

# 中空纤维 MBR 工艺膜堵塞行为与膜渗透性评估

闫立娜<sup>1</sup>, 王朝朝<sup>2</sup>, 李思敏<sup>2</sup>, 唐锋兵<sup>2</sup>, 张 凯<sup>2</sup>, 陈邦富<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 研究生部, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘 要:** 采用中试规模的中空纤维膜生物反应器(HF-MBR)处理市政污水,考察了在不同MLSS浓度、不同通量水平下的膜堵塞行为特性及其对膜渗透性的影响。结果表明,随着膜通道堵塞固体质量的增加,膜堵塞面积、堵塞固体积累速率与污泥固体负荷率比率也随之增加,膜渗透性衰减速率加快;膜组件的可持续通量受膜堵塞状态的影响,膜组件经过堵塞之后再次运行时临界通量较未发生堵塞之前会降低;在低MLSS浓度(约为8 g/L)下运行时,化学强化反洗(CEB)能够使系统渗透性得到持续恢复,然而在中、高MLSS浓度(16~32 g/L)下运行时,CEB只能使膜渗透性得到瞬时恢复,离线清堵(Declogging)联合CEB能够保证系统渗透性的持续恢复;此外需要强调的是,经过清洗后膜渗透性得到持续恢复的前提是在可持续通量下运行。

**关键词:** 膜生物反应器; 膜堵塞; 渗透性; 临界通量; 膜清洗

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)07-0015-08

## Assessment of Membrane Clogging Behavior and Permeability in a Hollow Fiber MBR Process

YAN Li-na<sup>1</sup>, WANG Zhao-zhao<sup>2</sup>, LI Si-min<sup>2</sup>, TANG Feng-bing<sup>2</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>,  
CHEN Bang-fu<sup>2</sup>

(1. Graduate School, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** A pilot-scale hollow fiber membrane bioreactor (HF-MBR) process was employed to treat municipal sewage, and the membrane clogging characteristic and its influence on membrane permeability under different MLSS concentrations and flux conditions were investigated. The results showed that membrane occluded area, the ratio of clogged solids accumulating rate to sludge solids loading rate and membrane permeability decline rate increased with the increase of accumulated solids in membrane channels; sustainable flux was affected by the membrane clogging condition and its value would decline during the post-clogging operation comparing with that during the pre-clogging operation; CEB could recover the sustainable membrane permeability under low MLSS concentration of about 8 g/L, nevertheless CEB could only recover the instantaneous membrane permeability at medium and high MLSS concentrations (16 to 32 g/L) and declogging and CEB could ensure the recovery of the sustainable membrane permeability; however, it should be noted that the sustainable membrane permeability could be recovered only

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203003); 河北省自然科学基金资助项目(E2016402017);  
河北工程大学博士点学位建设项目(16964213D)

通信作者: 王朝朝 E-mail: W-Z-Z@163.com

under the premise of the sustainable flux operation after membrane cleaning.

**Key words:** membrane bioreactor; membrane clogging; permeability; critical flux; membrane cleaning

膜生物反应器(MBR)工艺在污(废)水处理领域得到了广泛应用,但如何维持膜的渗透性始终是MBR技术领域的热点问题<sup>[1,2]</sup>。以往关于膜渗透性衰减机理的研究,主要将其归因于膜组件的表面污染,包括胞外聚合物(EPS)在膜表面的沉积行为和溶解性微生物产物(SMP)的堵孔行为两种膜污染机制<sup>[3,4]</sup>。近来有研究发现,膜堵塞行为是导致膜渗透性衰减的更为重要的因素<sup>[5]</sup>。与膜表面污染行为特征不同,膜堵塞行为分为编织物堵塞和污泥固体积累两种类型<sup>[6,7]</sup>。前者主要是由进水中的棉絮、毛发或其他纤维类物质聚集而成,这主要是由于MBR工艺预处理阶段的无效栅滤所致<sup>[8]</sup>。后者主要是由活性污泥的固体组分在膜丝(中空纤维膜组件)或膜片(平板膜组件)之间积累所形成。对原水进行有效栅滤即可防止编织物堵塞,而活性污泥混合液是MBR工艺分离的主体,污泥固体积累的膜堵塞行为是更为主要的膜堵塞形式。

对于中空纤维膜组件而言,膜丝通道固体积累的堵塞行为会直接增加活性污泥的溶解性组分的透膜阻力,从而加速了膜渗透性的衰减<sup>[9]</sup>。目前膜渗透性指示性参数(跨膜压差或通量)常用来反映膜污染与膜堵塞行为对反应器渗透性的整体影响,尚无对膜堵塞行为及其对膜渗透性影响的直接评估手段。此外,常用于有效抑制膜污染行为的化学维护清洗方式(CEB)对膜堵塞行为的控制具有一定的局限性,这是由于污泥固体积累主要发生在膜丝之间(而膜污染行为是发生在膜丝表面),因此有别于膜污染控制手段的膜清洗方式尚待探索。

鉴于此,以中空纤维膜生物反应器处理城市污水为基础,构建不同MLSS浓度水平的运行条件,考察膜堵塞行为特性,评估膜堵塞程度,解析膜堵塞行为对临界通量、膜渗透性的影响机制;考察不同清洗方式对膜渗透性恢复的影响,探寻抑制膜堵塞行为及持续恢复膜渗透性的有效清洗手段,从而为MBR工艺膜堵塞行为控制提供技术支持与理论指导。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验装置

中空纤维膜生物反应器中试装置见图1,总有

效体积为 $6.75\text{ m}^3$ ,包括生物池(占总有效体积的74%)和膜池(占26%)两部分。生物池底部装有微孔曝气盘,通过人工调节曝气量将好氧池的DO维持在 $1\sim 2\text{ mg/L}$ 。生物池与膜池通过一个污泥循环泵连接,污泥由膜池到生物池的回流比为400%。通过蠕动泵向生物池内输入蔗糖溶液,保证试验过程以恒污泥负荷( $F/M=0.13\text{ kgCOD/kgMLSS}$ )运行。另外通过DO、SS和温度探头对生物池的状态进行实时监测。膜池内装有2组聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维帘式膜,膜孔径为 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ ,膜丝内、外径分别为 $0.8$ 、 $1.9\text{ mm}$ ,相邻膜丝间距为 $1.0\text{ mm}$ ,单根膜丝长度为 $2.1\text{ m}$ ,单个膜组件的膜丝数量为 $1\ 850$ 根,过滤面积为 $23.2\text{ m}^2$ 。通过蠕动泵的抽吸实现产水过程,同时还可以实现反冲洗。在膜组件底部 $100\text{ mm}$ 以下安装有穿孔曝气管路,对膜表面进行间歇性的曝气冲刷(开 $10\text{ s}$ 、关 $10\text{ s}$ ),保证单位膜面积的曝气量( $\text{SAD}_m$ )为 $0.25\text{ m}^3/\text{h}$ 。

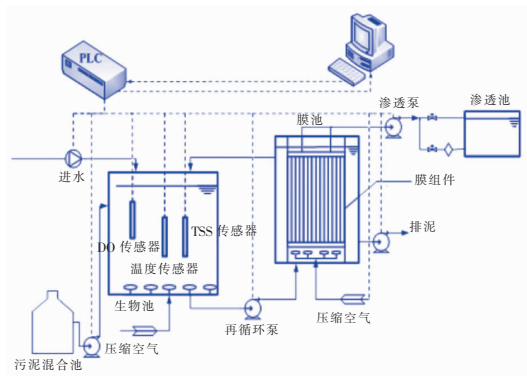


图1 中空纤维膜生物反应器中试工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of pilot-scale HF-MBR process

反应器的进水、污泥循环、产水、膜组件曝气和排泥过程由可编程逻辑控制器(PLC)和数据采集与监视控制(SCADA)系统控制。生物反应池内配备有液位计,通过膜组件出口处的压力传感器记录跨膜压差(TMP)。跨膜压差、产水通量( $J$ )和产水净通量( $J_{\text{net}}$ )值每 $30\text{ s}$ 由压力传感器和超声流量计传送到SCADA系统。水力反冲洗通量( $J_b$ )为 $15\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,每 $10\text{ min}$ 反冲洗 $30\text{ s}$ 。产水净通量、膜渗透性( $L$ )以及膜渗透性衰减速率( $P_{\text{DR}}$ )的计算公式

如下:

$$J_{\text{net}} = \frac{n(J_t - J_b \tau_p)}{t_c + \tau_c} \quad (1)$$

$$L = \frac{J_{\text{net}} \cdot e^{-0.029(T-20)}}{\text{TMP}} \quad (2)$$

$$P_{\text{DR}} = \frac{L_s - L_e}{t} \quad (3)$$

式中  $n$ ——一个 CEB 周期内包含的物理清理次数

$J$ ——产水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

$J_b$ ——水力反洗通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

$t_p$ ——水力反洗间隔周期,  $\text{h}$

$\tau_p$ ——水力反洗持续时间,  $\text{h}$

$t_c$ ——CEB 间隔周期,  $\text{h}$

$\tau_c$ ——CEB 持续的时间,  $\text{h}$

$T$ ——产水水温,  $^{\circ}\text{C}$

$L_s$ ——一个运行周期起始的膜渗透性

$L_e$ ——一个运行周期末端的膜渗透性

$t$ ——运行周期,  $\text{h}$

## 1.2 运行工况与可持续通量确定

中空纤维膜生物反应器装置在恒定污泥负荷下运行,通过控制 SRT 实现 MLSS 浓度的稳定增长,以达到不同目标 MLSS 浓度的要求。在达到目标 MLSS 浓度之后,通过通量阶式递增法测定临界通量( $J_c$ )<sup>[10]</sup>,从而确定在该 MLSS 浓度下的可持续通量 $J_{\text{sus}}$ (次临界通量下运行)<sup>[11]</sup>;测定临界通量时每个阶量运行周期为 18 h,运行期间每 10 min 进行 30 s 的水力反洗作业, $J_b$ 拟控制在  $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,膜池采取间歇曝气(开 10 s、关 10 s), $\text{SAD}_m$ 拟控制在  $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ ;在进行下一个阶量运行之前,需要对膜组件进行 Declogging&CEB 作业,以减少该阶段的膜堵塞及膜污染行为对下一阶段测定 $J_c$ 的影响。

每个目标 MLSS 浓度下的稳定运行工况见表 1。阶段 II、IV、VI、VIII 分别是在阶段 I、III、V、VII 进行初次堵塞行为考察之后的二次运行(MLSS 浓度相同),旨在了解膜组件状态对膜堵塞行为的影响,二次运行前均会对膜组件进行 Declogging&CEB 作业。

表 1 反应器在目标 MLSS 浓度下的运行工况

Tab. 1 Operational conditions at targeted MLSS concentration in HF-MBR process

阶段	$L_s/(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$	$L_e/(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$	$J_{\text{sus}}/(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	MLSS/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SRT/ d	HRT/ h	容积负荷/ ( $\text{kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )	曝气强度/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
I	3.40	3.20	28	8.7	38	5.2	1.13	16
II	3.45	3.15	28	8.6	38	5.2	1.12	16
III	2.90	2.54	24	15.8	41	6.1	2.06	72
IV	2.65	2.11	22	15.9	41	6.6	2.07	72
V	2.58	1.80	14	20.4	43	10.4	2.66	125
VI	1.84	0.85	10	20.3	43	14.5	2.64	125
VII	1.41	0.21	6	32.1	47	24.2	4.18	220
VIII	1.12	0.21	4	32.1	47	36.4	4.19	220

注: 前 7 个阶段均运行 168 h,阶段 VIII 运行 100 h。

## 1.3 试验用水与接种污泥

试验进水来自某污水处理厂的初沉池出水,TCOD 为  $(487.2 \pm 190.1) \text{ mg/L}$ ,SCOD 为  $(120 \pm 59.1) \text{ mg/L}$ , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为  $(30.1 \pm 7.5) \text{ mg/L}$ ,TN 为  $(45.3 \pm 11.6) \text{ mg/L}$ ,TP 为  $(6.2 \pm 2.5) \text{ mg/L}$ ,SS 为  $(220.5 \pm 80.6) \text{ mg/L}$ ,pH 值为 7.1~8.2。配制的蔗糖溶液浓度以 COD 当量计为  $1142 \text{ g/L}$ ,每天需要调整其流量,以保证其协同城市污水达到所需的有机负荷。接种污泥取自该污水厂氧化沟工艺的回流污泥,其 MLSS 约为  $8 \text{ g/L}$ ,其中 MLVSS 占到 75% 左右,在经过 MBR 工艺驯化之后的整个试验过程中 MLVSS/MLSS 稳定在 85% 左右。

## 1.4 分析方法

TCOD、SCOD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、SS、MLSS、MLVSS 均采用标准方法进行测定。污水中 SCOD 的测定:将样品在  $12000 \text{ r/min}$  下离心 15 min,上清液通过  $0.45 \mu\text{m}$  微滤膜过滤后测定 COD 浓度。pH 值采用便携式 WTW Multi 340i 检测仪测定。胞外聚合物(EPS)和溶解性微生物产物(SMP)采用热处理法进行萃取和分析,EPS 以比污泥总有机碳浓度计,SMP 以总有机碳(TOC)浓度计。污泥粒径(PSD)采用马尔文粒径仪测定,以平均粒径( $D_{50}$ )计。通过测定稀释的污泥体积指数(DSVI)来表示污泥沉降性能,将污泥样品的 MLVSS 浓度稀释至 3

g/L, 放置到 1 L 的量筒中测定其污泥沉积指数。CST 和浊度分别采用便携式 CST 仪和浊度仪测定。

### 1.5 膜堵塞行为评估方法

在每个运行周期结束后, 通过 Declogging 作业完成堵塞固体的收集与测定, 具体步骤为: 将膜组件从膜池内提升出来并在重力作用下自然释水 1 h, 通过重力传感器测定堵塞固体的湿质量 ( $M_w$ ); 然后采用低压自来水冲洗膜丝廊道内的固体, 并将冲掉的污泥固体收集, 烘干, 获得堵塞固体的干质量。堵塞固体积累速率 ( $M_c$ )、污泥固体负荷率 ( $M_L$ ) 以及膜组件的固体截留率 ( $\Delta K$ ) 的具体计算方法如下:

$$M_c = \frac{M_w \cdot f \cdot 1\,000}{t \cdot A_f} \quad (4)$$

$$M_L = \rho_{MLSS} \cdot J_{net} \quad (5)$$

$$\Delta K = \frac{M_c}{M_L} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $f$ ——堵塞固体的干质量系数, 以 10% 计

$t$ ——运行周期, h

$A_f$ ——膜组件总过滤面积,  $m^2$

$\rho_{MLSS}$ ——MLSS 浓度, g/L

膜堵塞面积比率 (固体堵塞面积与过滤面积的比率, 记作  $\Phi$ ) 的理论评估通过相邻膜丝的几何计算获得。

### 1.6 膜渗透性恢复评估方法

在每个运行周期结束后, 要分别进行 CEB 和 Declogging&CEB 清洗作业。CEB 作业的具体程序为: 在产水箱中投加次氯酸钠溶液 (稀释至 500 mg/L), 进行 10 个脉冲的化学反冲洗, 每个脉冲的持续时间为 30 s, 每个脉冲的间隔为 2 min, 化学反冲洗的通量为 25 L/( $m^2 \cdot h$ )。Declogging&CEB 清洗作业的程序是在离线清堵之后增加一个 CEB。

$A_{PR}$ 、 $P_{PR}$  分别定义为膜渗透性绝对恢复量和相对恢复率, 具体计算方法如下:

$$A_{PR} = L_c - L_e \quad (7)$$

$$P_{PR} = \frac{L_c - L_e}{L_s - L_e} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $L_c$ ——进行清洗作业之后的膜渗透性

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行效能及膜堵塞行为对 $P_{DR}$ 、 $J_c$ 的影响

HF-MBR 系统采用恒污泥负荷运行, 进水容积负荷由 1.13 kg/( $m^3 \cdot d$ ) 逐渐提高到 4.19 kg/( $m^3 \cdot d$ ), 出水 COD 由 21.2 mg/L 提高到 288.6

mg/L, 对 COD 的去除率保持在 93% 以上。系统内 MLSS 浓度的增加, 提高了微生物对 N、P 的需求, 对 TN、TP 的去除率也分别由 32%、40.6% 提高到了 78.9% 和 90%; 生物池中 DO 保持在 1~2 mg/L, 可以保证完全硝化, 对氨氮的去除率维持在 99.5% 以上; 此外, 系统出水浊度始终维持在 0.5 NTU 以下, 说明膜组件在运行过程中能够保持完整性。

在阶段 I~VIII 通过离线清堵作业可以获得的  $M_w$  范围为 0.1~94 kg。具体而言, 系统在低 MLSS 浓度阶段 (I) 运行结束后  $M_w$  仅为 0.1 kg, 几乎没有发生膜堵塞行为; 而在中 MLSS 浓度阶段 (III、V)  $M_w$  增加到了 37、50 kg, 在高 MLSS 浓度阶段 (VII)  $M_w$  进一步增加到了 73 kg。相同 MLSS 浓度下的二次运行, 阶段 II 受阶段 I 的影响较小,  $M_w$  增加了 0.5 kg; 而在中污泥浓度运行阶段, 初次堵塞的膜组件在二次运行时, 膜堵塞程度会加重, 在阶段 IV、VI 运行周期末端  $M_w$  分别增加了 5、17 kg; 在高污泥运行阶段, 二次运行的膜组件的堵塞程度达到了最高,  $M_w$  达到了最大值为 94 kg。由上可知, 膜堵塞行为不仅受污泥浓度的影响, 而且受到此浓度水平下是否发生过膜堵塞行为的影响。

膜堵塞行为对系统  $P_{DR}$ 、 $J_c$  的影响如图 2 所示。

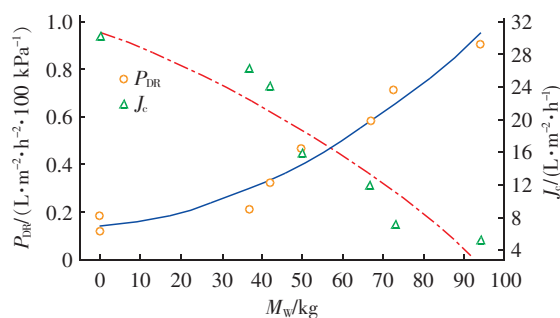


图2 膜堵塞行为对  $P_{DR}$ 、 $J_c$  的影响

Fig. 2 Influences of membrane clogging behavior on  $P_{DR}$  and  $J_c$

随着  $M_w$  的增加,  $P_{DR}$  呈增加趋势, 在阶段 I~VIII,  $P_{DR}$  由 0.12 L/( $m^2 \cdot h^2 \cdot 100$  kPa) 提高到 0.91 L/( $m^2 \cdot h^2 \cdot 100$  kPa)。同样需强调的是,  $P_{DR}$  是膜堵塞与膜污染行为共同作用的结果, 图 2 中  $M_w$  与  $P_{DR}$  的相关性直观地反映出膜堵塞行为对  $P_{DR}$  的影响, 即膜堵塞程度越严重, 系统渗透性能力越弱。Buzatu 等<sup>[7]</sup> 在研究中也发现, 随堵塞固体质量的增加则 TMP 的增速加快, 降低了膜组件的渗透性。



由图 2 还可知,随着  $M_w$  的增加,  $J_c$  呈现减小趋势,在阶段 I ~ VIII,  $J_c$  由  $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  降低到  $5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。Wu 等<sup>[11]</sup> 在研究中发现,随着 MLSS 浓度的增加,  $J_c$  呈现下降趋势,为了维持 MBR 的可持续运行,需要根据 MLSS 浓度范围确定可持续通量。膜堵塞行为导致的不同膜状态对  $J_c$  的影响也不容忽视,在阶段 I 几乎无堵塞行为发生,  $J_c$  在阶段 II

与阶段 I 均保持在  $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  左右;而在阶段 III ~ VIII,二次运行时的  $J_c$  较初次运行值减小  $2 \sim 4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,因此膜堵塞行为也是影响系统  $J_c$  一个不可忽视的直接因素。

## 2.2 膜堵塞行为与污泥特性评估

不同 MLSS 浓度下膜堵塞行为与污泥特性如表 2 所示。

表 2 膜堵塞行为与污泥特性评估

Tab. 2 Assessment of membrane clogging behavior and sludge characteristics

阶段	$M_L/$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$M_C/$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$\Delta K/$ %	$\Phi/$ %	EPS/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{MLSS}$ )	SMP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	PSD/ $\mu\text{m}$	CST/ s	DSVI/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )
I	243.6	0.001	0.000 5	0.4	76.8	20.7	96.8	12.8	400
II	240.8	0.002	0.000 8	0.6	76.9	20.9	96.5	12.8	395
III	379.2	0.475	0.125 2	148	71	28.0	45.2	16.4	375
IV	349.8	0.539	0.154 0	168	70	29.0	45.0	16.2	380
V	285.6	0.641	0.224 6	200	54	17.3	61.3	17.6	319
VI	203.0	0.860	0.423 4	268	55	18.0	60.8	17.1	320
VII	192.6	0.936	0.486 2	292	62	125.0	43.5	83.1	425
VIII	128.4	2.026	1.577 8	376	61	127.0	43.2	82.9	420

在低 MLSS 浓度下(阶段 I),堵塞固体积累速率( $M_C$ )与污泥固体颗粒物负荷率( $M_L$ )分别为  $0.001$ 、 $243.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,膜组件的固体截留率( $\Delta K$ )与膜堵塞面积比率( $\Phi$ )分别仅为  $0.000 5\%$ 、 $0.4\%$ ,可以认为几乎没有膜堵塞行为发生;在此 MLSS 浓度的二次运行(阶段 II)中膜堵塞性能参数变化不大;在中 MLSS 浓度下(阶段 III), $M_C$ 、 $M_L$ 、 $\Delta K$  分别提高到  $0.475 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $379.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $0.125 2\%$ ,由  $\Phi$  值( $148\%$ )可以直观反映出膜堵塞程度明显增强。需要指出的是  $\Phi$  值只是从几何尺寸角度计算膜堵塞程度,因此该值可能超过  $100\%$ 。在此 MLSS 浓度下的二次运行中,膜堵塞行为受到了初次运行时膜堵塞行为的影响,而污泥的其他指标(EPS、SMP、PSD、CST 及 DSVI)几乎无差异,表明膜组件在特定 MLSS 浓度下发生膜堵塞后更易诱发膜堵塞行为。而在阶段 V,  $M_L$  降低到了  $285.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $M_C$ 、 $\Delta K$  和  $\Phi$  值则分别提高到  $0.641 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $0.224 6\%$ 、 $200\%$ ,也就是说在膜表面污泥固体负荷率降低的情况下膜堵塞程度反而增加了,可以推断污泥性质变化是影响此膜堵塞行为的主要因素,由表 2 中数据可以看到阶段 V 相对于阶段 III(MLSS 增加了约  $4 \text{ g/L}$ ),CST 由  $16.4 \text{ s}$  提高到了  $17.6 \text{ s}$ ,在一定程度上反映出随着 MLSS 浓度的增加,污泥的可滤性在变差,这种现象在高 MLSS 浓

度下更为明显(阶段 VII)。在阶段 VII,  $M_L$  进一步降低到了  $192.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,而  $M_C$ 、 $\Delta K$  和  $\Phi$  值分别提高到了  $0.936 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $0.486 2\%$ 、 $292\%$ ,CST 值提高到了  $83.1 \text{ s}$ ,SMP 的增加、PSD 的减小均会降低污泥的脱水性与可滤性<sup>[12]</sup>,Zsirai 等<sup>[13]</sup> 在研究中也发现,污泥脱水性能变差将会诱发膜堵塞行为的发生。同样,在阶段 V 和 VII 的二次运行中,初次堵塞行为会不同程度地加重二次运行时膜堵塞的程度。

## 2.3 清洗方式对 $A_{PR}$ 、 $P_{PR}$ 的影响

不同运行阶段清洗方式对  $A_{PR}$ 、 $P_{PR}$  的影响如图 3 所示。由图 3(a)可知在相同 MLSS 浓度下,通过 Declogging&CEB 方式获得的  $A_{PR}$  比 CEB 的略大,这说明 Declogging 提高  $A_{PR}$  的效果并不显著,这与 Buzatu 等<sup>[7]</sup> 的研究结果一致。在低 MLSS 浓度(阶段 I)下,初次运行时由于无明显的膜堵塞行为发生,膜渗透性在运行周期内由  $340 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$  降低到  $320 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ ,通过 CEB 方式清洗后可以恢复到  $328 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ ,获得的  $A_{PR}$  也较小,仅为  $8 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ ;在该 MLSS 浓度的二次运行中,通过 CEB 获得的  $A_{PR}$  变化不大。随着 MLSS 浓度的提高(阶段 III、V),膜堵塞程度增加,膜渗透性在运行周期内呈现明显降低趋势,降幅分别为  $36$ 、 $78 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ ,通过 CEB 获得的  $A_{PR}$  较低 MLSS 浓度下有明显增加,分别

提高 26、72 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa);在高 MLSS 浓度(阶段Ⅶ)下,通过 CEB 获得的  $A_{PR}$  达到了最大,约为 124 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa),而在此 MLSS 浓度下二次运行时, $A_{PR}$ 较初次运行却降低了 45 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa),这是由于  $J_{sus}$ 进一步由 6 L/(m<sup>2</sup>·h)降低到 4 L/(m<sup>2</sup>·h), $L_e$  接近运行极限值而无法进一步降低。

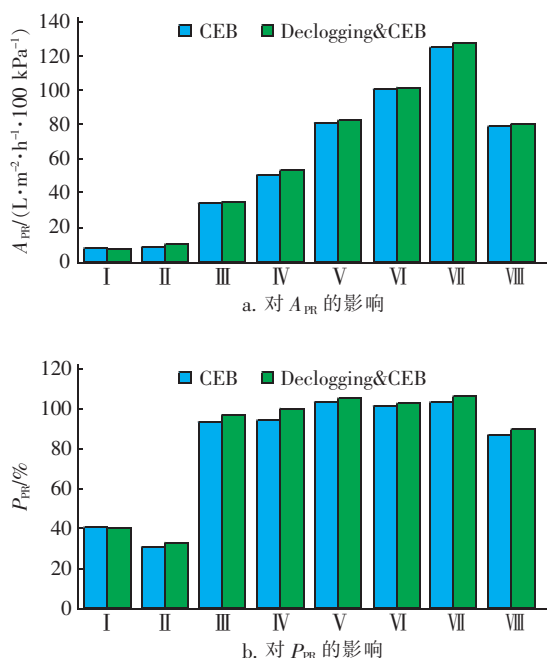


图3 不同运行阶段清洗方式对  $A_{PR}$  和  $P_{PR}$  的影响

Fig. 3 Influences of cleaning modes on  $A_{PR}$  and  $P_{PR}$  during different operational phases

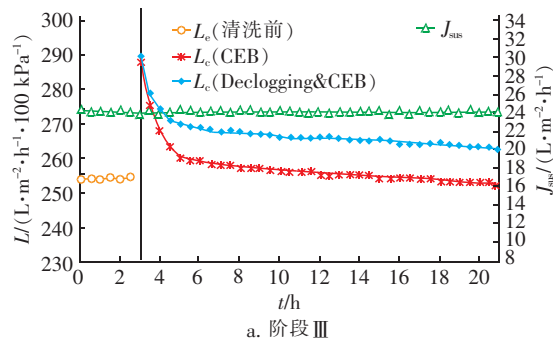
由图 3(b)可见, $P_{PR}$  与  $A_{PR}$  的变化趋势类似,在相同的 MLSS 浓度下,通过 Declogging&CEB 方式获得的  $P_{PR}$  比 CEB 方式也略大(3% 左右)。在低 MLSS 浓度(阶段 I)下,通过 CEB 获得的  $P_{PR}$  为 40%,而在二次运行时  $P_{PR}$  降低为 30%。在中 MLSS 浓度(阶段Ⅲ、Ⅴ)下, $P_{PR}$  有了显著提高,分别增加为 94%、103%,基本可以恢复到  $L_s$  的水平,且在二次运行时  $P_{PR}$  变化不大;而在高 MLSS 浓度(阶段Ⅶ)下二次运行时,通过 CEB 获得的  $P_{PR}$  降低了约 16%。整体而言, $A_{PR}$  与  $P_{PR}$  在一定程度上反映出 CEB 与 Declogging&CEB 两种清洗方式在恢复膜渗透性方面的能力相当,然而膜渗透性恢复的持续性尚需考察  $L_e$  的衰减特性。

## 2.4 清洗方式对膜渗透性持续恢复的影响

在低 MLSS 浓度(阶段 I)下,系统以  $J_{sus}$  为 28

L/(m<sup>2</sup>·h)的恒通量运行,阶段末期  $L_e$  为 320 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa),经过 CEB 清洗后, $L_e$  提高到 328 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa),在之后的 18 h 运行中, $L_e$  逐步降低到 322 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa);同样条件下,经过 Declogging&CEB 清洗后, $L_e$  在 18 h 内的衰减曲线几乎与 CEB 的重合,表明两者的清洗效果无明显差异,在系统长期运行时,两者至少可以保持  $L_e$  在 320~322 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa)之间达 168 h 以上。在二次运行阶段,通过 CEB、Declogging&CEB 清洗后的  $L_e$  衰减曲线均与初次运行阶段的相似,因此,在低 MLSS 浓度下 CEB 可以实现膜渗透性的持续恢复,并且不受膜状态的影响。

在中 MLSS 浓度(阶段Ⅲ、Ⅴ)下,系统分别以 24、14 L/(m<sup>2</sup>·h)的恒通量运行,末期的  $L_e$  分别为 254、180 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa),经过 CEB 清洗后, $L_e$  分别提高到 288、260 L/(m<sup>2</sup>·h·100 kPa), $L_e$  在 18 h 内的衰减速率要高于低污泥浓度的。其次,通过 Declogging&CEB 清洗后  $L_e$  的衰减速率要明显小于 CEB 清洗的,经 CEB 清洗后分别经过 12、10 h 降至清洗前的膜渗透性水平(见图 4,以阶段Ⅲ的为例);而且,在二次运行时(阶段Ⅳ、Ⅵ),经过 CEB 清洗后的膜渗透性降至清洗前的时间进一步缩短为 8、5 h。通过 Declogging&CEB 的  $L_e$  的衰减曲线可知, $L_e$  在运行 18 h 后均高于清洗前的状态,并且通过长期运行可知, $L_e$  至少需要运行 100 h 才可降到清洗前状态。因此可知,随着 MLSS 浓度及堵塞程度的增加,依靠 CEB 获得的膜渗透性恢复瞬时存在并难以持续,若要实现膜渗透性的持续恢复则需要多次 CEB 清洗作业,Zsirai 等<sup>[13]</sup>也发现存在膜堵塞行为的中空纤维膜组件通过 CEB 清洗后膜渗透性无法持续维持,而通过 Declogging&CEB 一次清洗作业即可实现持续恢复,这也进一步表明较膜污染行为而言,膜堵塞对膜渗透性衰减的影响具有持续性。



a. 阶段Ⅲ

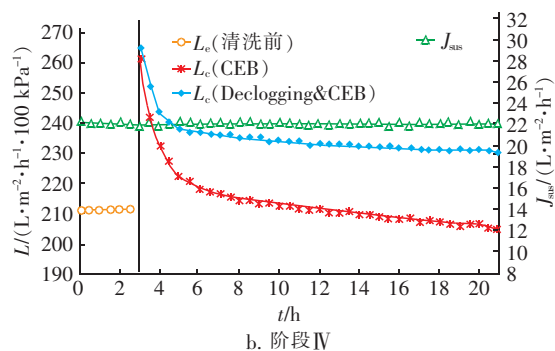


图 4 在阶段Ⅲ、Ⅳ清洗方式对膜渗透性持续恢复的影响

Fig. 4 Recovery of sustainable membrane permeability after cleaning in ends of phase III and IV

在高 MLSS 浓度 (阶段Ⅶ) 下, CEB 对膜渗透性的不可持续恢复的作用更为明显 (见图 5)。末期的  $L_c$  为  $21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ , 经过 CEB 清洗后,  $L_c$  提高到  $145 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ , 经过 6 h 的运行后  $L_c$  降到清洗前的状态, 而采用 Declogging&CEB 清洗后的  $L_c$  降为  $98 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ , 并可运行近 100 h 方能降到清洗前的状态。

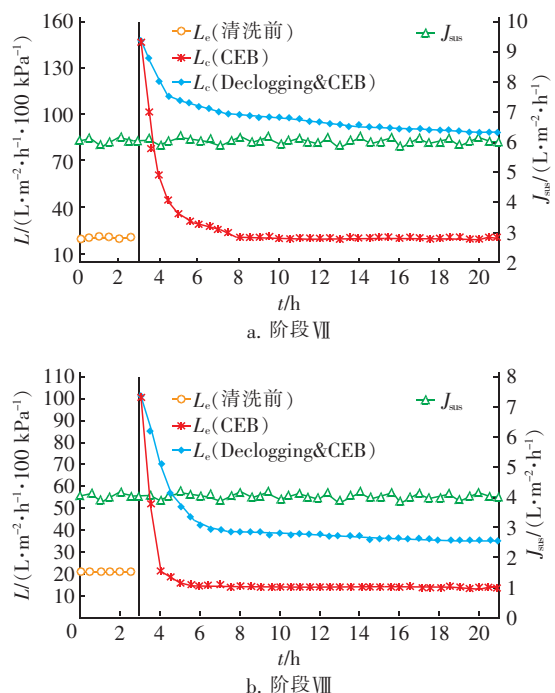


图 5 阶段Ⅶ、Ⅷ清洗方式对膜渗透性持续恢复的影响

Fig. 5 Influence of cleaning modes on sustainable membrane permeability recovery in phases VII and VIII

在二次运行时, 经过 CEB 清洗后的膜渗透性达到清洗前状态的时间降到了最低 (1 h 左右), 经 Declogging&CEB 清洗后的  $L_c$  则降为  $71 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 100 \text{ kPa})$ , 并可运行近 100 h 方能降到清洗前的状态。

• 100 kPa), 但同样可以保证近 100 h 的运行, 实现膜渗透性的持续恢复。因此, 不同 MLSS 浓度下的膜堵塞行为直接决定有效膜清洗方式的选择以及膜渗透性恢复的持续性。

### 3 结论

① 在低 MLSS 浓度 (约为  $8 \text{ g/L}$ ) 下运行时, 中空纤维膜生物反应器几乎没有发生膜堵塞; 随着 MLSS 浓度的增加 ( $16 \sim 32 \text{ g/L}$ ), 膜堵塞程度呈增加趋势, 而 MLSS 浓度增加致使污泥可滤性降低是膜堵塞行为发生的主要诱发条件。

② 在中、高 MLSS 浓度 ( $16 \sim 32 \text{ g/L}$ ) 下, 二次运行时的膜堵塞程度较初次运行时有不同程度的增加 ( $\Delta K$ 、 $\Phi$  值分别增加  $23\% \sim 225\%$  和  $13.5\% \sim 34\%$ ); 二次运行时膜组件的可持续通量会受到初次堵塞程度的影响, 降低了  $2 \sim 4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

③ 在相同的 MLSS 浓度下, 通过离线清堵联合 CEB 方式获得的  $A_{PR}$  和  $P_{PR}$  较 CEB 方式的略大; 在以可持续通量运行的前提下, CEB 方式可以实现低 MLSS 浓度 (约为  $8 \text{ g/L}$ ) 膜渗透性的持续恢复; 而在中、高 MLSS 浓度 ( $16 \sim 32 \text{ g/L}$ ) 条件下, 只有通过 Declogging&CEB 方式才可以实现。

### 参考文献:

- [1] Sun F Y, Li P, Li J, et al. Hybrid biofilm - membrane bioreactor (Bf-MBR) for minimization of bulk liquid-phase organic substances and its positive effect on membrane permeability [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 198: 772 - 780.
- [2] Autin O, Hai F, Judd S, et al. Investigating the significance of coagulation kinetics on maintaining membrane permeability in an MBR following reactive coagulant dosing [J]. *J Membr Sci*, 2016, 516: 64 - 73.
- [3] Lin H J, Zhang M J, Wang F Y, et al. A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies [J]. *J Membr Sci*, 2014, 460: 110 - 125.
- [4] Li Z P, Tian Y, Ding Y, et al. Fouling potential evaluation of soluble microbial products (SMP) with different membrane surfaces in a hybrid membrane bioreactor using worm reactor for sludge reduction [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 140: 111 - 119.
- [5] Santos A, Ma W, Judd S. Membrane bioreactors: Two decades of research and implementation [J]. *Desalina-*



- tion, 2011, 273(1): 148 – 154.
- [6] Gabarron S, Gomez M, Monclus H, *et al.* Ragging phenomenon characterisation and impact in a full-scale MBR [J]. *Water Sci Technol*, 2013, 67(4): 810 – 816.
- [7] Buzatu P, Zsirai T, Aerts P, *et al.* Permeability and clogging in an immersed hollow fibre membrane bioreactor [J]. *J Membr Sci*, 2012, 421/422: 342 – 348.
- [8] Gabarron S, Gomez M, Dvorak H, *et al.* Ragging in MBR: Effects of operational conditions, chemical cleaning, and pre-treatment improvements [J]. *Sep Purif Technol*, 2014, 49: 2115 – 2123.
- [9] Judd S, Judd C. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment* [M]. London: Elsevier, 2010.
- [10] Zsirai T, Aerts P, Judd S. Reproducibility and applicability of the flux step test for a hollow fibre membrane bioreactor [J]. *Sep Purif Technol*, 2013, 107: 144 – 149.
- [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]. *J Hazard Mater*, 2009, 162: 1397 – 1403.
- [12] Sabia G, Ferraris M, Spagni A. Effect of solid retention time on sludge filterability and biomass activity: Long-term experiment on a pilot-scale membrane bioreactor treating municipal wastewater [J]. *Chem Eng J*, 2013, 221: 176 – 184.
- [13] Zsirai T, Buzatu P, Aerts P, *et al.* Efficacy of relaxation, backflushing, chemical cleaning and clogging removal for an immersed hollow fibre membrane bioreactor [J]. *Water Res*, 2012, 46: 4499 – 4507.



作者简介: 闫立娜(1986 – ), 女, 河北遵化人, 硕士, 工程师, 研究方向为污水处理技术与资源化。

E-mail: yanlina01@126.com

收稿日期: 2016 – 10 – 09

(上接第14页)

- [4] 王海燕, 陶金成, 仲志, 等. 采用浸没式超滤膜处理水厂沉淀池出水的研究 [J]. *给水排水*, 2010, 36(11): 136 – 140.
- [5] 张艳, 李圭白. 混凝沉淀—浸没式超滤膜处理东江水的中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(11): 37 – 39.
- [6] Henderson P K, Baer A, Murphy K R, *et al.* Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: A review [J]. *Water Res*, 2009, 43(4): 863 – 881.
- [7] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chem*, 1996, 51(4): 325 – 346.
- [8] Liu T, Chen Z, Yu W, *et al.* Characterization of organic membrane foulants in a submerged membrane bioreactor with preozonation using three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Water Res*, 2011, 45(5): 2111 – 2121.



作者简介: 韩星航(1989 – ), 男, 河北承德人, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事给排水工程项目的建设、管理和研究。

E-mail: waterheb@sina.com

收稿日期: 2017 – 02 – 08