

附增缓冲区的膜-生物反应器临界通量改进测定法

马金星^{1,2}, 王志伟^{1,2}, 吴志超^{1,2}, 王巧英^{1,2}

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 利用改进的通量阶梯式递增法对膜-生物反应器(MBR)中的临界通量进行了测定, 同时对不同缓冲时间下的测定值差异进行了研究. 结果表明: 延长缓冲区的等待时间, 可有效降低通量-跨膜压差(Flux-TMP)与通量-膜渗透性(Flux-Permeability)的不对称性, 削弱 Flux-TMP 滞后效应, 降低膜面残余污染阻力, 提升次临界区内污染可逆性. 附增缓冲区的临界通量测定法可更好地表征膜组件过滤性能随通量的变化规律, 减缓可逆污染对测定结果产生的影响.

关键词: 膜-生物反应器; 临界通量; 缓冲时间; 滞后效应
中图分类号: X 703.1 **文献标识码:** A

An Improved Step-wise Method to Determine Critical Flux of Membrane Bioreactor by Adding Relaxation Zone

MA Jinxing^{1,2}, WANG Zhiwei^{1,2}, WU Zhichao^{1,2}, WANG Qiaoying^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Shanghai 200092, China)

Abstract: The critical flux of submerged flat membrane bioreactor (MBR) was measured by an improved flux-stepwise method and the measured values under different relaxation time were analyzed. The result was that with longer relaxation time, asymmetry of Flux-TMP and Flux-Permeability decreases remarkably with much lower membrane residual resistance and better fouling reversibility in sub-critical flux zone and without obvious hysteresis. The relaxation-zone-attached flux-stepwise method can better describe the principle of flux-permeability and alleviate the impact of reversible fouling.

Key words: membrane bioreactor (MBR); critical flux; relaxation time; hysteresis effect

膜-生物反应器(MBR)是将膜分离技术和生物反应器结合而成的一种新型污水处理工艺. 因其具有结构紧凑, 占地面积小, 污泥产量少, 出水水质好等特点^[1], 日益受到国内外专家学者关注. 目前, 全球 MBR 市场年平均增长速率约为 10.9%^[2], 仅在中国, 从 1991 年至 2006 年的 15 年间, 兴建的 MBR 污水处理厂(站)已达 254 座^[1]. 然 MBR 在大规模应用推广过程中也遇到诸多瓶颈问题^[3-4], 如膜组件价格目前较为昂贵, MBR 运行能耗偏高, 膜组件运行过程中易受污染造成通量下降, 过滤性能变差. 因此, 如何优化反应器结构及运行参数, 保证 MBR 高效低耗稳定运行, 已成为相关研究领域的核心内容.

Field 于 1995 年首先引入临界通量的概念, 以描述产水通量与膜污染之间的规律. Field 对临界通量的定义为“在启动阶段存在这样一种通量, (操作通量)在其之下, 不会出现通量随时间延长而衰减的现象”^[5], 即不出现明显的膜污染. 由于导致膜污染的潜在因素极复杂, 目前比较公认能影响临界通量的因素可归为 4 类^[6]: 膜材料特性(材质、孔径、孔隙率等)、反应器及其流体动力学特征、污泥混合液特性(污泥浓度 MLSS、滤液化学需氧量 SCOD、胞外聚合物 EPS、絮体颗粒粒径分布等)^[4]及测定方法的操作条件(起始通量、递增通量、过滤时间). 这些因素对临界通量测定具有很强的交互性影响, 如 Bottino 等研究发现^[3], 大孔径的聚乙烯(PE)中空纤维膜比小孔径的聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜具有更高的清水通量, 但在污泥混合液中测定两者临界通量差异不大, 这是因为絮体颗粒向 PE 膜表面沉积趋势更强, Hyde 等研究中亦有此类结论^[7]. 由于影响临界通量的因素极复杂, 针对单一因素进行研究分析

收稿日期: 2010-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008217)

第一作者: 马金星(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为水污染控制技术与理论. E-mail: 1040050011@tongji.edu.cn

通讯作者: 王志伟(1980—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为水污染控制技术与理论. E-mail: zwwang@tongji.edu.cn

往往会得到迥然不同甚至相反的结论. Madaeni 等发现 MLSS 在 $0\sim 10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 临界通量与 MLSS 呈现负相关^[8]. 而 Rosenberger 等的研究表明 MLSS 在 $2\sim 24\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内对过滤性影响很小^[9].

随着分析手段的优化, 最近的研究结果表明, 即使在次临界区内, MBR 也会在短期内产生膜污染, 在长期运行中这污染现象更为明显^[10]. 由于传统阶梯式临界通量测定法 (Traditional flux-step method, 以下简称传统法) 不能很好表征次临界区内潜在的可逆与不可逆膜污染, van der Marel 等对这种通量阶梯式递增法进行了改进 (Improved flux-step method, 以下简称改进法)^[10], 如图 1 所示. 图中 $F_1\sim F_{11}$ 表示 11 个通量值.

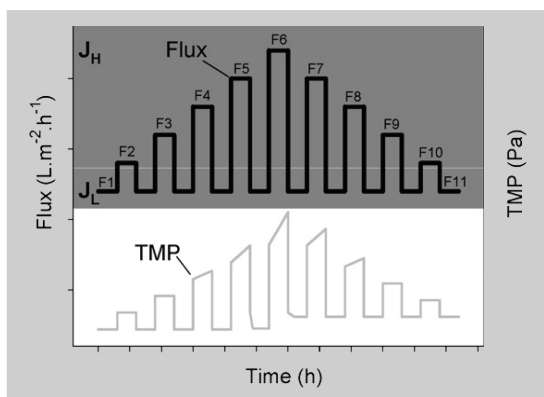


图 1 改进法中跨膜压差 (TMP) 随通量 (Flux) 变化示意图^[10]

Fig.1 Example of a Flux-TMP profile of the improved flux-step method

改进法是在传统法基础上, 在通量 ($J = F_i, \text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) 测定周期结束后增设缓冲区, 缓冲区内通量降至起始通量 ($J = F_1$). 通过对比通量下降与上升路径中 TMP 的滞后效应、缓冲区内与起始通量下 TMP 差异性, 从而分析临界通量测定过程中膜面潜在污染的可逆性^[10]. 研究表明, 相比于传统法, 改进法的总污染速率显著降低并基本不存在滞后效应. 通过改进法连续运行 10 次, 可以反映出不可逆污染对长期运行的影响^[10]. 但 van der Marel 等^[10]并未对通量下降与上升路径中 TMP 的不对称性给予定量分析, 同时每个缓冲区需将通量调至起始通量, 对自控实现要求过高.

本文针对传统临界通量测定方法不能很好表征潜在的膜污染与滞后效应, 采用改进的临界通量测定方法, 即在测定周期后增设缓冲区 (不进行抽吸), 并借助数理统计量偏斜度 (Skewness) 与峰度 (Kurtosis) 对 Flux-TMP 与 Flux-Permeability 的不对称性及分布形式深入分析, 以期通过简便的操作

过程实现对次临界区短期膜污染特性的科学评价.

1 材料与方法

1.1 试验装置及材料

试验采用如图 2 所示的 MBR 装置. 反应器尺寸参数见表 1. 试验所用污泥来自平板膜污泥浓缩示范工程 (MST) 1# 反应器, 有关 MST 机理参见文献^[11]. 运行期间进泥质量浓度控制在 $(9.66 \pm 0.40)\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 临界通量测定过程中, 由气体流量计控制曝气强度 $I = 24.7\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. 操作压力通过压力计直接读出. 进泥泵流量恒定, 即 $Q_{\text{inf}} = 40\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 排泥泵通过液位检测仪进行反馈调节, 保证 MBR 装置液位恒定. 产水蠕动泵通过自控柜调节.

表 1 反应器尺寸参数

Tab.1 Dimension parameters of reactor

反应器断面尺寸		升流区断面尺寸		有效水深	底部扩散区
长度 L/cm	宽度 B/cm	升流区长 度 l/cm	升流区宽 度 b/cm	H/cm	高度 h/cm
67	55	49	33	221	40

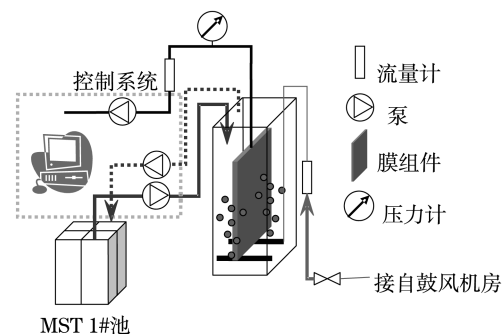


图 2 试验装置图

Fig.2 Schematic representation of the experimental system

试验所用平板膜为 PVDF 材质, 有效面积 $A_e = 0.76\text{ m}^2$, 膜龄 0.5 年, 由上海子征环境技术咨询有限公司提供. 膜特征参数见表 2.

1.2 临界通量测定方法

本实验中采用的临界通量测定方法是基于通量阶梯式递增法的改进^[12].

(1) 测定通量上升区 Flux-TMP 关系

表 2 膜特征参数

Tab.2 Characteristic parameter of membrane

平均膜孔径 $/\mu\text{m}$	孔隙率 $\%$	厚度 $/\text{mm}$	接触角 $/(^\circ)$	平均膜阻力 R_m/m^{-1}
0.2	60	0.215	67.2	1.8×10^{10}

在一定操作条件下,选用固定的起始通量 $J_{\text{int}} = 10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行时间 $\Delta T_i = 15 \text{ min}$,考察 ΔT_i 内跨膜压差 TMP 的变化.测定周期 ΔT_i 结束后,设置不同的缓冲区 ΔT_j ,此期间不进行抽吸出水.本实验共设置 3 种缓冲模式进行对比,A 组为空白组, ΔT_j 为 0 min,B 组 ΔT_j 为 5 min,C 组 ΔT_j 为 10 min.

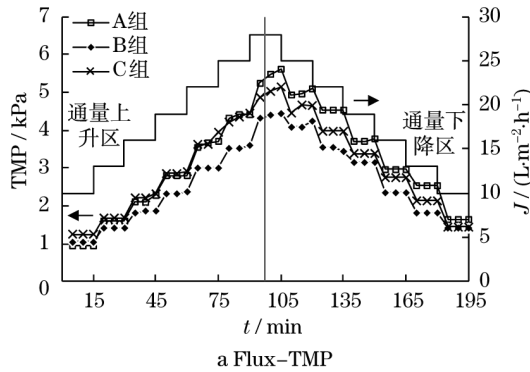
定义污染速率为 $R_{\text{total}}, \text{Pa} \cdot \text{min}^{-1}$:

$$R_{\text{total}} = \frac{\text{TMP}_E - \text{TMP}_S}{\Delta T_i}$$

式中: TMP_S 代表某一测定周期开始时跨膜压差, kPa; TMP_E 代表某一测定周期结束时跨膜压差, kPa. 当 $R_{\text{total}} < 13.3 \text{ Pa} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,认为该运行通量低于临界通量,则提升通量 $\Delta J_{\text{int}} = 3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,重复上述测定过程直至 $R_{\text{total}} > 13.3 \text{ Pa} \cdot \text{min}^{-1}$,达到临界通量.记录 Flux-TMP 关系.

(2) 测定通量下降区 Flux-TMP 关系

当运行通量达临界通量,采用类似于(1)方法将运行通量逐步回落至起始通量.记录 Flux-TMP 关系.



2 结果与讨论

2.1 不同缓冲条件下的 Flux-TMP 及 Flux-Permeability 对称性

图 3a 表述了不同缓冲条件下(A 组 $\Delta T_j = 0 \text{ min}$, B 组 $\Delta T_j = 5 \text{ min}$, C 组 $\Delta T_j = 10 \text{ min}$) Flux-TMP 关系.由于缓冲区内 $\text{TMP} = 0 \text{ kPa}$, $J = 0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,故 Flux-TMP 图中只列出测定周期内数据.

本文讨论内容为不同缓冲条件下 Flux-TMP 在通量上升区与通量下降区的对称性,B 组 Flux-TMP 上升速率比 A 组及 C 组缓慢,这是由 3 套膜组件本身性质差异决定的,故不在本文讨论范围之内.

为描述膜组件过滤性能,引入表征膜渗透性变量 P_{er} : $P_{\text{er}} = J/\text{TMP}, \text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$.图 3b 表述了不同缓冲条件下 Flux-Permeability 关系.由于缓冲区不进行抽吸,无法反映膜组件过滤性能,故 Flux-Permeability 图中只列出测定周期内数据.

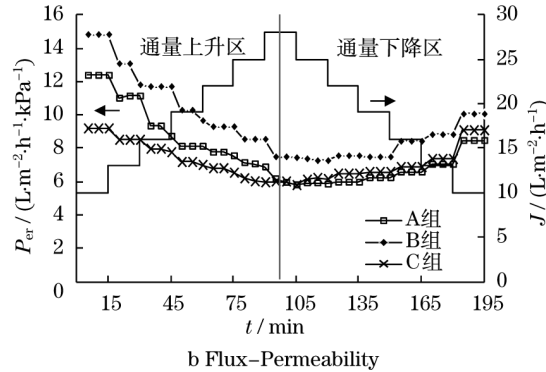


图 3 不同缓冲条件下 Flux-TMP 和 Flux-Permeability

Fig. 3 Flux-TMP and Flux-Permeability profile under different relaxation conditions

为科学表征 Flux-TMP 与 Flux-Permeability 在通量上升区和通量下降区变量分布形状与对称形式,本试验引入数理统计量偏斜度 S 和峰度 K 进行描述.

设变量 X 代表跨膜压差,变量 Y 代表膜渗透性.

数据处理过程以 TMP 为例,设样本原始数值

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{pmatrix}, \text{其中 } i_{\text{max}} = 3, j_{\text{max}} = 39$$

式中, X_{ij} 表示第 i 组,第 j 个 TMP 数据.

由于 TMP 测定结果基本分布于对称轴(极大值)左侧,需将通量下降区数据进行“镜像”处理,如图 4 所示.

原始数据“镜像”处理由 Matlab 嵌套函数实现.

if $j < 20$, $x_{ij} = X_{ij}$; else $x_{ij} = X_{i20} + (X_{i20} - X_{ij})$, 得到:

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{pmatrix}$$

变量 X 偏斜度 S 与峰度 K 分别为

$$S(x) = \frac{E(x - E(x))^3}{[D(x)]^3}, K(x) = \frac{E(x - E(x))^4}{[D(x)]^4}$$

式中: $E(x_i)$ 为期望, $D(x_i)$ 为方差:

$$E(x_i) = \sum_{k=1}^{j_{\text{max}}} x_k p_k = \frac{1}{j_{\text{max}}} \sum_{k=1}^{j_{\text{max}}} x_k$$

$$D(x_i) = E\{[x_i - E(x_i)]^2\}$$

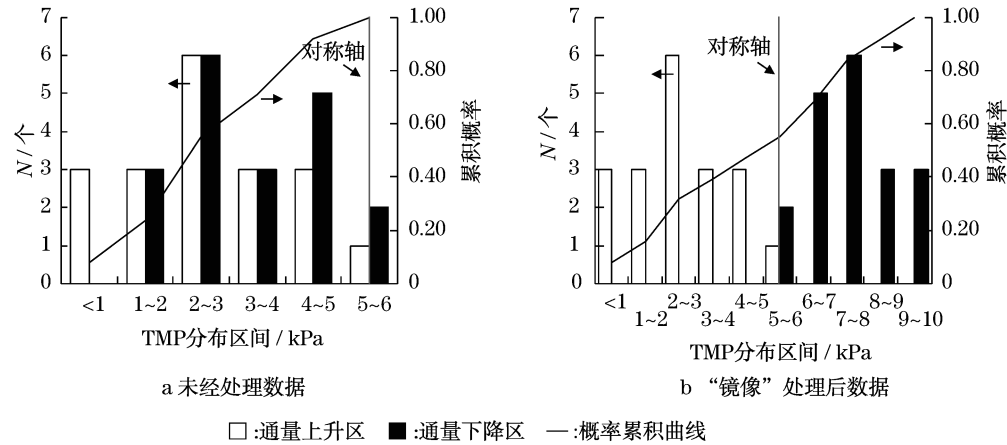


图 4 TMP 原始数据处理

Fig.4 Mirror of TMP raw data

变量 Y 偏斜度和峰度处理与变量 X 类似。Matlab 计算结果如下所示:

$$S(X) = (-0.0311; 0.0274; -0.0069);$$

$$K(X) = (1.7278; 1.7101; 1.7769);$$

$$S(Y) = (1.3917; 0.5766; 0.4689);$$

$$K(Y) = (4.2896; 2.0878; 2.5133);$$

数值运算结果表明,缓冲区等待时间延长可有效降低 Flux-TMP 与 Flux-Permeability 的不对称性,且缓冲区等待时间延长,Permeability 衰减程度变弱,稳定性增强。但从峰度 K 数值计算结果,并未发现 Flux-TMP 曲线峰度明显降低,这与 van der Marel 等研究结果有一定出入^[10],可能的原因是 van der Marel 等研究中最高通量至 $100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,而本实验中 3 组临界通量为 $25 \sim 28 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。高通量运行会引起高出水拖曳力, van der Marel 等研究中 $J = 50 \sim 100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 为超临界区,从而加剧絮体颗粒向膜面沉积过程,滤饼层过滤阻力

增大^[10]。此时缓冲区内曝气对膜面累积污染冲刷效果更为明显,引起 Flux-TMP 曲线峰度降低。

通过 Flux-TMP 与 Flux-permeability 对称性分析可以看出,传统通量阶梯式递增法中,膜在次临界区域内仍会产生一定污染,但这部分污染属可逆性滤饼污染,可以通过调节缓冲区内等待时间有效去除。附增缓冲区的改进法可以更好的表征膜组件过滤性能随通量的变化规律,减缓可逆污染对临界通量测定结果的影响。

2.2 不同缓冲条件下的滞后效应

固定膜过滤与动态膜过滤中普遍存在滞后效应^[13]。Howell 等根据滞后效应对临界通量进行了测定^[14]。Bottino 等研究了不同 MLSS 及膜材质对临界通量测定过程中滞后效应的影响^[3]。本试验中,不同缓冲条件对膜面累积污染影响在图 5 的滞后效应中表现得更为直观。

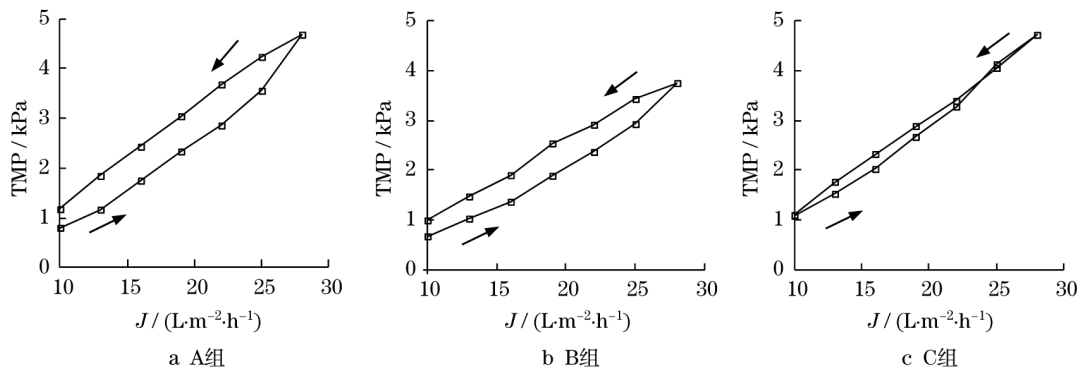


图 5 不同缓冲条件的滞后效应

Fig.5 Hysteresis effect under different relaxation conditions

从图 5 可知,在通量上升区内,Flux-TMP 曲线切线斜率随着通量增加有增加的趋势,而 A 组这一现象尤为明显.在通量下降区内,Flux-TMP 曲线线性增强,但相同通量条件下 TMP 高于通量上升区,说明即使在次临界区操作,仍会产生一定膜面累积污染,使过滤阻力增加.

关于缓冲条件对滞后效应影响可以用临界通量产生的机理进行解释^[15].对于污泥絮体颗粒粒径主要分布在 20~40 μm 的 MBR,拖曳作用与返混作用是影响絮体颗粒向膜面沉积的主要作用力.要使到达过滤面的絮体颗粒重新返回混合液中,则必须提供更高的水力剪切力增强返混,或者降低由出水拖拽力产生的额外粘附力.

从图 5 对比中可以看出,随着缓冲区等待时间延长,平均产水通量降低,“平均”出水拖拽力降低,沉积到膜表面的污泥絮体颗粒减少,膜面累积污染阻力降低,通量上升区与下降区数据离散性降低,滞后现象削弱.

2.3 不同缓冲条件下膜面残余污染阻力

根据 Darcy 公式,定义通量 J_i 下膜面残余污染阻力 ΔR_i 如下:

$$\Delta R_i = R_{iD} - R_{iU} = \frac{\text{TMP}_{iD}}{\mu J_i} - \frac{\text{TMP}_{iU}}{\mu J_i}$$

式中: ΔR_i 表示通量 J_i ($J_i = 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 时膜面残余污染阻力, m^{-1} ; R_{iD} 表示通量 J_i 时下降区膜面总阻力, m^{-1} ; R_{iU} 表示通量 J_i 时上升区膜面总阻力, m^{-1} ; TMP_{iD} 表示通量 J_i 时下降区跨膜压差, kPa ; TMP_{iU} 表示通量 J_i 时上升区跨膜压差, kPa ; μ 表示渗透液动力学粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$. 计算结果如图 6 所示.

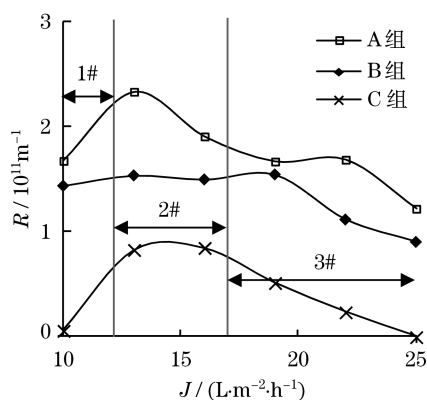


图 6 不同缓冲条件下膜面残余污染阻力对比
Fig.6 Comparison of membrane residual resistance under different relaxation conditions

通过图 6 分析可以看出,延长缓冲区的等待时间,可有效降低膜面残余污染阻力,且污染的可逆性得到显著提升,即当通量下降区达到 $J_i = 10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, C 组膜面残余污染阻力基本为零.

由于膜面残余污染阻力 ΔR_i 是沉积概率的累积函数,故建立两者之间函数关系如下:

$$\Delta R_i = \int_0^{\Delta t} [p(D) - p(B)] d\Delta t$$

式中: $p(D)$ 为絮体颗粒向膜面沉积几率; $p(B)$ 为沉积颗粒返混至液相几率, $\Delta t = t(J_{iD}) - t(J_{iU})$, 即通量下降区与通量上升区在 J_i 处操作时间间隔.

当 $J = 25 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $\Delta t = 30 \text{ min}$ 时,此时出水拖拽力较大, $p(D) - p(B) > 0$, 膜面可逆污染呈现加重趋势(图 6 中 3# 阶段). 但 Δt 较短, 因此 ΔR_i 不高; 当 $J = 10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $\Delta t = 180 \text{ min}$ 时,此时出水拖拽力较小, $p(D) - p(B) < 0$, 膜面可逆污染呈现脱附趋势(图 6 中 1# 阶段). 因此在 $J = 13 \sim 15 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 时 $p(D) = p(B)$, 膜面残余污染阻力达到最大值, 此处恰好为最大通量与最低通量黄金分割点附近.

3 结论

(1) 通过延长缓冲区内的等待时间, Flux-TMP 与 Flux-Permeability 偏斜度明显降低, 对称性增强. 说明改进的临界通量测定方法可以更好地表征膜组件过滤性能随通量的变化规律, 减缓可逆污染对测定结果产生的影响.

(2) 随着缓冲区等待时间延长, 膜组件平均产水通量降低, 絮体颗粒沉积到过滤面几率降低, 膜面累积污染阻力降低, 通量上升区与下降区数据离散性降低, 滞后现象削弱.

(3) 延长缓冲区的等待时间, 可以有效降低膜面残余污染阻力 ΔR_i , 并有效提升污染可逆性.

(4) 通过对次临界区内膜面残余污染阻力特性进行分析, 将次临界区分为可逆污染的脱附阶段、平衡阶段及吸附阶段. 在次临界区黄金分割点附近 ($J = 13 \sim 15 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 时), ΔR_i 达到最大值.

参考文献:

- [1] Wang Z W, Wu Z C, Mai S H, et al. Research and applications of membrane bioreactors in China: progress and prospect [J]. Separation and Purification Technology, 2008, 62(2): 249.
- [2] Yuan D D, Fan Y B, Yu Y, et al. Study of a membrane bioreactor

- with glass fiber flat grille modules and the modules' optimization based on the local critical flux theory[J]. *Water Research*, 2010, 44(3):997.
- [3] Bottino A, Capannelli G, Comite A, et al. Critical flux in submerged membrane bioreactors for municipal wastewater treatment[J]. *Desalination*, 2009, 245(1-3):748.
- [4] Wang Z W, Wu Z C, Tang S J. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2009, 43(9):2504.
- [5] Field R W, Wu D, Howell J A, et al. Critical flux concept for microfiltration fouling[J]. *Journal of Membrane Science*, 1995, 100(3):259.
- [6] Wu Z C, Wang Z W, Huang S S, et al. Effects of various factors on critical flux in submerged membrane bioreactors for municipal wastewater treatment[J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 62(1):56.
- [7] Hyde F W, Alberg M, Smith K. Comparison of fluorinated polymers against stainless steel, glass and polypropylene in microbial biofilm adherence and removal [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 1997, 19(2):142.
- [8] Madaeni S S, Fane A G, Wiley D E. Factors influencing critical flux in membrane filtration of activated sludge[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 1999, 74(6):539.
- [9] Rosenberger S, Kraume M. Filterability of activated sludge in membrane bioreactors[J]. *Desalination*, 2002, 146(1-3):373.
- [10] van der Marel P, Zwijnenburg A, Kemperman A, et al. An improved flux-step method to determine the critical flux and the critical flux for irreversibility in a membrane bioreactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 332(1-2):24.
- [11] Wu Z C, Wang X H, Wang Z W, et al. Identification of sustainable flux in the process of using flat-sheet membrane for simultaneous thickening and digestion of waste activated sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2-3):1397.
- [12] Le Clech P, Jefferson B, Chang I S, et al. Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, 227(1-2):81.
- [13] Gesan-Guizou G, Boyaval E, Daufin G. Critical stability conditions in crossflow microfiltration of skimmed milk: transition to irreversible deposition[J]. *Journal of Membrane Science*, 1999, 158(1-2):211.
- [14] Howell J A, Chua H C, Arnot T C, et al. In situ manipulation of critical flux in a submerged membrane bioreactor using variable aeration rates, and effects of membrane history[J]. *Journal of Membrane Science*, 2004, 242(1-2):13.
- [15] 袁栋栋, 樊耀波, 徐国良, 等. 膜生物反应器中临界通量理论的研究[J]. *膜科学与技术*, 2010, 30(2):97.
YUAN Dongdong, FAN Yaobo, XU Guoliang, et al. Research in critical flux theories of membrane bioreactor [J]. *Membrane Science and Technology*, 2010, 30(2):97.

—————
 (上接第 1609 页)

- ZHANG Mengxi, ZHANG Shilei. Behaviour of soil reinforced with H-V inclusion by PFC^{2D} [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(5):625.
- [3] 岳中琦, 陈沙, 郑宏, 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(6):889.
YUE Zhongqi, CHEN Sha, ZHENG Hong, et al. Digital image proceeding based on finite element method for geomaterials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6):889.
- [4] 张嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动量测[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(8):903.
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, LIANG Dongfang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8):903.
- [5] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4):431.
HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4):431.
- [6] 李元海, 靖洪文, 朱合华, 等. 基于图像相关分析的土体剪切带识别方法[J]. *岩土力学*, 2007, 28(3):522.
LI Yuanhai, JING Hongwen, ZHU Hehua, et al. A technique of identifying shear band accurately in granular soil using image correlation analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3):522.
- [7] Guler M, Edil T B, Bosscher P J. Measurement of particle movement in granular soil using image analysis[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 1999, 13(2):116.
- [8] 中华人民共和国水利部. SL/T 235—1999 土工合成材料测试规程[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
The Ministry of Water Resource of the People's Republic of China. SL/T 235—1999 Code for test and measurement of geosynthetics[S]. Beijing, China Waterpower Press, 1999.
- [9] 张嘎. 粗粒土与结构接触面静动力学特性及弹塑性损伤理论[D]. 北京:清华大学岩土工程研究所, 2002.
ZHANG Ga. A new monotonic and cyclic elasto-plasticity damage theory for soil-structure interfaces [D]. Beijing, Tsinghua University. Geotechnical Research Institute, 2002.