

上流式厌氧污泥床滤层反应器 基质降解动力学模型探讨

孙慧修 周琪

摘要 本文运用生物化学理论基础和化学反应器理论,对上流式厌氧污泥床滤层反应器处理啤酒废水的过程进行了研究,提出了填料表面比基质去除率和污泥床体积比基质去除率的概念,建立了形式为 $U = \frac{U_{max}S}{K+S}$ 的厌氧处理有机废水动力学模型,并利用反应器试验装置测定了处理啤酒废水的动力学参数。

关键词 比基质去除率,动力学,厌氧污泥床滤层反应器,啤酒废水, Monod 模式

上流式厌氧污泥床滤层反应器是一种新型的混合式反应器。该反应器由下部污泥床和上部滤层,气室组成,它综合了上流式厌氧污泥床反应器和厌氧滤池的优点,充分发挥了污泥床保留生物量大,成熟后的球形颗粒污泥去除COD效率高,滤层截污能力强,生物相丰富,减少污泥流失等主要作用。它不设三相分离器,部分填装填料,因而结构简单,有效反应容积大,不易堵塞和短流,并提供了采用轻质、高效填料的可能性。研究表明,该反应器有机容积负荷可达25gCOD/l·d以上。

目前国内外对该反应器还处于研究阶段。本文作者利用啤酒废水作为基质,运用微生物过程反应动力学和化学反应器的理论,对其基质降解动力学进行了探讨,推导出一种新的、较简单的反应器动力学模式。

1 动力学模式的推导

图1是上流式厌氧污泥床滤层反应器原理图。图中可见,该反应器为下部污泥床和上部滤层串联。R·Samson等人曾对该反应器流态进行了研究,指出上流式厌氧污泥床滤层反应器流态为完全混合型³。由此可假设下部污泥床部分各点废水浓度均相同,即出水浓度(进

入滤层的浓度) 等于污泥床中的浓度。上部滤层也具有这个特征, 并且填料表面生物膜可视为均匀分布, 根据化学反应动力学理论, 反应器物料平衡关系表达如下:

$$\begin{aligned} & \text{〔反应器内基质变化速率〕} \\ & = \text{〔基质进入反应器速率〕} \\ & - \text{〔基质离开反应器速率〕} \quad (1) \end{aligned}$$

基质通过附着增长和悬浮增长的同化作用在反应器中被去除。未被生物利用的基质被出水带出, 故平衡关系式(1)可用数学式表达:

$$\left(-\frac{dS}{dt}\right)V = QS_0 - \left[\left(-\frac{ds}{dt}\right)_A V_A + \left(-\frac{ds}{dt}\right)_B V_B + Qs_e\right] \quad (2)$$

另一方面, 当略去维持生命的能量, 微生物增长与基质利用有如下关系:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_A = y_A \left(-\frac{ds}{dt}\right)_A \quad (3)$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_B = y_B \left(-\frac{ds}{dt}\right)_B \quad (4)$$

式(3)、(4)可化为如下形式:

$$-\left(\frac{ds}{dt}\right)_A = \frac{(dx/dt)_A}{y_A} \quad (5)$$

$$-\left(\frac{ds}{dt}\right)_B = \frac{(dx/dt)_B}{y_B} \quad (6)$$

如果微生物比增长率在悬浮生物体和附着生物体中分别表达为

$$\mu_A = \frac{(dx/dt)_A}{x_A} \quad (7)$$

$$\mu_B = \frac{(dx/dt)_B}{x_B} \quad (8)$$

它们与基质浓度之间符合Monod关系式:

$$\mu_A = \mu_{A, \max} \frac{S_e}{K_A + S_e} \quad (9)$$

$$\mu_B = \mu_{B, \max} \frac{S'}{K_B + S'} \quad (10)$$

(5)、(6)两式可化为

$$\left(-\frac{ds}{dt}\right)_A = \frac{\mu_A x_A}{y_A} = \frac{\mu_{A, \max} x_A}{y_A} \cdot \frac{S_e}{K_A + S_e} \quad (11)$$

$$\left(-\frac{ds}{dt}\right)_B = \frac{\mu_B x_B}{y_B} = \frac{\mu_{B, \max} x_B}{y_B} \cdot \frac{S'}{K_B + S'} \quad (12)$$

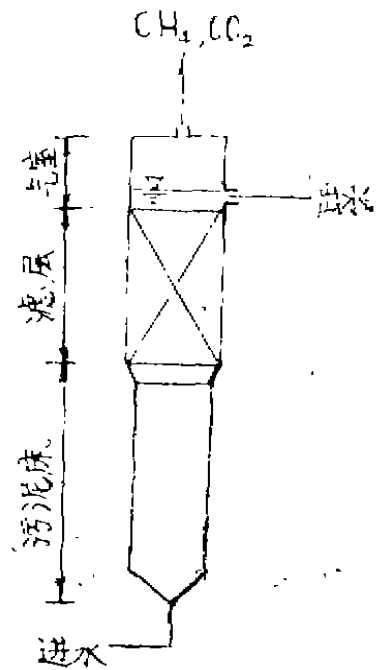


图1 上流式厌氧污泥床滤层反应器原理图

将 (11)、(12) 式代入 (2) 式, 在稳态条件下 ($\frac{ds}{dt} = 0$) 得到

$$Q(S_0 - S_e) = \frac{\mu_{A,max} X_A}{y_A} V_A \frac{S_e}{K_A + S_e} + \frac{\mu_{B,max} X_B}{y_B} V_B \frac{S'}{K_B + S'} \quad (13)$$

在污泥床中, 基质去除主要靠悬浮生物体, 滤层中主要靠附着生物膜, 其悬浮生物体数量少, 并且带有活性差的老化脱落的生物膜, 因此该部分可忽略不计。将 (13) 式分别用于反应器的上、下部分, 得到:

滤层部分:

$$Q(S' - S_e) = \frac{\mu_{A,max} X_A}{y_A} V_A \frac{S_e}{K_A + S_e} \quad (14)$$

污泥床部分:

$$Q(S_0 - S') = \frac{\mu_{B,max} X_B}{y_B} V_B \frac{S'}{K_B + S'} \quad (15)$$

如果用 D 代表生物膜平均活性深度, A 代表填料比表面积, 即单位体积填料表面积, V_n 代表填料体积。则总生物膜体积 V_A 可表达为: $V_A = V_n A D$, 等式 (14) 可表达为

$$Q(S' - S_e) = \frac{\mu_{A,max} X_A}{y_A} V_n A D \frac{S_e}{K_A + S_e} \quad (16)$$

用 $U_{A,max}$ 代表填料表面最大比基质去除率, $U_{B,max}$ 代表污泥床体积最大比基质去除率:

$$U_{A,max} = \frac{\mu_{A,max} X_A}{y_A} D \quad (17)$$

$$U_{B,max} = \frac{\mu_{B,max} X_B}{y_B} \quad (18)$$

则式 (14)、(15) 可表达为

$$\frac{Q(S' - S_e)}{V_n A} = \frac{U_{A,max} S_e}{K_A + S_e} \quad (19)$$

$$\frac{Q(S_0 - S')}{V_B} = \frac{U_{B,max} S'}{K_B + S'} \quad (20)$$

等式 (19)、(20) 左边的物理意义为填料表面比基质去除率和污泥床体积比基质去除率, 分别用 U_A 和 U_B 表示, 将其代入 (19)、(20) 式, 可得到上流式厌氧污泥床滤层反应器基质去除动力学模式:

$$U_A = \frac{U_{A,max} S_e}{K_A + S_e} \quad (21)$$

$$U_B = \frac{U_{B,max} S'}{K_B + S'} \quad (22)$$

以上两式反映了反应器中填料表面比基质去除率和污泥床体积比基质去除率与基质浓度之间的动力学关系。易于看出, 该关系式的形式与 Monod 关系式的形式相似。但新建立的动力学模式提出了填料表面比基质去除率和污泥床体积比基质去除率的概念, 把反应器的物理特性与基质降解直接联系起来, 因而概念直观, 计算方便, 不须测定象生物膜厚这一类复杂

参数, 为厌氧处理废水提供了一种新的、较简便的动力学模式。

这里讨论一下两种特殊情况:

当基质浓度很高时, 即有 $S_e \gg K_A$, $S' \gg K_B$, 此时基质以最大速率被去除, 生化反应为零级, 即与基质浓度无关, 微生物处于对数增长期, 由 (21)、(22) 式中可见, 分母中 K_A 和 K_B 与 S_e 和 S' 相比可以略去, 即:

$$U_A = U_{A, \max} \quad (23)$$

$$U_B = U_{B, \max} \quad (24)$$

当基质浓度较低时 ($S_e \ll K_A$, $S' \ll K_B$), (21)、(22) 式中分母的 S_e 和 S' 与 K_A 和 K_B 相比可略去不计, 则:

$$U_A = \frac{U_{A, \max}}{K_A} \cdot S_e = K'_A S_e \quad (25)$$

$$U_B = \frac{U_{B, \max}}{K_B} S' = K'_B S' \quad (26)$$

式中 $K'_A = \frac{U_{A, \max}}{K_A}$, $K'_B = \frac{U_{B, \max}}{K_B}$, 上两式反映了基质去除速率与残留基质浓度之

间的线性关系。此时微生物处于减速生长期。

如果基质中存在着微生物不可降解的物质, 其浓度为 S_n , 则 (21)、(22)、(25)、(26) 式应为:

$$U_A = \frac{U_{A, \max}(S_e - S_n)}{K_A + (S_e - S_n)} \quad (27)$$

$$U_B = \frac{U_{B, \max}(S' - S_n)}{K_B + (S' - S_n)} \quad (28)$$

及在低基质浓度时:

$$U_A = K'_A (S_e - S_n) \quad (29)$$

$$U_B = K'_B (S' - S_n) \quad (30)$$

2 反应器处理啤酒废水的动力学参数计算

反应器动力学参数 $U_{A, \max}$, $U_{B, \max}$, K_A , K_B 可通过试验确定, 对于某种基质和填料, 在一定的环境条件下可求得相应的动力学参数。在啤酒废水中存在不可生物降解的基质浓度, 根据上节的推导, 取 (27)、(28) 式的倒数形式:

$$\frac{1}{U_A} = \frac{K_A}{U_{A, \max}} \cdot \frac{1}{S_e - S_n} + \frac{1}{U_{A, \max}} \quad (31)$$

$$\frac{1}{U_B} = \frac{K_B}{U_{B, \max}} \cdot \frac{1}{S' - S_n} + \frac{1}{U_{B, \max}} \quad (32)$$

以 $\frac{1}{U_A}$ 或 $\frac{1}{U_B}$ 为纵坐标, $\frac{1}{S_e - S_n}$ 或 $\frac{1}{S' - S_n}$ 为横坐标作图, 通过一元回归分析, 可求得其动力学参数。

2.1 试验装置及运行参数

本试验装置见图2。反应器总容积为15.9升，其中滤层容积为7.7升，污泥床容积为8.3升，填料为外径1.5cm，内径1.1cm，长1.5cm的空心粗瓷环，空隙率为66.0%。反应器装置设在 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 的恒温室内。试验采用啤酒厂糖化车间排出的废水，COD在520至40973mg/l之间（平均为7523mg/l）。

反应器采用城市污水厂消化池污泥接种，利用啤酒废水进行培养驯化，约经50日，污泥全部成熟，试验进入负荷阶段。整个过程采用不同的进水COD浓度(2000mg/l~9000mg/l)和不同水力停留时间(1.7日~0.3日)。主要试验结果见表1。

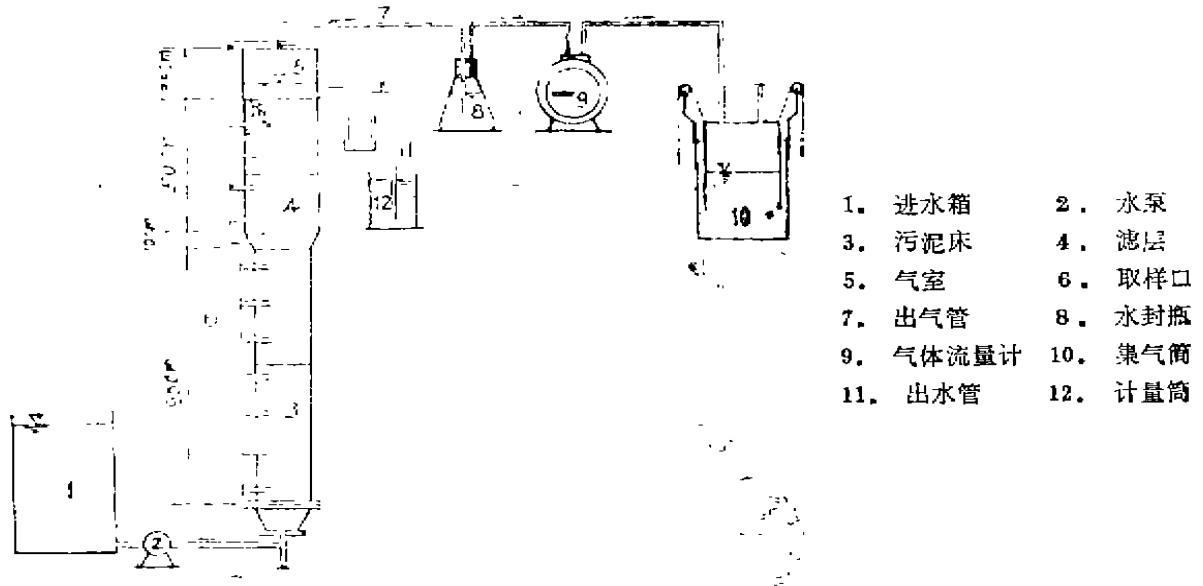


图2 上流式厌氧污泥床滤层反应器系统图

2.2 不可生物降解基质 S_n 的求解

在本试验中，考虑到滤层基质浓度低，生化反应为一级反应。根据上节的推导，可采用(29)式来求解 S_n 。根据试验中采用的不同进水浓度和废水水质情况，分三部分求解其 S_n 。计算见表2，当置信度为90%时，其相关性显著。

2.3 动力学参数的求解

根据试验运行数据和式(31)、(32)，用线性回归法求解反应器动力学参数，计算见表3，由此得出：

滤层一元回归方程为

$$\frac{1}{U_A} = 10.810 \frac{1}{S_c - S_n} + 2.242 \quad (33)$$

污泥床一元回归方程为

$$\frac{1}{U_B} = 0.0156 \frac{1}{S' - S_n} + 0.0546 \quad (34)$$

滤层相关系数 $r_A = 0.928$ ，污泥床相关系数 $r_B = 0.957$ ，当置信度考虑为99%，自由度为

12-2 = 10, 则临界相关系数 $r_{0.05} = 0.708$, 由于 $r_A > r_{0.05}$ 和 $r_B > r_{0.05}$, 其相关性为高度显著。

表1 主要试验数据表

编号	进水量 Q (l/d)	进水基质浓度 S_0 (mgCOD/l)	(污泥床出水滤层进水) 基质浓度 S' (mgCOD/l)	出水基质浓度 S_e (mgCOD/l)
1	7.52	1707	102	69
2	14.53	1607	105	77
3	27.60	1700	117	73
4	44.64	1773	292	218
5	8.14	4831	157	108
6	13.60	4661	461	342
7	27.82	4631	1136	564
8	43.89	4690	1835	1286
9	7.98	7588	451	253
10	13.63	7679	585	447
11	27.38	7619	1897	1463
12	45.52	7829	3020	2435
13	46.60	9134	5239	4018

表2 不可生物降解基质浓度的计算*

组号	进水量 (l/d)	S' COD (g/l)	S_e COD (g/l)	$Q(S' - S_e)$ (g/d)	U_A^{**} $\times 10^{-2}$ (g/dm ² ·d)	S_n COD (g/l)
I	7.52	0.102	0.069	0.2482	0.141	0.050
	14.53	0.105	0.071	0.4068	0.231	
	27.60	0.137	0.093	1.2144	0.688	
	44.64	0.292	0.218	3.3034	1.872	
II	8.14	0.157	0.108	0.3989	0.226	0.077
	13.60	0.146	0.342	1.6184	0.917	
	27.82	1.136	0.564	15.9130	9.019	
	43.89	1.835	1.286	24.0956	13.657	
III	7.98	0.451	0.253	1.5800	0.896	0.201
	13.63	0.585	0.407	2.4261	1.357	
	27.38	1.897	1.463	11.8829	6.735	
	45.52	3.020	2.435	26.6292	15.092	

* 进水COD在9134mg/l的废水性质与第三组同, 按此比例可计算出其 $S_n = 0.239$ (g/l)。

** 滤层总容积为7.71, 填料比表面积为22.91 (dm²/l)。

表3 动力学参数计算

$Q(S_0 - S')$ (g/d)	$Q(S' - S_e)$ (g/d)	U_B (g/l·d)	$U_A \times 10^{-2}$ (g/dm ² ·d)	$1/U_B$ (l·d/g)	$1/U_A$ (dm ² ·d/g)	$1/(S' - S_e)$ (1/g)	$1/(S_0 - S_e)$ (1/g)
12.02	0.248	1.47	0.141	0.680	709.22	19.23	52.63
21.82	0.407	2.66	0.231	0.376	432.90	18.18	37.04
38.15	0.399	4.64	0.688	0.216	442.48	12.50	32.26
43.14	1.214	5.26	1.872	0.190	145.35	11.49	23.25
56.95	1.580	6.94	0.226	0.144	111.61	4.00	19.23
57.12	1.618	6.97	0.917	0.143	109.05	2.60	3.77
66.11	3.303	8.06	9.019	0.124	53.42	4.13	5.95
96.69	1.881	11.97	13.657	0.085	93.81	2.60	4.07
97.23	15.913	11.86	0.896	0.084	11.09	0.94	2.05
125.31	24.096	15.28	1.357	0.065	7.32	0.57	0.83
156.67	11.883	19.11	6.735	0.052	14.85	0.59	0.79
218.97	26.629	26.70	15.092	0.037	6.63	0.35	0.45
181.51	56.899	22.14	32.246	0.045	3.10	0.20	0.26

• 该行数据未列入回归数据范围。

从 (33) 和 (34) 式, 可得到当有机负荷在 1.47 到 26.77 (gCOD/l·d) 之间, 水力停留时间 $\theta \geq 0.285$ 日时, 反应器处理啤酒废水的动力学参数为

滤层,

$$U_{A,max} = 0.446 (\text{gCOD}/\text{dm}^2 \cdot \text{d})$$

$$K_A = 4.821 (\text{gCOD}/\text{l})$$

污泥床,

$$U_{B,max} = 18.32 (\text{gCOD}/\text{l} \cdot \text{d})$$

$$K_B = 0.286 (\text{gCOD}/\text{l})$$

3 结 论

本文提出了填料表面比基质去除率和污泥床体积比基质去除率的概念, 建立了与 Monod 模式相似的基质降解动力学模型, 其基本形式为 $U = \frac{U_{max} S}{K_s + S}$ 当废水中存在不可生物降解

基质, 其浓度为 S_e 时基本形式成为 $U = \frac{U_{max}(S - S_e)}{K_s + (S - S_e)}$ 经统计分析表明, 在置信度为 99%

时, 该模式与实验数据之间相关性高度显著。另一优点是它具有概念直观, 计算方便, 不须测定象生物膜厚等一类复杂参数, 为厌氧处理有机废水提供了一种新型简便的动力学模式。

符号一览表:

A 填料比表面积, ($L^2 \cdot L^{-3}$)

D 生物膜平均活性深度, (L)

K_S, K_A, K_B 饱和常数, ($M \cdot L^{-3}$)

$S(S_e)$ 基质(不可生物降解基质)浓度, ($M \cdot L^{-3}$)

S_0 反应器进水基质浓度, ($M \cdot L^{-3}$)

- S' 反应器污泥床出水(滤层进水)基质浓度, $(M \cdot L^{-3})$
- S_e 反应器出水基质浓度, $(M \cdot L^{-3})$
- $U_A (U_{A,max})$ 填料表面(最大)比去除基质速率, $(M \cdot L^{-3} \cdot T^{-1})$
- $U_B (U_{B,max})$ 污泥床体积(最大)比去除基质速率, $(M \cdot L^{-3} \cdot T^{-1})$
- V 反应器容积, (L^3)
- $V_A (V_B)$ 附着生物膜(悬浮生物体)体积, (L^3)
- V_m 滤料体积, (L^3)
- x 微生物浓度, $(M \cdot L^{-3})$
- $x_A (x_B)$ 生物膜(悬浮生物体)活性生物量, $(M \cdot L^{-3})$
- $y_A (y_B)$ 生物膜(悬浮生物体)产率系数, $(M \cdot M^{-1})$
- $\mu_A (\mu_{A,max})$ 生物膜比增长率(最大值), (T^{-1})
- $\mu_B (\mu_{B,max})$ 悬浮生物体比增长率(最大值), (T^{-1})
- $\left(-\frac{ds}{dt}\right)$ 反应器中基质变化率, $(M \cdot L^{-3} \cdot T^{-1})$
- $\left(-\frac{ds}{dt}\right)_A \left[\left(-\frac{ds}{dt}\right)_B \right]$ 生物膜(悬浮生物体)去除基质速率, $(M \cdot L^{-3} \cdot T^{-1})$
- $\left(\frac{dx}{dt}\right)_A \left[\left(\frac{dx}{dt}\right)_B \right]$ 生物膜(悬浮生物体)绝对生长率, $(M \cdot L^{-3} \cdot T^{-1})$

参 考 文 献

(1) Larry D. Benefield, Clifford W. Randall, (1980) Biological Process Design for Wastewater Treatment, (N.J. 07632)

(2) S.R. Guiot and Van Den Berg, (1985), Biotechnology and Bioengineering XXVII, 800~806

(3) R. Samson and S.R. Guiot, (1985), J. Chem. Tech Biotechnol. 35B, 65~74

(4) APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 15th. ed, (1980).

(5) 吴唯民等, 《水处理技术》, Vol 12, No. 2, 113~117, 1986

(6) 顾夏声, 《废水处理数学模式》, 清华大学出版社, 1982

(编辑: 刘家凯)

STUDY OF THE SUBSTRATE DEGRADATION KINETIC MODEL OF THE UPFLOW ANAEROBIC BLANKET FILTER REACTOR

Sun Huixiu

Zhou Qi

ABSTRACT According to biochemistry principle and chemical reactor theory, the process of treating brewery wastewater has been discussed and the

conception of the specific substrate removal rate of packing area and the specific substrate removal rate of blanket volume are put forward in this paper. The basic form of anaerobic treating organic wastewater kinetic model is $U = U_{max} \cdot S / (K + S)$. The coefficients of the reactor to treat brewery wastewater are determined.

KEY WORDS specific substrate removal rate, kinetics, anaerobic blanket filter reactor, brewery wastewater, Monod's model