气,产气作用后移,而后续反应室将先后完成各类VFA到甲烷的转化。

2.3 产酸相和产甲烷相的pH值

有报道说在厌氧生物处理的第一步产酸阶段的最佳pH值范围为4~6.5,对于其后的产甲烷相最佳pH值范围为6.5~8.2^[7]。图4为各格室的平均pH值,可以看出,平均pH值沿各格室逐次递增,几乎类似于线性变化,同时,在运行过程中各格室的pH值随着有机负荷的提高却是逐步降低的,而第四格室内的平均pH值仍然保持在产甲烷相最佳pH值范围,ABR反应器对废水这种沿程降解的特性,为产甲烷细菌代谢在适宜的pH值范围内创造了有利的条件。因为各相之间的最佳pH值范围如此明显的不同,由此可见相分离使每一相都保持了它们各自最佳的条件,总体运行效率将会更高,这种假设似乎是合理的。

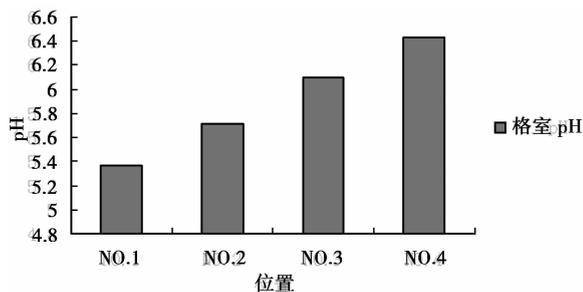


图4 各格室平均pH值

在相同的HRT条件下,受到的负荷冲击越大,所产生的VFA越多,在这样的情况下由于VFA的积累而使pH降低,由于前面格室所承受的有机负荷比后面格室高出许多,这对前面格室特别是第一格室的影响较为明显,在这种条件下就使得前面格室甲烷菌难于繁殖。在其后的甲烷相虽然随VFA的提高受到一定影响,但在分格室的独立环境下使得大部分的VFA在产甲烷相能够被消耗,因此pH值仍可保持在中性范围内,这也是ABR反应器运行稳定性的原因之一。尽管产酸相的环境条件对甲烷菌而言是相当恶劣的,但要在产酸相完全消除产生甲烷菌是非常困难的。

2.4 生物相的变化

高效厌氧反应器的最大特点就是形成沉降性能良好、产甲烷活性高的颗粒污泥,厌氧颗粒污泥的形成使反应器中具有丰富的微生物相,从而确保厌氧生化过程稳定高效运行^[3]。由于接种污泥性状较好,反应器在启动18d后即有颗粒污泥的出现,一个月后颗粒污泥粒径增大到2mm~3mm,通过高倍显微镜观察,各格室污泥中占优势的菌种并不一样。第一格室中颗粒污泥表面菌种主要以水解和产酸菌为主,存在大量的杆状以及丝状体微生物,颗粒污泥结构较松散,表面有乳白色的粘液层附着。第二格室颗粒污泥表面菌种较第一格室复杂,既包括部分水解和产酸发酵细菌,又包括少量产甲烷菌,颗粒污泥表面呈灰色,相对来说占优势的为产酸细菌,形状上主要为杆状、丝状以及部分球状的细菌。第三格室与第二格室类似,只不过占优势菌种变为产乙酸细菌和产甲烷菌,颗粒污泥颜色呈碳黑色。第四格室则主要由甲烷八叠球菌及甲烷杆菌等构成,由于进入第四格室的基质浓度已经很低,颗粒污泥相对前面格室较小。

由于各格室基质浓度、运行情况、水力混合条件等的不同,颗粒污泥呈现出各种不同的不规则形状,如球形、椭圆形甚至短杆形等,图5为在显微镜下各格室颗粒污泥的情况。

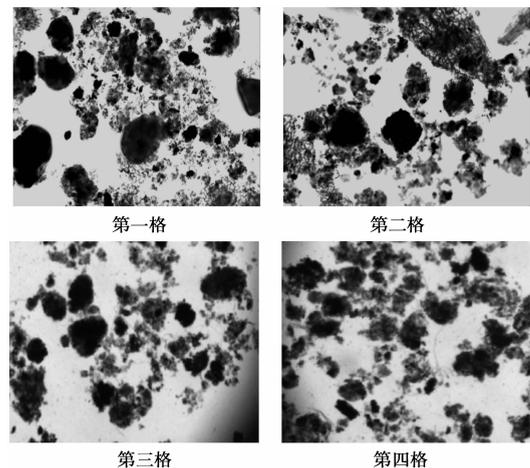


图5 各格室颗粒污泥外观(40倍)

3 结语

1) ABR反应器由于其独特的结构使得各格室能够培养出与格室内环境条件相协调的微生物群落,这使得反应器具有较高的 COD_{cr} 去除率以及较强的耐冲击负荷能力。通过观察,反应器运行一段时间生物相实现分离后,各格室微生物组成逐渐发生变化,前面格室主要以水解和产酸菌为主,而后面格室则主要以产甲烷菌为主。

(下转 145 页)

- 土的性能研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 665-671.
- [41] Han Zhu, Norasit Thong-On, Xiong Zhang. Adding crumb rubber into exterior wall materials[J]. Waste Management and Research, 2002, 20(5): 407-414 (in Chinese).
- [42] 胡鹏, 朱涵, 王旻. 橡胶集料混凝土渗透性能的研究[J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(4): 8-12.
HU Peng, ZHU Han, WANG Min. Experimental study on permeability of crumb rubber concrete [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2006, 22(4): 8-12 (in Chinese).
- [43] 欧兴进, 朱涵. 橡胶集料混凝土氯离子渗透性试验研究[J]. 混凝土, 2006(3): 46-49.
OU Xing-jin, ZHU Han. Experimental study on chloride ion permeability of crumb rubber concrete [J]. Concrete, 2006(3): 46-49 (in Chinese).
- [44] 王开惠, 朱涵, 祝发珠. 氯盐侵蚀环境下橡胶集料混凝土的力学性能研究[J]. 长沙交通学院学报, 2006, 22(4): 38-42.
WANG Kai-hui, ZHU Han, ZHU Fa-zhu. Investigation on mechanics performances of crumb rubber concrete under chlorine salt erosion [J]. Journal of Changsha Communications University, 2006, 22(4): 38-42 (in Chinese).
- [45] ILKER BEKIR TOPCU, N AVCULAR. Collision behaviors of rubberized concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(12): 1893-1898.
- [46] DIMITRION G. GOULIAS and Al-HOSAIN Ali. Non-Destructive Evaluation of Rubber Modified Concrete [C]. In: Proceedings of a Special Conference, ASCE, New York, 1997. 111-120.
- [47] 陈振富, 柯国军, 胡绍全, 等. 橡胶混凝土小变形阻尼研究[J]. 噪声与振动控制, 2004(3): 32-34.
CHEN Zhen-fu, KE Guo-jun, HU Shao-quan, et al. Study on damping of rubber powder concrete in small deformation [J]. Noise and Vibration Control, 2004(3): 32-34 (in Chinese).
- [48] 许静, 朱涵, 刘春生, 等. 橡胶集料混凝土阻尼比的初步试验研究[J]. 混凝土, 2005(11): 40-42.
XU Jing, ZHU Han, LIU Chun-sheng, et al. Preliminary experimental studies on damping ratio of crumb rubber concrete [J]. Concrete, 2005(11): 40-42 (in Chinese).
- [49] 史巍, 张雄, 陆沈磊. 橡胶粉水泥砂浆隔声功能研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 553-557.
SHI Wei, ZHANG Xiong, LU Shen-lei. Sound insulation function of cement mortar modified with crumb rubber [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 553-557 (in Chinese).
- [50] 龙广成, 谢友均, 李建. 废旧橡胶颗粒改性水泥混凝土及其工程应用[J]. 粉煤灰, 2005(2): 3-4.
LONG Guang-chen, XIE You-jun, LI Jian. Modified cement concrete mixed with waste rubber grain and its application in engineering [J]. Coal Ash China, 2005(2): 3-4 (in Chinese).

(编辑 王秀玲)

(上接第123页)

2) 由于微生物之间相互依赖的特性, 实验并不能将各微生物体系完全分离开来。水解与酸化过程是相互作用, 由相同的微生物种群完成的, 所以这两个过程是不可以完全分割的; 而为了保持较低的氢分压, 产乙酸菌需要嗜氢甲烷菌的活动, 因此, 产乙酸过程与产甲烷过程也并不能完全分割开来。

参考文献:

- [1] G LETTINGA. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future[J]. Wat Sci Technol, 1997, 35(10): 5-12.
- [2] 黄永恒, 王建龙. 折流板厌氧反应器的工艺特性及其应用[J]. 中国给水排水, 1999, 15(7): 18-20.
HUANG Yong-heng, WANG Jian-long. The technological feature of ABR and its application [J]. China Water and Wastewater, 1999, 15(7): 18-20.
- [3] 吕炳南, 陈志强. 污水生物处理新技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [4] 束琴霞, 沈耀良, 陈坚. ABR反应器运行稳定性的研究[J]. 环境工程, 2004, 22(5): 16-18.
SHU Qing-xia, SHENG Yao-liang, CHENG Jian. Study on the operational stability of ABR [J]. environment engineering, 2004, 22(5): 16-18.
- [5] 任南琪, 马放. 产酸发酵微生物生理生态学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [6] PERTER N HOBSON, ANDREW D WHEATLEY. Anaerobic Digestion—Modern Theory and Practice[M]. 1994.
- [7] R. E. 斯皮思. 工业废水的厌氧生物技术[M]. 李亚新译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

(编辑 陈蓉)