

错流式膜-生物反应器处理生活污水及其生物学研究*

邢传宏 钱 易 孟耀斌

(清华大学环境工程系环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084)

Tardieu Eric

(法国利安水务公司水与环境研究中心, 巴黎 F78230)

摘 要 用错流式膜-生物反应器(Crossflow Membrane BioReactor 简称 CMBR) 进行处理生活污水试验并研究其生物动力学参数. 结果表明: 当 HRT 为 5h, SRT 为 15d, 膜面流速为 4m/s , 膜通量为 $75, 150\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时, CMBR 处理生活污水试验的去除率为: COD > 97%、 $\text{NH}_3\text{-N}$ > 97%、浊度 $\geq 98\%$; 对 SS 和总 E. coli 则达到 100%, 出水水质优于建设部生活杂用水回用标准 CJ25. 1-89. 生物相分析表明, 污泥中没有原、后生动物, 只有菌胶团. 推导了 CMBR 稳态运行时的生物浓度计算公式, 进而求得表观产率因数 Y_g 为 0. 65, 衰减常数 K_d 为 $0. 1\text{d}^{-1}$.

关键词 错流式, 膜, 生物反应器, 生物动力学, 生活污水.

错流式膜-生物反应器(Crossflow Membrane BioReactor 简称 CMBR) 是先进的膜分离技术与传统活性污泥法相结合而产生的一种高效污水生化处理工艺. 它具有 HRT 和 SRT 完全分离、不设二次沉淀池、不怕污泥膨胀、易于实现一体化自动控制、设计管理操作方便的特点^[1]. 早期的有机高分子材料膜组件因存在通量小、寿命短、易堵塞、清洗困难等问题, 阻碍了 CMBR 技术的发展^[2]. 90 年代后, 通量大、寿命长、不易堵塞、清洗操作相对简单的错流式无机膜的工业化生产为 CMBR 的实用化推广开辟了新途径. 本文报道 CMBR 处理生活污水及其生物学研究的结果.

1 试验概况

1. 1 试验流程与用膜

整套试验装置由法国利安水务公司水与环境研究中心制造提供, 工艺流程见文献[4]. 试验用错流式膜组件为 KERASEP X3 管状陶瓷膜, 切割相对分子质量为 3×10^5 , 新膜初始通透能力(清水试验)为 $4\text{--}5\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$.

1. 2 试验用水

试验用水为清华大学北区生活污水, 基本水质情况如表 1, 数据表明原水水质变化较大, 其原因是原水经泵送至高位污水箱, 再重力流进入 CMBR 系统的进水箱. 当高位污水箱沉积的大颗粒、悬浮物等泄入进水箱时, 进水 COD、SS 便骤增; 有时只有上清液流入进水箱, 造成进水 COD 及 SS 偏低.

1. 3 试验运行参数

第 1 阶段(03-07- 03-21)、第 2 阶段(03-22- 04-16)膜通量分别为 $150, 75\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 2

表 1 试验用水水质

COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_3\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总 E. coli/ $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$	浊度/度	pH	水温/ $^{\circ}\text{C}$
118—761	19—488	20—30	$10^5\text{--}10^6$	50—80	7. 5—8. 5	15—25

阶段其它运行参数相同: HRT 为 5h, SRT 为 30d, 膜面流速为 4m/s . 由于定期清除通道阻塞物, 有效地延缓了膜面堵塞的发生, 试验期间

(约 6 周)没有进行清洗操作.

* 国家自然科学基金项目
收稿日期: 1997-01-03

2 结果分析与讨论

接种污泥取自首都机场污水处理厂,其处理对象主要是生活污水和少量机修车间的含油废水. 自然沉淀 1h 后,浓缩污泥放入反应器启动运行.

2.1 COD、SS、VSS 的历时变化

出水水质稳定是 CMBR 的突出特点之一. 试验期间进、出水 COD 的历时变化如图 1,启动运行初期的出水 COD < 12mg/L. 03-13 前后,提供曝气的空气压缩机故障,使生物反应器内的活性污泥一度处于厌、缺氧状态;进水 COD 也突然升高,造成此后出水 COD 也略有增高,最高达到 22mg/L,但水质没有出现明显恶化. 故障排除后,CMBR 出水 COD 稳定在 12mg/L 以下. 整个试验期间,出水 NH₃-N 始终保持在很低的水平(≤1.4mg/L). 这是因为 SRT 较长时,生长周期也较长的硝化细菌受短期故障的影响不大.

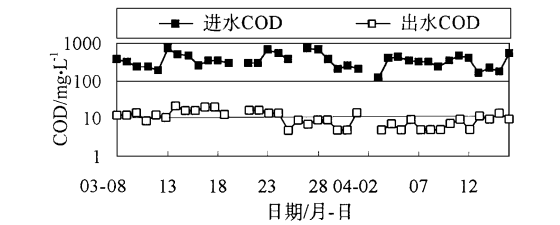


图 1 进、出水 COD 的历时变化

没有微生物的流失是 CMBR 的另一突出特点,这使得生物反应器内污泥有可能同时保持高浓度和高活性. 污泥 SS、VSS 的历时变化如图 2. 运行初期微生物生长迅速, VSS/SS 的

值较高,接近 70%. 经过 1.5 倍的 SRT, VSS/SS 的值便维持在 63% 左右,此时的污泥浓度也不再变化,说明 CMBR 的试验运行达到了稳态. VSS 代表的微生物量与(SS-VSS)所代表的无机组分量之间处于动平衡,生物反应器内没有无机组分的累积.

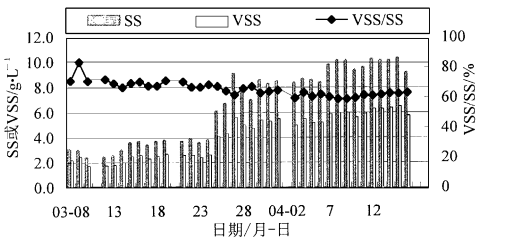


图 2 污泥 SS、VSS 的历时变化

2.2 CMBR 出水水质评价

CMBR 是一种效率高但能耗也较大的污水生物处理技术,仅以二级排放为目的处理生活污水显然是不经济的. 为此本文对 CMBR 回用生活污水的可行性进行了研究. 试验出水(见表 2): 没有 SS 和 E. coli, COD < 12mg/L(故障时 COD ≤ 22mg/L), NH₃-N < 1.4mg/L, 浊度 < 1.5 度, pH 及嗅觉指标也达标,未因故障而产生大的波动, CMBR 综合出水的各项水质指标始终优于建设部生活杂用水回用标准 CJ25.1-89. 从平均去除率来看,对 COD、NH₃-N、浊度分别达到或超过 97%、97%、98%; 对 SS 和总 E. coli 则达到 100%,这是任何二级生化处理工艺都无法做到的. 总之,CMBR 处理生活污水对 COD、NH₃-N、SS 等去除效率高,出水水质好而稳定,可直接回用于城市绿化等.

表 2 CMBR 处理生活污水试验出水水质

水质项目	杂用水回用标准 CJ25.1-89		CMBR 出水水质 正常值(故障时)	平均去除 率/%
	城市绿化	洗车扫除		
SS/mg · L ⁻¹	10	5	0	100
COD/mg · L ⁻¹	50	50	≤12(22)	> 97
NH ₃ -N/mg · L ⁻¹	20	10	< 1.4(1.4)	> 97
浊度/度	10	5	< 1.5(1.5)	≥98
总 E. coli/个 · L ⁻¹	3	3	0	100
pH	6.9~ 9.0	6.9~9.0	7.1~ 8.5	
嗅	无不快感觉	无不快感觉	无不快感觉	

3 CMBR 生物动力学参数研究

3.1 污泥的生物相

菌胶团是活性污泥的主要组成部分,对废水生化处理具有非常重要的意义.CMBR 工艺中的活性污泥在生物反应器和膜组件之间循环流动,并以较高流速(4m/ s)通过膜表面,泵轮、膜组件对污泥生物相有较大影响,使 CMBR 生物反应器内的活性污泥与普通活性污泥法相比有明显不同,如图 3 所示.与普通活性污泥法相比,CMBR 污泥中菌胶团数量较多,颜色较浅,甚至无色透明,结构较紧密,具有较强的吸附和氧化有机物的能力.值得指出的是,普通活性污泥法的污泥中除菌胶团外,还含有相当数量的原、后生动物(如轮虫等)吞食游离细菌,借以改善出水水质;而 CMBR 的污泥中游离细菌极少,再加上高速水流剪切力较大,原、后生动物因食物短缺,适应性差而无法生存.



图 3 CMBR 污泥生物相照片(放大 100 倍)

3.2 生物反应器内的生物浓度

前已述及,膜的机械截留作用避免了微生物的流失,使得 CMBR 内的污泥浓度比相同条件下普通活性污泥法要高.本文根据物料衡算来推导 CMBR 生物反应器内的生物浓度公式如图 4. R_0 和 R_g 分别表示反应器容积 V 内以 COD 和 VSS 表示的细胞增殖率.对反应器进行物料衡算:

$$V \frac{dX}{dt} = Q_i X_i + V R_g - Q_w X_w - Q_e X_e \quad (1)$$

$$V \frac{dc}{dt} = Q_i c_i + V R_0 - Q_w c_w - Q_e c_e \quad (2)$$

$$X_i = 0, X_e = 0, X_w = X, c_w = c_{sup} \quad (3)$$

$$\text{在稳态下存在, } \frac{dX}{dt} = 0, \quad \frac{dc}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$\text{又因为, } R_g = -YR_0, \quad \frac{V}{Q_e} = \text{HRT}, \quad \frac{V}{Q_w} = \text{SRT},$$
$$Q_i = Q_w + Q_e \quad (5)$$

由(1)–(5)式可以解出:

$$X = Y \times \text{SRT} \left[\frac{c_i - c_e}{\text{HRT}} + \frac{c_i - c_{sup}}{\text{SRT}} \right] \quad (6)$$

其中, X 为以 VSS 表示的生物浓度,单位 mg/L; Y 为真产率因数(包括内源呼吸); c_i 、 c_e 、 c_{sup} 分别表示进水、出水、污泥上清液的 COD 浓度,单位 mg/L; SRT 为污泥停留时间,单位 h; HRT 为水力停留时间,单位 h.

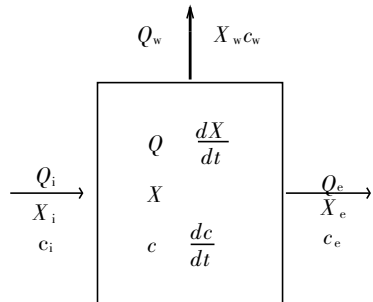


图 4 CMBR 物料衡算简图

显然,CMBR 生物反应器内的生物浓度 X 不仅与 HRT、SRT、 Y 、 c_i – c_e 有关,而且与 c_i – c_{sup} 有关,与普通活性污泥法明显不同.原因是普通活性污泥法从二沉池排除剩余污泥,而 CMBR 不设二沉池,剩余污泥从生物反应器排除,生物浓度 X 和 c – c_e 、 c_i – c_{sup} 皆有关系.

3.3 生物动力学常数 Y_g 、 K_d

生物动力学常数对指导工程设计具有十分重要的意义.普通活性污泥法生物动力学常数^[3] Y_g (温度 20℃时,活性污泥消耗单位质量 COD 所能产生的 VSS 量)为 0.4, $K_d = 0.06\text{d}^{-1}$.利用 Arrhenius 公式修正到 30℃时, $Y_g = 0.63$, $K_d = 0.09\text{d}^{-1}$.本文根据 CMBR 处理生活污水试验长期运行的结果对其生物动力学常数的取值进行了研究.选取稳态下的典型数据代入(6)式求解真产率因数 Y 如表 3,大致在 0.16–0.38 范围.

$$Y \text{ 与 } Y_g \text{ 存在关系, } Y = \frac{Y_g}{1 + K_d \text{SRT}} \quad (7)$$

$$\text{两边取倒数整理得, } Y^{-1} = Y_g^{-1} K_d \text{SRT} + Y_g^{-1} \quad (8)$$

表 3 CMBR 的真产率因数 Y (温度 30°C)

VSS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SRT /d	HRT /h	$c_i - c_e$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$c_i - c_{\text{sup}}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Y	Y^{-1}
2300	5	5	244	215	0.38	2.6
2000	5	5	213	201	0.38	2.7
1800	15	7.5	124	118	0.30	3.4
6018	15	5	317	272	0.26	3.8
10900	30	5	441	384	0.17	5.9
10400	30	5	447	352	0.16	6.2

依据式 (8) 和表 3, 以 SRT 为横坐标, Y^{-1} 为纵坐标, 用 Excel 5.0 进行曲线拟合如图 5, 相关系数 $R^2 = 0.969$. 显然有:

$Y_g^{-1} = 1.8005, \quad Y_g^{-1}K_d = 0.1379 \quad (9)$

容易解出 CMBR 的生物动力学常数(30°C) 为 $Y_g = 0.56, K_d = 0.08\text{d}^{-1}$, 此与普通活性污泥法大致相当, 说明 CMBR 生物反应器内的生物浓度公式(6) 的推导是正确的, 因为生物动力学常数仅与进水性质、生物反应器的温度等有关.

根据 $Y_g、K_d$ 的计算结果, 合并(6)、(7) 式得:

$$X = \frac{0.56 \times \text{SRT}}{1 + 0.08 \times \text{SRT}} \left[\frac{c_i - c_e}{\text{HRT}} + \frac{c_i - c_{\text{sup}}}{\text{SRT}} \right] \quad (10)$$

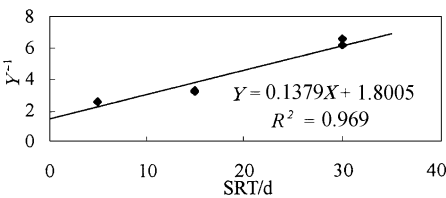


图 5 图解法求 $Y_g、K_d$

已知操作参数SRT、HRT 以及进、出水水

质情况,即可计算 CMBR 生物反应器内的生物浓度 X , 借以判断 CMBR 的运行状况, 指导生产和科学研究.

4 结论

(1) CMBR 处理生活污水试验运行稳定, 技术可行, 出水水质优于建设部生活杂用水水质标准 CJ25.1-89, 可直接回用于城市绿化等.

(2) 当 HRT 为 5h, SRT 为 30d, 通量为 $75、150\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 膜面流速为 $4\text{m}/\text{s}$ 时, CMBR对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、浊度的平均去除率分别达到或超过 97%、97%、98%; 对 SS 和总 E. coli 则达 100%, 明显高于二级生化工艺.

(3) 经过 1.5 倍的 SRT, VSS/SS 值维持在 63%左右, SS 也不再变化, 说明 CMBR 的运行达到了稳态. 生物反应器内没有无机组分的累积.

(4) 与普通活性污泥法相比, CMBR 活性污泥中菌胶团数量较多, 颜色较浅, 甚至无色透明, 结构较紧密, 具有较强的吸附和氧化有机物的能力. 没有原、后生动物的(如钟虫等).

(5) 真产率因数 Y 大致在 0.16– 0.38 范围. 图解法得到生物动力学常数(30°C) $Y_g = 0.56, K_d = 0.08\text{d}^{-1}$, 比普通活性污泥法略低.

参 考 文 献

1 Brindle K, Stephenson T. Biotech. and Bioeng., 1996, **49**: 601
2 Moller E B et al. Wat. Res., 1995, **29**(4): 1179
3 顾夏声. 废水生物处理数学模型. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 1993: 68
4 邢传宏, 钱易等. 超滤膜-生物反应器处理生活污水及其水力学研究. 环境科学, 1997, **18**(5): 19–22

Zhangzhou.

Keywords: SO₂, washout, stable isotope, model, Mingnan Area, summer.

Study of Organic Hydroperoxides and H₂O₂ Yields in Isoprene and O₃ Reactions.

Li Shuang et al. (The State Key Lab of Environ. Simulation and Pollution Control, Center of Environ. Sci., Peking Univ., Beijing 100871): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 16—18

The atmospheric reaction of isoprene with O₃ was simulated under the dark and room temperature in the 28.5L quartz reactor coupled with a Long Path Fourier Transform Infrared Spectrometer, while the Dual Channel H₂O₂ Analytical System was used to determine the production of organic hydroperoxides and H₂O₂. Yields measured respectively in the three repeated experiments are 3.8%, 4.3% and 3.9% for organic hydroperoxides with the average of 4.0%, and 2.2%, 1.6% and 1.8% for H₂O₂ with the average of 1.9%. The formation mechanisms of organic hydroperoxides and H₂O₂ were briefly discussed.

Keywords: isoprene, O₃, Dual Channel H₂O₂ Analytical System, organic hydroperoxides, H₂O₂.

The Atmospheric Diffusion Parameter in Various Terrain in Comparison with Each Other in Shandong Province.

Mao Hengqing (National Meteorological Center, Beijing 100081) *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 19—22

Analysing the experimental result in Shandong province, it is found that the atmospheric diffusion parameters vary obviously with terrain. The diffusion parameters are about as big as that of national standard in the plain and half to one class bigger than it in the mountain areas. In industrial park the cross-wind diffusion parameter is about the same as while the vertical one is one more class bigger than that of national standard. In coastal areas the cross-wind parameter is bigger slightly and the vertical one is smaller slightly than that of national standard. The pollutant diffusion density and the air diffusiophoretic velocity are related directly to the diffusion parameter.

Keywords: atmospheric diffusion parameter, national standard, air pollutant, cross-wind

diffusion parameter, vertical diffusion parameter.

Cross-flow Membrane Bioreactor for Domestic Wastewater Treatment and Its Biological Behavior.

Xing Chuanhong, Qian Yi (State Key Lab of Environ. Simulation and Pollution Control, Dept. of Environ. Eng., Tsinghua Univ., Beijing, 100084), *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 23—26

It is proven that Crossflow Membrane BioReactor (CMBR) applied to domestic wastewater treatment, under conditions of hydraulic retention time 5h, sludge retention time 15d, membrane surface velocity 4m/s and membrane flux 75, 150L/(m²·h), is technically feasible and reliable during six weeks. Removal rate of COD, NH₃-N, and turbidity of the system are equal to or higher than 97%, 97% and 98%, SS and E. coli., 100%. The effluent quality is always better than the quality standard for reuse issued by the Ministry of Construction in China. An important formula to calculate the sludge concentration for CMBR at steady state is successfully derived from material balance equations. The apparent yield factor Y_g is approximately 0.65mgVSS/mg COD and the decay constant, 0.1d⁻¹. Furthermore, the bio-facies analysis of CMBR is included.

Keywords: crossflow, membrane, bioreactor, biological behavior, domestic wastewater.

Photochemical Treatment of Selected Organic Wastewater.

Zhu Chunmei et al. (State Key Lab. of Pollution Control and Resource Reuse, Dept. of Environ. Sci. and Eng., Nanjing Univ. 210093): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 27—30

The photochemical oxidation treatment for selected organic wastewaters which were hard to degrade and were performed by adding H₂O₂ or some semiconductor powder and bubbling of O₂ or O₃ under sunlight or a middle pressure mercury lamp. The results showed that the removal rates of COD, oil and volatile phenols were 26.4%—60%, 39.8%—97.8% and 86.3%—100% respectively for the wastewaters of oil refinery and coking industry; the removal rates of COD and decoloration rates were 48%—75%, 80%—100% for selected