EGSB 反应器的动力学模型研究(Ⅱ)

一参数估计与过程模拟

左剑恶,凌雪峰,王妍春,顾夏声

(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘 要:本文利用实验室处理葡萄糖自配水的 EGSB 反应器在第 33~70 d 的运行数据对厌氧动力学模型进行了参数估计,然后利用该模型对 ECSB 反应器在第 71~117 d 的实际运行进行动态模拟,模拟结果如出水 COD 值、反应器内部 pH 值、出水碱度、沼气产量、沼气中的甲烷含量以及反应器内部生物量等与实际运行数据吻合良好。
关键词:动力学模型;参数估计;厌氧生物处理;ECSB 反应器
中图分类号: X703; S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1166 (2003) 02-0003-04

A Study on Dynamic Model of an EGSB Reactor – Π : Parameter Estimation and Dynamic Simulation / ZUO Jian-e, LING Xue-feng, WANG Yan-chun, et al. / (Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The operational data of a lab-scale ECSB reactor with glucose feed during the 33rd to 70th day was used to estimate the main dynamic parameters for the previously developed dynamic model. This dynamic model was then used to simulate the performance of the same ECSB reactor from 71st to 117th day. The results showed that this model could basically simulate the operational parameters as effluent COD, pH value in the reactor, effluent alkalinity, biogas yield, content of methane and biomass.

Keywords: dynamic model; parameter estimation; anaerobic biological treatment; EGSB reactor

前文^[1]已经详细介绍了描述 EGSB 反应器内生 化过程和物化过程的动力学数学模型的建立过程, 本文则重点讨论如何利用 EGSB 反应器的运行结果 进行动力学参数估计以及对实际运行的 EGSB 反应 器进行动态模拟。

1 材料和方法

1.1 EGSB反应器及工艺流程

试验中所采用的 EGSB 反应器及其工艺流程如 图 1 所示。EGSB 反应器为有机玻璃制成,总体积 为 8.08 L,反应区有效体积为 4.26 L,采用夹套式 水浴加热,控制反应器内部温度为 35℃,接种颗粒 污泥取 自处理制药废水的生产性 UASB 反应器, VSS/SS 为 0.72,反应器的接种污泥浓度约为 6.4 gVSS·L⁻¹。试验中采用葡萄糖自配水,即在自来水 中加人一定量的葡萄糖作为有机基质,并按COD:N :P = 100:5:1(启动期)或 150:5:1(运行期)加入尿 素和磷酸二氢钾,同时加入微量元素(Fe = 0.05 mg· L^{-1} , Co = 0.05 mg· L^{-1} , Mo = 0.05 mg· L^{-1} , Ni = 0.01 mg· L^{-1})和酵母浸膏(50 mg·gCOD⁻¹),还加入适量 Ne₂CO₃调节反应器内部 pH 值在 6.8~7.2之间^[2]。 自来水中含有约 60 mg· L^{-1} 的 SO4²⁻。

- 1.2 主要分析项目及方法
 - (1) COD: TL-1A 型污水 COD 速测仪;
- (2) pH 值及温度: TPX 90 *i* pH 计及水银温度
 计;
 - , (a) =======
 - (3) 碱度:标准酸碱滴定法;
 - (4) 沼气产量:湿式气体流量计;
 - (5) 沼气组分: 气相色谱法;
 - (6) VSS: 参见文献^[2]。

收稿日期: 2002-08-10 修回日期: 2002-12-06

項目来源: 国家"863"计划 (课题编号: 2002AA601190); 国家自然科学基金 (课题编号: 50008009)

作者简介: 左剑恶(1968 -), 男, 湖南常德人, 工学博士, 副教授, 主要从事废水生物处理工程的研究和教学。



2 EGSB 反应器的启动与稳定运行

EGSB 反应器在 32 天内完成了启动,启动结束 时,容积负荷为 4.5 kgCOD·m⁻³d⁻¹,HRT 为 28 h, COD 去除率在 90%以上。随后进入稳定提高负荷的 运行期,在第 33 d~117 d 的运行期中,共分四次提 高了反应器的负荷:第 33~46 d,负荷稳定在 5.8 kgCOD·m⁻³d⁻¹,HRT 为 18.5 h;第 47~70 d,负荷 稳定在 7.4 kgCOD·m⁻³d⁻¹,HRT 为 14 h;第 71~ 101 d,负荷稳定在 10.3 kgCOD·m⁻³d⁻¹,HRT 为 10 h;第 102~117 d,负荷稳定在 20.7 kgCOD·m⁻³ d⁻⁴,HRT 为 5 h;在此期间,反应器 COD 去除率一 般在 90%以上,最高甚至达到 97%。在本文中,首 先利用上述 EGSB 反应器在第 33 到 71 d 之间的运行 数据对前文^[1]中所建立的数学模型中的主要动力学 参数进行估计,然后应用该模型对反应器第 71~ 117 d之间的运行状况进行了动态模拟。

3 动力学参数的估计

正确选取动力学参数对于动力学模型的应用十 分重要。一般来说,动力学参数可以通过以下几种 途径获取: 1. 从已发表的文献中直接选取; 2. 理 论分析和计算; 3. 通过专门设计的小型间歇试验求 取; 4. 直接从动态试验过程中获取^[3,4]。在本文中, 结合上述第1和第4种方法,采用如下策略进行动 力学参数的估计: 1. 根据不同的文献资料中所给出 的各动力学参数值(见表1),确定各参数的取值范 围; 2. 在取值范围内根据经验选取初始参数值,利 用前文建立的数学模型以及前述的 EGSB 反应器在 第 33~71 d之间的运行数据对模型中各动力学参数 按图 2 所示的流程进行估计。由此最终确定的各主 要动力学参数值见表 1。



图 2 动力学参数估计的步骤

表1 动力学参数的取值范围及本文所确定的动力学参数值

产酸细菌	γ ∕gVSS∙gCOD ⁻¹	μm /d ⁻¹	Ks ∕gCOD∙L ⁻¹	<i>Kd</i> /d ⁻¹	数据来源
	0.17	30	0.0225	6.1	Ghosh, 1974 ^[5]
	0.14	8.64	0.37	0.14	Zoctemeyer, 1982 ^[6]
	0.1 gVSS•gBVS ⁻¹	0.013T(°C)-0.129 (20 < T < 60)	9gBVS∙L ⁻¹		Hill, 1982 ^[7]
	0.16	42.96	0.023	0.0192	Mosey, 1983 ^[8]
	0.038	1.2	0.131	0.408	Denac, 1991 ^[9]
	0.12	2.5	0.1	0.008	本文
产甲烷细菌	Yc ∕gVSS∙gCOD ⁻¹	μ _{mc} /d ⁻¹	K _{sc} ∕gCOD·L ⁻¹	K _{de} d ⁻¹	数据来源
	0.042	0.456	0.167	0.0096	Mosey, 1983 ^[8]
	0.041	0.357	0.165	0.015	Lawrence & Macarty, 1969 ^[10]
	—	1.4	0.32	_	Zinder&Mah, 1979 ^[11]
	0.0315 (gVSS•gVFA ⁻¹)	0.013T(℃)-0.129 (20 < T < 60)) 3.0 (gBVS·L ⁻¹)	1 6	Hill, 1982 ^[7]
	0.035	0.55	0.45	0.004	本文・

注: Ki 和 Kic 取 1.5 gCOD·L⁻¹; BVS 指可生物降解挥发性固体 (包括可溶性有机物和不溶的有机物)。

4 动力学模型对 EGSB 反应器实际运行的动态模拟

完成了动力学参数的估计后,就可以利用已确 定了动力学参数的数学模型对 ECSB 反应器的实际 运行过程进行动态模拟。本文中主要对 EGSB 反应 器的出水 COD 值、反应器内部 pH 值、出水碱度、 沼气产量以及沼气中的甲烷含量以及反应器内部生 物量等进行了模拟,并分别与反应器第 71~117 d 之间共 47 天的实际运行结果进行了对比,其结果 分别讨论如下:

4.1 对反应器出水 COD 值的模拟

图 3 所示为 ECSB 反应器在运行第 71~117d 之 间共 47 天的出水 COD 浓度及相应的模型计算值, 图中还同时给出了反应器的容积负荷。可知在此阶 段中,反应器主要在两个负荷下运行,即 71~101 d 之间的 10.3 kgCOD·m⁻³d⁻¹和 102~117 d 之间的 20.7 kgCOD·m⁻³d⁻¹和 102~117 d 之间的 20.7 kgCOD·m⁻³d⁻¹。在负荷提高的前几天,出水 COD 值略有升高,但随着运行时间的延长,又会逐 渐下降并稳定在约300 mg·L⁻¹(第 77~101 d)和 400 mg·L⁻¹(第 102~117 d)。从图中可以看出,由模型 计算的出水 COD 值与实际运行结果基本吻合。



4.2 对反应器内部 pH 值和出水碱度的模拟

图 4 和图 5 所示分别为在第 71~117 d 期间反 应器内部 pH 值和出水碱度的实际运行结果与模型 模拟值的对比。可看出,尽管反应器在此期间有两 次较大幅度的负荷提升(即在第71d由原来的7.4 kgCOD·m⁻³d⁻¹突然提升并稳定在 10.3kgCOD·m⁻³ d⁻¹以及由 10.3 kgCOD·m⁻³d⁻¹再次提升至 20.7 kg-COD·m⁻³d⁻¹),但反应器内部的 pH 值以及出水碱度 均没有大的波动。分析表明,由于反应器内碱度维 持在 3500~4000 mgCaCO3·L-1,而且实测和模型模拟 的结果均表明,反应器出水碱度中的主要组成是碳 酸氢根,如此高的碳酸氢根碱度提供了足够的缓冲 能力,保证了在提高负荷初期反应器内的 pH 值不会 有明显的下降。在厌氧反应器中,由于酸化细菌的 增殖速率远高于产甲烷细菌,因此在负荷突升时,可 能会有大量的酸化中间产物 VFA 的产生和累积,如 果系统内没有足够的缓冲能力,将会导致 pH 值迅速



下降,如果 pH值下降幅度过大,就可能会对产甲烷 细菌产生抑制,导致 VFA 更多累积,由此产生恶性循 环,最终导致反应器运行失败。但在本文所研究的 EGSB 反应器中,图 4 和图 5 的实测结果与模型模拟 结果均表明,系统内的缓冲能力是足够的,可以承受 如前所述的负荷突然提升。

从图中还可以看出,在运行的第 89 天,由于进 水碱度的突然降低,反应器内的 pH 值从 7.11 下降 到 6.79,而模型也较好的模拟出这一过程。由此,从 理论计算和实际运行两个方面均能证明在运行厌氧 反应器时,维持稳定的进水碱度对于保证反应器内 pH 值的稳定具有重要意义。图 5 中还同时给出了反 应器的进水碱度,可见,EGSB 反应器的出水碱度总 是高于进水碱度,二者的差值约为 700 mgCaCO₃ · L⁻¹。一般认为^[12],中性碳水化合物如葡萄糖等的降 解不会影响厌氧体系的碱度,硫酸根的还原及有机 氮的降解通常使得体系的碱度增加。在本试验中, 进水中投加了一定量的尿素作为氮源物质,同时配 水中还含有约 60 mg·L⁻¹的硫酸根,因此导致出水碱 度升高。

4.3 对沼气产量及沼气中甲烷含量的模拟

图 6 和图 7 所示为反应器的沼气产量以及沼气 中甲烷含量的实测值与模拟值的对比。从图 6 中可 以看出,在第 71~101 d之间,模型模拟值与沼气产 量的实测值较吻合;而在 102~115d之间,模拟值明 显高于实测值,这主要是由于此阶段反应器集气管 路出现故障,导致大量的沼气未能被收集;而集气装 置经过改进之后,实测的产气量有了较大的提高,在 最后两天,已经基本接近模拟值。从图 7 可见,沼气

5



4.4 对反应器内部生物量的模拟

图 8 所示为模型对 EGSB 反应器内的生物量的



模拟结果,同时给出了第71 d 和第117 d 两个生物量 的实测值。图中可以看出,反应器内的生物总量与 负荷有很好的相关性,一定的负荷对应于一定的生 物量。反应器在第71 d 时,生物浓度约为5 gVSS· L^{-1} ,当负荷从7.4 kgCOD·m⁻³d⁻¹提高到10.3 kgCOD ·m⁻³d⁻¹以后,随着运行时间的延长,生物浓度逐渐 升高到13 gVSS·L⁻¹,随后即稳定在这一水平上。当 运行至第102 d时,负荷提高到20.7 kgCOD·m⁻³d⁻¹, 生物量也相应逐渐升高到约17 gVSS·L⁻¹。

5 结论

本文利用 ECSB 反应器的实际运行数据对其动 力学模型进行了参数估计和过程模拟,主要可以得 到如下的结论:

(1)利用 ECSB 反应器在第 33~70d 的实际运行数据对动力学模型中所涉及的产酸菌和产甲烷菌的 各主要动力学参数如 µm, µmc, Ks, Ksc, Y, Yc, Kd, Kdc 进行了估计。(2)应用动力学模型对 ECSB 反应 器在第 71~117 d 期间共 47 天的实际运行进行动态 模拟。结果表明,该模型对反应器的出水 COD 值、 内部 pH 值、出水碱度变化、沼气产量及沼气中甲烷 含量、生物量等的模拟值与反应器的实际运行结果 较为吻合。

参考文献:

- [1] 左剑恶,凌雪峰,王妍春.ECSB反应器的动力学模型研究(I)一模型的建立[J].中国沼气,2003,21(1):3~7.
- [2] 王妍春. EGSB 反应器处理含氯苯有机废水的试验研究[D]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 2001.
- [3] Lu Lin, An anaerobic treatment process model: development and calibration (waste activated sludge, methanogensis) [D].
 Michigan Technological University, 1991.
- [4] Batstone D J, et al. Modelling anaerobic degradation of complex wastewater. II: Parameter estimation and validation using slaughterhouse effluent [J]. Bioresource Technology, 2000, 75: 75 - 85.
- [5] Ghosh S, KlassD L. Two phase anaerobic digestion [J]. Proc. Biochem. [J]. 1978, 13: 15 - 24.
- [6] Zoetemeyer R J, Arnoldy P, Cohen A, Boelhouwer C., Influence of temperature on the anaerobic acidification of glucose in a mixed culture forming part of a two stage digestion process [J]. Wat. Res., 1982, 16: 313 321.
- [7] Hill D T. A comprehensive dynamic model for animal waste methanogensis[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(5): 1374 - 1379.
- [8] Mosey F E. Mathematical modeling of anaerobic digestion process: regulatory mechanisms for the formation of short - chain volatile acids from glucose[J]. Wat. Sci. Tech., 1983, 15: 209 - 217.
- [9] Denac M, Miguel A, Dunn I .J. Modelling dynamic experiments on the anaerobic degradation of molasses wastewater[J]. [J].Biotechnol. Bioengng, 1988, 31:1-10.
- [10] Lawrence, A.W. and McCarty, P.L., Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment[J]. J.War. Poll. Cont. Fed., 1969, 41:1-17.
- [11] Zinder, S.H. and Mah, R.A., Isolation and characterization of a thermophilic strain of Methanosarcina unable to use H2 - CO2 for methanogenesis[J]. Appl. Environ. Microbiol, 1979, 38: 996 - 1008.
- [12] 左剑恶,等. 厌氧消化过程中的酸碱平衡及 pH 控制的 研究[J]. 中国沼气,1998, 16(1):3-7.

中甲烷含量的实测值与模拟值基本吻合。