

引用本文: 谭建国, 张鹏翔, 陈旭斌, 张俊, 邱慧. SBR+MBBR工艺在某市政污水处理厂总氮提标升级改造中的应用[J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(3): 252-257.

Citation: TAN Jian-guo, ZHANG Peng-xiang, CHEN Xu-bin, ZHANG Jun, QIU Hui. The Application of SBR+MBBR Process in the Upgrade and Retrofit of Total Nitrogen Standard Improvement in a Municipal Wastewater Treatment Plant [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(3): 252-257.

· 技术与应用 ·

文章编号: 1001-5493(2025)03-0252-06

DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2025030252

SBR+MBBR工艺在某市政污水处理厂总氮提标升级改造中的应用*

谭建国¹, 张鹏翔¹, 陈旭斌^{1**}, 张俊¹, 邱慧²

(¹物产中大公用环境投资有限公司, 杭州 310016; ²南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 基于序批式活性污泥法 (Sequential Batch Reactor, SBR) 和移动床生物膜反应器 (Moving-Bed Biofilm Reactor, MBBR), 浙江省某污水处理厂提标工程中, 针对系统冬季 SBR 生化段总氮 (TN) 脱除效果差的问题, 受限于 SBR 罐体结构及厂区可利用地, 在不新建水处理构筑物的条件下, 将原 SBR 池改造为 SBR+MBBR 反应器, 强化生化脱氮效果。提标后出水水质标准由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准提升至浙江省地方标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018), SBR+MBBR 工艺将生化段 TN 及总磷 (TP) 的去除率分别提升至 69.85% 和 79.3%。

关键词: MBBR, 提标, SBR, 钢罐反应器, 污水厂

中图分类号: X799.3 **文献标志码:** A

1 前言

浙江省某污水处理厂一、二期工程建于 2004 年, 处理规模为 6 万 m³/d, 处理工艺采用“粗格栅及进水提升泵房→预处理综合池 (细格栅+混合反应)→初沉池→SBR 选择池→SBR 池→缓冲池→高效沉淀池→反硝化深床滤池→接触消毒池→巴氏计量槽→外排”, 其中主体工艺采用 SBR 工艺, 由 12 组日处理能力为 0.5 万 t/d 的利浦罐反应器组成, 处理对象包括城区生活污水和印染、造纸企业工业废水, 生活污水与工业废水所占比例分别约为 80% 和 20%。2014 年该污水处理厂实施了提标工程, 增设了高效沉淀池及反硝化滤池, 强化了总氮 (TN) 及出水悬浮物 (SS) 的脱除效果, 出水水质稳定达到国家一级 A 标准。2018 年 7 月, 浙江省出台了《关于推

进城镇污水处理厂清洁排放标准技术改造的指导意见》, 要求推进现有日处理规模 1 万 t 及以上城镇污水处理厂清洁排放技术改造, 到 2022 年基本实现全省重点环境敏感区域日处理规模 1 万 t 及以上城镇污水处理厂达到浙江省地方标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)。该厂地处钱塘江水系上游, 属于重点环境敏感区域, 实施清洁排放技术改造迫在眉睫^[1]。通过对 2019 年 1 月—2020 年 12 月出水水质的逐项分析, 对照浙江标准, 出水 COD_{Cr}、氨氮、SS 相关指标均满足排放要求; 对照浙江标准指标 0.3 mg/L, 出水 TP 接近排放上限; 对照浙江标准指标 12 mg/L, 出水 TN 冬季有超标风险, 结合月平均出水指标分析发现, SBR 反应器总氮脱除效率仅为 28.52% 左右, 且脱除效率在冬季明显下降。为保证出水达标,

* 收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (基金号 BK20211286)。

作者简介: 谭建国 (1976—), 高级工程师, 注册公用设备工程师 (给排水)。

**通信作者: 陈旭斌, E-mail: chenxubin.2009@163.com.

当SBR出水TN浓度超标时,污水处理厂通过在后端反硝化滤池投加碳源强化脱氮,以保障出水TN达标。根据运行现状可知,随着冬季温度降低,SBR生化段脱氮效率下降(占总脱除效率<24%),反硝化滤池负荷迅速增加,其脱氮效率占总脱除效率的45%(冬季平均值)以上才可达到设计的出水水质标准,若不实施清洁排放技术改造工程,将存在排放超标的风险。

序批式活性污泥法(Sequential Batch Reactor, SBR)具有占地面积小、工艺简单、运行方式灵活等优点,但传统SBR工艺在有机物、氮、磷共存的情况下,由于反硝化过程与聚磷菌释磷过程存在碳源的竞争,且反硝化、硝化、碳化均在同一池内完成,脱氮除磷效果往往不佳,因此如何改进SBR工艺,如何有效解决碳源矛盾以提高氮、磷的去除效果已成为众多研究者的关注焦点。移动床生物膜反应器(Moving-Bed Biofilm Reactor, MBBR)工艺通过投加悬浮载体,使反应器形成悬浮态-附着态双泥龄系统,具有处理负荷高、抗冲击能力强、可灵活嵌入原工艺等优势,成为城镇污水处理厂提标改造的主流工艺之一^[2-3]。当前对活性污泥-生物膜复合工艺的研究多为连续流的IFAS工艺和A²O-MBBR工艺^[4],MBBR嵌入SBR及其衍生工艺的研究和工程应用较少,仅梅小乐等^[5]将MBBR+SBR工艺应用于寒冷地区的污水处理厂升级改造,该工艺将出水从一级B标准提升至一级A标准,但缺少其应用于一级A标准提升至类准四类的浙江地表排放标准的工程应用探索。

本工程以浙江某污水处理厂SBR二级工艺的老旧污水处理厂提标改造为基础,通过嵌入MBBR工艺,形成SBR+MBBR,强化生物脱氮除磷效果,提升系统冬季污水处理能力,为同类脱氮除磷功能低下且无新增用地的老旧污水处理厂更好地应用此类工艺提供参考。

2 提标改造方案

2.1 设计规模及进、出水水质

该污水处理厂设计处理规模为6万m³/d,结合该污水处理厂运营现状,2017—2020年实际处理量分别为1819.3、2056.3、2048.0、1963.4t,已逼近设计负荷,高峰期已超负荷运

行,2020年9月日处理量已高达6.7万m³/d。考虑到三期工程将扩容新建3万m³/d的处理规模,届时可弥补现有系统高峰期处理水量不足的短板,因此本次提标工程设计规模为6万m³/d。根据该污水处理厂实际进水水质,取80%~95%保证率下的进水水质指标进行分析,确定本项目进水水质。出水指标由一级A标准提升至浙江省地方标准《城镇污水处理厂主要污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)。设计进、出水水质详见表1。

表1 设计进、出水水质.

Table1 Design influent and effluent quality.

污染物 指标	COD _{Cr} (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N (mg·L ⁻¹)	TN (mg·L ⁻¹)	TP (mg·L ⁻¹)
进水水质	≤370	≤180	≤25	≤40	≤6
出水水质	≤40	≤10	≤2(4)	≤12(15)	≤0.3

2.2 提标改造工程难点

(1) 现有系统处理能力不足导致污水蓄积在管网内,造成管网淤积、管道的输送能力及运行可靠性降低。当污水管网的水量受到冲击时,特别是雨季汛期,易引发溢流污染问题。

(2) SBR池为已使用10年的利浦罐结构,结构改造难度极大。改造工期横跨汛期,改造期间现有系统存在极大的水量冲击负荷,改造期间污水厂不能停产、不能降标排放。

(3) 现有SBR处理系统脱氮除磷能力不足,存在出水TN超标风险,厂区污泥脱水系统未扩容更新,导致生化池内剩余污泥无法周期性排放,部分老化污泥积存在池内带来较大不利影响。

(4) 厂区围墙范围内可利用地块小且分散、不规则,不能满足提标工程相关设施建设的用地需求。

2.3 提标改造思路及工艺流程

首先,由于浙江省地方标准清洁排放对出水TN、TP的控制要求高于原设计,TN、TP出水浓度稍有超标,且现有工艺TN排放季节性波动明显,尤其在冬季加大了TN超标排放的风险。其次,本工程较低的进水强度及BOD₅/TN导致SBR单元污泥负荷低于设计值(0.025 kg BOD/kg MLSS·d),影响了SBR生化段反硝化效果,导致反硝化滤池存在负荷过高的问题。最后,SBR生物选

择池、SBR 反应池均为圆柱型的利浦罐结构，分区扩容等结构性改造难度大，提标工程难以对主生物反应单元的容积进行改良。因此，提标工艺选择的主要思路如下：

(1) 针对 TP 稍有超标风险的问题，建议在原有高效沉淀池增加聚合氯化铝 (Polyaluminium Chloride, PAC) 投加量。

(2) 针对现有处理效果季节性波动造成 TN 超标排放的问题，为提高 SBR 生化段的 TN 脱除效率，避免 TN 超标排放的风险，将现有 12 组 SBR 工艺改造为 SBR+MBBR 工艺。

根据改造期间污水处理厂不能停产、不能长时段减量、不能降标的要求，需对 12 组 SBR 池依次逐个改造。在单个 SBR 池改造期间，为保证污水处理不减量、不降标，在一、二期减产期间，对其进水量与三期项目适时调配，做到协同处置。通过合理设计以及合理安排施工，尽可能避免污水处理厂停产或短时间停产、减产。同时，考虑相关污水临时处理措施与三期工程的水量调配，确保在扩容工程建设期间污水达标排放。合理安排 SBR 池改造的工序和时序，避免与汛期水量形成冲突，施工前提前修复 SBR 池的放空管路，使其出水接通至三期进水管跌水井，尽量压缩改造工期。综合以上分析，确定本次提标工程的工艺流程如图 1 所示。

2.4 提标改造工程设计

2.4.1 工艺改造

将现有 12 组 SBR 工艺改造为 SBR+MBBR 工艺，改造时对现状 SBR 生物池进行改造，保留现状选择区、主反应区池容不变，在主反应区中设置 MBBR 区，并在其中设置悬浮生物膜载体及进出水拦截系统，防止生物膜载体随水流失。为保证悬浮生物膜载体不损伤现状池壁，考虑在原有利浦罐内壁增设耐磨涂层。

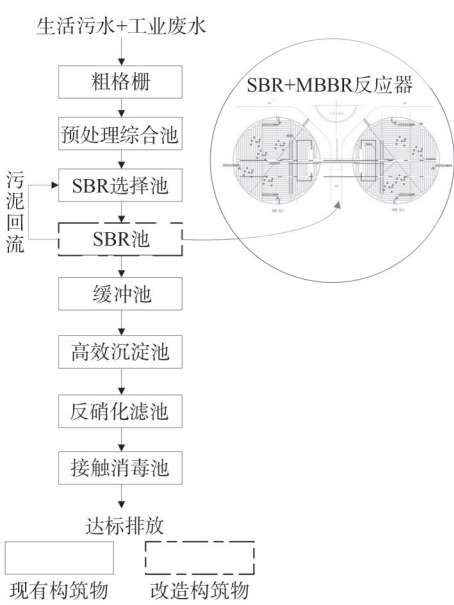


图1 提标工程处理工艺流程图.
Figure 1 Process flow chart of upgrading project.

SBR+MBBR 系统设计主要参数：反应器为直径 32 m、容积 5000 m³ 的钢罐，填料有效比表面积≥400 m²/m³，拦截筛网的过流面积根据流速进行计算 (其中流速≤0.05 m/s)，筛网孔隙率一般为 38%~40%。池内曝气设备使用原有膜盘曝气装置。具体改造如图 2 所示，改造系统设备清单见表 2。

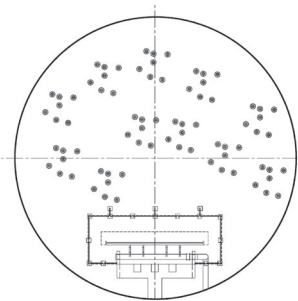


图2 SBR+MBBR 改造平面布置图.
Figure 2 Layout chart of SBR+MBBR reactor .

表2 主要设备.
Table 2 Main equipment.

序号	设备名称	规格参数	数量
1	MBBR 专用推流器	$\varphi=1000\text{ mm}$, $N=5.5\text{ kW}$	36 台
2	进出水拦截系统	不锈钢 304 材质	12 套
3	滗水器	$Q=1245\text{ m}^3/\text{h}$, $H=2.26\text{ m}$, $N=1.5\text{ kW}$	12 台
4	MBBR 填料	有效比表面积 $\geq 400\text{ m}^2/\text{m}^3$, 聚氨酯材质	1830 m ³
5	曝气设施	膜盘曝气	12 套

2.4.2 工艺控制系统优化

现状单个SBR反应池每批次运行周期为6 h，其中进水1 h(边进水边曝气)，反应2 h，沉淀1.5 h，排水1.5 h。在SBR反应池增加反硝化搅拌器后，进水阶段调整为不曝气。

调整每个周期的进水阶段时长，进水时间不变，缩短反应时间至1 h，沉淀1 h，排水1 h，有效提高反硝化的效果，提高TN的去除能力；冬季运行期间，该地区每年11月中旬至次年3月中旬，生物池平均水温<12℃，污泥中微生物新陈代谢速度减缓，分解作用降低，需调整运行时间，每周期增至6 h以上^[5]。在冬季将现有三期工程深度处理段磁混凝沉淀污泥投加至SBR反应池内，提高污泥的沉淀效率，减少沉淀时间，进一步提高系统对氨氮、TN的脱除能力以及系统冬季污水处理量。

3 运行效果与经济分析

2022年12月提标工程完成并投入使用，SBR生化段出水水质主要指标TN数据如图3所示。提标工程SBR反应器TN脱除效率由原来的28.52%左右提升至69.85%左右，且脱除效率在冬季明显好转，进水条件改用搅拌方式替代曝气搅拌，充分保障了反硝化所需的缺氧条件，利用MBBR悬浮填料固定并富集优势硝化细菌，强化了硝化性能^[6]。改造后深度处理段的反硝化滤池内碳源投加量明显下降。根据运行现状可知，在优化后的两级脱氮系统中，SBR生化段及反硝化滤池段的脱氮效率占比分别为85%和15%，与路晖等^[7]关于MBBR脱氮的研究符合，并且实现了生化段脱氮满足TN排放标准。

在未投加化学除磷药剂的情况下，SBR生化段出水水质主要指标TP数据如图4所示，改造前平均进水TP为2.86 mg/L，平均出水TP为0.81 mg/L，平均去除率为70.9%；改造后，

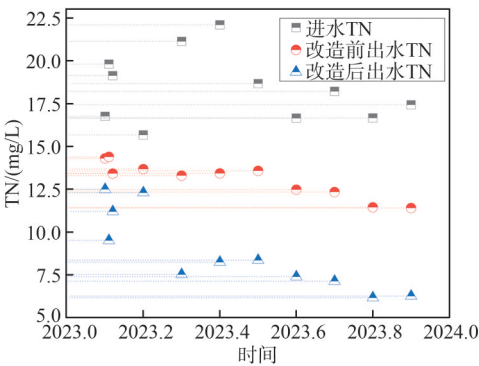


图3 出水TN水质情况.

Figure 3 The statistical graph of the influent and effluent concentrations of total nitrogen .

2023年平均进水TP为3.05 mg/L，平均出水TP为0.63 mg/L，平均去除率为79.3%，去除率同比提升8.4%。

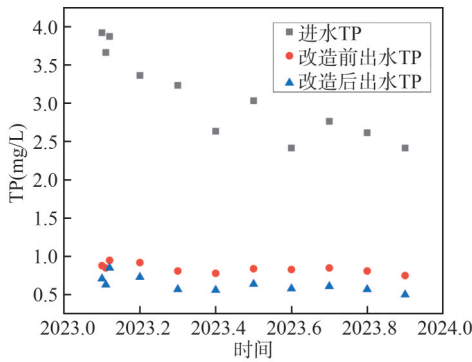


图4 出水TP水质情况.

Figure 4 The statistical graph of the influent and effluent concentrations of total phosphorus.

4 技术经济分析

本SBR+MBBR工艺改造项目总投资约为1900万元，项目投产后，直接运行成本增加0.024元/t。其与常规的活性污泥法A²/O (Anaerobic-Anoxic-Oxic) 及膜生物反应器 (Membrane Bio-Reactor, MBR) 在市政污水处理厂提标改造中的技术经济对比分析见表3。

表3 技术经济对比.

Table 3 Technical and economic comparison.

比选项目	活性污泥法A ² /O	SBR+MBBR	MBR
万吨水设备投资	150~200元	300~450元	1000~1200元
占地面积	7000~8000 m ² /万t水	较常规工艺节约30%	小
直接运行成本	0.04~0.05元/t	0.06~0.08元/t	0.7~0.8元/t
运行维护要求	低	较低	高, 定期冲洗维护

5 结 论

(1) 清洁排放技术提标改造工程处理规模为6万m³/d, 针对SBR工艺反硝化内回流不可控、TN脱除效果差的问题, 采用了SBR+MBBR工艺, 通过优化反硝化的适宜环境条件, 包括控制有效的停留时间、溶解氧含量、反硝化细菌的富集浓度、脱氮混合搅拌强度等, 最终实现了污水处理厂SBR生化段TN的高效去除, 降低了后续反硝化滤池的运行成本及运行压力, 实现了系统高标准排放。提标后出水水质标准由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准提升至浙江省地方标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—

2018)。该提标改造工程在未新建水处理反应池的条件下, 挖掘了现有生化处理系统的脱氮潜力, 解决了SBR工艺在冬季出水TN去除率极低的问题, 可在同类污水处理厂提标改造项目中应用推广。

(2) SBR+MBBR工艺在高负荷、冬季低温状态且未投加碳源的情况下能大幅提升原SBR生化段去除TN的能力, 生物除磷的能力略有增长, 为进水碳氮比低、建设用地紧张的老旧污水处理厂工艺升级改造提供了可行的方向。

(3) SBR+MBBR工艺仍有较大的挖掘潜力, 下一步可研究其对新型污染物多环芳烃及其衍生物等持久性有机污染物的去除效果, 提升城镇污水处理厂的抗冲击负荷能力。

参考文献

- 1 俞勇, 王久龙, 倪黄蕾, 等. 浙江省某污水处理厂清洁排放技术改造设计实例[J]. 水处理技术, 2022, 48(6): 152-156.
- 2 周祯领, 吴迪, 韩文杰, 等. MBBR镶嵌氧化沟在某污水处理厂的提标效果分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 1-6.
- 3 吴生余, 汤嵩瑜, 胡婷婷. CAST-MBBR工艺在污水处理厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(Z2): 43-46.
- 4 曾正仁, 牟菁, 白华清, 等. A²O-MBBR+反硝化深床滤池工艺用于污水处理厂提标扩能[J]. 水处理技术, 2024, 50(9): 152-156.
- 5 梅小乐, 代博, 杨红, 等. MBBR+SBR工艺用于寒冷地区污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2021, 41(3): 125-128.
- 6 吴迪, 周家中, 郑志佳, 等. MBBR用于山西某污水厂提标改造效果分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 6-11.
- 7 路晖, 辛涛, 吴迪, 等. MBBR工艺在污水处理厂提量增效中的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 100-105.

Technology and Application

The Application of SBR+MBBR Process in the Upgrade and Retrofit of Total Nitrogen Standard Improvement in a Municipal Wastewater Treatment Plant

TAN Jian-guo¹, ZHANG Peng-xiang¹, CHEN Xu-bin^{1*}, ZHANG Jun¹, QIU Hui²

(¹Wuchan Zhongda Utility & Environment Investment Co., Ltd., Hangzhou 310016, China; ²School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Jiangsu Provincial Key Lab for High Technology Research on Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Based on the sequential batch reactor (SBR) and the moving-bed biofilm reactor (MBBR), a sewage treatment plant in Zhejiang Province has upgraded its standards to address the issue of poor nitrogen removal efficiency in the SBR biological stage during the winter. Due to the limitations of the SBR tank structure and the available land within the plant, the original SBR tank was transformed into an SBR+MBBR reactor without

constructing new water treatment structures, thereby enhancing the nitrogen removal effect in the biological stage. After the upgrade, the effluent quality was improved from Class A of the *Urban Sewage Treatment Plant Pollutant Discharge Standard* (GB 18918—2002) to the local standard of Zhejiang Province, the *Urban Sewage Treatment Plant Main Water Pollutant Discharge Standard* (DB 33/2169—2018). The SBR+MBBR process increased the removal rates of total nitrogen and total phosphorus in the biological stage to 69.85% and 79.3%, respectively.

Keywords MBBR, Upgrading project, SBR, Steel tank reactor, Sewage treatment plant

* Corresponding author: CHEN Xu-bin, E-mail: chenxubin.2009@163.com.