

侧向流曝气生物滤池水力混合特性研究*

张红晶^{1,2} 龙腾锐² 何强² 王胤²

(1. 重庆大学 化学化工学院 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要:从反应器理论出发,采用脉冲刺激响应技术对新型侧向流曝气生物滤池进行了流态试验。对液龄分布函数的数据统计得出,无因次方差 σ_0^2 在 0.12~0.20, P_e 准数在 8~15,说明反应器流态介于全混流和平推流之间,偏于平推流。根据试验结果,运用轴向扩散模型建立了滤池的流态模型。进水流量和曝气量是影响 LBAF 水力混合特性的重要因素。曝气和增加进水流量有利于减少反应器的返混程度,使反应器的流态更接近于平推流。经理论分析认为,该流态有利于生物种群的空间分布,保证了反应器的容积利用率,提高了处理效能,是一种较好的流态形式。

关键词:侧向流曝气生物滤池,水力混合特性,有机物降解

中图分类号: TU982.29; X32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)05-0139-05

Research of the Hydrodynamic Behavior in Lateral Flow Biological Aerated Filter

ZHANG Hong-jing, LONG Teng-rui, HE Qing, WANG Ying

(1 College of Chemistry and Chemical Engineering; 2 College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

Abstract: Lateral flow biological aerated filter (LBAF) is a new type of wastewater treatment equipment. In order to research the hydrodynamic behavior, the pulse stimulus response technique is used to perform the tracer tests. Based on the experiment results, axial dispersion model is used to analyse the flow pattern of LBAF, it is found that the flow pattern is similar to that of plug flow reactor (PFR). With analysis, the hydrodynamic behavior of LBAF is helpful to full use of volume and nitrogen removal performance.

Keywords: lateral flow biological aerated filter; hydrodynamic behavior; degradation of organic pollutant

侧向流曝气生物滤池(Lateral Flow Biological Aerated Filter,简称 LBAF)是在传统曝气生物滤池的基础上开发的新型曝气生物滤池,该滤池与传统曝气生物滤池的最大区别是侧向进水,侧向出水,易于调整沿程的溶解氧浓度和填料填装方式,可针对不同的进水水质和处理要求,通过改变曝气方式、强度和填料填装方式实现多种不同的运行模式。

由于反应器的污水处理效能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,反应器的流体力学特征、气速和液速的大小又影响着传质性能和生物膜的附着生长,而且影响反应器处理效率与

反应器的容积利用率。而滤池的流态则直接与反应器的动力学模型相联系。研究表明,反应器愈接近推流式,对氨氮的硝化作用和对悬浮物的去除效果愈好^[1]。所以通过 LBAF 反应器水力混合特性的研究,对该反应器中物料的流动与混合状况进行分析,可为反应动力学模型的建立提供依据,并为反应器的合理设计、工程实践提供参考。

1 试验部分

1.1 试验装置

LBAF 试验装置如图 1 所示,长 2.28 m,宽

* 收稿日期:2007-03-21

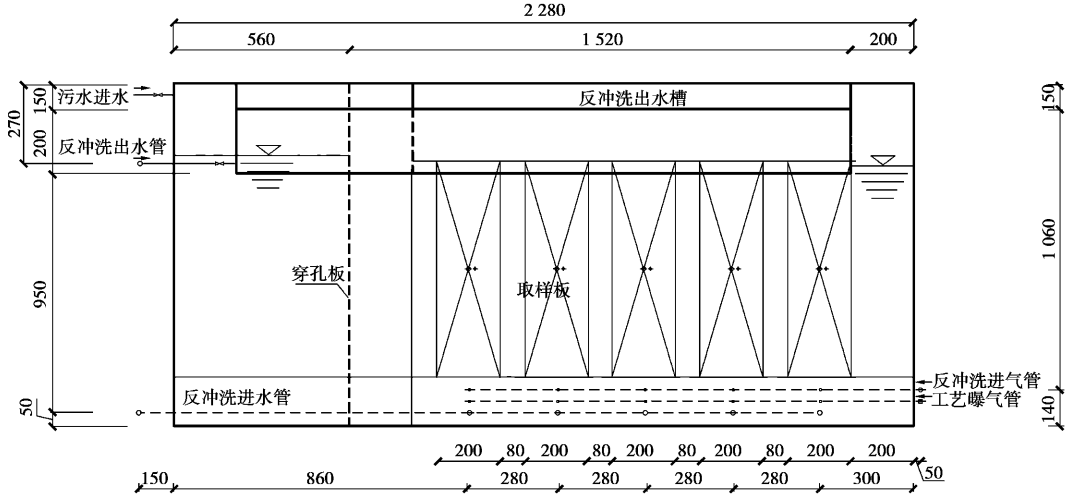
基金项目:国家十五攻关项目(2001BA604A01)

作者简介:张红晶(1967-)女,重庆人,博士,主要从事水处理技术的研究

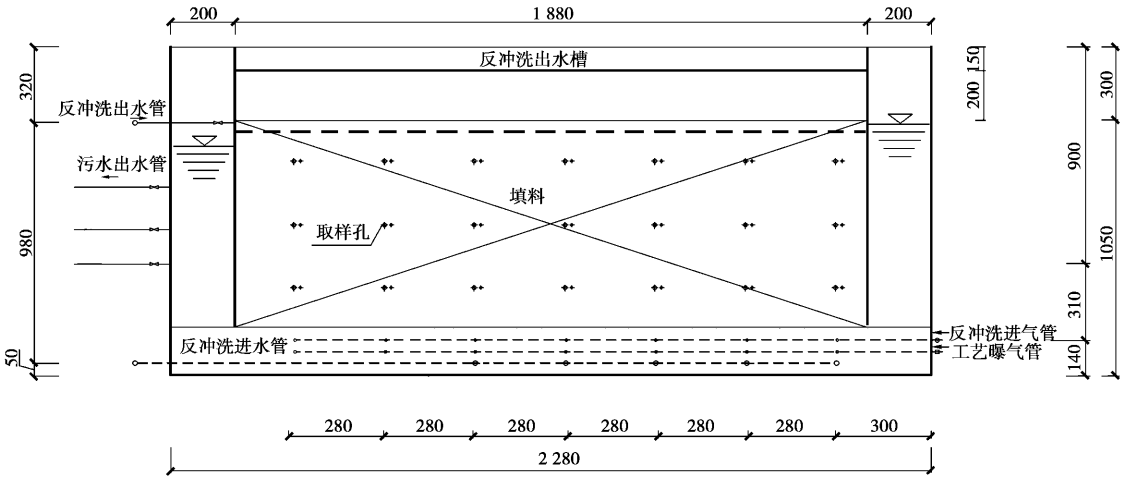
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

0.70 m,高 1.35 m,由 A、B 两段填料串联组成,A 段交错填装五框粒径为 10~15 mm 的沸石,每筐内放置一根微孔曝气器,其特点是在池体内交错布置填料框,大部分污水穿过填料,小部分污水会绕过填料框,通过填料框与池壁间的空隙,与穿过填料框的污水汇合进

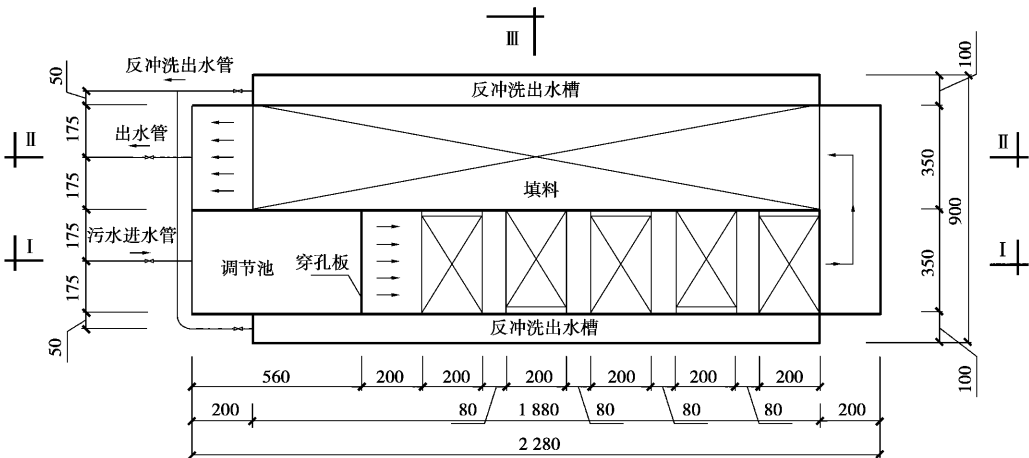
入下一个填料框,这样填料利用率高,可适当延长反冲洗周期,B 段每间隔 28 cm 放置一根微孔曝气器,装填粒径为 3~6 mm 的沸石。填料层自下而上的构造为:沸石填料,反冲洗进水管,曝气器,反冲洗进气管,沸石填料。



I — I 剖面图



II — II 剖面图



III — III 剖面图

平面图

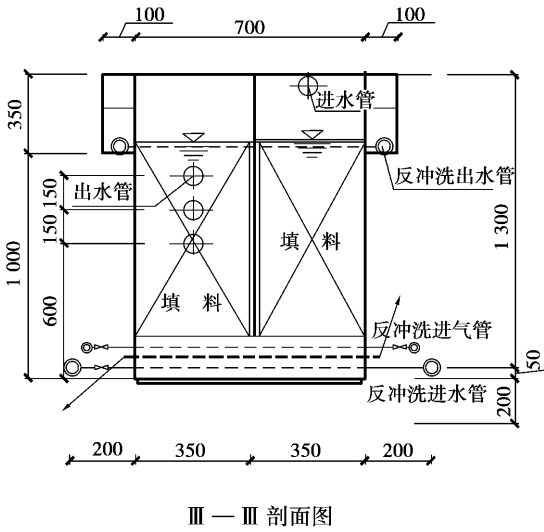


图 1 LBAF 试验设备图

表 1 沸石填料的性能参数

填料位置	粒径/mm	含水堆积密度*/ g · cm ⁻³	含水表观密度**/ g · cm ⁻³	内部孔隙率	外部空隙率
A 段	10~15	0.85	1.86	0.14	0.54
B 段	3~8	1.82	2.85	0.32	0.35

* 堆积密度指包括填料内部空隙率和堆积颗粒间空隙率的填料密度。

** 表观密度指仅包含填料内部空隙率的填料密度。

1.2 试验方法

采用脉冲刺激响应技术测定滤池在不同条件下的示踪剂浓度随时间的变化^[7], 然后计算出液龄分布函数 $E(t)$, 表征流态特性的平均停留时间 (\bar{t}) 、方差 (σ_t^2) 及无因次方差 (σ_θ^2) 等特征值。以上各个参数分别用式(1)~式(4)通过试验数据进行计算^{[2][3]}:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t) dt} \quad (1)$$

$$\bar{t} = \frac{\int tC(t) dt}{\int C(t) dt} \quad (2)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\int (t - \bar{t})^2 C(t) dt}{\int C(t) dt} \quad (3)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} \quad (4)$$

式中: $C(t)$ —在时间为 t 时出口处的示踪剂浓度。

2 滤池流态

2.1 滤池流态试验

滤池流态试验是将电导仪放在滤池出口处。根据曝气生物滤池常见的气水比进行了 4 次试验, 每次试

验运行参数如表 2 所示。图 2~图 5 分别为试验 I~试验 IV 得到的液龄分布函数曲线, 表 3 为试验 I~试验 IV 的平均停留时间 (\bar{t}) 、方差 (σ_t^2) 及无因次方差 (σ_θ^2) 等特征值。

表 2 整池流态试验运行参数

运行工况	试验 I	试验 II	试验 III	试验 IV
水流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	0.11	0.22	0.43	0.43
曝气量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	0	0.65	0.65	1.30
气水比	0	3:1	1.5:1	3:1

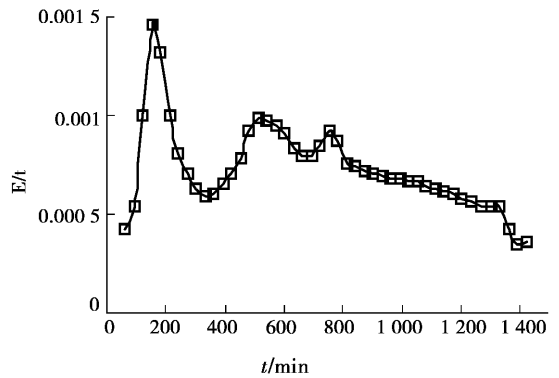


图 2 试验 I 的液龄分布函数曲线

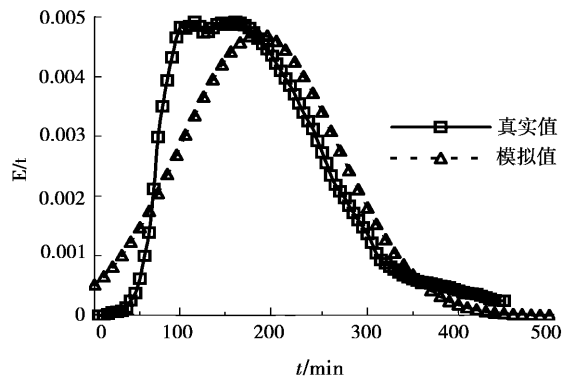


图 3 试验 II 的液龄分布函数曲线

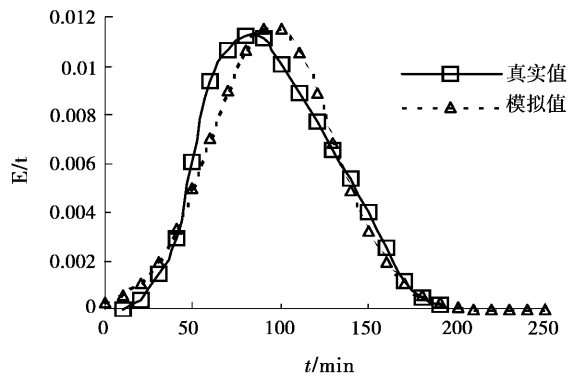


图 4 试验 III 的液龄分布函数曲线

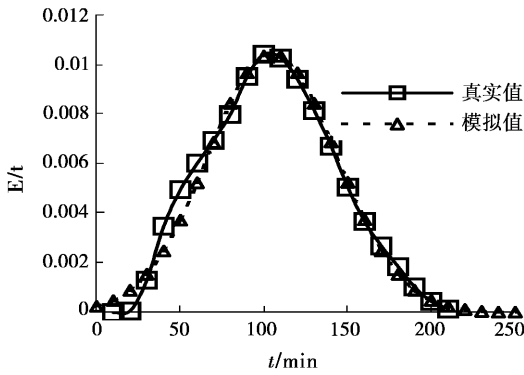


图 5 试验 IV 的液龄分布函数曲线

表 3 滤池流态特性参数一览表

参数	试验 II	试验 III	试验 IV
平均停留时间 \bar{t} /min	180.96	94.73	105.05
方差 σ_t^2 /min ²	6 549.30	1 103.77	1 386.17
无因次方差 σ_0^2	0.200	0.123	0.124
理论停留时间 τ /min	205.27	101.86	103.73

2.2 滤池流态模型的建立

由表 3 可看出,返混较小,可用轴向扩散模型对流态进行判断。轴向扩散模型特别适应于返混程度不大的系统,如管式、塔式以及其他非均相物系,其模型方程可表示为^[2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - u \frac{\partial C}{\partial l} \quad (5)$$

式中:D 为轴向扩散系数,l 为反应器轴向距离,u 为流速。引入无因次变量 $C^* = C/C_0$ 、 $\theta = t/\bar{t}$ 、 $Z = l/L$ 分别表示无因次的浓度、时间、和长度,其中 C_0 为初始浓

度,L 为反应器轴向总长度。将上述无因次变量代入(1)式中得到该模型的无因次表达式:

$$\frac{\partial C^*}{\partial \theta} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 C^*}{\partial Z^2} - \frac{\partial C^*}{\partial Z} \quad (6)$$

式中, $Pe = ul/D$ 为 Peclet 准数,它的倒数 D/ul 是表征返混大小的一个无因次准数。当 $D/ul = 0$ 时,滤池为平推流;当 $D/ul \rightarrow \infty$ 时,滤池为全混流;对“闭”式容器,在采用脉冲示踪法并在出口连续检测示踪剂浓度时,式(6)的解为^[2]:

$$\sigma_0^2 = 2\left(\frac{1}{Pe}\right) - 2\left(\frac{1}{Pe}\right)^2(1 - e^{-Pe}) \quad (7)$$

由式(7)可得各试验条件下的 Peclet 准数如表 4 所示。

表 4 试验 II ~ 试验 IV 中滤池的 Pe 准数表

运行工况	试验 II	试验 III	试验 IV
水流量/m ³ ·h ⁻¹	0.22	0.43	0.43
曝气量/m ³ ·h ⁻¹	0.65	0.65	1.30
气水比	3 : 1	1.5 : 1	3 : 1
Pe	8.85	15.15	15.02

解式(6)可得到轴向扩散模型的液龄分布函数为^[2]:

$$C(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi/p_e}} \exp\left[-\frac{\left(1 - \frac{t}{\bar{t}}\right)^2}{4} P_e\right] \quad (8)$$

在脉冲试验中,C(t)曲线与 E(t)曲线一样^[2],所以可以将试验 II ~ 试验 IV 中的 \bar{t} 和 Pe 代入式(8),模型拟合结果如表 5 和图 3 ~ 图 5 所示。由表 5 和图 3 ~ 图 5 可见,轴向扩散模型较好地模拟了侧向流曝气生物滤池。

表 5 试验 I ~ 试验 IV 中 E(t) 的试验值与模拟值

试验 II			试验 III			试验 IV		
时间	E(t)		时间	E(t)		时间	E(t)	
/min	试验值	模拟值	/min	试验值	模拟值	/min	试验值	模拟值
0	0	0.000 515	0	0	0.000 263	0	0	0.000 244
50	0.000 614	0.001 48	20	0.000 405	0.001 10	20	0.001 31	0.001 53
90	0.004 82	0.002 69	30	0.001 42	0.001 98	50	0.004 95	0.003 72
100	0.004 80	0.003 02	50	0.006 03	0.004 99	70	0.006 95	0.006 87
150	0.004 86	0.004 41	70	0.010 6	0.008 97	100	0.010 4	0.010 3
160	0.004 90	0.004 59	80	0.011 1	0.010 6	110	0.010 3	0.010 3
200	0.004 21	0.004 60	100	0.010 1	0.011 5	130	0.008 14	0.008 44
250	0.002 72	0.003 41	120	0.007 67	0.008 87	150	0.005 03	0.005 24
300	0.001 36	0.001 81	140	0.005 33	0.004 89	160	0.003 66	0.003 73
350	0.000 603	0.000 683	150	0.003 97	0.003 20	170	0.002 68	0.002 48
400	0.000 420	0.000 184	170	0.001 15	0.001 06	190	0.001 04	0.000 895
450	0.000 240	0.000 0354	180	0.000 527	0.000 540	200	0.000 485	0.000 485

2.3 滤池流态的试验结果分析

从图 2—图 5 可见,无曝气时流态十分混乱,出现几个递减的峰值,这表明滤池内可能有循环流动,当加

入曝气后,流态接近平推流,但试验 III 和试验 IV 中显示,在水流量不变的条件下,曝气量增加一倍时, Pe 准数基本相同,说明曝气量对流态并无太大影响,曝气只

是促进了反应器在纵向的混合,这是轴向呈现近似平推流流态的必要条件。水流量对流态的影响较显著,从表4可以看出,水流量增加一倍曝气量不变时, P_c 准数随水流量的增大而增大,说明较大的水流量有利于减少反应器的返混程度,使反应器的流态更接近于平推流。

从表3可见,试验II和试验III的平均停留时间 \bar{t} 小于理论停留时间 τ ,这说明滤池内存在死区,使得有效体积小于反应器实际体积,造成实际峰值较模型值左偏。流量越小,左偏程度越严重。在接近平推流的流态中,死区容积 V_d 由式(9)求得,如表6所示。而试验IV中,平均停留时间 \bar{t} 与理论停留时间 τ 大体一致而稍偏右,这可能是测量上的误差所致。

$$V_d = (1 - \frac{\bar{t}}{\tau}) \times 100\% \quad (9)$$

表6 试验II~IV中滤池的死区容积计算表

参数	试验II	试验III	试验IV
$V_d/\%$	11.84	7.0	0

总之,从表6可知水流量和曝气量的增大可以减少反应器死区的容积。

3 LBAF反应器水力混合特性对运行性能的影响

LBAF水力混合特性对LBAF运行效能的影响主要体现在污染物降解效率、容积利用率、脱氮性能三个方面。

对接近于一级反应的生化反应而言,越接近推流式,污染物降解效率和容积利用率就越高,需要的反应容积越小^[2]。这正是曝气生物滤池有较强的抗水力负荷变化能力的原因之一。

有机物的降解一般可看成是一级反应,在这样的条件下,为达到同样的去除效果,理想的全混流反应器的容积要比理想的平推流反应器的容积大得多^[2]。

$$\frac{V_{全混}}{V_{平推}} = \frac{\eta}{(\eta - 1)\ln(1 - \eta)} \quad (10)$$

式中; η ——有机物的去除率

公式(10)说明,当 $\eta=0.9$ 时, $\frac{V_{全混}}{V_{平推}}=3.9$ 。

但就容积利用率而言,全混反应器比平推流又要高,良好的混合(宏观混合)是必需的,只有这样,大量的生物体才能与进水中的基质良好接触而发挥其降解功能,否则若接触不良,则易造成反应器的大量死区。因此,LBAF反应器一方面利用曝气混合来提高微生物

与进水基质的良好均匀接触,这利于其降解功能的充分发挥、提高反应器的容积利用率;另一方面,利用了整体推流所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。

研究认为推流式流态有利于提高曝气生物滤池的硝化效率^[4],这在LBAF处理城市污水的试验中也得到了证实。反应器的流态影响了自养菌和硝化异养菌的空间分布,决定了各类微生物对空间和营养物质的竞争关系^[5]。近似推流式的流态使有机物在填料前段得到去除,为自养硝化菌在填料后段提供了良好的生长环境。得益于近似推流式的流态,LBAF处理城市污水的硝化效果良好,进水氨氮浓度在30 mg/L时,出水氨氮浓度 <5 mg/L,去除率达到80%以上,并且氨氮去除负荷的90%集中在填料后段。同时在LBAF填料后段发现了较明显的亚硝酸盐积累现象,而流态也是亚硝酸盐积累的影响因素之一^[6]。

4 结论

①根据脉冲刺激响应技术,判断出LBAF反应器整池水力混合特性接近于平推流,同时发现流量和曝气量是影响反应器流态的关键因素。

②经分析认为,平推流流态对提高滤池的容积利用率和硝化效率是一种有利的流态形式。

参考文献:

- [1] F. SEGURET, Y. RACAULT. Hydrodynamic Behavior of a Full-Scale Submerged Biofilter and its Possible Influence on Performance[J]. Wat. Sci. Tech., 1998, 38(8-9): 249-256
- [2] 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,2000,78-111
- [3] 罗固源,阙添进,刘玉亮. d/D值及导流转速对螺旋升流反应器流态的影响[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(6): 74-78
- [4] REBECCA MOORE, Joanne Quarmby and Tom Stephenson. The Effects of Media Size on the Performance of Biological Aerated Filters[J]. Wat. Res. 2001, 35(10): 2514-2522
- [5] ZHANG T. C., FU Y. C AND BISHOP, P. Competition for Substrate and Space in Biofilms[J]. Wat. Environ. Res, 1995, 67(6):992-1003.
- [6] CHUDOBA, J., CHEL, J. S. AND VILLAVERDE, S. The Effect of Tank Configuration on Nitrification kinetics. J. W. P. C. F. 57, 1078-1083

(编辑 胡玲)