

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.02.016

兰州雁儿湾污水处理厂原位提标MABR工程应用

张强^{1,2}, 李一¹, 夏海霞¹, 李伟^{1,3}, 骆平¹, 刘晨¹

(1. 北京恩菲环保股份有限公司, 北京 100038; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 兰州雁儿湾污水处理厂一线提标改造工程规模为 2×10^4 m³/d,在满足原位提标、池壁不增加负载、强化脱氮能力的需求下,采用MABR工艺实现出水水质提升至《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。该工程主要通过MABR膜箱进行新生化区域叠加设计与原生化功能区重组,强化生化处理效能。作为国内首例万吨级MABR市政污水提标改造项目,无需新增土建和停水施工。为期一年的监测表明,在未投加碳源条件下,改造后出水水质稳定满足一级A标准,出水TN平均仅为8.21 mg/L,运行成本降低约0.103 元/m³,节省运行费用约75万元/a。

关键词: 提标改造; MABR工艺; 强化脱氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)02-0101-04

MABR Application for In-situ Upgrading of Yanerwan WWTP in Lanzhou

ZHANG Qiang^{1,2}, LI Yi¹, XIA Hai-xia¹, LI Wei^{1,3}, LUO Ping¹, LIU Chen¹

(1. Beijing ENFI Environmental Protection Co. Ltd., Beijing 100038, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The line 1 upgrading project of the Yanerwan wastewater treatment plant (WWTP) in Lanzhou encompasses a scale of 2×10^4 m³/d. Adhering to the imperatives of in-situ upgrading, non-augmentation of pool wall loads, and reinforced denitrification capabilities, the membrane-aerated biofilm reactor (MABR) process is adopted to improve the effluent quality to the first level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The project primarily involved overlaying design of new biofilm areas using MABR membrane modules and reorganization of indigenous functional zones to strengthen biochemical treatment efficacy. As the first 10 000 m³/d MABR municipal wastewater upgrading project in China, this project required no civil construction and water cessation. One year of monitoring revealed that the effluent quality post-upgrade met the level A standard, with an average TN concentration of 8.21 mg/L, without additional carbon source. Additionally, operational costs decreased by approximately 0.103 yuan/m³, saving operation cost of about 750 000 yuan/a.

Key words: upgrading and reconstruction; MABR process; enhanced nitrogen removal

随着黄河流域环境保护的不断加强,城镇污水处理厂的污染物排放标准也日趋严格。兰州市政府已明确要求兰州雁儿湾污水处理厂执行《城镇污水

处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,这预示着各类污染物的排放限值将进一步被压缩。然而,由于规划用地的限制,该污水处理厂

无法获取新的土地进行扩建,因此只能在现有位置进行升级改造。为达到新的排放标准,采用高效的生化处理工艺并进行原位改造,是完成提标改造的有效路径。以该污水处理厂一线生化处理单元改造为例,在用地受限的条件下,利用膜曝气生物膜反应器(MABR)进行原位提标改造,完成国内首个万吨级MABR工艺的工程应用,从根本上解决现状脱氮能力不足的问题,实现了污水提质达标排放。

1 工程概况

该厂一线生化池现状采用AAO工艺,设计处理量为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,时变化系数1.3,设计水温 12°C ,设计MLSS为 $4.5 \sim 5.5 \text{ g/L}$,污泥龄为10 d,污泥回流比为100%~130%,硝化液回流比为250%。生化池尺寸为 $40.0 \text{ m} \times 41.7 \text{ m} \times 7.8 \text{ m}$,内设5个廊道,每个廊道宽8.0 m。廊道1和廊道2为厌氧区、缺氧区,廊道3~5均为好氧区,各功能区设计参数见表1。

表1 一线原AAO池设计参数

Tab.1 Original design parameters of AAO in line 1

功能区	有效容积/ m^3	所占总容积比例/%	停留时间/h
厌氧区	1 316	12.65	1.58
缺氧区	2 844	27.35	3.41
好氧区	6 240	60.00	7.49
总计	10 400	100.00	12.48

一线提标改造过程中主要面临两大挑战:水量

水质波动和复杂的工程建设问题。水量水质问题:

①进水量显著波动。受居民日常生活习惯影响,进水量昼夜变化幅度较大,时变化系数高达1.3,处理工艺需面对冲击负荷带来的问题。②低C/N导致脱氮能力不足。参考德国ATV-A131E标准中提出的反硝化相关参数概念(K_{de}),即硝态氮浓度与进水 BOD_5 浓度之比,用于评估生物池实现反硝化所需的 BOD_5 浓度。现状进水总氮(TN)约 60 mg/L ,在 $10 \sim 12^\circ\text{C}$ 的温度条件下, K_{de} 值为0.13。这意味着,若仅依靠进水碳源实现完全脱氮,进水 BOD_5 浓度至少需达到 344.6 mg/L 。由此可见,目前采用的AAO工艺在脱氮方面潜力有限,难以满足一级A标准,故需对原工艺进行改造。工程建设问题:①空间局限。一线生物池周围已无额外空间可供生化池扩容以提升水力停留时间。②池壁负载能力不足。一线生物池始建于20世纪80年代,采用结构承插式设计。经检测,池体混凝土的强度标准未达到现行的C20要求,因此不允许在生物池的池壁上增加任何额外负载。

2 改造思路及方案设计

2.1 设计水质

根据该污水处理厂实际运行数据,按照实际进水95%概率重新修正了设计进水水质,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,具体见表2。

表2 提标改造设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality of upgrading project

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

项目	BOD_5	COD	SS	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
进水	270	500	470	50	60	13
出水	10	50	10	5(8)	15	0.5
生物池实际进水(95%概率)	235	426	307	50.8	59.8	12.7

注: 括号外数字为水温 $>12^\circ\text{C}$ 时的控制指标,括号内数字为水温 $\leq 12^\circ\text{C}$ 时的控制指标。

2.2 改造思路

一线AAO生物池停留时间较短,导致处理效能无法充分发挥。改造的核心目标是在不增加额外用地的基础上,实现生物脱氮能力的强化,确保COD、氨氮、TN指标满足一级A标准,而TP和SS通过后续深度单元处理达标。为此,原位引入MABR工艺。该工艺结合了生物膜和膜分离技术的优点,通过在反应器内安装特殊的透气膜,为微生物提供附着生长的载体,并同时实现氧气的传递。

从技术原理来看,其核心优势在于无泡曝气、

异相传质以及独特生物膜结构^[1]。其中,无泡曝气显著区别于传统曝气方式中气泡产生和破裂所带来的能量损失,可降低能源消耗。氧气沿浓度梯度溶解扩散,减小了氧气的传质阻力,无需经液相边界层,直接供至生物膜,因此理论上氧气利用率可以达到100%;异相传质是指电子供体(污染物)和电子受体(氧气)具有“逆向扩散”特征^[2],有利于同步硝化反硝化等过程的发生,可提高脱氮效率;独特的生物膜分层结构可高效富集各功能菌群^[3]。

从工程应用的角度分析,其优势在于无需土建

动工,降低了施工成本和复杂度;安装工程量小,其主要工程集中在膜组件设备的安装上,且仅包含供气风机及膜箱,施工流程极简;施工周期短,全流程仅需约 15~30 d,提高了项目实施的效率;在施工过程中无需停水,保证了运行的连续性。

综合工艺应用成熟度、工期要求、土建条件、改造难度、不停水快速提标需求等多方面因素,最后该提标改造工程确定选用 MABR 工艺。

2.3 方案设计

2.3.1 功能区重构关系

经核算,原缺氧区的停留时间不足以满足新出水标准对 TN 的去除要求,而进水量波动带来的冲击负荷易导致风量难以及时准确适配,从而使好氧池溶解氧无法维持稳定,极易出现高溶氧环境通过硝化液回流冲击缺氧池环境的问题,从而影响 TN 去除率。因此,该工程的核心目标是新增缺氧区域,并降低回流硝化液中溶解氧的冲击影响。

利用 MABR 工艺的生物膜分层结构与异向传质特性,在原有区域内部以膜箱为单位,使用膜材料作为生物膜附着载体,氧气作为膜丝内部向外输送的气态底物,可有效构建额外的独特生化区域,从而变相补偿功能区有效容积。该项目选择将膜箱安装在缺氧池段,改造后池内功能区见图 1。

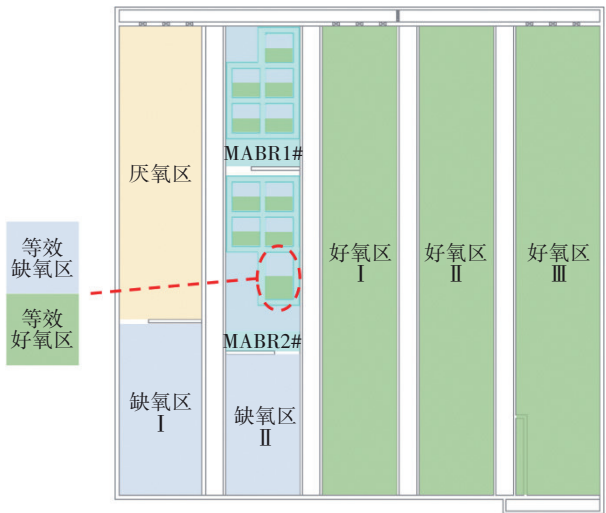


图 1 改造后生物池功能区划分

Fig.1 Functional zoning of biological tank after upgrading

通过在缺氧区安装 MABR 膜箱,可重构好氧(生物膜)-缺氧(生物膜)-缺氧(活性污泥)的新区域关系,通过自身提供的新增硝化能力来降低原系统硝化液回流比例,从而减少原系统内回流在水量

冲击负荷下带来的受迫性溶解氧冲击,提升缺氧系统整体的环境稳定性。由于氨氮的分子质量相较于易生物降解有机化合物更小,因此其在生物膜内部的扩散系数更高,促使氨氮在溶解氧充足的生物膜内侧优先完成硝化反应^[4],规避碳源被好氧降解的途径,充分利用原水碳源在生物膜缺氧外侧进行同步反硝化,并在此基础上利用原系统内硝化液回流带来的硝酸盐以增强系统反硝化能力。

2.3.2 膜箱设计及参数

MABR 膜箱总有效生物膜面积约 29 040 m²。共采用 20 个膜箱,分为 2 组以适应当前池型结构,采用单体独立悬挂安装,将膜组件以可调节的形式安装在漂浮式可拼装整体浮台上,防止池壁承担额外负载,也便于安装、运行与独立检修。新增 2 台独立变频风机,1 备 1 用,额定供气量 4 m³/min,轴功率 4.14 kW,进气压力为 39.2 kPa,平均分为 2 路供给 2 组膜箱,可通过背压阀单独调控每个膜箱膜丝内部压力。经生物膜利用后的尾气通过在线氧气含量测定后,再次为每个膜箱两侧的气提循环泵供气,从而达到提供膜箱内液体混合、尾气回收再利用的双重效果,气提后膜箱内上升流速约 42~63 m/h。生物膜控制系统的气源由原鼓风机系统提供,用气量极小(600 m³/d),并且由于 MABR 工艺本身可节省供气量,因此并不影响原曝气系统的供氧量。膜箱填充排开水体积为 11.6 m³,损失容积可忽略。

AAO 生物池改造后参数:MLSS 为 3.5~4.5 g/L;污泥回流比下调为 100%;硝化液回流比下调为 125%。对 MABR 膜组件提供的污染物去除能力进行池容等效负荷计算:在缺氧池嵌入 MABR 膜组件相当于等效增加好氧硝化容积约 1 185 m³,停留时间为 1.42 h;等效增加缺氧硝化池容约 1 259 m³,停留时间为 1.51 h。改造后等效池体参数见表 3。

表 3 改造后 AAO 池体设计参数

Tab.3 Design parameters of AAO after upgrading

项目	等效容积/m ³	占总容积比例/%	停留时间/h
厌氧区	1 316	10.25	1.58
等效缺氧区	4 103	31.94	4.92
等效好氧区	7 425	57.81	8.91
总计	12 844	100.00	15.41

2.3.3 不停水改造方案

MABR 不停水改造分为 3 个步骤。首先在现场进行稳固性整体浮台组装,并在浮台内部预先敷设

管道,仅留存对膜箱用接口。之后根据预先勘定位置,吊装浮台,并在浮台入水后完成各膜箱单体的独立悬挂安装。最后对管道进行连接,在预定位置完成鼓风机设备及仪表的安装。整个改造部分不需要停水,仅在浮台吊装过程中暂时关闭原池内搅拌机,提高水面平稳度与安装过程的安全性。

3 改造效果及经济分析

3.1 水质改善效果

2021年12月,仅花费1周即完成MABR提标改造现场吊装安装工作,随后进行生物膜挂膜与调试工作。挂膜完全在原有生化条件下进行,生化池温度为12.3℃。挂膜初期关闭生物膜控制系统,工艺曝气分两步,由50%供气量调整至100%,挂膜2个月开启生物膜控制系统。对改造后的一线生物池进行了为期1年的运行、监测,结果见表4。

表4 MABR提标改造后实际进、出水水质

Tab.4 Influent and effluent quality after MABR upgrading project $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	COD		TN		$\text{NH}_3\text{-N}$		TP	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
最大值	592.00	44.00	76.72	14.98	58.67	4.88	12.83	2.05
最小值	138.00	15.00	36.27	1.29	26.09	0.20	2.75	0.06
平均值	362.29	29.53	51.10	8.21	43.28	1.30	5.72	0.62
95%概率值	491.47	21.80	61.10	9.39	55.07	3.38	8.90	1.27

其间一线处理水量均值为 $1.96\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,与设计值基本一致。在水量昼夜冲击负荷大、冬季气温低的情况下,即使发生进水污染负荷大于设计值的情况,除TP指标由后续深度处理单元保障外,其余出水水质全部满足且明显优于排放标准,这表明MABR工艺具备较强的抗水量、水质及温度冲击能力。

3.2 技术经济指标

一线MABR提标工程总投资约500元/ m^3 。改造完成后,不仅处理能力得到较大提升,且无需额外投加碳源即可完成生物脱氮要求。对标该厂AAO工艺,降低总处理成本约0.103元/ m^3 ,包括无需投加碳源节省药剂成本约0.06元/ m^3 ;综合曝气系统效率提升,混合液回流比下调,减少电耗成本约0.013元/ m^3 ;控制污泥浓度下降约0.5~1.0g/L,减少污泥处理成本约0.03元/ m^3 。

4 结论及展望

通过漂浮式浮台单体悬挂安装等工程措施,

MABR工艺可实现快速高效的原位提标改造,且不会增加现有池壁负荷。运行结果表明,MABR工艺具备较强的抗水量、水质、温度冲击负荷能力。通过MABR膜箱可对现有各生化分区进行功能重构,出水水质不仅满足且优于排放标准,还可有效提高系统脱氮效能,提升原水碳源利用率、综合曝气效率等作用。采用该工艺改造可降低运行成本约0.103元/ m^3 。MABR技术作为新型先进水处理工艺,其工艺潜能仍处于探索过程中,需关注多方面工作,例如优化预处理以防杂质影响;选择合适膜载体并确保正确安装;建立系统监控机制与维护计划;持续研发高性能膜材料;引入智能化控制系统以提升效率与稳定性等。

参考文献:

- [1] WAQAS S, BILAD M R, MAN Z, *et al.* Recent progress in integrated fixed-film activated sludge process for wastewater treatment: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110718.
- [2] 陈晶,王冠平,石伟,等.单级MABR纯生物膜法处理市政污水的应用研究[J].中国给水排水,2022,38(11):74-78.
CHEN Jing, WANG Guanping, SHI Wei, *et al.* Application of single stage MABR pure biofilm for the treatment of municipal wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(11): 74-78 (in Chinese).
- [3] SANCHEZ-HUERTA C, MEDINA J S, WANG C Z, *et al.* Understanding the role of sorption and biodegradation in the removal of organic micropollutants by membrane aerated biofilm reactor (MABR) with different biofilm thickness [J]. Water Research, 2023, 236: 119935.
- [4] LIU H Y, LI L, YE W J, *et al.* Nitrogen removal from low COD/N interflow using a hybrid activated sludge membrane-aerated biofilm reactor (H-MABR) [J]. Bioresource Technology, 2022, 362: 127855.

作者简介:张强(1983-),男,湖北孝感人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水资源管理及污水处理技术。

E-mail: zhangq@enfiep.com

收稿日期:2024-01-15

修回日期:2024-04-02

(编辑:衣春敏)