

张申旺, 杨硕, 张向阳, 等. 某污水处理厂 MSBR 工艺升级改造为 MBBR 工艺的工程应用[J]. 净水技术, 2023, 42(10):173-178.

ZHANG S W, YANG S, ZHANG X Y, et al. Engineering application of upgrading and reconstruction of MSBR process to MBBR process in a WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10):173-178.

某污水处理厂 MSBR 工艺升级改造为 MBBR 工艺的工程应用

张申旺¹, 杨硕², 张向阳^{2,*}, 张彦浩²

(1. 济宁市城市水务服务中心, 山东济宁 272000; 2. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101)

摘要 某污水处理厂原有主体工艺为改良式序列间歇反应器 (MSBR), 处理规模为 20 万 m³/d。由于水量增加、水质波动与冬季低温的影响, 无法满足新排放标准的要求, 需要进行升级改造。该工程实例根据计算确定填料体积以及好氧池、厌氧池容积, 在污水处理厂原址基础上对 MSBR 池体构造进行重新布置, 并配合设备的改造。将 MSBR 工艺改造为移动床生物膜反应器 (MBBR) 工艺, 使出水氨氮、TN 质量浓度由原来满足限值 5(8)、15 mg/L 升级到满足限值 1.5(3)、10 mg/L。MBBR 工艺在生物池内增加了大量填料, 微生物浓度高, 脱氮效果好, 在无法增加占地的污水处理厂的升级改造中具有明显的优势。

关键词 污水处理厂 升级改造 MBBR 工艺 MSBR 工艺 脱氮 工程应用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2023)10-0173-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.10.022

Engineering Application of Upgrading and Reconstruction of MSBR Process to MBBR Process in a WWTP

ZHANG Shenwang¹, YANG Shuo², ZHANG Xiangyang^{2,*}, ZHANG Yanhao²

(1. Jining City Water Service Center, Jining 272000, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract The original main process of a wastewater treatment plant (WWTP) is the MSBR process, with a treatment capacity of 200 000 m³/d. However, due to the increase in water volume, fluctuations in water quality, and low winter temperatures, it is unable to meet the requirements of the new discharge standards and needs to be upgraded and reconstructed. Based on the calculated volume of fillers and the capacity of aerobic and anaerobic tanks, this engineering example rearranges the structure of the MSBR tank on the basis of the original site of the WWTP, and cooperates with equipment renovation to transform the MSBR process into the MBBR process, upgrading the effluent mass concentration of ammonia nitrogen and TN from the original limit of 5(8), 15 mg/L to meet the limit of 1.5(3), 10 mg/L. The MBBR process has added a large amount of fillers in the biological tank, with high microbial concentration and good denitrification effect. It has obvious advantages in the upgrading and renovation of WWTPs that cannot increase land occupation.

Keywords wastewater treatment plant (WWTP) upgrading and reconstruction MBBR process MSBR process denitrification engineering application

氮、磷一直是污水处理领域最受关注的元素, 脱氮除磷是污水处理厂的重要任务。为了应对我国更高的环保要求, 近年来对氮、磷的排放限值更为严格。出水排入敏感水域的排放标准在一级 A 标准

基础上进一步提高, 氮、磷等营养元素指标向地表Ⅳ类、Ⅲ类水靠拢^[1]。因此, 很多污水处理厂的提标改造势在必行。某北方市政污水处理厂已投产运行多年, 原主体工艺为改良式序列间歇反应器 (modified sequencing batch reactor, MSBR), 总处理规模为 20 万 m³/d, 原设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准。主要存在的问题是当进水水质波动或冬季低温时, 出水 TN 有时达不到一级 A 标准, 难以达到更

[收稿日期] 2023-03-19

[基金项目] 山东省自然科学基金项目 (ZR2020ME222)

[作者简介] 张申旺 (1965—), 男, 高级工程师, 主要从事城市排水管理工作, E-mail: zswjnpse@163.com。

[通信作者] 张向阳 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为污水处理, E-mail: xyz88@sdjzu.edu.cn。

严格排放标准的要求。而且,随着城市的发展,污水量也有所增加,需要进行扩容。通过将 MSBR 生化池升级改造为移动床生物膜反应器(moving bed biofilm reactor, MBBR)生化池,污水处理厂解决了原工艺不能稳定达到更严格标准的问题,取得了很好的效果。

1 MSBR 工艺与 MBBR 工艺

1.1 MSBR 工艺

MSBR 是 Yang 等^[2]根据序批式活性污泥法(SBR)技术特点结合厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺研究开发的一种污水处理系统,其综合了 AAO、SBR 等工艺的特点,脱氮除磷能力较传统 AAO 工艺更强。该工艺采用单池多格设计,可连续进水、连续出水,具有占地面积小、运行成本低、脱氮除磷效果较好、空间构型和周期变化设置灵活等优点^[3],其集约化、一体式的设计理念符合我国国情,在国内很多污水处理厂中一度发挥了非常重要的作用。

常规 MSBR 工艺流程如图 1 所示,采用单池多方格形式布置,系统在恒定水位下连续运行。MSBR 工艺是同时进行生物除磷及生物脱氮的污水处理工艺,碳利用率高,因此,脱氮除磷效果较好^[4]。然而,由于该系统各格互联、交替操作,且通过选择、组合与取舍操作步骤,调整各工序时间来控制运行,其运行控制和 AAO 工艺的运行控制相比,更为复杂^[5]。此外,受到进水冲击及同步脱氮除磷固有矛盾的影响,厌氧池、缺氧池、曝气池之间容积比不合理、气水比过高等问题,都会限制同步脱氮除磷过程,从而造成在实际运行过程氮、磷去除效率偏低,最终导致污水处理厂出水中的氮、磷指标难以同时达到一级 A 标准^[6]。当进水水质出现波动变化时,需要建立较为复杂的控制系统,才能得到理想的脱氮除磷效果。对于进水水质波动但出水又必须稳定达标的污水处理厂来说,MSBR 的短板较为明显。

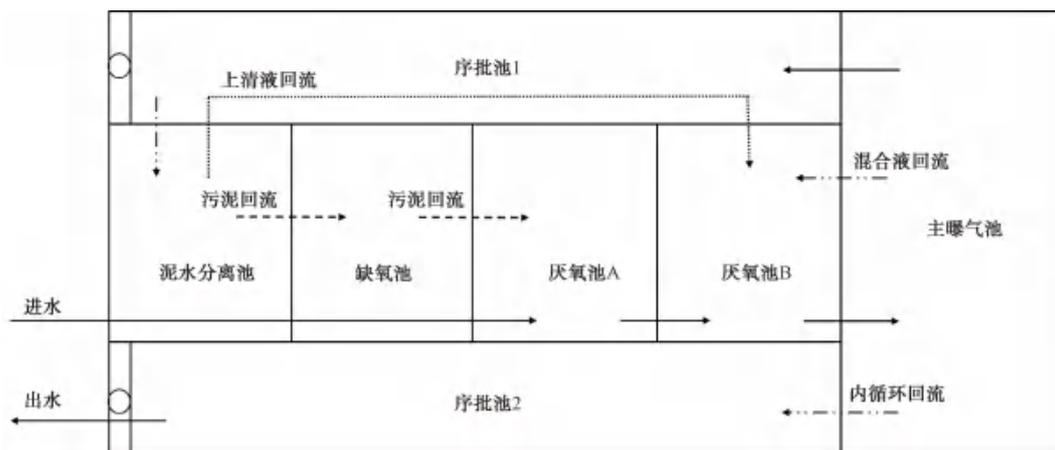


图 1 MSBR 工艺流程

Fig. 1 Process of MSBR

1.2 MBBR 工艺

在进水水质水量波动和冬季低温的情况下,常规 MSBR 生化池不能稳定保证出水 TN 和 TP 达标,因此,在 MSBR 基础上对污水处理厂进行升级改造一时成为非常迫切的需要。然而,城市的快速发展导致污水处理厂用地矛盾尖锐突出,大多数新建污水处理厂都面临着用地窘境,污水处理厂扩建与改造更是存在缺地的困难。MBBR 以其微生物浓度更高、脱氮效率更高的特点,特别适用于在不增加占地的前提下对现有污水处理厂进行扩容和提高出水水质的升级改造^[7]。

MBBR 实质上是一种基于特殊结构填料的生物流化床技术,该技术在同一个生物处理单元中将生物膜法与活性污泥法有机结合,有利于提高生物膜与氧气的接触和传质效率,提升反应池的处理能力和处理效果,增强系统耐冲击负荷的能力(包括有毒化合物浓度变化)^[8-9]。悬浮载体是 MBBR 工艺的核心部分,其性能对于生物膜的形成、生长及对污染物的去除效果有着关键作用^[10-11],国内市场上大多数 MBBR 悬浮填料可供生物膜附着的有效比表面积在 $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 以上^[12]。填料内部生长着大量厌氧菌或兼氧菌,而其外部为好氧菌,使填料及其周

边同时存在硝化反应和反硝化反应,因此,大大提高了脱氮效率。MBBR 还可以通过对核心微生物进行专性富集、固定培养,从而强化脱氮除磷效果,提高污水处理厂生化处理稳定性与抗冲击性^[13]。

MBBR 可以满足不同微生物的生长环境,实现不同功能微生物的污泥龄分离,有利于世代时间长的微生物和特殊降解微生物的生长和富集。载体上的生物膜污泥龄长,适宜硝化菌的生长并维持高浓度的硝化菌,因此,硝化脱氮能力显著。25℃下的硝化效率达 720~1 000 g 氨氮/(m³·d),而传统的活性污泥法在污泥质量浓度为 3 g/L 的情况下,硝化

效率低于 100~200 g 氨氮/(m³·d)^[12]。

2 污水处理厂的升级改造

2.1 升级改造难点

污水处理厂原主体工艺为 MSBR,共有 MSBR 生化池共 4 座,单池设计规模为 5.0 万 m³/d,总处理规模为 20 万 m³/d,原设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,原工艺流程如图 2 所示。新执行的主要水质指标限值如表 1 所示,最终排放标准达到国标一级 A 标准,并且对氨氮、TN 和 TP 的限值更加严格。

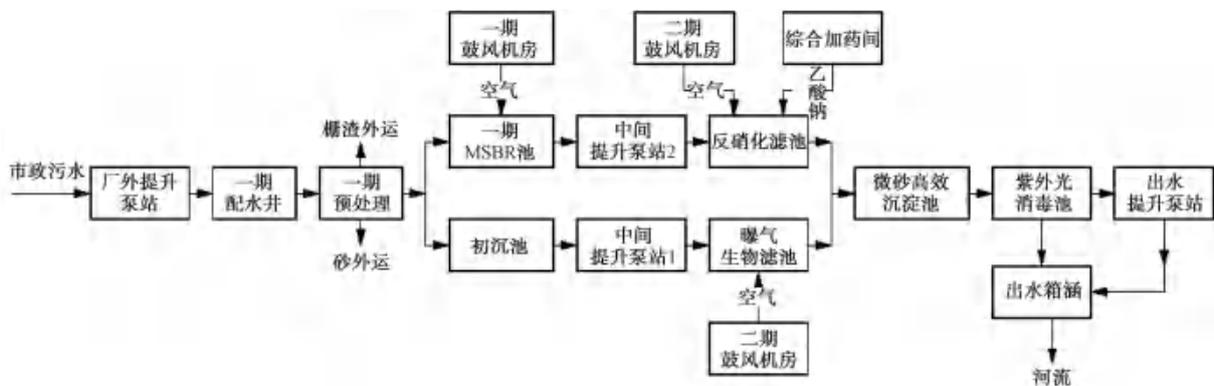


图 2 污水处理厂原工艺流程

Fig. 2 Original Process Flow of WWTP

表 1 MSBR 池升级改造前后出水主要水质指标限值

Tab. 1 Limit Value of Main Effluent Quality Indices before and after Upgrading of MSBR Tank 单位:mg·L⁻¹

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	氨氮	TN	TP
进水水质	290	110	240	24	28	5
原出水水质	≤50	≤10	≤10	≤5(8)	≤15	≤1.0
提标后出水水质	≤30	≤10	≤10	≤1.5(3)	≤10	≤0.5

注:括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标,进出水水质的 pH 值为 6~9。

污水处理厂长期运行结果显示,原有工艺主要存在的问题是当进水水质波动以及冬季低温时出水中 TN 时有超标。另外,随着城市人口的增加,进入污水处理厂的污水量也有所增加,污水处理厂规模需要从 20 万 m³/d 提升到 25 万 m³/d,水量增加也是造成出水水质下降的原因之一。如果增加深度处

理工艺,理论上出水可以达标排放,但这就意味着必须增建(构)筑物并增设处理设备,会受到污水处理厂占地面积的限制。

2.2 升级改造思路

通过对几种改造方案的比选(表 2),鉴于该污水处理厂的升级改造必须在原址基础上进行,既要做到

表 2 提升脱氮效果的污水处理方案比选

Tab. 2 Comparison and Selection of Wastewater Treatment Processes to Improve Denitrification Efficiency

改造方案	优点	缺点
将生化池改造为 MBR	对氨氮、TN 去除效果好,可在原址进行	不适合大水量;土建改动大;需要洗膜;管理复杂;耗电量较大
增设反硝化滤池	对 TN 去除效果好,需要新增用地	管理复杂;滤料需要反冲洗
将 MSBR 改造为 MBBR	对氨氮、TN 去除效果好,可在原址进行,土建改动小	水头损失较大
增设化学氧化单元	可有效去除氨氮、TN,新增用地不多	管理复杂;药量不易控制,超量对水体有害

不增加占地,又要保证水质达到更高的水质标准,最终选择 MBBR 工艺作为污水处理厂主体工艺。

在不增加占地面积的前提下,尽量保持原有 MSBR 池的基本结构,重新设置其内部构造,并向生化池中投加大量悬浮载体,将现有 MSBR 改造成 MSBR-MBBR 生化泥膜混合活性污泥系统,提高单位生化池容积的处理水量与氮、磷负荷,改善其处理效果,同时间接满足扩容的需要。对原有 MSBR 池来说,升级改造后的 MBBR 单池的设计规模需提高至 $6.25 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,4 座 MSBR 池总设计规模达到 $25 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。该处理系统必须确保生物处理系统运行稳定,出水水质稳定达标。

3 现有生化池升级为 MBBR 的工艺设计

将原有 MSBR 升级改造为 MBBR 生化池,需要通过新增加的污染物负荷确定所需填料的体积,同时确定泥膜好氧池与厌氧池的池容。执行新排放标准以后,系统新增 COD_{Cr} 负荷为 $19\,000 \text{ kg COD}_{\text{Cr}}/\text{d}$,新增 BOD_5 负荷为 $7\,000 \text{ kg BOD}_5/\text{d}$,新增氨氮负荷为 $2\,425 \text{ kg 氨氮}/\text{d}$,新增 TN 负荷为 $2\,900 \text{ kg TN}/\text{d}$ 。

3.1 MSBR 池内新分割出的 MBBR 泥膜好氧池容积

系统新分割出的 MBBR 泥膜好氧池需要去除 COD_{Cr} 量为 $19\,000 \text{ kg}/\text{d}$,去除氨氮量为 $2\,425 \text{ kg}/\text{d}$;好氧池 BOD_5 负荷为 $0.073 \text{ kg BOD}_5/(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})$,活性污泥可以完全去除 BOD_5 ,不需要增加填料。实际水温下悬浮填料的氨氮容积负荷为 $0.254 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,去除 TN 所需的填料体积为 $9\,558 \text{ m}^3$,按 $9\,600 \text{ m}^3$ 计算,以悬浮填料填充率为 45% 计,则需要池容 $21\,328 \text{ m}^3$ 。

3.2 MSBR 池内新分割出的缺氧池容积

缺氧池 SS 质量浓度为 $4 \text{ g}/\text{L}$,挥发性悬浮固体 (VSS) 质量浓度为 $2.8 \text{ g}/\text{L}$,污泥总产率系数以 $0.60 \text{ kg MLSS}/\text{kg BOD}_5$ 计,排出生化池微生物的量为 $2\,940 \text{ kg MLVSS}/\text{d}$ 。生物同化所需氮源为 $950 \text{ kg}/\text{d}$,所需去除的 NO_3^--N 为 $1\,950 \text{ kg NO}_3^--\text{N}/\text{d}$ 。实际温度下活性污泥的 NO_3^--N 负荷为 $0.027 \text{ g NO}_3^--\text{N}/(\text{g MLSS}\cdot\text{d})$,新增缺氧池池容为 $146\,11 \text{ m}^3$,水力停留时间为 1.4 h 。

4 改造方案

4.1 方案简介

现场共 4 组 MSBR 生化池,单组 MSBR 改造成

MSBR-MBBR 生化泥膜混合活性污泥系统后的平面布置如图 3 所示。根据计算结果,对原 MSBR 池进行如下改造。

(1)原 MSBR 池的单元 2、单元 3 和单元 4 维持原有形式。经过计算,本项目的单元 2~单元 4 的池容不变,有效水深及平面尺寸不做调整。

(2)分割单元 6,增加原 MSBR 池的单元 5 的池容。单组的单元 5 有效容积为 $1\,976 \text{ m}^3$,共 4 组。在进水规模从 $20 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 提高到 $25 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的情况下,单元 5 的有效停留时间仅为 0.76 h 。为保证 TN 达标,将单元 6 中首先分割出 $3\,666 \text{ m}^3$ 体积作为缺氧池(单元 5'),相当于增加单元 5 的停留时间。这部分区域仍然保持原来的曝气系统,并新增搅拌器。单元 5 的池容、尺寸均不做调整。单元 5' 数量为 4 组,单元 5' 停留时间为 1.41 h ,反硝化速率为 $0.30 \text{ g NO}_3^--\text{N}/(\text{g}\cdot\text{d})$,需要新增搅拌器与内回流泵设备。

(3)将 MSBR 单元 6 剩余池体改造为 MBBR+好氧池组合。单元 6 改造为:单元 6 = 单元 5' + MBBR+好氧池。分割出的 MBBR 池单组有效容积为 $5\,331.9 \text{ m}^3$,MBBR 池数量为 4 组,水力停留时间为 2.05 h ,悬浮填料填充率为 45%。好氧池单组有效容积为 $1\,538.2 \text{ m}^3$ 。活性污泥好氧池数量为 4 组,好氧池水力停留时间为 0.6 h 。主要新增设备为进水闸门、填料、筛网。单组所需风量为 $430 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

单组所需增加有效比表面积为 $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的填料体积 $2\,400 \text{ m}^3$,4 组池体填料增加体积总共 $9\,600 \text{ m}^3$ 。

(4)其他构造与管路设计

原单元 5 进入单元 6 的分配进水管缩短,位于单元 5 内。单元 5 为上部出水,通过过水洞与单元 6 连接。单元 6 设置进水闸门,避免在没有进水的情况下,填料逆流回到单元 5。改造后单元 6 容积减小。单元 6 分割出单元 5 后,再分割为 MBBR 池+好氧池,MBBR 与好氧池中间用隔墙隔开,MBBR 出水处设置拦截筛网。

增加了 MBBR 出水筛网,MBBR 进水处设置闸门。MBBR 池的进水处不设置进水筛网和在筛网的入水段设置筛网冲洗曝气系统,以免设置的进水筛网会被进水带入的纤维状物逐渐堵塞。但是,为了保证停止进水时的 MBBR 系统的悬浮填料逆流到其前端的缺氧区,在新建(分割)墙一侧上部入水孔处新增进水闸门。闸门是常开的,只有 MBBR 池停

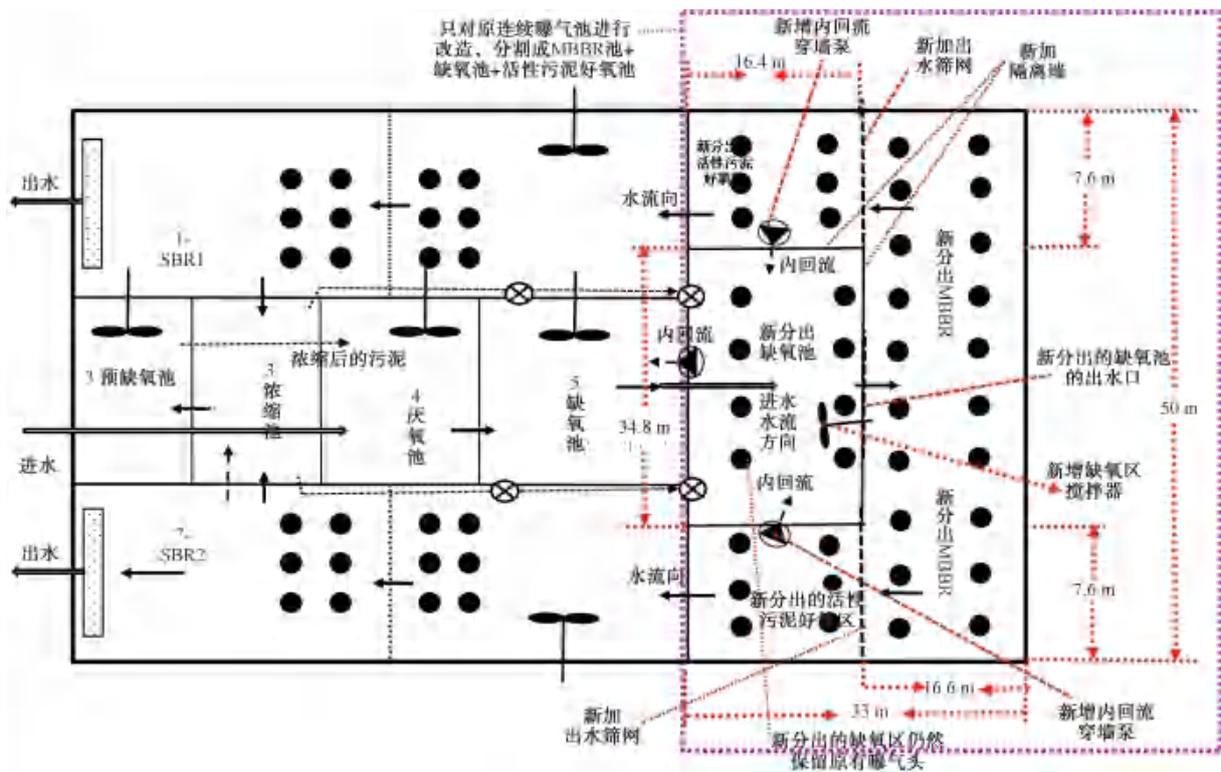


图3 MSBR 改成 MSBR-MBBR 生化泥膜混合污泥系统

Fig. 3 MSBR-MBBR Biochemical Sludge Membrane Mixed Sludge System Modified by MSBR

止进水时关闭,防止悬浮填料的倒流到单元5。另外,为了便于安装闸门和方便开启,新建(分割)墙上搭建设置一走道平台和护栏。

4.2 升级改造方案的特点

(1)针对来水的波动大可能造成生化系统存在水质、水量冲击下水质 COD_{Cr}、TN 超标的问题,将原有 MSBR 生化池系统的好氧区(单元6)进行重新分割,并增加好氧区容积,在好氧区内增加了填料,升级改造为 MBBR,可不增加污水处理厂占地面积,投资较省。

(2)增加了缺氧池停留时间,且好氧区填料表面生长的微生物量大、硝化菌多,能够耐受较高

的 COD_{Cr} 负荷和氨氮负荷,脱落的生物膜能够补充活性污泥内的硝化菌,总体上有利于提高 TN 去除率。

(3)单元5可以在好氧和缺氧之间灵活转换,保留了底部曝气系统,并新增搅拌器,可以应对进进水水质的波动,保证出水效果。

5 运行效果与运行费用

污水处理厂改造完成后,经过调试后稳定运行,出水达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,氨氮和 TN 达到了更严格的排放要求。主要水质检测指标如表 3 所示。

表3 改造后的污水处理厂进出水水质

Tab. 3 Influent and Effluent Quality of Reconstructed WWTP

单位: mg · L⁻¹

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	氨氮	TN	TP
进水水质	224~253	110~122	182~244	24	21.2~37.2	1.42~3.54
出水水质	11~15	2.8~5.8	8.6~9.4	0.33~1.02	6.55~10.00	0.05~0.34

升级改造后的污水处理运行费用为 1.23 元/m³,其中包括人工费、动力费、药剂费、维修费、折旧摊销成本等。

6 结论

(1)近年来,各地环保要求提高,对污水处理厂出水的排放要求也更加严格,尤其是敏感水域对氮、

磷的排放限值,比国标一级 A 更加严格。当污水处理厂进水水质发生波动、水量偏高或冬季水温降低时,常规 MSBR 工艺出水 TN 稳定达到更严格标准比较困难,因此,采用 MBBR 工艺在尽量不增加占地面积的前提下对污水处理厂进行扩容和提标改造成为首选手段。

(2) MBBR 工艺处理系统包括填料、进出水拦截系统、辅助穿孔曝气系统、填料专用推流器等,通过向好氧池增加悬浮填料,提高优势菌种浓度,并形成良好的硝化反应与反硝化反应环境,可有效提高脱氮负荷和脱氮效率,尤其适合于污水处理厂的提标改造。

(3) 在实际工程应用中,将现有 MSBR 改造成 MSBR-MBBR 生化泥膜混合活性污泥系统,通过计算确定填料体积以及好氧池与厌氧池池容,对 MSBR 池体构造进行重新布置,配合设备的改造,完全可以达到预期效果。该污水处理厂升级改造后,处理规模由原来的 20 万 m³/d 扩容到 25 万 m³/d,出水氨氮、TN 由原来的 5(8)、15 mg/L 提高到 1.5(3)、10 mg/L。

参考文献

- [1] 周家中,韩文杰,吴迪,等. MBBR 工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J]. 中国给水排水, 2022, 39(12): 1-14.
ZHOU J Z, HAN W J, WU D, et al. Discussion on series solutions of MBBR process applied to municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2022, 39(12): 1-14.
- [2] YANG C Q. A modified sequencing batch reactor activated sludge wastewater treatment system[D]. Lawrence: University of Kansas, 2000.
- [3] 熊晔,吕伟. MSBR 工艺控制参数总结与分析[J]. 中国给水排水, 2010, 46(1): 32-35.
XIONG Y, LÜ W. Summary and analysis of the MSBR process control parameters[J]. China Water & Wastewater, 2010, 46(1): 32-35.
- [4] 王文明,杨淇棕,蔡依廷,等. MSBR 工艺在高排放标准污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 111-115.
WANG W M, YANG Q L, CAI Y T, et al. Application of MSBR process in wastewater treatment plant with stringent discharge standard[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 111-115.
- [5] 李满桃. 改良型 MSBR 工艺在县级污水处理厂中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 100-103.
LI M T. Design and application of improved MSBR process to treatment of wastewater in a country, Guangxi [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 100-103.
- [6] 李悦,张金松,邓仁健. 基于 ASM2d 的 MSBR 工艺脱氮除磷优化运行诊断与改造[J]. 给水排水, 2015, 51(5): 39-42.
LI Y, ZHANG J S, DENG R J. Optimization and diagnosis of operation of MSBR based on ASM2d to remove nitrogen and phosphorus and its reconstruction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(5): 39-42.
- [7] QU J H, WANG H C, WANG K J, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(6): 1-7.
- [8] 李世文,王胜渊,于林静,等. 基于 MBBR 工艺的北方某污水厂运行效果及氮磷去除机理分析[J]. 净水技术, 2022, 41(9): 86-95.
LI S W, WANG S Y, YU L J, et al. Mechanism analysis of nitrogen and phosphorus removal in north WWTP based on MBBR process[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 86-95.
- [9] YOUNG B, BANIHASHEMI B, FORREST D, et al. Meso and micro-scale response of post carbon removal nitrifying MBBR biofilm across carrier type and loading [J]. Water Research, 2016, 91: 235-243. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.006.
- [10] 付昆明,李慧,周厚田,等. 生物膜 CANON 反应器性能的优化:从 FBBR 到 MBBR[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2256-2264.
FU K M, LI H, ZHOU H T, et al. Optimization of the nitrogen removal performance on the CANON process in a biofilm reactor: From FBBR to MBBR [J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2256-2264.
- [11] 熊富忠,赵小希,廖胤皓,等. 材料表面特征对生物膜形成的影响及其应用[J]. 微生物学通报, 2018, 45(1): 155-165.
XIONG F Z, ZHAO X X, LIAO Y H, et al. Effects of surface properties on biofilm formation and the related applications [J]. Microbiology China, 2018, 45(1): 155-165.
- [12] 廖足良. 采用 HYBAS™ 工艺升级改造传统活性污泥工艺[J]. 中国给水排水, 2006, 22(12): 21-25.
LIAO Z L. Application of HYBAS™ process to upgraded activated sludge process [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(12): 21-25.
- [13] 李艳,崔娇娇,王仁德,等. MBBR 工艺在吴忠市第三污水处理厂扩建工程中的应用及运行效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3438-3443.
LI Y, CUI J J, WANG R D, et al. Application and performance of MBBR process of No. 3 sewage treatment plant expansion project in Wuzhong City, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3438-3443.