

无机膜-生物反应器处理生活污水试验研究*

邢传宏¹⁾ Tardieu Eric²⁾ 钱 易¹⁾

(¹⁾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 ²⁾法国利安水务公司水与环境研究中心, 巴黎 F78230)

摘要 用无机膜-生物反应器进行处理生活污水试验. 结果表明, 当 HRT 为 5h, 膜通量为 $75\text{--}150\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 膜面流速为 $4\text{m}/\text{s}$, SRT 为 5、15、30d 时, 分别经过 10、16、14d 运行, 生物反应器中 MLSS 达到稳定值 3.1、10.7、17.3g/L. 对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和浊度的去除率分别超过 96%、95%、98%, 对 SS 和 E. coli 的去除率则达 100%. 试验出水水质优于建设部生活杂用水水质标准 CJ25.1-89. 初步探讨了无机膜的堵塞机理. 物理清洗和化学清洗相结合的方法可使无机膜通透能力恢复到新膜的 90% 以上.

关键词 无机膜, 生物反应器, 堵塞, 清洗.

无机膜-生物反应器(Inorganic Membrane Bioreactor 简称 IMBR) 是90年代兴起的一种污水生化处理新技术^[5]. IMBR 的核心是无机膜, 与膜-生物反应器(MBR) 比较^[1-4], 一般采用化学稳定性好、热稳定性高、机械性能优异、通量大、寿命长、易清洗的陶瓷为制膜材料, 但还存在制造成本高, 运行能耗大等问题, 因此 IMBR 及其在污水处理方面的研究成为当今膜科学技术领域的热点课题之一, 本文报道IMBR处理生活污水试验研究的结果.

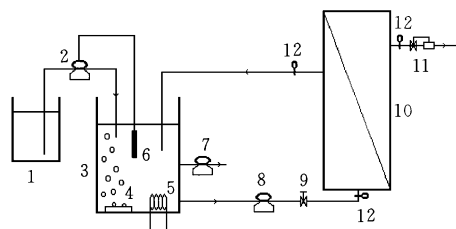


图1 无机膜-生物反应器工艺流程

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. 无机膜组件
11. 出水流量控制器 12. 压力表

1 试验概况

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、无机膜组件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. 生物反应器3中冷却器5控制反应器的温度在 30°C 左右. 微孔曝气器4供气量大小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 $300\text{--}400\text{mV}$. 液位控制器6控制进水泵2的启闭以保持生物反应器3内液位恒定; 流量控制阀9调节过膜循环流量来获得需要的膜面流速.

1.2 无机膜组件

试验用无机膜组件为法国 TECH-SEP 公司生产的 KERASEP X3管状陶瓷膜, 如图2. 烧结的7通道支撑体为疏松多孔陶瓷材料, 无机氧化锆(ZrO_2) 膜通过气相沉积紧密结合于7通道内表面. 膜表面孔径约 10nm , 切割分子量 30×10^5 , 单通道直径 4.5mm , 长 40cm , 每根膜(7个通道) 总表面积约 0.04m^2 , 清水试验新膜初始通透能力为 $4\text{--}5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{MPa})$.

1.3 试验用水

试验用水为清华大学北区生活污水, COD: $50\text{--}2234\text{mg}/\text{L}$, 一般在 $100\text{--}800\text{mg}/\text{L}$; SS: $80\text{--}1327\text{mg}/\text{L}$, 一般在 $100\text{--}600\text{mg}/\text{L}$; $\text{NH}_3\text{-N}$: $10\text{--}40\text{mg}/\text{L}$; E. coli:

* 中法环境保护国际合作项目
收稿日期: 1996-11-01

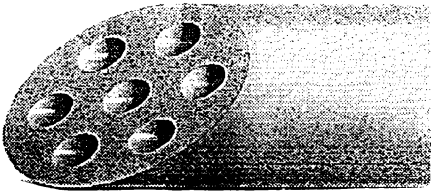


图2 无机膜斜剖面

10^5 — 10^6 个/L; 浊度: 50—80度; pH: 7.5—8.5; 水温: 15—25℃. 这些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 IMBR 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.

1.4 各阶段运行参数

为研究不同 SRT, 不同膜通量时 IMBR 处理生活污水的效果, 试验共分3个阶段进行: 第1阶段1996-01-11—02-02, 第2阶段1996-03-22—04-16, 第3阶段1996-04-17—06-17, 运行时间分别为23、26、62d. 各阶段运行参数见表1. 调整各阶段运行参数的方法是固定 HRT 和膜面流速, 设定剩余污泥排放量以改变 SRT, 控制投入运行的膜数量改变其通量.

表1 各阶段运行参数

参数名称	第1阶段	第2阶段	第3阶段
HRT/h	5	5	5
SRT/d	5	15	30
膜通量/ $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	150	75	75
膜面流速/ $m \cdot s^{-1}$	4	4	4

2 分析与讨论

2.1 各阶段出水水质

试验用接种污泥取自首都机场污水处理厂, 其处理对象主要为生活污水, 还包括一些飞机修理车间的废水. IMBR 各阶段出水水质情况见表2, 在启动期(约2—4d), 由于接种污泥对试验用水和循环泵的水力剪切作用不太适应, IMBR 的出水水质较以后的稳定期稍差, COD 最高值分别为30、22和28mg/L. 出水 NH_3-N 则无论是启动期还是稳定期都在2mg/L 以下, 这是由于生长周期较长的硝化细菌被无机膜截留在生物反应器内, 硝化反应进行较为充分的缘故. 3个阶段有95% 的出水 COD < 21mg/L, 出水 COD 平均值为10mg/L, 出水浊度平均值 < 1.3度, 出水中未检测到 SS 和 E. coli, 嗅无不快感, 综合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, 洗车扫除等.

表2 无机膜-生物反应器出水水质

水质项目	标准 CJ25.1-89		第1阶段			第2阶段			第3阶段		
	城市	洗车	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
	绿化	扫除	值	值	值	值	值	值	值	值	值
pH	6.9—9.0	6.9—9.0	8.5	7.1	7.8	8.5	7.1	7.8	8.5	7.1	7.8
SS/ $mg \cdot L^{-1}$	10	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
COD/ $mg \cdot L^{-1}$	50	50	30.0	4.0	10.0	22.0	4.0	10.0	28.0	2.0	10.0
$NH_3-N/mg \cdot L^{-1}$	20	10	1.6	0.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.4	0.6	1.0
浊度/度	10	5	1.1	0.9	1	1.2	1	1.1	1.3	1.1	1.2
总 E. coli/个 $\cdot L^{-1}$	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0

随着 SRT 的延长, 生物反应器中生物量增加, 有机物的分解稳定应进行得更为充分, 出水 COD、 NH_3-N 等也应该越来越低. 但由于无机膜的机械截留作用, 不管有机物分解稳定程度如何, 只有一定分子量大小的物质通过无机膜, 故随着 SRT 的延长, 出水水质基本没有变化. 说明无机膜对稳定 IMBR 出水水质具有重要作用.

IMBR 出水水质与膜通量大小无关. 由表1知, 第1阶段膜通量为第2、3阶段的2倍, 而 SRT 仅为第2、3阶段的1/3和1/6, 对比表2中3个阶段的出水水质, 未见有明显波动.

2.2 各阶段平均去除率

各阶段平均去除率见表3. 计算各阶段的平均去除率时, 舍去了进水 COD 和 SS 极高极低情况的几组小概率数据而选用一般情况下的水

质数据. IMBR 处理生活污水试验, 对 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别超过96% 和95%, 对浊度的去除率高达98% 以上, 对 SS 和 *E. coli* 的去除率稳定达到100%, 明显高于其它任何二级生化处理工艺. 特别是在运行期间, 进水水质发生了较大变化, 第3阶段进水平均 COD 分别是第

1、2阶段 COD 的2. 5倍和2. 6倍; $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别是第1、2阶段的1. 6倍和1. 4倍, 而第3阶段对 SS 和 *E. coli* 的去除率仍达到100%, 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、浊度的去除率分别达到或超过97%、98%、98%, 说明 IMBR 适应进水水质变化的能力较强.

表3 各阶段平均去除率

项 目	第1阶段平均		第2阶段平均		第3阶段平均	
	进(出)水	去除率/ %	进(出)水	去除率/ %	进(出)水	去除率/ %
SS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	157(0. 0)	100	178(0. 0)	100	348(0. 0)	100
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	286(10. 0)	96. 5	370(10. 0)	97. 3	565(10. 0)	98. 2
$\text{NH}_3\text{-N/ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	24(1. 2)	95. 0	21. 5(1. 1)	95. 0	25(0. 7)	97. 2
浊度/度	58(1. 0)	98. 3	69(1. 1)	98. 4	61(1. 2)	98. 0
总 <i>E. coli/ 个</i> $\cdot\text{L}^{-1}$	10 ⁶ (0)	100	10 ⁶ (0)	100	10 ⁶ (0)	100

从表1表3可知: SRT 和膜通量的变化对3个阶段的平均去除率没有影响.

2. 3 各阶段生物量、污泥 COD 负荷、体积 COD 负荷

提高 MLSS 浓度有助于减小生物反应器的体积. 但由于种种原因, 普通活性污泥法的 MLSS 浓度仅能维持在2g/L—4g/L. IMBR 无机膜的机械截留作用使生物反应器内的微生物保持高浓度和高活性成为可能^[6]. 表4为本研究中各阶段运行的 MLSS、污泥负荷、体积负荷. 3个阶段启动期, 生物反应器中 MLSS 与普通活性污泥法的2—4g/L 接近. 经过10、16和14d 运行后生物反应器中 MLSS 分别达到3. 1、10. 7和17. 3g/L. 第1阶段的 HRT 和 SRT 与普通活性污泥法相当, 稳定期 MLSS 为3. 1g/L, 也与普通活性污泥法相当. 第2、3阶段的 SRT 较普通活性污泥法大大延长, 稳定期 MLSS 也有较大提高, 分别为第1阶段的3. 5倍和5. 6倍, 这对减小生物反应器的体积具有特别重要的意义. 3个阶段的污泥 COD 负荷分别为0. 55kg/($\text{kg}\cdot\text{d}$)、0. 2kg/($\text{kg}\cdot\text{d}$)、0. 19kg/($\text{kg}\cdot\text{d}$), 与普通活性污泥法污泥 COD 负荷0. 1—0. 4kg/($\text{kg}\cdot\text{d}$) 大致相当. 值得指出的是在第3阶段, 由于进水的较大波动, 污泥 COD 负荷一度升至0. 97kg/($\text{kg}\cdot\text{d}$) (当日进水 COD 为2234mg/L、MLSS 为11. 0g/L), IMBR 出水水质及对各项指标的去除率都无大的变化, 表明 IMBR 处理生活污水适应冲击负荷能力较强, 出水水质稳定可靠.

3个阶段体积 COD 负荷见表4, 分别为

表4 各阶段运行的 MLSS、污泥负荷、体积负荷

项目	第1阶段	第2阶段	第3阶段
运行初期 MLSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2. 0	3. 6	4. 1
到达稳定需时/ d	10	16	14
稳定后 MLSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	3. 1	10. 7	17. 3
污泥 COD 负荷/ $\text{kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	0. 55	0. 2	0. 19
体积 COD 负荷/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$	0. 7	2. 2	3. 4

0. 7kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$) (对应的 MLSS 为3. 1g/L)、2. 2kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$) (对应的 MLSS 为10. 7g/L)、3. 4kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$) (对应的 MLSS 为17. 3g/L), 其中第1阶段体积 COD 负荷与普通活性污泥法的体积 COD 负荷0. 4—0. 8kg/($\text{m}^3\cdot\text{d}$) 相当. 在进水水质波动较大, 出水水质基本稳定的条件下, 试验第2、3阶段体积 COD 负荷有较大幅度的提高, 分别是普通活性污泥法的2倍和4倍多, 说明 IMBR 生物反应器单位体积的处理能力较普通活性污泥法有很大提高. 换言之, 处理同质同量的生活污水, IMBR 生物反应器体积可缩小2—4倍, 节约大量投资.

3 无机膜的堵塞与清洗

3. 1 无机膜的堵塞机理

经过一定时间的运行, 无机膜的通透能力会因堵塞而大大降低, 操作压力也会越来越高. 本研究控制无机膜组件的操作压力(Trans Membrane Pressure 简称 TMP) 低于0. 1MPa. 当 TMP 大于0. 1MPa 时, 认为无机膜已发生严重堵塞, 需进行清洗以恢复其通透能力. 此时无机膜的通透能力降为新膜通透能力的1/ 4—1/ 3. 笔者经过长期观察认为, 无机膜的堵塞可划分为2种类型:

(1) 通道阻塞(Channel clogging) 通道阻塞主要是由活性污泥中的纤维、杂物等折叠缠绕引起的,其中也含有相当数量的菌胶团.这些物质先是在无机膜进流一端的膜头处聚集,慢慢变厚,此过程需24—48h;然后向7个通道内延伸,约5—7d后甚至会将某个通道塞死,造成无机膜的通透能力骤降,过膜循环流量骤降,即为通道阻塞.在IMBR处理生活污水试验中,通道阻塞常严重影响运行周期.

(2) 膜面堵塞(Surface fouling) 膜面堵塞物主要是生物反应器中微生物正常代谢产生的粘性多糖类物质和一些蛋白质分子等,含有活性基团的大分子物质可能与无机金属离子如 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 等相互作用在无机膜表面沉积形成凝胶层,从而增加过滤阻力^[7].

3.2 无机膜的清洗

对于通道阻塞,已设计出一套简单有效的手动清除方法,实际生产中极易实现自动化,在此不再赘述.实践表明:没有通道阻塞的情况下,IMBR的运行周期可延长5—7倍.

对于膜面堵塞,采用物理清洗与化学清洗相结合的方法.物理清洗,即用清水冲洗管道和无机膜表面,洗去附着松散的部分物质.化学清洗,首先用稀碱热溶液(主要成分 NaClO)冲洗20min左右,膜面流速4m/s,以初步破坏凝胶层使之从无机膜表面剥离下来,碱洗的作用对象主要是其中的有机物如多糖类等;然后用稀酸热溶液(主要成分 HNO_3)持续冲洗5min左右,膜面流速与碱洗同,以溶出凝胶层中结合在有机大分子间的无机金属离子如 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 等,将凝胶层从无机膜表面彻底洗脱以恢复其通透能力.图3是一次实际清洗时各步操作膜通透能力的恢复情况,清水冲洗后无机膜通透能力略有改善,经碱洗后无机膜通透能力相对洗膜前有较大提高,达到新膜初始通透能力的50%—60%,但恢复效果仍不能令人满意.只有再经酸洗后,无机膜的通透能力才有大幅度的提高,超过了新膜初始通透能力的90%.就单步操作而言,酸洗比碱洗更有效.

仅用碱洗或仅用酸洗的方法效果都不太理想,至多恢复到新膜初始通透能力的60%.说明针对无机膜的膜面堵塞而言,清水洗+碱洗

+酸洗是一种行之有效的清洗方法.

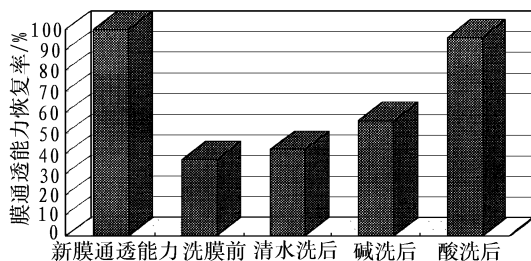


图3 各步清洗操作膜通透能力的恢复情况

4 结论

(1) IMBR处理生活污水,出水水质好而稳定,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.

(2) 当HRT为5h, SRT为5、15、30d时,IMBR生物反应器中MLSS经10、16、14d分别达到稳定值3.1、10.7和17.3g/L.

(3) IMBR处理生活污水,污泥COD负荷与普通活性污泥法大致相当,体积COD负荷可达普通活性污泥法的2—4倍.说明处理同质同量的污水,IMBR生物反应器体积可缩小2—4倍,节省大量投资.

(4) IMBR处理生活污水具有较强的抗冲击负荷能力.

(5) 无机膜的堵塞可划分为通道阻塞和膜面堵塞.手动方法清除通道阻塞可使运行周期延长5—7倍.物理清洗与化学清洗相结合清除膜面堵塞效果理想,可使通透能力恢复到新膜的90%以上.

参 考 文 献

- Smith C V, Jr Gregorio D D et al.. The Use of Ultrafiltration Membrane for Activated Sludge Separation. Presented paper at 24th Annual Purdue Industrial Waste Conference, Indiana. 1969
- Brindle K and Stephenson T. Biotech. and Bioeng., 1996, **49**: 601—610
- Yamamoto K, Hiasa M et al.. Wat. Sci. Tech., 1989, **21**: 43—54
- Moller E B, Stoothamer A H et al.. Wat. Res., 1995, **29** (4): 1179—1189
- Chaize S and Huyard A. Wat. Sci. Tech., 1991, **23**: 1591
- Bailey A D, Hansford G S et al.. Wat. Res., 1994, **28** (2): 297—301
- Tardieu E, Grasmick V et al.. Fouling Mechanisms in Membrane BioReactors Applied to Wastewater Treatment. Budapest: Presented Paper for 7th World Filtration Congress. 1996-05-20—23

Study on Inorganic Membrane Bio-Reactor for Domestic Wastewater Treatment. Xing Chuan-hong¹⁾, Tardieu Fric and Qian Yi²⁾ (1) State Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Dept. of Environ. Eng., Tsinghua University, Beijing, 100084, 2) CIRSEE-Lyonnaise des Eaux, 38, rue du President Wilson, F78230 Le Pecq.): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 1—4

It is proven that Inorganic Membrane Bio-Reactor (IMBR) applied to domestic wastewater treatment is technically feasible and reliable during several months. In this study, under conditions of membrane flux between 75 and 150L/(m² · h), hydraulic retention time 5 hours, sludge retention time 5, 15, 30 days and velocity inside the membrane channel 4 m/s, the stable sludge concentrations (MLSS) in the bioreactor reach 3.1, 10.7 and 17.3g/L after 10, 16 and 14 days respectively. Average removal rate of COD, NH₃-N, and turbidity of the system are higher than 96%, 95% 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. Moreover, fouling mechanisms of IMBR are also discussed in this paper. The initial permeability of inorganic membrane can be easily recovered over 90% after physical and chemical cleaning operations.

Key words: inorganic membrane, bioreactor, fouling, cleaning.

The Effect of Monocarboxaldehyde on the Structure and Biomass of Crop Population.

Huang Yingxiao and Lin Shunhua et al. (Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 5—8

The effect of a new pesticide mono carboxaldehyde (DMAH, concentration of 25%), on the structure and biomass of crop population was studied. The results showed that the effect of DMAH to biomass population varied following concentration of DMAH and crop species. In the treatment of 1000 times dilution DMAH, both of above-ground and under-ground biomass of cotton and bean were higher than control, while with 10 times dilution treating cotton and with 50 times dilution treating bean were obviously lower than the control. There were significant effect on the yield structure of cotton treated with 1000, 500, and 100 times dilution DMAH, especially in the treating system of 500 times, in which highest biomass of the layer was 2.5 times higher than the con-

trol. The amount of non-assimilative system was also obviously higher than the control (1.5 times) for the 1000 times treating system. In the 10 times treatment, both of assimilative system and non-assimilative system of cotton were evidently different, the height, leaf and root biomass were depressed. The structure of bean population changed according to the concentration and acidity of DMAH. The amount of assimilative and non-assimilative system of bean population increased by a factor of 2.2 and 1 respectively for control. The productive structure of bean treated with 50 times was decreased. There was a linear relationship between the light intensity as well as photosynthesis rate of crop and assimilative system amount in any layer.

Key words: monocarboxaldehyde, crop, population, biomass, structure, cotton, bean.

Silting-up Effect of Aquatic Plants in Lake East Taihu and Accumulation of Phosphorous in The Sludge.

Li Wenchao (Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008): *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(3), 1997, pp. 9—12

Remarkable accelerating effect of aquatic plants on silting-up of Lake East Taihu was found. For the whole lake, mean depth of sludge (hardness < 5kg/cm²) was 0.96m, and the total amount (dry weight) 149 370 000 t. In the zone along Southeastern shore where emerged plant *Zizania latifolia* was growing luxuriantly, the sludge was much more deeper. Organic matter only took 1.52% of the sludge which means that aquatic plants was not the main source of the materials in the sludge. But the organic matter made the sludge very loose (loosening-effect) which added 0.20 m sludge depth, about 20.8% of the total sludge depth. In the surface-layer sludge (0—10 cm), organic matter took 3.77% of the sludge and loosening-effect took as much as 64% of sludge depth. Mean content of phosphorous in the sludge was 0.023%, and the total amount of phosphorous 34 912 t. Phosphorous accumulated in the sludge mainly by non-biological sedimentation means. But aquatic plants accelerated phosphorous sedimentation primarily by promoting settlement of suspended solid in the lake water and protecting the loose sludge from erosion of wind-waves or current. It was very effective for reducing biological sedimentation that about 57% of plant product was harvested from the lake, but there was still large amount of plant matter was left in the lake.