

生物膜废水处理系统的数学模型及机理探讨*

陈黎明 柴立和**

天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

摘要 综合考虑影响生物膜形成和稳定的多种因素, 提出一个考虑悬浮微生物存在的生物膜废水处理系统的数学模型. 通过理论分析和数值计算详尽地讨论了稀释速率、脱落速率、进水浓度、初始接种污泥浓度等因素对生物膜形成和稳定的影响. 在此基础上, 定性分析了有关生物膜反应器的工程实际问题, 进而对工程改进措施提出了一些重要建议, 加深了对生物膜废水处理系统的物理机理方面的认识.

关键词 生物膜 挂膜 悬浮生物量 附着生物量

生物膜法作为一种高效的废水处理方法, 已经在工业界获得了广泛运用. 生物膜废水处理系统的性能在很大程度上取决于生物膜的形成及动力学过程. 从20世纪70年代提出反应-扩散模型以来, 各国学者对生物膜的形成及其反应动力学进行了大量的研究^[1,2]. 后来又有了Capdeville增长动力学模型^[2,3]和原胞自动机模型^[4,5]等较典型的成果. 然而这些模型都存在一些不满意的地方, 如反应-扩散模型主要考虑基质的去除动力学, Capdeville生物膜增长动力学模型主要考虑活性生物量和非活性生物量的积累, 而原胞自动机模型则主要考虑生物膜的形态和结构. 总之目前对生物膜形成机理和动力学过程的研究还有待深入. 本文试图从新的角度和更深的层次来研究生物膜的形成及增长动力学机理.

本文提出了一个可用于描述废水处理系统中生物膜形成的动力学模型. 通过对模型的理论分析和数值计算, 探讨稀释速率、脱落速率、进水浓度、初始接种污泥浓度等因素对生物膜形成和稳定的影响, 得到一些有用的结论. 这样不仅从深层次的理论上揭示了生物膜废水处理系统的物理机理, 而且对工程应用也有指导意义.

1 连续搅动釜式反应器(CSTR)生物膜废水处理的机理和模型

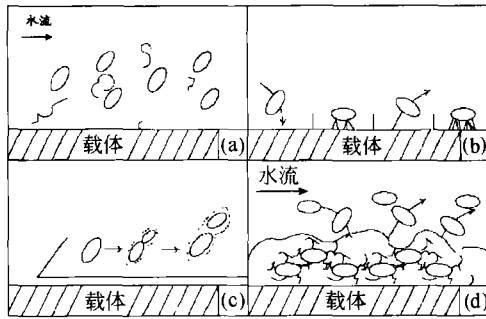
1.1 生物膜废水处理系统的物理机理

研究表明, 生物膜的累积形成是以下物理、化学和生物过程综合作用的结果^[2]: 有机分子从水中向生物膜表面运送, 其中部分被吸附, 形成了被微生物改良的载体表面(图1(a)); 水中部分悬浮的微生物细胞被传送到改良的载体表面, 其中碰撞到载体表面的细胞一部分被表面吸附一段时间后因物理、化学和生物作用又解析出来, 而另一部分则变成了不可解析的细胞(图1(b)); 不可解析的细胞摄取并消耗水中的有机底物和营养物质进行增殖; 同时, 细胞可能产生大量的产物, 有些排出体外, 这些产物有一些就是胞外聚合物, 将生物膜紧紧地结合在一起, 由此, 微生物细胞在消耗水中底物能量进行新陈代谢的同时便使得生物膜形成积累(图1(c)); 附着细胞在一定情况下也会进入水中, 或者在增殖时向水中释放出游离的细胞(图1(d)).

2004-11-09 收稿, 2004-12-20 收修稿

* 国家自然科学基金(批准号: 50406018)、天津大学杰出人才引进基金(批准号: W20201)和教育部留学回国人员科研启动基金(批准号: 413042)资助项目

** 通讯作者, E-mail: lhchai@tju.edu.cn

图1 生物膜在载体上的形成过程^[2]

1.2 CSTR 生物膜废水处理系统的数学模型

我们对生物膜废水处理系统做一些合理的考虑或简化：忽略生物膜的三维空间结构，模型假设生物膜无限薄，并且对流体环境没有影响；考虑单一溶解性基质，作为悬浮微生物和附着微生物的食物来源，并假定溶解性基质为单一的限制性生长因素；基于生物膜处理反应器的动态运行规律，考虑生物膜反应器中，附着微生物和悬浮微生物的相互转化，以及这种转化对处理效果的影响。

研究表明：在给定的系统中，悬浮微生物浓度代表了微生物与载体间的接触频度；一般地讲，随悬浮微生物浓度的增加，微生物与载体接触的几率随之增高。文献报道了大量实验事实，表明在附着微生物的密度与悬浮微生物的浓度之间存在着正比例关系^[2]。

综上所述，我们可以采取如下假设来建立生物膜形成及其动力学过程的数学模型，并对其进行理论分析和数值模拟：反应器内载体表面有有限数量的可定殖点，因此附着微生物有一个最大的面密度；悬浮微生物以正比于其浓度和载体表面未被占有的定殖点分数的速率吸附到载体表面；附着微生物以正比于其面密度的速率脱落进入流体；附着微生物的子细胞在载体上相互竞争生长空间；分数为 G 的子细胞找到附着点，分数为 $1-G$ 的子细胞不能找到附着点，只能进入流体 (G 是载体表面占有率的减函数)。

因为充分饱和的载体表面提供很少的生长机会给予细胞，所以 $G=G(W)$ 是占有率 W 的减函数这个假设是合理的。悬浮微生物和附着微生物的生长

均采用 Monod 方程，他们消耗基质并同时以产率系数 γ 将基质转化为新的微生物。采用如下的几率函数：^[6]

$$G(W) = \frac{1-W}{1.1-W}$$

根据以上假设，在体积为 V ，流速为 F ，载体表面积为 A 的 CSTR 反应器中，建立如下方程 ($D=F/V$, $\delta=A/V$):

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= D(S_0 - S) - \gamma^{-1}[\mu_u(S)X_u + \mu_w(S)\delta X_w], \\ \frac{dX_u}{dt} &= X_u[\mu_u(S) - D - k] + \beta\delta X_w + \\ &\quad \delta X_w \mu_w(S)[1 - G(W)] - \alpha X_u[1 - W], \\ \frac{dX_w}{dt} &= X_u[\mu_w(S)G(W) - \beta - k_w] + \alpha X_u[1 - W]\delta^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 S 为反应器中基质的质量浓度，mg/L； X_u 为反应器中悬浮微生物的质量浓度，mg/L； X_w 为载体表面附着微生物的面密度，mg/dm²； $D=F/V$ ，稀释速率，h⁻¹； $X_{w,m}$ 为附着微生物的最大面密度，mg/dm²； $W=X_w/X_{w,m}$ 为载体表面附着微生物的占有率； $G(W)$ 为子细胞找到附着点的几率； β 为附着微生物的脱落速率，h⁻¹； α 为悬浮微生物的附着速率，h⁻¹； γ 为微生物的产率系数； $\mu_u(S)$ ， $\mu_w(S)$ 分别为悬浮微生物和附着微生物的比增殖速率，h⁻¹； k ， k_w 分别为悬浮微生物和附着微生物的比衰亡速率，h⁻¹。

2 模型分析、数值计算及讨论

2.1 模型分析

令 $X = \delta X_w$ ，代入(1)式中，并用 X_w 代替 X ，此时 X_w 表示附着微生物的体积密度(mg/L)，由此得到：

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= D(S_0 - S) - \gamma^{-1}[\mu_u(S)X_u + \mu_w(S)X_w], \\ \frac{dX_u}{dt} &= X_u[\mu_u(S) - D - k] + \beta X_w + \\ &\quad X_w \mu_w(S)[1 - G(W)] - \alpha X_u[1 - W], \end{aligned}$$

$$\frac{dX_w}{dt} = X_w[\mu_w(S)G(W) - \beta - k_w] + \alpha X_u[1 - W]. \quad (2)$$

下面对(2)式进行详细的数学分析. 令(2)式左边等于0, 计算得到两个非负的平衡点 $E_1(S_0, 0, 0)$ 和 $E_2(S^*, X_u^*, X_w^*)$. 平衡点 $E_1(S_0, 0, 0)$ 表示微生物被洗出的状态, 即反应器中不能形成稳定的生物膜. 它的稳定性由下面的 Jacobian 矩阵的 2×2 子阵的特征值决定.

$$J = \begin{pmatrix} \mu_u(S_0) - D - k - \alpha & \mu_w(S_0)[1 - G(0)] + \beta \\ \alpha & \mu_u(S_0)G(0) - k_w - \beta \end{pmatrix}$$

如果 J 的特征值的实部是负的, 则 E_1 是渐进稳定的. 假设 $s(J)$ 是特征值中较大的一个, 则当 $s(J) < 0$ 时, 洗出平衡点是渐进稳定的; 当 $s(J) > 0$ 时, 洗出平衡点是不稳定的. 尽管可以写出 $s(J)$ 的准确表达式, 但对于简单的结果估计, 可以使用以下估计式:

$$\max\{\mu_u(S_0) - D - k - \alpha, \mu_w(S_0)G(0) - k_w - \beta\} < s(J) \leq \max\{\mu_u(S_0) - D - k, \mu_w(S_0) - k_w\}. \quad (3)$$

因此, 如果

$$\mu_w(S_0) - k_w < 0 \text{ 且 } \mu_u(S_0) - D - k < 0, \quad (4)$$

则 $s(J) < 0$ 并且洗出状态是全局稳定的.

如果

$$\mu_u(S_0) - D - k - \alpha \geq 0, \quad (5)$$

或者

$$\mu_w(S_0)G(0) - k_w - \beta \geq 0, \quad (6)$$

则 $s(J) > 0$ 并且洗出状态是不稳定的.

如果(5)式和(6)式不成立而

$$\mu_u(S_0) - D - k > 0 \text{ 且 } \mu_w(S_0)G(0) - k_w \geq 0, \quad (7)$$

成立的话, 则矩阵 J 的行列式是负的, 则有 $s(J) > 0$.

当 $s(J) > 0$ 时, 则另一个非平凡的平衡点

$E_2(S^*, X_u^*, X_w^*)$ 存在. 令(2)式左边等于0, 并将后两个方程相加得

$$0 = X_u^*[\mu_u(S^*) - D - k] + X_w^*[\mu_w(S^*) - k_w]. \quad (8)$$

由于 $X_u^* > 0, X_w^* > 0$, 所以由(8)式可以得到 $[\mu_u(S^*) - D - k][\mu_w(S^*) - k_w] < 0$; 由于在平衡点附着微生物的生长率通常大于其衰亡速率, 即有 $\mu_w(S^*) - k_w > 0$, 因此可得到 $\mu_u(S^*) - D - k < 0$, 即有 $D > \mu_u(S^*) - k$. 因此在平衡点附近为了保持生物膜的稳定性, 应采取较大的稀释速率, 即 $D > \mu_u(S^*) - k$, 稀释速率应大于悬浮微生物的净比增殖速率. 这一结果与 Heijnen 等^[7]的实验结果是吻合的. 即在生物膜反应器的运行阶段, 应采取较大的稀释速率 ($D = 1/\tau$). 由此, 从理论上说明, 采取较短的水力停留时间 (τ) 有利于反应器的启动成功. Tjihuis 等^[8]的实验和周平等^[9]的实验证明了这种观点, 他们均在水力停留时间短至 1 h 的情况下取得了反应器的挂膜成功.

总之, 如果 $s(J) < 0$, 则洗出点是稳定的. 如果 $s(J) > 0$, 则至少有一个非平凡稳定点存在, 且任一非平凡稳定点均满足 $X_u^* > 0, X_{w,m} > X_w^* > 0, 0 < S^* < S_0$. 该稳定平衡点的存在, 说明生物膜反应器内悬浮微生物和附着微生物可以稳定地同时存在, 悬浮微生物对有机物的去除作用不可忽略. 这与实际情况是相吻合的. 然而, 传统的生物膜模型, 通常均假设只有附着微生物才对基质有去除作用, 而忽略了悬浮微生物对基质的去除作用.

2.2 数值计算及讨论

由于实际生物膜系统的复杂性, 现有文献中参数的相互矛盾或缺乏, 并且考虑到生物膜的接种培养的实际情况, 暂时可把悬浮微生物和附着微生物考虑为同一类型, 而不考虑由于生理形态的不同而引起的生理功能的不同, 采用 Monod 方程来计算微生物的比增殖速率, 即有 $\mu_w(S) = \mu_u(S) = \frac{\mu_m S}{K_s + S}$, 其中 μ_m 为微生物最大比增殖速率, h^{-1} ; K_s 为半饱和常数, mg/L .

采用如下数据对异养好氧生物膜反应器进行数值模拟: $\gamma = 0.5, k = k_w = 0.01 h^{-1}, X_{w,m} = 5000 mg/L$; 并把 $D = 1 h^{-1}, \beta = 0.03 h^{-1}, \alpha = 0.1 h^{-1}, S_0 = 500 mg/L, \mu_m = 0.12 h^{-1}, K_s = 80 mg/L$ 时的 S, X_u, X_w 的时序列图(图 2(b))作为参数变化时比较的基准. 初始接

种污泥浓度为 1000 mg/L.

由于控制参数之间存在着相互作用,但是稀释速率、脱落速率及附着速率等控制参数之间还没有明确的函数关系可以采用,因此本文中采取每次改变一种参数的办法来进行数值模拟.故在预测生物膜的培养驯化过程和描述控制参数之间相互作用方面还有些缺陷,但它能提供一些重要的启示.

(1) 稀释速率 D 的影响.数值模拟结果(见图 2)

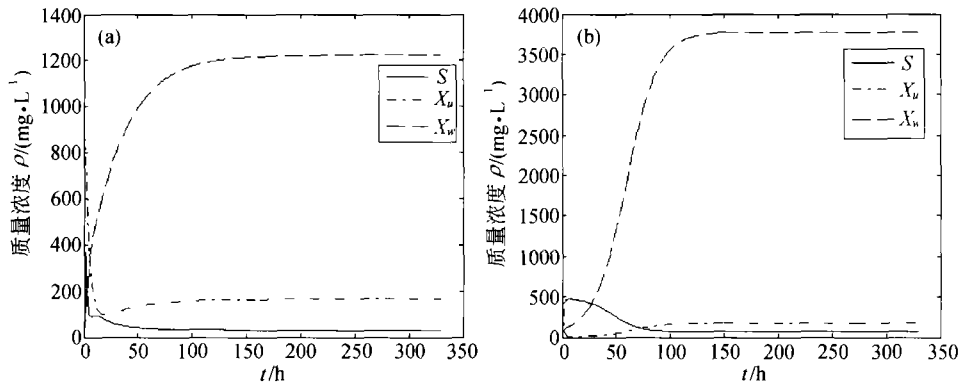


图 2 稀释速率 D 变化时, S, X_u, X_w 的时序列图

(a) $D = 0.2 \text{ h}^{-1}$; (b) $D = 1 \text{ h}^{-1}$

其他参数: $\alpha = 0.1 \text{ h}^{-1}$, $\beta = 0.03 \text{ h}^{-1}$, $S_0 = 500 \text{ mg/L}$, $X_u(0) = 1000 \text{ mg/L}$, $\mu_m = 0.12 \text{ h}^{-1}$, $K_S = 80 \text{ mg/L}$

(2) 脱落速率 β 的影响.生物膜的脱落受多种因素影响,主要包括来自液相或气相流动产生的剪切力以及颗粒之间的碰撞.此外生物膜结构、反应器构型、载体性质等也影响生物膜的脱落速率.脱落影响生物膜的形成、结构和稳定性.数值模拟表明(见图 3,图 2(b)),脱落速率太大时(其他参数不变),生物膜几乎不能形成.因此在生物膜反应器启动和运行

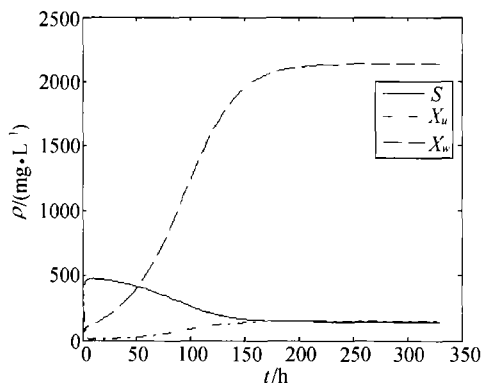


图 3 脱落速度 $\beta = 0.06 \text{ h}^{-1}$ 时, S, X_u, X_w 的时序列图

其他参数: $D = 1 \text{ h}^{-1}$, $\alpha = 0.1 \text{ h}^{-1}$, $S_0 = 500 \text{ mg/L}$,

$X_u(0) = 1000 \text{ mg/L}$, $\mu_m = 0.12 \text{ h}^{-1}$, $K_S = 80 \text{ mg/L}$

显示,稀释速率越大,附着微生物量越多,生物膜可以很好地形成.同时可以看到生物膜系统可以在稀释速率 D 为 1 h^{-1} 时,可以在 100 h (大约 4 d) 内形成稳定的生物膜系统.考虑到实际情况下,稀释速率太大,对生物膜的冲刷作用增大,因此在实际情况下,稀释速率 D 也不宜太大,即水力停留时间不宜太短.邓洪权等^[10]经实验证实, $\tau < 4 \text{ h}$ ($D > 0.25 \text{ h}^{-1}$) 有利于反应器的启动挂膜.

的时候,应设法减小脱落速率. Liu^[11] 也认为生物膜的脱落是影响生物膜形成及其结构的最重要的因素之一.

(3) 初始有机物浓度 S_0 的影响.数值模拟表明(见图 4,图 2(b)),在相同的稀释速率情况下,初始有机物浓度增大,表明有机负荷增高,对附着微生物的竞争有利,因而形成的生物膜量增多,但同时悬浮

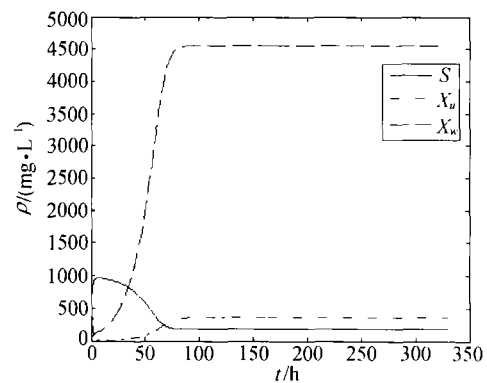


图 4 初始有机浓度 $S_0 = 1000 \text{ mg/L}$ 时, S, X_u, X_w 的时序列图

其他参数: $D = 1 \text{ h}^{-1}$, $\alpha = 0.1 \text{ h}^{-1}$, $\beta = 0.03 \text{ h}^{-1}$,

$X_u(0) = 1000 \text{ mg/L}$, $\mu_m = 0.12 \text{ h}^{-1}$, $K_S = 80 \text{ mg/L}$

微生物也较多. 因而在初始有机物浓度较低的情况下, 采取较高的稀释速率, 有利于生物膜的形成.

(4) 接种污泥量的影响. 数值模拟表明(图5, 图2(b)), 初始接种污泥量的多少对最终的生物膜量和悬浮微生物量的影响不是很大. 从图5(b)可以看

出, 在初始污泥浓度为0, 而附着微生物浓度为100 mg/L时, 生物膜也可以很快得形成. 这个模拟结果说明快速排泥挂膜法^[12,11]用于生物膜反应器的启动是可行的.

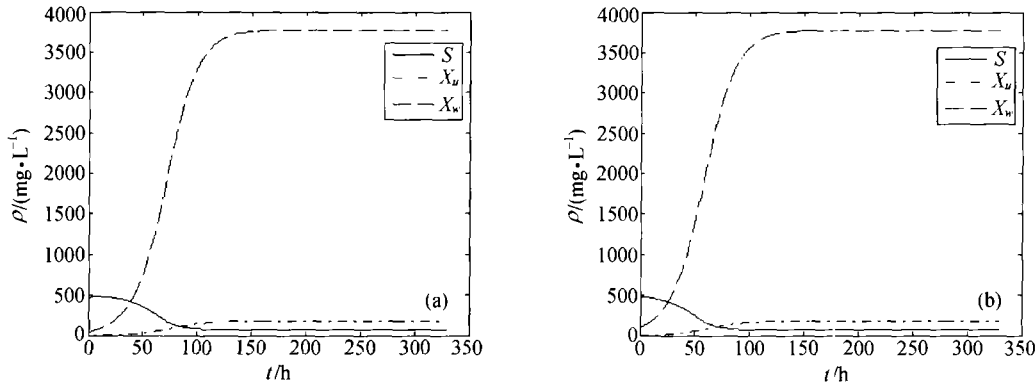


图5 初始接种污泥量 $X_w(0)$ 变化时, S, X_u, X_w 的时序列图

(a) $X_u(0) = 500 \text{ mg/L}, X_w(0) = 0$; (b) $X_u(0) = 0, X_w(0) = 100 \text{ mg/L}$

其他参数: $D = 1 \text{ h}^{-1}, \alpha = 0.1 \text{ h}^{-1}, \beta = 0.03 \text{ h}^{-1}, S_0 = 500 \text{ mg/L}, \mu_m = 0.12 \text{ h}^{-1}, K_s = 80 \text{ mg/L}$

(5) 附着速率的影响. 附着速率主要受载体表面性质影响. 数值模拟表明(图略), 附着速率系数 α 的大小影响着总的附着生物量和挂膜时间. 因此, 为了提高生物膜系统的生物膜量, 应该采取措施增大微生物的附着速率. 例如, 刘雨^[14]利用低温等离子技术改善了载体表面性能, 使得附着速率增大, 反应器的启动时间缩短.

(6) 有机底物性质和微生物的影响. 最大比增殖速率 μ_m 和半饱和常数 K_s 反映了基质本身的性质和

微生物的影响. 在前面模拟时采用的最大比增殖速率和半饱和常数 K_s 反映了有机基质较难降解的性质. 现在采用得到公认的生活污水中易降解的溶解性基质的两个典型参数: $\mu_m = 0.25 \text{ h}^{-1}, K_s = 20 \text{ mg/L}$ 进行模拟, 结果见图6. 与图2(b)相比较, 可以看出基质种类和微生物种类对生物膜的挂膜时间有很大影响. μ_m 大和 K_s 小时生物膜形成的时间较短. 因此, 在工程应用上, 为缩短挂膜时间, 应筛选应该该种污水的微生物(μ_m 较大而 K_s 小).

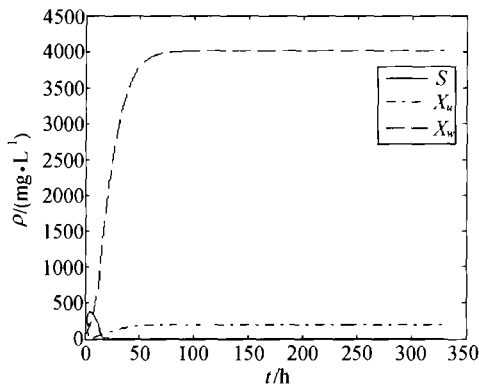


图6 $\mu_m = 0.25 \text{ h}^{-1}, K_s = 20 \text{ mg/L}$ 时, S, X_u, X_w 的时序列图

其他参数: $D = 1 \text{ h}^{-1}, \alpha = 0.1 \text{ h}^{-1}, \beta = 0.03 \text{ h}^{-1},$

$S_0 = 500 \text{ mg/L}, X_u(0) = 1000 \text{ mg/L}$

3 结论

在生物膜的形成和稳定过程中, 其动力学特征是影响生物膜性能的主要因素. 本文尝试从新的角度来阐述生物膜的形成及其动力学过程, 建立了一个考虑悬浮微生物存在的生物膜废水处理系统的数学模型. 通过对该模型的理论分析和数值计算详尽地讨论了稀释速率、脱落速率、进水浓度、初始接种污泥浓度、附着速率等因素对生物膜形成和稳定的影响. 得出的主要结论如下: 在合适的运行条件下, 生物膜可以在4 d之内很好地形成, 然而, 由于实际条件的限制, 挂膜时间常常超过4 d; 稀释速率较大时, 附着生物量会较大, 生物膜可以很好得形成; 生物膜

的脱落速率极大地影响着生物膜的形成和稳定,因此应该采取措施减少脱落;初始基质浓度对挂膜的影响不是很大,快速排泥挂膜法是可行的;附着速率增大,挂膜时间缩短;基质种类和微生物的性质对挂膜时间有较大影响, μ_m 大和 K_s 小时生物膜形成的时间较短。

参 考 文 献

- 1 Grady C P L, Daigger G T, Lim H C. *Biological Wastewater Treatment: Revised and Expanded*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc, 1999, 713—747
- 2 刘 雨,赵庆良,郑兴灿.生物膜法污水处理技术.北京:中国建筑工业出版社,2000,3—4,14—16,56—60
- 3 刘 雨,王岐东.生物膜增长动力学模型.北京轻工业学院学报,1997,15(2):28—31
- 4 Wimpenny J W T, Colasanti R. A unifying hypothesis for the structure of microbial biofilms based on cellular automaton models. *FEMS Microbiology Ecology*, 1997, 22(1): 1—16
- 5 Picioreanu C, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Discrete-differential modeling of biofilm structure. *Water Science and Technology*, 1999, 39 (7): 115—122
- 6 Freter R. Mechanisms that control the microflora in the large intestine. In: Hentges D, ed. *Human Intestinal Microflora in Health and Disease*. New York: Academic Press, 1983, 33—54
- 7 Heijnen J J, van Loosdrecht M C M, Mulder A, et al. Formation of biofilms in a biofilm air-lift suspension reactor. *Water Science and Technology*, 1992, 26 (5): 647—654
- 8 Tjihuis L, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Formation and growth on heterotrophic aerobic biofilm on small suspended particles in airlift reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, 44 (5): 595—608
- 9 周 平,汪诚文,吴晓磊,等.内循环生物流化床处理石化废水的中试实验. *环境科学*, 1997, 18(1): 26—29
- 10 邓洪权,潘永亮,杨 平.内循环三相生物流化床启动特性实验研究. *环境科学与技术*, 2001, 24(1): 12—15
- 11 Liu Y, Joo-Hwa Tay. Detachment forces and their influence on the structure and metabolic behaviour of biofilms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2001, 17(2): 111—117
- 12 俞汉青,顾国维.生物膜反应器挂膜方法的试验研究. *中国给水排水*, 1992, 8(3): 13—17
- 13 张 杰,曹相生,孟学征,等.好气滤池3种挂膜方法的实验研究. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(10): 1216—1219
- 14 刘 雨,刘 健.低温等离子体技术改善生物膜反应器载体表面性能的研究. *环境污染与防治*, 1997, 19(4): 1—3