

气升循环分体式膜生物反应器再生回用厕所污水的研究

徐慧芳, 樊耀波* (中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:研究了分体浸没式膜生物反应器及其应用于厕所污水的再生回用. 试验结果表明, 在入水浓度 COD₄₄₀ ~ 970 mg/L, BOD₅ 307 ~ 612 mg/L, NH₃-N 59 ~ 111 mg/L 的情况下, 出水水质稳定, 平均 COD < 47 mg/L, BOD₅ < 8.5 mg/L, NH₃-N < 20 mg/L, 处理水质达到建设部颁布的生活杂用水回用标准. 研究了动力学参数污泥负荷、容积负荷和 HRT 对出水 COD 的影响, 确定本试验较佳的污泥负荷和容积负荷分别为 0.1 kg/(kg·d) 和 1 kg/(m³·d), HRT 为 7 ~ 8 h. 本文对污泥浓度、温度和产水时间与间歇时间比对膜通量的影响进行了测定与探讨.

关键词:废水回用; 厕所污水; 气升循环分体式膜; 生物反应器

中图分类号: X799.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)02-05-0125

Treatment of Wastewater from a Toilet for Reclamation with A Airlift External Recirculated Membrane Bioreactor

Xu Huifang, Fan Yaobo (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: A new type membrane bioreactor (MBR) coupled with a separated immersed membrane unit was studied for treatment of wastewater from a toilet and for reclamation of the treated water. The results showed that the effluent of the MBR was stable with COD < 47 mg/L, BOD₅ < 8.5 mg/L, NH₃-N < 20 mg/L, when the influent concentration was COD 440 ~ 970 mg/L, BOD₅ 307 ~ 612 mg/L, NH₃-N 59 ~ 111 mg/L. The treated water could meet the standard of reused water for toilet washing issued by the Ministry of Construction P.R.China. The sludge loading, volume loading, HRT and their impaction to COD of effluent were studied. Appropriate sludge loading, volume loading were respectively 0.1 kg/(kg·d), 1 kg/(m³·d) and HRT 7 ~ 8 hour. The effect of mixed liquid suspended solid (MLSS), temperature and permeating time of the MBR to the membrane fluxes were discussed in this paper.

Key words: wastewater reclamation; wastewater from toilet; airlift external recirculated; membrane bioreactor

膜生物反应器 (Membrane Bioreactor, MBR) 是一种生物技术与膜技术相结合的高效生化水处理技术. 由于其有机物去除效率高, 出水水质好且稳定的特点, MBR 水处理技术日益广泛地应用到高浓度有机污水处理和循环水再利用中^[1~2].

日本报道了分体式 MBR 处理粪便污水的研究, 处理效果优于其它生物处理技术, 由于处理原水浓度高, 其处理工艺冗长, 后处理复杂^[3~6]. 河海大学对浸没式 MBR 处理粪便污水的效果做了小试研究, 但至今未见有工程应用的研究报道^[7].

本试验采用了一种新型的清洗方便、运行能耗较低的气升循环分体浸没式 MBR 处理浓度较低的化粪池上清液, 工艺紧凑, 出水经简单后处理就可达到建设部颁布的生活杂用水回用

标准; 本试验对新型 MBR 处理厕所污水的运行参数、操作条件对出水水质和膜通量的影响进行了研究, 可为该技术的进一步研究、开发及工程设计应用提供参考.

1 试验装置与方法

1.1 试验装置及工艺

研究采用的试验装置为一套处理水量为 2t/d 的分体浸没式 MBR. 装置特点是膜单元与生物反应器分置, 便于系统维修和膜清洗, 膜清洗时对生物反应器状态影响很小; 生物反应器与膜单元之间的循环无需循环泵; 膜组件采用浸没式, 保留了浸没式膜生物器低能耗的特点.

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (2002 AA601 220-A)

作者简介: 徐慧芳 (1978 ~), 女, 硕士.

收稿日期: 2002-03-30; 修订日期: 2002-07-15

* 通讯联系人

该膜生物反应器的装置建在某公共卫生间,工艺流程如图 1.潜污泵从化粪池抽出上清液送进生物反应池,活性污泥通过气升作用在生物反应池和膜单元之间形成水力循环,污水

在生物反应池内被生物净化后在清水泵作用下经膜过滤出水,膜出水用于冲洗便池,冲洗污水再回到化粪池.本系统生物反应池容积为 0.8 m^3 ,膜单元容积为 0.2 m^3 ,清水箱为 0.6 m^3 .

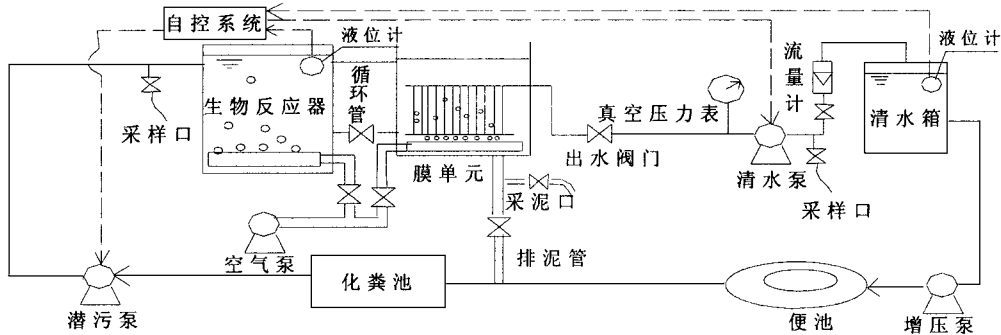


图 1 膜生物反应器处理回用厕所污水工艺流程图

Fig.1 Flow chart of MBR used for treatment and reuse of wastewater from a toilet

试验装置的膜组件由天津膜天膜工程技术有限公司制造,为聚偏氟乙烯中空纤维微滤膜,膜面积 20 m^2 ,膜单元和生物反应器内设曝气管曝气,曝气量根据膜污染程度与 DO 值的大小控制.流量计测量膜的瞬时透水量,真空压力表监测膜过滤压差的变化.自动控制系统根据生物反应器和清水箱液位控制潜污泵和清水泵的工作,并控制清水泵的工作/间歇时间.

1.2 分析项目与方法

分析项目有 COD、BOD₅、NH₃-N、污泥浓度 (MLSS)、挥发性污泥浓度 (MLVSS)、色度、浊度、pH、DO 及温度等.测定方法参见文献[8].

1.3 厕所污水水质及运行条件

处理的厕所污水为直接取自化粪池的上清液,水质指标如表 1 所示,系统运行参数见表 2.试验在秋冬季进行,温度逐渐由 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

表 1 厕所污水水质

Table 1 Quality of wastewater from a toilet

温度 / $^{\circ}\text{C}$	pH	COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	BOD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH ₃ -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	色度 /DT	浊度 /NTU	嗅
5.5~16	6.5~7.5	440~970	307~612	59~111	50~200	110~300	恶臭

表 2 MBR 运行参数

Table 2 Operating parameters of MBR

统计值	温度 / $^{\circ}\text{C}$	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	MLSS / $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	HRT /h	Q / $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
最大值	16	3	8	11.2	17.5	3.3
最小值	5.5	0.5	6.3	2.3	3.4	0.8
平均值	10	1.8	7.2	6.7	10	2.0

由于本系统膜单元独立于生物反应器,因此可分别控制其 DO 大小.试验期间生物反应器内底部厌氧,DO 为 0.5 mg/L 左右,上部 DO 保持在 $1\sim3\text{ mg/L}$,膜单元 DO 为 2 mg/L 左右.系统经历了微生物接种、驯化,微生物量

(MLSS)逐渐增多的启动期,约为 66d.在污泥浓度达到 4.4 g/L 时认为系统启动期结束,进入稳定运行期,开始进行各种参数和水质指标测定.系统运行期间生物反应器内污泥的 VSS/SS 值在此期间基本无变化,保持在 $0.84\sim0.9$,VSS/SS 值较高反应了系统污泥的有效成分较高.

2 结果与讨论

2.1 MBR 对污染物的去除

(1) COD 的去除 图 2 为 MBR 稳定运行期对 COD 的去除情况. COD 入水浓度在 $440\text{ mg/L}\sim970\text{ mg/L}$ 之间变化.45d 内活性污

泥由 4g/L 增长到 10g/L,出水 COD 在 50 ~ 109 mg/L 之间波动,平均为 64 mg/L;45 d 后污泥浓度稳定在 10 ~ 12g/L 之间,出水 COD 均维持在 47 mg/L 以下,平均为 29 mg/L.整个系统运行期间 COD 去除率在 87 % ~ 98 % 之间,平均去除率为 93 %.试验结果表明厕所污水中含有一些难降解的 COD.

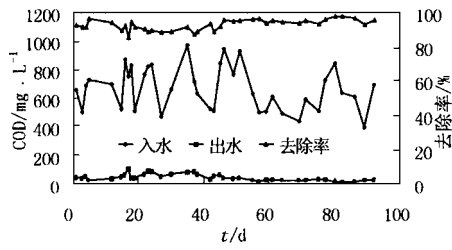


图 2 COD 的去除效率

Fig. 2 Removal efficiency of COD

(2) BOD₅ 的去除 MBR 对 BOD₅ 有很高的去除率(图 3).入水 BOD₅ 浓度在 307 ~ 612 mg/L 之间,出水 BOD₅ 的浓度均 < 8.5 mg/L,平均去除率达到 98.5 %.试验入水的 BOD₅/COD 在 0.48 ~ 0.85 之间,表明厕所污水属易生物降解污水.

(3) 氨氮(NH₃-N)的去除 出水的 NH₃-N 浓度逐渐降低,启动 1 个月后出水的 NH₃-N 浓度为 108 mg/L,出水的氨臭味明显;2 个月后出水 NH₃-N 浓度降到 67.4 mg/L,出水氨臭味明显减小.在稳定运行第 32 天膜单元出水的 NH₃-N 浓度降为 20 mg/L,出水已没有臭味,出水水质也开始逐渐变好.系统稳定运行第 60 天后出水 NH₃-N 浓度平均为 8.3 mg/L,平均去除率为 92 %(图 4).因为膜对 NH₃-N 没有去除作用^[9],所以出水 NH₃-N 浓度逐渐降低反映了

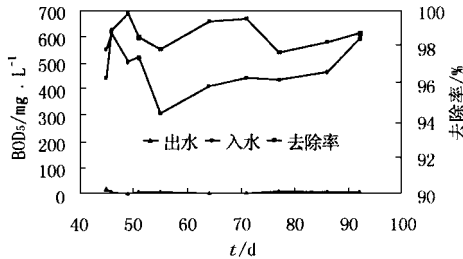


图 3 BOD₅ 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of BOD₅

MBR 驯化、截留和富集代时较长的硝化细菌的过程,也说明 MBR 可以高效地去除氮源.

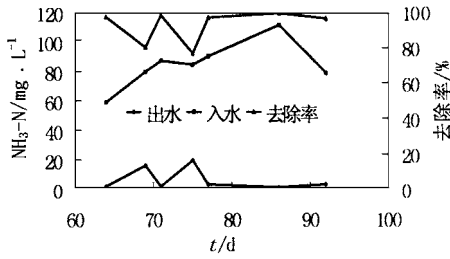


图 4 NH₃-N 的去除

Fig. 4 Removal efficiency of NH₃-N

(4) 色度的去除 厕所污水的色度在 50 ~ 200 倍之间,运行初期经 MBR 处理后的出水色度在 15 ~ 35 倍左右(图 5).运行后期为了脱色,进行了投加活性炭的试验,结果表明脱色作用明显,出水色度降到 8 倍以下,平均去除率达到 91 %.

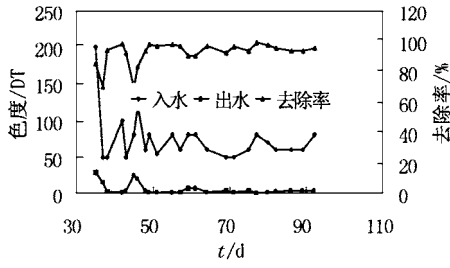


图 5 色度的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of color

2.2 运行参数及影响因素分析

(1) 污泥负荷和容积负荷 由于膜对微生物的高效截留作用,生物反应器内污泥浓度高于普通活性污泥法,使本系统在较高的容积负荷条件下能维持低 F/M 比.本试验的 COD 污泥负荷在 0.035 ~ 0.7kg/(kg·d) 之间波动,多维持在 0.1 kg/(kg·d) 左右,小于普通活性污泥法的 0.1 ~ 0.4kg/(kg·d);容积负荷在 0.42 ~ 2.86kg/(m³·d) 之间波动,平均为 1.24kg/(m³·d),是普通活性污泥法 0.4 ~ 0.8kg/(m³·d) 的 1 ~ 3 倍(图 6).试验发现在污泥负荷低于 0.15kg/(kg·d),容积负荷低于 1.2kg/(m³·d) 时,出水 COD 浓度低于 40 mg/L,MBR 在此负荷条件下有一定的抗冲击负荷能力.由此试验可知,为取得较好的出水水质,污泥负荷设计值

可取 $0.1 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,容积负荷取 $1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

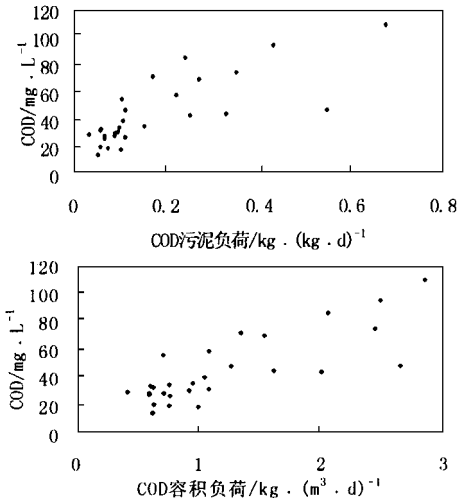


图 6 出水 COD 与污泥负荷、容积负荷的关系
Fig. 6 Relation between effluent COD and sludge load, volume load

(2) 水力停留时间(HRT) 对出水 COD 的影响 MLSS 为 $8 \sim 12 \text{ g/L}$ 时 HRT 与出水 COD 的关系见图 7. 试验发现 HRT 与出水 COD 有良好的相关性, HRT 增加, 出水 COD 浓度降低, HRT 在 $2 \sim 6 \text{ h}$ 之间, 出水 COD 浓度随 HRT 增加而迅速下降, HRT 大于 8 h , 出水 COD 浓度随 HRT 增加变缓下降, HRT 在 7 h 左右时, 出水 COD 浓度值约为 45 mg/L , 可达到建设部生活杂用水回用标准 $\text{COD} < 50 \text{ mg/L}$.

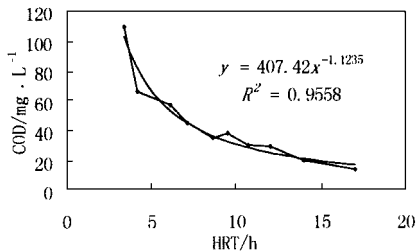


图 7 出水 COD 与 HRT 的关系
Fig. 7 Relation between effluent COD and HRT

(3) 污泥浓度(MLSS) 对膜通量的影响 MBR 内较高的污泥浓度使有机物去除能力加强, 但又会降低膜通量. 所以考虑处理效率和水处理量, 存在一个较佳污泥浓度范围. 根据膜过滤凝胶极化模型, 膜过滤达到稳态时, 膜界面污泥浓度达到临界值不再变化^[10] :

$$J = k \lg(x_g/x) \quad (1)$$

式中, k : 传质系数 $[\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; x_g : 膜界面污泥浓度 (mg/L) ; x : 污泥浓度 (mg/L) .

本试验结果经过回归得到如公式(1) 的膜通量与污泥浓度对数的线性关系:

$$J = -0.1681 \lg(\text{MLSS}) + 0.7684 \quad (2)$$

由图 8 看出, 在 MLSS 为 8 g/L 即 $\lg \text{MLSS}$ 等于 3.9 时是一个转折点, $\lg \text{MLSS}$ 大于 3.9 膜通量迅速减小. 根据试验结果污泥浓度在 $8 \sim 12 \text{ g/L}$ 之间出水 COD 好且稳定, 考虑到膜透水量, 建议 MBR 设计污泥浓度在 $8 \sim 9 \text{ g/L}$ 左右.

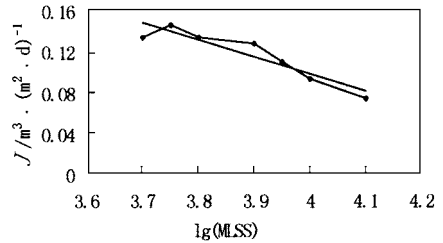


图 8 膜通量与污泥浓度的关系
Fig. 8 Relation between membrane flux and MLSS

(4) 温度(t) 对膜通量的影响 选择污泥浓度为 $8 \sim 12 \text{ g/L}$, 回归分析得出低温条件下的温度与膜通量正线性相关:

$$J = 0.0278t + 0.0515 \quad (3)$$

式中, J : 膜透速率 $[\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{h})]$. 温度升高, 污泥粘性下降, 膜通量升高(图 9). 由公式得出温度每升高 10°C , 透水量增大 $0.273 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{h})$. 由式(3) 和试验结果可知, 冬季膜透水量最小, 实际水处理工程的膜透水量设计值建议以冬季数值为准, 如可取 $0.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{h})$.

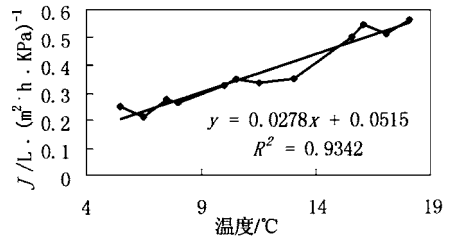


图 9 温度与膜通量的关系
Fig. 9 Relation between temperature and membrane flux

(5) 产水时间: 间歇时间对膜通量的影响

为了保证透水率,系统采用间歇产水方式,产水时间: 间歇时间对透水量的影响见图 10. 随产水时间延长,膜透水量减小,但产水时间过长,如为 7 min 时,膜污染较严重,延长间歇时间不足以恢复膜透水量. 试验结果表明,产水时间与间歇时间比例一般选择 3: 1 ~ 5: 1.

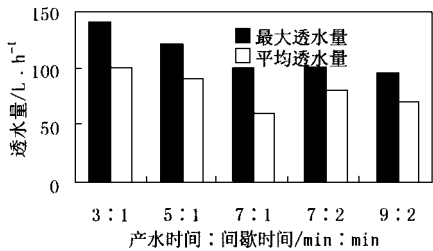


图 10 产水时间和间歇时间比与透水量的关系

Fig.10 Relation between ratio of working time to breaking time and membrane flux

(6) 运行能耗分析 工艺的主要能耗来自于鼓风机,为保证 DO 和膜面水流速度的曝气能耗,在选择鼓风机合适的曝气量后,运行能耗与膜通量直接相关,膜通量降低,单位产水能耗升高. 本试验选定风机的效率按 40 % 计,系统产水量由 250 L/h 降到 60 L/h,能耗一般为 0.3 ~ 1.0 k W / (h · m³),如图 11 所示. 大大低于一般分体式 MBR 2 ~ 10 k W / (h · m³) 的运行能耗^[11].

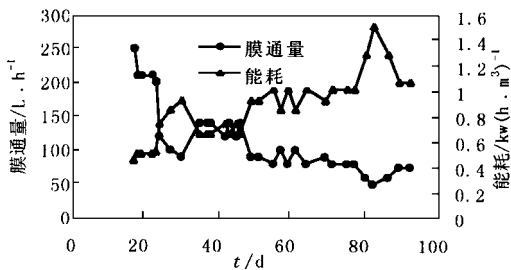


图 11 能耗与膜通量的关系

Fig.11 Relation between energy consumption and membrane flux

3 结 论

(1) 气升循环分体式 MBR 处理回用厕所污水效率高,出水水质好,可回用冲刷. 在入水 COD 浓度为 440 ~ 970 mg/L, BOD₅ 为 307 ~ 612 mg/L, NH₃-N 浓度为 59 ~ 111 mg/L、色度为 50 ~ 200 倍情况下,出水 COD < 47 mg/L、BOD₅ < 8.5 mg/L、NH₃-N < 20 mg/L、色度 < 20

倍,其平均去除率分别为 93 %、98 %、92 % 和 91 %.

(2) 本系统出水 COD 浓度与污泥负荷和容积负荷正相关,为保证出水 COD 较低,污泥负荷和容积负荷可分别取 0.1 kg / (kg · d) 和 1 kg / (m³ · d) 左右.

(3) 本系统出水 COD 与 HRT 存在幂相关关系,为保证理想的出水水质,HRT 取 7 ~ 8 h 较佳.

(4) 透水量与污泥浓度对数线性相关,为保证膜透水量,污泥浓度可控制在 8 ~ 9 g/L; 温度与透水量符合线性关系,低温是膜通量较小的原因之一.

(5) 合适的产水时间: 间歇时间有利于保持较大的膜通量,本系统合适的工作时间: 间歇时间为 3: 1 ~ 5: 1.

(6) 本研究的气升循环分体式 MBR 有膜维护、膜清洗方便的优点,该工艺的运行能耗小于 1.0 k W / (h · m³).

参考文献:

- 1 岑运华.日本水综合再生利用系统 90 计划的进展概要.环境科学研究,1990,3(2):50.
- 2 Cote P, Thompson D. Wastewater treatment using membranes: the North American experience. Wat Sci Tech., 2000,41(10-11):209~215.
- 3 Toshihiro T. Ultrafiltration aids Japanese treatment. WIQ, 1997, July/ August:26~27.
- 4 Magara Y et al. Biological denitrification system with membrane separation for collective human excreta treatment plant. Wat. Sci. Tech.,1992,25(10):241~251.
- 5 Misaki T, Matsui K. Night soil treatment system equipped with ultrafiltration. Desalination,1996,106:63~70.
- 6 Magara Y, Itoh M. The effect of operational factors on solid/liquid separation by ultra membrane filtration in a biological denitrification system for collected human excreta treatment plants. Wat. Sci. Tech.,1991,23(7-9):1583~1590.
- 7 周建仁,白韬光.膜-生物反应器处理高浓度生活污水的中试研究.环境工程,2002,20(1):18~19.
- 8 国家环保局编.水和废水监测分析方法(第三版).北京:中国环境科学出版社,1989.
- 9 李红兵,顾国维等.中空纤维膜生物反应器处理生活污水的特性.环境科学,1999,20(2):53~56.
- 10 何义亮.膜生物反应器工艺参数控制研究.上海环境科学,1999,18(7):318~320.
- 11 Tom stephenson, Simon judo, Bruce Jefferson, Keith Brindle. Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. London, UK: IWA Publishing, 2001. 70.