

大型生物膜反应器的宏观水流混合特性研究*

孙国胜^{1,2}, 贾晓珊¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006;
2. 广东粤港供水有限公司, 广东 深圳 518021)

摘要: 基于多级理想完全混合反应器(CSTR)串联假设, 以东深供水原水生物预处理工程(目前世界同类工程之最大规模工程)的生物接触氧化池为研究对象, 采用罗丹明B作示踪剂试验, 运用MATLAB编程对各级反应器出口浓度系数和混合距离作曲线拟合, 推算反应器的串联级数。结果表明: 生物池单级CSTR长约13 m, 全池270 m的CSTR反应器串联级数 $n=21$; 将生物池水流模型简单地视为推流式模型, 将产生较大偏差; 曝气管层的水流在每隔4.5 m区段有71.8%的水体发生交换, 每级CSTR不存在短流情况。

关键词: 生物膜反应器; 水流模型; 示踪剂; 微污染原水; 曝气

中图分类号: X505 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2011)06-0125-05

Study on Flow Mixing Characteristics of the Large-scale Bio-film Reactor

SUN Guosheng^{1,2}, JIA Xiaoshan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. Guangdong Yuegang Water Supply CO, LTD, Shenzhen 518021, China)

Abstract: Based on the hypothesis of series multistage continuous stirred reactor (CSTR), rodamine B tracing experiments were carried out in the bio-contact oxidation tank of Dong-shen raw water bio-pretreatment engineering, the largest engineering in the world, in order to get the fitting curve of the outlet concentration coefficient and mixed distance of CSTR stages using Matlab, and then calculate series number of the reactor. Results show that the length of a single-stage CSTR is 13 m. The whole tank series number of CSTR with a length of 270 m is 21. It is incorrect that the bio-tank is considered simply as a plug flow reactor. About 71.8% water exchange occurs every 4.5 m at the aeration tube layer. The short flow does not exist in a single-stage CSTR.

Key words: biofilm reactor; flow model; tracer; micro-polluted raw water; aeration

生物反应器中水流的混合特性直接影响微生物对底物和溶解氧的获取, 最终影响污染物的去除效率。实际生物反应器的处理效能不仅依赖于生物反应过程本身, 而且与反应器的流态和混合形式密切相关^[1]。

随着原水水质受污染程度加剧, 生物接触氧化法应用于饮用水预处理越来越受青睐^[2]。一般认为, 生物接触氧化法兼有生物膜法和活性污泥法的特点, 其流态从整体上视为推流式^[3-6]。

生物反应器常用的实时控制参数有溶解氧、pH和ORP^[7-8], 但对于生物接触氧化法进行原水预处理的实际工程应用中, 由于基质浓度低, 反应过程中上述参数与生物反应难于实现线性对应。运行过程中水中溶解氧很高, 供氧量远超过需氧量, 而曝气量的变化对处理效果却又有明显影响, 这与反应器推流式假设相矛盾。因为推流式反应器沿水流方向的物料彼此不混合, 而垂直于水流的所有物料充分混合^[9], 推流式模型无法反映生物反应对曝

* 收稿日期: 2010-11-15

基金项目: 国家重大科学专项基金资助项目(2008ZX07211-003)

作者简介: 孙国胜(1971年生), 男, 博士研究生, 高级工程师; 通讯作者: 贾晓珊; E-mail: eesjxs@mail.sysu.edu.cn

气量的需求变化。曝气量过多将增加能耗, 不足则影响处理效果^[8]。

要研究基质传递对生物反应的影响, 首先要研究流动模型^[10]。完全混合反应器和推流式反应器是理想反应器的两种极端, 实际反应器内由于存在短流、回流、漩流等流态, 为非理想状态^[11], 如果套用理想反应器, 将导致较大偏差, 且无法通过运行参数建立控制模型。本研究将探讨大型生物膜反应器的宏观水流混合特性, 为建立生化反应器模型奠定基础。

1 研究方法

1.1 试验对象工程

本文以东深供水原水生物预处理工程为研究对象。工程采用生物接触氧化法作用是降解水中氨氮和有机污染物。工程布置 6 组生物池, 单池长 270 m, 宽 25 m, 水深 3.8 m (如图 1)。生物池内悬挂弹性立体填料, 池底布有穿孔曝气管, 曝气管层净空 0.6 m, 填料层净空 3.2 m, 填料上层净水层(淹没层) 0.2 m。水流流动时受填料和曝气管的阻力, 形成不同流速分布, 易发生短流。曝气强度不同, 水流混合程度也不一样。

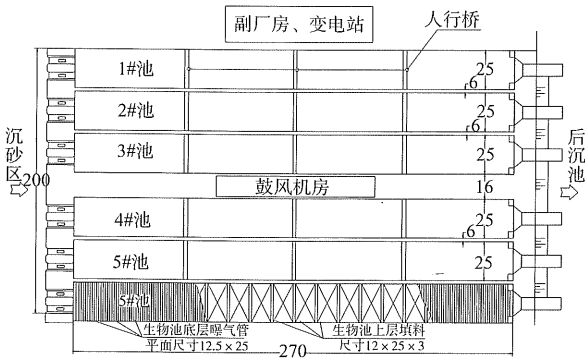


图 1 东深原水生物预处理工程平面布置图 (单位: m)

Fig. 1 Floorplan of Dong-shen raw water bio-pretreatment engineering (unit: meter)

1.2 水流混合分析模型的推导

轴向扩散模型更接近实际反应器, 但求解复杂^[11]。对反应器研究, 可采用多级 CSTR 串联模型和轴向扩散模型进行模拟, 常用方法是通过理想反应器模型串联、组合、并联甚至要加入死区模型和短流模型等对模型进行校验。采用上述方法建立的 n 个等容积 CSTR 串联模型比较简单, n 可以采用图解法或解析法求解, 易于数学处理^[12]。本试验采用 n 个体积相同的理想完全混合反应器串联进

行模拟。假设 n 个反应器按图 2 串联, 图中 C_{p-1} 为 p 级反应器的入口浓度, C_p 为 p 级反应器的出口浓度; 用 τ 表示每个反应器的停留时间, n_τ 为串联总反应器停留时间^[9]。

根据 CSTR 反应器流态模型, 示踪剂的稳态质量平衡方程如下,

$$QC_{p-1} - QC_p = Q(C_{p-1} - C_p) \quad (1)$$

各级反应器出口示踪浓度关系式为 ($p = n$),

$$F(t) = \frac{c_n(t)}{c_0} = 1 - e^{-t/\tau}$$

$$\left[1 + t/\tau + \frac{1}{2!}(t/\tau)^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!}(t/\tau)^{n-1} \right] \quad (2)$$

当 $n \geq 2$ 时可表示为:

$$F(t) = \frac{c_n(t)}{c_0} = 1 - e^{-t/\tau} \left[1 + \sum_{p=2}^n \frac{(t/\tau)^{p-1}}{(p-1)!} \right] \quad (3)$$

假设一级完全混合反应器的混合距离为 1, 其反应停留时间则为:

$$\tau_1 = \frac{l \cdot A}{Q} \quad (4)$$

$$\tau_p = \frac{l_p \cdot A}{Q} = \frac{p \cdot l \cdot A}{Q} = p \cdot \tau_1 \quad (5)$$

同一采样时间各串联级示踪剂出口浓度关系式如下:

$$\frac{c_1(t)}{c_0} = 1 - e^{-t/\tau_1}, n = 1 \quad (6)$$

$$F(t) = \frac{c_n(t)}{c_0} = 1 - e^{-t/p\tau_1}$$

$$\left[1 + \sum_{p=2}^n \frac{(t/p\tau_1)^{p-1}}{(p-1)!} \right], n \geq 2 \quad (7)$$

按式 (6)、(7), 运用 MATHLAB 编程对各级反应器出口浓度系数 - 混合距离作曲线拟合, 从而可推算生物池的反应器串联级数 n 值。

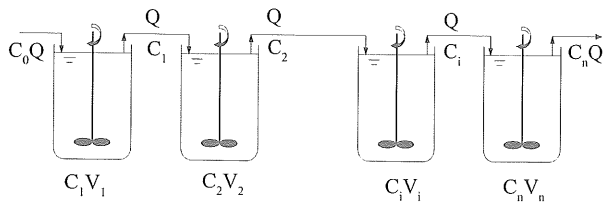


图 2 n 级串联 CSTR 示意图

Fig. 2 The diagram of n series reactors

1.3 示踪剂实验

1.3.1 试验方法 天然河流水质模型的扩散系数通常采用罗丹明 B (RodamineB) 作示踪剂来测定^[13-16]。通过检测罗丹明 B 溶液沿程浓度的变化

揭示生物池的流态特性。

1.3.2 试验安排 根据生物池进出口的水流条件,选取 5#生物池距池首 134.5 ~ 201.5 m 区段为试验段。取一定量的罗丹明 B 试剂,在溶解补给箱内配制罗丹明 B 溶液,装入贮存箱,通过开缝投放管投放。生物池沿程布设 8 个采样断面,各断面由池底至水面共布设 16 个测点。试验现场配备离心机和分光光度计各一台,试验工况为:单池过水流量 7.716 m³/s;平均流速为 0.081 3 m/s;气水比为 1:1。

示踪剂投加点分别于距填料顶 0.10 m 和距池底 0.15 m 曝气管层投加。

2 结果与讨论

2.1 原水示踪剂浓度的修正

利用分光光度计,调节波长为 555 nm,测定待测溶液的吸光度,通过与预先绘制好的标准曲线比较,从而可确定溶液罗丹明 B 浓度^[17]。以蒸馏水为参考液,检测一系列用已知浓度的罗丹明 B 溶液的吸光度,作出浓度和吸光度的关系标准曲线,见图 3 曲线 C1;用原水配制罗丹明 B 溶液进行率定,见图 3 曲线 C2。

由于原水对吸光度有一定影响,不能完全套用标准曲线推算罗丹明 B 浓度,应采用原水 A-C 曲线作数据处理。试验时间必须在同一时间段内进行,以保证原水组分的稳定。浓度换算方程如下:

$$C = 5.294 1A - 0.177 3 \quad (8)$$

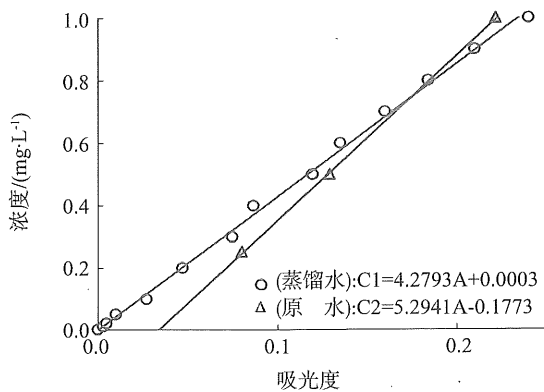


图 3 标准液、原水吸光度-浓度曲线

Fig. 3 Concentration vs absorbance curve of standard solution and the raw water

2.2 填料吸附的修正

为避免生物膜对罗丹明 B 吸附影响,利用新填料并按同样的填料体积比进行填料吸附试验,如图 4。填料吸附试验表明,按生物池填料体积比,填

料对罗丹明 B 的吸附平衡时间约 10 min,饱和吸附量约 0.13 mg/L。因此,对反应器示踪试验的时间控制应不小于 10 min,同时要考虑填料对示踪剂的吸附修正问题。

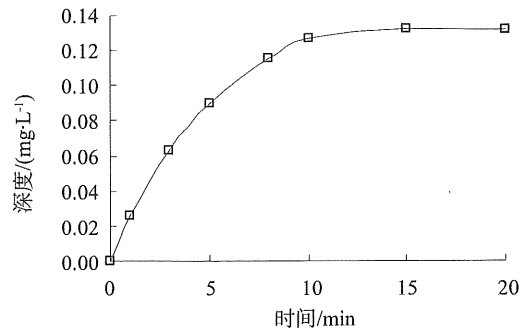


图 4 填料吸附时间-浓度曲线

Fig. 4 Time-concentration curve of carrier adsorption

2.3 反应器示踪剂浓度的计算

1) 示踪剂的投放及观察。示踪剂经投放管均匀投放至生物池,控制初始浓度约 0.5 mg/L,对填料顶层和池底曝气管层 2 个投加点位的试验数据进行分析。

2) 试验数据分析。考虑到填料吸附作用的影响,罗丹明 B 溶液连续投放 15 min 后,对各断面进行同时采样。利用公式(8)进行浓度换算,可测定各测点浓度,结合断面的流速分布(流速分布试验结果表明,填料层流量分配为 57.2%,曝气管层为 42.8%),计算生物池沿程各断面的平均浓度,如表 1 和表 2。

2.4 反应器串联级数拟合

根据表 1 和 2 数据,考虑了流量分配、以及填料对示踪剂的吸附率进行修正后的反应级数拟合得到图 5。

表 1 表层示踪试验

Table 1 The surface tracing test

断面距离 m	平均浓度/(mg · L ⁻¹)				浓度 系数
	填料上层	填料下层	考虑流量 分配后	考虑吸附 校正	
4.5	0.336	0.321	0.330	0.460	1
10.5	0.330	0.370	0.347	0.477	1
13	0.322	0.383	0.348	0.478	1
19.5	0.316	0.373	0.340	0.470	0.997
26	0.308	0.366	0.333	0.463	0.981
32.5	0.303	0.347	0.322	0.452	0.958
45.5	0.266	0.292	0.277	0.407	0.863
58.5	0.213	0.230	0.220	0.350	0.743

表 2 底层示踪试验

Table 2 The bottom tracing test

断面距离 m	平均浓度 / (mg · L ⁻¹)		考虑流量		浓度 系数
	填料上层	填料下层	分配后	校正	
4.5	0.090	0.660	0.334	0.464	1.00
10.5	0.250	0.440	0.331	0.461	1.00
13	0.325	0.373	0.346	0.476	1.00
19.5	0.322	0.355	0.336	0.466	0.998
26	0.318	0.338	0.327	0.457	0.978
32.5	0.311	0.322	0.316	0.446	0.955
45.5	0.247	0.266	0.255	0.385	0.825
58.5	0.214	0.226	0.219	0.349	0.748

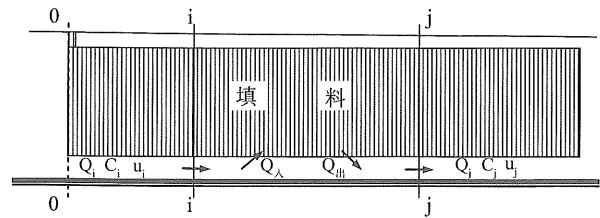


图 6 生物池底层水体运行趋向

Fig. 6 Running trend of bottom water in the bio-tank

$$K = \left[\frac{2(C_i - C_j)}{C_i + C_j} - \eta \right] \times 100\% \quad (9)$$

式中, C_i 、 C_j 为前后两断面罗丹明 B 溶液浓度; η 为 i 、 j 两断面间水体的平均吸附率 (底层不设填料, 吸附率为 0%)。

i 、 j 两监测断面距离分别设为 0 m 和 4.5 m, 测得相应断面的填料下层示踪剂的平均浓度分别为 1.40 mg/L 和 0.66 mg/L。

根据试验结果, 利用公式 (9) 计算生物池底层水体混掺率: 生物池底层水体经过 4.5 m 运动后, 其中 71.8% 与填料发生了交换, 余下 28.2% 可能发生短流。如此类推, 经过 13.0 m 运动后, 存在短流的概率为 2.24%。考虑轴向扩散影响, 认为底层水体经 13.0 m 运动后基本完成一次混掺, 可不考虑短流修正。

3 结 论

1) 利用罗丹明 B 进行示踪试验, 必须考虑原水和填料吸附的影响, 同时需考虑吸附平衡问题, 要对试验数据进行修正计算。

2) 固定填料生物池可通过现场试验测定 CSTR 串联级数, 试验结果表明, 本工程生物池单级 CSTR 长约 13 m, 全池 270 m 的 CSTR 反应器串联级数 $n = 21$ 。

3) 将生物池水流模型简单地视为推流式模型, 将产生较大的偏差。

4) 填料层水体直接与生物膜接触, 不会存在短流现象; 曝气管层水体在每一个 4.5 m 区段约有 71.8% 的水体与填料层发生交换接触, 沿生物池水流方向经 13 m 流动后, 池底水体与填料层水体基本实现了完全混合, 因此单级 CSTR 反应器可不考虑短流修正。

参考文献:

[1] 鞠兴华. 城市污水活性污泥生物脱氮模型及模拟研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004: 33 - 35.

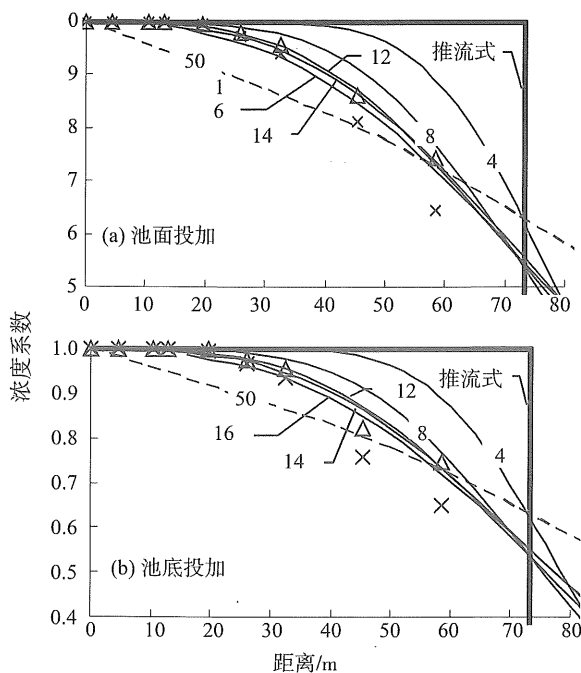


图 5 示踪试验距离-浓度系数曲线

Fig. 5 Length-concentration factor curve of the tracing test

图 5 中曲线中对应数字表示单级完全混合池长度 (m); “x” 表示未考虑吸附补偿的拟合曲线, “Δ” 表示考虑吸附补偿后的拟合曲线。根据上述两组示踪试验的拟合结果, 推测生物池单级完全混合池长约 13 m, 按生物池全长 270 m 推算, 生物池可等效于多级 CSTR 反应器, 串联级数 $n = 21$ 。

2.5 底层水体短流试验

若生物池底层曝气管存在短流现象, 将影响反应器模拟等效性, 有必要补充短流试验。池底流量平衡如图 6, 推导 i - i 断面和 j - j 断面水体混掺率计算式 (9)。

- [2] 高廷耀,陈洪斌,夏四清,等.我国水污染控制的思考[J].给水排水,2006,32(5):9-13.
- [3] 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.
- [4] 黄廷林,丛海兵,周真明,等.强化原位生物接触氧化技术改善水源水质的试验研究[J].环境科学学报,2006,25(5):785-790.
- [5] MANN A, FITZPATRICK C S B, STEPHENSON T. Comparison of floating and sunken media biological aerated filters using tracer study techniques[J]. Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B, 1995, 73(2):137-143.
- [6] 陈汉辉,孙国胜.东深源水生物预处理工程挂膜启动过程水质净化效果变化的分析[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(2):59-61.
- [7] 高大文,彭永臻.实时控制技术在污水生物处理中的研究进展[J].应用与环境生物学报,2004,10(6):821-825.
- [8] 杨岸明,王淑莹,杨庆,等.变频控制DO下SBR硝化反应控制参数及节能的中试研究[J].环境工程学报,2007,1(10):13-17.
- [9] 张元兴,许学书.生物反应器工程[M].上海:华东理工大学出版社,2001:93-116.
- [10] 凌霄,胡勇有.曝气生物滤池流态特性研究[J].安全与环境学报,2005,5(4):4-7.
- [11] Chen J, Deng Y. Identifiability analysis of the CSTR river water quality model[J]. Water Science and Technology, 2006, 53(1):93-99.
- [12] 陈甘棠.化学反应工程[M].北京:化学工业出版社,2009:88-107.
- [13] 中华人民共和国水利部.水域纳污能力计算规程[S].北京:水利水电出版社,2006:30-31.
- [14] 顾莉,祖华林,何伟,等.河流污染物纵向离散系数确定的党演算优化法[J].水利学报,2007,38(12):1421-1425.
- [15] 温季,郭建表,宰松梅,等.河流水团示踪试验数据分析的双站直线解析法[J].水利学报,2008,39(5):618-622.
- [16] 杜彦良,褚君达.河流中污染源垂向紊动混合过程研究[J].水科学进展,2003,14(3):318-322.
- [17] 王金刚,王西奎,郭培全,等.利用涡流空化效应降解水中罗丹明B[J].中国环境科学,2007,27(1):129-131.

(上接第124页)

- [10] 华维,范广洲,周定文,等.青藏高原四季日照时数年际、年代际变化趋势分析[J].自然资源学报,2009,24(10):1810-1817.
- [11] 杜军,边多,胡军,等.西藏近35年日照时数的变化特征及其影响因素[J].地理学报,2007,62(5):492-500.
- [12] 张智,林莉,孙银川,等.银川市日照时数气候变化特征分析[J].干旱区地理,2006,23(2):344-348.
- [13] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖无锡地区近40a来日照的变化特征分析[J].气象科学,2003,23(2):231-236.
- [14] 余功梅.华南地区近40年降水的气候特征[J].热带气象学报,1996,2(3):252-256.
- [13] 郑彬,梁建茵,林爱兰,等.华南前汛期的锋面降水和夏季风降水I.划分日期的确定[J].大气科学,2006,30(6):1207-1216.
- [14] 伍红雨,杜尧东.1961-2008年华南区域寒潮变化的气候特征[J].气候变化研究进展,2010,6(3):192-197.
- [15] 王志伟,唐红玉,李芬.近50年中国华南雨涝变化特征分析[J].热带气象学报,2005,21(1):92-97.
- [16] 林爱兰,李春晖,郑彬,等.南海夏季风爆发与华南前汛期锋面降水气候平均的联系[J].中山大学学报:自然科学版,2010,49(4):134-138,143.
- [17] 温之平,吴乃庚,冯业荣,等.定量诊断华南春旱的形成机理[J].大气科学,2007,31(6):1224-1236.
- [18] 乔云亭,周鑫,简茂球,等.华南春旱特征及其与水汽输送的关系[J].中山大学学报:自然科学版,2010,49(2):125-129.
- [19] 陈丽娟,张培群.1951-2005年华南春播期气象条件的年代际变化[J].气候变化研究进展,2006,2(4):184-187.
- [20] 简茂球,乔云亭,温之平.华南季节干旱及连旱特征分析[J].中山大学学报:自然科学版,2008,47(4):118-121.
- [21] 杜尧东,毛慧琴,刘爱君,等.广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征[J].资源科学,2003,25(6):66-70.
- [22] 黄珍珠,蔡玲玲,秦鹏,等.1960-2008年广东省不同区域的日照时数变化特征[J].广东气象,2009,31(6):23-25.
- [23] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007:23-71.