

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.006

周东卉, 吴时强, 祝龙, 等. 折流式厌氧反应器水力特性分析[J]. 水利水电工程学报, 2015(4): 37-42. (ZHOU Dong-hui, WU Shi-qing, ZHU Long, et al. Analysis of hydraulic characteristics of anaerobic baffled reactor[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 37-42.)

折流式厌氧反应器水力特性分析

周冬卉¹, 吴时强¹, 祝 龙¹, 吕学研²

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036)

摘要: 折流式厌氧反应器(ABR)的处理效果受水力特性的影响较大,而水力停留时间(HRT)又是影响反应器内水力特性的一个重要因素。运用欧拉双流体模型和标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型,对不同 HRT 下 ABR 反应器内的多相流场进行三维数值模拟,并从反应器内水流速度、固含率两个方面探讨分析了 HRT 对反应器内部流场特性的影响。分析结果表明: HRT 变化对各反应室内降流区水流速度的影响不大,升流区内的循环水流速度随 HRT 的减小而增大;反应器内污泥颗粒的分布范围受 HRT 影响显著, HRT 过短或过长,均不利于提高反应器的处理效率, 5~8 h 时为 ABR 反应器的最佳水力停留时间,最有利于去除污水中的污染物。

关 键 词: 折流式厌氧反应器; 多相流; 水力停留时间; 固含率

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)04-0037-06

折流式厌氧反应器(Anaerobic Baffled Reactor,简称 ABR)是一种高效新型的废水处理设备^[1],内部的流体动力学特性控制着反应器内的物质传输,决定着目标污染物与反应器中微生物的接触程度,从而影响整个反应器的处理效果,因此水力特性是反映其性能的一个重要指标^[2-3]。对污水处理反应器来说,水力停留时间(HRT)是 ABR 反应器的流体力学基本参数,对反应器的水力特性影响较大^[4-5]。

本文运用欧拉双流体模型^[6-7]对 ABR 反应器的多相流流场进行数值模拟,并对计算结果进行分析讨论,研究水力停留时间(HRT)对反应器内部流场特性的影响规律,为反应器的运行和设计提供有效的科学依据。

1 数学模型和研究方法

ABR 工艺采用一系列竖向导流板将反应器分隔成串联的几个反应室。一般情况下,废水通过上部进水管进入反应器后,在导流板引导下,上下折流前进。降流区内水流向下,升流区内水流向上,并逐个通过反应器内的污泥床^[8-9]。水流在经历了串联的 5 个反应室后排出反应器。

本文利用数值方法研究 ABR 反应器内的流场特性,在建立数学模型之前对 ABR 反应器结构以及实际运行情况进行简化和基本假设:

(1)实际 ABR 反应器内沼气由废水与微生物接触产生,本文采用从底部外加空气的方法模拟沼气;用纯水代替污水;ABR 反应器内颗粒污泥形态不同,粒径为 0.5~5.0 mm,本文假设颗粒污泥直径为 1 mm。

收稿日期: 2014-11-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07506-003-04);国家自然科学基金资助项目(51309156,51479120,51479121)

作者简介: 周冬卉(1986—),女,江苏泰州人,博士研究生,主要从事环境水力学研究。

E-mail: zhoudonghui0514@163.com

(2) 假设入口处流体均匀分布。反应器模型的尺寸为 $600\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 650\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 自由液面高 560 mm , 反应器分 5 个反应室, 每个反应室宽 200 mm , 进水管和出水管直径 15 mm , 集气管直径为 20 mm , 反应器底部污泥颗粒占反应器有效体积的 30% , 即污泥床高度 180 mm (ABR 反应器几何模型见图 1)。

由于 ABR 反应器内部结构以及边界比较复杂, 对反应器采用分块划分网格的方法, 大部分使用六面体网格单元, 个别位置允许有楔形体, 具有进出口边界的区域使用四面体网格单元划分, 网格总数为 147 351 (如图 2)。

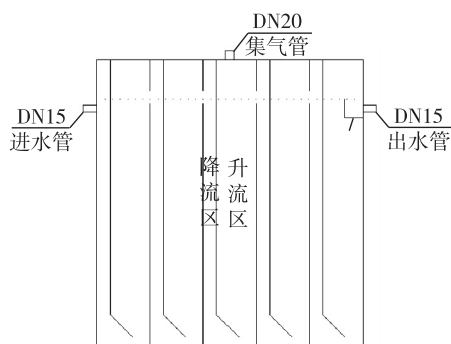


图 1 ABR 反应器几何模型

Fig. 1 A geometric model for ABR reactor

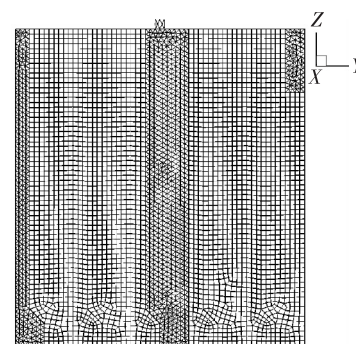


图 2 ABR 反应器网格划分

Fig. 2 Mesh generation in an ABR reactor

ABR 反应器内的流动视为不可压缩的多相紊流, 采用标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟, 欧拉双流体模型模拟多相流流动过程。设曝气气泡直径为 1 mm , 颗粒污泥粒径为 1 mm 。进水管处设置为液相速度进口边界条件; 反应器底部设置为气相速度进口边界条件; 由于底部单独进气, 因此气相体积设置为 1, 产气量 2.4 L/h , 因此进气口速度为 0.056 mm/s ; 出水管处采用自由出流的边界条件, 壁面采用无滑移边界条件。反应器内自由液面位置通过设置不同区域内各相的体积分数来确定, $z=560\text{ mm}$ 为自由液面的高度, 在 $z=0\sim 180\text{ mm}$ 区域内液相(水)的体积分数为 0.7 , 固相(污泥颗粒)的体积分数为 0.3 , 即污泥浓度为 30% ; 在 $z=560\sim 650\text{ mm}$ 区域内气相(空气)的体积分数为 1 。

2 试验结果分析与讨论

水力停留时间 HRT 为反应器有效容积与进水流量之比, 所以 HRT 的变化可以表现为进水流量的改变, 通过调整进水速度可以观察水力停留时间的变化对反应器流场的影响。因此, 为了分析水力停留时间对流场特性影响, 固定其他运行条件, 进水管处的进水流速分别取 0.0085 , 0.014 , 0.023 和 0.028 m/s , 对应的水力停留时间分别为 $14, 8, 5$ 和 4 h 。以反应器内的水流速度和固含率为考核指标, 比较不同 HRT 的流场变化及对 ABR 反应器水力特性的影响。

2.1 对水流速度的影响

图 3 为不同 HRT 时 $x=0.1\text{ m}$ 平面上的水流速度分布。可见, 自由液面处的水流速度最大, 这是因为顶部挡板的反作用, 再加上气体溢出自由液面时水体会受重力影响而向下流动所致。

ABR 反应器分为 5 个反应室, 每个反应室的流场分布相似, 本文对第 2 反应室中 $y=0.14, 0.16, 0.19, 0.22\text{ m}$ 共 4 个不同位置的水流速度进行讨论分析, 具体位置见图 4(a)。图 4(b)~(d) 是不同 HRT 时第 2 反应室中不同位置的水流速度分布曲线。

从 $y=0.14\text{ m}$ 处水流流速分布曲线(图 4(b))可见, 降流区中水流速度随深度分布均匀, 仅在接近自由液面的位置, 在顶部挡板作用下, 水流速度突然变大。结果还显示, 在 4 个工况下水流速度分布基本相似, 变化不大, 可见改变 HRT 对各个反应室内降流区中水流速度的影响不大。

近导流板($y=0.16\text{ m}$)处水流速度分布曲线(图 4(c))显示, 在 $z=0.75\text{ m}$ 以下的区域, 4 个工况的水流

速度均很小, $z=0.075 \sim 0.500$ m 之间区域中, 水流速度随 HRT 的减小而增大; 而在接近自由液面处, 水流速度会突然增大, 水流以较高的速度进入下一个反应室。

近边壁($y=0.22$ m)处水流速度分布曲线(图 4(d))显示, 靠近边壁处的水流向上运动, 在接近自由液面处出现回流, 水流以较大速度向下运动, 在升流区中部形成水流循环。结果还表明, 随着 HRT 的减小, $y=0.22$ m 处向上的水流速度也逐渐增大, 发生回流的高度也逐渐接近自由液面, 在 HRT 为 14 和 8 h 时, 分别在 $z=0.4$ 和 0.45 m 处发生回流, 当 HRT 减小至 5 和 4 h 时, 在接近自由液面 $z=0.56$ m 处才开始产生回流, 且回流速度较大。

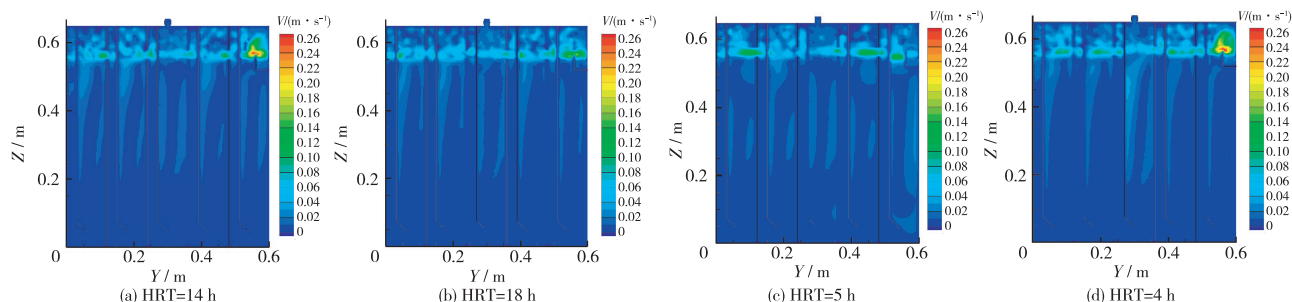


图3 不同 HRT 时 y - z 平面($x=0.1$ m)水流速度分布

Fig. 3 Flow velocity distribution of y - z plane ($x = 0.1$ m) at different HRT

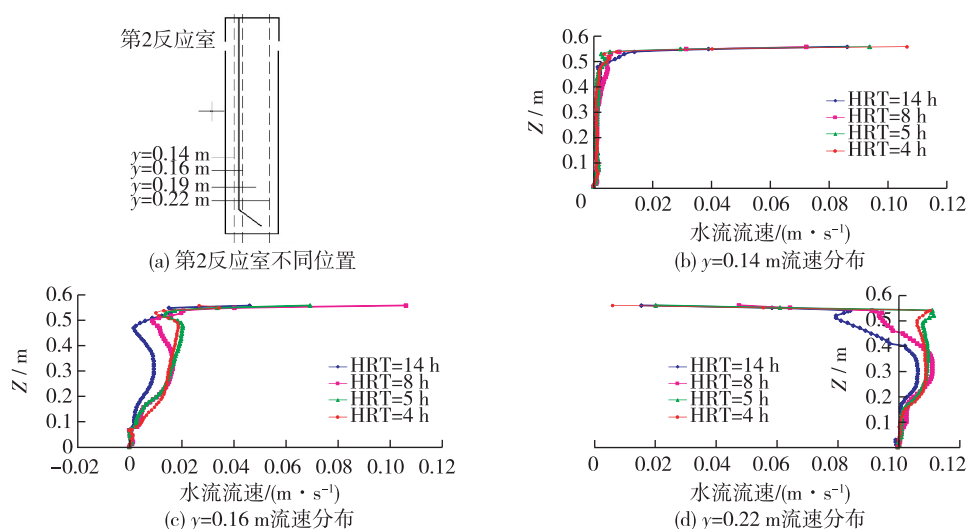


图4 第2反应室水流速度分布

Fig. 4 Flow velocity distribution of second upper chamber

2.2 对固含率的影响

图 5 为不同 HRT 时 $x=0.1$ m 平面的固含率(污泥颗粒的体积百分比)分布。由图 5 可知, 由于降流区中的流速受 HRT 改变的影响并不大, 但当 HRT 减小至 4 h 时, 相对其他 3 个工况降流区内的污泥沉降比较明显, 在反应器底部形成堆积。在升流区随着 HRT 的减小, 污泥颗粒的循环速度加大, 水力搅动使得颗粒污泥形成污泥悬浮层。污水中的底物与悬浮层中的厌氧生物菌群接触充分可以提高废水中 COD 的去除率^[10-11], 因此 HRT 为 8 和 5 h 时, 反应器具有相对较高的废水处理效率。当 HRT 减小至 4 h, 虽然较大的水流速度有利于厌氧污泥和废水的混合, 增强传质效果^[12], 但在该工况下, 上升流速过大, 颗粒污泥分布范围扩大至反应器上部, 污泥容易被带至下一个反应室, 废水与微生物接触时间缩短, 从而使得 COD 去除率降

低;并且反应器底部水流速度变小,颗粒污泥发生停滞堆积,出现明显的水力死区。

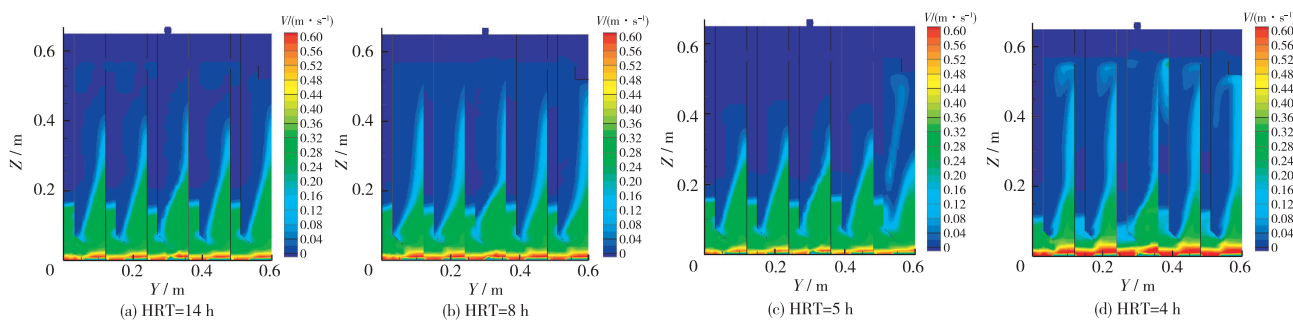


图 5 不同 HRT 时 y - z 平面 ($x=0.1$ m) 固含率分布

Fig. 5 Solid holdup distribution of y - z plane ($x = 0.1$ m) at different HRT

图 6 是不同 HRT 时第 2 反应室中不同位置的固含率分布曲线。从 $y=0.14$ m 处水流流速分布曲线(图 6(a))可以看出,降流区中的污泥颗粒均分布在 $z=0.2$ m 以下的区域。比较不同 HRT 时固含率分布曲线可见,随着进水流速增大,相同深度处的固含率变小,在 HRT=14, 8, 5 h 这 3 个工况下,污泥颗粒分布变化不大,随着进水流速进一步增加,在 HRT=4 h 的工况下,污泥颗粒分布范围缩小比较明显,在接近反应器底部时固含率变大,污泥沉降变得明显。这是由于流速增大,更多的污泥随着水流带到上流室,而在反应器底部边角处,水流速度比较小,更容易形成污泥堆积。

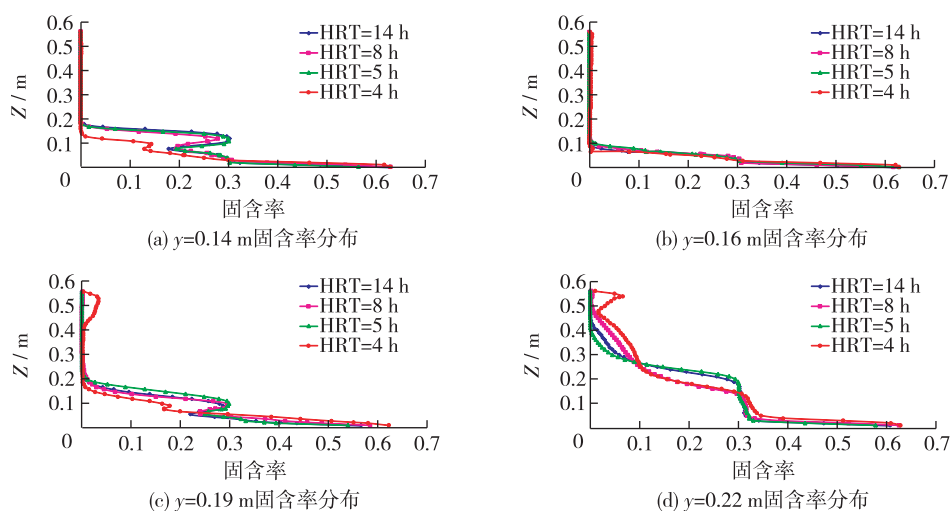


图 6 第 2 反应室固含率分布

Fig. 6 Solid holdup distribution of second upper chamber

图 6(b)~(d) 为升流区中 3 个位置的固含率分布。近导流板 ($y=0.16$ m) 处固含率分布曲线(图 6(b))显示,由于水流运动方向向下,且流速与降流区中的流速相比更大,所以污泥颗粒沉降也更加明显,污泥颗粒基本分布在 $z=0.1$ m 以下区域内,沿着深度方向固含率逐渐增大,4 个工况固含率的分布情况基本相似。

中心线 ($y=0.19$ m) 处固含率分布曲线(图 6(c))显示,由于水流运动方向向上且较小,所以污泥颗粒的上升运动不明显,所以污泥颗粒依旧分布在 $z=0.2$ m 以下区域。HRT=14 和 8 h 这两个工况相比,流速大的固含率大,当进水流速继续增大,固含率反而随着流速的增加而降低。但是在接近反应器底部时,流速较大的固含率大,在 HRT=4 h 时反应器底部固含率达到 60% 的区域在 4 个工况中是最大的。

近边壁 ($y=0.22$ m) 处固含率分布曲线(图 6(d))显示,水流运动方向向上且流速较大,因此颗粒污泥

向上运动的速度快,垂向分布范围比较广,在接近自由液面的部分也有一定浓度的颗粒存在。比较不同 HRT 时的固含率分布曲线,可以把反应器沿深度方向划分成 3 个区域进行说明, $z=0.35\sim 0.55\text{ m}$ 这个区域里,随着 HRT 的减小,固含率变大,这是因为该区域上升流速比较大,由于水流的推动,更多的污泥颗粒被带到这个区域,由此也会使在 $z=0.15\sim 0.35\text{ m}$ 这个区域里会发生随着 HRT 减小,固含率变小的现象;在 $z=0.15\text{ m}$ 以下区域,随着 HRT 的减小,固含率变大,这是由于上流室中循环水流的速度增大,而处于循环水流之外的反应器底部水流速度反而会更小,这个区域容易产生水流停滞,污泥颗粒更易发生聚集堆积。

由此可见,HRT 过大,升流区内水力搅动不够明显,颗粒污泥分布变化不大,随着 HRT 减小,颗粒污泥床不断膨胀,形成污泥悬浮层,此时废水与污泥中的微生物能够得到充分接触,提高处理效率。但当 HRT 过短,反应器中流速过大,颗粒污泥垂向分布范围过大,且容易在反应器底部形成堆积,加大反应器的水力死区,从而降低废水中的 COD 去除率。

3 结 语

本文对不同 HRT 时 ABR 反应器内的多相流场进行三维数值模拟,从反应器内水流速度、固含率两个方面分析探讨了 HRT 对反应器内部流场特性的影响。从模拟结果可得出以下结论:

(1) 反应器内各降流区的水流速度随深度分布均匀,升流区中部形成水流循环,水流以较高速度进入下一个反应室。HRT 变化对各反应室内降流区水流速度的影响不大,升流区内的循环水流速度随着 HRT 的减小而变大。

(2) 反应器内污泥颗粒分布范围受 HRT 影响明显,随着 HRT 减小,污泥颗粒在反应器内的循环效果变好。HRT=14 h 时,各个反应室中升流区的循环水流速度较小,污泥颗粒分布范围不大。HRT=4 h 时,污泥颗粒分布的均匀性变差,反应器上部的颗粒浓度增大,污泥容易被带出反应器,且处于循环水流之外的反应器底部污泥颗粒明显堆积,不利于提高反应器的处理效率。HRT=5~8 h 时,各个反应室内的水流循环速度最有利于污水中的底物与悬浮层中的厌氧生物菌群充分接触,能够提高反应器中污染物的去除率。

参 考 文 献:

- [1] LETTING A, FIELD J, VAN LIER J, et al. Advanced anaerobic waste water treatment in the near future[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(1): 5-12.
- [2] 耿亚鸽,张翔,张浩勤,等. ABR 反应器工程设计的技术探讨[J]. 水处理技术, 2009, 35(2): 103-107. (GENG Ya-ge, ZHANG Xiang, ZHANG Hao-qin, et al. Discussion on engineering design of anaerobic baffled reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(2): 103-107. (in Chinese))
- [3] 王建龙,韩英健,钱易. 折流式厌氧反应器(ABR)的研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(5): 490-498. (WANG Jian-long, HAN Ying-jian, QIAN Yi. Research advances in anaerobic baffled reactor(ABR)[J]. Chinese Journal of Applied and Environment Biology, 2000, 6(5): 490-498. (in Chinese))
- [4] YOUNG H W, YOUNG J C. Hydraulic characteristics of up-flow anaerobic filter[J]. Environment Energy, 1988(114): 621-638.
- [5] 徐金兰,刘茵,黄廷林. 多隔室厌氧折流板反应器(ABR)的水力特性试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(12): 52-55. (XU Jin-lan, LIU Yin, HUANG Ting-lin. Pilot study on hydraulic characteristics of anaerobic baffled reactor[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(12): 52-55. (in Chinese))
- [6] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社. (LIU Da-you. Fluid dynamics of two-phases flow[M]. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese))
- [7] 车得福,李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007. (CHE De-fu, LI Hui-xiong. Multiphase flow and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2007. (in Chinese))
- [8] 沈耀良,赵丹,王承武,等. ABR 反应器的水力特征研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19(11): 1-3. (SHEN Yao-liang, ZHAO Dan, WANG Cheng-wu, et al. Study on hydraulic characteristics of ABR reactor[J]. China Water & Wastewater, 2003,

- 19(11): 1-3. (in Chinese))
- [9] 耿亚鸽, 张浩勤, 陈昊, 等. ABR 反应器在不同 HRT 下的流态特征分析[J]. 郑州大学学报:工学版, 2008, 29(3): 92-94. (GENG Ya-ge, ZHANG Hao-qin, CHEN Hao, et al. A study of hydrodynamic characteristics of ABR at different HRT[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2008, 29(3): 92-94. (in Chinese))
- [10] 耿亚鸽. 厌氧折流板反应器的水力特性实验与流场模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2008. (GENG Ya-ge. The hydrodynamic characteristic experiment and flow field simulation research of anaerobic baffled reactor[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2008. (in Chinese))
- [11] 马珑玲, 唐艳葵, 张寒冰. 折流式厌氧反应器的设计[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2008, 33(增 1): 378-380. (MA Long-lin, TANG Yan-kui, ZHANG Han-bing. Development and design of anaerobic baffled reactor for wastewater treatment[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2008, 33(Suppl1): 378-380. (in Chinese))
- [12] 赵丹, 王承武, 沈濯良, 等. 厌氧折流板反应器(ABR)的水动力学及污泥特性[J]. 环境工程, 2001, 19(2): 12-15. (ZHAO Dan, WANG Cheng-wu, SHEN Yao-liang, et al. Hydrodynamic and sludge characteristic of anaerobic baffled reactor (ABR)[J]. Environmental Engineering, 2001, 19(2): 12-15. (in Chinese))

Analysis of hydraulic characteristics of anaerobic baffled reactor

ZHOU Dong-hui¹, WU Shi-qiang¹, ZHU Long¹, LV Xue-yan²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Jiangsu Province Environmental Monitoring Centre, Nanjing 210036, China)

Abstract: The hydraulic characteristic of the anaerobic baffled reactor (ABR) is an important factor affecting its treatment effects. Hydraulic retention time (HRT) has a greater influence on the hydraulic characteristic of the reactor. A double flow model and a $k-\varepsilon$ turbulence model have been used to simulate the three-dimensional flow field in the anaerobic baffled reactor at different HRT and analyze the influences given by HRT on the hydraulic characteristic of inner flow field of the reactor from both water flow velocity and solid holdup. The analysis results show that HRT has a little influence on the flow velocity of the down-flowing compartment, however, there is an increase in the velocity of circulating water flow with decrease in HRT in the up-flowing compartment. HRT has a great influence on the distribution of the solid holdup. Either the shorter HRT or the longer HRT has a negative effect on the improvement of the efficiency of the reactor. The optimal hydraulic retention time of the reactor is 5 ~ 8 h, which is the most favorable for the removal of pollutants in the waste water.

Key words: anaerobic baffled reactor; multiphase flow; hydraulic retention time; solid holdup