

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.12.017

$A^2O + MBR$ 工艺用于北方某再生水厂提标扩建工程

高伟楠

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要: 北方某再生水厂原设计规模为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用 CASS 工艺, 出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 B 标准, 需提标至北京市地方标准《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012) B 标准并扩容至 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。针对占地小、进水浓度高、出水标准高等难点, 新建工程 ($2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 采用多段多级 A^2/O 工艺, 提标工程 ($0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 改造原 CASS 池为 A^2/O 池, 新建与提标工程生物池出水一并接入 MBR 池, 并新增臭氧脱色措施以确保出水指标达标。实际运行数据表明, 出水水质稳定达标, 在进水水质达到或超过设计值的情况下, 出水氨氮、总氮均值分别为 0.7 mg/L 和 11.2 mg/L 。该工程在占地仅增加 85% 的情况下, 处理水量提升 2.75 倍, 扩建后吨水占地 $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$; 膜池膜组件曝气采用脉冲曝气方式, 能有效节能降耗, 并延缓膜污堵。

关键词: 提标扩建工程; MBR; 多段多级 A^2/O ; 脉冲曝气

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)12-0091-05

Application of $A^2O + MBR$ Process in the Upgrading and Expansion Project of a Water Reclamation Plant in North China

GAO Wei-nan

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: A water reclamation plant in north China, the original CASS process treatment capacity was $8\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ and the effluent quality was required to meet the first class B standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). It must be raised to B standard of Beijing local standard *Discharge Standard of Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (DB 11/890 - 2012) and expanded to $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. The upgrading and expansion mainly face difficulties such as scarce land occupation, high quality concentration of influent water, and the stricter effluent standards. Multistage A^2/O process was used in new construction project ($2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), and CASS process was transformed into A^2/O process in upgrading project ($5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$). The effluent of new construction and upgrading project flow into following MBR together, and ozone decolorization was also applied to ensure the design target. Actual operation results showed that effluent quality totally met the design standard. When the influent water quality reached or exceeded the design value, the average values of ammonia nitrogen and total nitrogen in the effluent were 0.7 mg/L and 11.2 mg/L , respectively. With the land occupation increase only 85%, the treatment scale is increased by 2.75 times. After the expansion, the plant occupies only $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$. The membrane module aeration adopts pulse aeration method, in order to effectively save energy and reduce consumption, and delay membrane fouling.

Key words: upgrading and expansion project; MBR; multistage A²/O; pulse aeration

1 工程概况

北方某污水厂于2015年建成投产,设计规模为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积约 1.62 hm^2 ,吨水占地 $2.025 \text{ m}^2/\text{m}^3$,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准。污水处理采用以CASS为核心的工艺流程,粗格栅及进水泵房及附属构筑物土建规模按照 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 设计,设备按照 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 安装,其余建(构)筑物设备及土建规模均为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

因污水厂已满负荷运行,依据相关规划需进行扩建,同时提标,并校核设计水质。本次提标扩建后再生水厂规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,是原规模的3.75倍,扩建后总占地面积 3 hm^2 ,是原占地面积的1.85倍,扩建后吨水占地 $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。提标扩建工程出水水质需满足北京市地方标准《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)B标准的要求。本次提标扩建主要面临占地小、进水浓度高、出水标准高等难点,设计时在占地能够满足要求的前提下,应尽可能优先利用原有土建及设备,并综合考虑投资、运行等方面因素,确定合理的工艺流程。

2 工程设计

2.1 设计进、出水水质

污水厂实际进水水质已超设计值,本次设计重新校核。为节省投资,选取90%保证率的实际进水水质与《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)A标准规定的限值水质的较小值作为本次设计水质,部分污染物超过排放限值的,应通过加强执法予以改善,当进水水质超过该保证率时,通过调整运行工况予以解决,提标扩建后的设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

mg · L ⁻¹						
项 目	BOD ₅	COD	SS	NH ₄ ⁺ - N	TN	TP
原设计进水	200	350	260	—	45	6
原设计出水	20	60	20	8	20	1
提标后设计进水	350	500	350	45	60	7
提标后设计出水	6	30	5	1.5	15	0.3

2.2 工艺流程及厂平面布置

近年来,伴随着MBR技术的日益成熟,其设备

费显著降低,从原来的吨水投资3 000元以上,下降到现在的600~1 000元,这使得MBR在国内得以进一步推广应用,并取得了不错的运行效果^[1-4]。本提标扩建工程采用生物处理+MBR主工艺。

由于工程占地紧张、出水水质要求高,经技术经济比选,新建工程生物池采用多段多级A²/O工艺;而提标工程中,为降低改造难度,将原CASS池改造为传统A²/O工艺,通过减产延长生物池停留时间来确保出水水质;提标与扩建生物处理出水一并进入MBR池,同时末端设置臭氧脱色,确保总体出水达标。

厂区平面布置见图1,西侧为现况用地,东侧阴影部分为本次新增用地。构筑物布置中尽可能减少水力转折,节约厂区管线费用。受用地限制,新建多段多级A²/O生物池、MBR池及设备间、臭氧接触池采用合建形式。

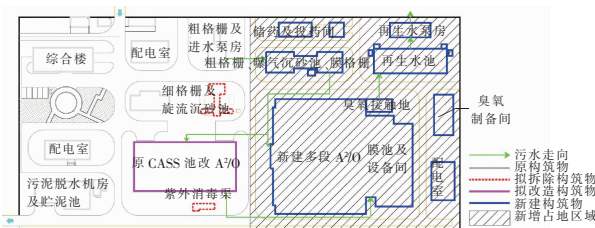


图1 污水处理厂平面布置

Fig. 1 WWTP plane layout

2.3 工艺形式选择

① A²/O与多段多级A²/O

目前我国绝大多数污水厂的生物处理都采用A²/O工艺或其变种,此工艺需要较大的硝化液回流量以满足脱氮的需求,一般控制硝化液回流比在200%~400%,以400%回流量计算,理论极限总氮去除率为80%,当回流比超过400%时,增加回流比难以进一步提升脱氮效率。多段多级A²/O即在传统的A²/O工艺基础上增加后置缺氧区,从而破除总氮极限去除率壁垒,通过分段进水(当原水碳源不足时在第二缺氧区投加外加碳源,类似于Bardenpho工艺),提高总氮去除效果。目前,多段多级A²/O及Bardenpho工艺已在国内很多污水厂广泛应用并取得良好的运行效果。北方某污水厂^[5]改造前为改良A²/O工艺,因进水总氮超标造成出水经常性超标,采用多段多级A²/O+MBBR工

艺实现了出水的稳定达标;姚伟涛等^[6]针对由生活污水与工业废水组成的低 BOD₅/TN 混合污水,采用具有较高脱氮除磷效率及碳源利用率的改良 Bardenpho 处理工艺,使污水处理系统运行稳定、高效;滕良方等^[7]对浙江某大型污水处理厂采用 Bardenpho - MBBR 工艺进行提标改造,生化段出水 COD、氨氮、TN 稳定达到了地表准Ⅳ类水质标准。经计算,本工程总氮去除率需达到 75% 以上方可达标,采用传统 A²/O 工艺对于 TN 的保障率较低,故本次设计新建生物池采用多段多级 A²/O 工艺 ($2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。而对于提标生物池部分,由于规模较小,为降低改造难度,采用传统 A²/O 工艺,通过减产延长生物池停留时间来确保出水水质,处理规模由 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 降为 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

② 膜池两期合建与分建

由于生化处理分为新建与提标两部分,且受场地制约,中间有一定的距离,对于后续 MBR 单元,可考虑合并建设 1 座膜池或分别建设两座与生化系统匹配的膜池。对合建与分建的综合效能进行了比选(见表 2),经分析,采用两期合建形式较分建形式具有一定的优势,因此最终确定膜池单元两期合建,在膜池内设置轴流泵回流污泥。

表 2 膜池两期合建及两期分建效能对比

Tab. 2 Effectiveness comparison of MBR joint and separate construction

项 目	两期合建膜池	两期分建膜池
规模/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	3	0.5 + 2.5
设计膜通量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	17	17
占地/($\text{m} \times \text{m}$)	44 × 28.8	41 × 26 + 27.5 × 7
设备/万元	2 745	2 920
总投资/万元	3 603.5	3 950
吨水投资(设备)/(元 · m^{-3})	915	983
运行成本(电费、药剂费 + 折旧费)/(元 · m^{-3})	0.318 + 0.329	0.320 + 0.354

③ 膜池脉冲曝气

MBR 工艺在节约占地的同时具有较高的出水水质,但能耗远高出传统工艺,也因此具有更高的节能潜力。杨敏等^[8]对清河再生水厂的研究表明,曝气是污水处理的常规工艺和 A²/O - MBR 工艺的主要耗能需求,采用脉冲曝气改造后节能效果明显。吨水能耗降幅为 20%,与此同时改造后的膜运行通

量增大约 20%;朱彩琴等^[9]亦得到了相似的研究结论,2 座污水厂 MBR 系统采用脉冲曝气代替传统曝气方式后,曝气量分别下降了 12% 和 31%;徐巍等^[10]的试验验证了 MBR 系统采用新型曝气(脉冲曝气)的运行能耗降低 14%,且能够延缓膜污堵反洗周期 1.2 倍以上。为节约膜池曝气量、延缓膜污堵,本次 MBR 曝气系统采用脉冲曝气方式。在这种曝气模式下,鼓风机连续运行,通过气体转换阀使气流在不同管路间循环,从而实现脉冲曝气。由于每个膜箱中的膜元件一半连接在同一根气管上,因此空气得以循环。这种脉冲曝气方式在工艺上和经济上均优于连续曝气。在工艺上,连续曝气常导致膜元件内形成气流通路,只能彻底清洗组件的一部分,而通过脉冲曝气,剪切力和气流都变得不稳定,可以有效防止气流通路的形成。连续运行的曝气装置还易发生堵塞,而脉冲曝气可以对曝气装置进行有效擦洗,显著减缓堵塞。

2.4 工艺设计

① 现况 CASS 池改造设计

现况生物池为 CASS 工艺,设计规模为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分设四个池(A、B、C、D),池内有效深度为 6.05 m,原停留时间为 19.9 h。改造工程通过增加导流墙,将 CASS 池重新划分,降低运行液位,同时增加污泥回流及内回流系统设计,将生物池改造成连续进水的 A²/O 工艺,并通过减产实现提标。经核算,将 CASS 池减产至 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

改造后,A²/O 生物池由厌氧、缺氧、好氧池组成,共分为四个系列,总水力停留时间为 25.23 h,MLSS 为 6 000 ~ 8 000 mg/L。设计好氧 - 缺氧回流比为 300%,每系列设置回流泵 1 台,单台 $Q = 187.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 8 \text{ kPa}$, $N = 2.2 \text{ kW}$;缺氧 - 厌氧回流比为 100%,每系列设置回流泵 1 台,单台 $Q = 62.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 8 \text{ kPa}$, $N = 0.4 \text{ kW}$ 。为保证脱氮效果,在缺氧区设置乙酸钠投加点。

② 新建多段多级 A²/O 生物池设计

新建多段多级 A²/O 生物池规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。分为两系列,每系列处理能力为 $1.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,由厌氧、缺氧、好氧、脱气、第二缺氧区组成,总水力停留时间为 19 h(其中厌氧区 2 h、第一缺氧区 2.5 h、好氧区 10.5 h、脱气区 0.5 h、第二缺氧区 3.5 h),MLSS 为 6 000 ~ 8 000 mg/L。设计好氧区 - 第一缺氧区回流比为 300%,每系列设置回流

泵两台,单台 $Q=750 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=8 \text{ kPa}$, $N=7.5 \text{ kW}$; 第一缺氧区-厌氧区回流比为 100%, 每系列设置回流泵 1 台,单台 $Q=500 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=8 \text{ kPa}$, $N=4.0 \text{ kW}$ 。为保证脱氮效果,在第二缺氧区设置乙酸钠投加点。

③ 两期合建膜池设计

膜池设计规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总变化系数为 1.45, 峰值流量为 $43\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ 。正常工况下, MBR 膜池污泥浓度为 $8\,000 \sim 10\,000 \text{ mg/L}$, 名义膜通量为 $17 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。设计 8 个膜池(7 用 1 备), 每列膜池净尺寸为 $13.5 \text{ m} \times 3.25 \text{ m} \times 3.7 \text{ m}$, 在每个膜列里安装有 5 个膜箱, 并预留一组备用空间。每列膜池中的膜箱呈单排布置, 所有膜箱都通过透过液母管连在一起, 透过液母管的另一端则连到透过液泵的吸入口。污泥混合液在透过液泵抽吸的作用下, 将干净的透过液送到出水池。污泥经回流污泥渠内设置的回流泵送至新建多段多级 A^2/O 生物池好氧区及现况 CASS 池改造 A^2/O 生物池好氧区, 最大回流比为 400%。MBR 设备间与膜池合建。

④ 其他配套工艺设计

除磷设计: 采用生物除磷辅以化学除磷, 化学除磷采用协调沉淀方式, 投加点位于 A^2/O 生物池缺氧区/新建多段多级 A^2/O 生物池脱气区。

鼓风机房: 现况鼓风机房土建设计规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 共安装罗茨鼓风机 3 台(2 用 1 备), 单台 $Q=23.1 \text{ m}^3/\text{min}$, $H=68.6 \text{ kPa}$, $N=45 \text{ kW}$ 。经复

核, 改造后 A^2/O 生物池最大需气量为 $45.8 \text{ m}^3/\text{min}$, 现况风机满足要求, 不再进行更换; 新建多段多级 A^2/O 生物池需气量为 $214.8 \text{ m}^3/\text{min}$, 新增空气悬浮鼓风机 3 台(2 用 1 备), 单台 $Q=108 \text{ m}^3/\text{min}$, $P=80 \text{ kPa}$, $N=179 \text{ kW}$ 。

加药间: 设置了碳源投加系统, 新建乙酸钠加药间, 投加 10% 乙酸钠溶液作为外加碳源, 最大设计投加量为 40 mg/L (NaAc 计); 对现况除磷加药间进行改造, 改为投加液体 PAC, 投加浓度 10%, 最大设计投加量为 80 mg/L (商品溶液计)。

细格栅、曝气沉砂池及膜格栅: 新建 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 细格栅、曝气沉砂池及膜格栅。细格栅共设置 2 条渠道(1 用 1 备), 渠宽为 $1\,600 \text{ mm}$, 栅条间隙为 6 mm ; 曝气沉砂池分为两系列, 共用一台桥式吸砂机, 均时停留时间为 8 min ; 膜格栅共设置 2 条渠道(1 用 1 备), 渠宽为 $1\,600 \text{ mm}$, 孔径为 1 mm 。

臭氧接触池: MBR 出水进入臭氧接触池脱色处理, 设计臭氧投加量为 5 mg/L , 接触时间为 15 min 。

再生水池: 臭氧接触池出水进入再生水池, 投加次氯酸钠消毒, 投加量为 10 mg/L , 再生水池水力停留时间为 2 h 。

3 实际运行效果

本再生水厂提标扩建工程于 2018 年完成, 2019 年 1 月开始通水试运行, 至今可全负荷运行, 其主要进、出水指标如表 3 所示, 在部分进水指标超过设计限值的情况下, 出水水质能够达到设计预期。

表 3 实际进、出水水质

Tab. 3 Actual influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	BOD_5	COD	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
实际进水	58 ~ 289.4 (151.3)	80.2 ~ 853.7 (255.4)	44 ~ 940 (259.1)	29.2 ~ 76.5 (44.9)	30.3 ~ 90.8 (58.1)	3.9 ~ 16.6 (7.6)
实际出水	0.56 ~ 5.65 (3.34)	7.9 ~ 31.3 (24.5)	2 ~ 8(4)	0.18 ~ 1.46 (0.7)	1.26 ~ 14.8 (11.2)	0.09 ~ 0.4 (0.2)

注: 括号内为平均值。

4 工程投资及实际运行成本

提标扩建工程总投资约 1.55 亿元。工程实际运行经营成本为 $1.85 \text{ 元}/\text{m}^3$, 其中电费为 $0.64 \text{ 元}/\text{m}^3$, 药剂费用为 $0.28 \text{ 元}/\text{m}^3$, 膜更换、人工、维护等其他费用为 $0.93 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

5 结论

针对占地小、进水浓度高、出水标准高等提标改造难点, 新建工程采用多段多级 A^2/O 工艺, 提标工

程改造原 CASS 为 A^2/O 池, 新建与提标工程生物池出水一并接入 MBR 池, 并新增臭氧脱色措施以确保出水指标达标。实际运行数据表明, 出水水质稳定达标。

参考文献:

- [1] 高飞亚, 李金河. Bardenpho + MBR 工艺用于污水处理厂的升级改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 99-101.

- Gao Feiya, Li Jinhe. Application of Bardenpho and MBR process in the upgrading and reconstruction of a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 99 – 101 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 刘焘, 党朝华. MBR 工艺在污水处理厂提标改造中的工程应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24): 92 – 94.
- Liu Tao, Dang Chao-hua. Application of MBR for upgrading and reconstruction of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(24): 92 – 94 (in Chinese).
- [4] 杨学贵, 肖晓文, 孙雁, 等. 昆明第四水质净化厂 MBR 工艺 7 年运行实践分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 121 – 127.
- Yang Xuegui, Xiao Xiaowen, Sun Yan, *et al.* Analysis of MBR of 7 years practical operation in the fourth wastewater purification plant of Kunming [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14): 121 – 127 (in Chinese).
- [5] 黄青, 周家中, 吴迪, 等. Bardenpho 镶嵌 MBBR 工艺用于北方某污水厂抗冲击性能[J]. 环境工程学报. DOI:10.12030/j.cee.201907108.
- Huang Qing, Zhou Jiazhong, Wu Di, *et al.* Study on the shock-loading resistance of Bardenpho – embedded MBBR process in a WWTP of northern China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering. DOI:10.12030/j.cee.201907108 (in Chinese).
- [6] 姚伟涛, 肖社明, 张永祥. 改良 Bardenpho 工艺处理低 BOD₅/TN 混合污水工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(14): 67 – 70.
- Yao Weitao, Xiao Sheming, Zhang Yongxiang. Project design of modified Bardenpho process for treatment of low BOD₅/TN mixed wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(14): 67 – 70 (in Chinese).
- [7] 滕良方, 吴迪, 郑志佳, 等. 某污水厂 Bardenpho – MBBR 准 IV 类水提标改造分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(11): 33 – 39.
- Teng Liangfang, Wu Di, Zheng Zhijia, *et al.* Upgrading and reconstruction to meet quasi class IV standard of surface water by Bardenpho – MBBR in a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(11): 33 – 39 (in Chinese).
- [8] 杨敏, 李亚明, 魏源送, 等. 大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2203 – 2209.
- Yang Min, Li Yaming, Wei Yuansong, *et al.* Energy consumption comparison and energy saving approaches for different wastewater treatment processes in a large-scale reclaimed water plant [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2203 – 2209 (in Chinese).
- [9] 朱彩琴, 周味贤, 矫甘来. 脉冲曝气在污水处理工艺中的节能应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(2): 95 – 98.
- Zhu Caiqin, Zhou Weixian, Jiao Ganlai. Application of pulse aeration to energy saving in sewage treatment industry [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(2): 95 – 98 (in Chinese).
- [10] 徐巍, 李勇, 唐传祥, 等. 新型曝气系统用于 MBR 一体化设备试验[J]. 环境工程, 2015, 33(10): 10 – 14.
- Xu Wei, Li Yong, Tang Chuanxiang, *et al.* Experiment of a new aeration system used in MBR integration equipment [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(10): 10 – 14 (in Chinese).



作者简介: 高伟楠(1989 –), 男, 内蒙古锡林浩特人, 硕士, 工程师, 主要从事给排水工程设计与水环境恢复研究等工作。

E-mail: 15801387865@126.com

收稿日期: 2020 – 01 – 08