

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-924-05

# 基于 A/O-MBR 工艺的黑水处理试验研究

杨 晓<sup>1</sup> 毕海权<sup>1</sup> 潘国峰<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 成都 610031;

2. 广东迦南通用设备有限公司 佛山 528000)

**【摘要】** 针对 A/O 工艺(厌氧好氧工艺)处理黑水结果不达标的问题,将 A/O 工艺与 MBR 工艺(膜生物反应器)进行组合,形成了 A/O-MBR 工艺(厌氧好氧-膜生物反应器组合工艺),为了明确 A/O-MBR 工艺对黑水中主要污染物的去除效果以及运行时的控制模式,搭建了全尺寸试验系统并进行了黑水处理试验。结果表明:在间歇曝气以及间歇回流的运行模式下,A/O-MBR 工艺对黑水中的 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 去除率都达到了 90%以上,对悬浮物以及粪大肠菌群的去除率都达到了 99%以上,都达到了一级 A 标准;但出水 TP 的去除率为 76%,仍需辅以化学处理。间歇曝气以及间歇回流的 A/O-MBR 工艺可以有效提高黑水中污染物的去除率,适合用于处理黑水。

**【关键词】** 黑水; A/O-MBR 工艺; 间歇曝气; 间歇回流; 污染物  
中图分类号 X703 文献标识码 A

## Experimental Study on Blackwater Treatment Based on A/O-MBR Process

Yang Xiao<sup>1</sup> Bi Haiquan<sup>1</sup> Pan Guofeng<sup>2</sup>

(1.Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2.Guangdong Cnaan General Equipment Co., Foshan, 528000)

**【Abstract】** Aiming at the problem that A/O process(anaerobic and aerobic process) is not up to standard in treating blackwater, The A/O process and the MBR(membrane bioreactor) process are combined to form the A/O-MBR process (anaerobic/aerobic-membrane bioreactor combination process), in order to clarify the effect of the A/O-MBR process on the removal of major pollutants in the blackwater and the control mode during operation, A full-scale test system was built and the black water treatment test was carried out. The results show that, under the operation mode of intermittent aeration and intermittent reflux, the removal rates of COD, NH<sub>3</sub>-N and TN in black water by A/O-MBR process reach more than 90%. The removal rate of suspended matter and fecal coliform bacteria reached more than 99%, which reached the Grade A standard. However, the removal rate of TP was 76%. It still needs to be treated with chemicals. Intermittent aeration and intermittent reflux A/O-MBR process can effectively improve the removal rate of pollutants in black water, which is suitable for treating blackwater.

**【Keywords】** blackwater; A/O-MBR process; intermittent aeration; intermittent reflux; contaminant

## 0 引言

黑水指包括人类粪便、尿液、冲厕以及洗手用水的污水<sup>[1]</sup>。与城市污水相比,黑水有机污染物浓度高,氮磷浓度高,而且含有大量的病原体微生物,

未经处理的黑水直接排放不仅会引起土壤和水资源污染,还会滋生传染病,包括近年来肆虐的新型冠状肺炎。

元素分析表明,黑水中占了生活污水 80%~

作者简介: 杨 晓 (1997.10-), 男, 硕士研究生, E-mail: aerodynamicnoise@163.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士研究生, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2022-08-05

90%的氮和 50~57%的磷<sup>[2]</sup>, 当黑水与其余生活污水混流处理时, 会消耗大量资源。因此, 按照依照生态卫生理念中的“闭环理论”, 黑水应当与厨房浴室盥洗污水、雨水等其他生活污水分离、单独收集并处理, 从而减少污水处理过程中的能源消耗并实现资源再生。有国外学者对 32 个住宅的黑水分别进行真空集输和厌氧处理后, 可分别保留 7.6g 氮和 0.63g 磷每天<sup>[3]</sup>, 黑水资源回收在实践层面是可行的。

目前黑水处理最常用的污水处理工艺为 A/O 工艺, A/O 工艺法也叫厌氧好氧工艺法, A (naerobic) 厌氧段, 用于脱氮除磷; O (Oxic) 是好氧段, 用于除去水中的有机污染物, 其主要流程如图 1 所示, A/O 工艺法流程简单, 管理方便, 但是其沉淀池效果不稳定, 颗粒类污染物不能完全沉淀, 导致出水往往达不到国家标准, 不适用于高氮以及高磷的黑水处理。蔡英英<sup>[4]</sup>等人利用 A/O 工艺处理猪场废水, 该类废水含有高浓度有机物、氮、磷和致病性微生物等, 与黑水具有相似性, 但对氨氮和总氮的去除率分别只有 50%和 30%左右, 总磷的去除率也只有 26%, 远远达不到排放标准; 同样地, 牛明芬<sup>[5]</sup>在处理猪场废水时也选择了 A/O 工艺, 最好的情况下, 总氮去除率也仅有 60%。实践表明, 单纯的 A/O 工艺在处理高浓度污水时, 氮磷去除率偏低。

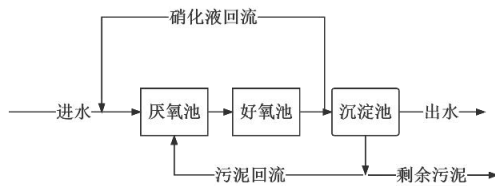


图 1 A/O 工艺流程图

Fig.1 A/O process flow chart

为了提高黑水处理的效率, 本文基于 A/O 工艺, 用 MBR (膜生物反应器, 膜池) 代替了 A/O 工艺中的沉淀池, 形成了 A/O-MBR 工艺厌氧好氧-膜生物反应器组合工艺, 其流程如图 2 所示。

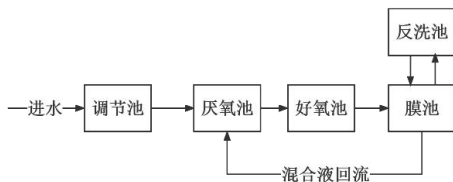


图 2 A/O-MBR 工艺流程图

Fig.2 A/O-MBR process flow chart

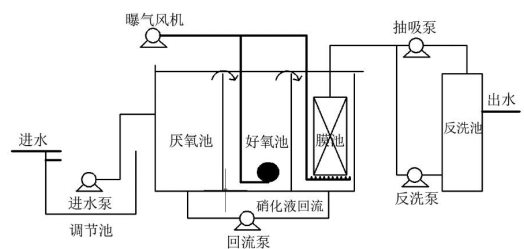
膜生物反应器 (MBR) 是一种高效的过滤膜技术, 与沉淀池相比, 膜组件的高效截留作用能实现良好的泥水分离, 因此膜组件对悬浮物、对难降解有机物以及病原体有较好的截留作用, 大大提高了污水去除效率。除此之外, 过滤作用将活性污泥完全截留在反应池内, 使有关微生物能够最大限度的增长繁殖, 因此世代时间较长的硝化及亚硝化细菌也得到很好的增长, 大大增加了吸附和降解污染物的能力。反应池内较高的生物浓度, 能够适应水质及水量变化所带来的负荷冲击。

理论上 A/O+MBR 工艺适用于黑水处理, 为了验证 A/O+MBR 工艺对黑水中主要污染物的去除效果, 以及处理黑水时 A/O+MBR 工艺的控制模式, 开展了污水处理试验。

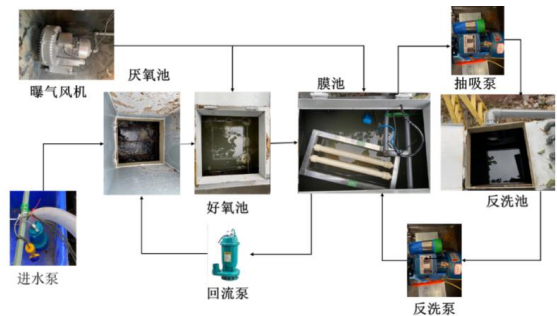
### 1 全尺寸试验

#### 1.1 试验系统

A/O+MBR 工艺贴合了黑水的水质特点, 可用作黑水处理工艺, 基于图 2 的流程图搭建了试验系统, 如图 3 所示。首先, 进水泵将黑水泵入试验设备内, 然后依次经过厌氧池、好氧池、膜池的处理, 最后处理完成的水进入反洗池。厌氧池、好氧池、膜池的有效体积分别为 1.8m<sup>3</sup>、1.8m<sup>3</sup>以及 1.2m<sup>3</sup>。好氧池以膜池的溶解氧通过曝气风机控制; 厌氧池以及好氧池都设有填料, 以增加脱氮效率。



(a) A/O-MBR 工艺试验系统流程图



(b) A/O-MBR 工艺试验系统实物图

图 3 试验系统

Fig.3 Test system

## 1.2 试验对象

试验用的黑水为某工厂卫生间污水,属于典型的黑水,该黑水的主要污染物浓度为:COD(化学需氧量)浓度为1600mg/L, TN(总氮)、NH<sub>3</sub>-N(氨氮)、TP(总磷)以及悬浮物的浓度分别为249、167、16.7、1600mg/L,粪大肠菌群浓度为3500000MPN/L。

## 1.3 系统设置

### 1.3.1 曝气模式

试验中,好氧池以及膜池都有曝气装置,两反应池的曝气量体积比为3:2。曝气系统既要满足曝气池内微生物反应所需的氧气量,又要起到混合搅拌的目的,使反应池内的微生物、氧气以及其他物质完全混合。为了满足溶解氧浓度以及搅动要求,传统工艺一般都采取连续曝气,在连续曝气的模式下,MBR工艺对黑水中COD、NH<sub>3</sub>-N以及TN的去除率分别为83.8%、88.2%和52.9%<sup>[6]</sup>。研究发现,与连续曝气相比,间歇曝气对污泥的扰动更小,会使微生物表面变得更加疏水,从而更容易吸附与聚集,形成更大的微生物菌团和群落,因此,间歇曝气具有更高的有机物和氮磷去除率<sup>[7]</sup>。通过间歇曝气的方式,氨氧化细菌可获得竞争优势以增加绝对丰度,从而实现短程硝化<sup>[8]</sup>。由于控制模式的调整,曝气设备的运行时间下降,电耗可降低18.3%<sup>[9]</sup>。此外,间歇曝气能在更宽泛的溶解氧浓度内实现氮的去除,所以对溶解氧的控制要求低于连续曝气。除此之外,通过间歇曝气在同一反应池内交替形成厌氧、好氧环境,为除磷菌的生长创造了条件,增加了磷的去除。

为了提高对黑水中污染物去除效率以及节能降耗,试验时选择了间歇曝气,曝气时间与停止曝气时间比为1:2,由曝气风机控制。

### 1.3.2 回流模式

硝化液回流的目的是将好氧段硝化细菌氧化氨氮产生的硝酸盐氮送回厌氧段,由反硝化细菌进行硝酸盐氮的反硝化,实现总氮去除。当回流量过小时,脱氮率达不到要求,所以传统工艺通过增大回流量来提高脱氮效率,但当过量硝化液涌入厌氧池后,会破坏其厌氧环境,使反硝化效率大大下降,本末倒置。

间歇回流即在一个回流周期内,回流一段时间,实现缺氧,剩下时间停止回流,实现厌氧状态。

在A/O+MBR工艺中,回流方式对COD和氨氮的去除没有明显影响,但是间歇回流对TP的去除远好于连续回流的情况<sup>[10]</sup>。但是当厌氧时间过长时,不利于NH<sub>3</sub>-N和COD的去除,间歇回流以污水在设备内的间歇循环流动来减少厌氧时间,以保证COD和氨氮的去除率。

回流量由回流泵的运行控制,试验期间其运行模式为2min/30min(启动2min,停止30min。循环往复),回流比达到了4000%。

动力设备的具体控制与运行模式如表1所示。

表1 动力设备控制模式

设备	控制模式	运行时间
进水泵	自动运行	1次/d
曝气风机	间歇运行	15min/30min
回流泵	间歇运行	2min/30min
抽吸泵	自动运行	1次/2d
反洗泵	间歇运行	15min/30d

## 1.4 检测方式

当装置稳定运行后,对系统出水取样检测,基于城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002),选择的检测指标为COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP、悬浮物以及粪大肠菌群。最终检测结果由广东谱尼测试技术有限公司提供,检测方法如表2所示。

表2 参数检测方法

检测参数	方法
COD	重铬酸盐法
NH <sub>3</sub> -N	纳氏试剂分光光度法
TN	酚二磺酸分光光度法
悬浮物	重量法
TP	钼酸铵分光光度法
粪大肠菌群	多管发酵法

## 2 试验结果与讨论

系统出水指标如表3所示。从表3可以看出,除TP外,其余检测参数均满足国家一级A标准。

表3 出水参数对比

Table 3 Comparison of effluent parameters

控制参数 (mg/L)	出水	一级 A 标准
COD	49.04	50
TN	9.96	15
NH <sub>3</sub> -N	1.95	8
悬浮物	4.03	10
TP	3.5	0.5
粪大肠菌群 (MPN/L)	110	1000

### 2.1 COD 的去除效果

试验期间进水 COD 平均为 1600mg/L, 处理后出水 COD 为 35~52mg/L, 平均值为 49.04mg/L, 出水水质较稳定。传统的 A/O 工艺对 COD 的去除率在较好运行状态下能够维持在 88%<sup>[11]</sup>, 而试验系统对 COD 的平均去除率达到了 96.93%, 提高了 8%。试验结果表明, 间歇曝气以及间歇回流运行的 A/O-MBR 工艺对于有机污染物的去除是有利的。

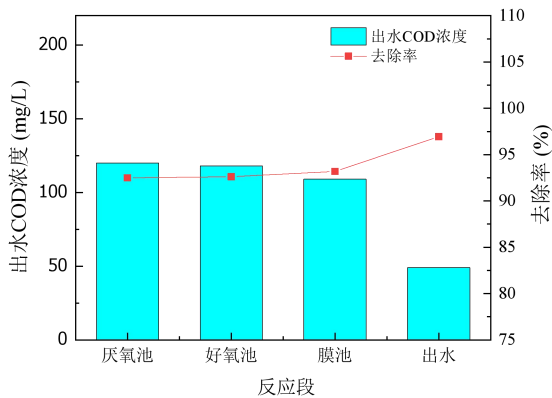


图4 各反应池 COD 浓度

Fig.4 COD concentrations in each cell

除此之外, 黑水中的颗粒性 COD 占到了 68% 以上, 而一般的市政污水占 59% 左右, 灰水 (厨房及洗涤用水) 仅占 23.6%。对于颗粒态 COD 占比较高的污水, MBR 膜具有良好的过滤作用, 能进一步减少出水 COD 浓度。图 4 为膜组件对 COD 的拦截作用, 相较于拦截前, 去除率提高了 3.8%。

当膜污染严重时, 出水 COD 浓度必然会增加, 所以在实际运行中, 要密切关注膜污染的程度, 及时进行清洗或者更换, 保证出水 COD 的稳定。

### 2.2 TN 的去除效果

试验期间进水氨氮均值为 167mg/L, 处理后为 1.04~2.13mg/L, 平均去除率为 99.24%。氨氮的去

除主要是依靠好氧池和厌氧池的生物活动来去除, MBR 膜对氨氮的截留作用很小。通过对黑水进行氮元素分析, 76% 以上的总氮以氨氮的形式存在, 保证 A/O 段的运行十分重要。

进水 TN 平均为 249mg/L, 出水 TN 在 9.30~18mg/L, 平均去除率达到了 94.50%。相较于连续运行时的 66.24%<sup>[12]</sup>, 试验系统所采用的间歇曝气以及间歇回流的运行模式, 对于 TN 的去除率提高了 27%。

试验系统的每个回流周期内, 回流量仅为 150%, 而且回流的混合液来自膜池并非好氧池, 该段的溶解氧浓度维持在较低水平, 不会影响厌氧池的溶解氧浓度, 保证了反硝化反应的正常进行。该过程在一天内多次重复, 回流总量达到了 4000%, 保证了系统内污水完全进行了脱氮过程。除此之外, 在间歇曝气条件下, 停止曝气后, 好氧池也能发生短程硝化反应, 进一步提升了对 TN 的去除。

膜池前后的 TN 浓度几乎没有变化, 证明 MBR 膜对 TN 的截留作用可以忽略不计。

### 2.3 TP 的去除效果

进水 TP 均值为 16.7mg/L, 出水时为 3~5mg/L, 平均去除率为 76.00%。系统所采用的间歇回流以及间歇曝气的控制模式能够创造厌氧与缺氧状态的交替, 有利于聚磷菌的生长与繁殖, 进而影响磷的去除。连续回流不能保证严格的厌氧环境, 聚磷菌增长缓慢, 在间歇回流的模型下, 释磷速率是连续回流的 2 倍, 所以相较于传统模式的 60%TP 去除率<sup>[13]</sup>, 试验系统对 TP 去除率提高了 16%。

尽管通过控制模式优化了生物除磷的效率, 出水 TP 浓度仍不能达到国家标准。仅依靠生物除磷将 TP 浓度控制在 1mg/L 以下, 进水 BOD/TP 的值应在 20~30, 而试验所用的黑水, 该比值仅为 14 左右, 所以有关微生物得不到良好增值, 影响释磷效率。此外, 试验系统不设排泥系统, 含磷污泥无法排出, 进一步影响了 TP 的去除。因此需要对该工艺进一步深入研究, 并结合其它成熟工艺进行改进, 或者辅以化学除磷, 以提高对污水中 TP 的去除效果。

试验过程中发现, 膜池中的 TP 浓度略高于出水中的 TP 浓度, 证明 MBR 膜对颗粒型有机磷有一定的截留作用。

## 2.4 悬浮物以及病原体的去除效果

进水中的悬浮物浓度在 1600mg/L 以上,而出水中的悬浮物浓度稳定在 5mg/L 以下,去除率保持在 99%以上,MBR 膜对悬浮物的截留作用非常明显。

进水粪大肠菌群进水为 3500000MPN/L,设备出水时其浓度仅为 110MPN/L, A/O-MBR 工艺对其去除率大达到了 99.99%以上。MBR 对病毒的去除作用不仅体现在活性污泥对病毒的灭活,膜表面的滤饼层和凝胶层在病毒的截留中起了重要的作用。经 MBR 膜截留后,出水中的肠道病毒等病原微生物都低于检测限。

随着膜污染的增加,出水中悬浮物以及病原体浓度必然会升高,因此,定期清洗膜组件是必要的。

## 3 结论

本文选用 A/O-MBR 工艺并搭建系统处理黑水,在间歇回流以及间歇曝气的控制模式下,研究了对主要污染物参数的去除效果,得到以下结论:

(1) A/O-MBR 工艺对黑水中 COD、H<sub>3</sub>-N、TN、TSS、粪大肠菌群等主要污染物的去除率达到了 90%以上,出水达到 GB 18918-2002 一级 A 标准。

(2) A/O-MBR 工艺对 TP 的去除率达到了 76%,间歇回流的运行模式有利于聚磷菌的生长与繁殖,能提高除磷效率,但是由于黑水水质自身的影响,仅依靠生物除磷无法达到国家标准,需辅以化学除磷。

(3) 膜组件对于悬浮物、病原体以及颗粒型污染物的截留作用明显,膜污染的控制至关重要。

### 参考文献:

[1] 郑永菊,陈洪斌,何群彪.黑水处理与资源化进展[J].中国沼气,2008,(5):9-13,25.  
[2] Zeeman G, Lettinga G. The role of anaerobic digestion

of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level[J]. Water Science and Technology, 1999,39(5):187-194.

- [3] Zeeman G. Resource recovery from source separated domestic waste(water) streams; full scale results.[J]. Water science and technology, 2011,64(10):1987-92.  
[4] 蔡英英,韩志刚,邓良伟,等.A/O 与 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液对比研究[J].农业环境科学学报,2022,41(3):648-657.  
[5] 牛明芬,李卓坪,张迪,等.A/O 反应器处理养殖场废水[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(1):140-145.  
[6] 张静,唐贤春,陈洪斌.倒置 AAO-MBR 处理黑水[J].环境工程学报,2016,10(7):3657-3663.  
[7] Huang J S, Xu L J, Guo Y Y, et al. Intermittent aeration improving activated granular sludge granulation for nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater[J]. Bioresource Technology Reports, 2021, 15.  
[8] 李亚峰,秦亚敏,谢新立,等.间歇曝气条件下短程硝化的实现及影响因素研究[J].环境工程学报,2011,5(7):1518-1521.  
[9] 郑琬琳,史彦伟,高放,等.改良 AAO 工艺间歇曝气对微生物群落特征及运行效果影响[J].给水排水,2021,57(5):34-39,44.  
[10] 丁安,梁恒,郭五珍,等.回流对间歇式 A/O-MBR 脱氮除磷影响的中试研究[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(4):33-37.  
[11] 张春利.A/O 工艺污水处理厂运行及控制研究[D].吉林:吉林大学,2007.  
[12] 呼永锋,王坤,曹孟京,等.A/O+MBR 工艺在分散式污水处理工程中的应用[J].水处理技术,2022,48(1):150-152,156.  
[13] 饶正凯,韦世凡.A/O-MBR 强化脱氮除磷优化控制研究[J].膜科学与技术,2013,33(3):9.