

中空纤维膜生物反应器污泥特性与可持续通量评估

王朝朝^{1,2}, 杨磊^{1,2}, 闫立娜³, 赵丹^{1,2}, 张凯^{1,2}, 李思敏^{1,2}

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038; 3. 河北工程大学 研究生部, 河北 邯郸 056038)

摘要: 采用中空纤维膜生物反应器处理市政污水,考察了不同污泥浓度条件下污泥性质与可持续通量(J_{sus})的变化,并通过统计分析手段对污泥性质指标与可持续通量进行了相关性评估。结果表明,当 MLSS 浓度由 6.8 g/L 增至 32.1 g/L 时,膜组件的膜渗透性(L)与可持续通量分别由 3.60 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$)、30 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 降至 0.99 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$)、6 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$),MLSS 浓度与可持续通量负相关性较强($r_p = -0.966, p < 0.05$),说明 MLSS 浓度对 J_{sus} 的影响较大;同时发现毛细吸水时间(CST)、溶解性化学需氧量(sCOD)与 J_{sus} 的负相关性较弱(r_p 分别为 -0.750、-0.744, p 均小于 0.05),而稀释的污泥体积指数(DSVI)对 J_{sus} 几乎无影响;通过偏相关性分析进一步证明,MLSS 浓度可以作为预测 J_{sus} 的污泥性质指标。

关键词: 膜生物反应器; 污泥特性; 污泥浓度; 可持续通量; 浓缩过程

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0088-05

Assessment of Sludge Properties and Sustainable Flux in Hollow Fiber Membrane Bioreactor

WANG Zhao-zhao^{1,2}, YANG Lei^{1,2}, YAN Li-na³, ZHAO Dan^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2},
LI Si-min^{1,2}

(1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Engineering Research Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Handan 056038, China; 3. Graduate School, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: A pilot-scale hollow fiber membrane bioreactor (HF-MBR) was used to treat municipal wastewater, and the sludge properties and sustainable flux variations under different MLSS concentration conditions were investigated. The correlations between the sludge properties and the sustainable flux were further assessed in the statistical analysis. The results showed that the membrane permeability and sustainable flux decreased from 3.60 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$) and 30 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$) to 0.99 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$) and 6 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$), respectively, as the MLSS concentration increased from 6.8 g/L to 32.1 g/L. MLSS concentration showed the strongest correlation with the sustainable flux ($r_p = -0.966, p < 0.05$), which indicated that the MLSS concentration exerted substantial influence on the sustainable flux. Moreover,

CST and sCOD showed weak correlations with the sustainable flux (r_p was -0.750 and -0.744 respectively, and p was less than 0.05). DSVI exhibited negligible impacts on the sustainable flux. MLSS concentration was identified as a sustainable flux predictor.

Key words: membrane bioreactor; sludge property; MLSS concentration; sustainable flux; thickening process

MBR 是将活性污泥的生物降解过程与固液分离的膜过滤过程相结合的一种污水处理工艺。然而在实际运行中,如何有效保持膜组件渗透性的持续是亟待解决的问题。影响膜渗透性(L)的因素很多,通常来讲主要涉及膜材料、运行条件和污泥特性^[1]。对于特定膜组件反应器,运行条件和污泥特性是影响膜渗透性较关键的因素。膜通量,作为 MBR 工艺产水动力的直接来源,亦是影响产水率和膜渗透性大小的主要因素^[2]。在 MBR 工艺运行中,经常选取次临界通量作为维持系统运行的可持续通量(J_{sus}),因此临界通量及可持续通量的确定至关重要。Wu 等^[3]研究了污泥性质(包括 MLSS 浓度、污泥粒径 PSD、胞外聚合物 EPS、溶解性微生物产物 SMP)对膜通量的影响,发现 MLSS 浓度对膜通量的影响最大。而 Sabia 等^[4]在研究 SRT 对 A/O-MBR 运行性能的影响时发现,毛细吸水时间(CST)可以作为临界通量的指示性参数。在以往的研究中,由于 MLSS 浓度的差异,导致 MLSS 对 MBR 的影响机理不同。因此选择不同 MLSS 浓度条件下的可持续通量并分析污泥性质对其影响,对于 MBR 系统的持续运行及优化调控具有重要意义。

笔者采用膜生物反应器处理市政污水,在不同 MLSS 浓度条件下考察污泥性质对膜组件持续通量的影响,并采用 SPSS 软件对污泥性质与膜组件可持续通量的相关性进行评估,探究污泥性质中关键影响因子,建立膜组件可持续通量预测模型。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置与流程

中空纤维膜生物反应器工艺流程如图 1 所示。该装置总有效体积为 6.75 m^3 ,包括生物池和膜池,分别占总有效体积的 74% 和 26%。生物池底部装有微孔曝气盘,通过人工调节曝气量保证好氧池的溶解氧维持在 $1 \sim 2 \text{ mg/L}$ 。生物池与膜池通过污泥循环泵连接,由膜池到生物池的污泥回流比为 400%。通过蠕动泵向生物池输入蔗糖溶液,确保反应器以恒污泥负荷 [$F/M = 0.13 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$] 运行。

另外,通过溶解氧和温度探头对生物池的状态进行实时监测。反应器的进水、污泥循环、产水、膜组件曝气、排泥过程采用配有监控和数据采集(SCADA)系统的可编程逻辑控制器(PLC)控制。

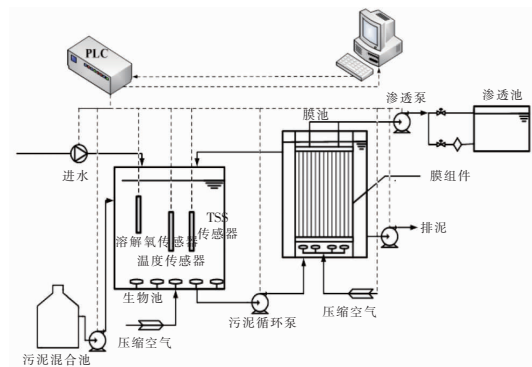


图1 中空纤维膜生物反应器工艺流程

Fig. 1 Flow chart of HF-MBR process

膜池内装有两组竖状的聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维帘式膜,膜孔径为 $0.04 \mu\text{m}$,膜的总有效过滤面积为 46.4 m^2 。通过蠕动泵的抽吸实现产水过程,并可实现水力反冲洗功能。在膜组件底部 100 mm 以下安装穿孔曝气管路,对膜表面进行间歇性曝气冲刷(开 10 s ,关 10 s),保证单位膜面积的曝气量(SAD_m)为 $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

1.2 试验的运行条件

试验的运行条件见表 1。

表1 试验运行条件

Tab. 1 Operational conditions during experiment

项 目	浓缩前	浓缩时	浓缩后
SRT/d	38 ± 4	$87 \sim 103$	47 ± 1
HRT/h	7.9 ± 0.5	$7.8 \sim 22.7$	21.8 ± 0.9
容积负荷/ ($\text{kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	1.18 ± 0.48	$0.80 \sim 5.59$	4.23 ± 0.43
污泥负荷/($\text{gCOD} \cdot \text{g}^{-1} \text{MLSS} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.13	0.13	0.13
曝气量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	16	$16 \sim 220$	220
膜渗透性/($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$)	3.67 ± 0.57	$3.65 \sim 0.77$	1.26 ± 0.31

压力传感器安装在生物池中,用于控制污泥水

平。通过连接到 SCADA 系统的浸入式压力传感器和超声波流量计,每隔 30 s 记录一次 TMP、膜渗透性和产水通量。

1.3 进水水质

试验进水取自某污水处理厂的初沉池出水, tCOD、sCOD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、SS 分别为 (483.2 ± 290.5) 、 (117 ± 60.5) 、 (28.9 ± 8.2) 、 (44.3 ± 10.6) 、 (8.2 ± 2.8) 、 (230 ± 190) mg/L, pH 值为 8.2 ± 1.1 。配制的蔗糖溶液浓度(以 COD 当量计)为 1 142 g/L,每天调整流量,以保证其协同城市污水达到所需的有机负荷。

1.4 分析项目及方法

1.4.1 分析方法

COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、MLSS、MLVSS 以及 SS 浓度均按照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定。污水中 sCOD 的测定:将样品在 12 000 r/min 下离心 15 min,上清液通过 0.45 μm 微滤膜过滤后测定 COD 浓度。pH 值采用便携式仪器测定。采用稀释的污泥体积指数(DSVI)来表示污泥的沉降性能,可将污泥样品的 MLVSS 浓度稀释至 3 g/L,放置到 1 L 量筒中测定污泥沉积指数。污泥粒径(PSD)采用马尔文粒径仪测定,以平均粒径(D_{50})计。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,EPS 以比污泥总有机碳浓度计,SMP 以总有机碳(TOC)浓度计。CST 采用便携式 CST 仪测定。

1.4.2 可持续通量的确定

在 MLSS 浓度由 6 g/L 增加到 32 g/L 的过程中,采用通量递增法测定临界通量,测定周期为 18 h,且在每个测定周期结束后均进行离线清堵作业和一个周期的 CEB 作业。离线清堵作业:将膜组件从膜池内取出,采用低压水进行清洗,冲洗掉膜丝通道内的固体颗粒物;CEB 作业: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,间隔为 2 min,化学反冲洗的通量为 25 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)。

1.4.3 SPSS 分析

采用 SPSS 软件对试验数据进行统计分析,以直观反映污泥性质(如 MLSS 浓度、MLVSS 浓度、EPS、SMP、sCOD、DSVI、PSD、CST)对可持续通量的影响。皮尔逊系数 r_p 是介于 -1.0 ~ 1.0 之间的无量纲指数,反映了两个参数之间相关性的方向与强度,其中 -1.0 表示完美负相关,1.0 表示完美正相关,0 表示无相关性。本试验数据的相关性在统计学上被认为在 95% 的置信区间内显著($p < 0.05$);此外采用偏相关系数 r_p' 确定影响可持续通量最为关键的因子,统计学上被认为在 95% 的置信区间内显著,即 $p' > 0.05$ 的因子被排除。

2 结果与讨论

2.1 污泥性质、膜渗透性和可持续通量的变化

MLSS 浓度与膜组件可持续通量的具体变化情况见表 2。

表 2 浓缩过程中膜渗透性、可持续通量与污泥性质的变化

Tab. 2 Change of membrane permeability, sustainable flux and sludge properties during thickening process

$L/(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$	$J_{\text{sus}}/(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	MLSS/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	MLVSS/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	EPS/(mg $\cdot \text{g}^{-1}$ MLSS)	SMP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	sCOD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	DSVI/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	PSD/ μm	CST/ s
3.60	30	6.8	5.9	77.1	22.1	120.5	405.0	81.9	12.1
3.63	28	8.7	6.4	76.8	20.7	81.0	400.0	96.8	12.8
3.60	26	10.3	8.0	62.0	12.8	73.5	287.5	105.9	9.3
3.48	25	12.4	8.7	67.8	37.4	201.0	337.5	53.2	16.4
3.49	25	13.9	10.7	71.9	28.9	180.0	350.0	53.0	20.9
3.42	24	15.8	12.9	71.0	28.0	230.0	375.0	45.2	16.4
3.16	22	18.2	12.3	63.2	36.9	203.0	350.0	69.2	15.0
2.59	14	20.4	17.7	54.0	17.3	132.5	319.0	61.3	17.6
1.80	10	22.5	20.5	67.2	27.4	210.0	320.0	54.3	17.8
1.26	8	25.5	20.1	59.7	66.25	254.0	450.0	31.4	51.6
1.08	7	28.1	21.2	69.1	55.94	276.0	405.0	43.6	38.6
0.99	6	32.1	28.9	62.0	125	356.0	425.0	43.5	83.1

由表 2 可知,MLSS 浓度对膜组件的渗透性和可持续通量有较大影响。当 MLSS 由 6.8 g/L 增加到

32.1 g/L 时,膜的渗透性与可持续通量分别由 3.60 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$)、30 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 降低到 0.99 L/

($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa}$)、 $6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。同时发现 EPS 与 PSD 分别由 77.1 mg/gMLSS 、 $81.9 \mu\text{m}$ 降低到 62.0 mg/gMLSS 、 $43.5 \mu\text{m}$;而 SMP 与 sCOD 分别由 22.1 、 120.5 mg/L 提高到 125 、 356.0 mg/L ;DSVI 的变化

无显著规律,在 $287.5 \sim 450.0 \text{ mL/g}$ 之间波动。

2.2 污泥性质对可持续通量的影响

通过 SPSS 软件分析可持续通量与污泥性质的相关性,结果见表 3。

表 3 可持续通量与污泥性质的皮尔逊系数

Tab. 3 Pearson coefficient of sustainable flux and sludge properties

项目	J_{sus}	MLSS	MLVSS	EPS	SMP	sCOD	PSD	DSVI	CST
J_{sus}	1.000								
MLSS	-0.966	1.000							
MLVSS	-0.960	0.979	1.000						
EPS	0.566	-0.547	-0.537	1.000					
SMP	-0.673	0.776	0.776	-0.261	1.000				
sCOD	-0.744	0.856	0.826	-0.234	0.864	1.000			
PSD	0.681	-0.734	-0.696	0.265	-0.577	-0.851	1.000		
DSVI	-0.325	0.368	0.336	0.239	0.625	0.514	-0.434	1.000	
CST	-0.750	0.818	0.830	-0.334	0.974	0.826	-0.599	0.643	1.000

由表 3 可知,MLSS、MLVSS 浓度对 J_{sus} 的影响较大,其他污泥性质指标 (EPS、SMP、sCOD、PSD、CST) 对 J_{sus} 的影响较弱,而 DSVI 对 J_{sus} 几乎无影响。

2.2.1 MLSS 和 MLVSS 对 J_{sus} 的影响

一般来讲,MLSS 包括污泥颗粒、胶体以及大分子溶解性物质。在低污泥浓度条件下,胶体类和溶解性物质的膜污染行为是影响 J_{sus} 的主要因素;而在高污泥浓度条件下,固体颗粒物的膜堵塞行为是影响 J_{sus} 的主要因素,并且能够使 J_{sus} 急剧降低从而缩短运行周期。由表 3 可知,MLSS、MLVSS 浓度和可持续通量呈现很强的负相关性(r_p 分别为 -0.966 、 -0.960 , p 均小于 0.05),可以推测在 MLSS 浓度范围内($6.8 \sim 32.1 \text{ g/L}$),膜通量降低的原因主要为固体颗粒物的膜堵塞行为,并可使在线维护清洗逐渐失效从而降低膜渗透性,缩短持续运行周期。

2.2.2 EPS、SMP 与 sCOD 对 J_{sus} 的影响

EPS 和 SMP 通常作为膜污染行为的指示因子,并且 EPS 与 SMP 之间也存在一定的转化关系。sCOD 则表征了污泥混合液组分中溶解性有机物和胶体类物质的含量。EPS 沉积在膜表面,促进凝胶层和滤饼层的形成,从而加速膜渗透性的降低;SMP 在抽吸力的作用下,通过堵塞膜孔形成膜污染,加速通量下降^[5]。由表 3 可以看出,SMP 和 sCOD 与 J_{sus} 呈现一定的负相关性(r_p 分别为 -0.673 、 -0.744 , p 均小于 0.05),表明 SMP 和 sCOD 含量的增加会促使 J_{sus} 降低;而 EPS 与 J_{sus} 具有一定的正相关性($r_p = 0.566$, $p < 0.05$),这是由微生物代谢产物总量平衡

引起的,EPS 与 SMP 的变化呈现相逆性,该特性在 MBR 反应器污泥浓缩过程中更为显著^[3]。

2.2.3 PSD 与 CST 对 J_{sus} 的影响

PSD 能够影响膜渗透性的持续性,较大粒径的污泥颗粒受到的水力剪切力较大,不易附着在膜表面形成滤饼层^[6];CST 则反映了污泥的脱水性能,CST 值越小,污泥的脱水性能越好,过滤分离阻力也越小^[4]。从表 3 可以看出,PSD 与 J_{sus} 存在着一定的正相关性($r_p = 0.681$, $p < 0.05$),即 PSD 越大则污泥过滤阻力越小;CST 与 J_{sus} 呈现一定的负相关性($r_p = -0.750$, $p < 0.05$),可见污泥脱水性能越好越有利于污泥的高效分离。

2.2.4 DSVI 对 J_{sus} 的影响

DSVI 通常用来评估污泥的沉降性能及絮凝能力。污泥沉降性能良好可以提高污泥的可滤性,降低污泥的过滤阻力,提高污泥分离效率。影响 DSVI 的因素很多,例如 PSD、EPS、SMP 及丝状菌指数 (FI) 等。由表 3 可知,DSVI 与 J_{sus} 的相关性较弱($r_p = -0.325$, $p < 0.05$),即 DSVI 对 J_{sus} 几乎无影响。这说明 DSVI 不是决定 J_{sus} 的关键因素,DSVI 作为考量污泥浓缩系统运行持续性效果的指标并不可靠。

2.3 偏相关性分析、模型构建与数据验证

综上所述,污泥性质指标中除 DSVI 之外,其他参数对 J_{sus} 均有一定的影响。其中 MLSS 浓度对 J_{sus} 的影响最大,然而 MLSS 浓度与其他污泥性质指标也存在一定的相关性,因此能否采用 MLSS 浓度来指示 J_{sus} ,取决于 MLSS 浓度与 J_{sus} 的绝对相关性,而

这一相关性可以采用偏相关性分析来实现。表4为污泥性质与 J_{sus} 的偏相关性分析结果。

表4 污泥性质与 J_{sus} 的偏相关性分析结果

Tab.4 Results of partial correlation analysis between sludge properties and J_{sus}

项 目	与 J_{sus} 的偏相关性关系	
	r_p'	p'
MLSS	-0.966	0.000
MLVSS	-0.269	0.423
EPS	0.606	0.175
SMP	0.470	0.145
sCOD	0.623	0.080
PSD	-0.158	0.643
DSVI	0.125	0.714
CST	0.276	0.411

从表4可以看出,MLSS浓度可以作为 J_{sus} 的指示性参数,偏相关系数 $r_p' = -0.966$ ($p' < 0.05$),其他参数的 p' 值均大于0.05。将MLSS浓度与 J_{sus} 进行拟合(见图2),得到 J_{sus} 的预测模型为 $J_{\text{sus}} = 38.21 - 1.09\text{MLSS}$,这与Wu等^[3]的研究结果一致。

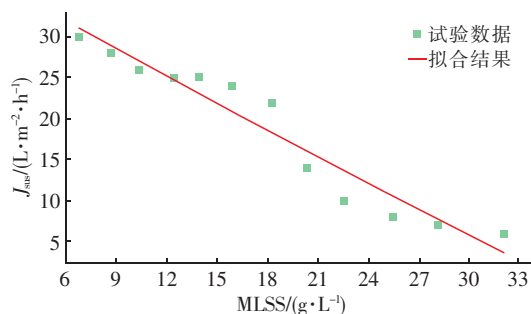


图2 拟合结果与试验数据的关系

Fig.2 Correlation between linear fitting result and experimental data

3 结论

① 当MLSS浓度由6.8 g/L增加到32.1 g/L时,膜组件的膜渗透性由 $3.60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$ 降低到 $0.99 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$,与此同时可持续通量由 $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降低到 $6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

② 通过SPSS软件分析发现,MLSS浓度与 J_{sus} 呈现较强的负相关性($r_p = -0.966$, $p < 0.05$),表明MLSS浓度对 J_{sus} 的影响较大;并且发现CST、sCOD与 J_{sus} 分别呈现出较弱的负相关性(r_p 分别为-0.750、-0.744, p 均小于0.05),而DSVI对 J_{sus} 几乎无影响。

③ 通过偏相关性分析进一步证明MLSS浓度

可以作为预测 J_{sus} 的污泥性质指标,预测模型为 $J_{\text{sus}} = 38.21 - 1.09\text{MLSS}$ 。

参考文献:

- [1] Meng F G, Zhang S Q, Oh Y, *et al.* Fouling in membrane bioreactors: An updated review [J]. *Water Res*, 2017, 114: 151–180.
- [2] Tiranuntakul M, Schneider P A, Jegatheesan V. Assessments of critical flux in a pilot-scale membrane bioreactor [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(9): 5370–5374.
- [3] 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(1/2): 1397–1403.
- [4] 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.
- [5] Chen R, Nie Y L, Hu Y S, *et al.* Fouling behaviour of soluble microbial products and extracellular polymeric substances in a submerged anaerobic membrane bioreactor treating low-strength wastewater at room temperature [J]. *J Membr Sci*, 2017, 531: 1–9.
- [6] Shen L G, Lei Q, Chen J R, *et al.* Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor: Impacts of floc size [J]. *Chem Eng J*, 2015, 269: 328–334.



作者简介:王朝朝(1985—),男,河北邯郸人,博士,副教授,主要研究方向为膜法污水处理理论与技术。

E-mail: W-Z-Z@163.com

收稿日期:2017-10-28