

生物转盘数学模式研讨

刘长松 周春生

(吉林建筑工程学院, 长春 130021)

摘要 为探求能够确切反映转盘净化反应实质及其影响因素且简便实用的数学模式, 本文根据物料平衡原理和莫诺特 (Monod) 关系式建立了形如 $A/Q(L_{n-1} - L_n) = 1/P + K_s/PL_n$ 的转盘数学模式, 利用处理生物制品废水的生产性四级转盘系统的试验数据确定出各级转盘的 P 、 K_s 、 Y 、 μ_{max} 、 X_f 等动力学参数值, 并对此数学模式及其动力学参数进行了分析。认为该数学模式可作为转盘的设计公式, 它揭示了转盘净化废水的实质及影响因素, 比以往的经验公式更简单实用。建议在设计处理生物制品废水或与其类似废水的生物转盘时, 采用文中的数学模式及动力学参数值。

关键词 生物转盘, 数学模式, 动力学参数。

自从 1954 年世界上第一座半生产性生物转盘装置在前联邦德国海尔布隆 (Heilbronn) 城污水厂建成以来, 污水的生物转盘处理技术得到了迅速的发展和越来越广泛的应用。令人遗憾的是, 迄今为止生物转盘的设计计算仍沿用经验公式法或负荷法。前联邦德国斯图加特工业大学的勃别尔 (F. Popel) 教授提出的求定转盘总面积的经验公式是生物转盘设计计算中应用较早和在国外引用较多的公式。继勃别尔之后, 署斯特 (Joost)、安东尼 (Antonie)、维奇 (Welch) 等人也提出了一些经验公式, 但这些公式都太繁琐, 且有的误差较大。国内在设计生物转盘时采用按 BOD_5 面积负荷计算盘片面积, 再以水力负荷或废水停留时间校核的方法, 这种方法虽简单但比经验公式法还显粗糙, 更无法满足工程上的需要。为此, 本文将通过生物转盘法处理生物制品废水的试验研究, 探讨转盘数学模式的建立过程与动力学参数的确定方法, 并对此模式与参数进行理论分析。

一、试验装置与方法

试验装置是长春生物制品研究所污水站中的生物转盘。这是一台双轴四级生物转盘, 每级转盘盘片数为 60, 盘片直径 3m, 间距 3cm, 材质为聚脂玻璃钢; 转盘转速为 2r/min, 线速度为 18.84m/min, 水力负荷 $0.08\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, 废

水停留时间 2h, 接触反应槽内水温 $19-21^\circ\text{C}$ 。

本试验装置的进水流量为 $260.9\text{m}^3/\text{d}$, 水质 $\text{COD} (\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)$ 271.1mg/L 、 BOD_5 162.6mg/L 、挥发酚 9.10mg/L 、pH 值 6.55。

水样的采集与分析 在整整一年期间内, 我们逐月在各级转盘的进、出口处采集水样数次, 分析测定的项目有 COD 、 BOD_5 、挥发酚、 DO 、pH 等。

生物膜的采集与测定 分别在各级转盘的盘片上刮取一定面积的生物膜, 测定其厚度、密度、挥发分、生物浓度等项指标。

二、结果与分析

1. 生物转盘数学模式的建立

在生物转盘内 (图 1), 由于盘片不断转动, 接触反应槽中的污水能够得到较好的混合, 因此可以将每级转盘都视为一个完全混合反应器。那么, 根据物料平衡原理, 对于稳定状态下的生物转盘则有下式成立^[1]。

$$QL_0 = QL_c + \frac{dL}{dt}V + \left(\frac{dL}{dt}\right)_m V_m \quad (1)$$

式中, Q ——进水流量;

L_0 ——进水基质浓度;

L_c ——出水基质浓度;

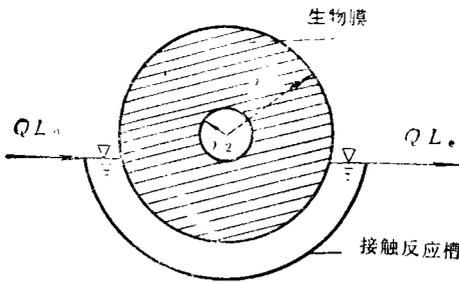


图 1 生物转盘示意图

$\frac{dL}{dt}$ ——单位体积附着生物膜(简称生物

膜,下同)利用基质的速率;

V ——生物膜的体积;

$\left(\frac{dL}{dt}\right)_m$ ——单位体积悬浮生物固体利用

基质的速率;

V_m ——接触反应槽的有效容积。

引入莫诺特(Monod)关系式并进行推导,对于第一级生物转盘有下式存在。

$$\frac{A}{Q(L_0 - L_1)} = \frac{1}{P} + \frac{K_s}{P} \cdot \frac{1}{L_1} \quad (2)$$

式中, A ——转盘浸湿面积;

L_0 ——第一级转盘进水基质浓度;

L_1 ——第一级转盘出水基质浓度;

K_s ——饱和常数;

$$P = \frac{\mu_{\max} X_f d}{Y}$$

μ_{\max} ——生物膜的最大比增长速率;

X_f ——单位体积生物膜的活性生物量,也称膜的生物浓度;

d ——生物膜厚度;

Y ——生物膜的增长常数。

对于第 n 级转盘,下式成立。

$$\frac{A}{Q(L_{n-1} - L_n)} = \frac{1}{P} + \frac{K_s}{P} \cdot \frac{1}{L_n} \quad (3)$$

式中, L_{n-1} ——第 $n-1$ 级转盘出水(即第 n 级转盘进水)中基质浓度;

L_n ——第 n 级转盘出水中基质浓度;其他符号意义同前。

式(2)是(3)的一个特例($n=1$),所以可以把式(3)视为生物转盘的数学模式。

2. 生物膜的厚度、生物浓度及水质污染指标测定值

为了根据试验确定转盘数学模式中的动力学参数值,必须测定各级转盘的生物膜厚度、生物浓度及进出水中的污染指标值。我们采用体积-面积折算法测定各级转盘生物膜的平均厚度。因刮取生物膜的面积是已知的,所以只要测定出其体积便可以根据下式计算出膜的平均厚度 d 。

$$d = \frac{V}{S} \times 10^4 (\mu\text{m})$$

式中, V ——生物膜体积 (cm^3);

S ——生物膜面积 (cm^2)。

各级转盘生物膜的厚度示于表 1 中。

表 1 生物膜厚度的测定值(平均值)

转盘级数	1	2	3	4
膜厚度 (μm)	886.49	757.92	706.91	668.17

表 2 生物膜密度、挥发分与生物浓度

转盘级数	1	2	3	4
指标				
密度 (mg/L)	53.57	39.94	34.44	33.71
挥发分 (%)	65.46	71.39	72.57	73.95
生物浓度 (mg/L)	35066.92	28513.17	24993.11	24928.55

我们以单位体积生物膜内的挥发性固体量表示膜的生物浓度 (X_f), 单位为 mg/L 。为了确定各级转盘生物膜的 X_f 值, 分别测定了各级转盘生物膜的密度和挥发分。挥发分是指生物膜内的挥发性固体与总固体重量的百分比。这样, 根据密度和挥发分就可以计算出膜的生物浓度。各级转盘生物膜的密度、挥发分与生物浓度见表 2。

根据试验结果, 各级转盘进、出水中的主要污染指标值示于表 3 中。

3. 转盘数学模式动力学参数的确定

我们以 BOD_5 表示转盘系统中的基质浓

表 3 转盘进出水中主要污染指标测定值

级 数	水样种类	BOD ₅ (mg/L)	COD (mg/L)	挥发酚 (mg/L)
1	进 水	162.6	271.1	9.10
	出 水	97.1	184.8	2.29
2	出 水	65.3	136.3	0.89
3	出 水	41.7	102.8	0.55
4	出 水	24.0	79.6	0.42

度。这样,根据式(3)和各级转盘的盘片有效面积 A 、流量 Q 、第一级转盘进出水 BOD₅ (L_0 和 L_1) 的几组平行试验数据,作 $1/L_1$ 与 $A/Q(L_0 - L_1)$ 的关系图(图 2), 并求定线性回归方程, 确定第一级转盘的 P 与 K_s 值。同理, 可以求出其他级转盘的 P 与 K_s 值(见图 3、4、5)。表 4 示出了以 BOD₅ 为基质浓度的长春生物制品所四级转盘系统中各级转盘的数学模式及其 P 、 K_s 值。

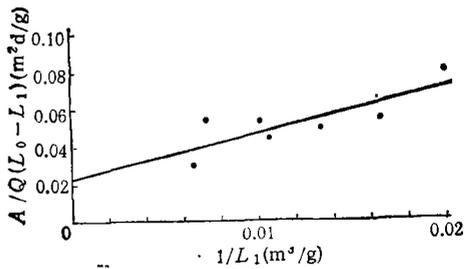


图 2 第一级转盘 $1/L_1$ 与 $A/Q(L_0 - L_1)$ 关系图
 $A/Q(L_0 - L_1) = 0.0220 + 2.39/L_1$
 $r = 0.800$

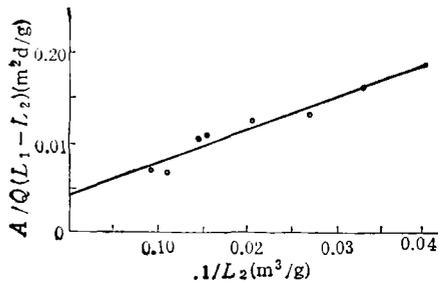


图 3 第二级转盘 $1/L_2$ 与 $A/Q(L_1 - L_2)$ 关系图
 $A/Q(L_1 - L_2) = 0.0439 + 3.54/L_2$
 $r = 0.959$

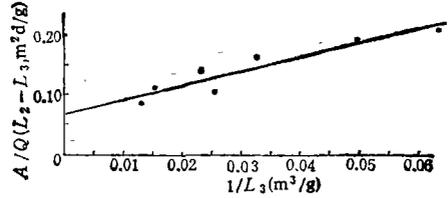


图 4 第三级转盘 $1/L_3$ 与 $A/Q(L_2 - L_3)$ 关系图
 $A/Q(L_2 - L_3) = 0.0688 + 2.38/L_3$
 $r = 0.974$

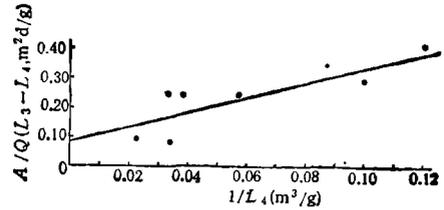


图 5 第四级转盘 $1/L_4$ 与 $A/Q(L_3 - L_4)$ 关系图
 $A/Q(L_3 - L_4) = 0.0841 + 2.55/L_4$
 $r = 0.854$

表 4 各级转盘的数学模式及 P 、 K_s 值

级数	数学模式	P (g/m ² ·d)	K_s (mg/L)
1	$A/Q(L_0 - L_1)$ $= 0.0220 + 2.39/L_1$	45.5	108.9
2	$A/Q(L_1 - L_2)$ $= 0.0439 + 3.54/L_2$	22.7	80.4
3	$A/Q(L_2 - L_3)$ $= 0.0688 + 2.38/L_3$	14.5	34.5
4	$A/Q(L_3 - L_4)$ $= 0.0841 + 2.55/L_4$	11.9	30.3

由于 $P = \mu_{\max} X_1 d / Y$, 故 P 在转盘数学模式中为一项综合性参数。又因 X_1 、 d 是试验中的测定数据, 为确定数学模式中的所有动力学参数, 有必要计算 Y 与 μ_{\max} 值。

生物膜的增长常数 Y 可以用下式表示:

$$Y = \frac{dX}{dt} / \frac{dL}{dt}$$

这就是说, 生物膜的增长常数是膜的增长速率与其利用基质速率之比。生物膜的增长速率 dX/dt 可以通过各级接触反应槽内挥发性悬浮固体浓度 (VSS) 增长量与相应的污水停留时间之比而求得。接触反应槽内的 VSS 随转盘级数的增加而增大, 如在本试验研究中, 第一级至

第四级转盘槽内的 VSS 依次是 39.2、56.4、65.8、74.4mg/L。生物膜利用基质 (BOD₅) 的速率 dL/dt 可以由各级接触反应槽内的 BOD₅ 逐级减小量与相应的污水停留时间之比而求得。第一至第四级转盘出水中的 BOD₅ 分别为 96.4、65.3、41.7、24.0mg/L (见表 3), 污水在每级转盘内的停留时间为 0.5h。于是, 我们就可以求得生物膜增长常数 Y 的平均值^[2]。经计算 (见表 5), Y 的平均值为 0.48。

表 5 转盘系统的 Y 值

级间关系	1-2	2-3	3-4	1-3	1-4	2-4	平均值
$\frac{dX}{dt} / \frac{dL}{dt}$	0.55	0.40	0.49	0.49	0.49	0.44	0.48

生物膜的最大比增长速率 $\mu_{max} = PY/X_1d$, 式中的 d 与 X_1 可以分别取表 1 中膜厚度和表 2 中的膜生物浓度值, P 值在表 4 中已示出, 这样, 各级转盘的 μ_{max} 值便可以确定。表 6 列出了四级转盘的动力学参数值。

表 6 四级转盘动力学参数测定值

级数	饱和常数 K_s (mg/L)	P (g/m ² d)	生物膜增长常数 Y	膜的最大比增长速率 μ_{max} (d ⁻¹)	膜生物浓度 X_1 (mg/L)
1	108.9	45.5	0.48	0.70	35 066.92
2	80.4	22.7	0.48	0.50	28 513.17
3	34.5	14.5	0.48	0.39	24 993.11
4	30.3	11.9	0.48	0.34	24 928.55

4. 对转盘数学模式及其动力学参数的分析

(1) 转盘数学模式 转盘数学模式 (3) 是根据物料平衡原理和莫诺特关系式建立起来的, 式中左侧一项 $A/Q(L_{n-1}-L_n)$ 是盘面 BOD₅ 去除负荷率的倒数, 右侧中的 $P = \mu_{max}X_1d/Y$, 所以式 (3) 揭示了转盘系统中每级转盘的 BOD₅ (基质) 去除负荷率与出水中的 BOD₅ (基质) 浓度、饱和常数、生物膜的最大比增长速率、增长常数、生物浓度、膜厚度间的内在联系, 它比以往的经验公式更确切地反映了转盘净化污水的实质及其影响因素。这一数学模式的应用, 有可能使生物转盘的设计计算进入深层次阶段, 即有可能由以往的按经验公式计算进入按理论

公式计算阶段。在设计生物转盘时, 只要获得各级转盘的 P 和 K_s 值资料, 就可以根据进水流量、基质浓度和所要求的出水基质浓度, 利用此数学模式确定各级转盘的盘片面积。反之, 若假定盘片面积, 那么根据已知条件还可以确定各级转盘的出水基质浓度。由此可见, 与国外众多繁琐的经验公式相比, 这一数学模式显得更简单、更实用。

(2) 动力学参数 从表 6 中可以看出, 除 Y 外, 各级转盘的其他动力学参数 K_s 、 P 、 μ_{max} 及 X_1 的数值都是不断变化的。这些参数值均随转盘级数的增加而减小。追根溯源, 这种变化趋势是由各级转盘接触反应槽内有机污染物浓度逐级降低所造成的。

我们知道, 废水中的基质 (有机物) 浓度在一定范围内, 其浓度越高, 微生物的代谢速率也越快, 单位体积内的微生物数量也会越大, 反之也成立。所以在转盘系统中当有机污染物浓度逐级降低时, 微生物的代谢速率、单位体积生物膜内的微生物数量也逐级降低, 这必然导致生物膜的最大比增长速率 μ_{max} 与生物浓度 X_1 均逐级降低。

饱和常数 K_s 的定义是对应生物膜比增长速率为最大比增长速率一半时的有机物浓度。于是, 转盘内的有机物浓度逐级降低势必引起 K_s 值逐级减小。

生物膜厚度与废水中有机物浓度呈正增长关系, 即废水中有机物浓度越高, 有机物所能扩散的深度也越大, 膜内微生物生长也就越旺盛, 因此可以维持较厚的生物膜^[3]。在转盘系统内, 废水中有机物浓度逐级降低, 故各级转盘的生物膜厚度依次减小。

根据上述分析, 转盘系统中的 μ_{max} 、 X_1 、 d 值均逐级减小, 而生物膜增长常数 Y 为一常数, 所以 $P(\mu_{max}X_1d/Y)$ 值必定逐级减小。

由试验结果可以看出, 生物转盘法处理生物制品废水是行之有效的。我们建议在长春生物制品所处理生物制品废水的生物转盘扩建或设计处理与该所相类似废水的转盘时, 采用表

(下转第 51 页)

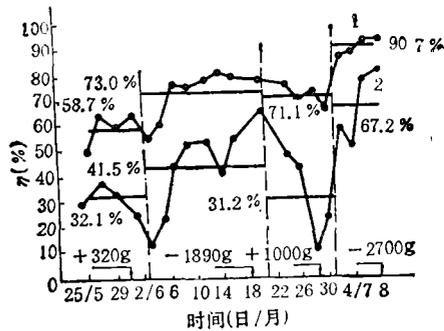


图 4 凤眼莲不同放养量与 COD 去除率的变化

1. 总去除率(停留 7 天) 2. 兼性塘去除率(停留 2.33 天)

“+”表示加入凤眼莲; “-”表示取出凤眼莲;

图中数字表示 COD 平均去除率; 试验平均气温 24.9 °C

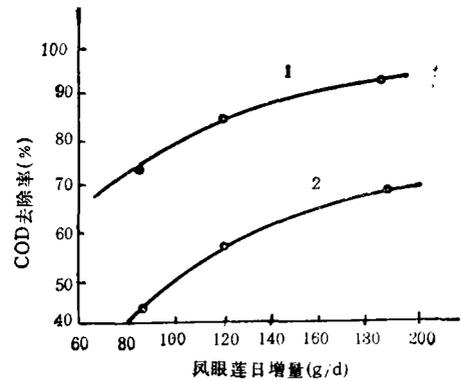


图 5 凤眼莲日增长量与 COD 去除率关系

1. 总去除率 2. 兼性塘去除率

塘、兼性塘组成的工艺系统, 处理土霉素、庆大霉素制药废水, 将处理水用于灌溉是可行的。当停留时间为 7—11d 时, COD 去除率夏季达 76.6%, 冬季可达 47%。

2. 以厌氧塘为主体的处理工艺, 具有占地面积小, 有机去除负荷随进水负荷的升高而升高, 削减 COD 能力强的特点。本研究中, 夏季厌氧塘削减 COD 负荷达 $150\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 。

3. 气温、有机负荷、pH 等是影响稳定塘效果的重要因素。本文初步探讨了这些因素对稳定塘处理效果的简单影响规律。

(上接第 32 页)

4 中的数学模式或表 6 中的动力学参数值。

三、结 论

1. 生物转盘数学模式 [式(3)] 可作为转盘的设计公式, 它揭示了转盘净化废水的实质及影响因素, 此数学模式比以往众多繁琐的经验公式更简单、更实用。

2. 生物转盘数学模式中的各项动力学参数值均可通过试验确定。除膜增长常数外, 其余每项参数值在各级转盘中都是不等的, 且均随

4. 预沉池-两级厌氧塘-兼性塘-明渠农灌工艺具有省地、省投资、省运行管理费的特点, 适于处理干旱地区以有机工业废水为主的中小城镇污水。

参 考 文 献

- 1 李献文等编. 城市污水稳定塘设计手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 47—49
- 2 [美] E.J. 米德尔布鲁克斯等著, 杨文进, 张选译. 稳定塘的设计与运行. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 89—90
- 3 张希衡, 金奇庭. 化工环保. 1987, (75): 275

级数的增加而减小。

3. 建议在设计处理生物制品废水或与其类似废水的生物转盘时, 采用表 4 中的数学模式或表 6 中的动力学参数值。

参 考 文 献

- 1 顾夏生. 废水生物处理数学模式. 北京: 清华大学出版社, 1982: 153—158
- 2 J H Clark et al. J. WPCF 1978, 50: 900
- 3 郑元景等. 生物膜法处理污水. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 183

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

region, loess plateau, Shanxi province, that only the content of Se, one of the nine essential elements detected by X-ray in the children's hair shows a significant negative correlation with the percentage of incidence of the disease among neighbouring villages. The average Se content in human hair of disease point is lower than that of the people living in disease free areas at home and abroad. through the study on different types of soil and water in the environment of various topography, the cause for the distribution of light, medium and severe points of incidence and the low Se level in human body were explained. All of the results mentioned above provide a new scientific basis for the hypothesis that the incidence of K. B. D is related to the low level of Se resulted from the low Se environment through food chain.

Key words: micro-environment, micro-topography, food-chain, selenium, Kaschin-Beck disease.

Study on the Fundamental Characteristics of Activated Sludge fortified with Powdered Activated Carbon. Zhu Hui, Zhang Lindi et al. (Environmental Protection Reseach Institute, Shanghai Petrochemical Complex 200540): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(6), 1992, pp.23—28

The results of experiments on the fundamental characteristics of activated sludge (AS) fortified with powdered activated carbon (PAC) are presented. PAC does not adsorb ammonia-nitrogen and COD adsorptive capacity of PAC is only 0.0148—0.2305g COD/gPAC. However the reaction rate coefficient K of AS-PAC system is 2.33 times as great as that of PAC and 1.4 times as great as that of AS. respectively. The absolute amount of COD removed in AS-PAC is more than the sum of that in AS and PAC, so the removal rate of organics in biological treatment system is improved remarkably. In addition, 1mg PAC and absorb 0.5—0.75mg dissolved oxygen. When the ratio between PAC concentration and AS concentration is 1 to 2, sludge volume index (SVI) can be reduced from 389ml/g for AS to less than 200ml/g. After being coagulated with alkali aluminum chloride the sludge containing 1.5g/L

PAC shows only 25% specific resistance and a doubled filtration yield as compared with sludge without PAC. Various advantages brought by the addition of PAC in AS provide the basis for the development of treatment process and its practical application.

Key words: activated sludge, powdered activated carbon, COD removal, biological treatment.

A Study on Mathematical Modeling for Biological Rotating Contactor. Liu Changsong, Zhou Chunsheng (Jilin Architectural and Civil Engineering Institute Chang Chun 130021): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(6), 1992, pp 29—33 Based on material balance and Monod's relation, an expression, $A/Q(L_{n-1} - L_n) = 1/p + k_i/pL_n$, is derived to actually represent the mathematical model and the related parameters for biological rotating contactor (BRC). Kinetic parameters, $p, k_i, Y, \mu_{max}, X_f$, etc were decided by the experimental data of treatment of biological product wastewater using four stage BRC. Moreover, the derived expression and parameters are evaluated in this paper. It is suggested that the expression, which reveals the theory and related factors of BRC process, and the parameters be used for the design of BRC for biological product or similar wastewater treatment.

Key words: biological rotating contactor (BRC), mathematical model, kinetic parameter.

Effect of Influent Strength on Granulation of Sludge in UASB Reactor. Zhu Jianrong, Xia Xiaohong et al. (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua University Beijing 100084): *Chin. J. Environ. Sci.*, **13**(6), 1992, pp33—38 Using synthetic glucose wastewater, the effect of influent strength on granulation of sludge in UASB reactor was investigated. Results show that granulation could be well achieved in an operational period of 2 months or more, when UASB reactor was directly fed with high strength influent of 9000 mg/L COD. The granular sludge were 1.0—2.5mm (mostly 2.0mm) in diameter, SVI 16.03ml/g. The organic loadings of UASB reactor reached 30.8kg