Vol. 6, No. 12 Dec. 2005

# 2 种不同填料曝气生物滤池 处理生活污水的经验模型

王春荣<sup>1,3</sup> 李 军<sup>2</sup> 王宝贞<sup>3</sup> 张国柱<sup>4</sup>

 (1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083;2. 北京工业大学北京水质科学与环境恢复工程重点实验室, 北京 100022;3. 哈尔滨工业大学水污染控制研究中心,哈尔滨 150090;4. 哈尔滨工业大学深圳研究生院,深圳 518055)

摘 要 对分别装有火山岩和陶粒填料的2套平行运行的曝气生物滤池,在不同的进水负荷下进行生活污水的试验研究,结果表明火山岩的溶解性 COD(SCOD)去除效果要优于陶粒。同时,根据大量试验数据针对2个反应器进出水 SCOD 随反应器高度的变化关系,建立一套经验模型。推算出不同水力负荷下的经验模型常数 n 和 K 值,结果表明模型的预测值 与实测值是相吻合的,该模型可作为设计者和运行者的参考依据。

关键词 曝气生物滤池(BAF) 经验模型 火山岩 陶粒

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2005)12-0056-05

### **Empirical model of two different media biological aerated filters (BAFs) for domestic wastewater treatment**

Wang Chunrong<sup>1,3</sup> Li Jun<sup>2</sup> Wang Baozhen<sup>3</sup> Zhang Guozhu<sup>4</sup>

(1. Shool of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083;

2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science & Water Environment Recovery Engineering, Beijing University

of Technology, Beijing 100022; 3. Water Pollution Control Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090;

4. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055)

Abstract Two parallel systems packed with lava media and expanded clay granule respectively were run for domestic wastewater treatment with different influent hydraulic loadings. The results showed that the soluble chemical oxygen demand (SCOD) removal of the former exceed to the latter. Meanwhile, an empirical model relating influent SCOD to effluent SCOD and reactor height was established, and the empirical values of n and K with different hydraulic loadings were calculated according to a large number of data with the result that the values of predict correspond to that of experiment. Therefore, the empirical model may provide reference for designers and operators.

Key words biological aerated filter (BAF); empirical model; lava; expanded clay

#### 1 前 言

目前,有关生物膜反应器数学模型方面的研究 比较多,划分起来主要分为2类:机理模型和经验模 型。机理模型主要运用动力学机理和某些工程原 理,研究个性的机理问题<sup>[1-4]</sup>,主要集中在微观领 域,例如生物膜内营养物质的转移以及 Monod 方程 的应用。尽管机理模型能精确地描述反应器的行 为,但根据基本原理测定参数对设计者和运行操作 者来说不太实际,如 BAF 等颗粒介质生物膜反应器 的运行涉及到许多参数,并且其中许多参数都是相 互关联的,致使反应器的机理模型相当复杂<sup>[5,6]</sup>。 经验模型仅考虑工艺进、出水浓度的变化,即水力负 荷或有机负荷与营养物质去除率之间的关系,而无 需测定生物膜厚度及营养物质在生物膜内的转移速 率等参数。

本文作者采用火山岩和陶粒为填料的曝气生物 滤池进行生活污水试验,并在 Mann A. T. 等<sup>[7]</sup>研究 的基础上,建立只与进出水 SCOD 浓度和反应器高 度有关的经验模型,通过对试验数据进行推算得出 相应模型常数,从而为实际工程提供设计依据。

基金项目:黑龙江省 2002 年杰出青年专家基金

收稿日期:2004-05-31;修订日期:2004-08-09

作者简介:王春荣(1978~),女,博士,讲师,主要研究方向:污水生物处理。E-mail:wcrzgz@126.com 或 wcrzgz@163.com

#### 2 试验部分

#### 2.1 试验装置

本试验中2套装置均由有机玻璃加工而成,反应器为圆柱形,高度2m,直径10 cm,有效容积 11.8 L(见图1)。



图 1 试验装置图 Fig. 1 Diagram of experiment

2 套平行运行的反应器中分别装有火山岩和陶 粒,粒径均介于3~5 mm,具体填料特性见表1。火山 岩填料是取自五大连池火山口的天然矿石,它是火山 喷发时的岩石融化物冷却凝固后形成的,由于喷发后 瞬间冷却,其中溶有很多气体,致使其孔隙度较好。

表1 填料的特性

	Table 1 Cha	racteristics	of two media	1
填料	占反应器的体积	堆积密度	实际密度	孔隙度
	(%)	( kg/m <sup>3</sup> )	$(kg/m^3)$	(%)
陶粒	70	$0.582 \times 10^{3}$	$1.048 \times 10^{3}$	44.4
火山岩	70	$0.628 \times 10^{3}$	$1.673 \times 10^{3}$	62.5

# 2.2 废水及试验方法

试验用水为实际生活污水,取自哈尔滨工业大 学二校区家属区,其主要水质参数见表2。该水质 为经过筛网过滤后的原水水质。

反应器从底部进水,气水同向。启动时投加一 定量的 SBR 池沉降污泥作为种泥,闷曝 3 d 后改为 连续流进水,系统运行15 d 后对溶解性 COD

<b>表 2 生活污水的水质情况</b>						
Table 2	Quality of domestic wa	stewater				
项目	范围	平均值				
SS(mg/L)	60.21 ~ 98.64	75.8				
SCOD(mg/L)	100.55 ~ 201.2	165.8				
TCOD(mg/L)	145.6 ~ 530.2	286.5				
$NH_3$ -N(mg/L)	34, 30 ~ 40, 38	38.20				
DO(mg/L)	0,9~1,6	1.2				
рН	6.5~8.18	7.2				

(SCOD)和 NH<sub>3</sub>-N 的去除率分别达到 75% 和 40%, 至此标志挂膜成功。试验分别在 9.17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d、 15.59 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d和 22.01 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d 的水力负荷下 运行,水温为 15 ~ 20.5 ℃,稳定运行后定时测定反 应器进、出水及各取样口处的 SCOD、SS、NH<sub>3</sub>-N、pH 值和溶解氧以考察反应器内 SCOD 随高度变化的特 点及去除有机物的效能。

#### 2.3 分析方法

SCOD、SS、TCOD 和 NH<sub>3</sub>-N 每天测 1 次,具体分 析均按《水和废水监测分析方法》第三版中的标准 方法进行<sup>[8]</sup>。而 pH 和 DO 每天监测 1~2 次,保证 反应器在指定的条件下运行, pH 采用 pHS-3C 监 测,DO 根据碘量法测定。

#### 3 反应模型的建立

BAF 与接触氧化工艺有类似的特征,接触氧化 处理工艺是微生物反应,其中 BOD 去除率与 BOD 浓度有关,两者之间呈一次反应关系<sup>[9]</sup>。同时根据 Mann A.T.等<sup>[7]</sup>的研究结果,认为在 BAF 内生物膜 对基质的利用也符合一次反应关系,即:

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} = -kS \tag{1}$$

两侧积分后,得:

$$t = K' \ln \frac{S_0}{S_c} \tag{2}$$

式中:t—接触反应时间, $h;S_0$ —原污水 COD 值, $kg/m^3$ ; $S_e$ —处理水 COD 值, $kg/m^3$ ;k,K'—反应速率常数。然而 t 是与填料的容积负荷相关的,即:

$$t = \frac{k'}{N_w} \tag{3}$$

式中:k'是生物量常数,它与反应器的水力特性及容积负荷 N<sub>w</sub> 有关。而容积负荷又可以用下式表达:

$$N_{w} = \frac{QS_{0}}{HA} = \frac{qS_{0}}{H} \tag{4}$$

环境污染治理技术与设备

式中:Q一体积流量,m<sup>3</sup>/d;H一反应器高度(填料高度),m;A一反应器横截面积,m<sup>2</sup>;q一水力负荷,m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d。

将(3)和(4)代人(2),并引人填料类型常数 n 值,整理得:

$$\ln \frac{S_{\star}}{S_0} = \frac{-k'}{K'qS_0^n} H \tag{5}$$

这里,令
$$m = \frac{K}{qS_0^n}$$
,其中 $K = \frac{k'}{K'}$ ,则式(5)可简化为:

$$\ln \frac{S_{\epsilon}}{S_0} = -mH \tag{6}$$

因此,COD 去除率( $S_{\epsilon}/S_{0}$ )与反应器填料高度 (H)之间可表达成一次函数关系。在不同的进水浓 度( $S_{0}$ )下,以 ln( $S_{\epsilon}/S_{0}$ )对 H 作图,可得到一系列的 斜率(-m)值。再用 ln(qm)对 ln( $S_{0}$ )作图,则斜率 n和 y 轴截距(ln(K))也可计算出。

#### 4 结果及讨论

#### 4.1 试验结果及模型常数推算

试验在系统启动 2 周后进入稳定运行阶段,整 个试验持续 6.5 个月,试验根据进水流量的不同分 3 个阶段进行。最初,反应器在 9.17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d 的 负荷下运行,此时污水在滤料中的水力停留时间 HRT = 3.14 h,2 反应器出水中 SCOD 的去除率分别 在 75% ~ 83.3% (火山岩)和 65% ~ 80.6% (陶粒) 之间。当负荷提高到 15.59 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d 时(此时 HRT = 1.84 h),SCOD 的去除率略有变化,火山岩反 应器介于 72% ~ 80.2%,陶粒反应器介于 65% ~ 75%,具体试验结果见表3。继续提高负荷到 22.01 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d(此时 HRT = 1.31 h),SCOD 去除率明显 下降,其中火山岩反应器平均去除率仅为 69.2%, 陶粒 61.5% (见表 3)。试验各阶段出水中 DO 值介 于 4.0 ~ 7.3 mg/L,这样就确保了溶解氧不会成为 反应器的限制因素。

	1 401	e 5 Emuent par	ameters of two reactor	8	
项目		出 水(火山岩)		出水(陶粒)	
		平均值	变化范围	 平均值	变化范围
第1阶段	SCOD(mg/L)	28.3	25.0 ~ 34.0	38.17	35.0~45.0
	NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	17.8	12.6 ~ 20.5	19.1	16.3 ~24.1
	SS(mg/L)	18.2	10.6~68.5	21.8	14,6~68.9
$q = 9.17 \text{ m/m} \cdot a$	DO(mg/L)	5.2	4.0~6.5	5.5	4.1~6.5
	рН	7.1	—	7.1	
第2阶段	SCOD(mg/L)	33.05	28.2~40.0	40.97	35.0~48.3
	NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	18.9	14.5~23.8	21.4	18.7~26.5
	SS(mg/L)	19.6	10.4 ~72.8	23.6	14.5 ~72.3
$q = 13.39 \text{ m/m} \cdot a$	DO(mg/L)	5.5	4.2~6.8	5.7	4.4~6.9
	рН	7.15	_	7.13	—
	SCOD(mg/L)	38.67	35.1 ~ 44.2	48.67	44.9~51.1
第3阶段 q=22.01 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ・d	$NH_3$ -N(mg/L)	22.5	18.1 ~26.7	25.8	21.4~31.8
	SS(mg/L)	21.7	11.6~71.9	25.9	15.6~72.1
	DO(mg/L)	5.9	4.6~7.2	6.0	4.6~7.3
	рН	7.2	_	7.25	_

表 3 2 反应器出水的参数值 Cable 3 Efficient parameters of two read

试验过程中,为了推算模型常数 n 值和 K 值, 从各运行阶段选出 25 组相关性较好且具有代表性 的数据进行推算,其中各阶段所选数据的相关系数  $R^2$  分别在 0.9801 ~ 0.9987( $q = 9.17 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )、

0.9872~0.9995( $q = 15.59 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$ )和 0.9642~ 0.9974( $q = 22.01 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d$ )之间。这样每组数据 得到一个相应的 *m* 值,每个运行阶段共 25 个 *m* 值, 然后根据  $\ln(qm)$ 值和相应的初始浓度  $\ln(S_0)$ 值进

第6卷

第 12 期

59





图 2 n 和 K 值 (q = 9.17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d)











图 2 ~ 图 4 是负荷分别为 9.17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d、 15.59 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d 和 22.01 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d 下的模拟结 果,由图 2 ~ 图 4 中的回归方程可以得出相应的模 型常数(见表 4)。在相同负荷下运行时,火山岩填 料的 n 和 K 要略大于陶粒填料的各相应值,表明在 相同的运行条件下,火山岩填料的运行效果要优于 陶粒填料。同时将图 2~图 4 进行横向对比,发现 线性回归方程随负荷的增加,斜率和截距均变小,说 明对于同种填料来说低负荷(或水力停留时间较 长)有利于水与生物膜的充分接触,处理效果好,这 与实际运行是相符合的。此外,低负荷运行时,2 种 填料的线性回归方程间距较小,随着负荷的增加,方 程间距变大,表明低负荷时,2 反应器的处理效果较 接近,这是因为停留时间长,两反应器都具有一定的 抗冲击负荷能力;而负荷增加后,火山岩填料的处理 效果较陶粒填料好,这与火山岩填料的自身性质有 关,它的孔隙率高达 62.5%,为生物膜的生长提供 了较大的比表面积,因此其单位体积的生物量浓度 要高于陶粒填料,这一点也与实际情况相吻合。

表 4 试验推算出的模型常数 Table 4 Constants calculated by experiment

项目		K	п
0.17 3/2 1	火山岩	44	0.7103
$q = 9.1 / m^2 \cdot d$	陶粒	38	0.6668
15 50 3 4 2 1	火山岩	41.7	0.3984
$q = 15.59 \text{ m}^2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	陶粒	35.6	0.3940
$32.01 + \frac{3}{2} + \frac{2}{2}$	火山岩	36.5	0.2134
$q = 22.01 \text{ m}^{-1}/\text{m}^{-1} \cdot \text{d}$	陶粒	31.5	0.2117

#### 4.2 模型常数的讨论

反应器总体运行常数 K 与 SCOD 去除率有直接 的关系,它控制反应器不同高度处的 SCOD 去除情况。从数学模型中可以看出,K 值越大,S,/S。值就 越小,此时整体 SCOD 去除率就高。这一点从试验 数据中也得到了充分证明,如图 2~图4 火山岩的 K 值大于陶粒,因此运行效果前者要好于后者。此外, 对于同种填料在不同的负荷下运行时,K 值的大小 也反应了 SCOD 去除量的大小。因此,K 值的大小 预示着反应器内生物膜的活性。

这里界定 n 值是一个与填料特性有关的常数, 在模拟结果中我们看到,相同运行条件下,2 种填料 的 n 值存在着差别,表明 2 种填料的特性,如填料密 度、孔隙率对 n 值有一定的影响,这于实际情况较相 符,两种填料特性见表 1。模型中 n 值的具体含义 是,表明进水 SCOD 在一定范围内变动时,反应器的 去除率变化幅度,它是一个表征系统运行稳定性的 常数。模型中  $\ln \frac{S_e}{S_0} = \frac{-k'}{K'qS_0^n}H$ ,即  $\ln \frac{S_e}{S_0} = \frac{-K}{qS_0^n}H$ ,对于 5 给定的某个反应器来说,当它在一定负荷下运行时, 其中的 $\frac{-K}{q}H$ 为常数。现定义 $R = \frac{R_e}{S_0}$ ,则  $\ln R = \ln \frac{S_e}{S_0}$  募  $= \frac{-K}{qS_0^n}H$ ,此时 R 是一个关于  $S_0$  的隐函数,方程两侧 网 对  $S_0$ 求偏导,整理得  $R'_{S_0} = \frac{-KH}{q} \times n \times \frac{S_e}{S_0^{(n+2)}}$ ,因为 5  $S_0$ 为一大于 1 的数,当进水浓度  $S_0$ 在 $\Delta S_0$ 内波动 时,n 值越小,R 的波动幅度就越大,相应的 SCOD 的去除率变化幅度就大,表明反应器的抗冲击负荷 能力较差,不适合处理浓度变化系数大的污水。这 是从模型分析中得出的结论,在试验中我们也发现, 当负荷较低时,即反应器的水力停留时间较长,此时 出水效果较大负荷时好。此外,试验的模拟结果也 显示出了这一特点,低负荷时 n 值较大,随着负荷的

#### 4.3 SS 模型的影响及验证

增加,n值减小。

试验过程中还考察了 SS 对模型的影响。研究 结果表明,SS 对模型常数的影响很小,基本不妨碍 模型常数在实际污水中的应用。分析认为,SS 自身 不会影响 SCOD 去除率的变化,只是 SS 的存在会加 剧生物膜的阻塞,在运行过程中增加反冲洗频率,而 频繁的反冲会造成整体运行效率的下降。图 5 则是 水力负荷为 15.59 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d、进水 SCOD 浓度为 159.95 mg/L 时,运行达到稳定后,反应器不同高度 处的 SCOD 浓度典型值及相应的模型预测值,从图 5 可以看出,实测值与预测值吻合的较好,表明该模 型可作为工程设计和运行者的依据。





Fig. 5 Typical recorded values and predict values of SCOD along the height during the steady state ( $S_0 = 159.95 \text{ mg/L}$ )

### 5 结 论

关于生物膜工艺理论模型的开发,由于影响因 素较多,且各因素间又相互影响,致使模型较为复 杂,本文从实际运行、设计的角度出发,总结出一套 简单的经验模型,模型主要针对 SCOD 进出水浓度 随反应器填料高度的变化情况而确立的。通过对大 量的试验数据进行回归模拟,推算出不同水力负荷 下的经验模型常数 n 和 K,它们是对实际生活污水 进行试验得到的,具有一定的代表性,可作为工程设 计的依据。同时,在实际工程中,针对具体的填料和 生物膜反应器也可以借鉴此方法进行试验研究,确 定相应的模型参数,然后指导实践和工程设计,这是 一种最直接也是最确切有效的方法。

#### 参考文献

- [1] Rittman B. E., McCarty P. L. Design of fixed-film processes with steady-state biofilm model. Prog. Wat. Technol., 1980, 12:271 ~ 281
- [2] Avaev A. A. Modelling mass exchange in the treatment of fluid in biological filter. J. Wat. Chem. Tech., 1985, 7:7
  ~9
- [3] Capdeville B., Nguyen K. M. Kinetics and modeling of aerobic and anaerobic film growth. Wat. Sci. Tech., 1989,2 (1/2):149~170
- [4] Songming Z., Shulin C. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters. Aqua. Eng., 2002, 26:221 ~ 237
- [5] Garrido J. M., Van Benthum W. A. J., et al. Influence of dissolved oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor. Biotech. Bioeng., 1997, 53: 168 ~ 178
- [6] Hiroshi T., Taira H., et al. A simple biofilm model of bacterial competition for attached surface. Wat. Res., 2002,36:996 ~ 1006
- [7] Mann A. T., Stephenson T. Modelling biological aerated filters for wastewater treatment. Wat. Res., 1997, 31 (10): 2443 ~ 2448
- [8]国家环保总局,水和废水监测分析方法(第三版).北 京:中国环境科学出版社,1989
- [9] 张自杰, 排水工程(第三版), 北京: 中国建筑工业出版 社,1997. 219~222