

超滤膜-生物反应器处理生活污水 及其水力学研究*

邢传宏 钱 易

Tardieu Eric

(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) (法国利安水务公司水与环境研究中心, 巴黎 F78230)

摘要 用超滤膜-生物反应器进行处理生活污水试验并研究其水力学行为. 结果表明: 当 HRT 为 5h、SRT 为 30d、膜面流速为 4 m/s 、膜通量为 $75\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时, 试验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. 该反应器的去除率 COD > 98%、 $\text{NH}_3\text{-N}$ > 97%、浊度 98%、SS 和总 E. coli 则达到 100%. 探讨了污泥粘度 η 与污泥浓度 MLSS 以及给定临界雷诺数时最小膜面流速 v_{\min} 与污泥浓度 MLSS 之间的关系. 计算得到典型雷诺数为 4×10^3 — 2×10^5 时, 水力边界层厚度 δ 约 185 — $5.9\mu\text{m}$, 传质边界层厚度 δ_c 约 18.5 — $0.59\mu\text{m}$.

关键词 超滤膜, 生物反应器, 生活污水, 水力学, 污泥粘度, 膜面流速, 边界层厚度.

60年代末, Smith 等人首次用超滤膜过滤活性污泥, 开始了超滤膜-生物反应器(Ultrafiltration Membrane BioReactor 简称UMBR) 处理污水的研究^[1]. UMBR 具有 HRT 和 SRT 完全分离、不设二次沉淀池、不怕污泥膨胀、处理效率高、充氧效率高、容易实现一体化自动控制、设计操作运行简便的优点^[2]. 早期的超滤膜组件大多由廉价的有机高分子材料制成, 通量小、寿命短、易堵塞、清洗困难, 推广应用受到很大限制^[3, 4]. 90年代后, 通量大、寿命长、易清洗、化学稳定性好、热稳定性高、机械性能优异的陶瓷超滤膜的出现使 UMBR 在污水生化处理方面的应用研究成为当今膜科学技术领域的热点课题之一. 本文用超滤膜-生物反应器进行处理生活污水试验并研究其水力学行为.

1 试验

1.1 试验装置

整套试验装置由法国利安水务公司制造提供, 工艺流程如图1. 生物反应器3、循环泵8、超滤膜组件10共同构成活性污泥循环过滤系统. 出水流量控制器11(一个电磁流量计和一个气动控制阀联合工作) 控制出水流量以精确调节 HRT; 通过排泥泵7设定剩余污泥排放量进而控制 SRT. 冷却器5控制反应器的温度在30

左右. 微孔曝气器4供气量通过控制生物反应器3中的氧化还原电位(ORP) 来实现, 一般好氧环境 ORP 应为300—400mV. 液位控制器6控制进水泵2的启闭以保持生物反应器内液位恒定; 流量控制阀9用于调节过膜循环流量来获得需要的膜面流速.

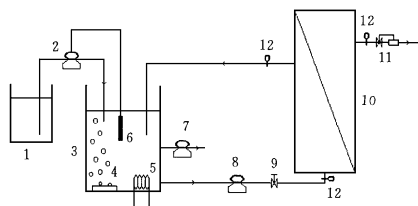


图1 超滤膜-生物反应器工艺流程

1. 进水水箱 2. 进水泵 3. 生物反应器
4. 微孔曝气器 5. 冷却器 6. 液位控制器
7. 排泥泵 8. 循环泵 9. 流量控制阀 10. 超滤膜组件 11. 出水流量控制器 12. 压力表

1.2 超滤膜组件

试验用超滤膜组件为法国 TECH-SEP 公司生产的 KERASEP X3管状陶瓷膜, 共有7个通道, 通道直径4.5mm, 膜长40cm, 膜表面孔径约20—50nm, 切割分子量为300 000, 每根膜总表面积约0.04m², 清水试验新膜初始通透能力为4—5m³/(m²·h·MPa). 活性污泥在通道内沿

* 本研究为中法环境保护国际合作项目
收稿日期: 1996-11-06

轴向流过,出水沿径向流出,为流体力学中的错流式.

1.3 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.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

UMBR 系统的进水水箱.当高位污水箱中沉积的大颗粒、悬浮物等泄入进水水箱时,进水 COD、SS 便骤增;有时则只有上清液从高位污水箱流到进水水箱,造成进水 COD 及 SS 偏低.

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/
400—850	300—600	10—40	$10^5\text{—}10^6$	50—80	7.5—8.5	15—25

2 结果分析与讨论

2.1 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、MLSS 的历时变化

本研究采用 SRT 为30d, HRT 为5h,膜面流速为 4m/s ,膜通量为 $75\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,试验运行期间共进行1次清洗操作. COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的历时变化如图2,启动运行初期的出水 COD $<10\text{mg/L}$. 此后的10余天里,试验装置中的空气压缩机、油水分离器、液位控制器等屡屡故障,导致生物反应器内出现大量黄褐色泡沫,其主要原因是油水分离器工作失常,大量油水混合物经气路进入生物反应器;再加上供氧不足,使得其中的微生物无法迅速适应. 从图2看,此间 UMBR 的出水 COD 比以后的正常运行期略高,但 COD 最高值也只有 24mg/L ;出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 仍保持在很低的水平. 这是因为当 SRT 较长时,生长周期较长的硝化细菌受短期故障的影响不大. 故障排除后,UMBR 进入正常运行状态,表现为出水水质渐趋稳定: COD $<10\text{mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N}<2.0\text{mg/L}$,说明 UMBR 处理生活污水是可行的. 故障期间,也没有观察到出水水质(主要指标如 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等)恶化现象.

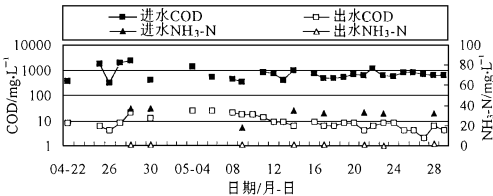


图2 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的历时变化

由于超滤膜的机械截留作用,UMBR 生物

反应器内没有微生物的流失,其中污泥浓度 MLSS 的历时变化如图3. 在整个试验期间,生物反应器内 MLVSS/MLSS 值稳定在63%左右,说明 UMBR 处理生活污水试验的运行是稳定的. 从 MLVSS 和 MLSS 实测值的变化来看,MLVSS 代表的微生物量与 MLSS-MLVSS 所代表的无机组分量之间始终处于动态平衡状态,生物反应器内没有无机组分的累积.

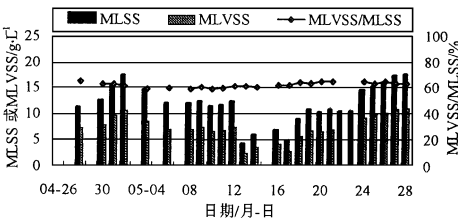


图3 污泥浓度 MLSS 的历时变化

2.2 UMBR 出水水质评价

UMBR 处理生活污水试验的出水情况详见表2. 出水中没有 SS 和 E. coli, COD $<10\text{mg/L}$ (故障时 COD $=24\text{mg/L}$), $\text{NH}_3\text{-N}<2.0\text{mg/L}$, 浊度 <1.5 度, pH 及嗅觉指标也达标. 尽管试验运行期间部分设备多次出现故障,UMBR 出水的各项水质指标始终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、洗车扫除等. 对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、浊度的平均去除率分别达到或超过98%、97%、98%, 对 SS 和总 E. coli 则达到100%, 明显高于其它二级生化处理工艺.

表2 UMBR 处理生活污水试验出水水质

水质项目	建设部杂用水水质标准 CJ25.1-89		UMBR 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	10(24)	> 98
NH ₃ -N/mg•L ⁻¹	20	10	< 2.0(2.0)	> 97
浊度/度	10	5	< 1.5(1.5)	98
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	无不快感	无不快感	

3 UMBR 水力学研究

3.1 生物反应器中污泥的粘度

多年来,生物反应器中污泥的粘度一直按水的粘度来考虑,污泥浓度 MLSS 也较低.但对于 UMBR 而言,生物反应器中污泥的浓度 MLSS 可高达15—20g/L,如果在雷诺数等计算时仍沿用水的粘度代入,势必产生较大的误差.为此笔者对高浓度污泥的粘度进行了研究:取 UMBR 生物反应器中污泥500ml,污泥浓度 MLSS 为17.7g/L,恒温水浴中保持温度30 ,待用.

判别流体类型.取污泥若干用 HAAKE VT 501 粘度仪测定其粘度,结果表明在不同速度水平下,UMBR 生物反应器中污泥具有大致相同粘度,与粘度仪使用手册给出的标准曲线相比较得知:此时的污泥仍属牛顿流体.

测定污泥的粘度.以 UMBR 生物反应器中污泥浓度17.7g/L 为基本浓度1,分别用试验出水稀释到1/2、1/3、1/4、1/5、1/6、1/7、1/8、1/9和1/10,在温度30 时测定其粘度,试验结果利用 Excel 5.0进行曲线拟合如图4,相关系数 $R^2 = 0.987$,拟合得到污泥粘度 η 随污泥浓度 MLSS 变化的公式为:

$$\eta= 0.1488 \times \text{MLSS}+ 1.036$$

(1)

其中污泥浓度 MLSS 的单位为 g/L,粘度 η 的单位为 mPa•s

水在30 时的粘度为0.8mPa•s,而本试验得到 UMBR 生物反应器中的污泥在30 时的粘度为3.62mPa•s,约为水粘度的4.5倍,显然此时污泥的粘度已经不能简单地用水的粘度来

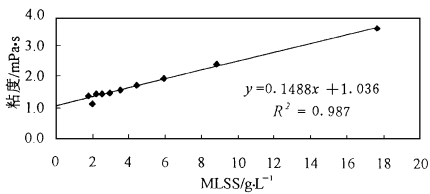


图4 污泥粘度 η 随污泥浓度 MLSS 的变化

近似.试验结果还表明,污泥粘度 η 随污泥浓度 MLSS 的变化呈良好的线性关系.

3.2 最小膜面流速计算

已知 UMBR 生物反应器中污泥浓度 MLSS,再考虑湍流发生的临界雷诺数,即可进行不同 MLSS 下的最小膜面流速计算.大量的试验表明:污泥过膜流态为层流要远比湍流时易于堵塞,所以从理论上确定不同 MLSS 下湍流发生的最小膜面流速具有十分重要的意义.从流体力学知:

$$\text{Re}=\frac{evd}{\eta}$$

(2)

对污泥: $e= \text{MLSS}+ 1000$

(3)

由(1)、(2)、(3)式,并考虑安全系数 SF 得:

$$v_{\min}=\text{SF} \times \frac{\text{Re}_{\text{临界}}(0.1488 \times \text{MLSS}+ 1.036)}{(\text{MLSS}+ 1000) \times d}$$

(4)

根据 UMBR 处理生活污水试验的具体情况,取临界雷诺数 $\text{Re}_{\text{临界}}$ 为4000,安全系数 SF 为1.2,当污泥浓度 MLSS 为0、2、4、6、8、10、12、14、16、18、20g/L 时分别求解对应的最小膜面流速 v_{\min} 如图5.利用 Excel 5.0拟合得到最小膜面流速 v_{\min} 与污泥浓度 MLSS 之间的关系如式(5),相关系数 $R^2 = 1$.

$$v_{\min}= 0.1545 \times \text{MLSS}+ 1.1144$$

(5)

可见, 最小膜面流速 v_{\min} 和污泥浓度 MLSS 也呈现出良好的线性关系. MLSS 越高, 湍流发生所需的最小膜面流速 v_{\min} 就越大, 耗能越显著.

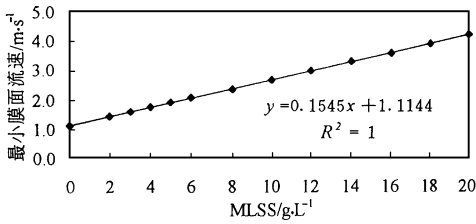


图5 最小膜面流速 v_{\min} 随污泥浓度 MLSS 的变化

3.3 边界层计算

错流式无机管状超滤膜膜面粗糙度极小, 属流体力学中的湍流光滑管. 所谓光滑管指在一定雷诺数下, 膜面上存在着粘性底层, 而且底层的厚度超过了粗糙元的高度, 使粗糙度的扰动影响被粘性效应所抑制. 也就是说在大部分流动区域中, 雷诺应力是主要的, 粘性应力可以忽略; 而在靠近膜面的粘性薄底层 (即边界层) 内, 雷诺应力趋于0, 剪切应力主要由粘应力构成. 从速度分布来看, 污泥流动速度从膜面的零值 (粘性附着) 迅速增加到边界层外面的主体流速 v , 距膜面 δ 处, 污泥流速达到 v 的99%, 定义 δ 为水力边界层厚度.

根据普兰特-卡门公式:

$$\frac{1}{f} = 2 \times \log(\text{Re} \times \overline{f}) - 0.8 \quad (6)$$

$$\delta = \frac{32.8 \times d}{\text{Re} \times \overline{f}} \quad (7)$$

本试验研究中管状超滤膜的 $d = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, 取典型雷诺数 $\text{Re} = 4 \times 10^3 - 2 \times 10^5$, 由 (6) (7) 式容易解出, 水力边界层厚度 $\delta = 185 - 5.9 \mu\text{m}$. 传质边界层厚度 δ_c 与水力边界层厚度 δ 间存在关系^[5]:

$$\delta_c = \frac{\delta}{(N_{\text{Sc}})^{1/3}} \quad (8)$$

对大多数液体而言, 施密特数 N_{Sc} 的量级为 10^3 , 因此 (8) 式可以简化为:

$$\delta_c = \frac{\delta}{10} = 18.5 - 0.59 \mu\text{m} \quad (9)$$

显然, 水力边界层越薄, 则传质边界层也越薄, 活性污泥中易引起堵塞的物质如粘性多糖、蛋白质等也就越不易在超滤膜表面上沉积, 堵塞速度也就会越慢, 从而操作周期也就越长, 对 UMBR 的长期稳定运行也就越有利. 但在其它条件不变的情况下, 减小水力边界层厚度就意味着增大膜面流速, 能耗也就必然相应增加, 经济性也就越差, 所以管状超滤膜的膜面流速不宜过高. 本研究采用膜面流速 4 m/s .

4 结论

(1) UMBR 处理生活污水试验的运行是稳定的, 出水水质优于建设部生活杂用水质标准 CJ25.1-89, 可直接回用于城市绿化, 洗车扫除等.

(2) 当 HRT 为 5h、SRT 为 30d、膜通量为 $75 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、膜面流速为 4 m/s 时, UMBR 处理生活污水试验 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、浊度的平均去除率分别达到或超过 98%、97%、98%; SS 和 E. coli 则达到 100%, 明显高于其它二级生化处理工艺. 生物反应器中 MLSS 可达 17.3 g/L , MLVSS/MLSS 值稳定在 63% 左右, 生物反应器内没有无机组分的累积.

(3) UMBR 处理生活污水试验, 生物反应器污泥粘度 η 随污泥浓度 MLSS 的变化呈良好的线性关系. 发生端流的临界雷诺数一定时, UMBR 处理生活污水试验的最小膜面流速 v_{\min} 与污泥浓度 MLSS 之间也呈现出良好的线性关系.

参 考 文 献

- 1 Smith C V et al., The Use of Ultrafiltration Membrane for Activated Sludge Separation. Presented Paper at 39th Annual Purdue Industrial Waste Conference, Indiana, 1969
- 2 Brindle K and Stephenson T. Biotech. and Bioeng., 1996, 49: 601
- 3 Yamamoto K et al., Wat. Sci. Tech., 1989, 21: 43
- 4 Moller E B et al., Wat. Res., 1995, 29(4): 1179
- 5 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学. 北京: 化学工业出版社, 1988: 365—367

northern China. The maximum value of N_2O emissions from forest and grassland soil is about $23\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. A high rate of N_2O loss is observed when the temperature is lower than 15°C . The maximum value of N_2O negative emissions as high as $18.984\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ has been measured.

Key words: N_2O , O_3 , emission flux, source, sink, exchange between atmosphere and territory.

Ultrafiltration Membrane Bioreactor for Domestic Wastewater Treatment and Its Hydraulic Behavior. Xing Chuanhong, Qian Yi, (State Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Dept. of Environ. Eng., Tsinghua University, Beijing, 100084), Tardieu Eric (CIRSEE-Lyonnais des Eaux, 38, rue du President Wilson, F78230 Le Pecq.): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18** (5), 1997, pp. 19—22

It is proven that Ultrafiltration Membrane BioReactor (UMBR) applied to domestic wastewater treatment, under conditions of hydraulic retention time 5h, sludge retention time 30d, membrane surface velocity 4m/s and membrane flux $75\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, is technically feasible and reliable during several weeks. Removal rate of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, and turbidity of the system are equal to or higher than 98%, 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. Furthermore, the hydraulic behavior of UMBR is concisely discussed. The hydraulic boundary layer is about $185\text{--}5.9\mu\text{m}$ thick, and the mass transfer boundary layer, $18.5\text{--}0.59\mu\text{m}$ when the typical Reynolds number is $4\times 10^3\text{--}2\times 10^5$.

Key words: ultrafiltration membrane, bioreactor, domestic wastewater, hydraulic behavior, boundary layer thick.

Soil Sensitivity to Acid Deposition in South China. Cation Leaching and Buffering Mechanism. Qiu Rongliang et al. (Department of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(5), 1997, pp. 23—27

Acidic deposition is considered an environmental problem that may affect the soil's cation-exchange status. This study used column leaching experiments to examine the influences of simulated acid rain with different pH values on base cation leaching of main soil types collected from South China. The results showed that amounts of leaching base cations increased obviously when the pH value of simulated acidic rain was lower than 3.0 or 3.5,

while the amounts almost did not differ when pH higher than 3.5. The leaching of Ca^{2+} and Mg^{2+} was affected evidently by the pH value of simulated acidic rain, compared with the leaching of K^+ and Na^+ . The H^+ buffering mechanisms which may vary in different simulated pH acidic rain are proposed for main soils studied. The dissolving reaction of salts was the dominant resources of leaching base cations and H^+ buffering when pH value higher than 3.5. The mechanisms of H^+ buffering treated with acid rain at pH 3.5 were the exchangeable cations and sulfate sorption. Dissolved aluminum on the broken edge of clay and aluminum oxides weathering of original and secondary minerals and sorption of sulfate played a great role on the leaching of soil cations and H^+ buffering when the soils treated with acid rain of pH lower than 3.5.

Key words: simulated rain, base cations, leaching, soil sensitivity.

Studies on Effect of Water Treated by High-Voltage Electrostatic Field on Oxygen Utilization Rating of Activated Sludge. Yang Feng, Kong Jilie, Deng Jiaqi (Dept. of Chem., Fudan University, Shanghai 200433), Xiang Yang, Gao Tingyao (School of Environ. Eng., Tongji University, 200092): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(5), 1997, pp. 28—30

The microorganisms extracted from activated sludge were selected as the sensitive material to make a BOD biosensor for monitoring the metabolic ability of themselves in high-voltage electrostatic treated water (HVETW). The oxygen utilization rating of the microorganisms which operated in such an aqueous media for appropriate time, could be promoted by at least 20%. At the same working high-voltage, this effect depended on how long the water was treated. The water treated for too long a time would lead to the negative effects. At 5000 V, it took about 6.0 h for the microorganisms to obtain the maximum oxygen utilization rating, whereas it did about 4.0 h at 7000 V. This discovery might offer a great potential for improving the new waste water disposal techniques.

Key words: high-voltage static electricity, activated sludge, BOD, microbial sensor.

Mixtoxicity of 2, 4-DNT and 6 Kinds of Nitroaromatic Compounds to the Algae. Liu Jingling, Yuan Xing, Lang Peizhen (Dept. of Environ. Sci., Northeast Normal Univ., Changchun, 130024): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18** (5), 1997, pp. 31—33

In order to evaluate objectively the ecological effects of 2, 4-DNT mixed with 6 kinds of ni-