

膜生物反应器中膜过滤特征及膜污染机理的研究

林红军, 陆晓峰*, 段伟, 沈飞

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 以膜生物反应器处理市政污水, 通过对活性污泥进行终端过滤来反映膜污染机理, 实验表明, 最初很短时间内膜污染受膜孔堵塞模型控制, 之后受沉积层阻力模型控制, 后一阶段是膜污染的主要控制阶段; 膜的相对通量随过滤时间呈指数衰减趋势, 压力越大, 通量衰减越快; 污泥沉积层存在压密过程, 这一过程中的污泥比阻随压力增大而增大, 并得到处理市政污水的污泥压密指数为 0.807 8; 阻力分布实验表明沉积层阻力占总阻力的 90% 以上, 是膜过滤污染阻力的主要组成部分; 活性污泥各组分对膜污染均有贡献, 其中悬浮固体、胶体颗粒和溶质产生的阻力分别占 87.98%、6.20% 和 5.82%; 根据实验和计算结果, 探讨了 MBR 处理市政污水过程中可能的膜污染机理。

关键词: 膜生物反应器; 膜污染机理; 活性污泥; 阻力分布

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2511-07

Filtration Characteristics and Mechanism of Membrane Fouling in a Membrane Bioreactor for Municipal Wastewater Treatment

LIN Hong-jun, LU Xiao-feng, DUAN Wei, SHEN Fei

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Filtration characteristics and mechanism of membrane fouling were investigated with MBR mixed liquor. It was found that, the variation of filtration resistance was fit to the standard blocking filtration model in initial process, and then fit to cake filtration model in later process. In dead-end filtration of sludge, the relative flux was in the tendency to the exponential decay along with filtration time, and flux was decreased more quickly at higher pressure. Sludge was compressed during filtration process, and resistance of sludge was increased with the increase in filtration pressure, the compressibility index was obtained as 0.807 8. Quantitative calculations showed that cake resistance made up over 90% of total resistance. In addition, the relative contribution of each of the sludge fractions to membrane was respectively calculated as 87.98% for suspended solids, 6.20% for colloids and 5.82% for solutes. Then a possible mechanism underlying membrane fouling was proposed.

Key words: membrane bioreactor; mechanism of membrane fouling; activated sludge; resistance distribution

膜生物反应器(MBR)作为一种高效水处理工艺,具有出水水质好、运行维护简单、结构紧凑、占地面积少等优点,在污水处理及回用方面有着广阔的应用前景。但是,膜污染依然是影响该技术经济性和运行稳定性的一个关键因素。膜污染是指与膜接触的料液中的微粒、胶体粒子或溶质大分子与膜存在物理、化学、生化作用或机械作用,在膜面或膜孔内吸附、沉积以及微生物在膜水界面的积累,造成膜孔径变小或堵塞,使膜产生透过流量与分离特性大幅度降低的现象。膜污染不仅缩短了膜的使用寿命^[1],而且直接导致泵的抽吸水头和曝气量增加,是造成 MBR 能耗较高,运行成本增加和膜组件频繁清洗与更换的主要原因^[2]。因此,研究 MBR 运行过程中膜的过滤特征和膜污染的发生机理,并以此来指导膜污染防治,对于维护工艺运行性能、降低运行费用、指导工艺的放大设计等方面具有重要的意义。

目前,许多研究者开展了针对膜污染的研究,如

有报道认为污泥浓度^[3~5]、污泥特性^[6~9]、微生物代谢产物的组成和数量^[6,7,10,11]是造成膜污染的关键因素,也有研究者指出膜污染直接受膜本身性质^[8,12]和膜过滤过程的水力条件^[13~16]的影响。这些研究对了解膜污染的影响因素及其防治有着重要的意义,但目前的这些研究多关注于对膜污染影响因素的考察,而很少从膜污染发生的整个过程去考察膜污染的发生机理。基于此,本研究着重从膜过滤过程、污泥压密过程、膜污染阻力的分布与变化、活性污泥各组分对膜污染的贡献等多个方面综合考察膜的过滤特征和膜污染机理,以为实际运行的 MBR 系统中的膜污染防治提供指导。

收稿日期: 2006-05-25; 修订日期: 2006-07-06

基金项目: 上海市科技发展基金项目(022312119)

作者简介: 林红军(1978~),男,博士研究生,主要研究方向为膜法水处理和水污染控制, E-mail: linhonjun@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xflu@sinap.ac.cn

1 实验装置与方法

1.1 MBR 装置及活性污泥

本实验所用的活性污泥混合液取自处理市政污水的一体式中试 MBR 装置, 该装置有效容积为 8m^3 , 有效膜面积为 150m^2 , 处理规模为 $60\text{m}^3/\text{d}$, 水力停留时间为 3.2h , 污泥停留时间为 $30\sim 40\text{d}$. 运行过程中的进水水质情况: COD 为 $(547.5 \pm 38.5)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, BOD_5 为 $(384.5 \pm 38.2)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 浓度为 $(29.1 \pm 5.4)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 为 7.3 ± 0.5 . 整个运行过程中的污泥浓度维持在 $10\sim 15\text{g/L}$, 污泥有机负荷约为 $0.24\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$. 提取实验用活性污泥时, 该装置已经连续运行约 400d . 活性污泥外观似棉絮状, 呈灰黄色, 略带土腥, 镜检发现大量的钟虫、轮虫和纤毛类的原生动物, 微型动物较活泼, 表明污泥活性良好.

1.2 实验装置

终端过滤虽与 MBR 中的膜过滤存在一定的差别, 但也可一定程度上反映 MBR 中的膜污染情况, 由于操作较为简便, 这种方法目前被广泛用在了 MBR 膜污染的研究中^[7, 17-19].

图 1 为终端过滤装置的示意图. 反应器为 350mL 容积的有机玻璃杯式滤器, 内设磁力搅拌桨, 用于对膜的水力清洗; 外加压力通过高压氮气提供; 料液从顶部带旋钮的孔中加入; 透过液流入电子天平上的容器中, 通过检测重力的变化折算为体积. 实验所用膜为 PVDF 平片式超滤膜, 其表观截留分子量为 1.4×10^5 , 所用膜的直径为 6.5cm , 膜面积为 0.00332m^2 .

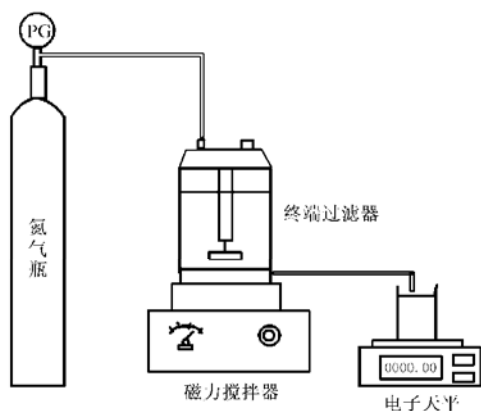


图 1 终端过滤实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of dead-end filtration set-up

新膜在通量测试过程中存在压密过程, 该过程中无膜污染发生, 但通量持续下降至一稳定值. 为防

止压密过程对膜通量的影响, 实验用膜在污染测试之前均先经过压密处理.

1.3 膜污染表征

膜污染通常用膜过滤过程中的膜污染阻力模型来表征, 膜通量和操作压力之间的关系可用式 (1) 表示:

$$J = \frac{\Delta p}{\mu \cdot R} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot (R_m + R_c + R_f)} \quad (1)$$

式中, J 为膜通量, $\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$; Δp 为膜两侧的压力差, Pa ; μ 为透过液粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; R 为过滤总阻力, m^{-1} ; R_m 为膜本身固有阻力, m^{-1} ; R_c 为膜表面泥饼层所产生的阻力, m^{-1} ; R_f 为膜孔堵塞与吸附所产生的阻力, m^{-1} .

对于 MBR 系统而言, 膜污染过程中同时存在膜孔的堵塞和沉积层的形成, 这一过程一般可以用非牛顿流体的标准堵塞过滤模型和沉积过滤模型来描述.

$$\text{标准堵塞模型: } J = J_0 \exp(-K_p t) \quad (2)$$

$$\text{沉积阻力模型: } J^2 = \frac{J_0^2}{1 + J_0^2 \cdot K_c \cdot t} \quad (3)$$

式中: J_0 为初始时刻的膜通量, $\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$; K_p 、 K_c 分别为膜孔堵塞模型和泥饼阻力模型的常数值. 将式 (1) 分别代入式 (2)、(3) 变形后, 得到以膜阻力与时间为变量的相关模型.

$$\text{膜孔堵塞模型: } \ln R_f = \ln R_0 + K_p t \quad (4)$$

$$\text{沉积层阻力模型: } R_c^2 = R_0^2 + \frac{K_c \times \Delta p^2}{\mu^2} \cdot t \quad (5)$$

根据上述公式可对不同形式的膜污染进行表征及评价.

对于沉积层阻力模型, 其中的 R_c 可进一步表述为:

$$R_c = \alpha \cdot M = r_c \cdot \delta_c \quad (6)$$

式中, α 为污泥比阻, m/kg ; r_c 为污泥比阻, m^{-2} ; M 为沉积层密度, kg/m^2 ; δ_c 为沉积层厚度, m .

根据 Carman-Kozeny 公式:

$$\alpha = \frac{180(1-\epsilon)^2}{\rho_p d_p^2 \epsilon^3} = \frac{1}{p_h \rho_p} = \frac{r_c}{\rho_p} \quad (7)$$

式中, ϵ 为沉积层孔隙率; ρ_p 为沉积层颗粒体积质量, kg/m^3 ; d_p 为沉积颗粒平均粒径, m ; p_h 为通过沉积层的水力透过性, m^2 .

$$\delta_c = \frac{\text{沉积层体积}}{\text{膜面积}} = \frac{m_p}{\rho_p(1-\epsilon)A_m} = \frac{M}{\rho_p} \quad (8)$$

式中, m_p 为沉积层总干重, kg ; A_m 为膜面积, m^2 .

由式(6) (7) (8)可得:

$$R_c = r_c \delta_c = \frac{180(1-\epsilon)^2}{d_p^2 \epsilon^3} \cdot \frac{m_p}{\rho_p(1-\epsilon)A_m} = \alpha M \quad (9)$$

1.4 活性污泥终端过滤实验

先用清洁的膜过滤去离子水测得初始通量, 然后过滤活性污泥混合液, 从产生透过液开始每隔 30s 记取 1 次透过液质量, 由所测值计算膜通量. 实验测试 3 个压力(0.12 0.16 0.22MPa)下污泥终端过滤情况, 以考察压力的影响和过滤过程中的污泥压密过程.

本实验以相对通量值比较膜的过滤性能, 其定义为 J_t/J_0 , 其中 J_t 为 t 时刻的膜通量, J_0 为清洁膜的去离子水通量, 该比值扣除了由不同膜片以及不同过滤温度所带来的差异, 因此具有可比性.

1.5 膜阻力分布测试

膜阻力分布测试过程如下: ①在一定压力下, 先用清洁膜过滤去离子水测得通量, 通过达西方程计算膜固有阻力 R_m ; ②在相同压力下用该膜过滤活性污泥, 当通量达到稳定状态时, 以此时的通量计算总阻力 R_t ; ③将活性污泥混合液倒掉后取出膜, 用自来水洗去膜表面的沉积层, 然后将膜重新装回后测试去离子水通量, 相对应的膜阻力即认为是 ($R_m + R_f$). 相关的计算关系式如下:

$$R_m = \frac{\Delta p_T}{\mu \cdot J_w} \quad (10)$$

$$R_f = \frac{\Delta p_T}{\mu \cdot J'_w} - R_m \quad (11)$$

$$R_c = \frac{\Delta p_T}{\mu \cdot J_{AS}} - R_m - R_f \quad (12)$$

式中, Δp_T 为膜两侧的压力差, Pa; J_w 为过滤去离子水的稳定通量, $L/(m^2 \cdot h)$; J'_w 为擦去表面沉积层后的膜稳定通量, $L/(m^2 \cdot h)$; J_{AS} 为过滤活性污泥的稳定通量, $L/(m^2 \cdot h)$.

1.6 活性污泥各组分对膜污染贡献的计算

活性污泥混合液分为 3 部分, 即溶液、胶体物质和悬浮固体物质^[19]. 本研究假设这 3 部分各自独立地产生膜污染, 这样总的膜阻力就等于这 3 部分产生的膜阻力之和, 即:

$$R_{AS} = R_{ss} + R_{col} + R_{sol} \quad (13)$$

式中, R_{AS} 为活性污泥产生的阻力, m^{-1} ; R_{ss} 为悬浮固体物质产生的阻力, m^{-1} ; R_{col} 为胶体物质产生的阻力, m^{-1} ; R_{sol} 为溶液产生的阻力, m^{-1} .

通过过滤活性污泥计算 R_{AS} , 其计算关系式为:

$$R_{AS} = R_t - R_m = \frac{\Delta p_T}{\mu \cdot J_{AS}} - R_m \quad (14)$$

取活性污泥混合液, 通过重力沉降作用沉淀 4h, 然后取上清液过滤, 所测定的阻力计量为胶体物质和溶液这 2 部分的过滤阻力, 计算关系式为:

$$R_{col} + R_{sol} = \frac{\Delta p_T}{\mu \cdot J_{sup}} \quad (15)$$

上述所得的上清液以孔径为 $0.45\mu m$ 醋酸纤维微滤膜过滤, 过滤后的溶液再进行阻力测定, 其计算关系式为:

$$R_{sol} = \frac{\Delta p_T}{\mu \cdot J_{sol}} \quad (16)$$

通过式(13)~(16)可分别计算得到这 3 部分产生的膜阻力.

2 结果与讨论

2.1 过滤通量和总阻力的变化情况

图 2 为 0.12MPa 压力下的过滤通量和总阻力变化情况, 从图 2 中可以看出, 通量在最初的几十秒内急剧衰减, 至第 1min 时趋于稳定, 相应过滤总阻力则不断上升.

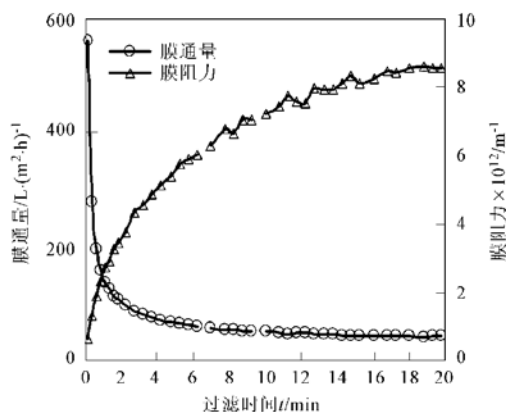


图 2 压力为 0.12MPa 下的过滤通量和总阻力变化情况

Fig. 2 Variation of membrane flux and resistance at pressure of 0.12 MPa

MBR 中膜所过滤的活性污泥混合液是由不同颗粒范围的物质组成, 因此在污染过程中必然同时存在膜孔的堵塞和沉积层的形成. 以 1min 为界限, 把过滤过程分为 2 个阶段, 即第 I 阶段和第 II 阶段. 考察 2 个阶段膜阻力与时间的关系, 分别以式(4)和式(5)对 2 阶段进行拟合, 以确定标准堵塞过滤定律和沉积过滤定律对污染过程的控制作用, 拟合结果如图 3 所示.

图 3(a) 表明第 I 阶段较好地符合膜孔堵塞模

型,即膜污染的产生主要来源于溶液中的大分子物质和颗粒物质对膜孔的堵塞.图 3(b)表明第 II 阶段

较好地符合沉积层阻力模型,沉积层的形成是控制膜过滤的主要污染因素.

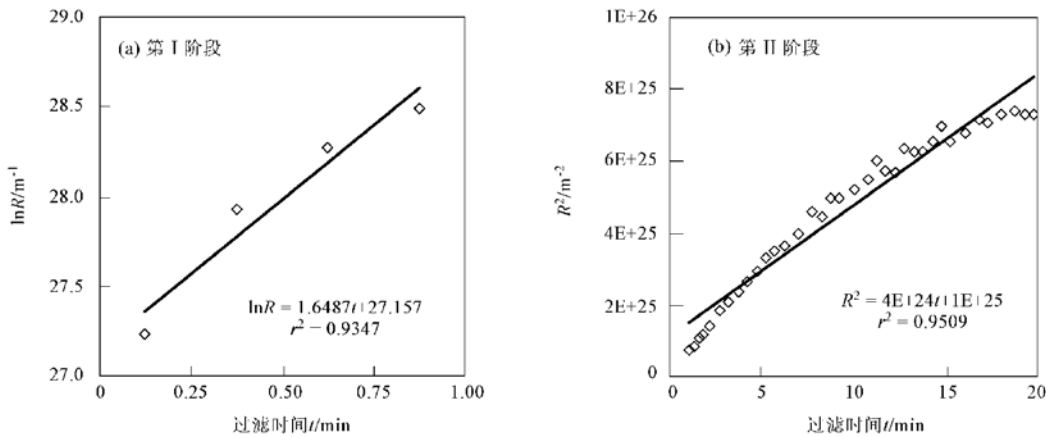


图 3 2 个阶段过滤阻力与时间的变化关系

Fig. 3 Relation between resistance and filtration time during two phases

2.2 压力的影响和压密过程

考察了不同压力下膜相对通量的变化情况,结果如图 4 所示.由图 4 可知,不论在何种压力下,通量在 6min 内就急剧衰减到稳定值,但压力越大,衰减速度越快,相对通量值越低.

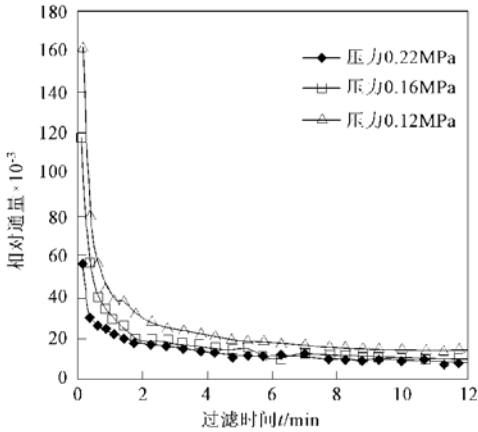


图 4 不同压力下膜相对通量的变化

Fig. 4 Variation of relative flux at different pressures

从图 4 中可以发现,相对通量 J_t/J_0 随过滤时间的变化关系呈现指数衰减趋势,即可通过式 (17) 表示:

$$J_t/J_0 = A t^m \tag{17}$$

式中, A 为系数; m 为通量衰减指数,为负值.对图 4 中不同压力下的过滤曲线按式 (17) 进行拟合,可得不同压力下的 m 值,结果如表 1 所示.3 种压力下都呈现较好的相关性,表明膜的相对通量随过滤

时间呈指数衰减趋势.同时可以看出,随着压力增大,通量衰减指数随之减小,即通量衰减越快.

表 1 不同压力下的 m 值和相关系数

Table 1 Values of m and r^2 at different pressures

压力/MPa	m	r^2
0.12	-0.402	0.984 6
0.16	-0.431	0.982 2
0.22	-0.474	0.977 3

菌胶团是活性污泥中固体物质的主要组成部分,它是较松散的体系,因而膜过滤过程中污泥沉积层表现出可压密性.污泥的压密过程使过滤阻力急剧升高,并形成不可逆的污染层且较难通过水力清洗去除.因此,有必要通过确定污泥的压密性来考察膜污染状况.

污泥的压密性通过压密指数(n)来衡量:

$$\alpha = \beta \cdot (\Delta p)^n \tag{18}$$

式中, α 为污泥比阻, m/kg ; β 为比例系数.

通过确定不同压力下的污泥比阻,作 $\ln \alpha$ 和 $\ln \Delta p$ 关系图便可求得压密指数(n),其值在 0~1.0 之间.根据式 (7) 确定 α 值很不方便,实际上 α 是通过式 (3) 所表示的沉积过滤定律确定的.

为了方便求解 α ,将式 (9) 变形为:

$$\begin{aligned} R_c = \alpha M &= \frac{180(1-\epsilon)^2}{\rho_p d_p^2 \epsilon^3} \cdot \frac{m_p}{(1-\epsilon) A_m} \\ &= \frac{180(1-\epsilon)}{\rho_p d_p^2 \epsilon^3} \cdot \frac{m_p}{A_m} = \alpha' \cdot \frac{m_p}{A_m} = \alpha' \cdot \frac{V_{CAS}}{A_m} \end{aligned} \tag{19}$$

式中, c_{AS} 为污泥浓度, kg/m^3 ; α' 为新定义的污泥比阻, 以下仍以 α 来表示新定义的比阻.

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = J = \frac{\Delta p}{\mu(R_m + R_c)} \quad (20)$$

将式(19)中的 R_c 代入式(20), 积分得到沉积过滤定律的完整表达式:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu R_m}{\Delta p A_m} + \left[\frac{\alpha c_{AS} \mu}{2 A_m^2 \Delta p} \right] V \quad (21)$$

因此图解 $V-t/V$ 便可求得 α .

根据以上推导, 以各压力下 $V-t/V$ 曲线斜率和相应膜过滤参数 ($A_m = 0.00332 \text{ m}^2$, $\mu = 1.15 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 污泥浓度 c_{AS} 为 $11.35 \text{ kg}/\text{m}^3$) 通过式(21)可求得不同压力下的污泥比阻 α , 结果如表 2 所示, 这样就定量地求得了一定压力下的污泥比阻. 表 2 表明随着过滤压力的增大, 污泥比阻增大, 说明

表 2 不同压力下的污泥比阻 α

Table 2 Values of α at different pressures

压力/MPa	污泥比阻 $\alpha/\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$
0.12	1.650E+13
0.16	1.936E+13
0.22	3.292E+13

表 3 PVDF 超滤膜的阻力分布情况¹⁾(压力: 0.22MPa, t : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)

Table 3 Filtration resistances of the PVDF UF membranes (Pressure: 0.22MPa, t : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)

膜	膜固有阻力 $R_m \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$	污染阻力 $R_f \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$	沉积阻力 $R_c \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$	总阻力 $R_t \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$
新膜	0.13 (0.78)	0.10 (0.63)	16.31 (98.59)	16.55 (100)
运行 1a 后的膜	0.13 (0.40)	0.91 (2.85)	30.81 (96.75)	31.85 (100)

1) 括号内为本项阻力占总阻力的百分比, 下同

从表 3 中可知, 无论是新膜还是运行 1a 后的膜, 沉积阻力均占总阻力的 90% 以上, 是膜阻力的主要组成部分, 可见膜表面污泥沉积层的形成是造成膜通量衰减的主要原因. 而来源于不可逆污染和膜孔阻塞所引起的污染阻力(即 R_f) 相比于沉积阻力而言几乎可以忽略不计. 比较 2 种膜的阻力分布情况, 运行 1a 后的膜在总阻力上有较大幅度的上升(上升了 92.4%), 同时 R_f 所占比例也有所增加, 由初期的 0.63% 上升到 2.85%, 而这部分阻力主要是由于微生物附着生长以及膜孔阻塞所引起. 对于长期运行的 MBR 系统, 取出膜组件可明显观察到有

表 4 活性污泥各组分的膜污染阻力(压力: 0.22MPa, t : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)

Table 4 Resistances of sludge constituents (Pressure: 0.22MPa, t : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)

活性污泥阻力 $R_{AS} \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$	悬浮固体物质产生的阻力 $R_{ss} \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$	胶体物质产生的阻力 $R_{col} \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$	溶质产生的阻力 $R_{sol} \times 10^{12}/\text{m}^{-1}$
16.42 (100)	14.44 (87.98)	1.02 (6.20)	0.96 (5.82)

较高压力下污泥沉积层被压得更加紧密.

由 $\ln \alpha$ 和 $\ln \Delta p$ 关系图求得污泥比阻(压密系数) α 为 0.8078, 如图 5 所示.

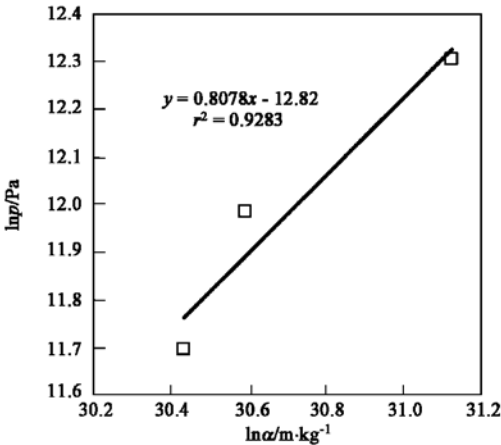


图 5 α 的求解

Fig. 5 Solving for α

2.3 膜污染阻力分布

由 1.5 所示的实验方法测试 PVDF 超滤膜过滤活性污泥时的通量, 并计算相应的污泥阻力分布情况, 结果如表 3 所示.

一层较厚的污泥层粘附在膜表面, 污泥层较致密, 较难通过水力清洗干净.

由此可见, 在长期运行条件下, 污泥沉积层产生的阻力始终是膜污染的主导因素, 因而膜污染的防治应当主要从降低膜的沉积阻力着手, 通过采用增大曝气强度、低通量运行及改变膜材质等措施均可达到这一目的.

2.4 活性污泥各组分对膜污染的贡献

根据 1.6 所示的方法进行实验, 计算活性污泥各组分产生的污染阻力, 结果如表 4 所示.

表 5 给出了不同的研究得到的污泥各组分对膜

污染的贡献率. 不同的研究结果差别较大, 这主要是因为各研究所使用的膜材质、污泥特性和实验方法不同引起的. 尽管如此, 大多数研究均表明悬浮固体对膜污染的贡献率最大. 本研究中, 悬浮固体物质产生的阻力 R_{ss} 占 87.98%, 远大于其它组分产生的阻力. 这主要是由于悬浮固体物质是活性污泥混合液的主要组成部分, 它对膜表面污泥沉积层的形成起主要作用^[19], 而沉积阻力又是膜过滤过程中的主要污染阻力.

表 5 部分文献报道的活性污泥各成分对膜污染的贡献率/%

Table 5 Relative contributions of various sludge fractions to membrane fouling in MBR systems/%

悬浮固体	胶体物质	溶质	文献
88	6	6	本研究
24	24	52	[20]
65	30	5	[21]
63~ 71	29~ 37	29~ 37	[6]
72~ 83	4~ 14	13~ 14	[19]

2.5 膜污染机理探讨

通过对以上试验现象和结果的分析和总结, 本研究对膜过滤活性污泥过程中可能的膜污染机理进行探讨. 图 6 形象地描述了活性污泥的过滤过程, 根据膜通量衰减情况, 可把整个过程分为 3 个阶段.

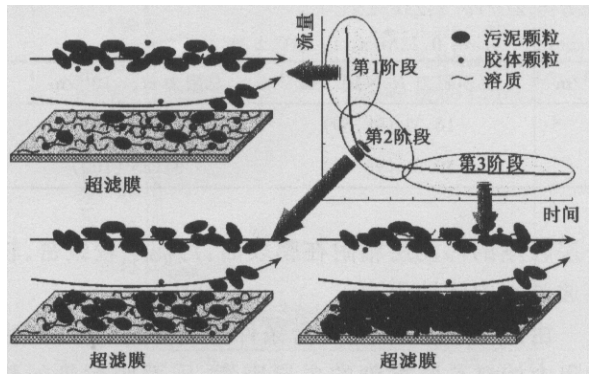


图 6 膜污染机理示意

Fig. 6 Schematic illustration of initial cake layer formation

第 1 阶段: 表现为膜过滤最初的很短时间内膜通量的急剧下降. 刚开始过滤时, 由于膜面存在压差, 污泥混合液中的污泥颗粒、胶体颗粒和溶质开始向膜表面沉积, 污泥颗粒尺寸较大而较容易被曝气和搅拌所形成的膜面剪切力带走, 胶体颗粒虽然尺寸较小但在数量上相比于污泥颗粒是很少的, 因而这部分作用相对于污泥颗粒的作用可以忽略不计, 同时胶体颗粒也较易被膜面剪切力带走, 而溶质却较容易沉积在膜表面, 并进入膜孔进而吸附在膜孔

内壁, 造成不可逆的膜污染. 这 3 部分都对膜通量的急剧下降起到一定作用, 其中溶质所引起不可逆污染是主要因素. 这很好地解释了最初的膜污染受标准堵塞模型控制的现象.

第 2 阶段: 表现为膜通量下降速度减缓. 在这一阶段中, 污泥颗粒和胶体颗粒持续向膜表面和已形成的污泥层表面沉积, 造成膜过滤阻力不断增加. 而这时溶质在膜表面被截留积聚, 浓度升高, 远高于反应池内溶质浓度, 从而造成溶质的反向扩散, 在这一阶段溶质的沉降和反向扩散慢慢达到一种平衡状态, 因而溶质对膜阻力增加的贡献较小. 这一阶段形成的膜污染多为可逆污染, 通过水力清洗可以恢复.

第 3 阶段: 膜污染速度大幅下降, 膜通量逐渐稳定. 这一阶段中沉积的污泥多为较大颗粒的污泥絮体, 由于抽吸力对污泥颗粒的拉拢作用明显减小, 沉积的量相对前 2 个阶段较少. 另 1 个对膜通量有重要影响的因素是污泥沉积层的压密作用, 这一作用存在于整个过滤过程, 在第 3 阶段这一作用更加明显. 压密过程取决于外部压力, 压力越大压密速度越快. 当污泥颗粒向污泥表面沉降的速度和膜表面污泥向溶液中扩散的速度达到平衡时, 膜通量达到稳定状态.

MBR 系统长期运行中的膜污染其实是一个非常复杂的过程, 这一过程不仅涉及物理作用, 还涉及化学和生物作用, 由于物理作用起主要作用, 后 2 部分的作用经常被忽略, 而完整的膜过滤过程这 2 部分作用也是应该被考虑的. 同时膜过滤在达到第 3 阶段后, 污泥沉积层随着系统运行其物理、化学及生物特征均将发生变化, 对膜污染将产生相应的影响, 目前由于实验手段所限, 这些影响还无法定量表征, 相关的研究有待进一步展开.

3 结论

(1) 污泥的终端过滤过程最初很短时间受膜孔堵塞模型控制, 之后受沉积层阻力模型控制, 后一阶段是膜污染的主要控制阶段.

(2) 膜的相对通量随过滤时间呈指数衰减趋势, 压力越大, 通量衰减越快. 活性污泥过滤过程中存在污泥压密过程, 压力越大, 污泥比阻随之增大, 本实验得到处理市政污水的活性污泥的压密指数为 0.807 8.

(3) 污染阻力分布测试表明, 沉积层阻力占总阻力的 90% 以上, 而来源于不可逆污染和膜孔阻塞所引起的污染阻力(即 R_f) 远小于沉积阻力, 说明膜

污染防治应从降低沉积层阻力着手。

(4) 活性污泥各组分对膜污染均有贡献, 其中悬浮固体物质产生的阻力占 87.98%, 是膜污染阻力的主要组成部分, 胶体颗粒和溶质产生的阻力较小。

(5) 根据膜通量衰减情况, 可以把整个过滤过程分为 3 个阶段, 各个阶段具有各自不同的膜污染机理和控制因素。

参考文献:

- [1] 郑成. 膜的污染及其防治[J]. 膜科学与技术, 1991, **17**(2): 5~ 14.
- [2] 郑祥, 樊耀波. 膜生物反应器运行条件的优化及膜污染的控制[J]. 给水排水, 2001, **27**(4): 41~ 44.
- [3] Magara Y, Itoh M. The effect of operational factors on solid/liquid separation by ultramembrane filtration in a biological denitrification system for collected human excreta treatment plants[J]. Water Sci. Technol., 1991, **23**: 1583~ 1590.
- [4] Clech P L, Jefferson B, Judd S J. Impact of aeration, solids concentration and membrane characteristics on the hydraulic performance of a membrane bioreactor[J]. J. Membr. Sci., 2003, **218** (1~ 2): 117~ 129.
- [5] Lee J M, Ahn W Y, Lee C H. Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor[J]. Water Res., 2001, **35**: 2435~ 2445.
- [6] Lee W, Kang S, Shin H. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors[J]. J. Membr. Sci., 2003, **216**(1~ 2): 217~ 227.
- [7] Chang I S, Lee C H. Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system—the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling[J]. Desalination, 1998, **120**: 221~ 233.
- [8] Choi J G, Bae T H, Kim J H, *et al.* The behavior of membrane fouling initiation on the crossflow membrane bioreactor system[J]. J. Membr. Sci., 2002, **203**: 103~ 113.
- [9] Shin H S, Kang S T. Characteristics and fates of soluble microbial products in ceramic membrane bioreactor at various sludge retention times[J]. Water Res., 2003, **37**: 121~ 127.
- [10] Huang X, Gui P, Qian Y. Behavior of soluble microbial products in a membrane bioreactor[J]. Proc. Biochem., 2001, **36**(5): 401~ 406.
- [11] Nagaoka H, Ueda S, Miya A. Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process[J]. Water Sci. Technol., 1996, **34**: 165~ 172.
- [12] Kang I J, Yoon S H, Lee C H. Comparison of the filtration characteristics of organic and inorganic membranes in a membrane-coupled anaerobic bioreactor[J]. Water Res., 2002, **36**: 1803~ 1813.
- [13] Hong S P, Bae T H, Tak T M, *et al.* Fouling control in activated sludge submerged hollow fiber membrane bioreactor[J]. Desalination, 2002, **143**: 219~ 228.
- [14] Tardieu E, Grasmick A, Jaugey V, *et al.* Hydrodynamic control of bioparticle deposition in a MBR applied to wastewater treatment[J]. J. Membr. Sci., 1998, **147**: 1~ 12.
- [15] Tardieu E, Grasmick A, Jaugey V, *et al.* Influence of hydrodynamics on fouling velocity in a recirculated MBR for wastewater treatment[J]. J. Membr. Sci., 1999, **156**: 131~ 140.
- [16] Kim J S, Lee C H, Chang I S. Effect of pump shear on the performance of a crossflow membrane bioreactor[J]. Water Res., 2001, **35**: 2137~ 2144.
- [17] Li Y Z, He Y L, Liu Y H, *et al.* Comparison of the filtration characteristics between biological powdered activated carbon sludge and activated sludge in submerged membrane bioreactors[J]. Desalination, 2005, **174**: 305~ 314.
- [18] Chang I S, Lee C H. Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system—the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling[J]. Desalination, 1998, **120**: 221~ 233.
- [19] Bae T H, Tak T M. Interpretation of fouling characteristics of ultrafiltration membranes during the filtration of membrane bioreactor mixed liquor[J]. J. Membr. Sci., 2005, **264**: 151~ 160.
- [20] Wisniewski C, Grasmick A. Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling[J]. Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects, 1998, **138**: 403~ 411.
- [21] Defrance L, Jaffrin M Y, Gupta B, *et al.* Contribution of various constituents of activated sludge to membrane bioreactor fouling[J]. Bioresour. Technol., 2000, **73**: 105~ 112.