

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.014

振动MBR系统关键运行参数优选与验证

黄江龙, 关欢欢, 刘江辉, 马亚娥, 薛涛, 俞开昌
(北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206)

摘要: MBR技术通常采用膜面曝气吹扫方式控制膜污染,导致运行能耗较高。以机械振动方式代替曝气吹扫具有抗污染效果好、能耗低的突出优势,实用价值和研究意义较高。采用通量阶梯递增法测定了不同参数条件下振动MBR临界通量,确定最优产水开停比为7:1,在此基础上建立了包含振频、振幅、污泥浓度和回流比等因素的临界通量模型。结合膜振动理论能耗计算,优选膜系统关键运行参数如下:振频为0.4~0.6 Hz、振幅为4~6 cm、污泥浓度为10~16 g/L、回流比为100%~300%。以实际城镇污水为进水,对优选参数进行了中试验证,并与曝气MBR工程进行对比。振动MBR中试装置的运行跨膜压差(TMP)低于10 kPa,单个清洗周期内TMP增长速率的均值为0.1 kPa/d,振动能耗均值为0.066 kW·h/m³。与曝气MBR相比,振动MBR的TMP平均增长速率降低86%,膜系统节能57%,是一种特色鲜明、应用前景良好的新型MBR技术。

关键词: MBR; 振动; 膜污染; 能耗; 临界通量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0088-05

Optimization of Key Operating Parameters of Vibrating MBR System and Its Verification

HUANG Jiang-long, GUAN Huan-huan, LIU Jiang-hui, MA Ya-e, XUE Tao,
YU Kai-chang

(Beijing OriginWater Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: MBR technology usually adopts air scouring method to control membrane fouling, which leads to high energy consumption in operation. The mechanical vibration method instead of air scouring has the outstanding advantages of good anti-fouling performance and low energy consumption, and has high practical value and research significance. The critical flux of vibrating MBR with different operating parameters was measured by flux step-up method, and the optimal flux on/off ratio of water production was determined to be 7 : 1. On this basis, the critical flux model including vibration frequency, amplitude, sludge concentration and reflux ratio was established. Combined with the theoretical energy consumption calculation of vibrating membrane, the key operating parameters of the membrane system were optimized as follows: vibration frequency was 0.4–0.6 Hz, amplitude was 4–6 cm, sludge concentration was 10–16 g/L, and reflux ratio was 100%–300%. The optimized parameters were verified in a pilot-scale vibrating MBR with actual municipal wastewater as influent, and the results were compared with aerated MBR. The transmembrane pressure (TMP) of the pilot-scale vibrating MBR was less than 10 kPa, the average TMP

基金项目: 北京市资源环境与可持续发展项目(Z171100000717001)

通信作者: 薛涛 E-mail: xt_chn@163.com

growth rate in a single cleaning cycle was 0.1 kPa/d, and the average vibration energy consumption was 0.066 kW·h/m³. Compared with aerated MBR, the average TMP growth rate of vibrating MBR was reduced by 86%, and the membrane system saved 57% of energy consumption, indicating that it was a new MBR technology with distinct characteristics and good application prospect.

Key words: MBR; vibration; membrane fouling; energy consumption; critical flux

膜生物反应器(MBR)具有占地面积小、出水水质高、污泥产率低等优点,已广泛应用于市政污水和工业废水的处理,但膜污染仍是阻碍其应用的关键。目前常用膜面曝气吹扫方式减缓膜污染,导致MBR技术的运行能耗较高。

以振动等机械运动方式代替曝气吹扫,使膜面与活性污泥混合液形成相对运动而产生局部剪切力、惯性力等,也可达到控制膜污染的效果。1992年,Armando等^[1]最早提出振动剪切强化工艺,将水平堆叠的圆形有机膜元件安装在可振动的垂直扭转轴上,产生的膜面剪切速率约为错流系统的10倍,可用于化工、食品等领域。Beier等^[2]于2006年通过临界通量测评,证实了轴向振动方式减缓中空纤维膜组件污染的有效性。Genkin等^[3]对比了轴向振动和横向振动时膜的临界通量,发现横向振动可将临界通量提升近一倍。Li等^[4-5]开展了振动膜连续运行试验,证明了横向振动比轴向振动更有利于减缓膜污染。同时,以机械振动方式代替曝气吹扫能够显著降低运行能耗。Ho等^[6]设计了约20 m³/d处理规模的振动MBR中试装置,并连续运行9个多月,振动能耗为0.064~0.150 kW·h/m³,比曝气降低约66%。De Sotto等^[7]搭建了1 000 m³/d处理规模的振动MBR中试装置,并连续运行8个月,振动能耗仅为0.008~0.012 kW·h/m³。综上所述,在MBR工艺中以机械振动方式代替曝气吹扫控制膜污染,具有抗污染效果好、能耗低的突出优势,但目前相关应用研究较少,尤其缺乏对振动膜系统关键运行参数的分析。

笔者采用临界通量评价方法考察了振动MBR系统的关键运行参数,包括开停比、振频、振幅、污泥浓度和回流比的影响,获得了最优参数。在北京某MBR污水处理厂搭建了一套振动MBR中试装置,以实际城镇污水为进水,开展了2个月的连续运行试验,对优选参数进行了验证,并对比了振动MBR和曝气MBR系统的运行稳定性与能耗。

1 材料与方法

1.1 试验装置

1.1.1 振动机构原理

振动MBR的运行原理如图1所示。膜组器固定在水平滑架上,通过传动轴与电机连接,利用曲柄滑块原理,将电机的旋转运动转化为膜组器的横向振动。膜组器振动频率由电机振频和变频器决定,振幅为曲柄旋转半径,曲柄长度可调。

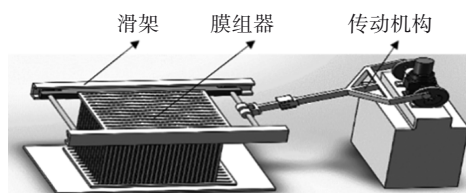


图1 振动MBR运行原理示意

Fig.1 Schematic diagram of operation principle of vibrating MBR

1.1.2 临界通量测试装置

振动MBR临界通量测试装置如图2所示。

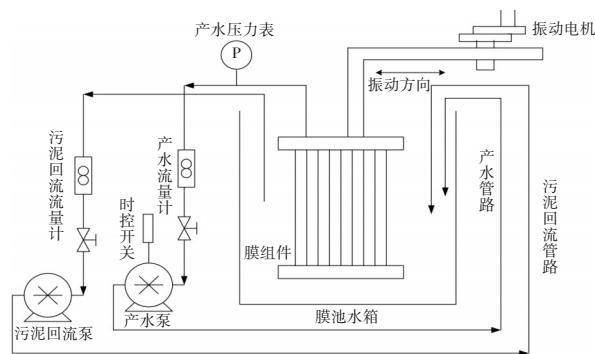


图2 振动MBR临界通量测试装置示意

Fig.2 Schematic diagram of critical flux test device of vibrating MBR

其中膜池水箱容积约为200 L,膜组件包括4片PVDF中空纤维膜,总膜面积为3.6 m²,膜组件在电机驱动下进行横向振动。膜产水回流至膜池水箱,以保证测试期间污泥浓度稳定。设污泥混合液自循环旁路,以模拟实际工程中膜池污泥回流的水力

效应。测试装置的产水开停比(产水抽吸时间/产水停抽时间)、振频、振幅、污泥浓度、污泥回流比(污泥混合液循环流量/产水流量)等参数可调。

1.1.3 参数验证中试装置

在北京某污水处理厂搭建1套振动MBR中试装置,对膜系统运行参数进行验证。该污水厂采用MBR工艺,流程为厌氧—缺氧—好氧—缺氧—曝气膜池,设计规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于来水量不足,实际处理水量约为 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实际膜通量为 $12 \sim 14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。污水厂进水水质:COD为 $100 \sim 200 \text{ mg/L}$,氨氮为 $20 \sim 35 \text{ mg/L}$,总氮为 $25 \sim 40 \text{ mg/L}$,总磷为 $2 \sim 6 \text{ mg/L}$ 。振动MBR中试装置处理规模为 $70 \sim 80 \text{ m}^3/\text{d}$,总HRT为 $15 \sim 17 \text{ h}$ 。污水厂及中试装置膜系统每周采用 1000 mg/L 的 NaClO 在线清洗1次。

1.2 试验方法

1.2.1 临界通量测试与参数优选方法

采用通量阶梯递增法测定振动MBR的临界通量,初始膜通量设为 $4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,通量增长梯度为 $3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,阶梯间隔为 30 min 。首先测定不同产水开停比条件下的临界通量,确定最优产水开停比参数,之后设计振频、振幅、污泥浓度、回流比的单因素变量试验,并采用多元回归分析法建立临界通量的数学模型,见式(1)。

$$J_{\text{cr}} = a \times f^{b_1} \times A^{b_2} \times c^{b_3} \times R^{b_4} \quad (1)$$

式中: J_{cr} 为临界通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; f 为振频,Hz; A 为振幅,cm; c 为污泥浓度,g/L; R 为污泥回流比,%; a, b_1, b_2, b_3, b_4 为模型方程拟合系数。

1.2.2 参数验证方法

振动MBR中试装置以优选出的参数连续运行,监测跨膜压差(TMP)及用电量,考察膜系统稳定性及振动能耗,并与污水厂曝气MBR工程进行对比,验证参数的有效性。

2 结果与讨论

2.1 产水开停比优选

在振频为 0.48 Hz 、振幅为 6 cm 、污泥浓度为 15 g/L 、回流比为 250% 条件下,分析不同开停比下振动MBR临界通量值和产水量当量(以连续产水时的产水量为基准)的变化,结果见图3。当产水开停比从 $11:1$ 减小至 $7:1$ 时,产水量当量的变化不到 5% ,但临界通量上升明显。当开停比降至 $4:1$ 时临界通量最高,但相比于开停比为 $7:1$,产水量当量下降

8.6% ,每天产水泵启停次数增加 37.5% 。根据MBR工程运行经验,为兼顾产水效率、膜污染控制效果与设备控制可靠性,优选产水开停比为 $7:1$ 。

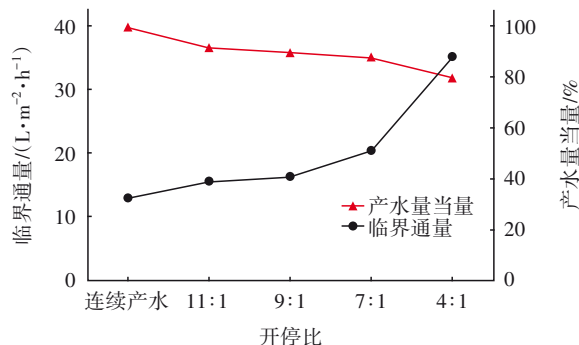


图3 不同开停比下临界通量和产水量当量的变化

Fig.3 Change of critical flux and flux equivalent at different flux on/off ratios

2.2 临界通量模型建立及参数优选

在产水开停比为 $7:1$ 的条件下,按1.2.1节所述方法建立不同范围内振频($0.4 \sim 0.7 \text{ Hz}$)、振幅($4 \sim 10 \text{ cm}$)、污泥浓度($10 \sim 20 \text{ g/L}$)、回流比($100\% \sim 450\%$)的临界通量数学模型,见式(2)。

$$J_{\text{cr}} = 103.76 \times f^{2.43} \times A^{0.94} \times c^{-0.81} \times R^{0.33} \quad (2)$$

临界通量模型计算值与实测值的结果基本相符,准确性较好。进一步运用该模型分析各参数项对临界通量的影响。

2.2.1 膜组件参数

振频和振幅为振动MBR特有的调控参数。在污泥浓度为 12 g/L 、回流比为 200% 的条件下,分析振频、振幅对临界通量的影响,结果如图4所示。

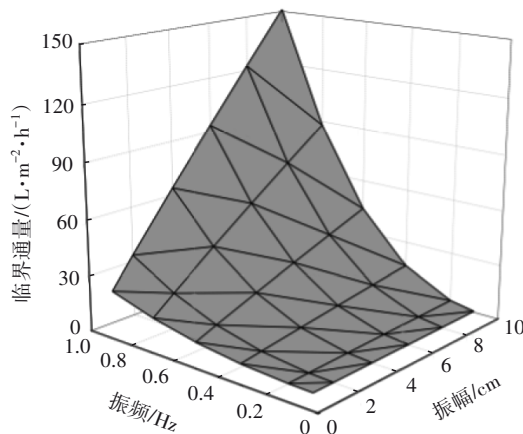


图4 振频及振幅对临界通量的影响

Fig.4 Influence of vibration frequencies and amplitudes on critical flux

振动MBR临界通量随振频和振幅的增加而增大,但振频和振幅的增加也将导致振动能耗升高,参照文献[8]中的膜振动理论能耗计算方法,得到不同振频、振幅下的理论能耗值,如图5所示。振动能耗随振频和振幅的增加而升高,尤其在振频>0.6 Hz、振幅>6 cm后,能耗快速升高。综合图4与图5的结果,优选振频为0.4~0.6 Hz、振幅为4~6 cm。

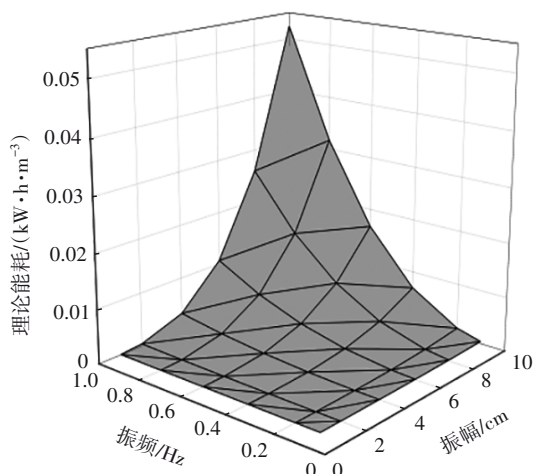


图5 不同振频、振幅下理论能耗计算值

Fig.5 Theoretical energy consumption at different vibration frequencies and amplitudes

2.2.2 膜池运行参数

在振频为0.5 Hz、振幅为5 cm条件下,分析污泥浓度与回流比对振动MBR临界通量的影响,结果如图6所示。

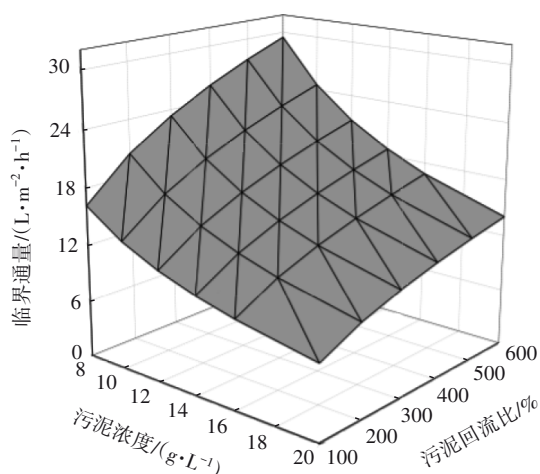


图6 污泥浓度和回流比对临界通量的影响

Fig.6 Influence of MLSS and sludge reflux ratio on critical flux

由图6可知,临界通量随污泥浓度的增加而减小,随回流比的增加而增大。污泥浓度升高,对控

制膜污染不利,该参数首先应满足生化处理的要求,在此基础上进行调控。结合现有MBR工程的实践经验,优选污泥浓度为10~16 g/L。增加回流比是有利的,但考虑到回流能耗是成倍增长的,因此优选回流比为100%~300%。

综上所述,确定振动MBR系统关键运行参数的最优值如下:振频为0.4~0.6 Hz、振幅为4~6 cm、污泥浓度为10~16 g/L、回流比为100%~300%。

2.3 优选参数的中试验证

振动MBR中试装置和污水厂曝气MBR工程的膜系统运行情况如图7所示。

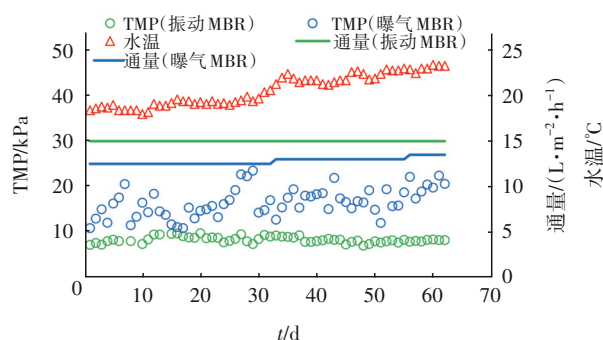


图7 振动MBR及曝气MBR系统运行情况对比

Fig.7 Comparison of operation performance between vibrating MBR and aeration MBR systems

振动MBR运行条件:振频为0.5 Hz、振幅为5 cm、污泥浓度为11~12.5 g/L、膜池回流比为200%;曝气MBR运行条件:曝气强度为80 m³/(m²·h)、污泥浓度为10~12 g/L、膜池回流比为500%。可知,振动MBR的TMP低于10 kPa,单个清洗周期内TMP增长速率的均值为0.1 kPa/d。曝气MBR的TMP为10~25 kPa,单个清洗周期内TMP增长速率的均值为0.7 kPa/d。振动MBR的TMP平均增长速率比曝气MBR降低86%,可见膜系统具有很好的运行稳定性,以振动方式控制膜污染切实可行。

振动MBR膜系统能耗均值为0.066 kW·h/m³,曝气MBR膜系统为0.153 kW·h/m³,振动膜系统节能57%。振动MBR中试装置规模较小,预计放大至日处理1 000 m³及以上规模后振动能耗将低于0.05 kW·h/m³,与曝气MBR相比节能优势将更为显著。设备投资方面,振动MBR节省了曝气吹扫风机及管路等,但增加了振动电机及传动机构,初步评估两者成本基本相当。总体来看,振动MBR技术是一种特色鲜明、应用前景良好的新型MBR技术。

3 结论

① 采用通量阶梯递增法测定了不同参数条件下的振动MBR临界通量,确定最优产水开停比为7:1,在此基础上建立了包含振频、振幅、污泥浓度和回流比等因素的临界通量模型,明确了振频、振幅和回流比对临界通量为正向影响,而污泥浓度为负向影响。膜振动理论能耗计算结果表明,能耗随振频和振幅的增加而加速升高。最终优选膜系统关键运行参数如下:振频为0.4~0.6 Hz、振幅为4~6 cm、污泥浓度为10~16 g/L、回流比为100%~300%。

② 在北京某MBR污水处理厂搭建了一套振动MBR中试装置,以实际城镇污水为进水开展了2个月试验。振动MBR中试装置在振频为0.5 Hz、振幅为5 cm、污泥浓度为11~12.5 g/L、回流比为200%条件下的运行TMP低于10 kPa,单个清洗周期内的TMP增长速率均值为0.1 kPa/d,振动能耗均值为0.066 kW·h/m³。污水厂曝气MBR膜系统在曝气强度为80 m³/(m²·h)、污泥浓度为10~12 g/L、回流比为500%条件下的运行TMP为10~25 kPa,单个清洗周期内TMP增长速率均值为0.7 kPa/d,膜吹扫能耗均值为0.153 kW·h/m³。与曝气MBR相比,振动MBR的TMP平均增长速率降低86%,膜系统节能57%,是一种特色鲜明、应用前景良好的新型MBR技术。

参考文献:

- [1] ARMANDO A D, CULKIN B, PURCHAS D B. New separation system extends the use of membranes [J]. *Filtration & Separation*, 1992, 29(5): 376-378.
- [2] BEIER S P, GUERRA M, GARDE A, *et al.* Dynamic microfiltration with a vibrating hollow fiber membrane module: filtration of yeast suspensions [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 281(1/2): 281-287.

- [3] GENKIN G, WAITE T D, FANE A G, *et al.* The effect of vibration and coagulant addition on the filtration performance of submerged hollow fibre membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 281 (1/2): 726-734.
- [4] LI T, LAW A W K, FANE A G. Submerged hollow fibre membrane filtration with transverse and longitudinal vibrations [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 455: 83-91.
- [5] LI T, LAW A W K, JIANG Y S, *et al.* Fouling control of submerged hollow fibre membrane bioreactor with transverse vibration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 505: 216-224.
- [6] HO J, SMITH S, KIM G D, *et al.* Performance evaluation of a novel reciprocation membrane bioreactor (rMBR) for enhanced nutrient removal in wastewater treatment: a comparative study [J]. *Water Science and Technology*, 2015, 72(6): 917-927.
- [7] DE SOTTO R, HO J, LEE W, *et al.* Discriminating activated sludge flocs from biofilm microbial communities in a novel pilot-scale reciprocation MBR using high-throughput 16S rRNA gene sequencing [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 268-277.
- [8] KOLA A, YE Y, HO A, *et al.* Application of low frequency transverse vibration on fouling limitation in submerged hollow fibre membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 409/410: 54-65.

作者简介:黄江龙(1977-),男,河北石家庄人,硕士,正高级工程师,从事环保水务领域科技研发与管理方面的工作。

E-mail:2083864764@qq.com

收稿日期:2021-03-05

修回日期:2021-05-12

(编辑:任莹莹)