

# 分置式膜-生物反应器处理生活污水的抗冲击负荷能力

孟耀斌, 文湘华, 钱易, 邢传宏 (清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084, E-mail: meng\_yb@mail.cic.tsinghua.edu.cn)

**摘要:** 分置式膜-生物反应器处理生活污水的运行结果表明, 在3倍于正常水平的冲击负荷下, 分置式膜-生物反应器能够正常运行, 膜过滤出水COD维持在 $10\text{mg/L}$ 以下, 生物反应器污泥上清液COD和透膜压力TMP比正常水平略微上升, 但在冲击负荷消除后能够恢复正常水平, 呈现出较强的抗冲击负荷能力. 分置式膜-生物反应器与普通活性污泥法相比, 在冲击负荷下, 其有机物去除速率、污泥浓度都呈现较快增长, 而污泥混合液COD浓度上升幅度较小, 并且在冲击负荷消除后迅速恢复稳态运行. 分析表明分置式膜-生物反应器的强抗冲击负荷能力来自于膜对污泥的完全截流作用. 膜-生物反应器的强抗冲击负荷能力意味着该技术出水水质的安全稳定性和操作简便性.

**关键词:** 分置式膜-生物反应器; 生活污水; 冲击负荷; 稳定性; 有机物去除速率; 抗冲击负荷能力

**中图分类号:** X799.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2000)05-0022-05

## The Anti-Shock Loading Capability of Recirculated Membrane Bio-Reactor for Domestic Wastewater Treatment

Meng Yaobin, Wen Xianghua, Qian Yi, Xing Chuanhong (State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Dept of Environ. Sci & Eng., Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: meng\_yb@mail.cic.tsinghua.edu.cn)

**Abstract:** Under shock loading of triple normal strength Recirculated Membrane Bio-Reactor (RMBR) for domestic wastewater treatment exhibited high stability, the effluent COD concentration maintained normal value while mixed liquor supernatant COD value as well as Trans Membrane Pressure (TMP) showed only slight increase. On contrast to the model for Conventional Activated Sludge (CAS) system, a model for MBR to describe the variations of COD concentration, the biomass concentration and organic removal capability ( $R_o$ ) was established. The models were employed to simulate the operational behaviors of both RMBR and CAS systems. The results agree well with experimental results: RMBR exhibits higher organic removal capability and higher biomass concentration (MLVSS) than CAS does. Mixed liquor supernatant COD concentration of RMBR increases much slower than CAS and recovers to its normal value rapidly after the disappearance of shock loading. The strong anti-shock loading capability and high operational stability of RMBR imply its convenience and endurance in practical operation and the security in treated water quality.

**Keywords:** Recirculated Membrane Bio-Reactor (RMBR); domestic wastewater; shock loading; stability; organic removal rate; anti-shock loading capability

膜-生物反应器是一种将高效膜分离技术与传统活性污泥法相结合的新型水处理反应器系统<sup>[1~3]</sup>. 由于膜的过滤作用, 生物被完全截留在生物反应器中, 实现了水力停留时间与污泥龄的彻底分离<sup>[3]</sup>, 消除了传统活性污泥工艺中的污泥膨胀问题. 由于膜-生物反应器具有对污

染物去除效率高<sup>[4,5]</sup>、硝化能力强<sup>[5]</sup>、出水水质稳定<sup>[1~6]</sup>和设计、操作简化<sup>[6]</sup>等特点, 是一种先

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59878025)

作者简介: 孟耀斌(1974~), 男, 博士研究生, 主要从事水处理技术开发研究.

收稿日期: 1999-12-29

进的废水处理技术, 具有很大的应用潜力. 膜-生物反应器将膜过滤组件与生物反应器整合起来, 以膜过滤代替传统活性污泥法中的沉淀池, 具有出水水质优良, 操作方便等特点.

本文在用分置式膜-生物反应器 (Recirculated Membrane Bio-Reactor, RMBR) 试验装置处理实际生活污水的基础上, 对分置式膜-生物反应器抗冲击负荷的能力进行了探讨.

### 1 实验条件

#### 1.1 试验装置

试验装置主要由 2 部分组成, 即陶瓷膜过滤组件和生物反应器. 生物反应器中的活性污泥混合液由离心泵与膜组件相连接, 形成污泥回流. 膜过滤采用恒定出水流量操作, 整套装置由自动控制系统保证连续正常运行. 实验装置流程图见文献[8].

#### 1.2 试验用膜

试验用无机膜组件为法国 TECH-SEP 公司生产的 KERA SEP 系列管状陶瓷膜. 每根膜有 7 通道, 支撑体为疏松多孔陶瓷材料, 通道内表面为无机氧化锆 ( $ZrO_2$ ) 膜. 单通道直径 4.5mm, 长 40cm, 每根膜膜面积约  $0.04m^2$ . 本试验使用的微滤膜的平均孔径为  $0.45\mu m$ .

#### 1.3 试验条件

试验用生活污水为清华大学北区生活污水, 基本水质情况如表 1.

全部实验共持续 120 余天. 实验条件及运行效果见文献[8].

表 1 试验用生活污水水质/ $mg \cdot L^{-1}$

COD	SS	$NH_3-N$
40~ 850	< 10~ 500	11~ 27

### 2 结果与讨论

#### 2.1 分置式膜-生物反应器处理生活污水的稳定性

由于试验中采用的实际生活污水, 进水水质变化很大, 如进水 COD 有时可达到  $800mg/L$  以上, 形成较大的冲击负荷, 每次冲击负荷大约持续 12~ 48h. 但是, 这样的进水水质恶化并没有引起膜-生物反应器系统运行的恶化. 运行期间几次进水 COD 浓度突然增大的监测结果如表 2 所示. 表 2 所示的是几次在相对稳定进水时突然发生的短期进水水质恶化情形. 表中“正常进水”指的是发生进水水质突然恶化的前后几天平均进水水质和平均运行过膜压力 (Trans Membrane Pressure, TMP).

表 2 若干冲击负荷下监测结果/ $mg \cdot L^{-1}$

正常进水 COD	进水 COD	进水 SS	污泥上清液 COD	出水 COD	正常 TMP/ $\bar{M} Pa$	TMP/ $\bar{M} Pa$
300	849	483	40.82	4.08	0.05	0.06
170	354	180	32.66	8.16	0.01	0.01
340	816	394	20.41	4.12	0.05	0.09
160	734	290	8.16	4.80	0.05	0.07

可见, 在冲击负荷下, 膜过滤出水仍然维持在 COD 浓度  $5mg/L$  左右的正常水平. 生物反应器中污泥混合液上清液 COD 浓度也没有大幅度上升. 但除第 2 种情况外, 过滤阻力 (以过膜压力 TMP 表示) 明显上升, 但是都能够在冲击负荷后恢复到正常的 TMP 值. 整个监测结果表明, 分置式膜-生物反应器处理生活污水具有较强的抗冲击负荷能力和较高的稳定性.

在传统活性污泥法 (Conventional Activat-

ed Sludge System, CAS) 中, 系统的抗冲击负荷 (Shock Loading) 能力差, 当进水水质突然恶化时, 如进水 COD 浓度大幅度升高, 会导致出水水质下降. 在膜-生物反应器中, 由于膜过滤的作用, 出水水质不会出现明显的恶化. 在冲击负荷下, 膜出水与污泥上清液污染物浓度之比  $\alpha$  降低, 从而使得污泥的处理能力增强<sup>[8]</sup>. 但是, 范晓军发现, 在冲击负荷下, 生物反应器上清液中污染物浓度太高, 不利于膜过滤的长期运

行\* . 本试验中观察的结果表明, 冲击负荷并没有使得生物反应器上清液浓度大幅上升. 所以, 对分置式膜-生物反应器的稳定性机理有进一步探讨的必要 .

### 2.2 分置式膜-生物反应器若干参数的动力学规律

图 1 为分置式膜-生物反应器的流程示意图. 图中,  $Q, S, X, V$  分别表示流量, 基质浓度 (COD), 污泥浓度 (MLVSS) 和反应器或管路容积. 下标参数  $i, e, 1, 2$  分别表示原水, 膜过滤出水, 进入膜组件前和离开膜组件后的污泥混合液, 无下标代表完全混合反应器中污泥混合液参数 .

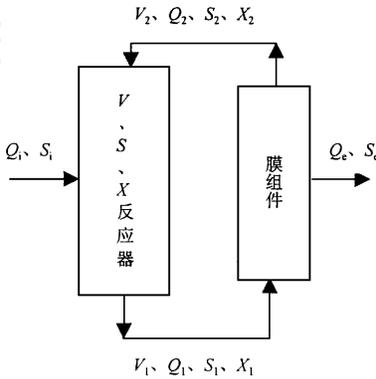


图 1 分置式膜-生物反应器示意图

分置式膜-生物反应器的有机物去除速率  $R_0$ <sup>[9]</sup>, 在稳态时即为体积负荷  $U_v$ , 其显式表达式如文献[8]:

$$R_0 = U_v = X v_m \left[ \frac{1}{1 + \frac{K_s}{S_1}} + \frac{\beta}{1 - \lambda} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_s}{(1 + \lambda + \lambda^2)(1 - \lambda\alpha)S_1}} \right] \quad (1)$$

式中,  $v_m$ : 基质最大比去除速率,  $d^{-1}$ ;  $K_s$ : 基质半饱和浓度,  $mg/L$ ;  $\alpha = S_e/S = S_e/S_1$ , 膜出水中 and 污泥混合液中有有机物浓度 (COD) 之比;  $\beta = V_2/(V + V_1) = V_2/V$ , 浓缩区和反应器容积比值;  $\lambda = Q_e/Q_1$ , 膜出水流量同循环流量的比值 .

根据文献[7], 分置式膜-生物反应器稳定

状态下的污泥浓度为:

$$X = \frac{Y \cdot SRT}{1 + k_d \cdot SRT} \left[ \frac{S_i - S_e}{HRT} + \frac{S_i - S_1}{SRT} \right] \quad (2)$$

在冲击负荷下, 进水明显偏离稳定运行时的进水条件, 污泥浓度  $X$  不再由公式(2)决定. 而是处于一个非稳态的变化过程. 其变化规律如公式(3)所示:

$$\frac{dX}{dt} = Y \cdot R_0 - k_d \cdot X \quad (3)$$

污泥混合液 COD 浓度  $S_1$ , 是进水、膜过滤出水和生物降解 2 个相反过程的综合反映, 如果忽略膜过滤出水带走 COD (膜出水 COD 很低,  $S_e = 5mg/L$ ), 则对生物反应器做衡算可得:

$$Q \cdot S_i - R_0 \cdot V = V \frac{dS_1}{dt} \quad (4)$$

变形, 得:

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{S_i}{HRT} - R_0 \quad (5)$$

### 2.3 分置式膜-生物反应器抗冲击负荷的数学模拟

根据公式(1)、(3)、(5), 采用离散化的数学方法, 对分置式膜-生物反应器在冲击负荷下的运行结果进行模拟 .

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta S_1 &= \frac{S_i}{HRT} \cdot \Delta t - R_0 \cdot \Delta t \\ \Delta X &= Y \cdot R_0 \cdot \Delta t - k_d \cdot X \cdot \Delta t \\ R_0 &= X \cdot v_m \left[ \frac{1}{1 + \frac{K_s}{S_1}} + \frac{\beta}{1 - \lambda} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K_s}{(1 + \lambda + \lambda^2)(1 - \lambda\alpha)S_1}} \right] \end{aligned} \right.$$

作为对照, 同时对完全混合式活性污泥法在相同冲击负荷下的运行进行模拟. 完全混合式活性污泥法中污泥浓度 ( $X$ ) 和污泥上清液中 COD 浓度 ( $S$ ) 所遵循的动力学也可以用公式(3)、(5)表示, 但有机物去除速率 ( $R_0$ ) 则不同. 根据被广泛接受的 Monod 生物处理动力

\* 范晓军. 膜生物反应器工艺处理生活污水中试研究. 清华大学博士学位论文, 1995 .

学,完全混合式活性污泥法的有机物去除速率  $R_0$  可以表示为:

$$R_0 = X \cdot v_m \left[ \frac{1}{1 + \frac{K_s}{S_i}} \right] \quad (6)$$

则对照完全混合式活性污泥法的模拟公式为:

$$\begin{cases} \Delta S = \frac{S_i}{HRT} \cdot \Delta t - R_0 \cdot \Delta t \\ \Delta X = Y \cdot R_0 \cdot \Delta t - k_d \cdot X \cdot \Delta t \\ R_0 = X \cdot v_m \left[ \frac{1}{1 + \frac{K_s}{S_i}} \right] \end{cases}$$

模拟条件: 参数参照本试验中的实际参数,  $HRT = 4h$ , 设正常进水 COD 浓度  $S_i = 300mg/L$ . 设冲击负荷时的进水 COD 浓度  $S_i = 900mg/L$ , 冲击负荷延续 300min 后恢复正常进水浓度. 邢传宏<sup>[7]</sup>等实验证明, 在膜-生物反应器中产率系数  $Y$  和污泥自身氧化速率  $k_d$  与传统活性污泥法相近. 本模拟中采用  $Y = 0.4 (VSS/COD)$ ,  $k_d = 0.06d^{-1}$ , 均为活性污泥法处理生活污水的典型数值<sup>[10]</sup> Monod 反应动力学中的最大比降解速率  $v_m$  和饱和常数  $K_s$  参照活性污泥法中数值<sup>[10]</sup>, 采用  $v_m = 1.6d^{-1}$ ,  $K_s = 25mg/L$ . 比值  $\alpha = 0.25$ ,  $\beta = 0.1$ ,  $\lambda = 0.0042$ , 为本试验中实际数值.

初始条件: 作为对实际运行的模拟, 可以以稳态处理时的参数值  $X, S, U_v$  作为初始值. 稳态时的  $U_v, X, S$  可分别通过公式(1)、(2)和对公式(2)做试算得到. 也可以通过实际运行经验获得. 本模拟中以试验中实际的稳态运行时数据作为初始条件.  $X = 5g/L, S = 10mg/L, R_0 = U_v = 1.8kg/(m^3 \cdot d)$ .

迭代步长  $\Delta t = 2min$ .

### 2.4 数学模拟结果

模拟结果如图 2~ 4 所示.

图 2 所示为冲击负荷下分置式膜-生物反应器与活性污泥法各自有机物去除速率的变化情况. 从图 2 可以看出, 在进水浓度大大高于稳态进水浓度下, 分置式膜-生物反应器的有机物去除速率上升, 而且比活性污泥相同情况要高, 意味着分置式膜-生物反应器更高的处理能力.

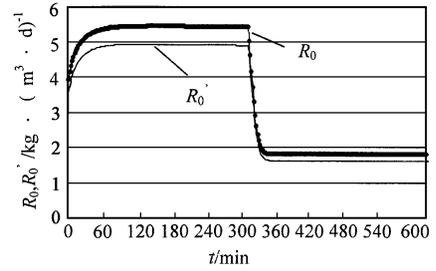


图 2 有机物去除速率  $R_0, R_0'$  变化

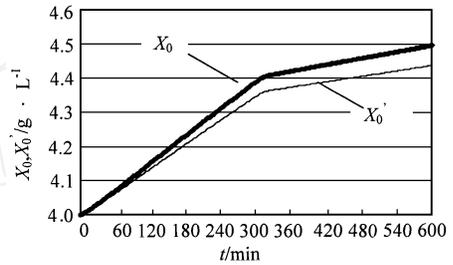


图 3 污泥浓度  $X, X'$  变化

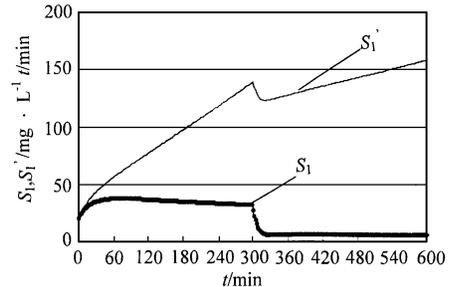


图 4 污泥上清液 COD 浓度  $S_1, S_1'$  变化

图 3 所示为冲击负荷下分置式膜-生物反应器与活性污泥法各自污泥浓度 (MLVSS) 的变化情况. 可以发现, 分置式膜-生物反应器中污泥浓度比活性污泥法中增长更快, 浓度更高.

图 4 中所示为冲击负荷下分置式膜-生物反应器与活性污泥法各自污泥混合液中 COD 浓度的变化情况. 可以明显看出, 分置式膜-生物反应器中污泥混合液的 COD 浓度大大低于活性污泥法. 而且在冲击负荷消除后, 很快恢复到正常水平, 而活性污泥法中则很难在短时间内降到稳态水平.

图 4 中  $S_1$  的最大值为  $37mg/L$ , 与试验监测值大体相同, 说明模拟结果与试验结果是吻合的(参见表 1).

### 2.5 模拟结果的讨论

从数学模拟的结果看,在分置式膜-生物反应器中冲击负荷的抑制机制(负反馈机制)反应较快,可较快消除冲击负荷带来的影响.这种负反馈机制表现在污泥浓度迅速增高,使得有机物的去除速率加快,从而抑制了污泥混合液中 COD 浓度的快速上升.

分置式膜-生物反应器与活性污泥法的另一个重要区别在于冲击负荷消除后污泥混合液 COD 浓度恢复情况的差别.如图 4 所示,分置式膜-生物反应器中 COD 上升缓慢而且增加后的浓度也较低( $37\text{mg/L}$ ),而且在冲击负荷消除后 15min 即可恢复正常水平.活性污泥法中  $S_1$  持续上升到  $150\text{mg/L}$ ,在冲击负荷消除后恢复很慢.在膜-生物反应器系统中,污泥浓度上升较快,而且分散性很好,与有机物接触充分,膜过滤出水维持在大约  $10\text{mg/L}$  以下,使得生物反应器中有机物的去除只能通过污泥的生物氧化来实现,基本不能通过出水排走.而活性污泥法中则可以通过较高浓度的出水排出.图 3 所示冲击负荷消失后膜-生物反应器中污泥浓度下降比活性污泥法缓慢的现象也可以证实这一解释.

虽然在分置式膜-生物反应器中  $S_1$  上升不大,但仍然对膜的过滤产生一定的负面影响.如果冲击负荷更大,例如  $S_1$  达到  $1600\text{mg/L}$ ,在分置式膜-生物反应器中,其污泥混合液 COD 浓度  $S_1$  也将达到  $300\text{mg/L}$  以上(模拟结果未图示),这样高的 COD 浓度将大大加快膜过滤阻力的上升速度,缩短运行周期,不利于长期运行稳定,在实际应用中应该避免.

值得指出的是,以上数学模拟是不够完善的.由于普通活性污泥法通过沉淀来获得出水,在污泥浓度增高时会引起沉淀效率降低,从而导致出水中含有污泥,而膜-生物反应器则不会有污泥流失,但这种差别在以上模式中反应不出来.分置式膜-生物反应器中污泥的特性能否简单比照活性污泥法的参数取值,尚有争论.范晓军<sup>7</sup>认为,膜-生物反应器中  $v_m$  比活性污泥法中污泥要大得多.如果这种假说成立,以上模拟中应分别取不同的生物处理动力学数值,结果

必然是膜-生物反应器具有更强的抗冲击负荷能力,即更高的稳定性.

### 3 结论

(1) 分置式膜-生物反应器具有强的抗冲击负荷能力,在 3 倍于正常浓度的进水 COD 浓度下能够正常运行.

(2) 分置式膜-生物反应器强的抗冲击负荷能力来自于膜过滤对污泥的完全截留为生物创造的良好生境.

(3) 数学模拟表明,分置式膜-生物反应器在冲击负荷下运行良好,在冲击负荷消除后 15min 内恢复正常水平运行.

(4) 过高负荷可能会导致膜过滤阻力加速增长,不利于长期运行.

### 参考文献

- 1 Trouve E et al Treatment of Municipal Wastewater by Membrane Bioreactor: Results of a Semi-Industrial Pilot-Scale Study. *Wat Sci Technol*, 1994, **30**: 151~ 157.
- 2 桂萍等.膜-生物反应器运行条件对膜过滤特性的影响. *环境科学*, 1999, **20**(3): 38~ 41.
- 3 Bailey A et al The Use of Crossflow Microfiltration to Enhance the Performance of an Activated Sludge Reactor. *Wat Res*, 1994, **28**: 297~ 301.
- 4 Muller E B et al Aerobic Domestic Wastewater Treatment in a Pilot Plant with Complete Sludge Retention By Crossflow Filtration. *Wat Res*, 1995, **29**: 1179~ 1189.
- 5 Nagano A et al The Treatment of Liquor Wastewaters Containing High-Strength Suspended Solids by Membrane Bioreactor System. *Wat Sci Technol*, 1992, **26**: 887~ 895.
- 6 Urbain V et al Integration of Performance, Molecular Biology and Modeling to Describe the Activated Sludge Process. *Wat Sci Technol*, 1998, **37**: 223~ 229.
- 7 邢传宏等.错流式膜-生物反应器处理生活污水及其生物学研究. *环境科学*, 1997, **18**(6): 23~ 26.
- 8 孟耀斌等.分置式膜-生物反应器处理生活污水及其有机物去除速率的确定. *环境科学*, 2000, **21**(2): 24~ 27.
- 9 许保玖.当代给水与废水处理原理.北京:高等教育出版社, 1991. 350.
- 10 顾夏声.废水生物处理数学模式.北京:清华大学出版社, 1993. 61.