

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.003

# MBR精准曝气控制系统开发与节能效果验证

王浩<sup>1,2</sup>, 刘国梁<sup>1,2</sup>, 常江<sup>1,2</sup>, 张志强<sup>1,2</sup>, 李彤<sup>1,2</sup>,  
韩建润<sup>1,2</sup>, 韩军<sup>1,2</sup>, 孙观来<sup>3</sup>, 邱浩然<sup>1,2</sup>

(1. 北京市污水资源化工程技术研究中心, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124; 3. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 高能耗限制了膜生物反应器(MBR)的广泛应用,通过精准调控实现MBR的节能降耗是未来的发展趋势。为此,建立了一套MBR精准曝气控制系统,采用箱线图法和 $3\sigma$ 统计算法对原始数据集进行异常值监测,基于最小二乘法建立曝气量与透水率之间的多元非线性回归模型。结果表明,采用清洗算法能够去除25%的异常值从而保证数据质量;数学模型对数据的拟合效果良好,决定系数 $R^2>0.99$ 。MBR精准曝气控制系统在不同条件下对膜单元透水率的控制效果稳定,节能效果显著。相比于传统曝气控制,平板膜和中空纤维膜在精准曝气控制方式下,膜单元曝气量分别降低20.0%和21.4%,曝气能耗分别降低8.2%和19.0%。传统与精准控制方式下的膜产水水质均稳定达标,MBR精准曝气控制系统不会对膜出水水质产生影响。

**关键词:** 膜生物反应器; 精准曝气控制系统; 数学模型; 能耗; 产水水质

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0013-06

## Development of MBR Precise Aeration Control System and Its Energy-saving Effect

WANG Hao<sup>1,2</sup>, LIU Guo-liang<sup>1,2</sup>, CHANG Jiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, LI Tong<sup>1,2</sup>,  
HAN Jian-run<sup>1,2</sup>, HAN Jun<sup>1,2</sup>, SUN Guan-lai<sup>3</sup>, QIU Hao-ran<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center for Wastewater Reuse, Beijing 100124, China;  
2. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100124, China; 3. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** The high energy consumption limits the widespread application of membrane bioreactor (MBR), and it is the future development trend of MBR to realize energy conservation and consumption reduction through precise regulation. In this study, a set of MBR precise aeration control system was established. The box plot method and  $3\sigma$  statistical method were used to monitor outliers on the original data set, and a multivariate nonlinear regression model between aeration volume and water permeability was established based on least square method. The results showed that the cleaning algorithm could remove 25% of outliers to ensure data quality. The mathematical model fitted the data well, and the coefficient of determination  $R^2$  was greater than 0.99. MBR precise aeration control system had stable control effect on membrane unit permeability under different conditions, and significant energy-saving effect. Compared with the traditional aeration control mode, the aeration of the membrane unit for flat membrane and hollow fiber membrane decreased by 20.0% and 21.4%, and energy consumption decreased by 8.2% and 19.0%, respectively. The effluent quality under the traditional and precise control

was stable and up to standard, and the precise aeration control system would not affect the effluent quality.

**Key words:** membrane bioreactor; precise aeration control system; mathematical model; energy consumption; effluent quality

相比于传统污水处理技术,膜生物反应器(MBR)具有处理效果受进水水质波动影响小、占地面积少、能够截留微生物、产水浊度低等优点<sup>[1-4]</sup>,但高能耗限制了其广泛应用。万吨级MBR污水处理厂的能耗大约为 $0.556 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,而普通A<sup>2</sup>O工艺的能耗为 $0.15\sim 0.4 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,氧化沟工艺的能耗在 $0.269 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 左右<sup>[5-6]</sup>,MBR的运行能耗远高于传统污水处理工艺。据报道MBR曝气能耗占总系统能耗的50%以上,其中膜组器的曝气冲刷能耗占到总系统能耗的30%以上<sup>[7]</sup>,因此曝气单元是污水厂节能潜力最大的系统之一。

通过精准调控实现MBR的节能降耗是未来的发展趋势<sup>[8-9]</sup>。MBR曝气能耗的调节包括生化池和膜池曝气控制。生化池曝气控制方法主要包括前馈模式、反馈模式以及前馈和反馈的耦合模式。前馈模式包括进水量-曝气量和水质-曝气量控制模式;反馈模式包括DO-曝气量、氨氮-曝气量、生物池耗氧速率-曝气量和氨氮-DO-曝气量两阶串级控制模式。采用生化池曝气控制系统能够有效节省鼓风机能耗13%~30%<sup>[10-11]</sup>。膜池曝气控制主要包括:①根据模型计算一定曝气量下,能耗最低的风机设定转速与风机开启数量的运行策略;②根据

跨膜压差采用不同梯度的曝气量进行控制。该方法能够节省鼓风机能耗13%~16%<sup>[12-13]</sup>。

膜分离是一个复杂的动态过程,涉及众多的影响因素以及过程参数,很难用准确的数学关系式去描述,缺乏一套MBR精准控制的理论体系,目前针对MBR膜单元曝气控制的研究未能将实时膜污染程度与曝气量联系在一起,并且大部分研究还停留在实验室小试阶段。因此,基于实际MBR运行过程,开展MBR膜池曝气的精准控制,对于深入了解并指导实际MBR工程运行具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与理化分析

MBR中试设备工艺流程见图1,设计规模为 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ ,进水为某再生水厂初沉池出水。采用平板膜和中空纤维膜两种膜组器进行试验。其中,平板膜孔径为 $0.15 \mu\text{m}$ ,膜片数量为220片,膜总面积为 $22 \text{ m}^2$ ;中空纤维膜孔径为 $0.06 \mu\text{m}$ ,膜片数量为8片,膜总面积为 $200 \text{ m}^2$ 。MBR总池容为 $40 \text{ m}^3$ ,厌氧区、缺氧区、好氧区和膜池的池容分配为1:3.2:4.2:1.5。膜产水开停比为8 min:2 min。采用次氯酸钠进行维护性化学清洗。COD采用快速消解分光光度法测定, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 采用纳氏试剂比色法测定。

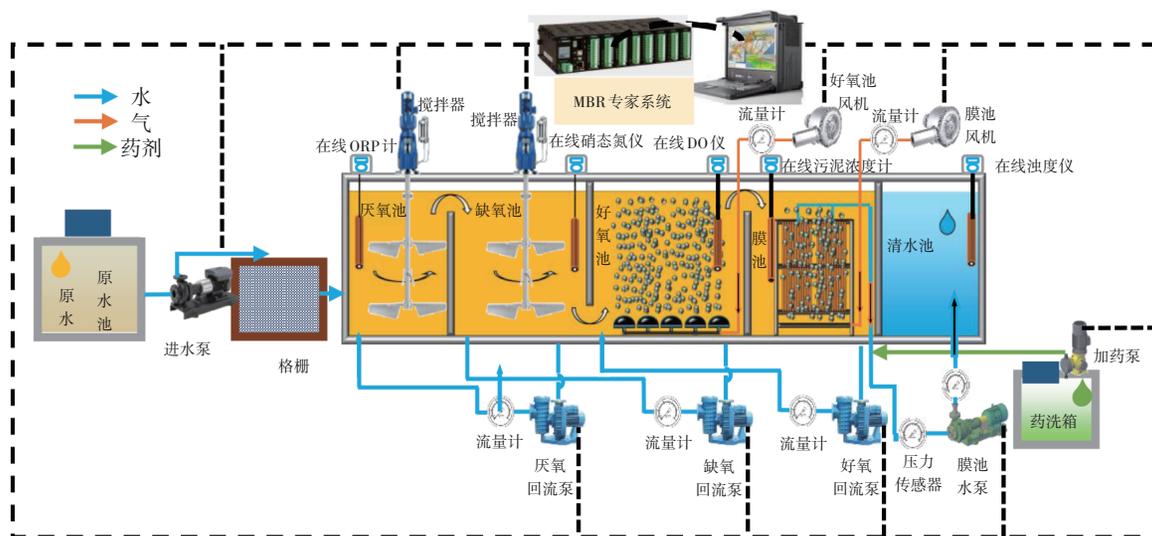


图1 MBR中试工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of the pilot-scale MBR

## 1.2 精准曝气控制系统

MBR精准曝气控制系统如图2所示。具体控制方法如下:首先采集MBR运行的过程数据(包括膜单元的产水流量、曝气流量和跨膜压差),并通过数据清洗模块去除异常数据;然后将过滤后的数据作为模型的输入,模型计算输出膜单元的实时曝气量;最后将计算后的曝气量导入PLC系统,采用PID控制方法控制鼓风机变频器的输出频率,从而实现风机流量的控制。

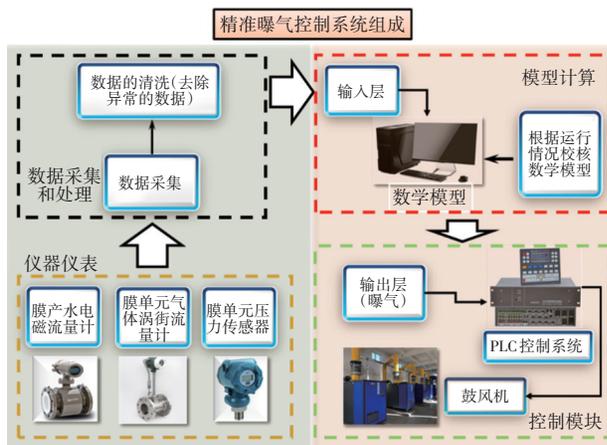


图2 MBR精准曝气控制方法

Fig.2 Precise aeration control method for MBR

### 1.2.1 数据采集和处理模块

数据清洗过程分为以下4个步骤:①剔除膜单元不产水时间的数据(松弛时间和洗膜时间);②根据设定的时间范围,从膜单元数据库查询数据,并进行排序;③使用箱线图对非正态分布数据进行异常数据清洗,筛选后的数据进入下一个清洗程序;④使用 $3\sigma$ 统计算法(标准偏差三倍法)对异常数据进行清洗,清洗后的数据进入最终的计算程序。

采用该清洗算法能够有效去除原始数据中的异常数据,例如采用该方法处理透水率数据,可使数据量由1697条减少至1277条,清洗掉25%的无效数据,清洗效果显著,有效保证了模型输入数据的准确性和计算结果质量,使MBR膜单元曝气控制更加准确。

### 1.2.2 数学模型

精准曝气控制的原理是通过控制变量透水率斜率比( $S_R$ )计算膜单元的曝气量,斜率比计算公式如下:

$$S_R = \frac{S_S}{S_L} \quad (1)$$

式中: $S_S$ 为短周期的透水率斜率; $S_L$ 为长周期的透水率斜率。

MBR透水率计算公式为:

$$S = \frac{F}{TMP} \quad (2)$$

式中: $F$ 为产水通量, $L/(m^2 \cdot h)$ ;  $S$ 为透水率, $L/(m^2 \cdot h \cdot kPa)$ ;  $TMP$ 为跨膜压差, $kPa$ 。

斜率的变化分为4个部分:①长周期透水率斜率下降,而短周期透水率斜率上升;②长周期透水率斜率下降,而短周期透水率斜率略微上升或者下降;③长周期透水率斜率上升,短周期透水率斜率上升或者略微下降;④长周期透水率斜率上升,而短周期透水率斜率下降。当出现条件①、③和④时说明MBR的运行情况较好,可以适当降低膜池曝气量;当出现条件②时说明MBR的运行情况较差,需要适当增加曝气量。斜率比作为控制变量,可根据它的变化对膜池曝气量进行实时调整<sup>[8,14]</sup>。

由于文献中透水率斜率与曝气量变化量之间的定量关系为间断函数,数据之间间断的范围较大,输出的曝气量不准确,并且不同地区不同水厂的MBR系统,因气候环境和水质差异,斜率比与曝气量变化量之间的关系也会有一定的变化。为此,建立了曝气量变化量与斜率比之间的数学关系式,根据斜率比的变化通过模型计算输出曝气量的准确数值,并且能够通过改变模型参数校正数学模型,以适应不同的运行条件。采用最小二乘法对实测数据进行非线性拟合,得到曝气量变化量( $A_{fs}$ )与斜率比( $S_R$ )变化之间的数学关系式。

当 $S_L < 0$ 时关系式为:

$$A_{fs} = 0.0001S_R^6 + 0.0039S_R^5 - 0.0244S_R^4 - 0.0248S_R^3 + 0.2298S_R^2 + 0.9767S_R - 1.1387 \quad (3)$$

当 $S_L > 0$ 时关系式为:

$$A_{fs} = -0.0089S_R^3 - 0.6486S_R^2 - 1.2523S_R - 0.4793 \quad (4)$$

鼓风机曝气量( $A_m$ )的计算公式如下:

$$A_m = A_b \cdot \frac{100 + k \cdot A_{fs}}{100} \quad (5)$$

式中: $A_b$ 为初始曝气量, $m^3/h$ ;  $k$ 为曝气量变化系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 数学模型的适用性

采用公式(3)和(4)对试验数据进行模拟,结果

见图 3。拟合度(即决定系数  $R^2$ )分别为 0.996 1 和 0.995 8,表明其能够很好地描述实测数据的变化,说明所建立的曝气量变化的数学模型准确可靠<sup>[15]</sup>。

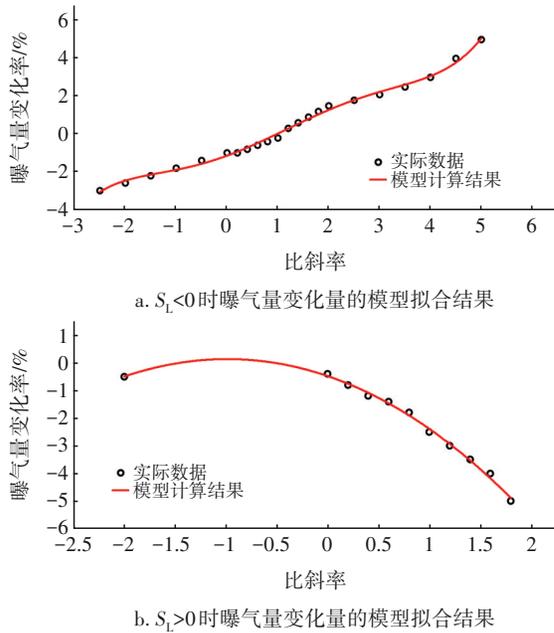


图 3 模型计算数据与实际数据的比较

Fig.3 Comparison of model calculated values with actual values

## 2.2 中试运行效果

### 2.2.1 平板膜中试运行效果

传统曝气控制方式下,MBR膜单元的平均透水率和透水率衰减速率分别为  $0.77 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$  和  $0.0031 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^2 \cdot \text{kPa})$ ;精准曝气控制方式下,膜单元的平均透水率和透水率衰减速率分别为  $0.70 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$  和  $0.0037 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^2 \cdot \text{kPa})$ 。与传统曝气控制方式相比,精准曝气控制方式下膜单元的平均透水率降低了 9.1%,透水率衰减速率增加了 19.4%。整个运行过程中,采用精准曝气控制方式对膜单元透水率的控制效果稳定(见图 4)。其中,在运行通量分别为 10、13 和  $18 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  三种运行模式下,传统曝气控制方式的平均透水率和透水率衰减速率分别为  $0.72 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$  和  $0.0031 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^2 \cdot \text{kPa})$ ,精准曝气控制方式的分别为  $0.80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$  和  $0.0028 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^2 \cdot \text{kPa})$ ,在环境温度稳定的条件下,精准曝气控制方式下的 MBR 系统运行稳定,与传统曝气控制方式相比,平均透水率提高了 11.1%,透水率衰减速率降低了 9.7%。在运行通量为  $21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的条件下,相比于传统曝气控制方

式,由于温度降低造成污水黏度和 EPS 含量增加以及微生物群落的变化,导致膜单元透水率降低<sup>[16]</sup>。

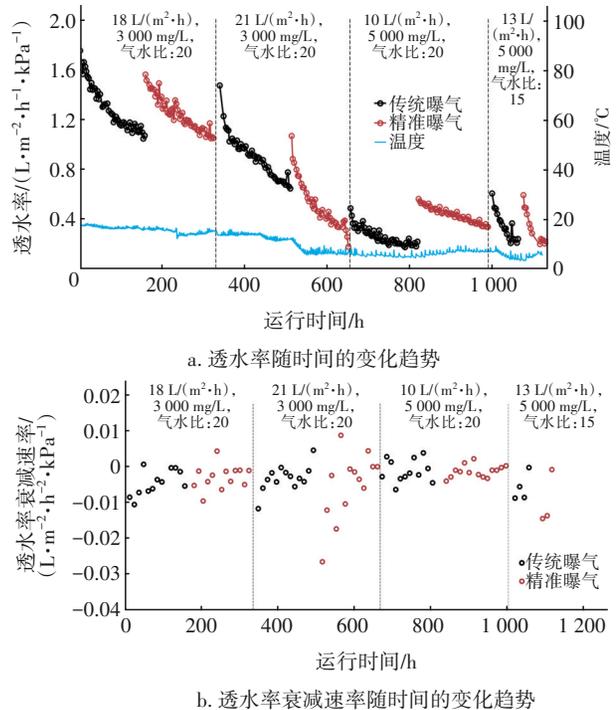
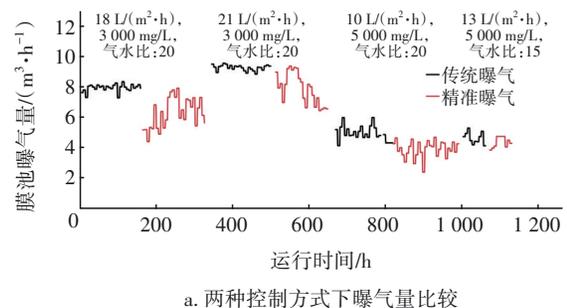
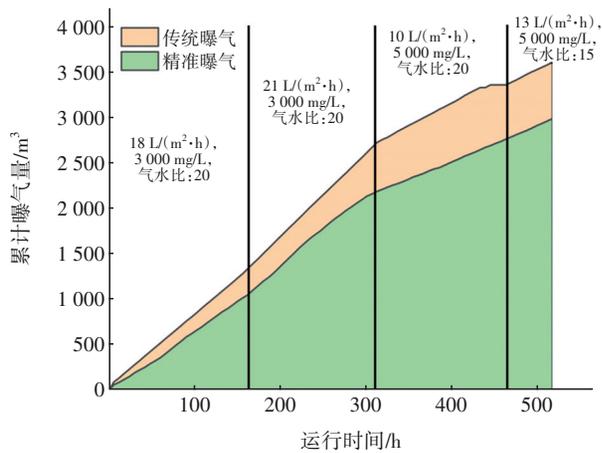


图 4 传统与精准曝气条件下透水率的衰减趋势  
Fig.4 Attenuation trend of permeability under conventional and precise aeration conditions

精准曝气系统能够在不影响透水率衰减趋势的前提下,根据透水率衰减速率的变化,实时调整膜池的曝气,提供合适的曝气量。中试结果表明,在 4 种通量条件下,传统曝气与精准曝气两种控制方式下曝气量的平均值分别为 7.90、9.22、4.98、 $4.61 \text{ m}^3/\text{h}$  和 6.24、7.83、3.88、 $4.34 \text{ m}^3/\text{h}$ ,能够分别节省 21.0%、15.1%、22.2% 和 5.9%,平均节省曝气量 20.0%,要高于国外文献的报道<sup>[8,17]</sup>。传统曝气与精准曝气两种控制方式下膜池的曝气能耗分别为  $4.64$ 、 $4.26 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{d}$ ,曝气能耗降低了 8.2%(如图 5 所示)。





b. 两种控制方式下累计曝气量比较

图5 传统与精准曝气的曝气量对比

Fig.5 Comparison of aeration volume between conventional and precise aeration conditions

### 2.2.2 中空纤维膜中试运行效果

在污泥浓度为9 411 mg/L、气水比为15条件下,传统曝气控制方式下MBR膜单元平均透水率和透水率衰减速率分别为1.42 L/(m<sup>2</sup>·h·kPa)和0.000 33 L/(m<sup>2</sup>·h<sup>2</sup>·kPa),精准曝气控制方式下膜单元平均透水率和透水率衰减速率分别为1.54 L/(m<sup>2</sup>·h·kPa)和0.000 24 L/(m<sup>2</sup>·h<sup>2</sup>·kPa),与传统曝气控制方式相比,精准曝气控制方式下膜单元的平均透水率提高了8.5%,透水率衰减速率减少了27.3%。在中空纤维膜MBR的运行过程中,采用精准曝气控制方式对透水率的控制效果更加稳定。

与此同时,传统曝气模式下平均曝气量为44.02 m<sup>3</sup>/h,精准曝气模式下平均曝气量为34.58 m<sup>3</sup>/h,曝气量降低了21.4%;传统曝气和精准曝气模式下的耗电量分别为43.75、35.42 kW·h/d,曝气能耗降低了19.0%。

### 2.3 精准曝气对膜产水水质的影响

两种曝气控制方式下,对COD和氨氮的去除效果对比见图6。在传统曝气控制条件下,系统进水COD、氨氮平均值分别为257.34、31.01 mg/L,膜产水COD、氨氮平均值分别为17.92、0.22 mg/L,对COD和氨氮的平均去除率分别为93.04%和99.31%;在精准曝气控制条件下,系统进水COD、氨氮平均值分别为204.04、28.41 mg/L,膜产水COD、氨氮平均值分别为17.78、0.24 mg/L,对COD和氨氮的平均去除率分别为91.28%和99.17%。两种控制条件下MBR产水水质相近,且均能够达到《城

镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)中B标准的要求。因此,精准曝气控制不会对MBR系统出水水质产生影响。

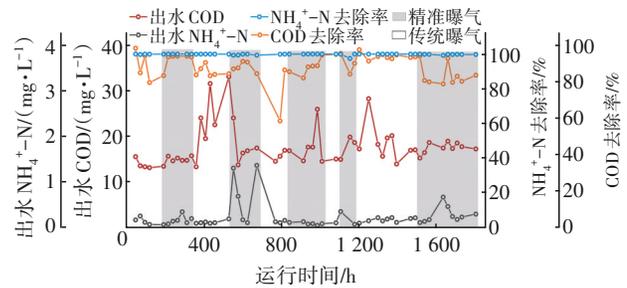


图6 MBR出水水质及去除率

Fig.6 MBR effluent quality and removal rate

## 3 结论

① 针对高能耗以及动态曝气控制的难题,建立了一套MBR精准曝气控制系统,它首先采用箱线图 and 3 $\sigma$  统计算法去除原始数据集中25%的异常数据,有效保证模型输入数据的准确性。采用最小二乘法建立曝气量与透水率之间的多元非线性回归模型,数学模型准确可靠, $R^2$ 均在0.99以上。

② MBR精准曝气控制系统在不同条件下对膜单元透水率的控制效果稳定且节能效果显著。平板膜在传统曝气和精准控制条件下的透水率衰减速率分别为0.003 1和0.003 7 L/(m<sup>2</sup>·h<sup>2</sup>·kPa),中空纤维膜分别为0.000 33和0.000 24 L/(m<sup>2</sup>·h<sup>2</sup>·kPa)。相比于传统曝气控制,平板膜在精准曝气控制方式下的曝气量降低20.0%,曝气能耗降低8.2%,中空纤维膜则分别降低了21.4%和19.0%。

③ 精准曝气控制不会对MBR系统出水水质产生影响。传统控制条件下出水COD和氨氮浓度以及它们的去除率平均值分别为17.92 mg/L、0.22 mg/L、93.04%和99.31%,精准控制条件下的分别为17.78 mg/L、0.24 mg/L、91.28%和99.17%。

### 参考文献:

- [1] 黄霞,文湘华. 膜法水处理工艺膜污染机理与控制技术[M]. 北京: 科学出版社,2016.  
HUANG Xia, WEN Xianghua. Mechanism and Control Technology of Membrane Pollution in Membrane Water Treatment Process [M]. Beijing: Science Press, 2016 (in Chinese).
- [2] CHIEMCHAI SRI C, YAMAMOTO K. Performance of membrane separation bioreactor at various temperatures

- for domestic wastewater treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 1994, 87(1/2): 119-129.
- [ 3 ] KRAUME M, DREWS A. Membrane bioreactors in waste water treatment—status and trends [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2010, 33(8): 1251-1259.
- [ 4 ] WANG Z W, WU Z C. A review of membrane fouling in MBRs: characteristics and role of sludge cake formed on membrane surfaces [J]. *Separation Science and Technology*, 2009, 44(15): 3571-3596.
- [ 5 ] 徐荣乐, 樊耀波, 张晴, 等. A<sup>2</sup>O-MBR 研究与应用进展 [J]. *膜科学与技术*, 2013, 33(6): 111-118.  
XU Rongle, FAN Yaobo, ZHANG Qing, *et al.* Recent progress in the development and application of A<sup>2</sup>O-MBR [J]. *Membrane Science and Technology*, 2013, 33(6): 111-118 (in Chinese).
- [ 6 ] 孙剑宇. 膜生物反应器城市污水处理工艺优化运行与节能降耗研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.  
SUN Jianyu. *Energy Saving and Operation Optimization of Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [ 7 ] 王琦, 樊耀波. 膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析 [J]. *膜科学与技术*, 2012, 32(3): 95-102.  
WANG Qi, FAN Yaobo. Analysis of energy consumption in membrane bioreactors for wastewater treatment and reuse [J]. *Membrane Science and Technology*, 2012, 32(3): 95-102 (in Chinese).
- [ 8 ] KEENE N A, REUSSER S R, SCARBOROUGH M J, *et al.* Pilot plant demonstration of stable and efficient high rate biological nutrient removal with low dissolved oxygen conditions [J]. *Water Research*, 2017, 121(15): 72-85.
- [ 9 ] MACINTOSH C, ASTALS S, SEMBERA C, *et al.* Successful strategies for increasing energy self-sufficiency at Grüneck Wastewater Treatment Plant in Germany by food waste co-digestion and improved aeration [J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 797-808.
- [ 10 ] SUN J Y, LIANG P, YAN X X. Reducing aeration energy consumption in a large-scale membrane bioreactor: process simulation and engineering application [J]. *Water Research*, 2016, 93: 205-213.
- [ 11 ] 胡田力, 邱叶林, 韩宝平. 基于 AAO 工艺的智能曝气系统设计与调试 [J]. *净水技术*, 2020, 39(10): 37-42.
- HU Tianli, QIU Yelin, HAN Baoping. Design and debugging of intelligent aeration system based on AAO process [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(10): 37-42 (in Chinese).
- [ 12 ] MONCLÚS H, DALMAU M, GABARRÓN S, *et al.* Full-scale validation of an air scour control system for energy savings in membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2015, 79: 1-9.
- [ 13 ] 黄文佳, 赵国清, 张荣兵, 等. 基于拉格朗日乘数法的 MBR 膜池鼓风机曝气系统优化控制 [J]. *给水排水*, 2021, 47(3): 61-67.  
HUANG Wenjia, ZHAO Guoqing, ZHANG Rongbing, *et al.* Study on optimization control of MBR aeration system based on Lagrange multiplier method [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(3): 61-67 (in Chinese).
- [ 14 ] FERRERO G, MONCLUS H, BUTTIGLIERI G, *et al.* Development of a control algorithm for air-scour reduction in membrane bioreactors for wastewater treatment [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2011, 86: 784-789.
- [ 15 ] GUO Y Y, WANG Z, MA Y, *et al.* A new composite model of the membrane cleaning for predicting the fouling resistance in the hydraulic cleaning process [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 602: 117957.
- [ 16 ] 张凯, 夏星星, 孙欣, 等. 温度对 AO-MBR 运行效果及微生物菌群的影响 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(13): 107-111.  
ZHANG Kai, XIA Xingxing, SUN Xin, *et al.* Effect of temperature on performance and microbial community of AO-MBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(13): 107-111 (in Chinese).
- [ 17 ] FERRERO G, MONCLÚS H, BUTTIGLIERI G, *et al.* Automatic control system for energy optimization in membrane bioreactors [J]. *Desalination*, 2011, 268: 276-280.

作者简介: 王浩(1992- ), 男, 河北邢台人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为膜法水处理技术。

E-mail: WanghaoBeyondbjut@163.com

收稿日期: 2023-11-22

修回日期: 2024-01-31

(编辑: 李德强)