

活性污泥生物反应动力学模型研究*

黄勇 杨铨大

(苏州城市建设环境保护学院, 苏州 215028)

王宝贞 聂梅生

(哈尔滨建筑工程学院, 哈尔滨 150006) (建设部科技司, 北京 100835)

摘要 介绍了在进行活性污泥法过程模型化研究中, 通过对国内外现有成果改进和强化, 所建立的结构化生物反应动力学模型。文中提出了建模的系统化方法, 采用概念模型图示和矩阵表达法简明清晰地表述了模型化的思路和全部定性定量信息; 并简要地介绍了模型参数估值的试验方法及估值结果。

关键词 活性污泥法 动力学 数学模型 参数估值

目前在工程实践中应用较多的活性污泥生物反应动力学模型是 Eckenfelder 和 McKinney 于 60 年代后期研究开发的模型以及 Lawrence - McCarty 在 70 年代初期建立的模型^[1]。尽管这些传统模型对实际系统和过程机理作了很大简化, 但所导出的稳态结果基本满足工艺设计要求, 且有模型变量可直接测定、动力学参数测定及方程的求解比较方便等特点, 故得以在环境工程领域内长期广泛地使用。

然而, 大量的试验和实际运行数据证实, 这些过于简化的模型不能很好地体现活性污泥法的许多典型工艺特点, 无法描述系统的瞬变响应过程^[2], 因而使其适用范围受到限制, 尤其是不能够有效地用于系统的动态和运行控制研究。要对活性污泥生物反应中的物质迁移转化过程进行更为准确的定量描述, 就必须建立更为完善的活性污泥生物反应动力学模型。近年来, 有关这方面的研究在国际上有了很大的进展。在目前较为流行的模型中, 以美国的 J. F. Andrews 及其合作者的长期工作为基础开发的

模型的特点是引入了底物在生物絮体中的贮存机理^[3]; 英国水污染研究中心(WRC)的模型强调了 Jones 非存活细胞的生物代谢活性^[4]; 国际水污染控制与研究协会(IAWPRC)提出的模型^[5]则在 Dold 等人的研究基础上, 对组分的划分和测定、过程的定义以及模型的表达方式等作了进一步的改进, 并综合了硝化和反硝化作用的过程动力学。而在国内, 这一领域的研究仍极为缺乏。本文将简要介绍在国际最新研究成果基础上, 通过理论分析和实验研究所建立的改进的活性污泥生物反应动力学模型。

1 建模的系统化方法

模型的性能和适用性受到建模方法的极大影响。传统动力学模型的建立沿用了经典微生物生长动力学的研究方法和 Monod - Herbert 生长-衰减机理模型的数学表达形式。这种在 CFST 反应器中, 采用溶解性底物, 由平衡生长时获得的数据得出的底物去除速率和微生物生长速率与底物浓度的关系, 丢失了大量不同平衡生长状态间的瞬变过程的信息, 忽视了一些重要的动态现象。应用到具有典型时变特性的活性污泥工艺系统中, 必然会带来许多问题。所

收稿日期: 1994-07-21

* 国家教委优秀青年教师基金资助项目

以,只注重稳态特性的研究方法是造成传统模型局限性的主要原因。

为了使建立的模型满足应用的要求,并具有良好的普遍适用性,在研究中提出了系统化的建模方法。其基本步骤如图1所示

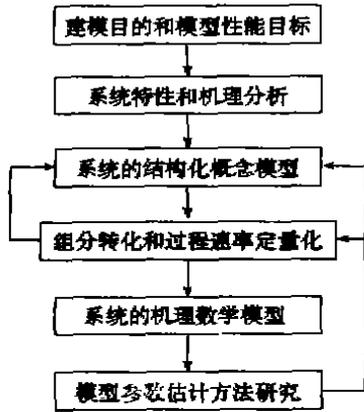


图1 机理模型研究的系统化方法

对任何物理现象进行模型化时,首先明确建模的目的十分必要。要对活性污泥法这样十分错综复杂的系统进行完全数量化的精确描述,采用一个综合模型反映其全部特性,必然需要测定大量的组分和反应速率并理解它们之间的相互作用和联系。这必须以不超过目前常用的测定技术所能实现的范围为前提。对于工程应用的目的来说,过于详细的信息将难以得到验证和推广。因而过程模型化应首先根据模型的用途确定对模型性能的要求,根据需要决定对实际系统特性描述的详尽和复杂程度。

由于活性污泥系统中底物组成和生物絮体组成的多样性和复杂性,各种生物降解性不同、存在形态各异的有机污染物的去除途径和降解过程是错综复杂的。污泥絮体的组成在底物的去除过程中也发生着各种变化。要用数学模型对此做出令人信服的解释和合理的描述,必须对系统的组分进行比传统模型更为细致的划分,采用多样化的机理和立体的结构阐明系统组分间作用和转化的关系和规律。这就是所谓结构化的机理模型。

表1 活性污泥法的典型现象和动态及其模型化方法

现象和动态	模型化方法	可能的机理和解释
有机物的快速去除	1. 捕集和吸附	非溶解性有机物结合到生物絮体中
底物的去除	1. 微生物的生长	合成细胞原生质、产能代谢
	2. 贮存	在细胞内或絮体中形成贮存物质
	3. 非存活细胞作用	产能代谢
溶解底物浓度升高(再扩散)	1. 贮存-水解 2. 捕集-水解	被捕集、吸附于生物絮体的非溶解有机物或贮存物质经水解进入液相
污泥的增长和积累	1. 微生物的增长	合成细胞原生质
	2. 贮存	形成贮存物质
	3. 内源代谢	产生代谢残余物质
	4. 捕集和吸附	非溶解性有机物结合到生物絮体中
污泥和活性生物量的减少	1. 衰减 2. 死亡	细胞体的氧化 细胞的老化、自然死亡和解体、被捕食等造成活性的丧失
	3. 水解	死亡细胞、胞外贮存物、吸附的不溶解底物的液化
溶解氧的消耗	1. 微生物的生长	产能代谢
	2. 非存活细胞作用	产能代谢
	3. 内源呼吸	细胞体自身氧化、产能
微生物生长和溶解氧利用的滞后	1. 贮存-代谢 2. 捕集-水解	从溶液中去掉的底物并非全部和同步地用于生长或产能代谢过程
惰性溶解有机物的生成	1. 水解	水解产物中存在不可生物降解物质

所要建立的反应动力学模型的目标是使之能反映活性污泥生物反应过程的主要动态行为

和工艺特性,适用于以含碳有机污染物为去除对象的多种活性污泥工艺系统。为此,模型应能够较好地描述那些已被许多试验研究和实际运行所证实的活性污泥法的典型现象和主要的动态行为,见表1所列。

2 活性污泥生物反应的结构化模型

2.1 有机物去除过程的概念模型

通过对文献报道的各种现象和机理的分析评价及试验研究结果,这里提出以1AWPRC模型为基础的改进模型。其概念模型结构可用图2表示。

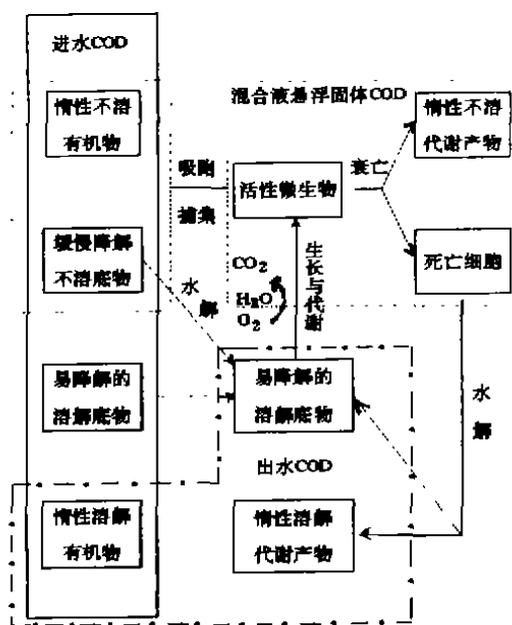


图2 废水中有机污染物降解过程概念模型

模型将系统分为9种组分,系统的组分均以COD测定:

① 易降解的溶解底物——来自进水及缓慢降解的非溶解底物和死亡微生物体的水解过程,可直接被微生物的生长和代谢过程所利用而得到降解;

② 惰性溶解有机物——来自进水中的不可生物降解的COD物质;

③ 惰性溶解代谢产物——活性微生物死亡所产生的不可生物降解的溶解代谢残余物;

④ 缓慢降解的非溶解底物——包括进水中非溶解性的,以及虽然溶解但生物降解速率缓慢的底物,通过水解作用而得以转化;

⑤ 活性微生物——以有机底物为碳源和能源的异养型微生物,包括具有增殖能力的存活细胞和有代谢活性但无增殖能力的非存活细胞;

⑥ 死亡微生物体——由于细胞老化、自然死亡和解体、自溶等原因而丧失代谢活性的微生物体中可生物降解部分,经水解作用而转化;

⑦ 惰性不溶代谢产物——丧失代谢活性的微生物体中不可生物降解部分;

⑧ 惰性不溶有机物——进水中非溶解性的不可生物降解的COD物质;

⑨ 溶解氧

图2中的实线框内指出了进水中可能包含的系统组分,虚线框内的组分构成了生物絮体,存在于出水中的组分由点划线框内表示。系统中的各种组分通过5个性质不同的作用过程进行迁移相互转化:①微生物的生长和底物代谢;②不溶底物的水解;③微生物的死亡;④死亡细胞水解;⑤捕集和吸附。

2.2 定量化与模型的矩阵表达式

在实际的活性污泥工艺系统中,吸附和捕集作用完成的时间往往比反应器的水力停留时间小得多。可以认为这一过程是瞬间完成的,因而不需要给出其速率表达式。对模型中鉴别的其它主要转化过程,必须给出适当的速率表达式表示其反应进行的方向和速度。生长与代谢过程的速率以Monod关系式表示,其它过程均以一级反应方程表示。从图1中还可以看出,有3个过程出现了物质的分流,需要用正确的计量关系保证物质转化中的质量守恒,为此引入了3个计量参数。

用1AWPRC课题组推荐的矩阵表达式对提出的模型进行表述,如表2所示。表中共有四行(下标为*j*)九列(下标为*i*),说明模型对系统

定义了 4 种转化过程,区分了 9 种不同的组分。矩阵元素 v_{ij} 为计量系数,表明了组分 i 与过程 j 间的相互关系。计量系数不为零时,它所对应的组分与相应的过程有关。计量系数的符号指出该组分在这一转化过程中的增减,其速率则等于计量系数 v_{ij} 乘以过程速率 ρ_j 。若某一组分不参与过程的变化,相应的计量系数为零,用空项表示。

采用这种矩阵形式,还能方便地通过连续性校核检验模型的列写是否出现违反质量守恒的错误。在每一个转化过程中,产生和消耗的物

质量应该相等。如果系统中的组分都以相同的单位表示,那么上述质量守恒规律就意味着每一行的计量系数之和应为零。表 2 给出的动力学模型中,组分均以 COD 表示,但溶解氧相当于负的耗氧量。放在进行连续性校核时,对与 S_o 有关的计量系数均应乘以 -1。

矩阵表达式还给出了模型中动力学参数和计量参数的定义和单位。可见采用这种矩阵表达法只需要用很小的空间和篇幅就可以清晰地显示出一个复杂系统中所有潜在的转化过程对各种组分影响的定性和定量关系。

表 2 活性污泥法动力学和计量关系

j 过程 \ 组分 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	过程速率 ρ_j ($ML^{-1}T^{-1}$)
	S_S	S_I	S_P	X_S	X_B	X_D	X_P	X_I	S_o	
1. 生长与底物利用	$-\frac{1}{Y_H}$				f_s				$-\frac{1-f_o Y_H}{Y_H}$	$\mu_{max} \frac{S_S}{K_S + S_S} X_B$
2. 非溶解底物水解	1			-1						$k_h X_P$
3. 微生物的衰亡					-1	$1-f_{xp}$	f_{xp}			$b_H X_B$
4. 死亡细胞水解	$1-f_{xp}$		f_{xp}			-1				$k_{hd} X_D$
表观转化速率 ($ML^{-1}T^{-1}$)	$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$									动力学常数
计量参数	易溶 降解	惰有 性机 溶物	惰代 性谢 溶产 解物	缓不 慢溶 降底 解物	活微 性生 物	死 亡 细 胞	惰代 性谢 不产 溶物	惰有 性机 不物 溶	溶 解 氧	
Y_H										μ_{max} (T^{-1})
f_{sp}										K_S (ML^{-1})
f_{xp}										b_H (T^{-1})
$f_o = S_S[f(S_S + K_S)]$										k_{hr} (T^{-1})
										k_{hd} (T^{-1})
单位: $M(COD)L^{-3}$										

3 模型验证和参数估计

对模型参数估计和废水特性测定的理论和试验方法问题进行了系统的研究,结果表明多数模型参数可以通过试验的方法有效地进行测定。同时,模型的参数估计和废水特性的测定是紧密联系的,往往需要循序、交替的进行。试验应在分批反应器以及流动完全混合反应器中进行。通过测定系统溶解 DO,耗氧速率 OUR,混合液及溶解性 COD 的动态变化过程,采用适当的数据处理技术实现对模型参数的估值和原

水中模型组分的测定。这正反映了结构化模型描述工艺动态行为的特征。

3.1 分批反应器脉冲负荷试验

这是在分批反应器中的生物反应进入内源呼吸等准稳态运行阶段时,迅速加入一定量的水样。通过对 DO 和 OUR 的瞬变过程的监测预测生物反应的某些动态特征,实现对相应参数的估计。这一试验技术可以用于 Y_H 及废水中可生物降解的底物浓度 S_{D0} 的测定(下标 0 表示进水中组分)。

3.2 分批反应器适当初始负荷试验

在试验开始时控制适当的污泥浓度、底物成分(原水样或过滤水样),使得反应器中产生适宜的动态变化过程,适宜于对 μ_{max} , k_{hs} , f_{xp} , S_{30} 进行估计和测定。

3.3 分批反应器污泥消化试验

这一试验旨在了解活性微生物在缺乏外源底物的条件下衰亡过程的特性,也反映出活性生物体衰亡过程中释放溶解性代谢产物的情况。可用于 b_H , f_{sp} 的测定。

3.4 连续流全混反应器矩形波负荷试验

利用在连续流完全混合反应器稳态运行中突然中断进水,造成耗氧速率发生突变的特性,测定出可直接被生物合成代谢所利用的易降解底物的变化量。用于 S_{30} 的测定。

表3 一些城市污水的水质特性

	S_T	S_5	X_A	X_T
南非(Ekama <i>et al.</i> , 1986)	5	20	62	13
南非,初沉污水 (Ekama <i>et al.</i> , 1986)	7	28	60	4
瑞士(Henze <i>et al.</i> , 1987)	11	32	45	11
匈牙利(Henze <i>et al.</i> , 1987)	9	29	43	20
丹麦(Henze <i>et al.</i> , 1987)	8	24	49	19
本研究,初沉污水	9	35	48	8

表4 文献报道的动力学参数和计量参数值

参数	单位	IAWPRC	Gold	Arden	Solfrank	本研究	
动力学参数							
μ_{max}	d ⁻¹	3~15.2	6.0	2.4~5.0	3.0	1.5	3.5
K_S	gCOD/m ³	10~160	20	5.0	20	5	20
b_H	d ⁻¹	0.09~4.38	0.62	0.62	0.52	0.24 ¹⁾	0.55
k_{dt}	d ⁻¹				5.0	250 ¹⁾	10
k_{hd}	d ⁻¹					2.3 ¹⁾	2.3
计量参数							
Y_H	gCOD/gCOD	0.46~0.69	0.67	0.665		0.64	0.65
f_{sp}					0.1	≈0	0.06
f_{xp}		0.08	0.02	0.08	0.02	0.20	0.08

注:1)内源代谢衰减常数;

2)非溶解底物的快速水解过程;

3)非溶解底物的缓慢水解过程

根据具体的测定参数或组分,在应用上述试验技术时采用不同的进水和曝气方式、取样和分析程序及试验历时,就可以获取相应的数据处理方法所必要的信息。

表3和表4分别是对有关模型参数和废水特性实测的结果及与文献报道数据的比较。

4 结语

试验及计算机模拟研究的结果表明,本文提出的活性污泥生物反应动力学模型反映了活性污泥生物系统的各种主要的过程特性和动态行为,与适当的反应器传递(流动、混合)过程模型相结合,可用于研究以常规法及其它以含碳有机物去除为目的的各种改良方法运行的、多种类型的活性污泥工艺。我们的研究改进了现有模型的结构,扩大了模型的功能,并使得模型参数的估值更为方便。采用结构化模型图示表示反应动力学的概念模型,以模型矩阵表述模型中的各种定型和定量信息,清晰直观,简洁明了。采用系统化方法使模型研究和开发具有明确的目标和清晰的思路,注重了对过程机理的阐述,并能使模型数学表达的简洁、参数估计的方便和模型功能扩展的可能得以综合考虑。

5 参考文献

- 1 Benefield L D, Randall C W. Biological Process Design for Wastewater Treatment. Prentice-Hall, Inc. 1980
- 2 黄勇等. 废水生物处理的结构化模型. 中国给水排水. 1992, 8(6): 29
- 3 Vitasovic Z, Andrews J F. An integrated dynamic model and control system for activated sludge wastewater treatment plants, Part I - modeling. Wat Poll Res J Canada, 1989, 24(4): 491
- 4 Chambers B, Jones G L. Optimisation and updating of activated sludge plants by efficient process design. Wat Sci Teehna. 1988, 20(4/5): 121
- 5 Henze M *et al.* Activated sludge model No. 1. Scientific and Technical Reports No. 1. London: IAWPRC, 1986

A Structured Kinetic Model for Activated Sludge Process

HUANG Yong YONG Quanda *et al.*

(Suzhou Institute of Urban Construction and Environmental Protection, Suzhou 215008)

Abstract In this paper, a structured biological kinetic model for activated sludge process is proposed, which is the modification of IAWPRC model with respect to carbonaceous organic pollutants removal. A systematic modeling approach is suggested and applied. The modified model is concisely presented with a conceptual schematic diagram and the matrix format which conveys all the qualitative and quantitative information of the model in a small space, and enable one to easily follow the modeler's idea. The experimental methods for parameter estimate and the results of determination are also briefly introduced.

Keywords Activated sludge process; Kinetics; Mathematical modeling; Parameter estimate

第四届全国污染治理技术研讨会

——脱硫实用技术交流与推广(征文通知)

中国环境科学学会拟于 1995 年第四季度在北京召开“第四届全国污染治理技术研讨会”,着重进行脱硫实用技术交流与推广,旨在会议研讨的基础上,配合新的“大气污染防治法”的颁布实施,为全国各有关行业寻求脱硫实用技术的企事业单位提供咨询服务,同时也力图在规范环保脱硫技术市场方面为政府有关部门提供某些决策依据。

一、会议研讨与征文内容

1. 我国脱硫实用技术研究与应用成果的现状与发展趋势;
2. 国内外控制二氧化硫的战略、规划、法规、标准,以及脱硫技术的评估与选用方法;
3. 国内脱硫技术(包括石灰乳喷雾半干法脱硫、石灰石(石灰)/石膏湿法脱硫、催化燃烧法、湿式除尘脱硫法、工业型煤和循环流化床等方法)的原理、工艺路线、适用范围、技术经济指标以及推广应用前景;
4. 适用于我国高硫煤地区和沿海经济较发达地区的脱硫技术及装置实际运行情况介绍;
5. 适用于我国大型火电厂脱硫技术及装置的探讨与交流;
6. 适用于我国小型工业炉窑的脱硫技术及装置的探讨与交流;
7. 与国外合作脱硫项目,以及国内脱硫示范工程的技术流程现状的介绍;
8. 关于脱硫技术及设备如何走结合引进加速实现国产化道路的探讨与实例研讨;
9. 当前国内已经采用的各类脱硫技术及设备在运转中出现和存在的主要问题及改进的建议措施;
10. 推动脱硫实用技术所采取的各项政策和措施。

二、征文要求

1. 每篇论文字数一般不超过 5000 字(包括图表),并附 400 字文章提要、关键词。用 A4(210mm × 297mm)标准稿纸打印或抄写工整清晰;
2. 提交文字材料截止时间为 1995 年 8 月 30 日,以寄出的邮戳日期为准,过期不再受理;
3. 应征论文经评审,录取论文将于 1995 年 9 月下旬发录取通知,会议期间颁发入选证书。录取论文将汇编成册,由出版社公开出版。
4. 寄送论文时请在信封左下面注明“脱硫专题研讨会应征论文”字样。
5. 研讨会正式通知将于前一个月发出。
6. 论文请寄北京西直门内南小街 115 号中国环境科学学会学术部,邮政编:100035,联系人:朱琳瑛,联系电话:6021006,传真:6020031。