

多点分区进水厌氧折流板反应器运行效能研究

彭举威^{1,2}, 韩相奎^{2*}, 康春莉¹, 赵新桐², 孔伟²

(1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026; 2. 吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 长春 130021)

摘要:以4格室单侧进水厌氧折流板反应器(ABR)为对照,研究了分区进水对ABR运行效果的影响。结果表明,在室温条件下, HRT=4 h时,单侧进水ABR对溶解性COD去除率为30%,而分区进水ABR对COD的去除率平均为35%,最高可达45%, COD去除率平均提高5%以上。分区进水ABR各室内生物种群主要以兼性水解酸化菌为主,同时亦存在产甲烷菌。分区进水避免了反应器第1格室内有机负荷过高,挥发性脂肪酸(VFA)过度积累的弊端,改善了反应器后部格室有机基质不足的现象,增强了反应器内微生物的活性,提高了对污染物去除的能力。

关键词:厌氧折流板反应器;分区进水;颗粒污泥;生物活性

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)09-2625-05

Study on Running Efficiency of More Spots Divisional Influent of Anaerobic Baffled Reactor

PENG Ju-wei^{1,2}, HAN Xiang-kui², KANG Chun-li¹, ZHAO Xin-tong², KONG Wei²

(1. College of Environmental and Natural Resources, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: The experimentation studied running efficiency of divisional influent mode to anaerobic baffled reactor (ABR) compared with single influent anaerobic baffled reactor that had four compartments. The results showed that the average soluble COD removal rate of single influent was 30%, but divisional influent anaerobic baffled reactor was 35%, and the highest value might reach to 45%, the removal rate of COD was improved over 5% than single influent anaerobic baffled reactor. The main biological processes were micro-aerobic hydrolysis and acidification, at the same time the methane-producing bacteria existed too. The means of divisional influent could avoid high organic loading in the first compartment that led the volatile fatty acids (VFA) to accumulate overly and might improve the fact of lacking organic substance at the back compartment and let reactor to have high microorganism activity and improve ability of reducing contamination.

Key words: anaerobic baffled reactor (ABR); divisional influent; granular sludge; microorganism activity

最初的折流式厌氧反应器(ABR)是 Bachmann等在20世纪80年代提出的一种新型高效厌氧消化反应器^[1,2],主要应用于高浓度和难降解废水的预处理。其结构特点是内置竖向导流板,将反应器分隔成串联的几个反应室,采用单侧进水。废水依次流经每一格室时,被截留的有机物首先被活性高的、降解能力强的水解酸化菌分解成小分子物质,其中的有机污染物被逐步降解^[3,4]。由于流经各格室废水中基质成分的不断变化,决定了反应器各格室内优势生物种群的不同。

传统ABR的进水方式易导致反应器前部格室有机负荷过高,造成VFA大量积累,致使内部环境pH值降低,抑制反应器内微生物的种群与活性^[5-7]。同时,单侧进水势必会造成反应器前部格室营养过度集中,而后部格室有机物又较为匮乏,相应生物种群量不足且活性不高,致使系统的效率偏低^[8,9]。目前,进水形式对ABR反应器运行效率影响的研究鲜见报道。因此,本研究采用多点进水方式,

以第1格室进水为主,其它各格室按比例少量进水,从而有效减小第1格室有机负荷,并使后续各格室内有机基质不足的现象得到改善,以提高反应器的整体运行效率。

1 材料与方法

1.1 试验装置及废水

试验装置由高位水箱、兰格蠕动泵、ABR反应器、湿式气体流量计等构成(图1)。为保证试验结果的可比性,两反应器为4个格室,均用有机玻璃制成,规格相同,长、宽、高分别为400 mm、100 mm和300 mm,每个格室的有效容积为2.25 L,总有效容积9 L。各格室相对独立,上设集气口,下设排泥口,反应器的上向流与下向流格室宽度比为3:1,折流板

收稿日期:2008-10-24; 修订日期:2008-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50778080)

作者简介:彭举威(1973~),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为废水治理技术, E-mail: pjw_lsh@126.com

* 通讯联系人, E-mail: han_xiangkui@163.com

底部折起角为 45°, 各格室内均设弹性填料. 为方便论述, 单侧进水 ABR 用 S 表示, 分区进水 ABR 用 D 表示.

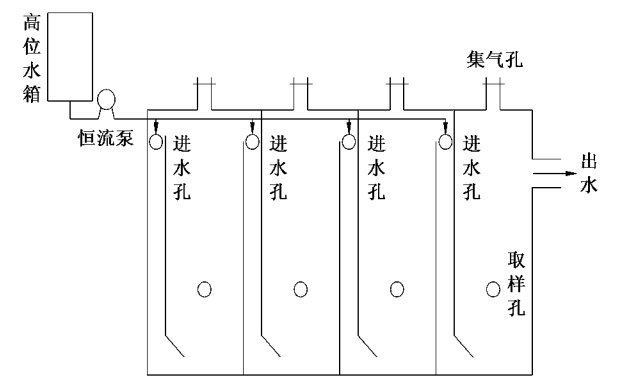


图 1 分区进水 ABR 反应器的示意

Fig.1 Schematic diagram of the divisional influent ABR

试验采取人工配制废水, 每 100 L 水中加葡萄糖 12 g、可溶性淀粉 4 g、奶粉 12 g、硝酸钾 2 g、磷酸二氢钾 3 g、氯化铵 12 g、尿素 8 g、碳酸钠 3 g 等, COD 浓度控制在 200 ~ 300 mg/L 之间.

1.2 试验方法

2 个反应器采取相同的试验条件, 以二沉池的活性污泥作为接种污泥, 每个格室内加入浓缩后的活性污泥 0.5 L, 在室温条件下以原水静态挂膜 5 d. 然后控制 $HRT = 8\text{ h}$, 进水量为 18 mL/min, D 反应器各下向流室按 4:3:2:1 的比例同时进水, 运行 15 d 进行启动. 之后提高进水量为 39 mL/min, 运行 60 d. 具体的研究内容为: ① D 反应器的启动方法及启动过程中 COD 变化规律; ② D 反应器对氮和磷的去除效果; ③ 两反应器内颗粒污泥的形成和微生物菌群差异.

2 结果与分析

2.1 对 COD 的去除效果

由图 2、图 3 可见, 启动初期 $HRT = 8\text{ h}$, 2 个反应器对 COD 浓度为 250 mg/L 左右低浓度废水进行处理时, 在试验 6 ~ 20 d 期间, D 反应器的出水 COD 值稍高于 S 反应器, 对 COD 的去除率分别为 23% 和 27%. 笔者认为, 在低负荷下 S 反应器由于在第 1 格室内积累的生物量多于 D 反应器第 1 格室生物量, 且废水中的有机污染物浓度较低, 对反应器的前部冲击影响不大. 因此, S 反应器在各格室内形成适合各自环境条件的菌种, 废水在依次流过各格室时, 废水中的基质得到了有效降解. 在试验初期, D 反应器各格室内的生物量表现为依次递减, 并且由 2、3、4

格室进入的污水在反应器内的总停留时间小于 S 反应器的总水力停留时间. 因此, D 反应器对 COD 去除低于 S 反应器.

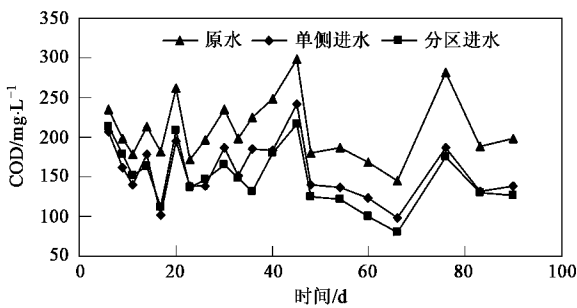


图 2 两反应器出水 COD 随时间变化曲线

Fig.2 Variation curves of effluent COD in the two reactors

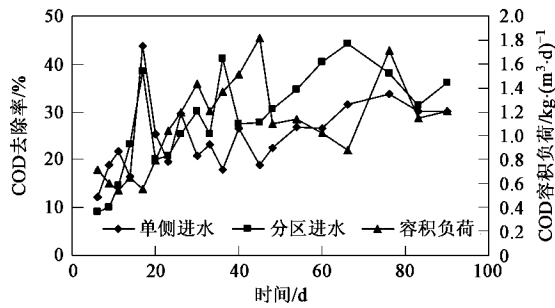


图 3 两反应器有机负荷与 COD 去除率的关系

Fig.3 Relationship between organic load and removal rate of COD in the two reactors

保持进水 COD 浓度不变, 增大进水流量, 控制 $HRT = 4\text{ h}$, 在试验第 23 ~ 40 d 期间, D 反应器的出水 COD 低于 S 反应器, 2 个反应器的 COD 去除率分别为 28% 和 23%. 笔者认为, S 反应器第 1 格室内有机负荷高于 D 反应器第 1 格室内有机负荷, 致使 VFA 大量积累, 水解酸化并不完全, 水解酸化过程被推移至后面格室, 对环境较为敏感的产甲烷菌活性受到抑制, 而在反应器后部格室的微生物可降解的有机物又较匮乏, 反应器后部多为活性较低的产甲烷菌. 分区进水则避免了单侧进水存在的上述弊端, 分区进水即有效降低了第 1 格室的有机负荷, 同时又改善了反应器后部各格室内有机基质不足的现象, 进水方式的改变增强了反应器各室内微生物的活性. 2 个反应器在后续的对比较试验中, D 反应器出水 COD 值均低于 S 反应器, D 反应器 COD 去除率平均保持在 35%, 而 S 反应器对 COD 的去除率仅为 30%. 在进水有机负荷为 $1\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, D 反应器对 COD 去除可达 45%, 分区进水方式在废水处理方面表现出

较好的效果.

2.2 反应器内颗粒污泥的性能研究

2 个反应器运行稳定后,笔者在第 80 d 时分别取各格室的颗粒污泥进行镜检,结果发现 2 个反应器各格室内的微生物种类有着明显差异.由图 4 可见,两反应器内的颗粒污泥的构成多含丝状菌类,但各格室内的微生物菌群各不相同,这与 2 个反应器的运行方式有着密切的关系.在 S 反应器内微生物呈现出种群分布递变的特点,这与各格室内 pH 值、基质的变化有关,反应器前部格室内主要存在以产酸菌为主的水解酸化菌群,后部格室为产甲烷菌,由于废水中 COD 浓度较低,因此,产甲烷菌以丝状菌为主,未发现甲烷八叠球菌^[10,11].而在 D 反应器内,

由于进水方式的不同,从各格室的镜检图片发现,反应器各格室的微生物菌群多为水解酸化菌群,同时也存在产甲烷菌群,占进水量大的第 1、2 格室内的菌群比较细小且稠密,主要为水解酸化菌,第 3 格室水解酸化菌中有短粗状的菌种,为甲烷杆菌,第 4 格室中有甲烷丝状菌存在.由于 S 反应器前部格室营养物质过度集中,而在反应器后部营养物质缺乏,使反应器后部格室内微生物的菌丝呈现较粗较长的特点(见图 4 中 S₄).相反,在 D 反应器后部格室中未见粗长的菌丝,分区进水弱化了对环境要求苛刻的产甲烷阶段^[12],反应器内微生物多为活性高的水解酸化菌群,这就提高了反应器的水解酸化效能.

2.3 两反应器中氮的去除

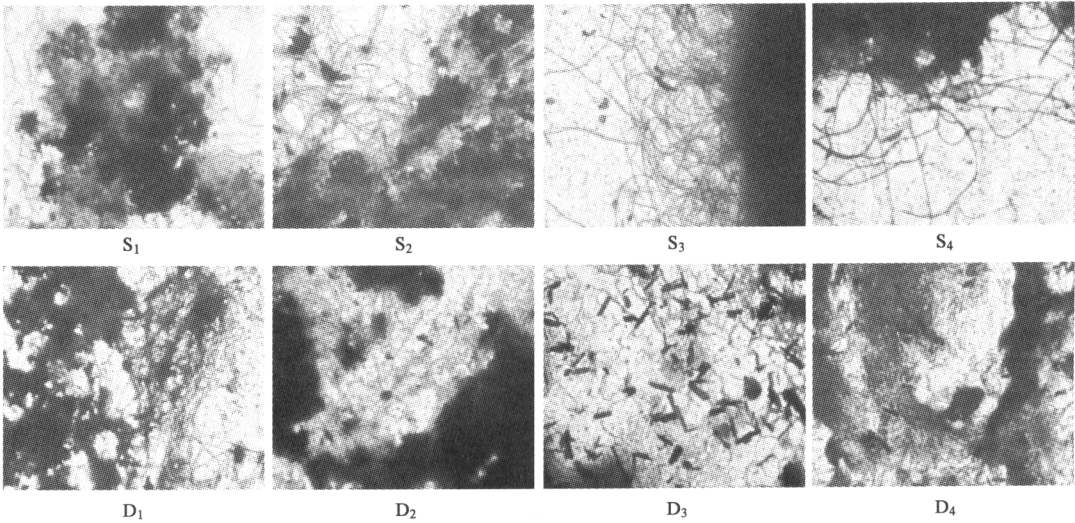


图 4 两反应器各室内微生物情况
Fig.4 Compare of microbe in the two reactors

为了能够实现在一个单一的反应器内去除有机污染物的同时,达到对氮元素的去除,对反应器出水氮素含量进行了测定.试验发现 2 个反应器对 TN 虽然有一定的去除,但对 NH₄⁺-N 不但没有去除,反倒有所增加,结果见图 5 和图 6.

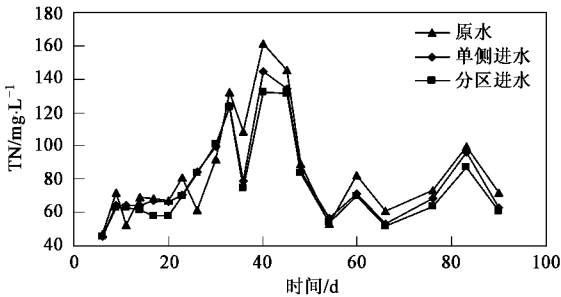


图 5 两反应器对 TN 去除曲线
Fig.5 Compare curves of TN removal in the two reactors

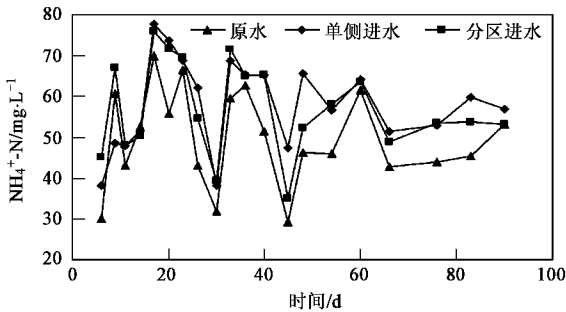


图 6 两反应器对 NH₄⁺-N 去除曲线
Fig.6 Compare curves of NH₄⁺-N removal in the two reactors

由图 5 中可以发现,2 个反应器对总氮的去除效果均较低,原因为反应器处于厌氧或缺氧状态,而氮的去除主要与硝化和反硝化作用有关,虽然在厌氧条件下可以发生硝化反应,但对环境要求很高,而

且反应速度很慢,并且需要适合的条件范围^[13-16].另一方面厌氧条件下微生物的生命活动对氮的需求也远远不如好氧微生物.由于反应器的 HRT 时间较短,因此,在总氮的去除上,2 个反应器的效果差异并不很明显.

在厌氧条件下, NH_4^+ -N 的去除主要依靠 NH_4^+ 能够被硝化细菌快速氧化为亚硝酸盐,但是,实际测定中 NH_4^+ -N 的浓度不但没有降低,反倒有所增加,见图 6.有机物在反应器内首先被水解,然后在微生物作用下进行脱氨基分解,脱氨基作用不仅能在有氧条件下进行,也能在缺氧条件下发生,分解的产物为 NH_4^+ 和一种不含氮的有机化合物^[17].含氮的有机物在分解过程中生成 NH_4^+ ,这是废水中 NH_4^+ 的主要来源,另一个来源为硝酸盐异化作用生成铵^[13].废水中的氮主要以 NH_4^+ 形态存在,而 ABR 反应器为厌氧反应器,通过硝化细菌将 NH_4^+ 氧化为亚硝酸盐,然后再转化为硝酸盐的硝化过程难以发生^[18,19].

2.4 两反应器对磷的去除

在试验启动初期对反应器的出水中磷浓度进行了测试,结果发现两反应器的出水磷浓度不稳定,有时出水中磷浓度高于进水,测定结果见图 7.

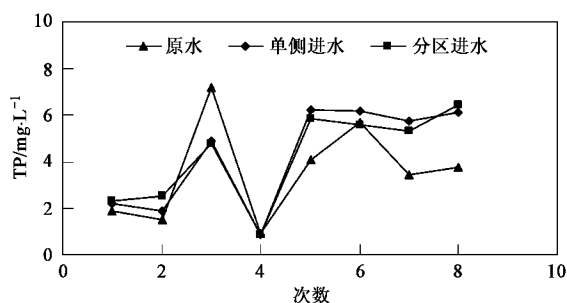


图 7 两反应器对 TP 去除曲线

Fig.7 Compare curves of TP removal in the two reactors

由图 7 可见,2 个反应器出水磷的浓度值高于原水中磷的浓度,笔者认为,废水中磷的去除只有一小部分是供反应器内微生物生命活动需要,出水中磷不但没有去除反而会增加这一反常的现象,是由于在厌氧条件下发生了吸磷所致.近年来,有学者研究了在厌氧条件下通过反硝化过程达到除磷的目的,其原理是在厌氧条件下以硝酸盐作为电子受体进行吸磷,同时达到脱氮除磷的效果^[20,21].Vlekke 等^[22]在 SBR 反应器的试验中也证实了以 NO_3^- 作为电子受体对磷吸收的事实.郭海娟等^[23]在研究 C/N 对反硝化除磷效果的影响时发现,17 L 污水中在加

入 20 mmol/L KNO_3 时,反应器除磷效果不好,会出现“二次释磷”现象.由于两反应器进水 NO_3^- 浓度约为 10 mg/L,废水的 NO_3^- 在反应器内一部分供反硝化菌消耗,另一部分用于厌氧氨氧化,第 3 部分用于聚磷菌吸磷,使废水中 NO_3^- 被消耗,在厌氧条件下,反应器后部发生释磷现象,致使出水磷的浓度较原水高.

3 结论

(1)以二沉池活性污泥接种 ABR 反应器,2 个反应器在启动运行 23 d 后,分区进水 ABR 出水 COD 值低于传统单侧进水 ABR,研究结果表明分区进水可有效降低 ABR 反应器前部格室有机负荷,增强了各格室内微生物的活性,提高了 ABR 反应器的运行效果.

(2)分区进水向各格室提供生物生命活动所需的营养物质,改变了反应器内生物种群的分布.通过镜检发现分区进水 ABR 反应器各室内微生物的种类差异不明显,主要以活性较高的水解酸化菌为主.

(3)2 个反应器对氮和磷的去除率均较低,差异不大.反应器出水氨氮的浓度较进水浓度高,是由于氨化作用和硝酸盐发生异化作用生成铵的缘故.反应器的出水含磷浓度较原水高,是由于在反应器前部发生以 NO_3^- 为电子受体的吸磷现象,而在反应器后部发生二次释磷所致.

(4)在室温条件下,HRT=4 h 时,分区进水 ABR 对低浓度有机废水 COD 去除率平均 35%,最高可达 45%,ABR 反应器由单侧进水变为分区进水 COD 去除率平均提高 5%,试验表明 ABR 分区进水在废水处理运行上具有可行性.

参考文献:

- [1] Bachmann A, Beard V L, McCarty P L. Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor [J]. Water Research, 1985, 19(1): 99-106.
- [2] Grobicki A, Stuckey D C. The role of ormate in the anaerobic baffled reactor [J]. Water Research, 1989, 23(12): 1599-1602.
- [3] Van Lier J B, Lettinga G. Development of thermophilic methanogenic sludge in compartmentalized upflow reactor [J]. Biotechnol Bioeng, 1996, 50(2): 115-124.
- [4] 蒲迅赤,李克锋,李嘉,等.紊动对水体中有机物降解影响的实验[J].中国环境科学,1999,19(6):485-489.
- [5] 彭举威,王宏哲,崔玉波,等.高效厌氧折流板反应器分区进水的启动实验[J].环境科学与技术,2008,31(11):28-30.
- [6] 崔玉波,尹军,曲波,等.厌氧折流板反应器的启动试验[J].中国给水排水,2002,18(7):75-76.
- [7] 宋铁红,高艳娇,张勇.ABR 反应器处理低浓度污水启动试验

研究[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(1): 26-27.

[8] Uyanik S, Sallis P J, Anderson G K. Improved split feed anaerobic baffled reactor(SFABR) for shorter start-up period and higher process performance [J]. Water Sci Technol, 2002, **46**(4): 223-230.

[9] 郭静, 李清雪, 马华年, 等. ABR 反应器的性能及水力特性研究[J]. 中国给水排水, 1997, **13**(4): 17-22.

[10] Nachaiyasit S, Stuckey D C. The effect of low temperature on the performance of anaerobic baffled reactor (ABR): 1. Step changes in feed concentration at constant retention time [J]. Water Research, 1997, **31**(11): 2737-2746.

[11] Nachaiyasit S, Stuckey D C. The effect of low temperature on the performance of anaerobic baffled reactor (ABR): 2. Step and transient hydraulic shocks at constant retention time [J]. Water Research, 1997, **31**(11): 2747-2754.

[12] 任南琪, 赵庆良. 水污染控制原理与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 172-174.

[13] Barber W P, Stuckey D C. Nitrogen removal in a modified anaerobic baffled reactor (ABR): 1. denitrification [J]. Water Research, 2000, **9**(34): 2413-2422.

[14] 马勇, 彭永臻, 陈伦强, 等. 实际生活污水短程/全程硝化反硝化处理中试研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2477-2482.

[15] Bodik I, Kratochvil K, Gašpariková E, *et al*. Nitrogen removal in an anaerobic baffled filter reactor with aerobic post-treatment [J]. Bioresource Technology, **86**(2003): 79-84.

[16] 马勇, 彭永臻. 城市污水处理系统运行及过程控制[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 209-214.

[17] 任南琪, 马放. 污染控制微生物学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002. 328-333.

[18] 赵志宏, 廖德祥, 李小明, 等. 厌氧氨氧化微生物颗粒化及其脱氮性能的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 800-804.

[19] 张代钧, 祖波, 任宏洋, 等. 氨氧化菌混培物在 O₂/微量 NO₂ 下的氨氧化动力学[J]. 环境科学, 2007, **29**(1): 127-133.

[20] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. Water Research, 2001, **35**(16): 3968-3976.

[21] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 533-537.

[22] Vlekke G J F M, Comeau Y, Oldham W K. Biological phosphate removal from wastewater with oxygen or nitrate in sequencing batch reactors [J]. Environ Technol Lett, 1998, **9**: 791-798.

[23] 郭海娟, 马放, 沈耀良. C/N 比对反硝化除磷效果的影响[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(3): 367-371.