

## 悬浮填料生物膜工艺的模拟诊断与优化

庞洪涛<sup>1,2</sup>, 邱勇<sup>2</sup>, 薛晓飞<sup>1</sup>, 刘洪波<sup>2</sup>, 郭媛媛<sup>1</sup>, 姜秀光<sup>1</sup>

(1. 信开水环境投资有限公司, 北京 101101; 2. 清华大学 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

**摘要:** 采用软件 BioWin 对某城市污水处理厂悬浮填料生物膜工艺的运行问题进行模拟诊断, 分析了溶解氧浓度、剩余污泥排放量、回流比和填料投配方式的影响, 提出该厂出水水质达一级 B 排放标准的优化运行方案, 并进行生产性验证。模拟结果表明, 污泥龄偏短是出水氨氮浓度不达标的瓶颈因素, 参数调节的优先序依次是排泥量、回流比、投配方式和溶解氧。生产性验证结果表明, 同时提高溶解氧浓度和污泥龄可使出水氨氮浓度稳定达标。

**关键词:** 悬浮填料; 生物膜; 数学模拟; 工艺优化; BioWin

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)03-0023-05

## Simulation-based Diagnosis and Optimization of Suspended Carrier Biofilm Process

PANG Hong-tao<sup>1,2</sup>, QIU Yong<sup>2</sup>, XUE Xiao-fei<sup>1</sup>, LIU Hong-bo<sup>2</sup>, GUO Yuan-yuan<sup>1</sup>,  
JIANG Xiu-guang<sup>1</sup>

(1. Xinkai Water Environmental Investment Co. Ltd., Beijing 101101, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The operating problem of suspended carrier biofilm process in a municipal wastewater treatment plant was simulated and diagnosed using BioWin software. The influence of dissolved oxygen concentration, excess sludge discharge, reflux ratio and suspended carrier addition method was analyzed. An optimized operation scheme of the effluent quality for meeting the first level B criteria was proposed, and the full-scale verification tests were performed. The simulated results showed that the short sludge retention time was the restrictive factor of not meeting the standard for the effluent ammonia nitrogen concentration. The priority order of parameter adjustment was the sludge discharge, reflux ratio, suspended carrier addition method and dissolved oxygen. The full-scale verification results indicated that the effluent ammonia nitrogen concentration could meet the standard by increasing dissolved oxygen and extending sludge retention time.

**Key words:** suspended carrier; biofilm; mathematical simulation; process optimization; BioWin

悬浮填料生物膜工艺(SCBP)又称移动床生物膜反应器(MBBR),由挪威 KMT 公司和 SINTEF 研究所共同开发,目的是在原有活性污泥处理系统的

基础上提高负荷率、增加脱氮除磷能力<sup>[1]</sup>。悬浮填料生物膜工艺开发成功以后,逐渐在市政生活污水、工业废水等领域得到研究与应用<sup>[2~4]</sup>。

国内某城市污水处理厂采用悬浮填料生物膜工艺,设计出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级标准,需通过提标改造达到一级 B 标准。由于实际出水仅有氨氮未能达标,拟通过数学模拟技术对其运行进行分析诊断,探索通过优化运行使出水水质达到一级 B 标准的可行性。数学模拟技术已在国内一些大型污水处理厂的运行优化中得到应用<sup>[5,6]</sup>,积累了许多宝贵的经验,但在悬浮填料生物膜工艺中应用较少。

本研究使用加拿大 EnviroSim 环境咨询公司开发的污水处理厂全流程模拟软件 BioWin,对该污水厂的工艺运行进行分析诊断,模拟了溶解氧浓度、污泥龄以及填料投配比等参数对出水水质的影响,提出出水水质达到一级 B 标准的工艺优化方案,并通过生产性调整予以验证。

## 1 污水处理厂模型的建立与校正

### 1.1 处理工艺概况

该污水处理厂主要处理周边经济开发区的生产和生活混合污水,采用悬浮填料活性污泥工艺,设计处理能力为  $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设计出水水质为 GB 18918—2002 的二级标准。生化系统工艺流程如图 1 所示。生化池有效容积为  $30\,800 \text{ m}^3$ ,分为 4 个系列,每个系列由 4 个串联的矩形池(1#~4#)组成,其中 1、2 系列投加国产高密度聚乙烯球形填料,比表面积  $\geq 160 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ;3、4 系列投加进口低压聚乙烯圆柱形填料,比表面积  $\geq 380 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。两种填料的投配比均为 25%。

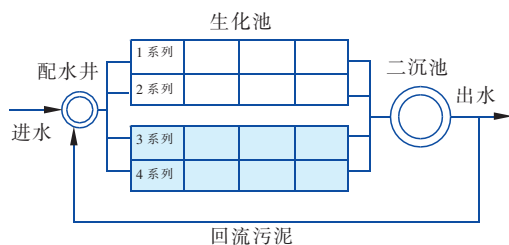


图1 生化系统工艺流程

Fig.1 Flow chart of bio-chemical treatment system

该厂在模拟优化前 1 年的运行数据表明,出水 COD、BOD<sub>5</sub>、SS 和 TP 平均浓度分别为 28.8、9.41、9.09 和 0.57 mg/L,均达到排放标准。但出水氨氮浓度为 18.61 mg/L,远高于一级 B 标准,进而导致出水 TN(20.4 mg/L)超标。因此,该厂硝化效果较差是出水水质不能达到一级 B 标准的主要原因。模拟的主要目的是通过调整溶解氧浓度、污泥龄以

及填料投配比等参数来提高硝化效果,提出氨氮达标排放的优化运行方案。

### 1.2 工艺概化模型与参数校正

该厂生化池 4 个系列并联运行,因而只建立 1 个系列的工艺概化模型(如图 2 所示),填料的比表面积取两种填料的平均值( $270 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )。

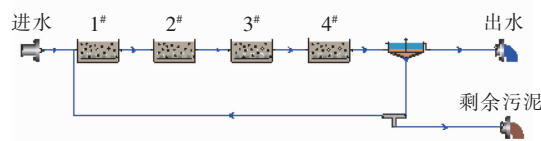


图2 污水处理厂工艺概化模型

Fig.2 Mathematical model of MBBR

氨氧化细菌(AOB)的最大比增长速率( $\nu_{\max}$ )是 BioWin 模型中影响出水氨氮浓度的关键参数,参照课题组以往研究和工程实践经验,国内污水处理厂的取值通常为  $0.5 \sim 0.6 \text{ d}^{-1}$ ,在进行不同工况的模拟分析前首先要对该参数进行校正。根据静态模拟结果(见表 1),AOB 最大比增长速率为  $0.56 \text{ d}^{-1}$ 时,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 18.69 mg/L,与实际出水浓度最为接近。

表1 氨氧化细菌最大比增长速率对模拟结果的影响

Tab.1 Effect of AOB maximum specific growth rate on simulation results

| $\nu_{\max}/\text{d}^{-1}$ | 模拟出水值/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |     |                            |      |     |
|----------------------------|---|-----|----------------------------|------|-----|
|                            | COD                                       | SS  | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | TN   | TP  |
| 0.65                       | 28.8                                      | 5.6 | 14.48                      | 19.3 | 0.6 |
| 0.625                      | 28.9                                      | 5.6 | 16.4                       | 20.2 | 0.6 |
| 0.6                        | 28.9                                      | 5.6 | 17.4                       | 20.7 | 0.6 |
| 0.58                       | 28.9                                      | 5.6 | 17.86                      | 20.9 | 0.6 |
| 0.56                       | 28.8                                      | 5.6 | 18.69                      | 21.2 | 0.6 |
| 0.55                       | 28.9                                      | 5.6 | 18.91                      | 21.4 | 0.6 |

### 1.3 工艺模拟的基准状态

参照该厂的设计参数与实际运行状况确定模拟的基准状态。进水水量为  $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水质采用年平均值,水温为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,4 个浮动填料反应器的投配比均为 25%,溶解氧设定值分别为 0.5、1、2 和 3 mg/L,剩余污泥排放量为  $1\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ ( $\text{SRT} = 5.52 \text{ d}$ )。在以上运行参数下的模拟结果如表 2 所示。

表2 基准状态的模拟结果

Tab.2 Simulation result in basic stage  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 项目 | COD  | SS  | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | TN   | TP   |
|----|------|-----|----------------------------|------|------|
| 进水 | 300  | 145 | 27                         | 32   | 3.6  |
| 出水 | 28.2 | 5.5 | 19.7                       | 22.8 | 0.66 |

## 2 结果与讨论

溶解氧浓度、污泥龄、填料的投配方式等是影响氨氮去除效率的主要因素,通过改变以上参数来模拟不同工况下的出水水质,比较各种运行方式在技术及经济上的可行性,为污水厂的工艺优化运行和提标改造提供最佳策略。

### 2.1 溶解氧的影响

以基准状态工艺参数为基础,改变曝气池溶解氧浓度(各段 DO 浓度均为同一水平),模拟溶解氧升高对出水水质的影响,结果如图3所示。随着 DO 浓度的升高,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度由 20.25 mg/L 降至 4.56 mg/L,当 DO 升至 4.5 mg/L 后,其出水浓度能够达到一级 B 排放标准。

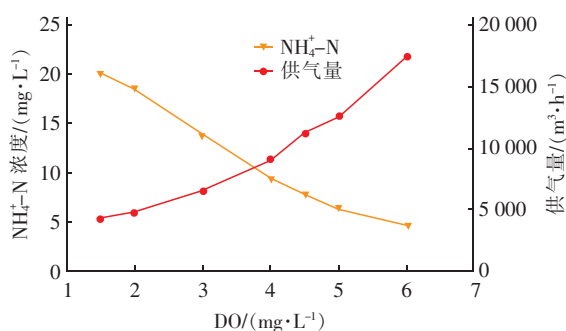


图3 溶解氧浓度对氨氮浓度的影响

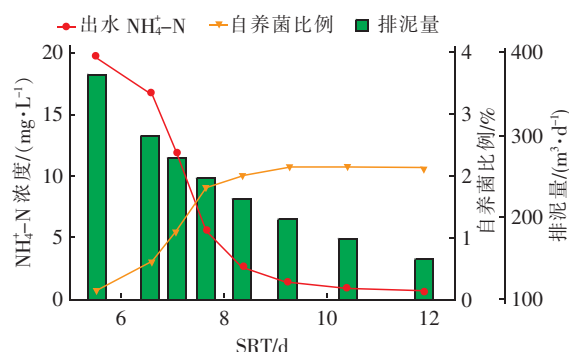
Fig.3 Effect of DO concentration on effluent ammonia nitrogen concentration

溶解氧浓度的升高能够降低出水氨氮浓度,但同时也大大增加了系统的供气量。随着 DO 浓度的升高,供气量由 4 102 m³/h 升高至 17 470 m³/h。鼓风机房共有 8 台鼓风机,6 用 2 备,单台风机流量为 9 600 m³/h,功率为 280 kW。为使出水氨氮浓度达到一级 B 标准,单系列进气量从 4 155 m³/h 增至 11 132 m³/h,需要由 2 台风机改为 5 台风机同时工作,增加电耗约 18 000 kW · h/d,吨水电耗增加 0.15 kW · h,可见单纯靠提高 DO 降低出水氨氮浓度在实际运行中并不可行。

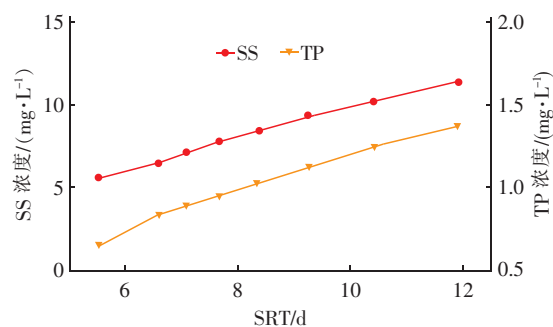
### 2.2 剩余污泥排放量的影响

污泥停留时间(SRT)即系统的污泥龄是影响硝化过程的重要因素<sup>[7]</sup>,减小剩余污泥排放量可以延长污泥龄,增加生化池的污泥浓度,并使世代周期较长的自养菌在活性污泥中的比例得到提高,进而增强硝化作用。如图4所示,随着排泥量的减小,SRT 从 5.52 d 升至 11.9 d,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度下降明

显,由 19.7 mg/L 降至 0.49 mg/L,系统内的自养菌比例由 0.14% 升至 2.14%。硝化过程是通过氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)的共同作用实现的,二者均为自养菌,在活性污泥系统中的比例为 1.6% ~ 2.3%<sup>[8]</sup>。系统现有的 SRT 过低,使得自养菌浓度下降,这是导致该厂硝化效果较差的根本原因。当单个系列排泥量为 250 m³/d,即控制 SRT 在 7.65 d 时,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度可达排放标准,此时若继续增大 SRT 会提高生化池污泥浓度并增加二沉池的固体负荷,使出水 SS 值升高,但自养菌比例基本保持不变。另外,由于生化处理系统中脱氮过程与除磷过程的“污泥龄矛盾”<sup>[9]</sup>,SRT 的升高还造成了出水 TP 浓度的升高,超出了一级 B 排放标准。因此 SRT = 7.65 d 是自养菌比例变化的敏感点,SRT 继续延长对硝化过程的促进作用降低,且会导致出水 TP 的超标。



a. 出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  及自养菌比例



b. 出水 SS 和 TP

图4 不同排泥量下系统的自养菌比例变化及处理效果  
Fig.4 Variation of autotrophic bacteria and treatment effect under different sludge discharges

### 2.3 污泥回流比的影响

不同污泥回流比下系统的处理效果如图5所示。随着回流比的增大,生化池内的生物量增加,进而减少了二沉池的污泥停留时间,降低回流污泥浓

度,从而延长了 SRT。当回流比达到 50% (SRT = 7.62 d)后,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  可以达到排放标准。此时若进一步提高回流比,SS 和 TP 都存在超标的可能。该厂实际回流比为 27.5%,过低的污泥回流比不利于曝气池内生物量的增长,间接缩短了污泥龄,减少了自养菌在系统中的比例,进而导致了硝化效果较差。因此,提高污泥回流比至 50%,有利于改善系统对氨氮的去除效果。

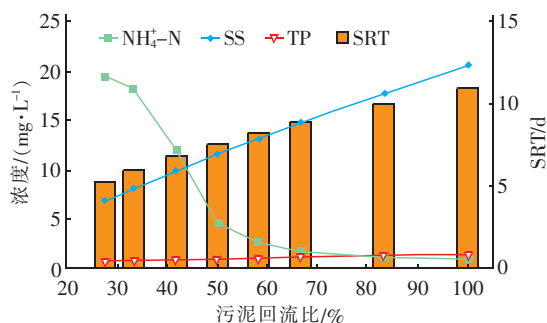


图5 不同污泥回流比下系统的处理效果

Fig. 5 Treatment effect under different sludge return ratios

## 2.4 填料分配方式的影响

在相同的投配比条件下,填料的分配方式也会影响系统的硝化效果。在填料的总投配比(25%)不变的情况下,按照三种方式进行投配,将填料集中投入1#和2#、1#和3#以及3#和4#反应器,且各反应器间的投配比为1:1。模拟结果如图6所示,在5种溶解氧水平下,第3种投配方式均可达到最优的氨氮去除率,这说明悬浮填料投配点越靠后,系统的硝化效果越好。且在低溶解氧条件下,此种投配方式的优势更为明显。

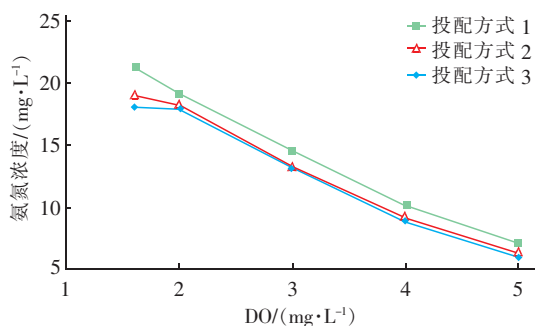


图6 不同投配方式下系统出水氨氮的变化

Fig. 6 Variation of effluent ammonia nitrogen under different dosing modes

在曝气池中投加填料是为硝化菌群提供生长载体,从而使其得到富集。在系统的4格曝气池中,

$\text{BOD}_5$  负荷呈逐渐降低的趋势,最后一格曝气池中的有机负荷最低,不利于异养菌的增殖,从而使硝化菌群成为优势菌种,实现了系统硝化效果的提升。

## 2.5 氨氮达标的优化策略

通过改变溶解氧、剩余污泥排放量、回流比和填料投配方式的模拟结果表明,单独改变某一工艺参数都能改善系统的硝化效果,其中溶解氧 $\geq 4.5$  mg/L、排放量 $\leq 250$  m<sup>3</sup>/d或回流比 $\geq 50\%$ 工况下出水氨氮均能达到一级B标准。另外,将填料集中投配于曝气池后两段的方式也有助于提高硝化效果。

然而,仅提高溶解氧带来的能耗增加巨大,在实际运行中并不可行;提高回流比需增开一台回流泵,也会增加能耗;减小排放量不会增加能耗,还能减少污泥处理成本,调节出水氨氮的效果也最直接和灵敏。因此,仅从氨氮达标的角度考虑,参数调节的优先序依次是排放量、回流比、投配方式和溶解氧。

## 3 试验验证

依据上述模拟优化结果,对该厂实际运行工况做出如下调整:①工况1,提高回流比 $>40\%$ ,运行3 d;②工况2,提高DO $\geq 6.5$  mg/L,运行3 d;③工况3,同时提高SRT $\geq 10$  d、DO $\geq 5.0$  mg/L,运行5 d。

经过短期调整后的出水水质如图7所示。在工况1中仅提高污泥回流比的情况下,出水TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值仍不能达标;在工况2中提高DO至6.5 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐降至6.9 mg/L;在工况3中继续保持高溶解氧并调整污泥龄,系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 保持平稳且平均为7.3 mg/L,达到一级B排放标准。由于该厂工艺并没有增加前置缺氧区,故对TN的去除效果不佳,出水TN浓度仍较高。

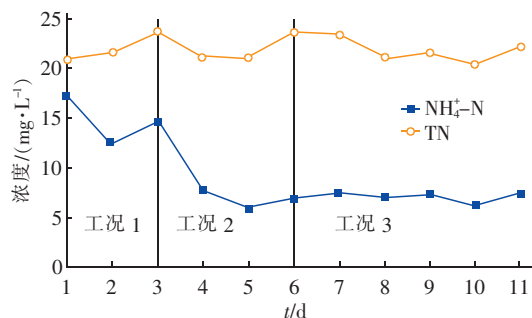


图7 三种工况下系统的硝化效果

Fig. 7 Effect of nitrification under three operation conditions

## 4 结论

① 模拟结果表明,调整溶解氧 $\geq 4.5$  mg/L、排



泥量 $\leq 250 \text{ m}^3/\text{d}$ 或回流比 $\geq 50\%$ 均可使出水氨氮达到一级B标准;将填料投配于生化池的后段能够改善硝化效果;参数调节的优先序依次是排泥量、回流比、投配方式和溶解氧。

② 生产性试验结果表明,同时增大污泥龄和溶解氧的方式可使出水氨氮稳定达标。

③ 实现该厂出水TN的达标需另外增加缺氧段,可进一步对该系统进行优化模拟。

#### 参考文献:

- [1] 廖榆敏,汤兵,陈秋雯. 移动床生物反应器启动特性研究进展[J]. 水处理技术,2011,37(2):5-8,22.
- [2] 王京城. MBBR工艺在废水处理中的应用研究进展[J]. 市政技术,2014,32(4):146-147,149.
- [3] 张有贤,王金相,李圣峰,等. A/O+MBBR组合工艺在炼油废水处理中的应用[J]. 水处理技术,2010,36(12):122-126.
- [4] 孟涛,刘杰,杨超,等. MBBR工艺用于青岛李村河污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水,2013,29(2):59-61.
- [5] 韩振波,孙从军,范宇. 基于BioWin的污水处理工艺模拟及优化分析——上海市松江西部污水处理厂一期改造工程[J]. 环境工程,2013,31(S1):233-239.
- [6] 刘成,王岩,邱显越,等. Biowin3模型在三峡库区污水

处理厂中的应用[J]. 现代农业科技,2016,(10):181,188.

- [7] 许洲. 基于ASM2D仿真模拟的特大型污水处理厂强化硝化工艺[J]. 净水技术,2015,34(6):85-89.
- [8] 唐书娟,吴志超,周振,等. 活性污泥系统中自养菌浓度及生长动力学参数测定[J]. 环境工程学报,2009,3(2):271-274.
- [9] 王建华,彭永臻,陈永志. 悬浮好氧生物膜 $A^2O$ 工艺处理城市污水的试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(12):3918-3922.



作者简介:庞洪涛(1980-),男,辽宁大连人,工学博士,高级工程师,主要从事水污染控制技术的研究与应用。

E-mail: panghongtao@tsinghua.org.cn

收稿日期:2016-10-12

#### · 企业动态 ·

### 赛莱默中国2016年水处理业务增长迅猛 开启智慧水务新征程

赛莱默(中国)有限公司在2017年1月10日举行的媒体会上宣布赛莱默2016在中国成绩斐然:公司成功实现了从提供泵到提供机组系统的转变,并推出了一系列新产品。2016年赛莱默中国业务的一大亮点就是其水处理业务迅猛增长,订单和项目规模都创历史新高,其中最典型的项目是为亚洲最大的地下再生水厂——北京槐房再生水厂提供全部的泵送和搅拌设备,为再生水厂的稳定运行保驾护航。

2016年,赛莱默扩大了沈阳生产基地的规模,增强了本地化能力,并通过加速产品国产化及新产品开发,推出了包括无负压二次供水机组、新型4320搅拌器、新型一体化泵站3.0和Compit以及热力机组等一系列新产品;新推出的智能控制系统IPS升级版使泵站的节能效率再提升10%~40%。过去一年,赛莱默的LEOPOLD曝气生物滤池、威德高(WEDECO)臭氧和紫外消毒系统等水处理业务主力产品在中国市场倍受客户青睐,所参与项目的规模与订单额度均有重大突破。

赛莱默公司中国总裁吕淑萍表示:“我非常高兴看到公司各项业务在2016年取得重大进展,这得益于国家高度重视环保和可持续发展的大势,以及我们赛莱默公司在水处理行业持续从客户实际需求出发,研发出能提高运营效率、保障水质并降低能耗和排放的产品技术。在空气和水污染严重、各行业都必须节能减排的今天,我相信我们很多产品比如臭氧系统,能够在包括造纸等工业在内的更多领域得到应用,从而助力于各行业的节能减排。以此实现我们赛莱默公司致力于环境和社区可持续发展的长期承诺。”

(赛莱默<中国>有限公司 供稿)