

# 复合式膜生物反应器去除城市污水中 TN 的研究

刘 强<sup>1,2</sup>, 王晓昌<sup>1</sup>, 杨振锋<sup>3</sup>, 刘永军<sup>1</sup>, 袁宏林<sup>1</sup>

(1 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2 济南水业集团有  
限责任公司, 山东 济南 250012; 3 西安市北石桥污水净化中心, 陕西 西安 710086)

**摘 要:** 采用复合式膜生物反应器 (HMBR) 中试装置处理城市污水, 考察了对 TN 的去除效果并探讨了脱氮机理。试验结果表明, HMBR 能够显著提高脱氮效果, 对 TN 的平均去除率为 50.9%, 比常规膜生物反应器 (CMBR) 提高了 13.8%。由于生物膜对松散附着型胞外聚合物 (LB-EPS) 的吸附作用, HMBR 中的 LB-EPS 与 CMBR 的相比明显降低。LB-EPS 的降低使 HMBR 中絮体的粒径增加了近 1 倍, 絮体密度明显增大, 提高了同步硝化反硝化的效果。另外, 一定厚度的生物膜同样可以进行同步硝化反硝化。与 CMBR 相比, HMBR 中的活性污泥絮体和生物膜在提高脱氮效果上分别贡献了 8%、5.8%。

**关键词:** 复合式膜生物反应器; 松散附着型胞外聚合物; 生物膜; 活性污泥; 同步硝化反硝化

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2008)21-0030-05

## Study of TN Removal from Municipal Wastewater by Hybrid Membrane Bioreactor

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-chang<sup>1</sup>, YANG Zhen-feng<sup>3</sup>, LIU Yong-jun<sup>1</sup>, YUAN Hong-lin<sup>1</sup>

(1 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2 Jinan Water Supply Group Co Ltd, Jinan 250012, China; 3 Xi'an Beishiqiao Sewage Purification Center, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** A pilot-scale hybrid membrane bioreactor (HMBR) was used to treat municipal wastewater, and the removal efficiency of TN and the nitrogen removal mechanism were investigated. The results show that the HMBR can significantly improve nitrogen removal efficiency. The average removal rate of TN is 50.9%, with rise of 13.8% compared with the conventional membrane bioreactor (CMBR). Due to the adsorption effect of biofilm on the loosely bond extracellular polymeric substances (LB-EPS), the LB-EPS in the HMBR are less than those in the CMBR. The size of flocs in the HMBR is enhanced by nearly 100%, and the density of flocs is also enhanced, which improves the effect of simultaneous nitrification and denitrification (SND). Like the flocs, the SND also occurs in thick biofilm. The contributions of flocs and biofilm in the HMBR to the improvement of nitrogen removal efficiency are 8% and 5.8% respectively.

**Key words:** hybrid membrane bioreactor; loosely bond extracellular polymeric substances; biofilm; activated sludge; simultaneous nitrification and denitrification

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (50621140001); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA06Z328)

膜生物反应器 (MBR)具有出水水质好、占地面积小、污泥停留时间 (SRT)长、剩余污泥量少等优点<sup>[1~3]</sup>。然而在好氧状态下,MBR的脱氮效果较差<sup>[4]</sup>。

向常规膜生物反应器 (CMBR)内投加生物填料,通过一段时间的培养,生物填料上会生长一层生物膜。与仅拥有悬浮型微生物 (活性污泥)的 CMBR相比,投加生物填料后的膜生物反应器同时拥有悬浮型和附着型 (生物膜)两种微生物,因此称之为复合式膜生物反应器 (HMBR)。前期的试验结果表明,与 CMBR相比,HMBR具有较好的脱氮效果<sup>[5]</sup>。在此基础上对 HMBR去除城市污水中 TN的效果进行了进一步的研究,并探讨了其脱氮机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验装置有两套,一套为 HMBR (见图 1),另一套为 CMBR。HMBR的设计处理水量为 4.8 m<sup>3</sup>/d,有效容积为 1.8 m<sup>3</sup>,膜组件为中空纤维微滤膜 (膜

孔径为 0.2 μm)。生物填料为内部多孔的扁圆柱体,直径为 25 mm,高为 12 mm,投加率为 50%。CMBR在结构上与 HMBR完全相同,所不同的是在反应器内没有投加生物填料。

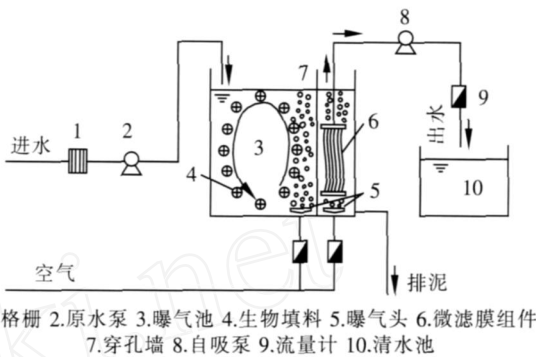


图 1 HMBR工艺流程

Fig 1 Schematic diagram of HMBR system

1.2 原水水质

试验在西安市北石桥污水净化中心进行,原水为细格栅出水,其水质见表 1。

表 1 原水水质

Tab 1 Characteristics of raw wastewater

| 项目 | COD /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | BOD <sub>5</sub> /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | TOC /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | TN /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | TP /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | TSS /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | pH      | 温度 /℃     |
|----|----------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------|-----------|
| 范围 | 235~891                          | 185~427                                       | 20.1~49.8                        | 20.3~46.8                                                     | 22.5~54.1                       | 4.1~13.7                        | 208~857                          | 7.0~7.6 | 17.8~24.2 |

1.3 试验方法

同时运行 CMBR和 HMBR,两个反应器的工艺条件见表 2。待生物膜成熟后,对两个反应器的脱氮效果进行对比分析。

表 2 CMBR与 HMBR的工艺参数

Tab 2 Operation conditions of CMBR and HMBR

| 项目   | HRT /h | SRT /d | MLSS /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | MLVSS /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | 生物膜 /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) | DO /<br>(mg · L <sup>-1</sup> ) |
|------|--------|--------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| CMBR | 10     | 10     | 3 850~<br>4 248<br>(4 058)        | 2 654~<br>2 960<br>(2 798)         |                                  | 0.5~3.3<br>(1.2)                |
| HMBR | 10     | 10     | 3 810~<br>4 350<br>(4 014)        | 2 630~<br>2 980<br>(2 796)         | 1 605~<br>1 750<br>(1 687)       | 0.4~3.5<br>(1.1)                |

注: 括号内的数值为平均值。

通过检测 CMBR、HMBR中松散附着型胞外聚合物 (LB-EPS)的含量,研究 LB-EPS对活性污泥絮体絮凝及沉降性能的影响,对比两个反应器内活性污泥颗粒的粒径大小及絮体内部结构。

取出 HMBR内的生物填料,迅速检测反应器对

TN的去除率,研究活性污泥絮体、生物膜对提高 HMBR脱氮效果的影响。

1.4 检测项目及方法

COD:重铬酸钾法;BOD<sub>5</sub>:生化需氧量法;氨氮:纳氏试剂光度法;TN:过硫酸钾氧化分光光度法;TP:钼锑抗分光光度法;TSS,MLSS,MLVSS:重量法<sup>[6]</sup>;生物膜:碱洗法<sup>[5]</sup>;TOC:TOC仪;DO:溶氧仪;pH:pH计。

活性污泥絮凝性能:取活性污泥混合液 1 L,慢速 (15 r/min)搅拌 10 min后静沉 30 min,用上清液浊度 (ST)表征污泥的絮凝性能;活性污泥沉淀性能:以活性污泥混合液的 SV 值表征;活性污泥絮体内部结构:采用配备有彩色闭路监控摄像机的显微镜检测;活性污泥絮体的粒径分布:激光粒度分布测定。

LB-EPS的提取与测定:取 5 mL 污泥混合液直接经 0.2 μm 的滤膜过滤,所得滤液为溶解性微生物产物 (SMP);另取 5 mL 污泥混合液,经高速离心后 (12 000 r/min,20 min),用 0.2 μm 的滤膜过滤,

所得滤液为 SMP 与 LB-EPS 的总和,其与 SMP 的差值即为 LB-EPS。LB-EPS 的浓度以单位质量 VSS 中的 TOC 含量计算。

2 结果与讨论

2.1 对 TN 的去除

结果表明,HMBR 具有较好的脱氮效果,对 TN 的平均去除率为 50.9%,与 CMBR 相比提高了 13.8%。

根据缺氧微环境理论,从活性污泥絮体表面至内核的不同层次上,由于受氧传递的限制,其氧浓度的分布是不均匀的,外表面的氧浓度较高,内层的则较低,在生物絮体颗粒尺寸足够大的情况下,可以在絮体内部形成缺氧区。此时,在絮体外层好氧硝化菌占优势,主要进行硝化反应,内层则是异养反硝化菌占优势,主要进行反硝化反应<sup>[7,8]</sup>。在 DO 浓度不变的情况下,絮体颗粒的大小对同步硝化反硝化(SND)的效果起到至关重要的作用,较大尺寸絮体的脱氮效果好<sup>[9]</sup>。而对于一定厚度的生物膜,同样能在内部形成缺氧区而进行 SND。对比两个反应器中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量后可知,HMBR 中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度明显低于 CMBR 的,表明 HMBR 的反硝化效果较好(见图 2)。

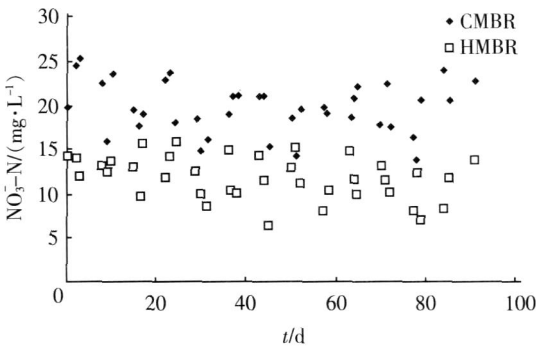


图 2 CMBR 与 HMBR 中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的对比

Fig 2 Concentrations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N in CMBR and HMBR

2.2 CMBR 与 HMBR 中的 LB-EPS 含量

经测定,CMBR 和 HMBR 中的 LB-EPS 含量分别为 12、8 mg/g 左右,这是由于生物膜能够吸附水中的小分子生物絮体及胶体物质<sup>[10]</sup>,因此 HMBR 中的 LB-EPS 平均含量与 CMBR 相比降低了 39%。

2.3 LB-EPS 对活性污泥絮凝及沉降性能的影响

向 HMBR 中投加生物填料后,生物膜开始生长,LB-EPS 由于生物膜的吸附作用而逐渐减少。LB-EPS 分布在 EPS 的外层,对细胞间的附着与絮

凝起重要作用。另外,由于 LB-EPS 内含有大量的结合水,LB-EPS 含量的降低会导致絮体内结合水的含量减少,进而导致絮体的孔隙率变小,活性污泥的沉降性能也会相应发生变化<sup>[11]</sup>。

ST、SVI 与 LB-EPS 含量的对应关系分别见图

3、4。

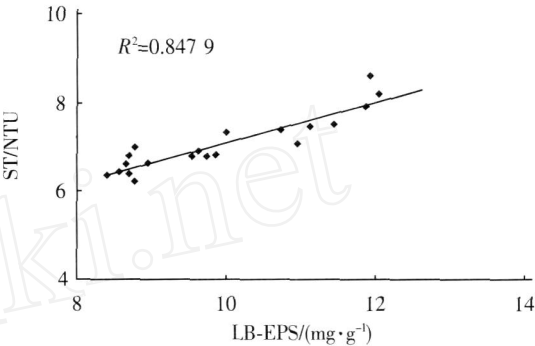


图 3 LB-EPS 与活性污泥絮凝性能的关系

Fig 3 Relationship between LB-EPS and activated sludge biofloculation

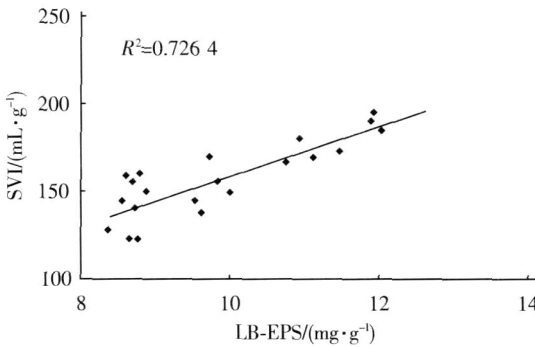


图 4 LB-EPS 与活性污泥沉降性能的关系

Fig 4 Relationship between LB-EPS and activated sludge settleability

图 3 表明,LB-EPS 与活性污泥的絮凝性能关系密切。随着 LB-EPS 含量的增加,ST 逐渐增大,活性污泥的絮凝性能逐渐降低。

图 4 表明,LB-EPS 对活性污泥的沉降性能有着重要影响。随着 LB-EPS 含量的增大,SVI 值逐渐升高,活性污泥的沉降性能变差。

2.4 活性污泥絮体颗粒的粒径分布

CMBR、HMBR 中活性污泥絮体颗粒的粒径分布见图 5。

由图 5 可以看出,HMBR 中的絮体颗粒明显大于 CMBR 的,平均粒径增大了近 1 倍。这可能与 HMBR 中 LB-EPS 含量的降低有关,LB-EPS 含量的降低提高了活性污泥的絮凝能力,絮体间的附着力

增强,小的絮体更易结合成大的絮体。

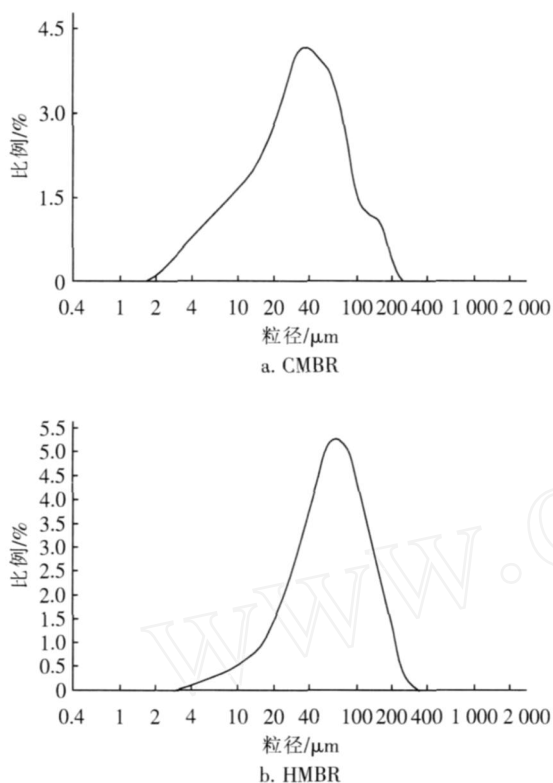


图 5 活性污泥絮体颗粒的粒径分布

Fig 5 Activated sludge flocs size distribution in CMBR and HMBR

## 2.5 活性污泥絮体的内部结构比较

显微照片显示,CMBR中活性污泥絮体的结构松散,而HMBR中活性污泥絮体的结构则较为密实。

由于HMBR中的LB-EPS含量比CMBR的低,其活性污泥的沉降性较好,反映到絮体的内部结构上,即为絮体的孔隙率较小,密度较大。

## 2.6 活性污泥絮体、生物膜对脱氮效果的影响

自HMBR中取出全部生物填料后,立即对反应器的脱氮效果进行检测,结果表明对TN的去除率降低了5.8%,这主要是由于生物膜的突然减少引起的,因为一定厚度的生物膜同样能够进行同步硝化反硝化。

结合前面的数据可知,在缺少生物膜的情况下,HMBR对TN的去除率仍比CMBR提高了8%,这主要是由于HMBR中活性污泥絮体粒径及密度的增加提高了氧向絮体内部传递的阻力,在相同的DO下,HMBR的絮体内部更易形成缺氧区,因而提高了

反硝化效果。

## 3 结论

HMBR能够显著提高脱氮效果,对TN的平均去除率为50.9%,与CMBR相比提高了13.8%。

由于生物膜对LB-EPS的吸附作用,HMBR中的LB-EPS含量与CMBR相比较低。LB-EPS含量的降低使得活性污泥絮体的絮凝、沉降性能提高,进而导致HMBR中絮体的粒径增加了近1倍,密度也明显提高,氧向絮体内部传递的阻力增大。在DO相同的情况下,HMBR更易在絮体内部形成缺氧区,提高了反硝化效果。试验结果表明,由于絮体粒径、密度的增大,与CMBR相比,HMBR的脱氮效果提高了8%。

在DO较低的情况下,一定厚度的生物膜内部同样可以形成缺氧区而进行同步硝化反硝化。如果只考虑生物膜增加的因素,与CMBR相比,HMBR的脱氮效果提高了5.8%。

## 参考文献:

- [1] Meng Fangang, Yang Fenglin, Xiao Jingni, *et al* A new insight into membrane fouling mechanism during membrane filtration of bulking and normal sludge suspension [J]. J Membr Sci, 2006, 285 (1 - 2): 159 - 165
- [2] Yamamoto K, Hiasa M, Mahmood T, *et al* Direct liquid/solid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank [J]. Water Sci Technol, 1998, 21 (1 - 3): 43 - 54
- [3] van Dijk L, Ronchen G C G Membrane bioreactors for wastewater treatment: the state of the art and new developments [J]. Water Sci Technol, 1997, 35 (10): 35 - 41
- [4] Zhang Shoutong, Qu Yanbo, Liu Yihui, *et al* Experimental study on domestic sewage treatment with a metal membrane bioreactor [J]. Desalination, 2005, 177 (1): 83 - 93
- [5] 刘强,付莎,杜于蛟. 淹没式复合型MBR处理城市生活污水的效能研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23 (5): 10 - 17.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002
- [7] 杨殿海,王峰,夏四清. 废水处理工艺中同步硝化反硝化研究进展 [J]. 上海环境科学, 2003, 22 (12): 878 - 882

(下转第 37 页)

理效果,UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TD<sub>2</sub>体系和UV/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub>体系分别需120、90 min。

另外,经UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub>体系光催化降解2 h后,苯酚水溶液中的TOC由85 mg/L降至0.18 mg/L,去除率约为97.9%,而UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TD<sub>2</sub>、UV/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub>体系的仅为40%左右。说明在UV/TD<sub>2</sub>体系中同时添加双氧水和臭氧能大大提高苯酚的矿化度。

经拟合,UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub>体系的表现速率常数为2.727 2 h<sup>-1</sup>,位于六种反应体系之首,是UV/TD<sub>2</sub>体系的近7倍;UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TD<sub>2</sub>和UV/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub>体系的表现速率常数在2 h<sup>-1</sup>左右,是UV/TD<sub>2</sub>体系的4~5倍。六种体系的表现速率常数排序为:UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub> > UV/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub> > UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TD<sub>2</sub> > UV/O<sub>3</sub> > UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> > UV/TD<sub>2</sub>。

#### 2.4 协同机理

在UV/TD<sub>2</sub>光催化体系中投加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>或O<sub>3</sub>后,由于H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>具有很强的亲电性,能捕获UV/TD<sub>2</sub>体系产生的光致电子并生成·OH,有效避免了光催化过程中自由电子与空穴的复合,提高了量子效率<sup>[3]</sup>,使有机物的光催化氧化更为迅速和彻底。

### 3 结论

① 在采用“表观即时成膜型UV/TD<sub>2</sub>光催化反应器降解水中有机污染物的过程中,外加的氧

化剂与UV/TD<sub>2</sub>体系之间存在显著的协同效应,可以显著提高光催化氧化有机物的速率和效率。

② 在UV/TD<sub>2</sub>体系中同时添加双氧水和臭氧比单独添加双氧水或臭氧的协同效应更加显著,在达到相同的有机污染物降解效果时可使光催化反应时间大大缩短。

③ 不同反应体系的表现速率常数按大小排序为:UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub> > UV/O<sub>3</sub>/TD<sub>2</sub> > UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TD<sub>2</sub> > UV/O<sub>3</sub> > UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> > UV/TD<sub>2</sub>。

#### 参考文献:

- [1] 侯娜,魏宏斌,邹平,等. “表观即时成膜型光催化反应器处理水中有机污染物的研究”[J]. 中国给水排水, 2007, 23(13): 15 - 19.
- [2] 魏宏斌,徐迪民,严煦世. 二氧化钛膜光催化氧化苯酚的动力学规律研究[J]. 中国给水排水, 1999, 15(2): 14 - 17.
- [3] Logemann F P, Annee J H J. Water treatment with a fixed bed catalytic ozonation process[J]. Water Sci Technol, 1997, 35(4): 353 - 360.

作者简介:魏宏斌(1967 - ),男,陕西宝鸡人,博士,副研究员,研究方向为给水和废水处理技术。

电话:(021) 65980354

E-mail: tjsywhb@smmail.cn

收稿日期:2008 - 07 - 14

(上接第33页)

- [8] 曹国民,赵庆祥,张彤. 单级生物脱氮技术的进展[J]. 中国给水排水, 2000, 16(2): 20 - 24.
- [9] Pochanna K, Keller J, Lant P. Model development for simultaneous nitrification and denitrification[J]. Water Sci Technol, 1999, 39(1): 235 - 243.
- [10] Yang Qiyong, Chen Jihua, Zhang Feng. Membrane fouling control in a submerged membrane bioreactor with porous, flexible suspended carriers[J]. Desalination, 2006, 189(1): 292 - 302.
- [11] Poxon T L, Darby J L. Extracellular polyanions in diges-

ted sludge: measurement and relationship to sludge dewaterability[J]. Water Res, 1997, 31(4): 749 - 758.

作者简介:刘强(1972 - ),男,山东济南人,博士研究生,工程师,主要从事水处理技术研究。

电话:13201689610

E-mail: liuqiang\_1207@163.com

收稿日期:2008 - 06 - 02