

错流膜生物反应器水力清洗特性研究*

李春杰 何义亮

欧阳铭

(同济大学环境工程学院, 上海 200092)

(兰州铁道学院环境工程系, 兰州 730070)

摘要 采用外压管式聚砜-聚丙烯腈共混超滤膜进行错流膜生物反应器水力清洗特性研究. 结果表明: 清洗时采用高膜面流速、低操作压力和限制透过液对流传递作用有利于错流膜生物反应器通量的恢复, 这符合膜污染形成和去除过程中的传质机理. 适宜的膜面流速应稍大于临界流速 $v_k = 1.92\text{m/s}$, 清洗时间应控制在 10min, 适宜的清洗操作压力为 0.07MPa.

关键词 膜生物反应器, 错流, 膜污染, 水力清洗, 传质机理.

Study on the Characteristics of Hydraulic Cleaning in Crossflow Membrane Bioreactor

Li Chunjie He Yiliang

(School of Environmental Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Ouyang Ming

(Dept. of Environ. Eng., Lanzhou Railway Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract The external pressure tubular module and PS-PAN blended membranes were used in the study on the characteristics of hydraulic cleaning in crossflow membrane bioreactor. It was demonstrated that low trans-membrane pressure and high velocities along membrane surface played an important role in removing the fouling layer and so did the elimination of the effect of the convective transport to membrane because the pressure differences across the membrane were reduced to zero. Considerations of the mechanism of mass transfer in the formation and elimination of the membrane fouling furtherly supported these cleaning conditions. The cleaning operation parameters were obtained at crossflow velocity a little more than $v_k = 1.92\text{m/s}$ which was the critical velocity, cleaning time about 10min, trans-membrane about 0.07MPa.

Keywords membrane bioreactor, crossflow, membrane fouling, hydraulic cleaning, mechanism of mass transfer.

膜生物反应器在运行过程中由于膜污染引起的通量下降问题直接影响膜组件的效率和使用寿命, 成为实际应用的关键. 笔者认为, 广义的膜污染不仅包括由于不可逆的吸附、堵塞引起的污染(不可逆污染), 而且包括由于可逆的浓差极化导致凝胶层的形成(可逆污染), 二者共同造成运行过程中膜通量的衰减. 水力清洗着重去除可逆污染物(凝胶层)及部分不可逆污染物(膜面沉积物). 错流膜生物反应器由于膜组件具有特定的错流流动因素^[1,2], 使得水力清洗成为解决该反应器膜污染问题的重要措施.

本文针对外压管式超滤膜组件对活性污泥混合液进行的错流过滤, 研究了水力清洗基本操作条件以及膜污染形成和去除过程中的传质机理.

1 试验概况

1.1 试验流程

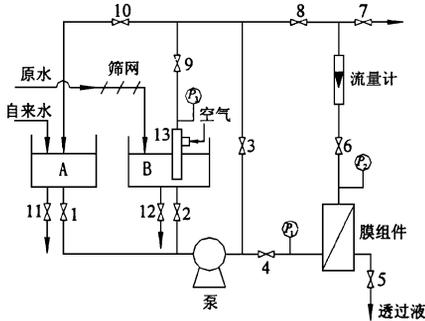
* 铁道部青年科学基金资助项目

李春杰: 男, 27岁, 博士生

收稿日期: 1998-08-22

试验流程如图 1 所示。

采用外压管式膜组件, 聚砜-聚丙烯腈(PAN)共混超滤膜, 截留分子量 6×10^4 。



- A. 清洗水箱 B. 曝气池 P_1 、 P_2 、 P_3 压力表 1. 清洗阀
2. 污泥阀 3. 分流阀 4. 膜组件进液阀 5. 透过液阀
6. 膜组件浓液阀 7. 排放阀 8. 回流阀 9. 污泥回流阀
10. 清洗水回流阀 11、12 排空阀 13. 水射器

图 1 试验流程图

系统利用分流回路的污泥混合液和膜组件的浓缩回流液合流至曝气池进行水射器曝气, 具有节能的特点。

1.2 试验用水

该系统用于生活污水的回用处理, 试验用水取自某高校生活污水, 其水质指标见表 1。

表 1 试验用水水质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

COD_{Cr}	BOD_5	SS	$\text{NH}_3\text{-N}$	pH
148—252	98—184	28—151	9.8—34.3	6.8—7.6

1.3 清洗效果评价指标及试验方法

试验中清洗效果以通量恢复程度来表示, 为了消除由于膜本身性能差异带来的误差, 采用相对通量值 J_{rel} 代替实际通量值, 定义为:

$$J_{\text{rel}} = \frac{J}{J_w} \times 100\%$$

式中, J 为污泥超滤或清洗过程中的实际通量 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, J_w 为清洁膜最初清水通量 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

试验中每个工况都以清洁膜开始, 先以一定操作条件对活性污泥混合液超滤运行 1h, 然后以一定操作条件进行水力清洗试验, 考察通量恢复程度 J_{rel} 随时间的变化关系。

2 试验结果与分析

2.1 膜面流速对清洗效果的影响

首先, 用清水对清洁膜组件进行流态试验, 即通过考察雷诺数 Re 与膜组件 $\Delta p_{\text{CF}} (= p_1 - p_2)$ 之间的关系, 确定该外压管式膜组件由紊流到层流的临界雷诺数 Re_k 及临界流速 v_k 。试验结果如图 2 所示。

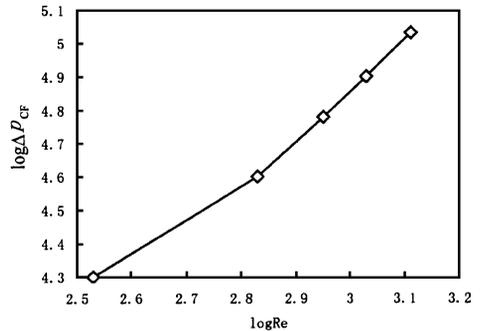
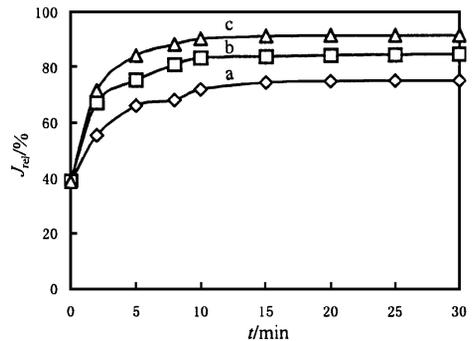


图 2 $\log \Delta p_{\text{CF}} - \log Re$ 关系图

由图 2 可知, 该组件 $Re_k = 673.5$ (拐点处对应的值), 对应 $v_k = 1.92 \text{m/s}$, 清洗流速应不小于此临界值。

在保持操作压力 (Δp_{TM}) 一定的情况下, 考察 2 种情况下不同膜面流速对清洗效果的影响。第 1 种情况是保持清洗之前的污泥混合液膜面流速 (污泥流速 v_s) 一定, 考察不同清洗水膜面流速 (清洗流速 v_c) 对清洗效果的影响 (图 3)。



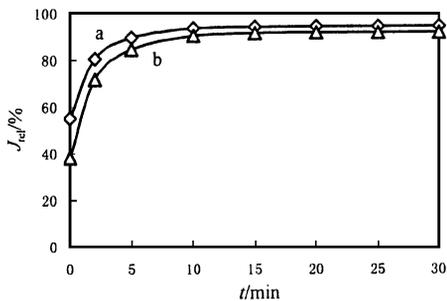
$\Delta p_{\text{TM}} = 0.12 \text{MPa}$ $v_s = 1.92 \text{m/s}$ a. $v_c = 1.92 \text{m/s}$ $J_w = 37.4 \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ b. $v_c = 5.26 \text{m/s}$ $J_w = 36.2 \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

c. $v_c = 7.04 \text{m/s}$ $J_w = 38.0 \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

图 3 清洗流速对清洗效果的影响

结果表明,流速越大清洗效果越好,然而在实际工程中,采用的清洗膜面流速越高,能耗越大,越不经济,而清洗效果也将逐步达到极限。因此,经济有效的清洗流速应以临界流速为基准,可采用稍高于临界值的流速作为经济的清洗流速。图3显示在清洗时间达到10min后,通量恢复已趋于稳定,因此,从经济性考虑,清洗时间控制在10min左右。

第2种情况保持清洗流速一定,考察污泥流速对后续清洗效果的影响,如图4所示。



$\Delta p_{TM} = 0.12 \text{ MPa}$ $v_c = 7.04 \text{ m/s}$ $J_w = 38.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

a. $v_s = 7.04 \text{ m/s}$ b. $v_s = 1.92 \text{ m/s}$

图4 污泥流速对清洗效果的影响

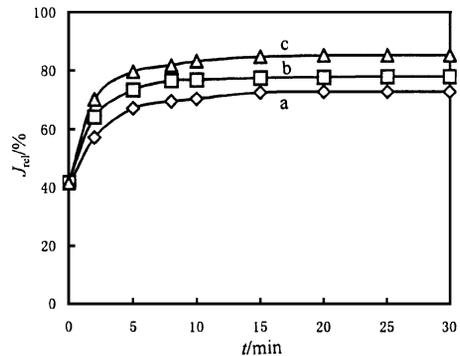
图4中a和b分别是在高污泥流速(J_{rel} 初始值大)和低污泥流速(J_{rel} 初始值小)运转后的清洗通量恢复曲线。结果表明,a较b的清洗效果要好些,但从最终通量恢复情况来看,二者差距并不大。根据错流过滤的特点,在对活性污泥混合液的超滤运行中,高膜面流速有利于减轻浓差极化和提高透水通量的作用^[3],而从以上结果看,这只在较小的程度上减轻了后续清洗的负担。

2.2 操作压力对清洗效果的影响

在清洗流速一定的情况下($v_c = 3.64 \text{ m/s}$),不同操作压力对清洗效果的影响如图5所示。

结果表明,清洗时采用较低的操作压力(c曲线)有利于通量的恢复。原因在于,当清洗操作压力较大时,污染物质向膜面的对流传递作用就会增强,其结果是增大了对污染层的压密效应,使之更紧密而不易去除。尽管操作压力大,实际透水量大,但高的操作压力对应于更高

的初始水通量 J_w ,因此相对通量值 J_{rel} 反而小,也就是通量恢复程度小。该试验中,较适宜的操作压力为0.07MPa。



a. $\Delta p_{TM} = 0.17 \text{ MPa}$ $J_w = 54.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

b. $\Delta p_{TM} = 0.13 \text{ MPa}$ $J_w = 39.1 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

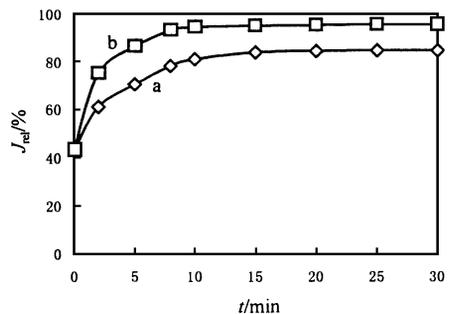
c. $\Delta p_{TM} = 0.07 \text{ MPa}$ $J_w = 21.3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

图5 清洗操作压力对清洗效果的影响

试验中也发现,在对活性污泥混合液的超滤运行中,采用较低的操作压力也有利于防止膜污染。这与水力清洗时采用较低的操作压力原理是一致的。

2.3 清洗时透过液对流传递作用对清洗效果的影响

清洗时关闭流程图1中透过液阀5,即可限制透过液对流传递作用,从而考察清洗时透过液对流传递作用对清洗效果的影响,试验结果如图6所示。



$\Delta p_{TM} = 0.1 \text{ MPa}$ $v_c = 5.26 \text{ m/s}$ $J_w = 31.3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

a. 不关闭透过液阀, b. 关闭透过液阀

图6 透过液对流传递作用对清洗效果的影响

结果表明,清洗时关闭透过液出水阀通量恢复更好.在这种情况下,由于膜两侧压差为0,污染层只受到清洗流速产生的剪切作用和其依靠浓度梯度产生的反扩散作用,离开污染层的物质不再有外加压力驱使回到污染层,因此对清洗最有利.

3 错流膜污染及清洗过程中的传质机理

错流膜组件运行传质机理可进一步说明以上水力清洗的基本操作条件.传质作用因素表现在3个方面(图7a),即由压力产生的物质向膜面的对流传递作用 $(J_s + J_v) \cdot c$ (其中, J_s 为污泥流率, J_v 为透过液流率),由于浓差极化产生的反扩散作用 $(-D_g \cdot dc/dy)$ 和由于错流流速使物质受到沿膜面的传递(剪切)作用 $J_s \cdot ax$.假定过程中污染层厚度沿膜面均匀分布,且浓

度 c_g 保持不变.图7a反映出错流膜组件对污泥混合液超滤时在3个作用因素下形成污染层的过程,主体料液为活性污泥混合液,主体料液浓度 $c_b \neq 0$,对流传递作用为 $(J_s + J_v) \cdot c$.在清洗过程中(图7b),主体料液为清水,可认为 $c_b = 0$,对流传递作用为 $J_v \cdot c$,而污染层厚度的减少仍在3个作用因素下完成,其中反扩散作用是由浓度梯度决定,而清洗操作条件能够直接改变的传质因素是增大污染物膜面传递作用 $J_s \cdot ax$ 和限制透过液对流传递作用 $J_v \cdot c$.结合试验结果看,增大清洗膜面流速正是加强了物质的膜面传递作用 $J_s \cdot ax$;在不限限制透过液对流传递作用时,低压清洗有利于减小透过液对流传递作用;而图7c则显示了在限制了透过液对流传递作用后,仅有反扩散作用和膜面传递(剪切)作用,对水力清洗最有利.

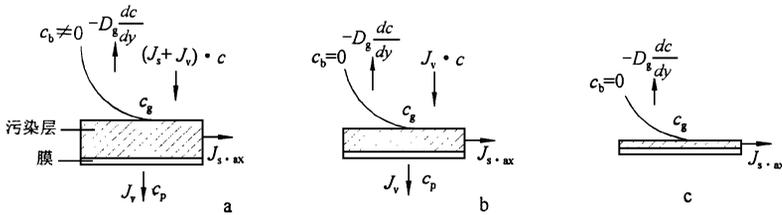


图7 错流过滤膜污染及清洗过程中传质作用示意图

4 结论

(1) 错流膜生物反应器在水力清洗时采用高膜面流速有利于膜通量的恢复,适宜的清洗流速应稍大于临界流速 $v_k = 1.92\text{m/s}$,清洗时间控制在10min;而在对活性污泥混合液的超滤运行中保持较高膜面流速只在较小的程度上减轻了后续清洗的负担.

(2) 水力清洗时采用低操作压力有利于膜通量的恢复,适宜的操作压力为0.07MPa,在对活性污泥混合液的超滤运行中保持低操作压力在一定程度上有利于防止膜污染.水力清洗

时关闭透过液出水阀,以限制其产生的对流传递作用,有利于水力清洗的进行.

参 考 文 献

- 1 Belfort G and Nagata N. Fluid mechanics and cross flow filtration: some thoughts. Journal of Desalination, 1985, 53: 57—61
- 2 Mellis R. Fluid dynamics in a tubular membrane: theory and experiment. Chem. Eng. Comm., 1993, 122: 103—125
- 3 黄霞等.膜-活性污泥法组合工艺的污水处理特性研究.资源、发展与环境(第三届海峡两岸学术研讨会论文集). 1995, 95—102