

膜生物反应器水力停留时间的确定 及其影响因素分析

张绍园 王菊思 姜兆春

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要 根据微生物反应动力学模型, 推导了分离式膜生物反应器水力停留时间公式, 并以此公式为基础, 分析与探讨了膜生物反应器的影响因素. 分析结果表明, 对膜生物反应器影响程度由大到小的因素为底物最大比降解速度常数 K , 饱和常数 K_s , 维持常数 m , 真产率系数 Y_G , 最大比增殖速率 μ_m . 最后简化了水力停留时间公式, 其简化形式为: $T = 1.1 \times (1/\beta - 1)(K_s + L)/KS_0$.

关键词 膜生物反应器, 废水处理, 水力停留时间, 反应动力学模型, 微生物动力学参数, 运行参数.

膜生物反应器是由生物反应器与膜技术相结合的生物化学反应系统^[1], 它是一种新型的水处理技术, 可用于给水、废水及中水回用处理, 在国内外得到广泛的应用与研究^[2,3]. 根据生物反应器与膜单元组合方式, 可分为一体式、分离式和隔离式 3 种. 目前, 所见的实用规模膜生物反应器均为分离式系统, 分离式膜生物反应器可以使水力停留时间(HRT)和污泥停留时间(SRT)得到有效地控制, 从而达到较高去除程度的效果. 本文笔者结合膜生物反应器特点, 运用微生物反应原理和物料平衡原理, 推导了分离式膜生物反应器水力停留时间公式, 采用数学分析手段, 探讨与分析了分离式膜生物反应器中生物反应器的影响因子, 并简化了该公式, 目的在于揭示膜生物反应器运行规律, 试图对膜生物反应器的设计与应用能起到一定的指导作用.

1 微生物反应动力学模型

劳伦斯和麦卡蒂根据莫诺特(Monod)方程提出了曝气池中底物去除速度和微生物浓度的关系方程^[4]:

$$\frac{dL}{dt} = - \frac{KSL}{K_s + L} \quad (1)$$

式中, S 为活性污泥浓度(以 VSS 计), mg/L; L 为底物浓度(以 BOD 计), mg/L; K 为底物最大比降解速度常数, h^{-1} ; K_s 为饱和常数, 其值

等于底物去除速度为最大值的一半时的底物浓度, mg/L.

在微生物降解底物的过程中, 微生物的增殖速率与底物的减小速率之间存在下列正比关系^[5]:

$$\frac{dS}{dt} = - Y \frac{dL}{dt} \quad (2)$$

式中, Y 为产率系数(以 VSS/BOD), mg/mg.

Y 随着比增殖速率 μ 的变化而变化, 因此, 底物浓度 L 的变化会引起 Y 值的变化. Y 与 μ 之间的关系为^[6]:

$$\frac{1}{Y} = \frac{m}{\mu} + \frac{1}{Y_G} \quad (3)$$

式中, m 为维持常数(h^{-1}), 为单位质量的微生物在单位时间内维持生命活动所需消耗的底物量; Y_G 为真产率系数, 代表实际用于微生物增长的每 mg 底物所产生微生物 mg 数, 单位为 mg/mg.

比增殖速率 μ 与底物浓度 L 之间存在下列关系^[6]:

$$\mu = \mu_m \frac{L}{K_s + L} \quad (4)$$

式中, μ_m 为 $L \rightarrow \infty$ 时 μ 的极限值, h^{-1} ; K_s 为饱和常数, 其值等于 $\mu = \mu_m/2$ 时的底物浓度, mg/L. 将(4)式代入(3)式, 整理得:

$$Y = \frac{\mu_m L Y_G}{m(K_s + L) Y_G + \mu_m L} \quad (5)$$

将(5)式代入(2)式,整理得:

$$dS = - \frac{\mu_m L Y_G}{m(K_S + L) Y_G + \mu_m L} dL \quad (6)$$

在 $S = S' \sim S, L = L' \sim L$ 上积分(6)式,其中 S', L' 分别为活性污泥和底物的初始浓度.

$$\int dS = - \int \frac{\mu_m L Y_G}{m(K_S + L) Y_G + \mu_m L} dL$$

积分整理得:

$$S = \frac{\mu_m Y_G}{m Y_G + \mu_m} [L' - L + \frac{m Y_G K_S}{m Y_G + \mu_m} \ln \frac{m Y_G K_S + L(m Y_G + \mu_m)}{m Y_G K_S + L' (m Y_G + \mu_m)}] + S' \quad (7)$$

令 $a = m Y_G + \mu_m, b = m Y_G K_S$, 则(7)式改写为:

$$S = \frac{\mu_m Y_G}{a} [L' - L + \frac{b}{a} \ln \frac{b + aL}{b + aL'}] + S' \quad (8)$$

将(8)式代入(1)式得:

$$\frac{dL}{dt} = - \left[\frac{\mu_m Y_G}{a} (L' - L + \frac{b}{a} \ln \frac{b + aL}{b + aL'}) + S' \right] \frac{KL}{K_S + L} \quad (9)$$

上式为底物降解速度与底物剩余浓度之间的动力学关系式. 据此式, 可进行膜生物反应器水力停留时间(HRT)公式推导.

2 膜生物反应器 HRT 公式推导

假定原水的底物浓度 L_0 , 流量为 Q . 当它与回流比为 R 、污泥浓度为 S_0 的回流污泥混合后进入曝气池, 其具体的工艺流程如图 1 所示.

根据物料衡算, 混合废水流量, 污泥浓度和底物浓度分别为:

$$Q' = (1 + R)Q \quad (10)$$

$$S' = RS_0 / (1 + R) \quad (11)$$

$$L' = (L_0 + RL) / (1 + R) \quad (12)$$

现以完全混合式曝气池为研究对象, 曝气池内的物料衡算方程为:

$$Q L' + V_m \frac{dL}{dt} = Q L \quad (13)$$

而水力停留时间 T 为:

$$T = V_m / Q \quad (14)$$

式中, T 为水力停留时间, h; V_m 为曝气池池容, m^3 . 将(9)、(10)、(11)、(12)式代入(13)式, 经

过一系列的简化, 求出完全混合式曝气器池容公式, 再将池容公式代入(14)式得如下公式:

$$T = \frac{a(1+R)(L_0-L)(K_S+L)}{KL[\mu_m Y_G(L_0-L) + \frac{b(1+R)}{a} \ln \frac{b+aL}{b+\frac{a(L_0+RL)}{1+R}} + aRS_0]} \quad (15)$$

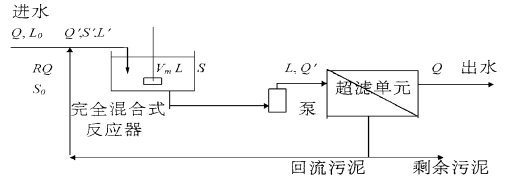


图1 分离式膜生物反应器示意图

3 影响因素分析

式(15)为膜生物反应器 HRT 公式, 从公式可见, 膜生物反应器影响因素较多, 影响因素有 $K, \mu_m, K_S, Y_G, m, L_0, R$ 和 S_0 , 根据这些因素的含义, 可以将它们分为微生物动力学因素和运行因素 2 大类. 其中 K, μ_m, K_S, Y_G, m 属于微生物动力学因素, 而 L_0, L, S_0, R 属于运行因素.

3.1 微生物动力学因素

式(15)是以莫诺特方程为基础推导的. 莫诺特方程式是由生长在单一有机底物的纯种细菌生长规律试验作依据而取得的. 活性污泥系统中曝气池的环境与此不同, 首先, 所处理的废水含有多种有机底物, 并不是单一的有机底物; 其次, 曝气池中的微生物也不是纯种细菌, 而是包含着复杂的微生物群落, 这些微生物群落处于微生物种类数量相对稳定的连续流动状态中, 所有这些使得动力学参数不是“常数”, 而是在一定范围内变动^[7]. 由文献[4-8]可知微生物动力学参数变化范围, 现列举于表 1.

为分析各因素对膜生物反应器水力停留时间的影响, 利用正交设计安排计算, 各参变量的因素水平见表 2.

表 2 中因素水平按 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行安排, 对分布在同一行的数组, 在确定运行参数 $L_0 = 500, L = 25, R = 10, S_0 = 2000$ 的情况下^[9],

由公式(15)计算. 正交安排与计算结果见表 3.

表 1 微生物动力学参数变化

参数	K/h^{-1}	μ_m/h^{-1}	$K_s/mg \cdot L^{-1}$	$Y_G/mg \cdot mg^{-1}$	m/h^{-1}
变化幅度	0.03~ 0.15	0.2~ 0.6	10~ 150	0.04~ 0.12	0.02~ 0.12

表 2 微生物动力学变量因素水平¹⁾

因素	1 水平	2 水平	3 水平	4 水平
K_s	10	50	100	150
Y_G	0.04	0.06	0.09	0.12
μ_m	0.2	0.3	0.4	0.6
K	0.03	0.06	0.09	0.15
m	0.02	0.06	0.09	0.12

1) 表中变量单位同表 1

从表 3 的正交安排与计算结果可以发现,微生物动力学因素对膜生物反应器 HRT 影响很大. 当保证有机物去除率为 95% 时,微生物动力学因素变化导致 HRT 变化范围为 2.43~61.08h. 影响程度由大到小排列顺序为底物最大比降解速度常数 K , 饱和常数 K_s , 维持常数 m , 产率系数 Y_G 和比增殖速率 μ_m . 根据表 3 数据确定的最佳数组与相应的 HRT 见表 4.

表 3 正交设计计算结果与简化公式计算结果表¹⁾

序号	K_s	Y_G	μ_m	K	m	T	T	偏差/ %
1	10	0.04	0.20	0.03	0.02	12.18	12.19	0.08
2	10	0.06	0.30	0.06	0.06	6.09	6.10	0.16
3	10	0.09	0.40	0.09	0.09	4.06	4.07	0.25
4	10	0.12	0.60	0.15	0.12	2.43	2.44	0.41
5	50	0.04	0.30	0.09	0.12	8.71	8.71	0.00
6	50	0.06	0.20	0.15	0.09	5.24	5.22	- 0.38
7	50	0.09	0.60	0.03	0.06	26.08	26.13	0.19
8	50	0.12	0.40	0.06	0.02	13.03	13.07	0.31
9	100	0.04	0.40	0.15	0.06	8.71	8.71	0.00
10	100	0.06	0.60	0.09	0.02	14.50	14.51	0.07
11	100	0.09	0.20	0.06	0.12	22.00	21.77	- 1.00
12	100	0.12	0.30	0.03	0.09	43.67	43.54	- 0.30
13	150	0.04	0.60	0.06	0.09	30.47	30.48	0.03
14	150	0.06	0.40	0.03	0.12	61.08	60.96	- 0.20
15	150	0.09	0.30	0.15	0.02	12.19	12.19	0.00
16	150	0.12	0.20	0.09	0.06	20.51	20.32	- 0.93
I_j	6.19	15.02	14.98	35.77	13.00			
II_j	13.27	21.37	17.67	17.90	15.35			
III_j	22.22	16.08	21.72	11.95	20.86			$j = 1, 2, 3, 4$
IV_j	31.06	19.91	18.37	7.14	23.56			
极差	24.87	6.71	3.35	28.63	10.56			

1) 表中变量单位同表 1

表 4 最佳动力学参数与相应的 HRT¹⁾

K	μ_m	m	Y_G	K_s	T
0.15	0.60	0.02	0.12	10	2.43

1) 表中变量单位同表 1

表 5 各参数对 HRT 的影响¹⁾

K	T	μ_m	T	Y_G	T	K_s	T	m	T
0.03	12.16	0.2	2.43	0.04	2.44	10	2.43	0.02	2.43
0.06	6.08	0.3	2.43	0.06	2.44	50	5.21	0.06	2.43
0.09	4.05	0.4	2.43	0.09	2.43	100	8.69	0.09	2.43
0.15	2.43	0.6	2.43	0.12	2.43	150	12.16	0.12	2.43

1) 表中变量单位同表 1

在微生物动力学因素变化范围内, 对确定的最佳动力学数组, 改变其中某一参数, 观察其对 HRT 的影响, 结果分别见表 5.

表 5 表明, K 和 K_s 的变化对 HRT 影响较大, K 值增大(0.03→0.15), T 值减小(12.16→2.43); K_s 值增大(10→150), T 值增大(2.43→12.16), 其中 K_s 值是由所采用的微生物和底物种类决定的. 对于易降解底物, K_s 值较低; 对于难降解底物, K_s 值较高^[6], 这与计算结果相吻合. K 值是由污泥活性决定, 污泥活性强, K 值高. 由此可见, 膜生物反应器的活性污泥应保持一定活性, 不能过大地加大 SRT, 以防污泥老化. μ_m , m , Y_G 的变化对水力停留较小, 在简化方程(15) 时, 可忽略它们对 HRT 影响.

3.2 运行因素

式(15) 中运行因素 L_0 , L , S_0 和 R 受人为因素控制. 其中 L_0 , L 与有机物去除率有关, 现假定 $L_0 = 500\text{mg/L}$ (BOD), 有机物去除率为 95%, 进行 S_0 与 R 对膜生物反应器 HRT 影响分析, 膜生物反应器系统回流污泥浓度 S_0 变化范围为 1000~ 3000mg/L (以 VSS 计), 回流比 R 变化范围为 10~ 20^[9,10], 在确定其它参数为表 4 所示最佳动力学数据情况下, 探讨 S_0 与 R 分别对 HRT 的影响, 见表 6.

表 6 所示数据表明, 随着 R 和 S_0 增大, T 都同时减小, 其中 S_0 影响较大, 而 R 影响较小. 由于膜生物反应器 R ($R = 10\sim 20$) 比传统活性污泥法 R ($R = 0.25\sim 0.5$) 大, 其曝气池污泥浓度几乎与回流污泥浓度相同. 因此, 为提高膜生物反应器处理效率, 可以适当加大曝气池

污泥浓度,同时,为保证一定膜面流速,以防膜被堵塞,应适当增大回流量.但回流量过大,也会造成能耗过大,运行成本过高的后果,采取多大的回流量经济可行,值得探讨.

表 6 S_0 与 R 分别对 HRT 的影响

$S_0/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1000	1500	2000	2500	3000
T/h	4.85	3.24	2.43	1.95	1.62
R	10	12	14	16	18
T/h	2.43	2.40	2.38	2.35	2.34

4 HRT 公式的简化

HRT 公式(15)比较复杂,为了实用,需对其进行简化.由于 μ_m , m , Y_G 和 R 对其影响较小,将它们以常数 $\mu_m = 0.4$, $m = 0.08$, $Y_G = 0.06$, $R = 16$ 代入,然后将其简化为如下式:

$$T = \frac{1.1 \times (\frac{1}{\beta} - 1)(K_s + L)}{K S_0}$$

(16)

式中, β 为处理后有机物浓度和处理前有机物浓度之比, L/L_0 ; L 为反应器出水有机物浓度.其余变量意义同式(15).

为了评价简化公式(16)的正确性,将 L_{16} (4⁵) 正交表中的数据分别代入式(15)和式(16),在保证出水有机物浓度为 25mg/L,去除率为 95%的前提下,求出各自 HRT 及其简化后的偏差,见表 3.其中 T 和 T' 分别为式(15)和式(16)的 HRT 计算结果.从表 3 结果可见,简化式(16)与原式(15)计算结果非常接近,偏差在- 1.00% —0.41% 之间变化.

5 简化公式参数的确定

简化公式中 K , K_s 为待测参数,其参数值主要由污水和微生物种类决定,对不同种类污水可采用实验确定.笔者根据膜生物反应器净化石油化工废水的研究结果,采用解联立方程求平均值方法,确定式(16)中的 K_s 和 K .发现全部数据拟合性差,而某些阶段数据拟合程度好.这与石油化工废水为多种水源废水,来水水质不稳定,水质十分复杂有关^[9],所求参数与拟合结果见表 7.

表 7 HRT 公式参数值¹⁾

实验日期/月-日	K_s	K	HRT 公式
03-17- 03-22	21.74	0.075	$T = 14.66(1/\beta - 1)(L + 21.74)/S_0$
04-10- 04-14	7.6	0.02	$T = 55(1/\beta - 1)(L + 7.6)/S_0$
06-02- 06-13	45.5	0.06	$T = 18.34(1/\beta - 1)(L + 45.5)/S_0$

1) 公式中 L 和 S_0 单位分别为 mg/L (以 COD 计)和 mg/L (以 VSS 计)

6 结论

- (1) 在微生物动力学因素中,对膜生物反应器处理效率影响程度由大到小的排列排序为: $K > K_s > m > Y_G > \mu_m$,膜生物反应器的活性污泥应保持一定活性,不能过大地加大污泥停留时间,以防污泥老化.
- (2) 在运行因素中,曝气池污泥浓度与 R 对 HRT 有影响,其中曝气池 S_0 比 R 影响程度大,在膜生物反应器系统中适当加大污泥回流量,有利于污染物的去除.
- (3) 膜生物反应器 $HRT = 1.1 \times (1/\beta - 1)(K_s + L)/K S_0$,其中 K , K_s 为待测参数.对不同种类污水,它们的值不同,需实验确定.

参 考 文 献

1 樊耀波,王菊思.水和废水处理中的膜生物反应器技术.环境科学,1995,16(5):79-81

2 范晓军.膜生物反应器技术及其在污水回用处理中的应用.清华大学博士论文.1995:12

3 汪诚文.膜-好氧生物反应器处理生活污水的试验研究.给水排水.1996(12):18-21

4 高廷耀编.水污染控制工程(下册).北京:高等教育出版社,1989:267

5 顾夏声.废水生物处理数学模式.北京:清华大学出版社,1993:46

6 许保玖.当代给水与废水处理原理.北京:高等教育出版社,1990:327,325

7 美)格雷迪.CP,小莱斯利等,李献文等译.废水生物处理理论与应用.北京:中国建筑工业出版社,1989:213,237-329

8 George Tchobanoglous. Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse. USA: McGraw-Hill Book Company. 1979: 411-428

9 樊耀波,王菊思.膜生物反应器净化石油化工废水的研究.环境科学学报,1997,17(1):68-74

10 Chart C. Performance of membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment. Journal of membrane science, 1994, 87(1):119-129

azo-dye aqueous solutions. The photodegradation products of phenol were also determined.

Keywords: photochemistry, photodegradation, wastewater treatment, oil refinery wastewater, coking industry wastewater, phenol.

The Preliminary Study on The Mechanism of Dyes Waste Water Treatment with ACF Electrode

Jia Jinping et al. (Dept. of Applied Chem., Shanghai Jiao Tong Univ., Shanghai, 200240): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 31—34

In this article, a new type of electrode made of ACF to treat several simulated dye waste water was studied. Under the electrolytic voltage ranged from 15V to 25V, all the wastewater's chromaticity removals are near 100%, with COD removals within 30%—80%. And the reaction mechanism were figure out preliminarily by various characterization means such as IR, UV, spectrofluorimetry and TOC. Mainly, it may be that the treating processes involve radical reaction and coagulation simultaneously. The radical reaction can combine several organic molecules by radical coupling, so the larger molecule can be coagulated easily.

Keywords: active carbon fiber, electrode, electrochemistry, dyes waste water, reaction mechanism.

Determination and Discussion of Hydraulic Retention Time in Membrane Bioreactor System

Zhang Shaoyuan, Wang Jusi et al. (Research Center for Eco-Environ. Sci., Chinese Academy of Sci., Beijing 100085): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 35—38

Based on the microorganism kinetic model the formula for computing the hydraulic retention time in the membrane bioreactor system (MBR) is derived, and then influencing factors of MBR are discussed. The results showed that the influencing factors are listed in order from strength to weakness as maximum specific removal rate K , saturation constant K_s , maintenance coefficient m , net bacteria yield coefficient Y_c and maximum specific growth rate μ_m . Finally, the formula is simplified and its simple form is as follows: $T = 1.1 \times (1/\beta -$

$1) (K_s + L) / K S_0$.

Keywords: membrane bioreactor, wastewater treatment, hydraulic retention time, microbial kinetic model, kinetic constant, operation constant.

The Pilot Test of Electrostatics-cyclone Precipitation Technology

Xu Dexuan and Qu Zhihe (Institute of Electrostatics, Northeast Normal University, Changchun 130024): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 39—41

The mechanism of electrostatics-cyclone precipitation technology has been researched in this paper. The pilot demonstration showed that this technology, using to improve the wet cyclone precipitator of power station, can heighten the precipitation efficiency from 92.55% to 98.4%. The precipitation efficiency for different concentration of flue gas is quite stable. When the gas flow is $10600 \text{ Nm}^3/\text{h}$, the resistance is 800—920 Pa and the consumption per unit flow of high voltage power supply is $0.2 \text{ W} \cdot \text{h} / (\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

Keywords: electrostatics-cyclone precipitation technology, wet cyclone precipitation, high voltage power.

A Study of Sulfate Reducing Bacteria in Two Phase Anaerobic Process of UASB Reactors

Zhu Jianrong et al. (Dept. of Environ. Eng. Tsinghua Univ., Beijing 100084): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 42—44

This paper described the properties of numeration and distribution of sulfate reducing bacteria (SRB) in two phase process of UASB reactors. Using Hungate anaerobic technique and MPN determination method, it was showed that SRB of acidogenic phase are $2.0 \sim 5.7 \times 10^6$ cells/ml, and the population of SRB in methanogenic phase are $0.93 \sim 9.3 \times 10^7$ cells/ml. The difference of SRB between acidogenic and methanogenic phase is about 1 order of magnitude. The numeration of SRB in single UASB reactor is similar to that of methanogenic phase. The distributions of SRB exhibited that the bacterial population of acidogenic and methanogenic phase are 7.5×10^5 and 4.3×10^5 in upper layer of suspended mixed liquids, and 2.5×10^6 and 2.5×10^7 cells/ml in lower layer of anaerobic sludge, re-