

工程实例

BNR 生物强化脱氮 + MBR 工艺升级改造污水厂

杨淑霞¹, 魏 迅¹, 严 勇², 李小军², 易海琴², 周秀凤¹, 迟海燕¹

(1. 国美<天津>水技术工程有限公司, 天津 300191; 2. 深圳水务<集团>有限公司, 广东深圳 528251)

摘 要: 某污水厂的生物池由原 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的 T 型氧化沟工艺升级为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的 BNR 生物强化脱氮工艺。泥水分离选用 MBR 工艺。为保障旱季、雨季、冬季、夏季及高浓度有机废水冲击等复杂工况下的实时处理效果, 配套建设了 Smart BNR 控制系统。全线运行后, 出水 $\text{COD} \leq 16 \text{ mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5 \leq 2 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 0.36 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 14.8 \text{ mg/L}$, 满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准(TN 除外)。整个膜车间的工艺设备系统总投资约 2 亿元, 平均电耗约 $0.19 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。目前该项目已顺利通过环境保护竣工验收。

关键词: 污水处理厂; 升级改造; 生物强化脱氮

中图分类号: TU992.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)08-0082-05

Retrofit of a WWTP by Biological Nutrient Removal and Membrane Bioreactor Process

YANG Shu-xia¹, WEI Xun¹, YAN Yong², LI Xiao-jun², YI Hai-qin², ZHOU Xiu-feng¹,
CHI Hai-yan¹

(1. USF <Tianjin> Water Technologies and Engineering Co. Ltd., Tianjin 300191, China; 2. Shenzhen Water Group, Shenzhen 528251, China)

Abstract: An aeration tank of a WWTP was retrofitted from the original T-shape oxidation ditch with capacity of $250\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ to BNR process with capacity of $400\,000 \text{ m}^3/\text{d}$. MBR process was applied for its sludge and effluent separation. To guarantee the real time effluent performance for difference seasons of dry, storm, winter, summer and the high organic wastewater load, etc., Smart BNR control system was applied. After full operation, the effluent COD, BOD_5 , $\text{NH}_3 - \text{N}$, and TN were no more than 16 mg/L , 2 mg/L , 0.36 mg/L , and 14.8 mg/L respectively, which stably met level IV criteria (except total nitrogen) of *Environmental Quality Standard for Surface Water* (GB 3838 - 2002). The whole equipment investment in the membrane workshop was about 200 million yuan, and the average electricity cost was $0.19 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$. Now it has passed the completion acceptance of environmental protection.

Key words: WWTP; retrofit; biological enhanced nitrogen removal

深圳某污水处理厂提标改造工程原设计总规模为 $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 包括一、二期工程。一期处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用 AB 工艺(B 段为 A/A/O 工艺); 二期处理规模为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用 T 型氧化

沟工艺^[1]。本次提标改造是在 T 型氧化沟(共 4 座)基础上实现 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的扩容提标改造, 出水水质由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准升级到《地表水环境质量

标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准(TN 除外)。

为了减少对实际运行的影响,改造分批次进行。2017 年 11 月底完成 2 座氧化沟的改造,2018 年 5 月中旬完成另外两座氧化沟的改造。改造期间一期运行规模为 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,二期运行规模为 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污水无外溢。2018 年 6 月初完成工艺自控系统调试。通过近半年的自控运行,虽然配套的附属设施(包括碳源投加系统、除磷药剂投加系统)仍未完善,出水水质依然基本达标,初步检验了该项目工艺路线设计的合理性和设备选型的可靠性。

1 工程背景

对 T 型氧化沟的扩容提标改造,经过比选多种处理工艺,最后选择了无新增池容、以缺氧曝气为核心理念的 BNR 生物强化脱氮工艺。为了缓解厂内占地紧张的局面,泥水分离单元选用占地最小的 MBR 工艺^[1]。厂内接收的污水既有附近片区的生活污水,又有某种高浓度难降解有机废水,所以水质、水量变化较大。为了保障生物处理单元的持续可靠性,兼顾节能的效果,采用与 BNR 生物强化脱氮单元相配套的 Smart BNR 控制系统;MBR 的中空纤维膜采用 SUEZ 公司的 ZW500 膜。

2 设计水质和工艺流程

污水厂经过整体改造后,出水水质需稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准

(TN 除外)。具体进、出水指标见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	进水	出水
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	250	6
COD/(mg·L ⁻¹)	550	30
SS/(mg·L ⁻¹)	550	6
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	35.0	1.5
TN/(mg·L ⁻¹)	42	15
TP/(mg·L ⁻¹)	5.6	0.3
设计最低水温/℃	15	—

注: TN 按 GB 18918—2002 一级 A 标准执行。

工艺流程见图 1。

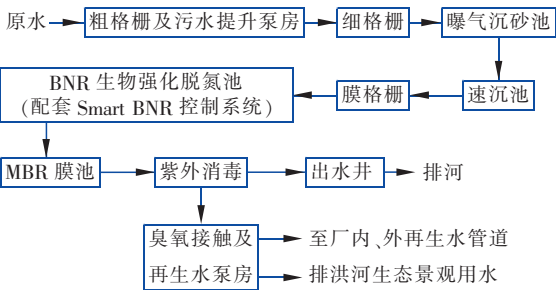


图 1 深圳某污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process of a WWTP in Shenzhen

针对进水水质,考虑预理工段具有一定的去除效果,则生物处理系统的进水水质见表 2。

表 2 生物处理系统进水水质

Tab. 2 Influent quality of biological treatment system

项目	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	COD/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	设计最低水温/℃
数值	225	495	330	35	42	5.6	15

汇总该厂 2011 年—2017 年的历史数据,结果 见表 3。

表 3 水量水质统计结果

Tab. 3 Statistical data of water quantity and quality

年份	水量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	COD/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
2010 年	29.82(均)	52~600	72~1 340	63~1 954	5.6~35.4	8.4~85.4	0.4~25.9
2011 年	30.28(均)	58~823	104~1 913	71~3 712	7.9~36.2	13.6~91.7	1.9~40.0
2012 年	22.5~39.1	23~628	110~1 485	38~2 189	4.4~33.3	7.3~86.0	0.8~21.7
2013 年	17.0~37.9	67~592	181~1 474	68~1 614	4.8~40.0	12.3~95.4	1.4~17.7
2014 年	19.9~40.8	43~830	125~2 075	80~2 205	6.6~65.9	16.2~95.2	1.6~26.8
2015 年	22.2~39.4	36~656	100~1 837	68~1 548	5.9~34.0	13.6~62.7	1.3~9.4
2016 年	21.0~40.3	55~714	118~2 373	67~3 458	10.6~37.4	14.7~89.5	1.5~20.7
2017 年	15.8~32.4	54~619	130~1 502	89~3 469	5.1~41.6	13.7~82.8	1.4~21.9

可见,该厂由于收水来源的复杂性,导致进水质、水量波动大,筛选工艺时不仅要考虑到池容、池

形的限制,还要兼顾水质水量特点,选择耐冲击负荷能力强的工艺路线。

2.1 主要工艺说明

① A^2O 与 BNR 生物强化脱氮工艺比选

A^2O 工艺设计参数:设计泥龄为 12 d,其中好氧泥龄为 9 d;MLSS 为 8 800 mg/L (MLVSS/MLSS = 0.5);总池容为 207 330 m^3 (其中好氧区为 142 801 m^3 ,缺氧区为 39 529 m^3 ,厌氧区为 25 000 m^3)。考虑到现状 4 座氧化沟的总池容仅 170 000 m^3 ,若选择 A^2O 工艺,则池容不满足要求。

BNR 生物强化脱氮工艺设计参数:总容积为 170 000 m^3 ,设计泥龄为 12 d (缺氧曝气工况下的综合泥龄);MLSS 为 8 800 mg/L (MLVSS/MLSS = 0.5);实际需氧量(AOR)为 7 015 kg/h。

从上述工艺参数对比可见,BNR 生物脱氮工艺比传统 A^2O 工艺节省约 18% 的池容, A^2O 工艺还需额外考虑三级回流,即从膜池到好氧,从好氧到缺氧,从缺氧再到厌氧。从对现有构筑物的适应性考虑,BNR 工艺优于 A^2O 工艺,故作为最终选择。

② BNR 工艺工程改造

所有对 T 型氧化沟的改造均在池内进行,为保障配水均匀性及操作灵活性,增加了进水总渠及进水闸门;为保障整体流程满足工艺要求,加设了出水渠及出水堰。每座沟道间新增尺寸为 4.5 m × 4.5 m 进水孔洞。

拆除原曝气转刷,每座氧化沟新增 24 台潜水推进器及底部曝气装置。第一沟道预留碳源投加位置,第三沟道预留除磷药剂投加位置。为便于控制,在第一沟道安装 ORP 仪表,在第二沟道安装 ORP 及 DO 仪表,在第三沟道安装 DO 仪表。为控制 MBR 在季节变更时出现的泡沫,在池顶设环管消泡装置。

改造后的 BNR 生物强化脱氮池平面布置如图 2 所示。

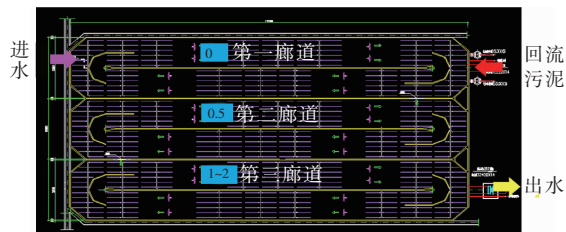


图2 BNR 生物强化脱氮池平面图

Fig. 2 Plan of biological enhanced nitrogen removal tank

由于该厂地处生活片区,周围高楼林立,故对系统的除臭、降噪要求较高;氧化沟顶部除了留出必要的设备维修、取样等操作空间,大部分面积设计了混凝土盖板并覆土绿化的方式,综合解决除臭及美化问题。

BNR 工艺改造实景见图 3。



图3 BNR 生物强化脱氮工艺工程改造实景

Fig. 3 Picture of retrofit biological nutrient removal process

2.2 BNR 生物强化脱氮工艺优势

① 土建改动量最小,所有改造均在现有氧化沟内部进行。

② 通过微孔曝气器和潜水推进器的联合工作,保留了原有氧化沟的流态,兼有推流式和完全混合式的特点,可大大稀释进水水质、水量的冲击负荷,减轻进水水质、水量变化对系统出水的影响。

③ 可实现同步硝化反硝化。

④ 微生物菌群结构的优化适应氨氮最大、最小浓度高达近 10 倍的波动环境。

因进水 SS 最大值和最小值之比高达 57.6,这将影响泥龄的控制;而 BOD_5 最大值和最小值之比高达 19.3,氨氮最大值和最小值之比高达 10.0,总氮最大值和最小值之比高达 11.4,这些指标波动范围如此之广,用一般手动调整的控制方式很难满足供氧与出水达标的平衡。故为了匹配生物处理系统设计,考虑采用 Smart BNR 控制系统。

2.3 Smart BNR 控制系统

为了实现 BNR 工艺强大的生物脱氮功能,Smart BNR 控制系统依据 ORP 控制原理(见图 4),按照工艺要求,控制各廊道在合适的 ORP 水平,使系统生物反应有序高效地进行。它是基于大量 BNR 工程经验积累和开发并经过多个工程验证的一种独特运算法则控制理念。

该厂原有 4 座 T 型氧化沟,改造后仍作为 4 座生化池,每池仍采用 3 段结构(3 个沟道),通过控制各廊道不同的溶解氧梯度和 ORP 范围,使整个生化系统在较低能耗下达到较高的污染物去除率。这三个廊道各设计一条空气干管,干管上安装曝气测控装置(流线型空气控制阀+热式气体流量计),在第

一沟道和第二沟道各安装一套 ORP 仪表,在第二沟道和第三沟道各安装一套 DO 仪表,通过仪表的实时监测来调节电动空气控制阀,从而调节供气量。

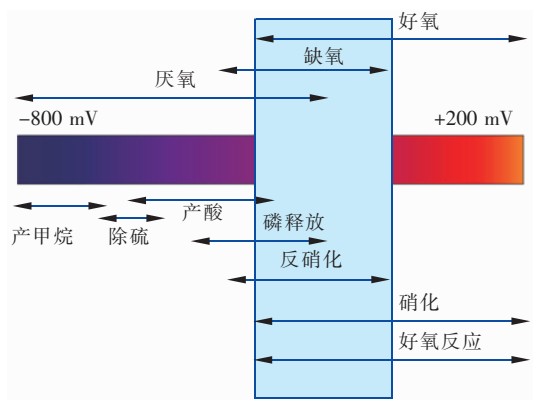


图4 ORP 控制原理

Fig. 4 Principle of ORP controlling

2.4 MBR

MBR 系统采用浸没式膜处理工艺,生物处理工段和膜过滤工段各自独立建设,其中膜过滤工段由膜池和膜车间组成。膜池分成4个系列共24格。通过进水渠道和回流渠道统一分配和汇合混合液,采用负压抽吸方式出水,变频控制,恒流量间歇运行。MBR 系统平均通量为 $25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,最大瞬时通量为 $28.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,膜池设计混合液浓度为 11 g/L ,最高运行上限可控制在 12 g/L 之内。

3 工艺及控制系统调试

该厂4座BNR生物强化脱氮池两两一组实施改造。第一、二座生化池改造完成后,从其他生化池直接引入活性污泥以缩短污泥驯化时间。为减少接种污泥量,直接引进浓度高的回流污泥。自接种污泥起即开启底曝系统和搅拌器,同时适量引入污水。

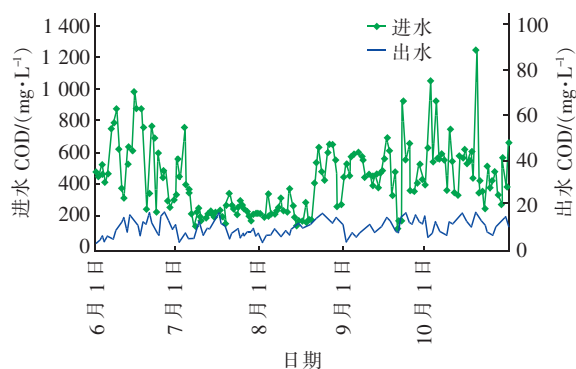
调试初期,进水量逐步增至 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,通过每天检测 BOD_5 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TN 的去除率来确定后一天的进水量,仅在取得了稳定的去除率且混合液浓度达到 $8000 \sim 9000 \text{ mg/L}$ 时,平衡4座生化池的进水量,使每座生化池的进水量稳定达到 $72000 \sim 84000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。当进水水量增加时,外回流量也相应增加,即按照400%的外回流比运行。为将硝化系统尽快建立起来,调试初期的泥龄控制在20 d左右。同步每天检测生化池内24 h混合样的 MLSS 、进出水 BOD_5 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TN 浓度。为使微生物尽快培养起来,每天只排少量泥或不排泥,使生化池内污泥浓度尽快达到 $8000 \sim 9000 \text{ mg/L}$ 。当生化池

内的混合液浓度稳定达到 $8000 \sim 9000 \text{ mg/L}$ 时,再逐步恢复设计泥龄(12 d)运行。

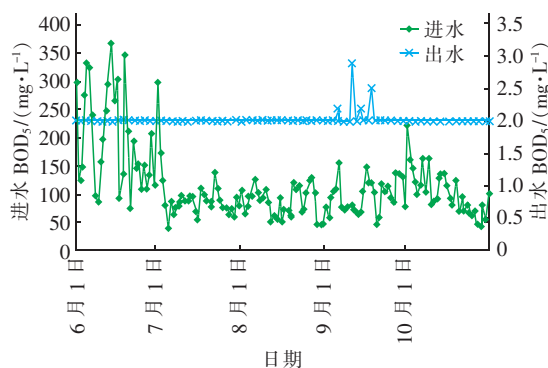
所有在线安装的仪表,包括 ORP、DO、TSS、气体流量计等优先经过校准。ORP、DO 等运行参数由 Smart BNR 控制系统根据工艺要求控制,通过调节每个廊道曝气干管上的电动调节阀门来实现,达到节能及稳定出水的目的。

4 运行效果

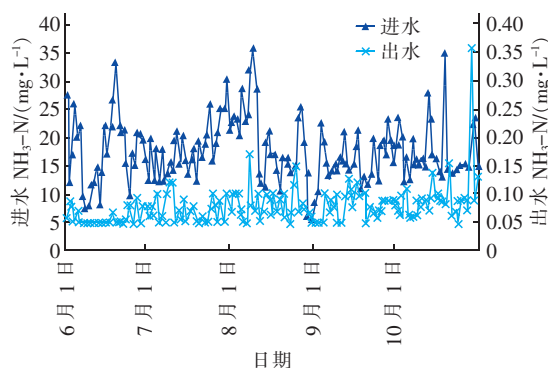
2018年5月中旬4座生物池改造完成,并进水调试;6月1日起在 Smart BNR 控制系统综合调控状态下运行。持续稳定运行5个月的数据见图5。



a. 进、出水 COD



b. 进、出水 BOD_5



c. 进、出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$

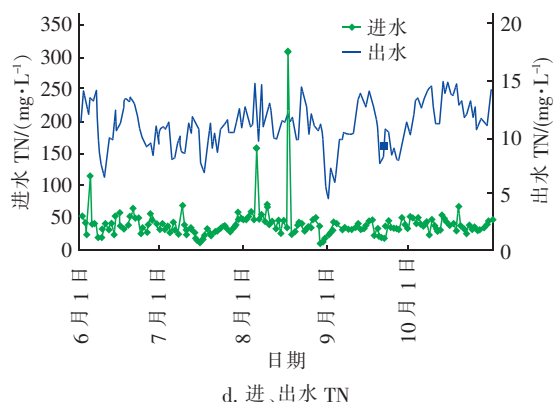


图5 连续5个月的系统运行监测数据

Fig. 5 Operational data of the treatment system for 5 months

进水 BOD_5 平均为 115 mg/L, 出水平均为 2 mg/L, 去除率为 98%。进水 COD 平均为 439 mg/L, 出水平均为 10 mg/L, 去除率为 98%。进水 NH_3-N 平均为 18 mg/L (波动范围: 5.4 ~ 35.8 mg/L), 出水平均为 0.08 mg/L (波动范围: 0.05 ~ 0.36 mg/L), 去除率为 99.6%。进水 TN 平均为 40.9 mg/L (波动范围: 15 ~ 308 mg/L), 出水平均为 11.1 mg/L (波动范围: 4.7 ~ 14.8 mg/L), 去除率为 73%。TN 的去除率与进水 BOD_5/TN 的比值关系密切, 因为反硝化过程需要硝化快速降解有机物, 系统 BOD_5/TN 的平均值仅为 3.1, 仅比理论反硝化的需碳量 (2.86) 略高。BNR 生物强化脱氮工艺主要用于生物脱氮, 最后靠投加除磷化学药剂保障出水磷浓度达标。

5 膜系统投资及耗电量

膜车间总投资约 2 亿元, 包括工艺设备 (膜擦洗鼓风机除外)、仪表、自控、安装及技术服务、调试运行等费用。膜车间总装机功率为 7 013 kW, 平均电耗约 $0.19 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。BNR 生物强化脱氮池和膜车间的平均电耗为 $0.24 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

6 结论

深圳某污水处理厂升级改造工程采用 BNR 生物强化脱氮 + MBR 工艺, 既满足对现状 T 型氧化沟的改造量最小化, 又满足了提标扩容需求。通过 5

个多月的自控运行, 出水水质稳定满足排放标准。

① 以缺氧曝气为核心理念的 BNR 生物强化脱氮工艺与 MBR 工艺结合, 生物池的池容无需增加, 工艺布局更紧凑合理, 可供现状污水厂占地面积受限时选用。

② BNR 生物强化脱氮工艺由 Smart BNR 控制系统自控运行, 既稳定了运行工况, 又提高了出水水质可靠性, 同时还节省了能耗, 降低了人工成本。

③ MBR 膜车间共 4 个系列, 每个系列含 6 座膜池, 共 24 座膜池, 单池处理能力为 $16\,667 \text{ m}^3/\text{d}$, 可为处理规模较大的 MBR 项目提供布局参考。

参考文献:

- [1] 刘杰, 徐桂淋, 阙添进, 等. 罗芳污水处理厂 MBR 生化段提标改造方案分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34 (10): 22 - 25.
Liu Jie, Xu Guilin, Que Tianjin, et al. Analysis on upgrading and reconstruction scheme of MBR biological stage in Luofang Wastewater Treatment Plant[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (10): 22 - 25 (in Chinese).



作者简介: 杨淑霞 (1976 -), 女, 天津人, 本科, 高级工程师, 技术总监, 研究方向为给水、污水、污泥处理处置。

E-mail: shuxia.yang@usf-tj.com

收稿日期: 2019-01-04