

# 一体式主动错流厌氧 MBR 的研制与启动研究

杨 非, 廖德祥, 耿安朝, 陈立楠, 逯焕波, 杨 丽, 韩 聪  
(上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

**摘 要:** 将自主研发的主动错流式膜分离设备用于校园生活污水的处理,膜设备安装在厌氧膨胀颗粒床反应器(EGSB)上代替原有的三相分离器,以程序控制旋转操作实现主动式错流过滤。结果表明,出水 COD 浓度 < 15 mg/L,去除率达到了 89.9%;除浊效果好,除浊率达到了 82.58%;系统对 TP 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  基本没有去除作用,需要合适的后续处理手段。主动错流膜设备产生的水力剪切力能有效防止滤饼层产生,表现出良好的抗污染能力。系统运行过程中膜通量基本稳定,跨膜压差增长缓慢。

**关键词:** 膜生物反应器; 厌氧生物处理; 主动错流过滤; 旋转膜设备; 深度处理

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0062-04

## Development and Start-up of Active Cross-flow Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor Device

YANG Fei, LIAO De-xiang, GENG An-chao, CHEN Li-nan, LU Huan-bo,  
YANG Li, HAN Cong

(College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** An active cross-flow anaerobic membrane bioreactor device was used to treat campus sewage. The membrane device was installed on EGSB to replace the three-phase separator, and the active cross-flow filtration was implemented by programmed rotation operation. The results showed that the effluent COD was below 15 mg/L with a removal rate of 89.9%. The removal rate of turbidity was 82.58%. However, TP and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  were not removed, which indicated necessity of subsequent processing. The cake layer formation was prevented effectively due to the large fluid shear force on the membrane surface. The rate of membrane fouling was significantly reduced, and the membrane showed excellent pollution resistance. During the experiment, the membrane flux remained stable and the operating pressure of the membrane was slowly increased.

**Key words:** membrane bioreactor; anaerobic biological treatment; active cross-flow filtration; rotating membrane module; advanced treatment

厌氧膜生物反应器(AnMBR)将厌氧生物处理与膜分离技术耦合,具有污泥浓度高、泥龄长、耐冲

击负荷强的优点<sup>[1,2]</sup>。然而目前广泛应用的膜组件都是静止的,为减轻膜污染,采用生物气体回流等措

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109126); 上海市自然科学基金资助项目(11ZR1415000); 上海市教委科研创新项目(12YZ123); 上海海事大学校基金资助项目(20120052)

通信作者: 廖德祥 E-mail: dexiangliao@163.com

施,使得运行费用大大增加,且易燃气体回流提升了安全隐患。因此,笔者采用自主研发的膜组件(授权专利:ZL200910224681.9),通过程序控制同心旋转的 19 片平板膜使膜面与料液之间产生极大的水力剪切力,达到主动错流式过滤的效果<sup>[3]</sup>。研究将主动错流式膜组件代替 EGSB 反应器原有的三相分离器,考察其处理生活污水的效能。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 反应器设计方法

一体式主动错流厌氧膜生物反应器,包括处理塔本体,其内自下而上依次为厌氧流化床反应区(长为 0.3 m、宽为 0.2 m、高为 0.75 m)、污泥沉降区(下底长为 0.3 m、宽为 0.2 m,上底长为 0.35 m、宽为 0.25 m,高为 0.2 m)和膜分离区(长为 0.45 m、宽为 0.3 m、高为 0.3 m)。厌氧流化床反应器内填充有附着厌氧微生物的载体颗粒,反应区内有竖直设置的导流筒,导流筒上端设有固液分离器,膜分离区设有旋转膜组件;在厌氧流化床反应器侧壁的下部设有污水入口、上部设有泥水出口,第一个采样口距底部 0.2 m,第二个采样口距底部 0.4 m;在厌氧流化床反应器侧壁的下部且与导流筒相通的是泥水入口;在膜分离区的侧壁设有净水出口;在膜分离区的顶部设有气体逸出口。整个设备保证密封性。

### 1.2 反应器结构

主动错流式厌氧 MBR 设备(见图 1)主要由原水箱(长为 0.6 m、宽为 0.6 m、高为 0.5 m)、处理塔、回流管组成。

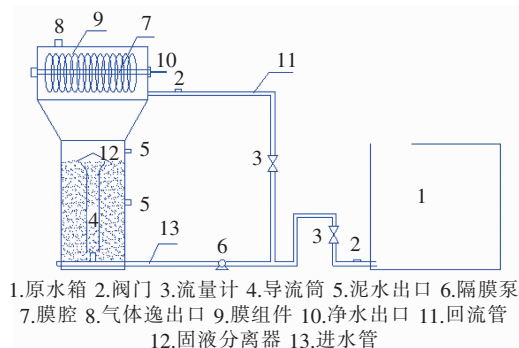


图 1 主动错流式厌氧 MBR 设备

Fig. 1 Active cross-flow anaerobic MBR device

由蠕动泵控制原水箱进水进入处理塔(即反应器主体),先经过流化床生物处理过程,再经过膜分离过程进行三相分离。与传统三相分离器使气泡通过碰撞反射板折向气室而有效分离不同,该设备通

过旋转的膜片与三相混合液接触,引起流场波动,达到扰动并聚合、打破气泡的效果。其中固体被截留沉降回流化床,气体通过气体收集装置收集,液体一部分从净水出口流出,另一部分通过回流管回流。膜组件采用自主研发的中空腔式支撑模板,加载平板式 PES 超滤膜片,单片膜面积为 0.065 m<sup>2</sup>、厚度为 7 mm、平均孔径为 0.04 μm<sup>[4]</sup>。系统采用间歇操作,抽水 225 s、停抽 78 s。膜片转速设为 130 r/min。

系统总运行时间为 117 d,由于后期系统性能较稳定,故只列出运行前期(0~60 d)的数据进行阐述。

### 1.3 种泥及原水水质

种泥取自上海市某污水处理厂,污泥驯化期间投入一定比例的高浓度生活污水,以利于污泥增殖。稳定运行后逐渐混入取自上海海事大学苗圃的生活污水,并加大进水量。种泥的基本性质如下:pH 值为 7.371、VS/TS 为 36.47%、SCOD 为 577.39 mg/L、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 238.87 mg/L、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>为 17.68 mg/L、TCOD 为 63 036.83 mg/L。进水水质如下:pH 值为 7.13~7.95、温度为 16.6~25.6℃、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 13.3~31.2 mg/L、TP 为 2.22~3.51 mg/L、COD 为 29.8~305.3 mg/L。

### 1.4 分析项目及方法

pH 值:PHS-3D 型 pH 计;COD:快速消解分光光度法;氨氮:纳氏试剂分光光度法;TP:过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法;DO、温度:WTW 测定仪;浊度:哈希 2100P 便携式浊度仪;污泥浓度:灼烧减重法;产气量:湿式流量计;气体组分:气相色谱仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对 COD 的去除效果

反应器进出水 COD 以及 COD 去除率随时间的变化如图 2 所示。可知,在 0~30 d,由于时值雨季,雨污混流导致进水 COD 波动幅度较大,在 29~306 mg/L 之间,而膜出水 COD 浓度从 42 mg/L 一直降至 10 mg/L 以下,较为平稳,说明该反应器启动迅速且具有自我调节能力。在 30~60 d,进水水质较稳定,反应器处理效果较好,出水 COD 浓度基本维持在 15 mg/L 以下。整个系统初期平均去除率在 87.16% 左右,而后期基本稳定在 89.9% 左右,最高为 92.44%,体现了系统良好的脱碳效果。系统水力停留时间为 7.13 h,容积负荷基本在 0.4 kgCOD/(m<sup>3</sup>·h)左右。

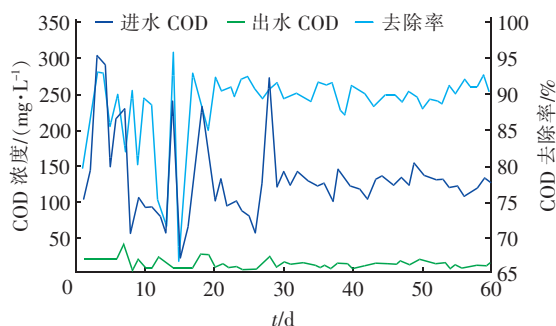


图2 对COD的去除效果

Fig. 2 Removal effect of COD

## 2.2 对TP的去除效果

从理论上讲,废水中的生物除磷需聚磷菌好氧过量吸磷和厌氧释磷的交替过程。而该设备为单极严格厌氧反应器,且运行60 d系统一直处于不排泥的状态,因此理论上讲系统对磷没有去除效果。在稳定运行阶段,进水TP基本稳定在2.48~3.58 mg/L,而出水TP浓度为1.77~2.91 mg/L,平均去除率在19.86%左右,这与理论相符。系统中磷的去除主要依靠微生物生长时的同化和吸附作用,或者转变为其他形式的磷源。

## 2.3 对氨氮的去除效果

进水氨氮为13.3~25.75 mg/L,出水氨氮为15.67~33.6 mg/L,略高于进水浓度。说明厌氧微生物在完全厌氧条件下发生氨化作用,将水体中的有机氮转化为氨氮,而氨氮在严格厌氧条件下无法向其他形态的氮转化。同样,传统脱氮理论需要好氧和厌氧交替的过程,该反应器为单极严格厌氧反应器,且并未向反应器内特别投加硝态氮源,所以理论上也很难出现厌氧氨氧化菌的脱氮作用。实际数据证明系统对氨氮并无去除效果。

## 2.4 对浊度的去除效果

运行初期进水浊度较高,在4.56~5.56 NTU之间;出水浊度波动较大,最高达到1.99 NTU,最低达到0.29 NTU。稳定运行后,进水浊度基本在2.0~3.0 NTU之间,出水浊度基本控制在0.5 NTU左右。整个系统对浊度的平均去除率在82.58%左右,除浊效果良好。

## 2.5 温度和溶解氧的变化

运行期间系统内温度和溶解氧的变化情况如图3所示。在稳定运行阶段,反应器内温度基本为20~25.6℃,接近常温厌氧生物处理最适温度范围。反应器内混合液的溶解氧浓度基本稳定在0.03

mg/L以下,系统内保证严格厌氧环境。

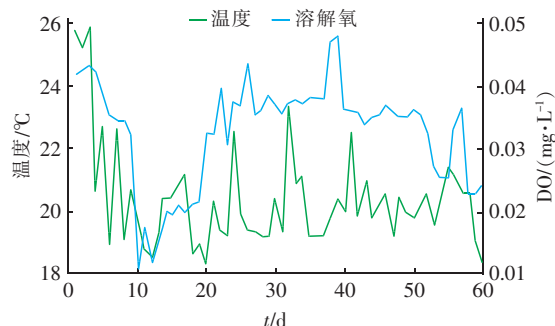


图3 温度和溶解氧随运行时间的变化

Fig. 3 Variation of temperature and dissolved oxygen with running time

## 2.6 pH值的变化

试验期间,进水pH值在7.13~7.95之间,稳定运行后出水pH值基本稳定,平均为7.23。反应器内膜前水的pH值基本维持在6.7~7.2之间,属于常温下厌氧处理的最适范围,运行期间没有出现较为明显的酸化现象。

## 2.7 膜通量的变化

运行期间膜通量和膜操作压力随时间的变化如图4所示。

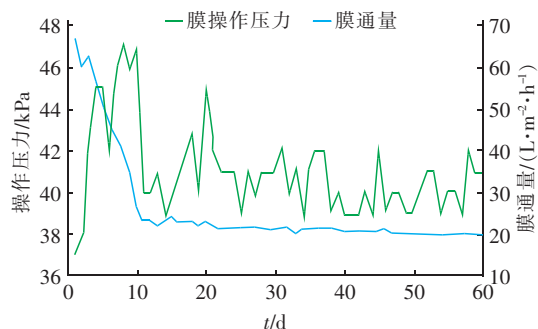


图4 膜通量和膜操作压力随运行时间的变化

Fig. 4 Variation of membrane flux and membrane operating pressure with running time

由图4可以看出,系统刚启动时,操作压力变化幅度较大,最低为37 kPa,最高可达47 kPa;稳定运行后,操作压力基本稳定在40 kPa左右。系统一周产水量和膜通量在0~10 d时很高,新膜初始通量达到66.7 L/(m²·h),在之后的几天内降到稳定值,10~60 d基本稳定在20 L/(m²·h)左右,通量呈现非常缓慢的下降速度,这主要得益于主动错流式膜组件与料液之间由于错流剪切作用产生的强力湍流可以有效抑制滤饼层的形成,大大减缓了膜污染速率,系统可以长期保持较高通量运行。

## 2.8 产泥及产气情况

系统刚接种污泥时污泥浓度约为 6.1 g/L。初始污泥浓度较低,微生物活性较低,所以 COD 去除效果较差。微生物由于部分发生内源衰减,污泥浓度先降到 4.2 g/L,随后随运行时间延长而逐渐增加,达到 12.1 g/L, COD 去除率稳定在 90% 左右。运行后期(运行至第 94 天),污泥浓度升至 16.5 g/L, COD 去除率稍有下降。随后每天定量排泥,确保污泥浓度维持在 12 g/L 左右, COD 去除率又恢复至 90%。这可能是由于长期不排泥运行状态使污泥活性有所下降造成的。

由于初始污泥活性较低且系统尚未稳定运行,反应器在第 19 天才检测到产气情况,稳定运行时系统日产气量基本维持在 0.8 L/d 左右。启动中期,甲烷含量为 37.7% ~ 41.3%;运行后期(运行至第 94 天),甲烷含量升高到 54.1% ~ 58.9%,这可能是由于产甲烷菌的活性和数量提高所引起的。

## 3 结论

① 在进水水质波动较大的情况下,主动错流式厌氧 MBR 工艺出水水质亦波动较大,但出水 COD 浓度基本维持在 15 mg/L 以下。

② 主动错流式厌氧 MBR 工艺对校园生活污水中 COD、浊度等指标具有较好的去除效果,去除率分别稳定在 89.9%、82.58%;对总磷、氨氮并无明显去除作用,需与合适的后续处理工艺结合以达到脱氮除磷的目的。

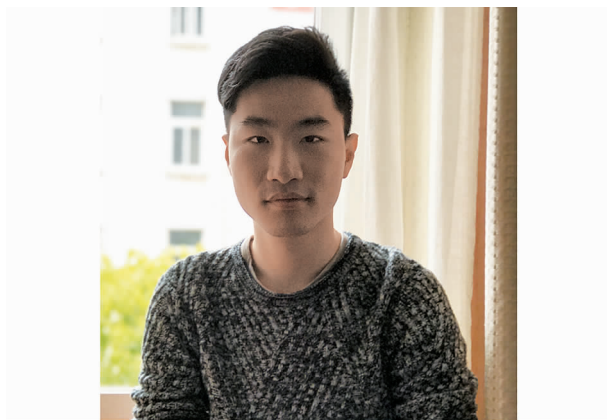
③ 相较于传统 MBR,主动错流式厌氧 MBR 设备无需频繁清洗和换膜,具有良好的抗污染能力。该设备可以长期稳定运行,试验为期 117 d,膜通量维持在 20 L/(m<sup>2</sup>·h)左右,操作压力维持在 40 kPa 左右。

## 参考文献:

- [1] 孙凯,陆晓峰,周保昌,等. 厌氧膜生物反应器(An-MBR)处理高浓度豆制品废水的研究[J]. 膜科学与技术,2011,31(4):65-69.  
Sun Kai, Lu Xiaofeng, Zhou Baochang, *et al.* Research on

the treatment of high concentration soybean processing wastewater with AnMBR [J]. Membrane Science and Technology, 2011, 31(4): 65-69 (in Chinese).

- [2] 刘茜,崔洪升,刘世德,等. 膜生物反应器(MBR)工艺污水厂的全流程节能降耗[J]. 中国给水排水,2016,32(6):99-102.  
Liu Qian, Cui Hongsheng, Liu Shide, *et al.* Energy saving and consumption reduction of MBR in WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6): 99-102 (in Chinese).
- [3] 刘浩亮,耿安朝. 主动错流式膜设备在污水处理 MBR 工艺中的应用[J]. 膜科学与技术,2013,33(6):97-102.  
Liu Haoliang, Geng Anchao. Application of active cross-flow membrane equipment in the MBR process for sewage treatment [J]. Membrane Science and Technology, 2013, 33(6): 97-102 (in Chinese).
- [4] 廖德祥,耿安朝,刘浩亮. 主动错流式 MBR 与 A<sup>2</sup>O 联用处理生活污水研究[J]. 中国给水排水,2014,30(11):5-8.  
Liao Dexiang, Geng Anchao, Liu Haoliang. Combined system of MBR with active cross flow filtration and A<sup>2</sup>O for treatment of domestic sewage [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(11): 5-8 (in Chinese).



作者简介:杨非(1993-),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,主要从事水污染控制与资源化研究。

E-mail: 13761687632@163.com

收稿日期:2017-10-12