

# 反硝化生物滤池用于污水深度脱氮研究

刘金瀚<sup>1</sup>, 白宇<sup>2</sup>, 林海<sup>1</sup>, 周军<sup>2</sup>, 甘一萍<sup>2</sup>, 常江<sup>2</sup>, 卮涛<sup>3</sup>

(1 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2 北京排水集团 科技研发中心, 北京 100022; 3 三菱电机 <中国>有限公司, 北京 100027)

**摘要:** 以酒仙桥污水厂的二级处理出水为研究对象, 采用中试规模的臭氧/活性炭/反硝化生物滤池工艺进行生物脱氮, 重点研究了反硝化生物滤池采用连续流自然挂膜法的启动速度和启动效果, 以及碳源投量对总氮去除率的影响。结果表明: 反硝化生物滤池是实现污水深度处理的有效手段, 当外加乙酸钠作碳源并使  $C/N > 8$  时, 对  $TN$  的去除率能达到 80% 以上; 下向流反硝化生物滤池的生物量主要集中在滤池的上半段, 对去除  $TN$  的贡献率可达 65%。

**关键词:** 反硝化生物滤池; 挂膜; 碳氮比; 水力负荷

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2008)21-0026-04

## Study on Denitrifying Biofilter for Advanced Wastewater Treatment

LIU Jin-han<sup>1</sup>, BAI Yu<sup>2</sup>, LIN Hai<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>2</sup>, GAN Yiping<sup>2</sup>, CHANG Jiang<sup>2</sup>,  
JUN I Hirotsuji<sup>3</sup>

(1 School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Center of Technology Development, Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China; 3 Mitsubishi Electric <China> Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** A pilot scale experiment of ozone/activated carbon/denitrifying biofilter was conducted for biological nitrogen removal from the secondary treatment effluent of Jiuxianqiao WWTP. The start-up speed and efficiency of continuous-flow natural biofilm formation mode used by the denitrifying biofilter as well as the effect of carbon source dosage on the removal rate of total nitrogen were investigated. The results show that the denitrifying biofilter is an effective way to achieve the advanced wastewater treatment. The removal rate of total nitrogen can reach 80% when sodium acetate is used as external carbon source, and the  $C/N$  ratio is more than 8. The biomass is concentrated at the upper section of the downflow denitrifying biofilter, and the contribution rate to total nitrogen removal is 65%.

**Key words:** denitrifying biofilter; biofilm formation;  $C/N$  ratio; hydraulic load

城市污水处理厂的二级出水中仍含有一定数量的氮和磷, 若直接用作景观补水则极易引发水体的富营养化。经臭氧/活性炭工艺净化后, 其色度、浊度等感官指标有了明显的改善, 但其中的氮、磷仍未得到有效去除。除磷可以采用化学法, 而氮的去除

目前仍以生物法为最优。考虑到北京市再生水厂的建设规模较大以及老水厂可供用地严重不足的现状, 反硝化生物滤池 (DNBF) 因生物量大、处理效率高而成为可行的污水深度处理技术。笔者所在课题组建立了处理规模为  $250 \text{ m}^3/\text{d}$  的中试 DNBF 系统

基金项目: 北京市科技计划项目 (D07050601200000)

考察了 DNBF用于再生水深度脱氮的挂膜特征,并探讨了正常运行时影响脱氮效果的主要因素。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

中试采用了 O<sub>3</sub> /GAC /DNBF 工艺,其流程如图 1所示。

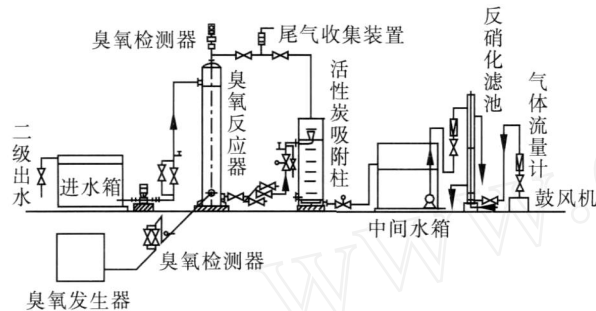


图 1 中试工艺流程

Fig 1 Flow chart of pilot plant

臭氧发生器以氧气为气源,气体流量为 20 L/min,最大产气浓度为 200 mg/L。臭氧反应器的直径为 0.9 m,高为 4.4 m,容积为 2.8 m<sup>3</sup>;活性炭柱的直径为 1 m,高为 3.2 m,容积为 2.5 m<sup>3</sup>,活性炭装填高度为 2 m。

反硝化生物滤池由有机玻璃制成,内径为 300 mm,高为 4 000 mm,其中底部承托区填充鹅卵石,粒径为 40~50 mm,填充高度为 400 mm;填料为火山岩,粒径为 2~3 mm,装填高度为 2 000 mm。沿高度方向每隔 200 mm 设置一个取样口,共 7 个。

1.2 原水水质

酒仙桥污水处理厂(主体工艺为氧化沟)的二级出水经臭氧/活性炭工艺处理后进入反硝化生物滤池,其水质见表 1。

表 1 原水水质

Tab 1 Influent characteristics

| 项 目                                                        | 范围          | 均值   | 项 目                                        | 范围                                | 均值              |
|------------------------------------------------------------|-------------|------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N / (mg · L <sup>-1</sup> ) | 0.62 ~ 10.4 | 7.04 | BOD <sub>5</sub> / (mg · L <sup>-1</sup> ) | 8 ~ 11                            | 9.8             |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N / (mg · L <sup>-1</sup> ) | 0 ~ 0.8     | 0.46 | COD / (mg · L <sup>-1</sup> )              | 20.3 ~ 45.1                       | 31.4            |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N / (mg · L <sup>-1</sup> ) | 0.29 ~ 6.67 | 0.63 | 浊度 /NTU                                    | 1.27 ~ 6.95                       | 2.84            |
| TN / (mg · L <sup>-1</sup> )                               | 5.07 ~ 12.3 | 8.13 | 色度 倍                                       | 5 ~ 12                            | 8               |
| TP / (mg · L <sup>-1</sup> )                               | 0.09 ~ 1.26 | 0.4  | 细菌总数 / (个 · mL <sup>-1</sup> )             | 10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup> | 10 <sup>5</sup> |
| TOC / (mg · L <sup>-1</sup> )                              | 8.46 ~ 8.58 | 8.52 | 粪大肠菌群 / (个 · L <sup>-1</sup> )             | <3                                | <3              |

2 结果及讨论

2.1 反硝化生物滤池的启动

2.1.1 启动方式的选择

由于系统的进水底物浓度低,故寻找经济快速的启动方式对实际水厂的运行有较大的参考价值。生物反应器挂膜启动的方法一般可分为三种:一是先间歇培养,然后再进行负荷渐增的连续流进水<sup>[1]</sup>;二是在设计流速或逐渐增加流速的条件下进行连续流培养<sup>[2]</sup>;三是先接种活性污泥,然后进行间歇或连续培养<sup>[3]</sup>。虽然这三种方法在启动过程中所形成的生物膜特性和挂膜周期不同,但达到稳态时处理效果却基本相同。也有研究者认为,与接种挂膜法所形成的生物膜相比,自然培养所形成的生物膜与载体之间的粘合强度更高。试验中采用了按设计流速连续流培养的自然挂膜法。操作过程为:连续进水,负荷稳定在 4.2 m<sup>3</sup> / (m<sup>2</sup> · h);以无水乙酸钠为外加碳源,保持进水 COD 在 50 mg/L 左右。

2.1.2 启动过程及分析

由于时处夏末(水温 > 20 ℃),所以挂膜较快(见图 2)。

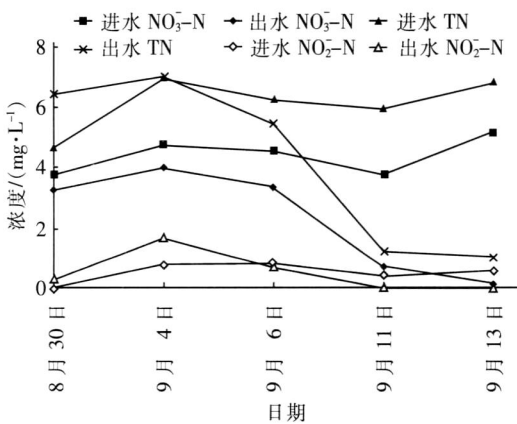


图 2 启动期间氮浓度随时间的变化

Fig 2 Variation of concentrations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N, TN and NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N during start-up period

挂膜期间进水硝态氮浓度稳定在 4~5 mg/L 之间,当培养到第 7 天时对硝态氮的去除率快速提高,至第 12 天时去除率已达 80%,出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N < 1 mg/L。总氮的变化趋势与硝态氮的基本一致,挂膜成功后出水 TN < 1 mg/L。而 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N 的浓度经历了一个先上升后下降的过程,这说明在反硝化菌逐渐增殖的过程中,反硝化过程由不完全反硝化逐渐变为完全反硝化。

由此可见,在碳源充足和水温适宜的条件下,反硝化生物滤池启动迅速、操作简便。挂膜过程中,肉眼可见反应器内壁上逐渐附着越来越多的丝状絮体,滤料表面包裹的生物膜颜色逐渐由浅黄色变为黄褐色。由于填料的比表面积大、吸附能力强,水中的微生物极易吸附于填料表面,同时被填料截留的有机颗粒也增加了填料表面的粗糙程度,进一步强化了对游离细菌的吸附作用。微生物被吸附后开始大量繁殖,同时代谢产生胞外聚合物(EPS),这些物质的存在也促进了生物膜的快速形成,填料的凹陷表面还有利于生物膜的扩展。

对于实际工程的运行调试来说,在反硝化滤池启动期间有几点需要注意:首先是要保持进水中足量的高品质碳源,缺少碳源则反硝化菌的生长会受到限制。一般来说,国外多以甲醇作为外加碳源,而因药品的毒性,甲醇的使用在北京受到限制。实践证明,乙酸钠是一种良好的碳源,易于为微生物所利用,可实现较高的 TN 去除率。其次,挂膜期间要保持较低的水力负荷,以  $3 \sim 5 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$  为宜,过快的流速不利于反硝化菌在填料上的附着。另外,若启动过程中长时间不进行反冲洗,则易造成填料结团成块而形成短流。因此,在 DMBF 的启动过程中,应适时施以短时、低强度的反冲洗,以达到重新分配生物量、激发微生物活性并加速启动的目的。

2.2 C/N对反硝化脱氮效果的影响

异养反硝化是以有机碳源为供体及营养源,因此有机碳源对反硝化的影响很大,不同的有机碳源将导致反硝化速率的差异。由于试验用水为市政污水处理厂的二级出水,可生化性较差,能被微生物利用的有机物量极少,故在进水中投加乙酸钠,研究了碳氮比对反硝化的影响。结果如图 3 所示。

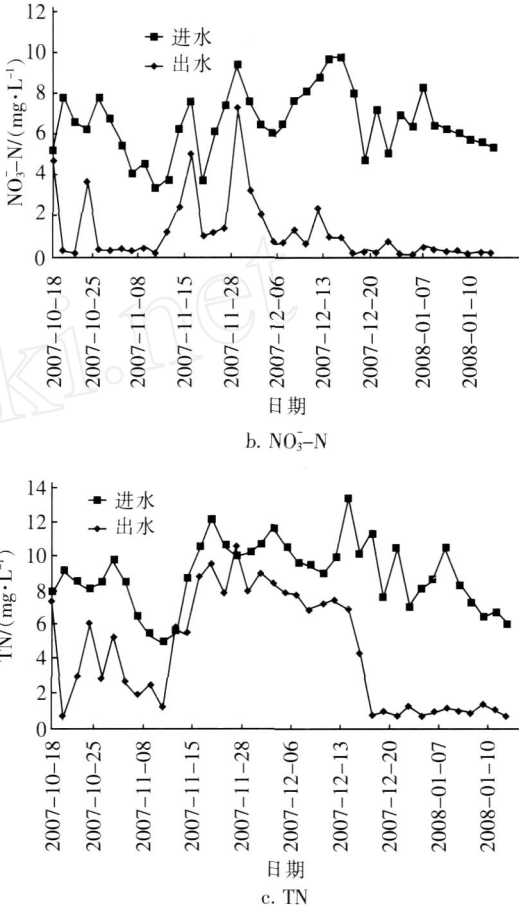
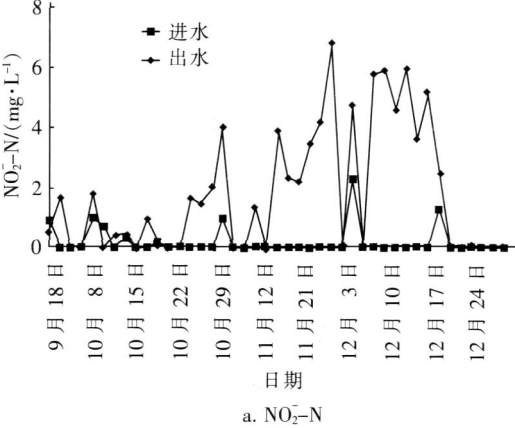


图 3  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TN 浓度随时间的变化  
Fig 3 Variation of concentrations of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and TN with time

由图 3 可知,稳定运行期间(11月 21 日—12 月 21 日),出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  升高,出现了亚硝酸盐积累的现象,从而导致出水 TN 居高不下。此时沿滤层深度方向的污染物降解规律显示, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的降解在 40 cm 内已完成大部分,说明反硝化不完全并非由于床层深度不够造成;此时的 C/N 在 6~8 之间,满足理论上脱氮对碳源的需求,但实际上由于进水  $\text{BOD}_5 / \text{COD}$  低,VFA 接近于零,有机物以不可生物降解的为主,可利用的碳源量不足,造成  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的还原不彻底,所以出水总氮  $> 5 \text{ mg/L}$ 。值得注意的是,碳源不足对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率影响不大,出水  $\text{NO}_3^- - \text{N} < 1 \text{ mg/L}$ ,说明  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  还原为  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的过程进行得较为完全,这是因为 1 mg 的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  还原为  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  只需消耗 1.15 mg 的 COD,而完全还原为  $\text{N}_2$  则需要 2.86 mg 的 COD。后续试验中,加大了碳源投量使  $\text{C/N} > 8$  时,遂实现了  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的彻底还原,出水  $\text{TN} < 2 \text{ mg/L}$ 。

一般来说,理论上达到完全反硝化所需的  $C/N$  为 3~4,但在实际工程中该值会受到多种因素的影响,如生物膜的生长状态、碳源品质及操作条件(温度、水力负荷、溶解氧浓度)等<sup>[4]</sup>。试验发现当污水中含有溶解氧时,对后置 DNBf 碳源投量的影响较大,原因是部分碳源被用于好氧异养菌和氨氧化菌的新陈代谢,从而造成了碳源的浪费。综上所述,反硝化需要的有机物总量可以按下式计算:

$$C = 2.86[NO_3^- - N] + 1.71[NO_2^- - N] + DO + \text{反冲洗损失的碳源} \quad (1)$$

### 2.3 含氮化合物沿滤层的变化

为进一步探索 DNBf 中反硝化的特点,在水力负荷为  $5 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、进水碳源充足的条件下,研究了含氮化合物和 DO 沿滤层的变化,结果见图 4。

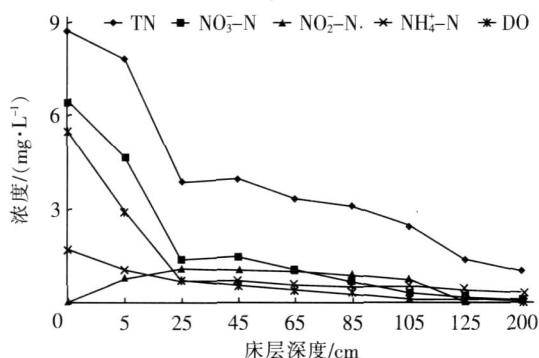


图 4 含氮化合物及 DO 在滤池内的变化

Fig 4 Variation of nitrogen and DO concentrations with depth of biofilter

对  $TN$  及  $NO_3^- - N$  的去除率均随床层深度的增加而提高,两者的变化规律基本一致,0~25 cm 的床层对  $NO_3^- - N$  和  $TN$  的去除速率最快,分别达到了 78% 和 53%;随着滤层深度的增加,对  $NO_3^- - N$  和  $TN$  的去除速率减缓,25~200 cm 的去除贡献仅分别为 20% 和 33%。这一方面是由于进水  $TN$  浓度较低(仅为  $8.6 \text{ mg/L}$ ),较浅的床层即可达到较高的去除率;另一方面由于采用下向流,上部的有机负荷高、营养丰富,微生物繁殖快且数量多、活性高,而下部的有机负荷较低,营养相对匮乏,微生物数量相对较少,所以上部的  $TN$  去除速率较快。

溶解氧的变化趋势与  $NO_3^- - N$  和  $TN$  的变化趋势类似,且与  $NH_4^+ - N$  浓度的变化密切相关,说明

系统中存在氨氧化菌。 $NO_2^- - N$  沿滤层呈先上升后下降的趋势,也反映了 DNBf 内菌群分布特征。氧化  $1 \text{ mg}$  的  $NH_4^+ - N$  需消耗  $3.43 \text{ mg}$  的氧,故  $NH_4^+ - N$  从  $1.68 \text{ mg/L}$  降至  $0.41 \text{ mg/L}$  时大约消耗  $4.36 \text{ mg/L}$  的氧,而溶解氧共降低了  $5.42 \text{ mg/L}$ ,说明系统中还存在好氧异养菌,其耗氧量为  $1.06 \text{ mg/L}$ 。

### 3 结论

反硝化生物滤池是实现污水深度脱氮的有效手段,适合于再生水厂的改扩建工程。该工艺宜采用连续流的自然挂膜法启动,在水温为  $20^\circ\text{C}$  且投加碳源的条件下,约两周即可挂膜成功。挂膜成功后,对总氮的去除率可达 80% 以上,出水  $TN < 1 \text{ mg/L}$ 。

碳源品质及投量对 DNBf 脱氮的影响较大,由于二级处理出水中难降解有机物多,要想实现较高的  $TN$  去除率,需要外加碳源并使  $C/N > 8$ 。

下向流 DNBf 的生物量主要集中在滤池的上半段,对去除  $TN$  的贡献率为 65%。将  $O_3/GAC/DNBf$  用于污水深度处理时,易造成氨氧化菌和好氧异养菌在 DNBf 中的生长繁殖。

### 参考文献:

- [1] Bacquet G, Joret J C, Rorgalla F. Biofilm start-up and control in aerated filter[J]. Environ Technol, 1991, 12: 747 - 756
- [2] 龙腾锐,方芳,郭劲松. 酶促填料变速生物滤池的生产性启动研究[J]. 给水排水, 2000, 26(11): 12 - 15
- [3] 顾国维. 水污染治理技术研究[M]. 上海:同济大学出版社, 1997.
- [4] Anette Aesoy, Hallvard Qdegaard. Denitrification in a packed bed biofilm reactor (biofor)—experiments with different carbon sources[J]. Water Res, 1998, 32(5): 1463 - 1470

作者简介:刘金瀚(1983-),男,山东青岛人,硕士研究生,研究方向为污水再生利用。

电话:(010) 62391247

E-mail: liujinhan1983@126.com

收稿日期:2008-07-02