

半推流式活性污泥系统反应动力学分析

田 刚(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037, E-mail: nercuepc@public.bta.net.cn)

摘要: 从生物反应动力学、出口年龄分布函数和抗冲击负荷能力方面, 分析讨论了一种新型复合式活性污泥系统——半推流式系统。工程应用实例结果说明, 该系统具有处理深度大、抗冲击负荷强、不易发生污泥膨胀等优点, 适合于工业废水的治理。

关键词: 活性污泥, 废水处理, 冲击负荷, 动力学, 污泥膨胀。

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)02-0081-05

Kinetics of the Semi-Plug Flow Reactor Activated Sludge System

Tian Gang(Beijing Municipal Research Academy of Environmental Protection, Beijing 100037, China E-mail: nercuepc@public.bta.net.cn)

Abstract: The new composite activated sludge system named Semi-plug flow reactor was discussed with the analyses of biological reaction kinetic, exit age distribution function and antishock-load capability. The results showed that the system has high organism removal efficiency and better antishock-load capacity, and the sludge bulge seldom occurs in it. The new activated sludge system is fit for industrial wastewater treatment.

Keywords: activated sludge, wastewater treatment, shock load, kinetic, sludge bulge.

连续流搅拌反应器(Continuous-flow stirred tank reactor, CFSTR)和推流式反应器(Plug-flow reactor, PFR)是常规活性污泥系统中的 2 种典型的生物反应动力学模型。但前者易产生污泥膨胀, 后者抗冲击负荷能力较弱, 故在工业废水处理中受到了一定限制。目前, 在国内外许多工业废水处理工程化应用实践中, 设置生物选择器以防止 CFSTR 污泥膨胀, 以阶段曝气提高 PFR 抗冲击负荷能力, 均为常用的改良手法。

半推流式活性污泥系统(Semi-plug-flow reactor, SPFR)是笔者在工程上多次使用的一种新型复合式动力学模型, 其前段为多点进水的阶段曝气(Multi-system, MS), 后段为 PFR。该系统比 PFR 抗冲击负荷能力强, 比阶段曝气和 CFSTR 处理深度大且不易发生污泥膨胀, 工程实践表明 SPFR 是一种经济高效、操作管理方便、适用于工业废水处理的新技术。本文仅从生物反应动力学、抗冲击负荷能力、抗污泥膨胀性能等方面对 SPFR 系统进行分析比较。

1 动力学模型简介

图 1~3 分别是完全混合式、推流式、半推流式活性污泥系统曝气池及沉淀池工艺的示意图。图中, Q 、 Q_1 为处理水量、剩余污泥量, $(\text{容积}) \cdot (\text{时间})^{-1}$; S_0 为进水有机物(底物)浓度, $(\text{质量}) \cdot (\text{容积})^{-1}$; S_e 为出水有机物浓度, $(\text{质量}) \cdot (\text{容积})^{-1}$; X 为污泥浓度, $(\text{质量}) \cdot (\text{容积})^{-1}$; R 为回流比, 无量纲。

2 反应动力学分析与比较

2.1 CFSTR、PFR 系统反应动力学分析

生物反应动力学主要为生物反应的过程描述。在

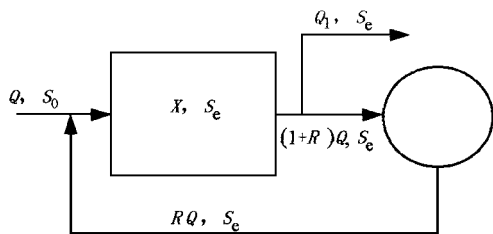


图 1 CFSTR 系统

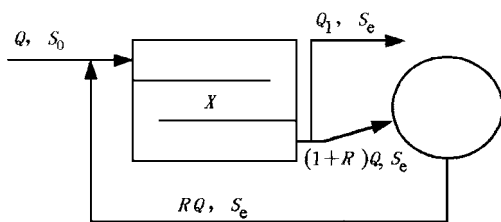


图 2 PFR 系统

污水处理过程中, 普遍关心的是在额定反应时间内(水力停留时间, HRT)的处理深度(去除率), 或是达到一定处理深度时的 HRT, 显然处理深度大和 HRT 短是被期待的。

一般认为生物处理过程中的反应符合一级反应, 即:

$$dS/dt = -K_0 S \quad (1)$$

作者简介: 田刚(1954~), 男, 工学博士, 研究员, 北京市环境保护科学研究院副院长, 主要研究方向为工业废水治理技术的研究和工程化应用。

收稿日期: 1999-06-14

式中, K_0 为反应常数, $(\text{时间})^{-1}$; S 为任意时间 t 内的反应物浓度, $(\text{质量}) \cdot (\text{容积})^{-1}$.

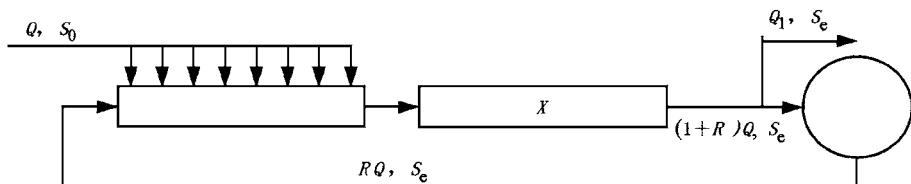


图3 SPFR 系统

在化学工程中, 对于理想的CFSTR和PFR系统, 动力学反应式有: $T_c = K_0^{-1} (S_0/S_e - 1)$ (2)

$$T_p = K_0^{-1} [\ln(S_0/S_e)] \quad (3)$$

式中, T_c, T_p 为HRT.

对于理想的CFSTR活性污泥系统, 在环境工程界被广泛应用的动力学反应式有:

$$T_c = (KX)^{-1} (S_0/S_e - 1) \quad (4)$$

式中, K 为反应常数, $(\text{质量})^{-1} \cdot (\text{容积}) \cdot (\text{时间})^{-1}$; X 为污泥浓度, $(\text{质量}) \cdot (\text{容积})^{-1}$.

对于理想的PFR活性污泥系统, 可以借用式(2)和式(4)的形式写出动力学反应式有:

$$T_{PA} = (KX)^{-1} [\ln(S_{0A}/S_e)] \quad (5)$$

但值得提出的是, 由于活性污泥系统存在着污泥回流, 式(4)和式(5)的HRT具有不同的定义. 可以证明式(4)中的 T_c 和污泥回流比无关, 为常规意义上的停留时间(V/Q). 而对于PFR系统来讲 $T_{PA} = (V/Q)/(1+R)$, $S_{0A} = (S_0 + RS_e)/(1+R)$, 才能符合PFR系统的实际情况. 这里 S_{0A} 为进入PFR系统初始时间的底物浓度, S_0 为原水中的底物浓度. 带入式(5)有:

$$T_p = (1+R)(KX)^{-1} \ln[(S_0 + RS_e)/(S_e + RS_e)] \quad (6)$$

同时, 由式(4)和式(6)可以得出: 污泥浓度增加, 停留时间可以减少. 但实际工程应用中, 污泥浓度在一

定范围内对反应过程影响不大. 考虑到分析问题的方便, 在本文以下公式中, 假设污泥浓度、污泥增长率、反应速率、反应温度等均为常数, 即各公式中的 (KX) 值均相等.

图4为达到不同底物去除率时, 按式(4)和式(6)所计算得出的PFR与CFSTR反应时间比值(T_p/T_c)的关系图(理论值). 从图4中可以看出, 达到同一去除率的反应时间前者明显低于后者, 降低幅度随去除率的增加和回流比的减小而变大. 可见PFR在反应动力学方面明显优于CFSTR.

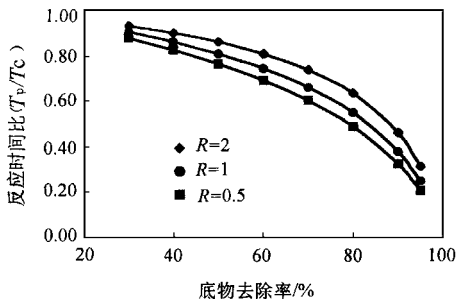


图4 反应时间比值对比

2.2 MS 系统反应动力学分析

为了分析MS的动力学模型, 可以将其视作足够多个容积相等、进水水量相同的CFSTR串联, 首先考虑独立的MS系统MS0, 如图5所示.

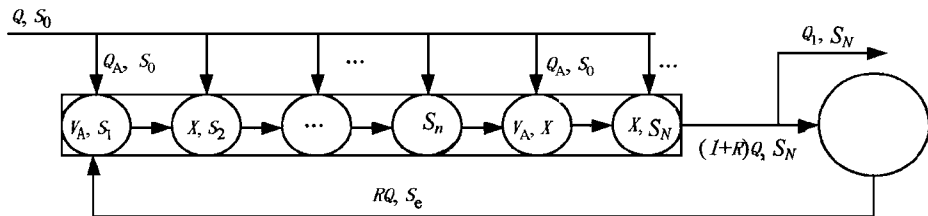


图5 MS0 系统

在稳态条件下分别写出第一级到第 N 级每级曝气池底物利用率和微生物增长率的物质平衡方程为:

$$QAS_0 + RQS_e - (dS/dt)_1 V_A - Q(1/N + R)S_1 = 0 \quad (7)$$

$$QAS_0 + Q(1/N + R)S_1 - (dS/dt)_2 V_A -$$

$$Q(2/N + R)S_2 = 0 \quad (8)$$

...

$$QAS_0 + Q[(n-1)/N + R]S_{n-1} - (dS/dt)_n V_A - Q(n/N + R)S_n = 0 \quad (9)$$

...

$$Q_A S_0 + Q[(N - 1)/N + R] S_{N-1} - (dS/dt)_N V_A - Q(N/N + R) S_N = 0 \quad (10)$$

所有 N 个方程相加并令 $N \rightarrow \infty$, 有:

$$\sum_{n=1}^N Q_A S_0 + R Q S_e - \sum_{n=1}^N (dS/dt)_n V_A - Q(N/N + R) S_N = 0 \quad (11)$$

式中, $N Q_A = Q, N V_A = V$ (总容积), 带入式(1)并整理有:

$$Q S_0 + R Q S_e - Q S_N - Q R S_N = \sum_{n=1}^N K X_n S_n V_A \quad (12)$$

如前所述, 在实际过程中污泥浓度在一定范围内对反应过程的影响不大, 按平均浓度(X) 计算结果偏差不大, 并假设各级 K 值相等, 整理式(12)有:

$$Q(S_0 - S_N) + R Q(S_e - S_N) = K X V_A \sum_{n=1}^N S_n \quad (13)$$

此处 $S_N = S_e$, 因此有:

$$Q(S_0 - S_e) = K X V_A \sum_{n=1}^N S_n \quad (14)$$

因为: $S_1 > S_2 > S_3 \dots > S_{N-1} > S_N = S_e$ (15)

以出水底物浓度 S_e 替代每一级的 S_n , 整理式(14)有:

$$Q(S_0 - S_e) > N K X S_e V_A = K X S_e V \quad (16)$$

或: $T_M < (K X)^{-1} (S_0/S_e - 1)$ (17)

比较式(2)可知, MS_0 所需的 HRT 较 CFSTR 少. 实际工程上可以这样认为, MS 系统进水点 N 越多, 反应推动力越小, 越接近于 CFSTR; 当进水点为一个时, 则成为 PFR 系统.

2.3 半推流(SPFR)系统反应动力学分析

SPFR 反应过程由 2 阶段组成, 前段为 MS 系统 MS_s , 后阶段为 PFR. SPFR 的前段以动力学反应式(13)表示:

$$Q(S_0 - S_N) + R Q(S_e - S_N) = K X V_A \sum_{n=1}^N S_n \quad (13)$$

以 S_N 替代每一级的 S_n , 对分析和应用来讲分别是保守和安全的, 因此有:

$$(Q S_0 - S_N) + R Q(S_e - S_N) = K X V S_N \quad (18)$$

或: $T_{S1} = (K X)^{-1} [(S_0/S_N - 1) + R(S_e/S_N - 1)]$ (19)

后阶段以式(5)表示:

$$T_{PA} = (K X)^{-1} [\ln(S_{0A}/S_e)] \quad (5)$$

经分析可知此处: $T_{PA} = (V/Q)/(1 + R), S_{0A} = S_N$, 因此有:

$$T_{S2} = (K X)^{-1} (1 + R) [\ln(S_N/S_e)] \quad (20)$$

式(19)、(20)中, $T_{S1}、T_{S2}$ 分别为 SPFR 前、后段的 HRT, S_N 为前段的出水底物浓度. 显然($T_{S1} + T_{S2}$)为

SPFR 系统总的 HRT; 取 $T_{S1} = T_{S2}$, 有:

$$(S_0/S_N - 1) + R(S_e/S_N - 1) = (1 + R) \ln(S_N/S_e) \quad (21)$$

在相同底物去除率的条件下, 与 CFSTR 系统比较反应时间有:

$$(T_{S1} + T_{S2})/T_c = [(S_0/S_N - 1) + R(S_e/S_N - 1) + (1 + R) \ln(S_N/S_e)] / (S_0/S_e - 1) \quad (22)$$

取 $R = 1$, 带入不同底物去除率的计算结果见图 6. 图 6 中另一条曲线为 PFR($R = 1$)与 CFSTR 的反应时间比值. 可以看出 SPFR 反应动力学条件相比 PFR 略差, 但较 CFSTR 有很大的改善. 当底物去除率为 90% 时, SPFR 和 PFR 所需的反应时间分别为 CFSTR 的 45% 和 38%, SPFR 和 PER 的反应能力相近.

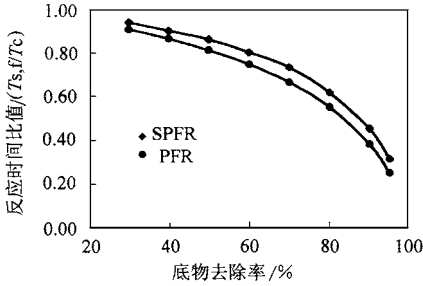


图 6 反应时间比值对照

在实际工程中, 任何系统均不可避免地存在着弥散或反混现象, 因此本文所计算的结果用于工程设计时需加以修正.

3 抗冲击负荷性能分析

3.1 出口年龄分布函数

抗冲击负荷能力指进水中有害物质或有机物浓度突然提高时, 生物处理系统的抵抗能力. 对于推流式系统, 冲击负荷将集中在少量污泥上, 导致该部分污泥处理能力下降, 阶段出水变差, 进而影响整个系统.

处理系统的抗冲击负荷能力可以用出口年龄分布函数描述. 出口年龄分布函数 $E(t)$ 是指随着时间的推移, 反应器排出的示踪物的量与 $t = 0$ 时进入反应器示踪物总量的比值. 将示踪物随进水瞬间注入反应器, 根据出口浓度, 可得脉冲响应曲线, 曲线越低、越平缓, 抗

冲击负荷能力越强. 且有 $\int_0^\infty E(t) dt = 1$ (23)

对于理想过程, CFSTR 及 PFR 系统的分布函数为(推导略): $E_c(t) = (1/T_E) \text{EXP}(-t/T_E)$ (24)

$$E_P(t) = \uparrow \text{脉冲量} \mid_{t=T_E} \quad (25)$$

$$E_P(t) = 0 \mid_{t \neq T_E} \quad (26)$$

式中, T_E 为水力停留时间. 对于 CFSTR 及 PFR 活性

污泥系统而言,不考虑回流污泥中所带回的示踪物量,分布函数中的水力停留时间为:

$$T_E = V/(Q + RQ) = T/(1 + R) \quad (27)$$

3.2 SPFR 系统的(污泥)停留时间

由于冲击负荷是针对微生物所言,分布函数与 HRT 有着密切的关系,SPFR 前段 MS_s 系统的 HRT 不能用常规计算公式得出,因此有必要首先推导出 MS 的 HRT,参见图 5 以 MS_0 为例,对于各级反应器来说有:

$$T_{E1} = (V/N)/(RQ + Q/N) = T/(RN + 1) \quad (28)$$

$$T_{E2} = T/(RN + 2) \quad (29)$$

...

$$T_{En} = T/(RN + n) \quad (30)$$

...

$$T_{EN} = T/(RN + N) \quad (31)$$

取 N 足够大,总停留时间 T_{EM} 为:

$$T_{EM} = \sum_{n=1}^N T/(RN + n) \quad (32)$$

取 $R=1$,解得 $T_{EM} = 0.7T$,此时对于 CFSTR 及 PFR, $T_E = 0.5T$,可知 MS 系统具有更长的污泥停留时间.

3.3 出口年龄分布函数比较

为分析方便,设 CFSTR、 MS_0 、PFR、SPFR 系统的生物反应器体积相同(取单位 1),SPFR 前段 MS_s 的容积取 $1/2$ 单位.当 $t=0$ 时, MS_0 系统反应器内的示踪物浓度与 CFSTR 相同, MS_s 是 CFSTR 的 2 倍.首先分析 MS_0 的分布函数,本讨论中 MS_s 分布函数的规律与 MS_0 相同,只是初始 $E(t)$ 值和分布时间周期分别为 MS_0 的 2 倍和 0.5 倍.设脉冲进水时不考虑输送管廊内的停留时间,在 $t=0$ 时,反应器每个截面进入示踪物的量相同并在瞬时完成混合,取 $R=1$ 为例分析.

参见图 5,在 MS_0 中任意一级(Y 级)到达终点(出口)时均被稀释,其分布函数值为稀释倍数乘初始值:

$$E_Y(t)/E_Y(t=0) = Q_Y/[(1+R)Q] \quad (33)$$

$$E_Y(t)/E_Y(t=0) = Q_Y/(2Q)|_{R=1} \quad (34)$$

任意一点到达终点所需的时间可由式(32)导出:

$$T_{EY} = T_E - \sum_{n=1}^Y T/(RN + n) \quad (35)$$

$$T_{EY} = 0.7T - \sum_{n=1}^Y T/(N + n)|_{R=1} \quad (36)$$

$$= T[0.7 - \sum_{n=1}^Y (N + n)^{-1}] \quad (37)$$

式中, $T = Q/V$,图 7 是 CFSTR、 MS_0 、PFR、SPFR 系统的出口年龄分布函数示意图.从图 7 中可以看出 MS_0

与 CFSTR 抗冲击负荷的能力相差不大,SPFR 虽然不如 CFSTR,但远远强于常规的 PFR.

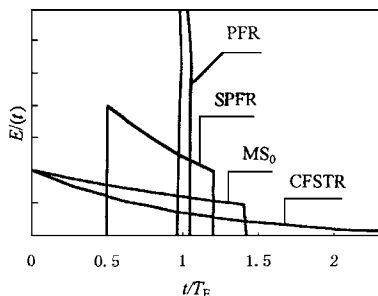


图 7 脉冲响应曲线

4 抗污泥膨胀性能简析

有机负荷过高和过低是造成污泥膨胀的一个重要原因.从进水方式分析,SPFR 前半段的 MS 系统相当于一个生物选择器,因此相对容易产生低负荷污泥膨胀的 CFSTR 系统而言,使有机负荷下限浓度提高了 1 倍.从出口年龄分布函数的分析可知,对于容易由冲击负荷造成污泥膨胀的 PFR 来讲,SPFR 运行稳定、管理方便,具有明显的优势.

5 结论

(1) 反应动力学分析表明,SPFR 活性污泥系统处理效率明显优于 CFSTR 系统,当回流比为 1、底物(BOD)去除率 90% 时,理论上 SPFR 所需的 HRT 仅为 CFSTR 的 45%.

(2) 出口年龄分布函数分析表明,SPFR 系统的抗冲击负荷能力明显强于 PFR 系统.

(3) 理论分析表明 SPFR 系统的复合式动力学特点,使该工艺具有处理深度大、抗冲击负荷强、不易产生污泥膨胀等优点,这些特点已在笔者工程实践中得到验证.实践表明 SPFR 系统是适合治理工业废水的高效技术.

参考文献

- 1 Larry D Benefield 等著,邢建等译. 废水生物处理过程设计. 北京: 中国建筑工业出版社,1984. 13~ 20.
- 2 陈甘棠等编. 化学反应工程. 北京: 化学工业出版社,1990. 50~ 77.
- 3 M· 贝伦斯等著,张继炎等译. 化学反应工程. 北京: 中国石油出版社,1994. 379~ 429.
- 4 田刚等. 乡镇工业废水集中治理效益分析. 上海环境科学,1995, 10: 20~ 24.
- 5 丛者愚等. 可乐生产废水处理工程活性污泥膨胀的控制. 田刚等编. 废(污)水处理工程技术论文集. 北京: 中国环境科学出版社,1998, 148~ 150.