SBR 动力学模型比较与改进*

李姜华[1] 郑泽根[2] 邹小兵[2] 肖 声[2]
(1. 重庆市宏伟辐射防护技术服务有限公司,重庆 400021;2. 重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘要:SBR 法是一种理想的按一定时间顺序间歇操作运行的活性污泥处理工艺,是序批式间歇活性污泥法的简称。它具有工艺流程简单、处理效果稳定、占地面积小、耐冲击负荷强及具有良好的脱氮除磷能力等优点,是目前正在深入研究之中的一项污水生物处理新技术。通过对 SBR 法的基质降解过程动力学进行了分析讨论,与几种不同的 SBR 动力学模型进行比较,推导出微生物生长和基质降解动力学关系式,以期促进这一领域工作的进展。

关键词:SBR 法;动力学;数学模型
中图分类号: X703.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1006－7329(2007)05－0135－04

Comparison and Improvement of SBR Dynamic Method

LI Jianng-hua, ZHENG Ze-gen, ZOU Xiao-bing XIAO Sheng
(1. Chongqing Hongwei Radiation Protection Technology Services Ltd, Chongqing 400021; 2. Faculty of Ulrban Construstion and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

Abstract: SBR method is the short for intermittent sequencing batch freatment that is an ideal techmology to order a certain amount of intermittent operation of the activated sludge treatment process. SBR which is currently an in－depth study of the biological wastewater treatment technology is a simple process, the effect of stability, small footprint, and strong resistance to shock load and has good advantages of nitrogen and phosphorus removal capacity. This study first analyzes and discusses substrate degradation process of SBR method , compares among several different SBR methods, and then derives microbial growth and substrate degradation kinetics relationship with a view to promoting the progress of the work in this area.

Keywords: SBR method; dynamics; mathematical model

SBR 是一种理想的按一定时间顺序间歇操作运行的活性污泥处理工艺,是序批式间歇活性污泥法(Seguencing Batch Reactor)的简称,被日本下水道协会和美国环保局评估为少数富有革新意义和较强竞争力的废水处理技术之一[1]。

目前 SBR 工艺主要有静态设计方法和动态模拟设计方法两种。静态设计方法即经验设计法,根据时间参数的不同可分为周期负荷率法和曝气期负荷率法,分别对应于整个周期和曝气阶段内的污染负荷,它不追踪 SBR 反应池内基质和活性污泥浓度在时间上的变化过程,而是着重于在某一进水水质条件下经系统处理后能达到的最终处理效果。动态模拟设计方法即动力学模型设计法,利用计算机通过建立数学模型,根据进水和 SBR 系统的各种参数条件,建立出水水质与时间过程之间的关系。动力学模拟设计法多见于理论探讨,在实际中应用减少,这主要是应为引入了过多的前提假设。与静态设计方法相比,动态设计方法由于较为复杂且难于理解和计算,故应用较少[2]。

本文在前人研究的基础上,对 SBR 的设计和运行管理中的一些问题作了进一步的探讨,以期促进这一领域工作的进展。

本试验采用瞬时进水、限制性曝气运行方式。

1 SBR 基本数学模型的建立

1.1 建模的假设条件

1)在进水期内,进入 SBR 曝气池污水水质和水量都是均匀的[3]。

2)在进水期及反应期内曝气池混合液处于完全混合状态。

3)进入曝气池的污水,可生化性基质是可溶性的。

欢迎访问重庆大学期刊网 http://qks.cqu.edu.cn

1.2 数学模型的推导

1.2.1 经典SBR反应器动力学反应器的设计 由于SBR反应过程的特点，反应池内微生物的浓度是变化的，但由于一个运行周期内微生物的总量变化比较少，一般认为在一个周期内微生物的总量为常数。

在进水结束后，进入曝气阶段，由于曝气，池内存在好气反应，有机物去除符合Monod动力学方程式：

$$\frac{ds}{dt}=-\frac{\hat{q}XS}{K_s+S} \tag{1}$$

式中 ds/dt—有机底物的消耗速率；S—反应时间t时有机底物浓度，mg/L；X—混合液中污泥浓度，mg/L；$\hat{q}$—基值最大比消耗速率，d^{-1}；K_s—饱和常数，mg/L；t—反应时间，h。

在曝气运行时，不再进行有机物的投加，只存在微生物的降解活动。反应器内有机物浓度变化的速率就等于微生物降解有机物的速率。对式(1)进行积分就得到反应器内有机物浓度随时间的变化关系

$$\frac{\hat{q}X}{K_s}=\frac{1}{t}\ln\frac{S^0}{S}+\frac{1}{tK_S}(S^0-S) \tag{2}$$

以$\frac{1}{t}\ln\frac{S^0}{S}$为纵坐标，$\frac{1}{t}(S^0-S)$为横坐标，对(2)式用最小二乘法进行线性回归，得$K_s$，$\hat{q}$值。

1.2.2 积分反应器的设计 SBR反应器操作的主要特点是在接种后所进行的微生物反应过程中，既无反应机质加入，也无代谢产物排出(氧和二氧化碳的加入和排出除外)，反应过程中浓度随时间变化。因此，实验性SBR反应器为典型的积分反应器[4]。

对微生物反应，描述整个反应体系至少需要两个微分方程，一个是细胞生长，另一个是基质消耗。联立微分方程组求解才能得到变量X或S的解，其解是很复杂的。

如果忽略生物衰退，微生物量和有机底物的变化关系为：

$$X=X^0+Y(S^0-S) \tag{3}$$

式中：X—反应时间为t时混合液中污泥浓度；X^0—反应时间开始时混合液中污泥浓度；Y—污泥产率系数；S^0—反应开始有机底物浓度；其它符号意义同前。

联立方程(1)、(3)整理得：

$$\frac{1}{t}\ln\frac{S}{S^0}=c\left[\frac{1}{t}\ln(1+ad)\right]-b \tag{4}$$

式中：$a=\frac{Y}{X^0}$，$b=\frac{\hat{\mu}(X^0+YS^0)}{YK_s}$，$c=1+\frac{X^0+YS^0}{YK_s}$，$d=S^0-S$；$\hat{\mu}$——为生物最大比增长速率；其它符号意义同前。

求解：假设一个a值，以$\frac{1}{t}\ln\frac{S^0}{S}$为纵坐标，$\frac{1}{t}\ln(1+ad)$为横坐标，对(4)式左图进行迭代直至为一条直线。据此直线估算其动力学参数。

1.2.3 SBR动力学模型的改进 在SBR以前的动力学模型的推导中，在一个运行周期内往往会假设活性污泥的浓度不变等诸多假设，这样就会在模拟系统运行时增大系统的误差。本文在前人研究的基础上，通过对动力学模型的改进，尽量避免上述假设造成的误差，从而增加对系统模拟的可靠性。

一般来说，微生物细胞生长率经常表示为[5]：

$$\frac{dx}{dt}=Y\left(-\frac{ds}{dt}\right)-bX \tag{5}$$

式中：dx/dt—活性微生物体净生长速率；b—生物有机体衰退系数，即每单位微生物，每单位时间内由于内源呼吸而消耗的微生物量；其它符号意义同前。

变换(5)式得(6)、(7)、(8)式：

$$\frac{1}{\theta}=\frac{1}{x}\frac{dx}{dt}=\frac{Y}{x}\left(-\frac{ds}{dt}\right)-b \tag{6}$$

$$\frac{1}{\theta}=\mu=Yq-b \tag{7}$$

$$Y_n=\frac{\frac{\mathrm{d}x_a}{\mathrm{d}t}}{(-\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t})}=Y-b\frac{x_a}{(-\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t})}=Y-\frac{b}{q} \tag{8}$$

式中：$q=\frac{\hat{q}s}{K_s+s}$；$-\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=qX$；$\mu=\frac{\mathrm{d}x}{x\,\mathrm{d}t}=\hat{\mu}\frac{S}{K_s+S}-b$；$\mu=Y_nq$；$\hat{\mu}=Y\hat{q}\mu$。

θ—生物固体停留时间；μ—活性微生物净比增长速率；$\hat{\mu}$—活性微生物最大比增长速率；q—为基值比消耗速率，即每单位生物体对底物的利用速率；Y_n—活性微生物净产率常数。

联合式(7)，(8)整理得：

$$Y_n=Y\frac{1}{1+b\theta} \tag{9}$$

$$q=\frac{1+b\theta}{Y\theta} \tag{10}$$

对式(6)积分得

$$X=X^0e^{\frac{t}{\theta}} \tag{11}$$

以X为纵坐标，t为横坐标，对(10)式进行作图，据此估算θ值。

把式(11)代入式(1)积分得

$$k_s\frac{lns^0-lns}{\hat{q}x_0\theta[e^{\frac{t}{\theta}}-1]}+\frac{s^0-s}{\hat{q}x_0\theta[e^{\frac{t}{\theta}}-1]}=1 \tag{12}$$

以$\frac{s^0-s}{[e^{\frac{t}{\theta}}-1]}$为纵坐标，$\frac{ln\,s^0-ln\,s}{[e^{\frac{t}{\theta}}-1]}$为横坐标，对(12)式

欢迎访问重庆大学期刊网 http://qks.cqu.edu.cn

用最小二乘法进行线性回归，得 K_s，$\hat{q}$ 值。

把式(10)、(11)代入(1)积分得

$$S = -\frac{X_a^0}{Y_n}e^{\frac{t}{\theta}} + S^0 + \frac{X_a^0}{Y_n} \tag{13}$$

以 S 为纵坐标，$e^{\frac{t}{\theta}}$ 为横坐标，对(12)式用最小二乘法进行线性回归，得 Y_n 值。

把式(1)代入式(8)整理得：

$$\frac{X^a - X^0}{S^0 - S} = -b\frac{K_s + S}{\hat{q}S} + Y \tag{14}$$

联合式(9)、(14)得 Y、b 值。

联合式(8)、(11)、(12)、(13)、(14)可以估算出间歇 SBR 反应器全部动力学参数，据此可以设计模拟出 SBR 反应器中微生物的生长和有机质降解的动态变化规律，为同类型间歇反应器工艺参数的设计及其运行具有直接指导意义。

2　基本关系式的实验验证

2.1　实验方法

实验装置为 22 L 的 SBR 反应器，进水 6 L，污泥浓度 5 500～6 000 mg/L。实验废水为自行模拟废水：COD_{cr} 1 493～1 538 mg/L，总氮 160～200 mg/L，总磷 28 mg/L。

2.2　实验结果及分析验证

SBR 的运行工况为进水(瞬时)，曝气 11 h，沉淀、排水 1 h，一周期为 12 h。在稳定运行当中，进水 COD_{cr} 浓度稳定在 1 493～1 538 mg/L，出水 COD_{cr} 浓度在 5～40 mg/L 之间。装置运行一个月出水水质达到稳定，COD_{cr} 的去除率可达到 95%～99.6%，出水全都达到国家一级排放标准。同时，在稳定运行中，活性污泥沉淀性能良好，MLSS 稳定在 5 560～6 000 mg/L 左右。试验数据如表 1。

表 1　试验数据表

反应时间	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10	11
CODcr	232	100	78	86	117	132	68	35	75	76	10	8	0	27	88	5

数据筛选 $T_0 = 0$ h，$S^0 = 232$ mg/L，$X = 5\,661$ mg/L；$t_1 = 2.5$ h，$S^1 = 132$ mg/L；$t_2 = 4.0$ h，$S^1 = 75$ mg/L；$t_3 = 6$ h，$S^3 = 10$ mg/L。

三种 SBR 动力学参数计算结果由表 2 可以看出 SBR 动力学模型的改进后，可以方便求出各种动力学参数，同时，模型的相关性也较好。

表 2　三种动力学模型动力学参数计算结果表

反应器类型	动力学参数							
	步骤 1	步骤 2			步骤 3		步骤 4	
	θ	K_s	$\hat{q}$	R^2	Y_n	R^2	Y	b
经典反应器		39.856 5	0.188 4	0.963 298				
积分反应器				0.820 267			0.581 76	
模型改进器	13.3	32.592 8	0.201 9	0.993 88	0.449 1	0.997 1	0.581 76	0.021 1

注：为了方便积分反应器计算，假设 Y 为已知(参考模型改进型 Y=0.581763)，据此对式(4)进行回归，估算其他动力学参数。如果与要求相差甚远，可在此基础上变换 Y 值，然后再进行回归，重复以上操作，直到所求直线达到要求为止。由于计算复杂，且其参数第一次计算结果偏离实际情况，在此没有列出，仅写出第一次计算结果时的相关性系数。

3　结论

SBR 工艺在整个生物反应过程中，池子中的污染物浓度(有机物和氮磷浓度)以及活性污泥浓度等时刻都在变化，是一种典型的非稳态反应过程。经典 SBR 反应器及积分反应器动力学的公式与笔者对 SBR 动力学反应器公式之间有着明显的差异。

1)经典 SBR 动力学反应器的设计，认为在一个周期内微生物的总量为常数，忽略微生物的衰退，从而给系统模拟带来较大误差。

2)积分反应器动力学的设计虽然考虑了微生物的增长，建立了微生物量和基质消耗的关系式，但同样是忽略了生物衰退。在系统模拟不准确的同时，其求解是非常复杂的，甚至是不可能。

3)在 SBR 动力学模型的改进式中，在考虑运行周期内有机底物变化的同时，也考虑了微生物的增长及其衰退变化的关系，把一个运行周期内有机底物的变化、微生物的增长及其衰退有机地联系起来；既克服了经典 SBR 动力学反应器的设计中误差较大的缺点，又解决了积分反应器动力学公式求解复杂的问题，可方

欢迎访问重庆大学期刊网　http://qks.cqu.edu.cn

便求出所需的动力学系数或参数。同时，大大提高了系统模拟的准确性、可靠性。

综上所述，SBR动力学模型的改进式克服了经典SBR动力学反应器的设计和积分反应器动力学的设计的缺点，使间歇反应器中微生物的生长和有机质降解的动态变化规律更加易于操作、计算，对同类型间歇反应器工艺参数的设计及其运行具有直接指导意义和参考价值。

参考文献：

[1] 杨云龙，陈启斌. SBR工艺的现状与发展[J]. 工业用水与废水，2002. 33(1)：45－50

[2] 杨琦，刘建林等. 序批式活性污泥工艺(SBR法)设计与运行控制理论探讨[J]. 给水排水，1996，(22)：10－11.

[3] BRAHA，A. et al，Use of Lab Batch Reactors to Model Biokinetics[J]. Wat. Res，1987，21(1)：73－81.

[4] 吴婉娥，葛红光. 废水处理新技术第1版[M]. 北京：化学工业出版社. 2003.

[5] 刘永淞. 间歇活性污泥法数学模型分析[J]. 中国给水排水. 1991，7(6)：12－16.

(编辑 胡 玲)

(上接第134页)

[23] Smith VH. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton [J]. Science(Wash.，D.C.). 1983，221：669－671.

[24] Canfield DE，Phlips E，Duarte CM. Factors influencing the abundance of blue-green algae in Florrida lakes[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci.. 1989，46：1232－1237.

[25] Dowing JA，Watson SB，McCauley E. Predicting cyanobacteria dominance in lakes[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci.. 2001，58：1905－1908.

[26] Takamura N，Otsuki A，Aizaki M，et al. Phytoplankton species shift accompanied by transition from nitrogen dependence to phosphorus dependence of primary production in lake Kasumigaura，Japan[J]. Arch. Hydrobiol.. 1992，124：129－148.

(编辑 陈 蓉)

欢迎访问重庆大学期刊网 http://qks.cqu.edu.cn