

厌氧颗粒污泥流化床降解有机物的动力学分析^{*}

王世和

何 炜

(东南大学环境工程系, 南京 210096)

(河北大学生物系, 保定 071002)

摘要 在前人研究的基础上, 运用反应器理论, 建立了厌氧颗粒污泥流化床(AGSFB)反应器内有机物降解的动力学模型。在测定动力学模型参数的基础上, 以大量实验资料验证了模型及其假设的可靠性, 并对反应器效率进行了模拟分析。结果表明, 在本试验条件下的最佳颗粒污泥粒径为 0.82mm, 反应器最佳生物浓度为 50g/L。

关键词 AGSFB 反应器, 颗粒污泥, 动力学分析。

Reaction Kinetics on Anaerobic Granular Sludge Fluidized Bed^{*}

Wang shihe

(Environmental Engineering Department of Southeast University, Nanjing 210096, China)

He Wei

(Biological Department of Hebei University, Boading 071002, China)

Abstract Anaerobic Granular Sludge Fluidized Bed(AGSFB) process was advanced in this paper. Based on the predecessor's research and reactor theory, a kinetic model of organic matter degradation in AGSFB was established. The parameters of the model were determined and the process of organic matter degradation was analysed. The presumptions and results of the kinetics model were proved to be fit by a great deal of experimental materials. And the imitation of the efficiency in AGSFB reactor shows that the optimum radius of granular sludge is 0.82mm and the optimum biomass in reactor is 50g/L.

Keywords AGSFB reactor, granular sludge, kinetics model.

厌氧颗粒污泥流化床(Anaerobic Granular Sludge Fluidized Bed, AGSFB)反应器是综合厌氧流化床良好的混合、外部传质与水力筛分等特性及 UASB 中颗粒污泥特定的生物结构、良好的吸附沉降性能、高生物浓度和高活性的特点, 发展而成的节能、紧凑的新型高效厌氧反应器。本文在文献[1]对其工艺特点及运行效果进行研究的基础上, 按双膜假设, 建立表征颗粒污泥降解有机物的动力学模型及床层综合处理模型, 并对反应器效率进行模拟分析, 以便深入理解反应器降解有机物的动力学机理, 并为反应器的开发及深入研究建立理论基础。

1 动力学模型的建立

1.1 建模假设

①AGSFB 在稳态下运行; ②AGSFB 中的生物相主要为双膜球状颗粒污泥, 且各层内的微生物特性、有机物有效扩散系数等均均匀一致; ③不考虑床高影响, AGSFB 中颗粒污泥粒径在全反应器内均匀一致; ④反应器中不存在基质积累, 进水中不含微生物, 进出水中基质均为溶解性有机物; ⑤床层整体为推流, 局部为完全混合流。

1.2 模型推导

1.2.1 双膜模型

按照有机物厌氧降解的两阶段说^[2], 假想

^{*} 国家自然科学基金资助项目(Project Supported by the National Natural Science Foundation of China): 59178329
王世和: 男, 52 岁, 硕士, 教授, 主要研究方向为水污染控制工程。
收稿日期: 1999-01-11

单个颗粒污泥为内外层分别为产甲烷层和产酸层组成的双层球体(图 1). 有机物首先进入产酸层进行酸化, 继而酸化产物进入内层产甲烷菌层被降解并转化为 CH_4 和 CO_2 .

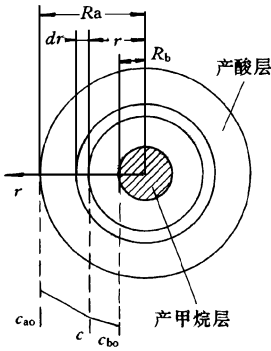


图 1 颗粒污泥简化模式图

(1) 产酸层基质转化 设颗粒污泥半径为 R_a , 产甲烷层半径为 R_b , 则产酸层为半径 R_b 和 R_a 间的球壳, 从中取厚度为 dr 的球壳微元体积, 建立基质物料平衡方程:

$$D_{el} \left(\frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} dr \right) 4\pi(r + dr)^2 = \frac{\partial c}{\partial t} + D_{el} \frac{\partial c}{\partial r} 4\pi r^2 + i \cdot 4\pi r^2 \cdot dr \quad (1)$$

式中, D_{el} 为产酸层基质有效扩散系数, i 为产酸层基质降解速率. 稳态条件下 $\partial c / \partial t = 0$, 由米-门方程, 产酸菌对基质的转化速率为:

$$i = \rho_a \frac{q_{max} c}{K_{ca} + c} \approx \rho_a \frac{q_{max} c}{K_{ca}} = \rho_a K_a c \quad (c \ll K_{ca} \text{ 时})$$

式中, ρ_a 为产酸层生物密度, K_a 为产酸层基质降解动力学系数, $K_a = q_{max} / K_{ca}$, 对 (1) 式整理并略去高阶无穷小量得:

$$D_{el} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) = \rho_a K_a c \quad (2)$$

以 $\bar{c} = c / c_{a0}$, $R = r / R_a$ 对 (2) 式进行无量纲化得:

$$\frac{d^2 \bar{c}}{dR^2} + \frac{2}{R} \frac{d\bar{c}}{dR} = \frac{K_a \rho_a}{D_{el}} R_a^2 \bar{c} \quad (3)$$

相应的边界条件为: $\bar{c} \Big|_{R=1} = 1$, $\frac{d\bar{c}}{dR} \Big|_{R=\frac{R_b}{R_a}} = 0$. 于是, 求解式 (3) 得:

$$\bar{c} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\text{sh} \left[b_a \left(R - \frac{R_b}{R_a} \right) \right] + b_a \frac{R_b}{R_a} \text{ch} \left[b_a \left(R - \frac{R_b}{R_a} \right) \right]}{\text{sh} \left[b_a \left(1 - \frac{R_b}{R_a} \right) \right] + b_a \frac{R_b}{R_a} \text{ch} \left[b_a \left(1 - \frac{R_b}{R_a} \right) \right]}$$

$$\text{其中, } b_a = \frac{\rho_a K_a}{D_{el}} R_a \quad (4)$$

(2) 产甲烷层基质降解 由稳态条件下产甲烷层球壳微元体积的物料平衡关系, 并以 $\bar{c} = c / c_{b0}$, $R = r / R_a$ 进行无量纲化得:

$$\frac{d^2 \bar{c}}{dR^2} + \frac{2}{R} \frac{d\bar{c}}{dR} = \frac{K_b \rho_b}{D_{e2}} R_b^2 \bar{c} \quad (5)$$

在 $\bar{c} \Big|_{R=\frac{R_b}{R_a}} = 1$, $\bar{c} \Big|_{R=0} = 0$ 的边界条件下求解上式, 可得产甲烷层基质无量纲浓度分布:

$$\bar{c} = \frac{1}{R} \frac{\text{sh}(b_b R)}{\text{sh}(b_b R_b / R_a)} \frac{R_b}{R_a} \quad (6)$$

$$(\text{其中 } b_b = \rho_b K_b / D_{e2} R_b)$$

(3) 综合基质降解方程 以乙酸表示产酸层转化基质形成的有机酸, 根据化学计量平衡方程, 由 $R = R_b / R_a$ 处的基质浓度求得乙酸浓度. 由上可得颗粒污泥内有机物浓度分布:

$$\bar{c} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\text{sh} \left[b_a \left(R - \frac{R_b}{R_a} \right) \right] + b_a \frac{R_b}{R_a} \text{ch} \left[b_a \left(R - \frac{R_b}{R_a} \right) \right]}{\text{sh} \left[b_a \left(1 - \frac{R_b}{R_a} \right) \right] + b_a \frac{R_b}{R_a} \text{ch} \left[b_a \left(1 - \frac{R_b}{R_a} \right) \right]}$$

$$(R_b / R_a \leq R < 1)$$

$$\bar{c} = \frac{1}{R} \frac{\text{sh}(b_b R)}{\text{sh}(b_b R_b / R_a)} \frac{R_b}{R_a} \quad (0 < R < R_b / R_a) \quad (7)$$

1. 2. 2 床层综合处理模型

按推流假设建立 AGSFB 反应器中轴向微元体内的物料平衡方程:

$$A dz \frac{\partial c}{\partial t} = Q c_z - Q c_{z+\Delta z} - A dz \cdot a \cdot D_{el} \frac{\partial c}{\partial r} \Big|_{r=R_a} \quad (8)$$

式中, A 为床层截面积, Q 为进水流量, a 为单位反应器体积中颗粒污泥的表面积. 稳态时 $\partial c / \partial t = 0$, 则 $Q dc_z = - A dz \cdot a \cdot D_{el} \frac{dc}{dr} \Big|_{r=R_a}$. 由颗粒污泥密度 ρ (干密度/湿体积) 及生物浓度 X , 根据床层空隙率可得 $a = 3X / (\rho R_a)$, 并推导得:

$$\frac{dc}{dr} \Big|_{r=R_a} = \frac{c_{a0}}{R_a} \frac{d\bar{c}}{dR} \Big|_{r=R_a}$$

= \frac{c_{a0}}{R_a} \left[\frac{b_a R_b \ln(b_a - b_a \frac{R_b}{R_a}) + R_a}{b_a R_b + R_a \ln(b_a - b_a \frac{R_b}{R_a})} - 1 \right] \quad (9)

设 f_a = b_a \frac{b_a R_b \ln(b_a - b_a \frac{R_b}{R_a}) + R_a}{b_a R_b + R_a \ln(b_a - b_a \frac{R_b}{R_a})} - 1, 则式(8)

可改写成 Qdcz = -A \frac{3X}{\rho R_a} D_{el} \frac{c_z}{R_a} f_a dz, 积分得:

c_{eff} = c_{inf} \exp(-\frac{3AXf_a D_{el}}{\rho R_a^2 Q} H)

= c_{inf} \exp(-\frac{3Xf_a D_{el}}{\rho R_a^2} \theta) \quad (10)

2 试验概况

AGSFB 试验装置流程见图2. 反应器本体以有机玻璃管制成, 有效段高为 100cm, 内径 10cm, 有效容积 7.85L, 沿床高设 6 处采样口. 底部以多孔管均匀布水, 顶部设三相分离装置(直径 40cm, 高 50cm). 采用葡萄糖人工配制废水. 试验在中温 35 条件下进行. 主要测定指标: COD、生物浓度、颗粒污泥粒径、污泥密度, 此外还对动力学参数 K_a, K_b 等进行了测定和分析.

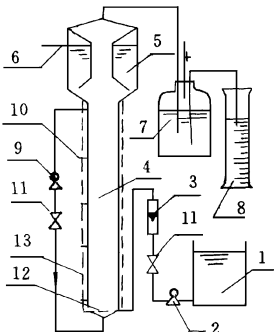


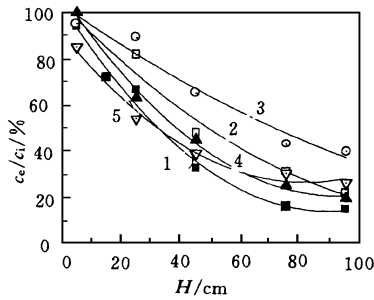
图2 AGSFB 试验装置流程图

3 动力学模型验证

3.1 假设验证

由不同床高处基质浓度与进水浓度之比 c_e/c_i 的变化规律(图3)可见, 尽管反应器运行

状态不同, 但与床高基本呈指数变化关系, 说明 AGSFB 流态在局部表现为完全混合, 但总体上仍为推流, 从而证明了本文对流态的假设是可行的.



1. X = 25.79g/L Q = 9801ml/h R_a = 0.039cm
2. X = 32.87g/L Q = 2090ml/h R_a = 0.049cm
3. X = 30.15g/L Q = 2180ml/h R_a = 0.049cm
4. X = 30.15g/L Q = 1120ml/h R_a = 0.045cm
5. X = 32.89g/L Q = 1400ml/h R_a = 0.054cm

图3 c_e/c_i 沿床高的变化曲线

3.2 模型结果验证

模型结果验证分不同运行状况下有机物去除效果的验证和床层模型结果的验证(图4、5)2部分(动力学模型参数及其来源如表1所示).

表1 模型参数

参 数	数 值	数 据 来 源
D _{e1}	0.0066cm ² · h ⁻¹	Yu & Pinder ^[3]
D _{e2}	0.0180cm ² · h ⁻¹	International Critical Tables
K _a	0.1176L · (g · h) ⁻¹	本文实测
K _b	0.0084L · (g · h) ⁻¹	本文实测
ρ _a = ρ _b = ρ	1.071 × 10 ³ g · L ⁻¹	本文实测
R _b	变化	本文实测
R _a	R _b = 0.7769R _a	本文推算
X	变化	本文实测
A	78.5cm ²	本文实测

由实测数据的分布规律看, 指数函数能很好地逼近测定结果, 因此本文采用指数函数进行曲线拟合(平均相关系数分别为 0.93 和 0.96). 由模型预测曲线与试验实测结果的指数拟合曲线比较可见, 试验结果与模型预测值吻合良好, 由此说明, 本文建立的 AGSFB 反应器基质降解模型能较好地反映反应器的运行规律. 但同时也发现, 在停留时间较长时, 模型预测值明显高于实测值. 分析偏差, 其原因主要包括: ①试

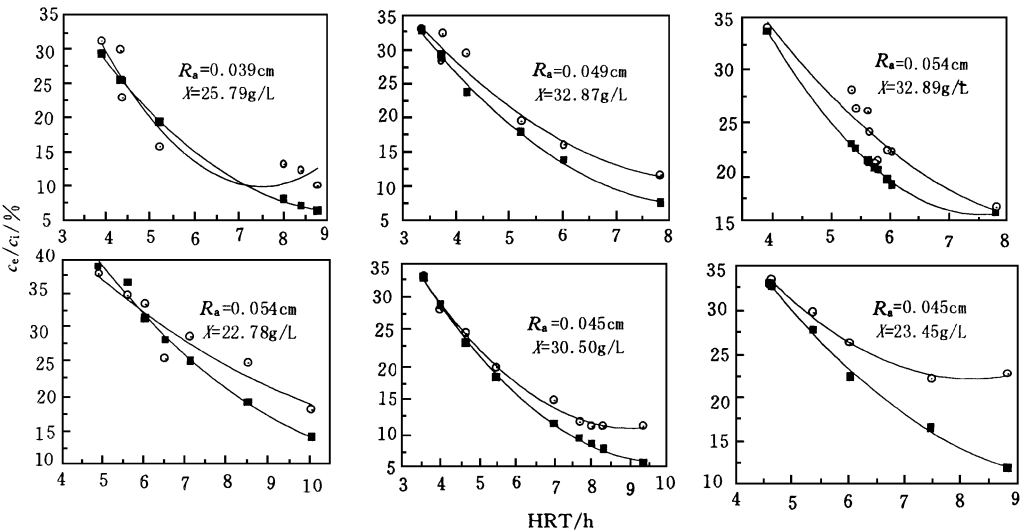


图 4 有机物降解模型验证

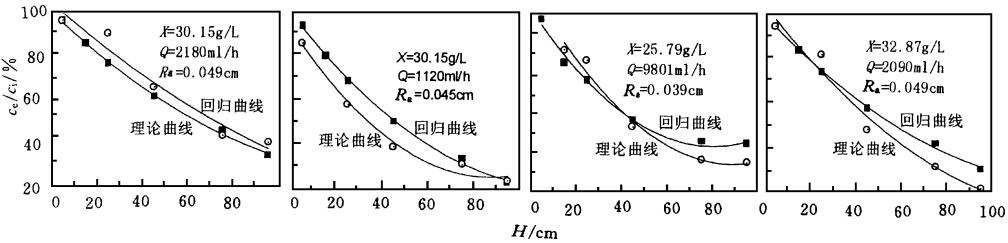


图 5 有机物去除床层综合处理模型验证

验测定存在的偶然误差影响理论模型的计算结果;②运行状态划分的主观性;③模型建立时一系列简化和假设与真实情况之间的差异.

4 反应器模拟分析

4.1 颗粒污泥内基质浓度分布

根据综合基质降解方程(式7),绘制颗粒污泥内葡萄糖及乙酸浓度分布曲线(图6),其中右侧为颗粒污泥产酸层基质(葡萄糖)浓度的径向分布曲线,左侧为产甲烷层基质(乙酸)浓度的径向分布曲线.可见,当颗粒污泥粒径 $R_a < 0.01 \text{ cm}$ 时,2组基质浓度分布曲线均趋于扁平,即产酸层与液相主体中的葡萄糖浓度梯度及产甲烷层内部与产甲烷层表面乙酸浓度梯度均接近于0,底物在颗粒污泥内传质阻力极小.而随污泥粒径增大,基质浓度梯度加大,传质阻力也加大,且产酸层中的传质阻力大于产甲

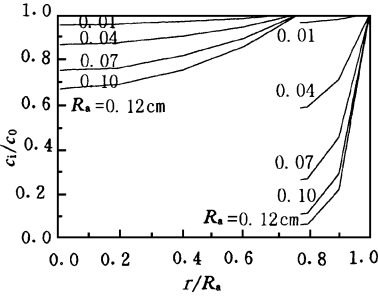


图 6 颗粒污泥内基质浓度分布

烷层. 传质阻力增大,无疑会降低有机物的降解速率,但与此同时,也避免或大大降低了高浓度有机物及限制物对厌氧微生物(特别是产甲烷菌)的冲击,这对厌氧反应器的稳定运行是有利的.因此,成熟高效的颗粒污泥应该具有一定大小的粒径.

4.2 影响反应器效率的因素

根据基质降解的床层综合处理模型(式

10), 绘制相同颗粒污泥粒径下反应器中生物浓度与基质降解效率间的关系(图 7). 由图 7 可见, 随反应器停留时间的增长, 有机物去除率提高, 生物浓度越高, 反应器的有机物去除率越高. 但当生物浓度 $X > 60\text{g/L}$ 时, 因颗粒污泥与基质间的混合不充分影响到传质效果, 因此, 继续提高生物浓度对反应器效率的提高作用甚微. 由模型模拟结果可知, 在反应器平均生物浓度为 50g/L 时, 水力停留时间(HRT)缩短为 5h , 反应器的去除率仍可达到 90% 以上, 而当 HRT 较长时, 即使稍低的生物浓度也可获得较好的去除效果. 图 8 为污泥浓度 $X = 50\text{g/L}$ 时颗粒污泥半径与基质降解效率之间的关系曲线. 可见, 在污泥浓度相同时, 颗粒污泥半径 $R_a < 0.04\text{cm}$ 时的反应器效率较高, 随着污泥粒径增大, 相同停留时间下反应器有机物去除率下降. 分析表明, 随着颗粒污泥粒径的增大, 内传质阻力也随之增大, 并逐渐成为限制因素, 导致内层污泥活性下降, 影响了反应器对基质的去除. 在 $R_a < 0.10\text{cm}$ 时, 基质去除率随 HRT 的增长而迅速提高, 而当 $R_a > 0.12\text{cm}$ 以后, 基质去除率变化较缓慢. 综合考虑反应器基质去除率和处理能力, 颗粒污泥粒径不宜过小. 本文对 R_a 与 f_a 关系的分析进一步证明, $R_a = 0.82\text{cm}$ 时, 反应器的基质去除率最高. 因此可

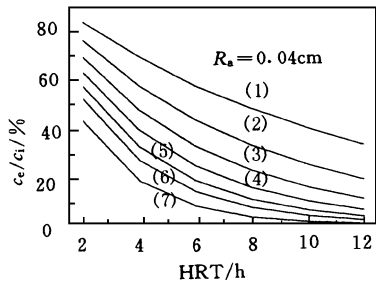


图 7 X - c_e/c_i 关系曲线

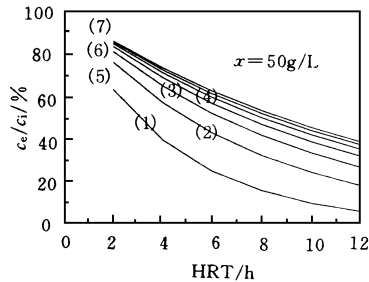


图 8 R_a - c_e/c_i 关系图

以认为, 本试验条件下颗粒污泥的最佳粒径为 0.82mm . 此时, 传质阻力对去除率的影响较小, 污泥具有较稳定的降解能力. 同时, 一定粒径的颗粒污泥, 可对环境变化具有较强的耐受能力, 从而有效地保证反应器的正常运行.

5 结论

在对 AGSFB 反应器流态及有机物降解机理分析的基础上, 按双模假设建立了表征颗粒污泥降解有机物的动力学模型及床层综合处理模型. 大量试验资料验证了动力学模型的可靠性和精度; 以动力学模型对 AGSFB 反应器处理效果进行模拟, 结果表明, 颗粒污泥粒径越小, 基质浓度梯度越小, 传质阻力越小, 基质去除率越高; 随反应器中生物浓度增加, 停留时间延长, 反应器基质去除率也提高. 本试验条件下, 颗粒污泥粒径的最佳值为 0.82mm , 反应器中的最佳生物浓度为 50g/L .

参 考 文 献

- 1 王世和, 何炜, 吴慧芳. 厌氧颗粒污泥流化床处理有机废水的运行特性. 东南大学学报, 1998, 28(2): 82~88
- 2 张自杰等. 水处理工程理论与应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. 287~290
- 3 Yu Pinder. Diffusivities of Volatile Fatty Acides in Methanogenic Biofilm. Biosource Technology, 1994, 48: 155