

# 折流曝气生物滤池的特征与 处理效能试验研究

严子春<sup>1</sup> 何强<sup>2</sup> 龙腾锐<sup>2</sup> 张涵<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要** 折流曝气生物滤池(BBAF)是一种新型生物滤池,为考察其工艺特征和处理效能,对运行时的效果和不同水力条件下的水力混合特性进行了研究。试验表明,BBAF滤池是一种复合流态反应器,单池趋于全混流,而整池趋向平推流;BBAF滤池对COD和SS的去除率稳定在90%以上,对氨氮、总氮和总磷平均去除率分别为88.8%、39.1%和46.5%。

**关键词** 污水处理 折流曝气生物滤池 水力混合特性 处理效果

**中图分类号** X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2008)10-1327-05

## Experimental research on characteristics and performance of baffled biological aerated filter

Yan Zichun<sup>1</sup> He Qiang<sup>2</sup> Long Tengru<sup>2</sup> Zhang Han<sup>2</sup>

(1. School of Environmental & Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070;

2. Faculty of Urban Constructive & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

**Abstract** Baffled biological aerated filter(BBAF) is an innovative biofilter for wastewater treatment. In order to evaluate the characteristics and performance of BBAF, experiments on the hydrodynamic mixing characteristics of BBAF were conducted under different hydrodynamic conditions. The performance of BBAF was researched also. The results indicate that BBAF is a complex flow pattern reactor. Individual filter is approach to continuous stirred tank reactor (CSTR). However, whole filter shows a tendency to plug flow reactor (PFR). The removal rates of COD and SS in BBAF are above 90% stably, and the average removal rates of  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN and TP are 88.8%, 39.1% and 46.5% respectively.

**Key words** sewage treatment; baffled biological aerated filter; hydrodynamic mixing characteristics; removal efficiency

曝气生物滤池(BAF)是近年来受到广泛关注的污水处理技术,它具有占地面积小、基建投资省、处理效率高、管理方便等特点<sup>[1~3]</sup>。但传统的曝气生物滤池容易发生堵塞,进水悬浮物含量较高时,运行周期短,反冲洗频繁,且生物除磷效果不好<sup>[4,5]</sup>,通常采用化学方法除磷<sup>[6]</sup>。笔者针对以上问题与不足,开发出一种新型曝气生物滤池,即折流曝气生物滤池(BBAF),并对其工艺特征和处理城市污水的效能进行了试验研究。

## 1 BBAF滤池的特征

### 1.1 BBAF滤池的构造特征

BBAF滤池由多个单池串联而成,各单池之间采用隔板上下交错进行分隔,留出污水上下折流通道;单池的底部为集泥斗及排泥管,中部设置填料,

池底多孔板下部装有曝气装置。污水在滤池中上下折流,通过物理截留和填料表面生物膜降解的共同作用得以净化。

BBAF试验装置如图1所示,由7个单池组成。整池长、宽、高分别为1528、580和1840 mm;单池长、宽、高分别为200、580和1500 mm。为减少水头损失逐级积累,3个水流翻越隔板的高度逐级递减,高度差为5 cm。

由多池组成的BBAF滤池根据处理要求可在不同单池中填装不同类型、不同粒径的填料,有利于

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(3ZS042-B25-046);兰州交通大学“青蓝”人才工程基金资助项目(QL-05-05A)

收稿日期:2008-05-28;修订日期:2008-06-23

作者简介:严子春(1970~),男,博士,副教授,主要从事水处理技术研究。E-mail: yanzichun@mail.lzjtu.cn

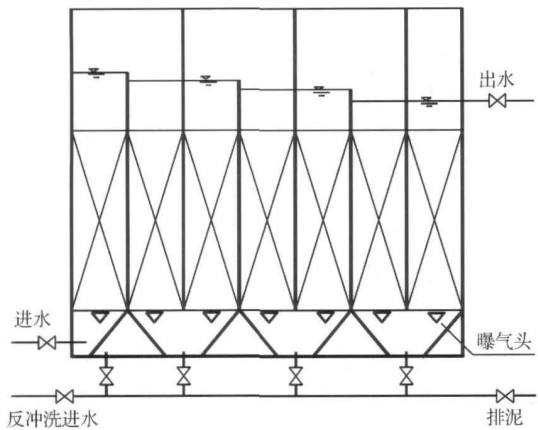


图 1 BBAF滤池试验装置  
Fig 1 Schematic diagram of BBAF

在同一生物滤池内可培养出不同功能分区,提高有机物去除和脱氮除磷效果;从进水管池到出水管池,采用粒径级配由大到小的填料或均质填料,有利于提高滤层的纳污能力,降低了对进水悬浮物的要求,延长滤池运行周期,节省反冲洗用水量和能耗。运行过程中滤池的水头损失增加、处理效果下降,当下降到一定程度后,通过气水联合反冲洗恢复其性能。BBAF滤池填装填料如表 1所示。

表 1 BBAF滤池中的填料及其级配

| Table 1 Filter media size in different units of filter |      |         |
|--------------------------------------------------------|------|---------|
| 单池序号                                                   | 填料类型 | 粒径 (mm) |
| 1                                                      | 酶促填料 | 15~20   |
| 2                                                      | 沸石填料 | 8~15    |
| 3                                                      | 沸石填料 | 8~15    |
| 4                                                      | 沸石填料 | 5~8     |
| 5                                                      | 沸石填料 | 5~8     |
| 6                                                      | 沸石填料 | 5~8     |
| 7                                                      | 沸石填料 | 3~5     |

1.2 BBAF滤池的水力混合特性

反应器的污水处理效能、容积利用率与反应器的构型及物料在反应器内的流动与混合状况有极大关系<sup>[7]</sup>。为考察 BBAF滤池的水力混合特性,采用脉冲实验法,以自来水为试验用水、氯化钠 (NaCl) 为示踪剂考察单池 (以第 1单池为代表)和整池水力混合特性。除去填料的体积,第 1单池的实测体积为 110 L,整个反应器的实测体积为 638 L。当反应器内流体流动达到稳定状态后,在极短时间内将含 300 g NaCl的浓溶液加入进水槽内,同时用 DDB-303A型电导仪分别检测记录第一单池出口处和 BBAF滤池最终出水口处的电导率,根据标准曲线,从而将其换算为浓度随时间的变化,然后在浓度函数的基础上求得停留时间的液龄分布函数  $E(t)$ 。本实验根据不同的水量、曝气量确定了 5次水力混合特性试验,每次运行参数如表 2所示。

表 2 5次水力混合特性试验的工况

| Table 2 Conditions of five tests for hydrodynamic mixing characteristics |       |       |        |       |      |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|-------|------|
| 运行工况                                                                     | 试验 I  | 试验 II | 试验 III | 试验 IV | 试验 V |
| 流量 (L/min)                                                               | 2.8   | 2.8   | 1.4    | 1.4   | 2.8  |
| 气水比                                                                      | 6:1   | 10:1  | 6:1    | 10:1  | 3:1  |
| 气量 (m <sup>3</sup> /h)                                                   | 1.000 | 1.680 | 500    | 830   | 500  |

(1) 单池的水力混合特性

采用理想反应器的  $E(t)$ 函数的组合来模拟单池的停留时间分布。进水流量为  $Q$ ,把容积为  $V$  的第 1单池看作是容积为  $(1 - f_1)V$  的平推流与容积为  $f_1V$  的全混流串联的结果,  $f_1$  为全混流比例,则其模拟公式为:

$$\begin{cases} E(t) = \frac{Q}{V} \exp\left\{-\frac{Q}{V}\left[t - (1 - f_1)\frac{V}{Q}\right]\right\} & t > (1 - f_1)\frac{V}{Q} \\ E(t) = 0 & 0 < t \leq (1 - f_1)\frac{V}{Q} \end{cases} \quad (1)$$

则临界时间点:

$$t_c = (1 - f_1)\frac{V}{Q} \quad (2)$$

实际的  $E(t)$ 由实验数据通过 (3)式换算得出。

$$E(t) = \frac{Q}{m} \times \rho_i \quad (3)$$

式中:  $Q$ ——流量, L/min;

$m$ ——所加示踪剂 NaCl的质量, mg;

$\rho_i$ ——时间  $t_i$ 时测定的示踪剂浓度, mg/L。

表 3 第 1单池中的水力混合状态

| Table 3 Hydrodynamic mixing characteristics of first unit |      |       |        |       |      |
|-----------------------------------------------------------|------|-------|--------|-------|------|
| 目标值                                                       | 试验 I | 试验 II | 试验 III | 试验 IV | 试验 V |
| 临界时间 $t_c$ (min)                                          | 8    | 6     | 20     | 17    | 21   |
| 全混流比例 $f_1$ (%)                                           | 79.6 | 84.7  | 74.5   | 78.4  | 46.5 |
| 平推流比例 $(1 - f_1)$ (%)                                     | 20.4 | 15.3  | 25.5   | 21.6  | 53.5 |

试验 V、试验 I 和试验 II 相比较,进水流量都为 2.8 L/min,而气水比分别为 3:1、6:1 和 10:1,试验所得全混流所占比例分别为 46.5%、79.6% 和 84.7%,说明水量相同,曝气量增加时,单池中全混所占比例将变大。试验 I 和试验 II 相比较,气水比相同,都为 6:1,试验 I 的水量为试验 II 的 2 倍,为 2.8 L/min,全混所占的比例为 79.3%,大于试验 III 的 74.5%;气水比都为 10:1 的试验 II 和试验 IV 相比较,试验 II 全混所占的比例为 84.7%,试验 IV 全混所占的比例为 78.4%;说明气水比相同,增加水量,全混所占的比例会略有增加,但影响不大;试验 II 和试验 V 相比较,曝气量都为 500 L/h,试验 V 的水量为试验 II 的 2 倍,为 2.8 L/min,两者的全混比例分别为 74.5% 和 46.5%,说明在曝气量相同的情况下,增加水量会使单池的水力混合特性更接近全混流。实际污水处理过程中,曝气生物滤池的气水比远大于 6:1,由于气体的搅拌作用,以及填料层内的分子扩散和涡流扩散作用,BBAF 滤池中单池的水力混合特性趋于全混流。

(2) 整池的水力混合特性

由于 BBAF 滤池为  $n$  个单池串联,由以上分析知水力混合特性趋于全混流,建立模型时理想化为全混流,对于 BBAF 滤池可采用多级串联模型来模拟其水力混合特性。建立的整池水力混合模型为:

$$E_n(t) = \frac{n^n}{(n-1)!} \left(\frac{t}{\Theta}\right)^{n-1} e^{-\left(\frac{t}{\Theta}\right)} / \Theta \quad (4)$$

为求得实际 BBAF 滤池的模型参数  $n$ ,需先计算出:理论停留时间  $\Theta$ ,平均停留时间  $\bar{t}$  方差  $\sigma^2$ ,无因次方差  $\sigma_0^2$  及其倒数值  $n'$ 。数学期望 (即平均停留时间)、方差  $\sigma^2$ 、无因次方差  $\sigma_0^2$  等可考察实际情况偏离理想情况的程度; $\sigma_0^2$  表示均值的离散程度,即  $E(t)$  的分散程度, $\sigma_0^2$  愈小,则  $E(t)$  分布愈窄,愈趋向于  $t$  表明流体的流动愈接近于平推流,反之则愈接近于完全混合。模型参数  $n = \text{Math ceil}(n')$  (将数字  $n$  向上舍入为最接近的整数),而  $n' = 1/\sigma_0^2$ ,一般可由实验得到。 $n$  越大,BBAF 滤池越接近于平推流, $n$  为 1 时为完全混合流, $n$  值趋于  $\infty$  时则为平推流<sup>[8]</sup>。其中平均停留时间和方差的离散公式为:

$$\bar{t} \approx \frac{\sum (t_{i+1} + t_i) (\rho_{i+1} + \rho_i) (t_{i+1} - t_i)}{2 \sum (\rho_{i+1} + \rho_i) (t_{i+1} - t_i)} \quad (5)$$

$$\sigma^2 \approx \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2 \rho_i (t_{i+1} - t_i)}{\sum \rho_i (t_{i+1} - t_i)} \quad (6)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} \quad (7)$$

式中:  $\rho_i$  ——时间  $t_i$  时测定的示踪剂浓度;  
 $t_{i+1} - t_i$  ——示踪剂测定取样时间间隔。

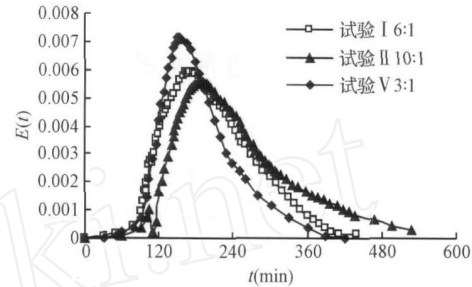


图 2 气量对 BBAF 滤池水力混合特性的影响  
Fig 2 Effect of air amount on hydrodynamic mixing characteristics of BBAF

水量 2.8 L/min,气水比分别为 3:1、6:1 和 10:1 的 3 次试验结果如图 2 所示,可以看出,气水比加大, $E(t)$  的方差  $\sigma^2$  随气水比变大,停留时间分布变宽,整池模型参数  $n$  值分别为 15、9 和 8,依次减小,说明反应器接近于平推流,但 BBAF 滤池水力混合特性表现为全混流比例随气水比增加而增加。

表 4 列出了计算得出的方差  $\sigma^2$ 、无因次方差  $\sigma_0^2$  及模型参数  $n_0$ 。由此可见, $\sigma_0^2$  很小,模型参数  $n$  较大,因此整池的水力混合特性接近于平推流。各单池之间的隔板阻止了相互之间的返混,可使 BBAF 反应器整池的水力混合特性接近于平推流,即在水平方向为推流态。

表 4 模型参数 (n) 的计算

| Table 4 Calculation of model parameters (n) |       |       |        |        |       |
|---------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|
| 参数                                          | 试验 I  | 试验 II | 试验 III | 试验 IV  | 试验 V  |
| $\Theta$ (min)                              | 228   | 228   | 456    | 456    | 228   |
| $\bar{t}$ (min)                             | 224   | 252   | 444    | 447    | 206   |
| $\sigma^2$                                  | 5 720 | 8 751 | 22 300 | 23 828 | 2 975 |
| $\sigma_0^2$                                | 0.114 | 0.137 | 0.113  | 0.12   | 0.07  |
| $n'$                                        | 8.77  | 7.26  | 8.85   | 8.38   | 14.51 |
| $n$                                         | 9     | 8     | 9      | 9      | 15    |

由 BBAF 滤池的水力学混合特性试验可知,由于气体的搅拌作用,以及填料层内的分子扩散和涡流扩散,BBAF 滤池中单池的水力混合特性趋于全混流,而整池在水平方向则表现为推流态。单池良

好的混合可使进水中的基质与生物膜良好接触,避免产生死区,充分发挥反应器的降解功能,有利于提高反应器的容积利用率;整体具有推流态,有机物浓度沿池长逐渐降低,分段形成占优种属,这非常有利于微生物新陈代谢功能的充分发挥和有机污染物的降解,具有的高传质推动力及反应速率,从而提高处理效果和处理能力<sup>[9]</sup>。

2 BBAF滤池处理城市污水的效能

2.1 污水水质与试验条件

试验地点在重庆渝北区城南污水处理厂,试验用水为该厂初沉池出水,由水泵从计量堰输送到实验室高位水箱,然后进入反应器,污水水质见表 5。试验期间第 1 单池为厌氧区,通过水解酸化的作用,提高有机物的可生化降解性;其后 6 个单池连续曝气。试验装置填料层总厚度为 5.6 m 时,曝气段水力停留时间 8 h,水力负荷为  $3.11\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,气水比为 10:1。以下试验结果是都在该条件下取得的。

表 5 污水水质

Table 5 Water quality of sewage

| 水质指标                    | 变化范围      | 水质指标       | 变化范围      |
|-------------------------|-----------|------------|-----------|
| COD (mg/L)              | 206~627   | 硝态氮 (mg/L) | 0~1.5     |
| BOD <sub>5</sub> (mg/L) | 90.7~243  | SS (mg/L)  | 101~199   |
| 氨氮 (mg/L)               | 49.4~55.2 | 总磷 (mg/L)  | 4.15~6.94 |
| 总氮 (mg/L)               | 50.0~80.7 | pH         | 6.7~7.9   |

2.2 BBAF滤池对城市污水的处理效果

图 3 为 BBAF 滤池对有机物的去除效果。试验

结果表明,出水水质稳定,进水 COD 的平均值为 506.6 mg/L,出水 COD 平均值为 46.7 mg/L,平均去除率为 90.9%<sup>[10]</sup>。

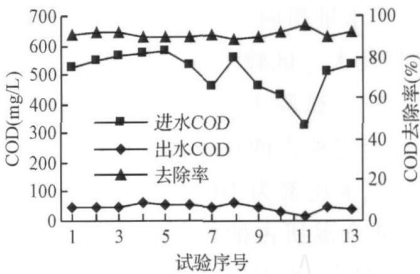


图 3 BBAF滤池对 COD 的去除

Fig 3 COD removal efficiency of BBAF

图 4 反映了 BBAF 滤池对 SS 的去除效果。进水 SS 的平均值为 157.6 mg/L,出水 SS 平均值为 6.8 mg/L,平均去除率为 95.5%。可见,即使进水 SS 值较高,且波动较大,但 BBAF 也能正常稳定的运行,保证出水 SS 值始终较低。所以其抗悬浮物冲击能力较强。

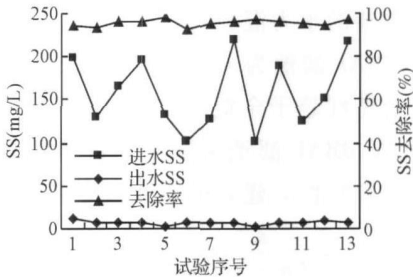


图 4 BBAF滤池对 SS 的去除

Fig 4 SS removal efficiency of BBAF

表 6 BBAF滤池对氮磷的去除效果

Table 6 Nitrogen and phosphorus removal efficiency of BBAF

| 试验<br>序号 | NH <sub>3</sub> -N |           |         | TN        |           |         | TP        |           |         |
|----------|--------------------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|
|          | 进水 (mg/L)          | 出水 (mg/L) | 去除率 (%) | 进水 (mg/L) | 出水 (mg/L) | 去除率 (%) | 进水 (mg/L) | 出水 (mg/L) | 去除率 (%) |
| 1        | 55.1               | 6.5       | 88.2    | 59.7      | 35.6      | 40.37   | 5.26      | 2.78      | 47.2    |
| 2        | 53.5               | 4.7       | 91.2    | 62.2      | 37.5      | 39.71   | 4.62      | 2.40      | 48.1    |
| 5        | 56.8               | 7.2       | 87.3    | 52.3      | 33.9      | 35.18   | 4.82      | 2.63      | 45.4    |
| 4        | 51.1               | 6.4       | 87.5    | 56.4      | 34.7      | 38.48   | 5.71      | 3.16      | 44.7    |
| 5        | 50.7               | 5.3       | 89.5    | 57.6      | 33.5      | 41.84   | 5.55      | 2.95      | 46.9    |
| 平均       | 53.4               | 6.0       | 88.8    | 57.6      | 35.0      | 39.12   | 5.19      | 2.78      | 46.5    |

表 6 为 BBAF 滤池去除氨氮、总氮、总磷的效果。城市污水经 BBAF 滤池处理后,出水氨氮浓度低于 8 mg/L,平均去除率为 88.8%;进水总磷平均值 5.19 mg/L,总磷平均去除率可达 46.5%,与现有 BAF 滤池生物除磷结果相比,有所提高;进水总氮

平均值 57.6 mg/L,出水总氮平均值 35.0 mg/L,总氮平均去除率可达 39.1%。要达到出水总氮和总磷达标排放还需要进行深入研究,通过提供厌氧、好氧交替的环境强化生物除磷脱氮或辅以化学除磷。

### 3 结 论

(1)水力混合特性试验表明,BBAF滤池的单池中的水力混合特性趋于全混流,而整池在水平方向则表现为推流态,是一种局部全混流和整体平推流的复合流态。

(2)BBAF滤池对 COD 和 SS 的去除效果稳定,去除率在 90%以上;对氨氮、总氮和总磷平均去除率分别为 88.8%、39.1%和 46.5%,达到了较好的处理效果,说明 BBAF 滤池的复合流态有利于提高反应器处理效能。

### 参 考 文 献

- [1] Pujol P., Lemmel H., Goundsilles M. A key point of nitrification in an upflow biofiltration reactor. *Water Science and Technology*, **1998**, 38 (3): 43~49
- [2] Wijeyekoon S., Mino T., Satoh H. Fixed bed biological aerated filtration for secondary effluent polishing-effect of filtration rate on nitrifying biological activity distribution. *Water Science and Technology*, **2000**, 41 (1): 187~195
- [3] Seguret F., Racault Y. Hydrodynamic behavior of a full-scale submerged biofilter and its possible influence on performance. *Water Science and Technology*, **1998**, 38 (8~9): 249~256
- [4] 马军,邱立平. 曝气生物滤池及其研究进展. *环境工程*, **2002**, 20 (3): 7~11
- [5] 张杰,曹相生,孟雪征. 曝气生物滤池的研究进展. *中国给水排水*, **2002**, 18 (8): 26~29
- [6] 崔福义,张兵,唐利. 曝气生物滤池技术研究及应用进展. *环境污染治理技术与设备*, **2005**, 6 (10): 1~7
- [7] 沈耀良,王惠民,赵丹,等. 厌氧生物处理反应器混合流态及其分析. *环境科学与技术*, **2002**, 25 (3): 13~18
- [8] Cao Y. S., Alaerts G. J. Influence of reactor type and shear stress on aerobic biofilm morphology, population and kinetics. *Water Research*, **1995**, 29 (1): 107~118
- [9] 许保玖,龙腾锐,等. 当代给水与废水处理原理 (第一版). 北京:高等教育出版社,1991. 92~95
- [10] 张涵,龙腾锐,严子春,等. 新型折流曝气生物滤池处理城市污水. *中国给水排水*, **2005**, 21 (4): 40~42