

UASB 结构模型理论探讨

杨琦¹, 尚海涛¹, 施汉昌², 钱易²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: UASB 反应器高度优化设计对 UASB 启动、运行尤为重要, 本文根据 UASB 反应器内紊流扩散概念, 推得 UASB 反应器内污泥悬浮层沿垂直高度的污泥分布模型, 通过小试实验数据经计算机模拟, 可以取得 UASB 优化设计参数。

关键词: UASB; 数学模型; 紊流扩散

中图分类号: S216.4; X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1166(2004)04-0010-04

Approach on Design Method and Operation Control of UASB Reactor Yang Qi, Shang Hai-tao¹, Shi Han-chang², Qian Yi² (1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The height is an important factor of UASB reactor for design, especially for starting up and operation of the reactor. In this paper, a model of the vertical distribution of sludge depending on the height within sludge blanket of UASB reactor was obtained by simulation based on the turbulent diffusion concepts. The data from laboratory experiment were fitted with the model by computer. They can be used as optimal parameters for design of UASB reactors.

Key words: UASB; mathematical model; turbulent diffusion

厌氧生物处理技术是目前世界上处理高浓度有机废水经济有效和广泛应用的生物处理技术。特别是新型高效厌氧生物处理反应器(如 UASB)出现, 受到世界各国专家学者广泛重视。目前国内外主要用它处理制糖废水、土豆加工废水、淀粉废水、啤酒废水、酒精废水、乳品废水、屠宰废水和造纸废水^[1]。反应器主要由污泥床、污泥悬浮层和三相分离器组成(见图 1)。有机质的厌氧消化在具有固定床性质的污泥层和具有流化床性质的污泥悬浮层两部分完成, 三相分离器具有气液固三相分离作用, 但不参与厌氧有机质的消化过程。因此, 影响有机质转化效率结构尺寸主要是污泥床和悬浮泥层高度。目前, 国内外学者对 UASB 颗粒污泥培养方面进行较深入的研究, 但对反应器结构优化和数学模型方面研究较少, 目前, UASB 设计仅仅停留在经验和半经验基础上, 对 UASB 设计一般采用污泥负荷和停留时间, 而对反应器内厌氧污泥分布、厌氧污泥产气率、厌氧反应器高度之间的内在关系探索较少, 本文力图通过反应器流态等水力学特性数学模型作较深入分析, 以图通过水力特性揭示 UASB 反应器优化设计参

数。

1 目前描述 UASB 数学模型

目前描述 UASB 数学模型主要分为厌氧生化反应动力学模型、UASB 反应器中流体流动动力学模型以及反应器内污泥分布数学模型。厌氧生化动力学模型主要分为基质降解动力学、厌氧微生物生长动

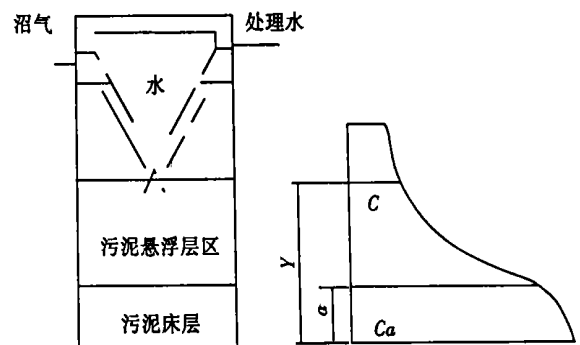


图 1 UASB 反应器装置示意和污泥浓度沿高度方向变化图
力学以及产甲烷气体动力学^[2]。以上模型对污泥颗粒在反应器中运动描述为两个方面, 一方面 Van der Meer^[3]等人认为在反应器内产生尾涡, 另一方面

收稿日期: 2004-04-01 修回日期: 2004-09-16

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(40102027)。

作者简介: 杨琦(1966-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事水污染防治方面的研究。

Bolle^[4]认为气体浮力在反应器内由于甲烷产生而存在在气体诱导浮力。也就是说气体浮力把污泥颗粒从反应器污泥床上浮到悬浮床中。然而根据实验观察大部分 COD 降解在污泥床中下部进行,且有机物在污泥床中产生气体多少与进水 COD 浓度成正比。在污泥床中,产生气泡较小,根据浮力和阻力公式

$$F_{\text{浮}} = \frac{\pi}{6} D_b^3 (\rho_w - \rho_g) g \quad (1)$$

$$F_{\text{阻}} = C_D \frac{\pi}{4} D_b^2 \rho_w \frac{V_b^2}{2} \quad (2)$$

D_b : 气泡的平均直径;

V_b : 气泡的上升速度;

ρ_w : 是水的密度;

ρ_g : 气泡的密度;

g : 重力加速度

C_D : 阻力系数。

浮力与 D_b 立方成正比,而阻力与 D_b 平方成正比,也就是说,在污泥床低部这样小气泡不可能克服污泥床阻力而使污泥颗粒上升。然而实际试验结果表明小气泡通过聚并,使其气泡变大,当直径达到 1 ~ 4 mm 时,上浮速度为 0.10 ~ 0.40 m · s⁻¹^[5]产生紊流,使固体颗粒与气泡分离,气泡上浮,固体粒子下沉。由于气泡产生诱导浮力,气泡携带固体颗粒到达三相分离器,由于气泡浮力存在,污泥悬浮层与污泥床粒子含量应渐渐趋于一致,然而通过试验观察发现污泥浓度随高度有变化。试验结果表明:由于小气泡聚并产生大气泡,大气泡产生浮力就大,浮力越大,水及气固之间产生紊动。在气泡上升途中,产生涡流,部分污泥颗粒不断离开,另一部分污泥颗粒随上升水流带走。

2 污泥分布理论分析

运用稳态固体颗粒质量平衡求得下列方程:

$$(V_s - V_w) C + \varepsilon \frac{dC}{dy} = 0 \quad (3)$$

C : 在任何 y 高度固体含量;

V_s : 固体颗粒沉降速度;

V_w : 水上升流速 ($H_{\text{反}} / HRT$)

ε : 扩散系数。

根据紊态扩散理论 Leliavsky^[6]估计

$$\varepsilon = \beta u^2 \quad (u \text{ 为水沿尾涡运动速度}) \quad (4)$$

而 u 与单位时间单位面积产生气泡数量以及气泡性质有关。

$$u = f(n, V_b, D_b) \quad (5)$$

当固体颗粒在污泥悬浮层处于平衡时可求出气泡上升流速。

$$\frac{\pi}{6} D_b^3 (\rho_w - \rho_g) g = C_D \frac{\pi}{4} D_b^2 \rho_w \frac{V_b^2}{2} \quad (6)$$

$$\rho_w - \rho_g \approx \rho_w \quad (7)$$

$$V_b = \frac{\sqrt{4 D_b g}}{\sqrt{3 C_D}} \quad (8)$$

由方程(8)可见, V_b 与 D_b 有关,而 D_b 对某一气泡是常数,方程(5)可看成:

$$u = f(n) \quad (9)$$

把(9)代(4)

$$\varepsilon = \beta (f(n))^2 \quad (10)$$

气体产率正比于 n ,而气体产率又与 COD 负荷成正比。

3 基本方程求解

为了求解方程(3),必须假设下列条件:

- (1) 反应污泥床有无数多个粒子进入污泥悬浮床;
- (2) 气泡在污泥床中产率是均匀的,在不同操作条件下,气泡直径是均匀的;
- (3) 气泡上升速度和颗粒污泥沉降速度是常数;
- (4) 上升气泡对周围水体剪切应力与其速度成正比。

对方程(3)积分:

$$\int_a^C \frac{dC}{C} = - \int_y^y \frac{V_s - V_w}{\varepsilon} dy \quad (11)$$

$$\ln \frac{C}{C_a} = - \frac{V_s - V_w}{\varepsilon} (y - a) \quad (12)$$

y 是 UASB 沿污泥悬浮层高度上的任一值;

a 是 UASB 沿污泥悬浮层最低点对应的高度;

C_a 是 UASB 污泥悬浮层最低点的浓度;

C 是 UASB 沿污泥悬浮层高度上的任一时刻的污泥浓度。

4 估算 ε

根据牛顿流体剪应力公式和前面假设,在污泥悬浮层中上升气泡对其周围水体剪应力 τ 正比于气泡上升速度:

$$\tau = \mu \frac{du}{dx} \quad (13)$$

又:

$$\tau = ku \quad (14)$$

τ 是剪应力, k 是常数, du/dx 是沿水平方向速度的变化, μ 是动力粘性系数。

对于上升气泡周围水体取微小质量 m 则根据牛顿第二定律:

$$m \frac{du}{dt} + ku = 0 \quad (15)$$

对(15)积分:

$$\int_a^u \frac{du}{u} = - \int_m^1 \frac{k}{m} dt \quad (16)$$

$$u = u_a \exp\left(-\frac{k}{m}t\right) \quad (17)$$

其中: u 是任一时刻气泡带动液体质点的瞬时速度;

k 是常数;

u_a 是气泡带动液体质点的初始速度。

n 是单位时间、单位面积产生气泡数目, 则对上升气泡周围水体平均速度:

$$u = \frac{\int_0^T u dt}{T} \quad (18)$$

把(17)代入(18):

$$u = \frac{u_a}{T} \int_0^T \exp\left(-\frac{k}{m}t\right) dt \quad \left[n = \frac{1}{T}\right] \quad (19)$$

$$u = nu_a \frac{m}{k} [1 - \exp\left(-\frac{k}{mn}\right)] \quad (20)$$

u , m , k 对于固定液体质量是常数:

$$A = \frac{mu_a}{k} \quad B = \frac{k}{m}$$

$$u = nA \left[1 - \exp\left(-\frac{B}{n}\right)\right]^2 \quad (21)$$

$$\varepsilon = \beta u^2 = \beta n^2 A^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{B}{n}\right)\right]^2 \quad (22)$$

对于气泡体数量

$$n = q/s,$$

其中, q 是单位时间、单位面积的气体产率,

s 是气泡的体积。

$$\varepsilon = \rho \left(-\frac{q}{s}\right)^2 A^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{BS}{q}\right)\right] \quad (23)$$

$$A = \beta \frac{A^2}{s^2} \quad B = BS$$

$$C = C_a \exp\left[-\frac{(V_s - V_w)(y - a)}{Aq^2(1 - e^{-\frac{B}{q}})}\right] \quad (24)$$

Lettinga G.^[8]通过求解 $A = 20 \text{ m}$, $B = 0.55$, Van der Meer^[9]等人认为 $V_s = 2 \text{ m s}^{-1}$

$$C = C_a \exp\left[-\frac{(V_s - V_w)(y - a)}{Aq^2(1 - e^{-\frac{0.55}{q}})}\right] \quad (25)$$

V_w 是表面负荷;

V_s 是污泥悬浮层中固体粒子的沉降速度;

A 是常数。

5 反应模型的应用举例

本文在实验室中试基础上,通过 UASB 实验处理啤酒厂废水,通过实验小试确定污泥容积负荷为 $10 \sim 15 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$,本试验选为 $11 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$,温度为常温条件下,进水 COD 平均值在 2000 mg L^{-1} 左右, pH 为 $5.5 \sim 6.5$,碱度为 430 mg L^{-1} ,悬浮固体浓度为 $300 \sim 600 \text{ mg L}^{-1}$, BOD_5/COD 为 0.75 ,接种污泥为某城市污水厂厌氧消化污泥,最大产甲烷的速率 $18 \text{ mLCH}_4 \cdot \text{gVSS}^{-1} \text{h}^{-1}$,含水率为 94% , VSS/SS 为 84% , SVI 为 $78 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,最大比 COD 去除率为 $1.37 \text{ kgCOD} \cdot \text{kgVSS}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。启动运行初期均以糖化废水作为实验用水,以后逐渐改用啤酒废水作为实验进水,碱度对厌氧反应器运行相当重要,因上述废水的碱度较低,所以用碳酸钠调配废水碱度,使进水碱度在 $650 \sim 900$ 之间。为了保持进水中 COD N P 比例在 $200 \ 5 \ 1$,配水中配加尿素和磷酸二氢钾,通过 3 个月接种对于 UASB 工艺的启动,试验研究表明可以根据反应器内污泥形成的形态和达到的容积负荷,大致分为启动初期阶段、颗粒污泥出现阶段和颗粒污泥成熟阶段等三个阶段。污泥驯化、颗粒污泥的培养,逐步提高活性污泥负荷,从 $5 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ 负荷,一直提升到污泥负荷为 $11 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ 。经过半年多运行,使 COD 去除率在 $60\% \sim 70\%$ 之间。产气率稳定在 $0.76 (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1})$ 左右。经过电镜观察,颗粒污泥基本形成。电镜图见图 2。反应器其他运行结果见表 1。



图 2 颗粒污泥的电镜图

表 1 反应器的运行条件及试验结果

反应器的体积 / m ³	30
反应器的高度 / m	6
三相分离区的高度 / m	1.1
反应区的高度 / m	4.9
进水 COD 的浓度 / g L ⁻¹	2.0
COD 的去除率 / %	63
容积负荷 / kgCOD m ⁻³ d ⁻¹	11
停留时间 / h	4.4
气体产率 / m ³ m ⁻² h ⁻¹	0.76
污泥床的浓度 / kgSS m ⁻³	80
污泥床的高度 / m	0.88
污泥悬浮层的高度 / m	4.02

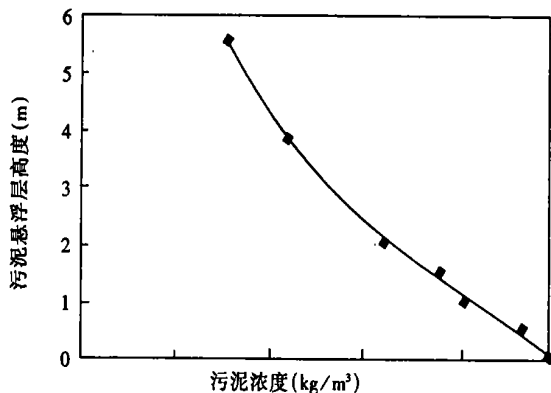


图 3 污泥悬浮层高度与污泥浓度的计算机模拟曲线

通过图 3 可以看出,当 $V_w = 1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $q = 0.76 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 时,当污泥悬浮层浓度 11 g L^{-1} 时,悬浮层高度为 3.92 m ,观察值为 4.02 m ,所建模型估算基本正确。

6 结论

(1) 使用紊流扩散概念代替层流扩散概念可以更精确地反应 UASB 反应器的实际流态;

(2) 从理论上建立污泥悬浮层中污泥沿垂直高度浓度分布数学模型:

$$C = C_0 \exp - \left[\frac{(V_s - V_w)(y - a)}{Aq^2(1 - e^{-\frac{0.55}{q}})^2} \right];$$

(3) 通过使用计算机对上述模型求解可以得到表面负荷从而确定 UASB 反应器结构优化尺寸。

参考文献:

- [1] Borge J J, et al. Anaerobic Treatment of Domestic Waste water in Small Scale UASB Reactors [J]. Wat. Sci. Technol., 1993, 27(9): 75 - 82.
- [2] Bolle W L, et al. Modelling the Liquid Flow in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors [J]. Biotechnol. Bioeng., 1986, 28: 1615 - 1620.
- [3] Van der Meer R R, et al. Anaerobic Treatment of Wastewater the Gas - Liquid - Sludge Separator [J]. J. WPCF, 1982, 54 (11): 1482 - 1492.
- [4] Bolle W. L., An Integral Dynamic Model for the UASB Reactor [J]. Biotechnol. Bioeng., 1986, 28: 1621 - 1636.
- [5] Lettinga G., Anaerobic Treatment of Slaughter House Waste Using a Granular Sludge UASB Reactor [J]. Biolog. Waste., 1987, 21(1), 11 - 28.
- [6] Ielavsky S. An Introduction to Fluvial Hydraulics [M]. 3rd Edition. NY: Dover Publications, 1966.
- [7] Garde R. J., et al. Mechanics of Sediment Transport and Alluvial Stream Problem [M]. Wiley Eastern Limited, 158 - 161.
- [8] Lettinga G., UASB Process Design for Various Types of Wastewater [J]. Wat. Sci. Tech., 1978, 24(8), 87 - 107, 1991.
- [9] Van der Meer R. R. et al., dynamics of Liquid Flow in an Upflow Reactor Used for Anaerobic Treatment of Wastewater [J]. Biotech. Bioeng., 1978, 20, 1577 - 1594.

欢迎订阅 2005 年《中国沼气》

《中国沼气》杂志由农业部主管,中国沼气学会和农业部沼气科学研究所主办,为中国科学引文数据库科技核心期刊。主要报道我国沼气厌氧技术及其在废物处理和生态建设上的研究与新进展,推广沼气、环保、生态建设实用新技术,介绍沼气、沼液、沼渣利用的新方法,探讨沼气建设中的新问题。辟有综述与实验研究、沼气工程、生活污水净化池、户用沼气池、综合利用、管理经验、问题探讨、其他可再生能源等 10 多个栏目。读者主要为从事厌氧技术研究、沼气建设、环保工程、农村能源、卫生土肥等领域的科研、教学人员、管理干部和技术人员等。本刊还承办广告业务,为客户提供产品信息。

本刊为国际大 16 开,季刊,国内外公开发行。订户可到当地邮局办理订阅手续,邮发代号:62 - 164,每期 5.00 元,全年订价 20 元;也可以直接向编辑部邮购。

单位:《中国沼气》编辑部

地址:四川省成都市人民南路四段 13 号

电话(传真):(028) 85230681

E-mail: cbso@mail.sc.cninfo.net

邮编:610041

开户行:成都商业银行人南支行

帐号:15012010206144800017