

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.016

# 脉冲曝气在大型膜生物反应器工程中的应用与优化

孙剑宇<sup>1,2</sup>, 雷霆<sup>3</sup>, 梁鹏<sup>2</sup>, 黄霞<sup>2,3</sup>, 刘慰<sup>4</sup>, 陈颖<sup>4</sup>, 薛涛<sup>5</sup>,  
俞开昌<sup>5</sup>

(1. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211; 2. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家联合重点实验室, 北京 100084; 3. 清华大学环境学院 膜技术研发与应用中心, 北京 100084; 4. 无锡市高新水务有限公司 梅村水处理厂, 江苏 无锡 214112; 5. 北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206)

**摘要:** 基于某大型膜生物反应器(MBR)城市污水处理工程,开展了膜池脉冲曝气的应用与优化研究,旨在为该工程提供最优的曝气条件,并揭示不同曝气强度下膜池混合液特性与膜污染情况的变化规律。结果表明,当总曝气量由13 000 m<sup>3</sup>/h上升至17 000 m<sup>3</sup>/h时,膜比通量先上升后下降。曝气量的增大导致污泥混合液粒径减小,疏松的污泥胞外聚合物(LB-EPS)浓度下降,上清液有机物浓度上升,致使膜污染潜势上升。综合比较,该MBR工程膜池的最适曝气条件为中等曝气量(15 000 m<sup>3</sup>/h),在此工况条件下,膜池内组件的平均比通量达到0.95 L/(m<sup>2</sup>·h·kPa)。

**关键词:** 膜生物反应器; 脉冲曝气; 膜污染; 优化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0100-05

## Application and Optimization of Pulse Aeration in Large-scale Membrane Bioreactor

SUN Jian-yu<sup>1,2</sup>, LEI Ting<sup>3</sup>, LIANG Peng<sup>2</sup>, HUANG Xia<sup>2,3</sup>, LIU Wei<sup>4</sup>, CHEN Ying<sup>4</sup>,  
XUE Tao<sup>5</sup>, YU Kai-chang<sup>5</sup>

(1. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Research and Application Center for Membrane Technology, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Meicun Wastewater Treatment Plant, Wuxi Hi-Tech Water Co. Ltd., Wuxi 214112, China; 5. Beijing Origin Water Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China)

**Abstract:** Application and optimization of pulse aeration in membrane tanks were carried out in a large-scale membrane bioreactor (MBR) plant for municipal wastewater treatment, which aimed to determine the optimal aeration parameters for the project and to reveal the variation rule of the mixed liquid characteristics and membrane fouling under different aeration intensities. The specific membrane flux increased first and then decreased in the membrane tanks as the total aeration flow rate increased from 13 000 m<sup>3</sup>/h to 17 000 m<sup>3</sup>/h. The increase of aeration flow rate led to smaller particle size of the

sludge in mixed liquor, lower organic concentration in loosely bound extracellular polymeric substances (LB-EPS) on sludge and higher organic concentration in supernatant, resulted in higher membrane fouling potential of supernatant. By comprehensive comparison, the optimal aeration rate of the MBR membrane tank was medium aeration rate ( $15\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ ). Under the optimal condition, the average specific flux of the modules in the membrane tank reached  $0.95\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$ .

**Key words:** membrane bioreactor; pulse aeration; membrane fouling; optimization

膜生物反应器(MBR)是一种高效的污水处理与再生技术,并已广泛应用在大型城市污水处理工程中。然而,在实际工程中,为延缓或避免膜污染的发生,通常需要向膜池内鼓入大量空气,这使得整个污水处理工艺的运行能耗增加。据统计,国内大型MBR工程的运行能耗平均为 $0.4 \sim 0.6\ \text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,其中膜池能耗占全工艺流程的40%<sup>[1]</sup>。为了降低MBR的运行能耗,不少膜厂商和研究单位针对膜池曝气的优化开展了研究,提出了根据在线膜污染情况实时控制曝气量、循环曝气、间歇曝气、脉冲曝气等控制策略。例如GE公司提出了一种通过自控阀门切换,使几组曝气管按照一定的时间比例交替工作的曝气模式,从而在宏观上减少了曝气量。Koch、Siemens等公司则通过改进膜组件曝气系统结构,在无外加自控装置的情况下,实现膜池内的间歇曝气冲刷。碧水源公司则提出通过曝气管路和自控阀门的设置,实现膜池内高/低脉冲交替的曝气条件,以降低运行能耗<sup>[2]</sup>。从工程层面上看,脉冲曝气的实施显著降低了膜池运行的能耗,然而具体的脉冲曝气条件,尤其是在工程层面曝气量的选取,仍缺乏一定的依据。考虑到曝气条件可能同时影响膜表面水力状态和膜池污泥混合液理化性质,基于实际MBR工程,优化脉冲曝气的曝气量对于膜系统的稳定运行具有重要意义<sup>[3]</sup>。

笔者依托采用膜池脉冲曝气模式的某大型MBR城市污水处理工程,在MBR系统允许的曝气量范围内选取高、中、低3种曝气条件开展试验,跟踪3种条件下膜系统的运行情况及膜池混合液的理化性质,从而优选出适宜本MBR工程的曝气条件。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 工程概况

无锡市某MBR污水厂的处理规模为 $5 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ ,分两期建设,投产时间间隔为1年。该污水厂的进水包含城市污水和附近园区的工业废水,原水经三级格栅处理及曝气沉砂池后进入生化反应

段。生化反应段采用改良 $A^2/O$ -MBR工艺,其中膜分离单元设置了12个平行运行的膜池廊道,膜元件选用中国碧水源公司生产的带衬膜系列,膜组件构型为帘式中空纤维膜,膜标称孔径为 $0.20\ \mu\text{m}$ 。

该污水厂膜池采用脉冲曝气运行模式,具体实现方式和初步节能效果已有报道<sup>[2]</sup>。在本试验中,结合实际情况,将MBR膜池鼓风机输出的气体总流量分别设置为 $13\ 000$ 、 $15\ 000$ 和 $17\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ (分别代表低、中、高3个曝气强度)。膜池实际脉冲曝气形式的大、小强度之比均为 $2:1$ ,因此,实际脉冲曝气下的曝气强度分别为低强度 $24.5$ 和 $49.0\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、中强度 $28.3$ 和 $56.6\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、高强度 $32.1$ 和 $64.1\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。6月—8月,该MBR系统在不同曝气条件下运行至少1个月,在此时间段内该MBR工程所在地的月平均气温分别为 $24$ 、 $28$ 和 $27\ ^\circ\text{C}$ ,污泥混合液的平均温度分别为 $24.7$ 、 $25.2$ 和 $25.0\ ^\circ\text{C}$ ,变化幅度均较小;进水COD、氨氮、TN等主要污染物指标变化亦较小(月均值相差5%以内)。在MBR工程稳定运行后,选取投产时间间隔为1年的两个膜池,连续跟踪膜池的产水量、跨膜压差(TMP)。采集膜池混合液样品至少6次,用以分析混合液的理化性质。

### 1.2 MBR混合液理化性质表征

MBR混合液中有有机物性质的表征方式主要包括污泥胞外聚合物(EPS)和上清液有机物的浓度与组成。污泥EPS的提取采用NaCl溶液热提取法<sup>[4]</sup>,依次从悬浮相中提取疏松附着的EPS(LB-EPS)和紧密附着的EPS(TB-EPS)。通过对混合液进行离心、过滤分离获得上清液。

污泥LB-EPS和TB-EPS以及上清液均以TOC浓度代表宏观的有机物浓度水平,以多糖、蛋白质和腐殖质的浓度代表典型的三类微生物代谢产物浓度。多糖采用苯酚硫酸法测定,蛋白质和腐殖质采用离子交换预处理的改性Lowry法测定<sup>[5]</sup>。

MBR混合液的粒径分布通过激光粒度仪进行

表征。混合液摇匀后用塑料滴管吸取,并逐滴加入样品室中,直至系统的信号强度稳定于7%~13%。每个样品的测试时长均设置为60 s,重复测试3次,测试期间通过超声振动防止污泥絮体聚集,超声的级别设置为2级。

### 1.3 膜污染表征方法

MBR的膜污染特性分别针对实际膜污染情况和上清液污染潜势展开。对于实际膜污染情况,采用膜比通量作为表征指标,膜比通量定义为过滤通量与跨膜压差(TMP)的比值;对于上清液膜污染潜势,采用实验室搅拌型死端过滤杯的恒压过滤试验评价,获得污染潜势指数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同曝气条件下实际膜污染特征

3种曝气条件下,两个采样膜池的过滤比通量见图1。可以看出,在不同曝气条件下膜池1和膜池2之间存在系统偏差,这是由于膜池2投运时间更久,膜性能略有衰减所致。随着总曝气量的升高,两个采样膜池的过滤比通量均先上升后下降,在中等曝气强度下表现出相对最佳的过滤性能。曝气量从低强度升至中强度过程中,提升曝气量可以增大膜表面的剪切力,以改善气泡的擦洗效果;而从中强度升至高强度过程中,提升曝气量并未进一步改善膜池的过滤效果。在本试验所开展的时间范围内,该MBR工程所在地气温及混合液温度均未发生明显变化,膜系统也按照正常规程进行在线清洗维护。因此,在高曝气强度下膜污染情况的恶化可能是因为污泥混合液性质发生了变化(详见2.2节)。

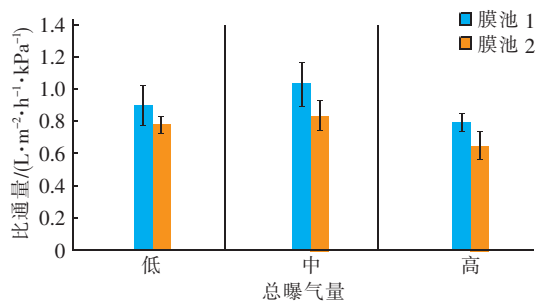


图1 不同曝气条件下膜池的过滤比通量

Fig.1 Specific membrane flux of MBR system under different aeration conditions

### 2.2 不同曝气条件下MBR混合液特征

#### 2.2.1 污泥混合液的粒径分布

不同曝气条件下 MBR 污泥混合液粒径分布结

果如图2所示。可以看出,随着曝气量的增加,混合液平均粒径、不同粒径尺寸指标均呈现明显的降低趋势,其中 $d_{90}$ 条件下,粒径尺寸降低幅度最为明显。这说明增大曝气量所提升的剪切和扰动效果会破碎粒径较大的污泥絮体,此效应对粒径超过 $60\mu\text{m}$ 的污泥絮体尤为明显。小粒径的污泥絮体受剪切力的作用相对更弱,由此将在一定程度上增加污泥絮体在膜表面聚集的可能性<sup>[6]</sup>。

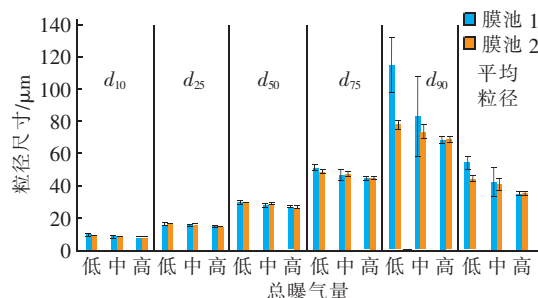


图2 不同曝气条件下 MBR 污泥混合液粒径分布结果

Fig.2 Particle size distribution of MBR mixed liquor under different aeration conditions

#### 2.2.2 EPS 有机物浓度及组成

不同曝气条件下,两个采样膜池污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 的有机物浓度及组成如图3所示。

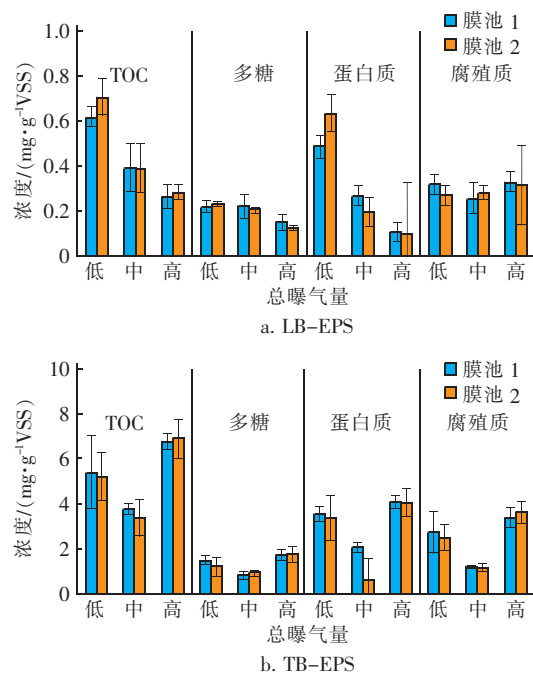


图3 不同曝气条件下混合液污泥 EPS 的有机物浓度及组成

Fig.3 Organic concentration and composition of EPS under different aeration conditions

从图3可以看出, LB-EPS 中有机物浓度随着

曝气量的增加呈下降趋势,这主要是由于LB-EPS中的多糖和蛋白质类物质浓度下降;而TB-EPS有机物浓度及组成与曝气强度的相关关系不明显。由于LB-EPS主要是相对远离微生物细胞的外层EPS,与细胞体的结合比较疏松,在高曝气强度下,LB-EPS中的有机物在高剪切力作用下会离开EPS而进入液相环境中,从而增加上清液中有机物的浓度<sup>[7]</sup>。此外,LB-EPS中降低的多糖和蛋白质类物质通常具有较高的膜污染潜势。因此,从LB-EPS中有机物性质对曝气强度改变的响应结果来看,增加曝气强度对于膜污染控制是不利的。

### 2.2.3 上清液有机物浓度及组成

不同曝气强度下,两个采样膜池上清液有机物浓度及组成如图4所示(图中纵坐标表示的浓度已折合成单位质量VSS的上清液有机物浓度)。可以看出,随着曝气量的增加,上清液TOC浓度明显增加。若以有机物在液相中的浓度计,膜池1和膜池2的上清液平均TOC浓度在低、中、高3个不同曝气强度下依次为4.8、6.7和11.9 mg/L。作为上清液中主要的有机物,多糖和蛋白质的浓度变化规律与TOC一致。在低、中、高3个曝气强度下,膜池1和膜池2中上清液多糖的平均浓度依次为1.77、2.58、4.09 mg/L,蛋白质的平均浓度依次为1.00、1.76和3.60 mg/L。MBR上清液TOC浓度的增加与前述LB-EPS性质的变化相对应,这表明高曝气强度对于微生物絮体的破碎将导致外层EPS中结合松散的有机物溶解于水中,并且主要是由于多糖和蛋白质类物质的溶解。

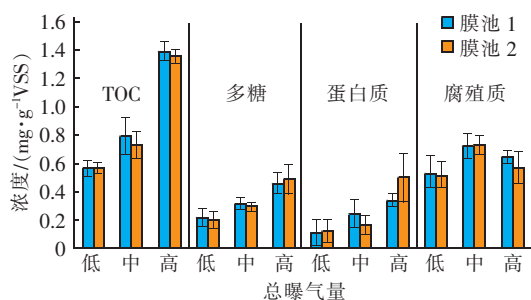


图4 不同曝气条件下膜池上清液有机物浓度及组成

Fig.4 Organic concentration and composition of supernatant under different aeration conditions

### 2.3 脉冲曝气条件对膜污染控制的影响

综上所述,在膜池中简单地提高曝气量并非总能获得理想的膜污染控制效果,曝气量的设置存在

最佳值。而受限于实际MBR工程运行波动、大型风机难以十分精细控制等客观因素,可选的工况条件十分有限。在本试验中,以2000 m<sup>3</sup>/h为间隔选取的3个曝气量基本覆盖了从膜供应商建议的最低曝气量到膜池鼓风机组的最大输出量。需要说明的是,由于本试验依托的MBR工程对于主要污染物的去除均由膜池之前的生化反应段完成,膜池曝气量对污染物去除的贡献并不显著,因此在3种曝气条件下,污染物去除效果差别不明显,但出水水质均可以稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

在不同曝气条件下,中等曝气强度时MBR系统的运行效果最佳,在此条件下,全流程中处理单位体积水的运行能耗为(0.44±0.5) kW·h/m<sup>3</sup>。对于低曝气强度(13000 m<sup>3</sup>/h),虽然平均运行能耗可以进一步降低至(0.41±0.3) kW·h/m<sup>3</sup>,但是即使在脉冲曝气的高曝气阶段,膜池的曝气量也只有1850 m<sup>3</sup>/h,折合到单位膜箱投影面积上的曝气强度为50 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),仍然低于一般的中空纤维帘式膜组器对曝气量的设计要求,即使上清液的污染潜势相对最低(见图5),但仍在实际运行中表现出不佳的运行效果。而在高曝气强度下平均能耗更高,可达到(0.48±0.3) kW·h/m<sup>3</sup>。而且由于污泥絮体在高曝气强度下更容易发生破碎,上清液有机物浓度明显增加,致使上清液的膜污染潜势增大,亦不利于膜污染控制。

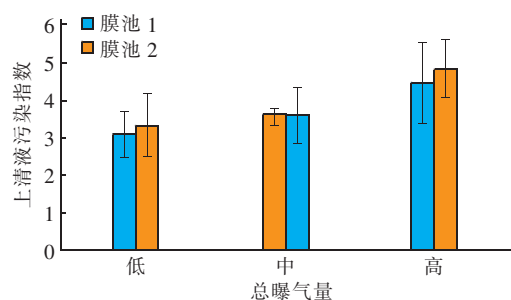


图5 不同曝气条件下膜池上清液的膜污染潜势

Fig.5 Membrane fouling potential of MBR supernatant under different aeration conditions

## 3 结论

随曝气量的增加,膜池污泥混合液粒径减小,污泥LB-EPS有机物浓度降低,上清液有机物浓度升高,其中多糖和蛋白质类物质的变化较为明显;随着曝气量的增加,膜池上清液的膜污染潜势呈上升趋势。



势;中等曝气量(15 000 m<sup>3</sup>/h)是本 MBR 工程实际运行时的最适曝气量。

#### 参考文献:

- [1] 黄霞,肖康,许颖,等. 膜生物反应器污水处理技术在我国的应用现状[J]. 生物产业技术,2015(3): 9-14.  
HUANG Xia, XIAO Kang, XU Ying, *et al.* Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China[J]. Biotechnology & Business, 2015 (3): 9-14 (in Chinese).
- [2] 朱彩琴,周味贤,矫甘来. 脉冲曝气在污水处理工艺中的节能应用[J]. 中国给水排水,2013,29(2): 95-98.  
ZHU Caiqin, ZHOU Weixian, JIAO Ganlai. Application of pulse aeration to energy saving in sewage treatment industry[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(2): 95-98 (in Chinese).
- [3] TRUSSELL R S, MERLO R P, HERMANOWICZ S W, *et al.* Influence of mixed liquor properties and aeration intensity on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor at high mixed liquor suspended solids concentrations[J]. Water Research, 2007, 41(5): 947-958.
- [4] LI X Y, YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. Water Research, 2007, 41(5): 1022-1030.
- [5] SHEN Y X, XIAO K, LIANG P, *et al.* Improvement on the modified Lowry method against interference of divalent cations in soluble protein measurement [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(9): 4167-4178.
- [6] LIN H J, LIAO B Q, CHEN J R, *et al.* New insights into membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor based on characterization of cake sludge and bulk sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2373-2379.
- [7] MENNITI A, KANG S, ELIMELECH M, *et al.* Influence of shear on the production of extracellular polymeric substances in membrane bioreactors [J]. Water Research, 2009, 43(17): 4305-4315.
- 作者简介:孙剑宇(1989-),男,北京人,博士,工程师,主要从事膜法水处理技术研究。  
E-mail: jianyu. sun@chnenergy. com. cn  
收稿日期:2019-11-06  
修回日期:2020-01-20  
(编辑:任莹莹)
- (上接第99页)
- 碱,2007(11): 13-16.  
CUI Xiaoming. Production, application and market prospect of hydrazine hydrate[J]. China Chlor-Alkali, 2007(11): 13-16 (in Chinese).
- [2] 唐丽,朱桂生,彭粉成. 酮连氮合成水合肼生产废水 COD 处理技术的研究[J]. 山东化工,2017,46(24): 187-189.  
TANG Li, ZHU Guisheng, PENG Fencheng. Study on COD treatment technology of waste water from hydrazine hydrate production by ketazine synthesis[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(24): 187-189 (in Chinese).
- [3] 陶建军. 水合肼及其应用[J]. 中国氯碱,2006(11): 30-33.  
TAO Jianjun. Hydrazine hydrate and its application[J]. China Chlor-Alkali, 2006(11): 30-33 (in Chinese).
- [4] 沈东放,马敬环,刘莹,等. 纳滤膜处理水合肼生产废水及膜污染机理研究[J]. 水处理技术,2018,44(7): 54-57.  
SHEN Dongfang, MA Jinghuan, LIU Ying, *et al.* Hydrazine hydrate production wastewater treatment by nanofiltration membrane and membrane fouling mechanism research[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(7): 54-57 (in Chinese).
- [5] 郑春华,耿安锋,李金国. 碱度对生物脱氮工艺的影响及其调控[J]. 中国给水排水,2017,33(10): 34-36.  
ZHENG Chunhua, GENG Anfeng, LI Jinguo. Role and control of alkalinity in the process for biological nitrogen removal[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10): 34-36 (in Chinese).
- 作者简介:胡帆(1987-),女,湖北武汉人,硕士,工程师,主要从事工业废水及市政污水处理设计及施工管理。  
E-mail: 284501103@qq. com  
收稿日期:2020-06-08  
修回日期:2020-12-29  
(编辑:任莹莹)