开放式呼吸速率法用于 ASM2D参数测量

徐丽婕， 朱五星， 邱 勇， 施汉昌
(清华大学 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室，北京 100084)

摘 要： 介绍了开放式呼吸速率法的原理和测量方法及其在 ASM2D (活性污泥 2D模型)参数测量和进水模型组分估测中的应用。利用呼吸速率法可以对活性污泥工艺过程的多种参数进行估值，包括表征污泥活性的参数、活性污泥模型的动力学参数、化学计量学参数以及废水组成分析等。利用开放式呼吸速率法的原理分别对投加自配水和实际废水的外源呼吸曲线进行了积分运算，估测了 ASM2D中的 Y_H、K_S 等参数及 S_S、S_A 和 S_F 等组分。

关键词： 呼吸速率法； 活性污泥模型； ASM2D； 参数测量
中图分类号： X703 **文献标识码**： C **文章编号**： 1000 - 4602(2006)07 - 0078 - 04

Application of Open Respirometry Technique in Parameter Determination of ASM2D

XU Li-jie, ZHU Wu-xing, QIU Yong, SHI Han-chang
(State Key Joint Lab of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The principle and measurement of open respirometry and its application in parameter determination of Activated Sludge Model No. 2D (ASM2D) and estimation of influent model components were introduced. Many kinds of parameters can be estimated by respirometry in activated sludge process, such as the parameter to describe the activated sludge process, kinetic parameters, stoichiometric parameters, and components in ASM2D. Based on the respirometry technique, the synthetic wastewater and real wastewater were added into the equipment to estimate the exogenous respiration curves with integral calculation. Here the kinetic constants Y_H and K_S, and model components S_S, S_A and S_F in ASM2D were estimated.

Key words: respirometry; activated sludge model; ASM2D; parameter determination

基于呼吸速率 (氧利用速率，OUR)可以得到活性污泥系统中的反应底物和微生物之间的定量关系，因而呼吸速率测量技术的应用极为广泛，主要用于污泥活性测定、废水水质监测、模型参数估计和工艺优化控制等方面[1]。

根据生物反应器是否密封，可将呼吸速率测定方法分为密闭式和开放式两种，由于开放式测量可以实现较长时间的底物降解，为此笔者采用开放式测量方法估测了 ASM2D中的 Y_H、K_S 等参数及 S_S、S_A 和 S_F 等组分的值。

1 试验原理及方法

1.1 开放式呼吸速率的测量方法

开放式测量方法的装置如图 1所示。

根据反应器内溶解氧的物料平衡，可以得到过程的微分方程：

$$\frac{d[DO(t)]}{dt} = K_{La}[DO_s - DO(t)] - (OUR_{ex} + OUR_{en}) \quad (1)$$

式中 DO——反应器内混合液的溶解氧浓度

K_{La}——反应器内的氧传质系数，min^{-1}

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

DO_s ——饱和溶解氧浓度

OUR_{ex} ——外源呼吸速率,mg/(L·min)

OUR_{en} ——内源呼吸速率,mg/(L·min)

首先根据内源呼吸曲线获得 OUR_{en}参数,其计算公式如下:

$$OUR_{en} = K_{La}[DO_s - DO_{bl}] \quad (2)$$

式中　DO_{bl}——溶解氧平衡浓度

其次是在加入反应底物后可获得外源呼吸曲线,此时有:

$$OUR_{ex} = K_{La}[DO_{bl} - DO(t)] - \frac{d[DO(t)]}{dt} \quad (3)$$

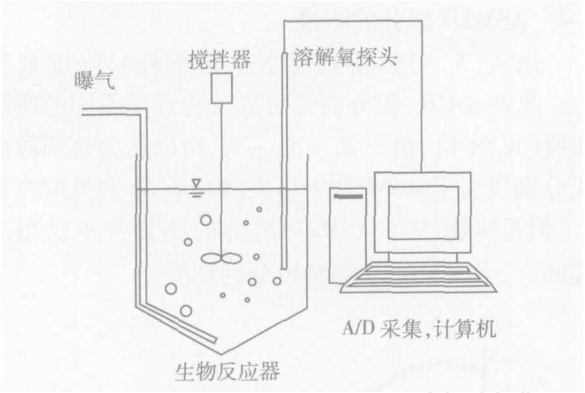

图 1　开放式呼吸速率法测量装置

Fig 1　Equipment of open respirometry technique

1.2　测定原理

根据活性污泥动力学模型可以对外源呼吸速率曲线进行参数估值,从而推导出模型参数,可得到化学计量学参数 Y_H、动力学参数 K_S 以及 $\mu_H X_H$ 的值[1]。

在 ASM2D模型中,异养菌的生长过程是基于可发酵基质 S_F 和发酵产物 S_A,代入 ASM2D中这两个过程的计量学系数,可得异养菌生长过程的氧利用速率(即外源呼吸速率 OUR_{ex})[2]。由于 $S_S = S_A + S_F$,考虑到在开放式测量环境下溶解氧浓度充足,活性污泥系统中含碳物质的氧化和含氮物质的硝化占主导地位,其他反应可以忽略,当反应器中加入硝化抑制剂后,可得到如下方程:

$$OUR_{ex,H} = -\left(1 - \frac{1}{Y_H}\right)\mu_H X_H \frac{S_S}{K_S + S_S} \quad (4)$$

同时,溶解性易降解基质有:

$$S_S = \left(\int_0^\infty OUR_{ex,H}\,dt - \int_0^\infty OUR_{ex,H}\,dt\right) / \left(1 - Y_H\right) \quad (5)$$

将式(4)、(5)合并、变形,可得如下公式(依此进行参数估值):

$$OUR_{ex,H} = A\frac{C - C(t)}{B + [C - C(t)]} \quad (6)$$

$$C(t) = \int_0^\infty OUR_{ex,H}\,dt$$

$$A = -\left(1 - \frac{1}{Y_H}\right)\mu_H X_H$$

$$B = K_S(1 - Y_H)$$

$$C = \int_0^\infty OUR_{ex,H}\,dt$$

由此,根据呼吸速率曲线的参数估值结果,可以得到 ASM2D中化学计量学参数 Y_H、动力学参数 K_S 以及 $\mu_H X_H$ 的值:

$$Y_H = 1 - \frac{C}{COD},\ K_S = \frac{B}{1 - Y_H},\ \mu_H X_H = \frac{A Y_H}{1 - Y_H} \quad (7)$$

2　试验结果及讨论

2.1　呼吸速率曲线的参数估值

确定了动力学模型,就可以根据测量得到的内源呼吸曲线和外源呼吸曲线进行参数估值,求出模型参数的具体数值。

2.2　内源呼吸曲线估值

图 2为内源呼吸的溶解氧变化曲线,溶解氧数据采集频率为 1次/6 s,时间为零的点停止曝气,曲线的最低点为重新曝气的时刻,将曲线分为 I和 II两部分。利用 matlab程序将该曲线通过滤波函数处理为平滑曲线后再进行微分,则可以根据 I段溶解氧的微分值计算出 OUR_{en},再由 II段曲线溶解氧的微分值计算出 K_{La}和 DO_{bl}。

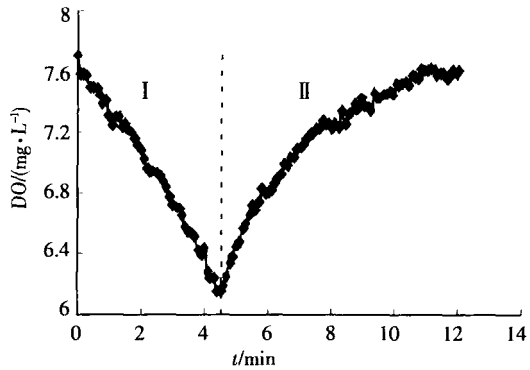

图 2　内源呼吸溶解氧变化曲线

Fig 2　Dissolved oxygen curves of endogenous respiration

由图 2曲线计算得,OUR_{en} = 0.311 03,K_{La} = 0.246 48,DO_{bl} = 7.781 8。

2.3　外源呼吸曲线估值

由试验得到外源呼吸的溶解氧变化曲线,在时

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间为零的对应点投入底物 (不同浓度的乙酸钠和乙酸混和自配水样)。将曲线通过滤波函数处理为平滑曲线后再进行微分,可得到外源呼吸速率变化曲线 (见图 3)。

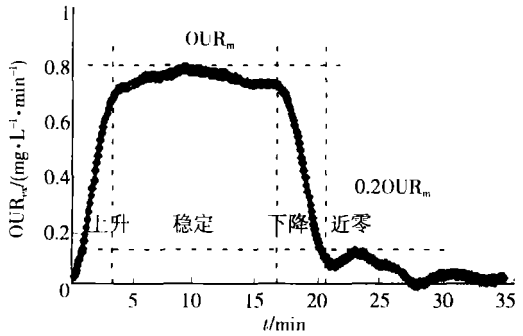

图 3　外源呼吸速率曲线

Fig 3　OUR curves of exogenous respiration

由图 3可见,OUR_{ex}曲线分为上升区、稳定区、下降区和近零区。选取稳定区和下降区这两部分曲线进行参数估值。选取 OUR_{ex}曲线的最大值 OUR_m 对应的时间点作为计算部分的起点,0. 2倍 OUR_m 对应的时间点作为计算部分的终点。

2. 3. 1　计算方法

以 OUR_{ex}的积分值作为自变量,OUR_{ex}作为变量,选取计算部分,通过最优化算法,可以寻找到与之最吻合的参数 A、B 和 C的值。

采用最小二乘法进行参数估值,并用网格法计算,构造目标函数如下:

$$Z = \sum_{t_B}^{t_E} [A\frac{C - C(t)}{B + C - C(t)} - OUR_{ex}]^2$$

式中　A、B、C——模型参数值

OUR_{ex}、$C(t)$ ——分别为随时间变化的呼吸速率及其对时间的积分值

t_B、t_E ——分别为计算曲线的首、尾位置

2. 3. 2　参数估值结果

用网格法计算结果为: A = 0. 863 2, B = 0. 626 3, C = 12. 611。

由于加入的底物已知,可以求得 Y_H = 0. 653、K_S = 1. 806、$\mu_H X_H$ = 1. 626。

五组开放式 OUR法试验的结果见表 1,其中 Y_H 值相对稳定, K_S 和 $\mu_H X_H$ 值是在 Y_H 值基础上计算而得,因而存在误差的累积,造成这两组参数结果不稳定。此外,在试验中发现,不同搅拌速度和温度对 OUR曲线的测量都有影响,因而会影响到活性污泥参数的计算。

表 1　开放式呼吸速率法参数的估值结果

Tab. 1　Parameter estimation results by open respirometry technique

序号	A	B	$C = r$BOD	Y_H	K_S/(mg·L^{-1})	$\mu_H X_H$/(mg·L^{-1}·min^{-1})
1	0. 302	0. 576	15. 740	0. 639	1. 597	0. 534
2	0. 473	1. 891	11. 108	0. 621	4. 988	0. 774
3	0. 680	1. 649	5. 382	0. 694	5. 386	1. 542
4	0. 378	0. 630	9. 629	0. 730	2. 332	1. 022
5	0. 863	0. 626	12. 611	0. 653	1. 806	1. 626
均值				0. 667	3. 222	1. 100

2. 4　ASM2D组分的测量

由式 (5)可以得到废水中溶解性易降解基质 S_S。此外,OUR_{ex}积分曲线可以分为速率不同的两段曲线 (见图 4),由于 $S_S = S_A + S_F$,可以认为这两段曲线分别代表了 ASM2D中可发酵基质 S_F 和发酵产物 S_A,但是生物法对 ASM2D 组分的测量并不是很准确的[3],尤其是对易降解组分的划分。

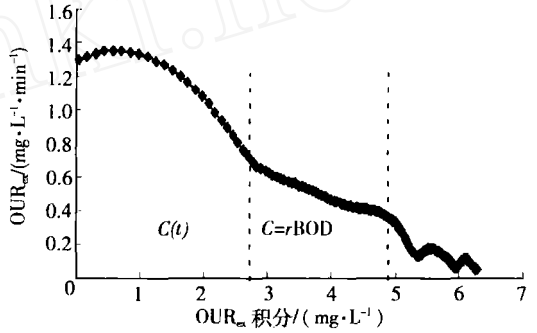

图 4　组分测量外源呼吸速率积分曲线

Fig 4　Integral curves of exogenous respiration for components analysis

开放式呼吸速率法模型组分估值结果见表 2,根据表 2可以获得一组 ASM2D的模型组分值。

表 2　开放式呼吸速率法模型组分的估值结果

Tab. 2　Components analysis results by open respirometry technique

序号	进水 COD/(mg·L^{-1})	A	B	$C = r$BOD	$C(t)$	S_S/(mg·L^{-1})	S_A/(mg·L^{-1})	S_F/(mg·L^{-1})
1	38. 72	1. 922	2. 670	3. 631	2. 677	10. 903	2. 864	8. 040
2	53. 42	2. 062	4. 295	5. 023	3. 060	15. 084	5. 894	9. 190
3	39. 41	2. 152	2. 395	4. 340	2. 843	13. 032	4. 493	8. 539
4	50. 42	2. 624	5. 668	4. 989	2. 778	14. 982	6. 640	8. 342

注:　$S_S = C/(1 - Y_H)$ [4], $S_A = [C - C(t)]/(1 - Y_H)$, $S_F = S_S - S_A$, Y_H 为表 1中的平均值 0. 667。

各组分在进水 COD中所占的比例如表 3所示。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3　ASM2D模型组分的估值结果

Tab. 3　Components analysis results of ASM2D

序号	进水 COD / (mg·L^{-1})	S_S / (mg·L^{-1})	S_S / COD	S_A / (mg·L^{-1})	S_A / COD	S_F / (mg·L^{-1})	S_F / COD
1	38.72	10.903	0.282	2.864	0.074	8.040	0.208
2	53.42	15.084	0.282	5.894	0.110	9.190	0.172
3	39.41	13.032	0.443	4.493	0.153	8.539	0.290
4	50.42	14.982	0.297	6.640	0.132	8.342	0.165
均值			0.326		0.117		0.209

目前呼吸速率法对易降解组分的测量是最可靠的一种方法,被广泛应用于活性污泥模型的组分分析和模型校正上,但这种方法仍然不是很准确,且在测量过程中易受搅拌速度、温度、仪器及 COD测定误差等各种因素的影响,使所获得数值的精确性大大降低,但对实际模拟仍然具有相当的参考价值。呼吸速率法还可以用来测定其他多种模型参数和组分,是活性污泥模型校正的有力工具。

3　结论

① 开放式呼吸测量法可以不受溶解氧浓度和基质浓度的限制,试验可操作性强,能获得较多的参数,且可以通过 matlab编程计算获得,是活性污泥模型参数估值的首选方法;

② 试验中用开放式呼吸速率测量法获得了一批 ASM2D中化学计量学参数 Y_H、动力学参数 K_S 和与模型组分相关的参数 $\mu_H X_H$ 的值,为 ASM2D的研究和应用提供了条件;

③ 利用开放式呼吸速率测量法进行了 ASM2D进水组分分析并获得了 ASM2D组分中溶解性易降解基质 S_S 在进水 COD中的比例,以及可发酵基质 S_F 和发酵产物 S_A 在进水 COD组成中的贡献。

参考文献:

[1] Petersen B, Gernaey K, Devisscher M. A simplified method to assess structurally identifiable parameters in Monod-based activated sludge models[J]. Water Research, 2003, 37(12): 2893 - 2904.

[2] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al* Activated sludge model No. 2d, ASM2d [J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(1): 165 - 182.

[3] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al* Wastewater and biomass characterization for the activated sludge model No. 2: biological phophorus removal[J]. Wat Sci Tech, 1995, 34(2): 13 - 23.

[4] Vanrollegem P A, Spanjers H, Petersen B, *et al* Activated sludge model No. 1 parameters and components by respirometry[J]. Wat Sci Tech, 1999, 39(1): 195 - 214.

[5] Kristensen G H, Jansen J l C, Jorgensen P E. Batch test procedures as tools for calibration of the activated sludge model-a pilot scale demonstration[J]. Wat Sci Tech, 1998, 37(4 - 5): 235 - 242.

[6] Brouwer H, Klapwijk A, Keesman K J. Identificaiton of activated sludge and wastewater characteristics using respirometric batch-experiments[J]. Wat Res, 1998, 32(4): 1240 - 1254.

电话:(010) 62773095

E-mail: hanchang@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005 - 11 - 01

保护自然　保护水源　行胜于言

贯彻执行《中华人民共和国水法》

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net