

空气提升内循环生物流化床反应器动力学研究

周 平 钱 易

(清华大学环境工程系 北京 100084)
(环境模拟与污染控制国家重点联合实验室)

摘要 进行了空气提升内循环生物流化床反应器内液体内循环速度、有机物降解动力学、载体表面生物膜脱落与增长动力学的研究。结果表明,内循环生物流化床内循环速度分别与反应器高度及升流区表观气速 u_g 的 0.5 次方成正比;当内循环流量很大时,反应器可视为 CSTR;生物膜的脱落率分别与 u_g 及膜厚 δ 的一次方、载体数量的 2/3 次方成正比。

关键词 空气提升内循环生物流化床;内循环速度;有机物降解动力学;因次分析;脱膜动力学。

空气提升内循环生物流化床反应器(Airlift Biofilm Suspension Reactor)内填充有惰性载体以供微生物附着生长,当在升流区进行曝气充氧时,由于升流区和降流区之间的密度差,使废水、载体及气泡在升流区和降流区之间循环流动,载体表面的微生物与废水充分接触,完成对有机物的降解作用。空气提升内循环生物流化床在保持了传统三相流化床所具有的传质速率快、污泥浓度大、有机物负荷高等优点的同时,新的特点为:①可以控制生物膜厚度;②载体流失量少;③载体流化性能好;④氧的转移效率高;⑤放大设计较为容易。本文介绍对这种新型废水生物处理反应器的动力学研究。

1 试验装置及材料

试验装置流程如图 1 所示。采用 3 个不同结构的空气提升内循环生物流化床,分别称为 R_1 、 R_2 、 R_3 ,其中心管直径 D_i 、反应器外径 D_d 、有效高度 H ,如表 1 所示。3 个反应器均为有机玻璃制成,采用粒径为 0.5—0.71 mm 的陶粒作为载体,试验所用废水为生活污水。

2 液体内循环速度

液体在反应器内循环流动是空气提升内循环生物流化床反应器的一个重要特征,内循环

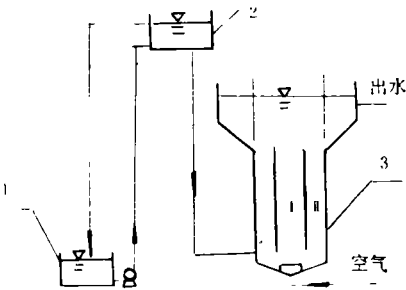


图 1 试验装置流程图

1. 储水箱 2. 恒水位水箱
3. 流化床反应器 I. 升流区 II. 降流区

表 1 试验所用反应器尺寸/m

流化床	D_i	D_d	H
R_1	0.07	0.15	0.95
R_2	0.10	0.15	0.95
R_3	0.10	0.15	1.90

速度则是反应器设计和放大的一个重要参数。在气、液、固三相系统中要对液体速度进行精确的测定比较困难,国内外的研究者^[1, 2]一般采用间接测量的方法进行非精确的测定。在本试验中,经观察发现在降流管中总有一些平均位移为零的气泡,这是因为降流管的水流向下,而气泡的浮升速度向上,当循环水流速度与气

泡的浮升速度相等时, 气泡可在短时间内达到动态平衡, 其平均位移为零. 故只要测得这些气泡的直径就可利用有关的公式求其浮升速度, 即此时的液体内循环速度. 在气、液、固三相反应器中, 气泡的浮升速度可根据戴维斯-泰勒公式^[3]计算: $u_b = 0.711 \sqrt{gd_b}$ (1)

式中, g : 重力加速度 (9800 mm/s^2), d_b : 气泡直径 (mm).

按式(1)计算出的气泡浮升速度即等于降流区的流速 u_d .

图 2 为不同升流区表观气速 u_g 及载体浓度 c_s 条件下, R_1 、 R_2 、 R_3 反应器液体内循环速度, 其中, u_g 为供气量 Q_g 与升流区截面积 A_r 之比. 由图 2 可见, 液体内循环速度随 u_g 的增大而增大, 随载体浓度的增加而减小, 这是因为载体浓度增加, 则需消耗较多的动量以维持载体的运动, 故液体循环速度下降. 由图 2 还可看出, 在 3 个反应器中, 当 u_g 相同时, R_3 的循环速度

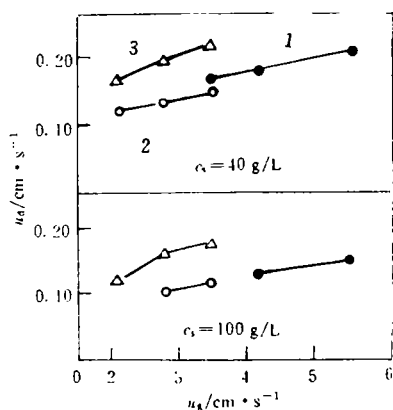


图 2 u_g 及 c_s 对内循环速度的影响

1. R_1 2. R_2 3. R_3

最大, 即反应器越高, 循环推动力越大, 从而循环速度越大. 此外 R_1 的循环速度比 R_2 快, 但其差别不大, 这里再一次表明反应器高度是影响内循环速度的重要因素, 而升流管直径对其影响要小得多. 当载体浓度增大时, R_1 与 R_2 循环速度的差别有减小的趋势. 在空气提升内循环生物流化床中, 升流区气、液、固混合十分剧烈, 大量的液体在升流区和降流区之间不断的循环流动, 因此整个反应器内的液体受到良好

的混合作用. 从内循环速度和降流管截面积即可求出内循环流量, 如在 R_3 反应器中, 当 u_g 为 3.5 cm/s , 载体浓度为 100 g/L 时, u_d 为 0.17 m/s , 则循环流量为 80 L/min , 若反应器的 HRT 为 1 h , 则循环流量是进水流量的 145 倍, 可见, 内循环流化床具有极大的稀释扩散能力, 从而具有很强的抗冲击负荷能力.

对于不同的反应器系统, 废水的内循环速度由于反应器的结构、载体浓度的不同而有很大的差异, 故不同的反应器系统其内循环速度与表观上升气速之间的关系不同. 但如果考虑到液体循环流动的惯性力与重力之比, 此比值称为弗汝德数 F_r : $F_r = \frac{u_d}{\sqrt{gH}}$ (2)

式中, H : 反应器高度 (m).

将式(2)整理成 F_r-u_g 关系图(图 3). 由图 3 可见, F_r 与 u_g 的关系符合:

$$F_r = f(c_s) u_g^n \quad (3)$$

经整理可得:

$$F_r = 0.0314 u_g^{0.496} \quad (c_s = 0 \text{ g/L 时})$$

$$F_r = 0.0257 u_g^{0.513} \quad (c_s = 40 \text{ g/L 时})$$

$$F_r = 0.020 u_g^{0.517} \quad (c_s = 100 \text{ g/L 时})$$

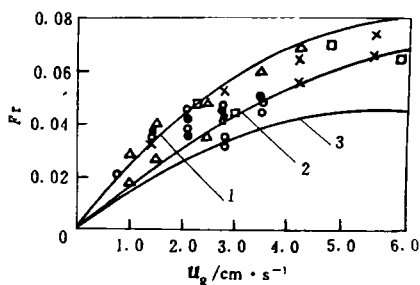


图 3 F_r-u_g 关系

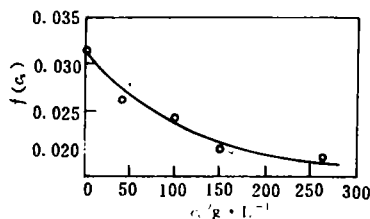
● $H=1.9 \text{ m}$, $D_r=0.1 \text{ m}$ ○ $H=0.95 \text{ m}$, $D_r=0.1 \text{ m}$

× $H=0.9 \text{ m}$, $D_r=0.07 \text{ m}$ □ $H=11 \text{ m}$ ^[4]

△ $H=19 \text{ m}$, $D_r=3.1 \text{ m}$ ^[4]

1. $c_s = 0 \text{ g/L}$ 2. $c_s = 40 \text{ g/L}$ 3. $c_s = 100 \text{ g/L}$

由此可见, $f(c_s)$ 随 c_s 的增加而下降, 而指数 n 变化不大, 约为 0.5. 根据 Heijnen 等人^[4]的试验结果, 绘出了不同 c_s 时 $f(c_s)$ 的曲线, 如图 4 所示. 经过曲线拟合, 可得出 $f(c_s)$ 与 c_s 的关系:

图4 $f(c_s)$ - c_s 关系

$$f(c_s) = 0.0314 \left[1 + \frac{c_s}{163} \right]^{-0.69} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中可得:

$$F_r = 0.0314 \left[1 + \frac{c_s}{163} \right]^{-0.69} u_g^{0.5} \quad (5)$$

$$\text{即 } u_d = 0.0314 \left[1 + \frac{c_s}{163} \right]^{-0.69} u_g^{0.5} \sqrt{gH} \quad (6)$$

笔者以往的研究^[5]表明,在内循环生物流化床中,经理论推导可得:

$$K_1 Q_g = \frac{1}{H} \cdot \frac{u_r^2}{2g} \left[\sum \zeta_i + 1 - \frac{A_r^2}{A_d^2} \right] \quad (7)$$

式中 K_1 为常数, u_r 为液体在升流区的速度, $\sum \zeta_i$ 为阻力损失系数之和, A_r 和 A_d 分别为升流区与降流区的截面积. 考虑到 $Q_g = u_g A_r$, $u_r A_r = u_d A_d$, 代入式(7)并整理可得:

$$u_d = \left[\frac{2K_1 A_r}{\left(\frac{A_d}{A_r} \right)^2 \sum \zeta_i + \left(\frac{A_d}{A_r} \right)^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{u_g gH} \quad (8)$$

可以发现(8)式与经验公式(6)在形式上极为相似. 即内循环速度与反应器的高度及升流区表观气速的平方根成正比, 它进一步证明了式(6)的合理性.

3 有机物降解动力学

研究结果表明*, 空气提升内循环生物流化床反应器升流区和降流区的氧传质及生物浓度存在着差异, 在建立有机物降解的动力学模型时, 可将升流区和降流区看成 2 个 CSTR, 其模式如图 5 所示

假定有机物的降解速率对生物浓度和有机物浓度均为一级反应, 且升流区和降流区的有机物降解动力学系数相同, 可分别对升流区和降流区建立有机物的物料平衡:

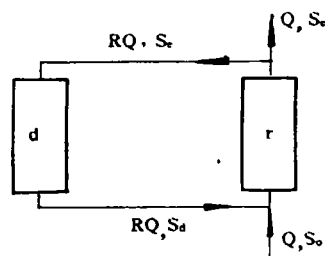


图5 内循环流化床反应器模式

升流区

$$r: QS_o + RQS_d = (Q + RQ)S_e + KX_r V_r S_e \quad (9a)$$

降流区 d:

$$ROS_e = RQS_d + KX_d V_d S_d \quad (9b)$$

式中, RQ : 内循环流量(m^3/d), $RQ = A_d u_d$; K : 有机物降解的动力学系数($m^3/kg \cdot d$); Q : 进水流速(m^3/d); X : 生物浓度(g/L); V : 体积(m^3); S : 有机物浓度, 以 COD 计(mg/L).

下标 r 、 d 分别代表升流区和降流区, o 、 e 分别代表进水和出水.

由式(9a)、(9b)经整理可得:

$$QS_o = \left[Q + KX_r V_r + \frac{KX_d V_d}{1 + KX_d V_d / RQ} \right] S_e \quad (10)$$

由(10)式可见, 循环流量 RQ 增大, 可使得出水有机物浓度 S_e 减小, 而增大反应器高度将提高循环流量, 因此高度较大的反应器有利于提高有机物的去除效果. $RQ=80 L/min$ 时, R_3 反应器的运行结果与根据式(10)计算所得出的理论值的比较见图 6, 图中实线为理论值, 圆点为多次试验结果的平均值, 横坐标 $HRT = (V_r + V_d)/Q$. 试验结果与模型预测结果吻合良好.

当循环流量 RQ 很大时, 式(10)可简化成:

$$QS_o = (Q + KX_r V_r + KX_d V_d) S_e \quad (11)$$

令 $X_r V_r + X_d V_d = XV$, 其中 X 为反应器内的平均生物浓度, 则式(11)可写成:

$$S_e = \frac{S_o}{1 + KX\theta} \quad (12)$$

* 周平. 内循环生物流化床反应器机理及技术的研究. 清华大学博士学位论文, 1996

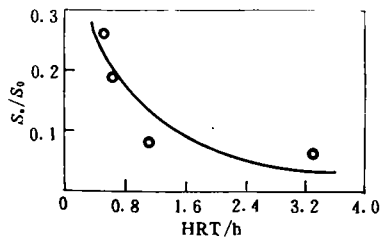


图6 反应器模型的验证

式中, $\theta = V/Q$, 此即为完全混合反应器(CSTR)的有机物降解模型, 由此可见, 当内循环流量很大时, 内循环三相生物流化床反应器即可视为 CSTR.

4 生物膜增长与脱落动力学

生物膜的生长率 R_g 可用式(13)表示如下:

$$R_g = YV N_V \quad (13)$$

式中, Y : 产率系数(kgSS/kgCOD); V : 反应器体积(m^3); N_V : 去除容积负荷($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$).

生物膜的衰减速率 R_d 包括: 由于微生物内源呼吸而消耗的速率; 生物膜的脱落速率. 生物膜内源呼吸速率与反应器中的生物量 VX 成正比, 而生物膜脱落速率与升流区表观气速 u_g 、生物膜厚 δ 、单位体积反应器中的载体数 n 有关, 故 R_d 可表示成:

$$R_d = k_2 u_g^a \delta^b n^c VX \quad (14)$$

式中 $n = c_s / (\rho_s 4/3 \pi r_m^3)$, ρ_s 、 r_m 分别为载体的真密度与平均径, k_2 为常数, a 、 b 、 c 为待定系数.

可用量纲分析法来确定 a 、 b 、 c . R_d 的量纲为 MT^{-1} , u_g 量纲为 LT^{-1} , δ 量纲为 L , n 量纲为 L^{-3} , V 量纲为 L^3 , X 量纲为 ML^{-3} . 式(14)的量纲方程为:

$$\text{MT}^{-1} = [\text{LT}^{-1}]^a [\text{L}]^b [\text{L}^{-3}]^c \text{L}^3 \text{ML}^{-3}$$

根据等式两边量纲和谐原理, 可得:

$$\begin{cases} a = 1 \\ a + b - 3c = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(14)可写成:

$$R_d = k_2 u_g \delta^{3c-1} n^c VX \quad (16)$$

在稳态下 $R_g = R_d$, 故可得:

$$YV N_V = k_2 u_g \delta^{3c-1} n^c VX \quad (17)$$

式(17)两边取对数并整理可得:

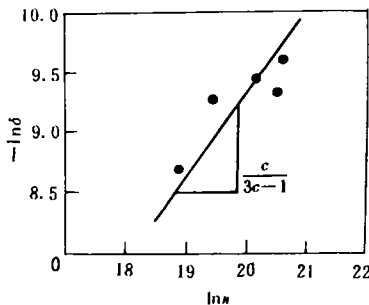
$$-\ln \delta = \frac{-1}{3c-1} \ln \frac{Y N_V}{k_2 u_g X} + \frac{c}{3c-1} \ln n \quad (18)$$

式中 δ 的单位为 m , n 的单位为 m^{-3} .

在稳态下作 $\ln n - \ln \delta$ 图(如图7所示), 可求得直线的斜率 $\frac{c}{3c-1} = 0.7$ (相关系数为 0.874), 即 $c = 0.64$, 由式(15)可求得 $b = 0.92$. 由于 δ 的指数 b 为 0.92, 极其接近 1, 考虑到试验的误差, 即可认为 $b = 1$, 从而 $c = 2/3$. 故生物膜的衰减速率可写成:

$$R_d = k_2 u_g \delta n^{2/3} VX \quad (19)$$

即 R_d 与 u_g 及 δ 的一次方成正比, 与 n 的 $2/3$ 次方成正比.

图7 待定系数 c 的求解

5 结论

(1) 空气提升内循环生物流化床反应器液体内循环速度分别与升流区表观气速及反应器高度的 0.5 次方成正比, 随载体浓度的增加而减少.

(2) 反应器内的循环流动有助于提高抗冲击负荷能力.

(3) 当内循环流量很大时空气提升内循环生物流化床可视为 CSTR.

(4) 生物膜的脱落率分别与升流区表观气速及生物膜的一次方、载体数量的 $2/3$ 次方成正比.

参 考 文 献

- Milan Popovic et al.. Biotech. Bioeng., 1988, 32: 301
- Chistl M Y et al.. Chemical Engineering Science, 1988, 43 (3): 451
- 哈里森, 戴维森. 流态化. 北京: 科学出版社, 1981
- Heijnen J J et al.. Wat. Sci. Tech., 1991, 23: 1427
- 周平, 钱易. 环境科学, 1995, 16(2): 88

Isolation of Bacteria for Degradation Benzene Homologue under Aerobic Condition. Lu Jun, Wang Jusi et al. (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 1—4

In order to sift for bacteria of degrading benzene homologue compounds, 25 strains degrading toluene, ethylbenzene, o-, m- and p-xylene and trimethylbenzene were isolated by selective enrichment from activated sludges of petrochemical and municipal wastewater treatment plants. The strain species are able to degrade the benzene homologue compounds as the sole source of carbon and energy. The results indicated that most of the 25 strains have strong capability of biodegrading benzene homologue compounds under aerobic condition.

Key words: benzene homologue compounds, aerobic degradation, bacteria, isolation.

Analysis of Economic Loss from Ecological Deterioration in Typical Ecological Regions and Division Districts of China. Wang Junsan and Cai Xinde (South China Institute of Environmental Sciences, NEPA, Guangzhou 510655); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 5—8

In Order to find out that the expressing situation of various ecological environmental deterioration during the process of economic development at present in China and assessing comprehensively the ecological environmental impact which was made by mankind activities, the method of quantitative and semi-quantitative conversion was applied. The economic loss from ecological deterioration of including Guangdong, Hainan etc. 11 provinces and regions was analyzed and evaluated. Based on the analytic results, the interrelation model and the diagnosis model about economic loss of 11 provinces and regions have been established. The interrelation model and parameters of assessing economic loss can be applied in the similar conditions of ecological environmental and economic development intensity. The economic loss of some regions can be evaluated using the diagnosis model and the amount of various ecological deterioration. The division districts of ecological deterioration of whole country have been made. The basic situation of various districts of ecological deterioration and the distributional characteristics which include the serious deterioration areas and the intensity deterioration areas have been summed up. The proportion of various ecological deterioration areas to national land areas have been calculated.

Key words: ecological deterioration, economic loss, region districts, interrelation model, diagnosis model.

Study on Kinetics of Biofilm Suspension Reactor. Zhou Ping and Qian Yi (Dept. of Environ. Eng. Tsinghua University, Beijing 100084); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 9—12

Study on the liquid circulation velocity, organic matter degradation kinetics and biofilm detachment rate in airlift biofilm suspension reactor was conducted. The results showed that the inner circulation velocity is proportional to the reactor height and the 0.5 power of the superficial gas velocity in the riser. The reactor can be treated as CSTR when inner circulation flux is high. The biofilm detachment rate is proportional to the first power of superficial gas velocity in riser and the biofilm thickness and the 2/3 power of carrier quantity in reactor, respectively. **Key words:** airlift biofilm suspension reactor, inner circulation velocity, organic matter degradation kinetics, dimensional analysis, biofilm detachment rate.

Two-Phase Anaerobic Digestion of Water Hyacinth Pretreated with Dilute Sulphuric Acid. Zhou Yuexi et al. (Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing, 100012); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 13—16

In this paper, diphasic fermentation of water hyacinth pretreated with dilute sulphuric acid was studied. Experimental results demonstrated that specific biogas yield of 134 litre per kilogram fresh water hyacinth was obtained with methane content of biogas about 75.1%. Effluent COD_{Cr}, SS were less than 320 mg/L, 40 mg/L respectively. And microbiological mechanism was also studied.

Key words: water hyacinth, pretreat, two-phase, anaerobic.

Study on Biodegradation of Nonionic Surfactant by Bacteria. Lin Li and Huifeng Yang (Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080), Xia Xinghui and Xu Jialin (Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875); *Chin. J. Environ. Sci.*, 17(6), 1996, pp. 17—20

Two strains isolated from soil contaminated by petroleum chemicals, *Pseudomonas* sp. strain 52 and *Weeksella* sp. strain 6 could utilize nonionic surfactants (AEO-9 and SA-20) as sole source of carbon for growth. The experiment results showed that the optimum source of nitrogen was ammonium acetate, the optimum pH and temperature for the degradation were 7.0 and 30°C. It was found that addition of glucose enhanced biodegradation of AEO-9. With the initial concentration of 5 000 mg/L the growth cells of the two strains had an AEO-9 removal efficiency of 85% and 95% within 2 weeks or 4 weeks, respectively. The biodegradation rate of AEO-9, in the same initial concentration, by resting cells of strain 52 was 60% within 6.5 hours under the optimum degradation condition in which pH, temperature and cell density (wet weight/volume) was 7.0, 30°C and 20%, respectively.

Key words: *Pseudomonas* sp. 52, *Weeksella* sp. 6, nonionic surfactant, biodegradation.

The Influence of Extra Gases in Degradation of CF₂ClBr