

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.06.019

悬浮填料耦合斜板沉淀改造MSBR的实践

刘影¹, 赖长清²

(1. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 湖南 长沙 410012; 2. 湖南鑫远环境科技股份有限公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 某污水处理厂一期工程采用MSBR工艺,处理规模为 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。因上位规划调整、建设边界条件限制及流域水环境治理持续推进的需要,该厂一期工程处理规模需原位扩容至 $25\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,出水水质要求提升至项目所在地一级标准(地表水Ⅳ类)。针对现状MSBR池容小、泥水分离效果差、跑泥、功能分区未能实现氮磷强化去除等问题,改造方案充分利用现有池体结构及设备,通过重新调整功能分区、投加填料、增设斜板澄清等措施,形成“悬浮填料耦合斜板沉淀”的新型组合工艺,实现了原位扩容提标的双重目标。该项目实施后,运行情况良好,出水水质可持续稳定达标。

关键词: 提标扩建; 悬浮填料; 一体化斜板沉淀; MSBR改造; MBBR工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)06-0108-05

Renovation Practice of MSBR by Suspended Filler Coupled with Inclined Plate Sedimentation

LIU Ying¹, LAI Chang-qing²

(1. Hunan Provincial Architectural Design Institute Group Co. Ltd., Changsha 410012, China;
2. Hunan Xinyuan Environmental Technology Co. Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: The first phase project of a wastewater treatment plant (WWTP) adopts modified sequencing batch reactor (MSBR) process with capacity of $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, and the effluent should meet first-level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). Due to the adjustment of upper planning, the limitation of construction boundary conditions and continuous promotion of water environment management in the basin, the treatment scale of the first phase project needs to be expanded to $25\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ in-situ, and the effluent quality requirements are upgraded to the local primary standard i.e. quasi-IV in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). In response to the problems of small tank capacity, poor sludge and water separation, sludge running, and dysfunctional partitioning for nitrogen and phosphorus removal, the renovation plan makes full use of the existing tank structure and equipment and forms a new combination process of suspended filler coupled with inclined plate sedimentation by readjusting the functional partitioning, adding filler and the inlined plate clarification, thus to achieve the dual goal of in-situ expansion and upgrading. After the implementation of the project, the system is running well and the effluent quality can continue to meet the standard stably.

Key words: upgrading and expansion; suspended filler; integrated inclined plate sedimentation; MSBR renovation; MBBR process

1 项目背景

南方某城市污水处理厂一期工程规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用MSBR工艺,于2008年4月投入运行。2017年底一期工程完成提标改造,深度处理采用“后置反硝化生物滤池+微砂高效沉淀”,出水水质可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

近年来,因城市总体规划调整,排水系统布局进一步优化,该污水处理厂在无法新增建设用地的情况下,总规模较原规划有了大幅提升。随着国家相关政策的出台和所在城市流域综合治理计划的持续推进,污水处理厂出水水质需提升至项目所在地一级标准(地表水Ⅳ类)。基于上述情况,综合现有边界条件及工艺技术水平等因素,需对一期工程实施原位扩容提标,MSBR单池处理规模要求由 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2 MSBR池现状及存在的主要问题

MSBR工艺的实质为AAO串接SBR,可实现多种不同的运行模式^[1],最初为7池型,后演变为10池型,强化了脱氮效果。现状MSBR采用早期7单元构型,厂区南北向并行布置4座,单座处理能力为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平面尺寸为 $88 \text{ m} \times 50 \text{ m}$,总容积 $27\,917 \text{ m}^3$,水力停留时间 13.40 h 。1、7单元各设有1台污泥回流泵和2台剩余污泥泵,单泵功率分别为13、3.1 kW。1台混合液回流泵设于6单元,功率13 kW。

MSBR池投入运营已有10余年,部分设备年久老化,主要存在以下问题:①池容偏小,不能满足提标和扩容的双重需要;②1、7单元序批池水力负荷高,泥水分离效果差,出水易跑泥,抗水力冲击负荷能力差;③1、7单元序批池为平底结构、边侧单点排泥方式不利于排泥,易积泥;④2单元浓缩池表面积偏小,水力负荷过高,固体负荷偏大,污泥浓缩效果较差;⑤3单元预缺氧区停留时间短,仅为 0.43 h ,且未考虑分点进水补充碳源,对回流污泥的反硝化效果不明显,末端残余硝态氮偏高;⑥4单元厌氧池和5单元缺氧池停留时间短,脱氮除磷效能不佳;⑦管式曝气器易损坏,更换周期较短,仅约为3年;⑧混合液、污泥回流泵出口均存在明显的跌水复氧现象,降低了系统处理效能;⑨6单元的好氧池长宽比接近1.5,进水采用双管配水至好氧池中心后,全池未设任何导流设施,流态较差,易形成短流且外侧

两边角存在死水区,加设推流器后未见明显改善。

特别是缺氧区停留时间仅为 1.02 h ,严重偏短,反硝化效果差。TN去除基本上依靠MSBR池后续的反硝化生物滤池。鉴于原水中的 BOD_5 在MSBR好氧池中已基本消耗殆尽,后置反硝化生物滤池脱氮完全依赖外部碳源,导致外加碳源投加量偏大,运行成本偏高。

3 提标扩容改造技术路线

3.1 实际进、出水水质

该项目自运行以来,进水可生化性较好,出水水质可稳定达到一级A标准。根据2017年12月—2019年2月的实际运行数据,对一期工程生产线主要污染物指标相对地方一级标准的达标率进行分析后发现, BOD_5 、SS两个指标可满足新标准的要求,COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP四个指标的达标率依次为96.65%、66.98%、44.81%和83.25%。分析表明,提标改造的最大难点为TN,其次为 $\text{NH}_3\text{-N}$;尤其是水温低于 12°C 时脱氮效率明显降低。

2020年1月—2022年12月的实际进水水质如表1所示。

表1 实际进水水质

Tab.1 Actual influent quality $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD_5	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
进水最大值	330.0	132.0	17.6	26.0	4.3
进水最小值	169.0	68.5	11.5	18.6	2.6
进水平均值	232.7	84.2	13.9	21.9	3.3
90%保证率水质	261.5	100.5	16.4	23.8	3.5

3.2 总体改造技术路线

现状MSBR池按一级B标准设计,污水处理厂一级A提标工程通过在其后端增设反硝化生物滤池和微砂高效沉淀池来实现整体提标,并未同步进行挖潜改造。针对地方一级标准(地表水Ⅳ类),一期工程MSBR系统扩容提标的关键在于解决池容偏小和1、7单元负荷较高两个最为突出的问题。采取的针对性措施包括:①提高污泥浓度,降低污泥负荷,弥补池容的不足,也可增强后置反硝化脱氮效果^[2];②降低沉淀功能区水力负荷,强化泥水分离效果。同时,充分利用现有池体结构及设备,优先利用内部碳源,功能分区应能实现氮磷的强化去除,将二级处理出水TN控制在 10 mg/L 左右,尽量少用或不用后置反硝化功能,以降低运行成本。MSBR池后续反硝化生物滤池可在滤床下部反冲洗膨胀

空间内装填 Annox™ K5 型填料,以增加生物膜载体数量,可有效处理二级生化系统出水残留的 TN。微砂高效沉淀池的水力负荷有较大的提升空间,完全满足扩容需求。鉴于深度处理设施为一、二期工程共用,而二期提标潜力有限,一期 MSBR 改造后生化系统出水宜尽可能直接或基本达到设计排放标准。改造后的工艺流程如图 1 所示。

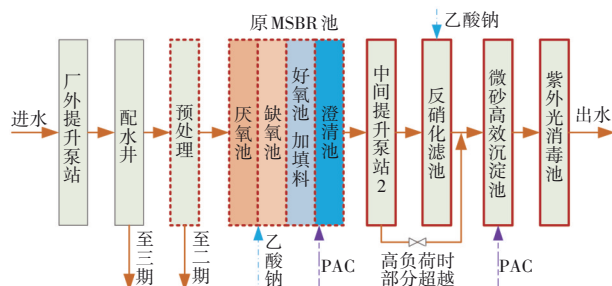


图1 一期工程改造工艺流程

Fig.1 Flow chart of the first phase of the transformation project

4 MSBR 池改造方案

污水处理厂提标所面临的瓶颈主要是低碳源与低水温的问题,投加填料或采用 MBR 工艺均能在一定程度上达到强化脱氮的目的^[3]。现状 MSBR 可行的基本改造思路:①改造为 MBR 膜工艺;②投加填料,调整功能分区,改造为 MSBR-MBBR 或类似工艺。采用 MBR 膜工艺进行改造,主要存在以下问题:①土建改造工程量过大,内部隔墙几乎需要全部拆改,原有池体结构利用率不高;②一次性投资过高,单池改造费用初步测算为 6 900 万元,远高于填料方案;③运行成本偏高。

鉴于此,提标改造以投加填料为优,通过控制流化填料在生物反应池内的比例,可以形成活性污泥与生物膜的共生系统^[4],脱氮效率高,抗冲击负荷能力强。具体方案:①改造为 MSBR-MBBR 工艺;②采用悬浮填料耦合一体化斜板沉淀的组合工艺。方案①仍然利用 MSBR 池的 1、7 单元来完成泥水分离,但运行方式将由序批间歇式调整为两池并联的连续运行模式;方案②将效能低下的 2、3 单元改造为厌/缺氧区,并将 1、7 单元改造为两座独立的一体化斜板沉淀池,以强化沉淀效果,其泥水分离功能相对更为专一、稳定和高效。MSBR-MBBR 方案基本不改变原有构筑物状态,悬浮填料耦合一体化斜板沉淀池方案改造相对更为彻底,工程量较大,新

增设备较多。两种方案的技术改造对比示意图见图 2。

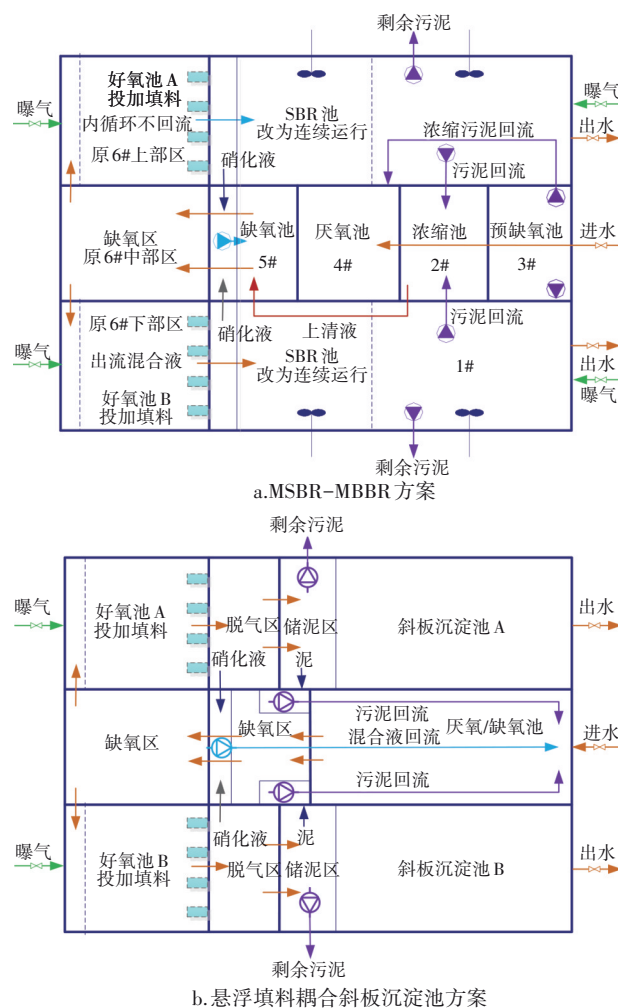


图2 MSBR 改造方案流程对比示意

Fig.2 Schematic comparison of the MSBR renovation program process

两种方案的经济技术比选如表 2 所示。MSBR-MBBR 方案尽管在土建改造工程量、现有池体设施设备利用率、实施的难易程度、设备采购费及总投资方面具有较大优势,也克服了原池容偏小、污泥负荷较高的缺陷,但仍存在如下问题:①澄清区跑泥问题未彻底解决;②厌/缺氧区空间固化,停留时间仍不足 2 h,后置反硝化池负荷高、易堵塞;③2、3 单元存在的问题甚至进一步恶化;④水质达标过多依赖一、二期共用的深度处理设施,因深度处理单元挖潜有限,达标存在一定风险。综上,该项目最终确定采用方案②。

悬浮填料耦合斜板沉淀方案摒弃了原效能不高的污泥浓缩池和预缺氧池,拆除浓缩池两侧短边

隔墙并在 5、6 单元隔墙底部开孔,2、3、4、5 单元及 6 单元中间区域彻底连通,形成一个通长的厌/缺氧可调区,总容积相对 MBBR 方案增加了 1 790 m³,且运行更为灵活。1、7 单元完美嵌入一体化斜板沉淀后,水力负荷提高一倍,达到 2 m³/(m²·h)。沉淀池前端脱气区利用中孔鼓风曝气形成紊流驱散氮气,进一步提高了泥水分离效果;排泥采用链条式刮泥机,效果良好;斜板下方安装自动气洗装置,可定时

定期对斜板进行清洗,避免污泥黏附。为避免藻类滋生,斜板区加盖遮阳棚,采用门式钢架、一体化装配式光伏屋顶,简洁美观。钢架屋面单跨 18 m,坡度 10°,净空 2.2 m。光伏系统建设规模为 1.47 MW_p,4 池共选用 290 W_p 多晶硅组件 5 088 块,总面积 8 292 m²,采用固定倾角安装方式,角度同屋面。同时配套逆变器、汇流箱等附属设施,采用分块发电、就近并网方案,发电总量可达 125×10⁴ kW·h/a。

表 2 MSBR 池改造方案比选

Tab.2 MSBR tank renovation option comparison

单元	原功能	原池容/m ³	改造前参数 (水量 50 000 m ³ /d)	方案①:MSBR-MBBR 方案 (改造后水量 62 500 m ³ /d)	方案②:悬浮填料耦合斜板沉淀方案 (改造后水量 62 500 m ³ /d)
1	SBR/澄清	5 830	名义 HRT 为 2.79 h	澄清模式固化且连续运行	改造为一体化斜板沉淀,斜板间距 80 mm;增加斜管、刮泥机、出水槽等设备
2	浓缩池	895	面积 84.5 m ² ,上升流速 25 m/h	保留,上升流速 31.25 m/h,偏大	改造后厌/缺氧区总容积 8 997 m ³ ;名义 HRT 为 3.45 h;厌/缺氧区未明确区分,两者灵活可调;增加设备为潜水搅拌机
3	预缺氧池	895	名义 HRT 为 0.43 h	保留,名义 HRT 为 0.34 h,偏短	
4	厌氧池	2 125	名义 HRT 为 1.02 h	保留,名义 HRT 为 0.82 h,偏短	
5	缺氧池	2 125	名义 HRT 为 1.02 h	调增容积 2 957 m ³ ,总容积 5 082 m ³ ,名义 HRT 为 1.95 h	基本同方案①;后端增设脱气区;脱气区增加脱气风机
6	好氧池	10 217	理论 HRT 为 4.9 h	调减容积 2 957 m ³ ,剩余池容 7 260 m ³ ,增加设备:填料、柱状栅网、填料区辅助穿孔曝气系统,更换设备:曝气器填料负荷 0.47 gNH ₃ -N/(m ² ·d),填充率 47%,污泥回流比 100%,硝化液回流比 100%	
7	澄清/SBR	5 830	上升流速 2.2 m/h	同 1 单元	同 1 单元
注: 1.跑泥问题,方案①改造后未彻底解决,方案②改造后已完全解决;2.对后续深度处理单元的影响,方案①负荷大,运行成本高,而方案②负荷小,运行成本低;3.厌氧/缺氧区容积可调性,方案①厌氧、缺氧分区固化,容积较小,而方案②厌氧、缺氧区灵活可调,适应能力强;4.土建工程量,方案①极少,方案②很大;5.现有设备利用率,方案①完全利用,方案②部分利用;6.设备采购费用,方案①为 1 750 万元,方案②为 1 900 万元;7.单池改造总投资,方案①为 2 650 万元,方案②为 3 600 万元。					

5 技术特点

基于 MSBR 的悬浮填料耦合斜板沉淀系统具有如下技术优势:①出水水质好,处理效能全面高效。系统具备除碳、硝化、脱氮及除磷的多重功能,出水水质可达到地表水准Ⅳ类标准。②镶嵌式改造方式池体结构利用率高,可实现原位扩容提标,改造潜力大,可实施性强。改造方案维持了原 MSBR 池的一体化组团共壁结构,流程简洁、占地省,易于实施。③厌/缺氧区之间容积相互可调,运行灵活,脱氮效率高,对水质适应性强,出水总氮可降至 10 mg/L。④泥膜结合协同硝化,处理效果稳定高效,抗冲击负荷能力强,出水氨氮可实现≤1.5(3) mg/L 的目标。⑤一体化斜板沉淀泥水分离效果好,排泥顺畅,有效解决了现有问题。⑥斜板沉淀池遮阳棚采用光

伏屋顶,大力践行绿色低碳理念,节能效果明显。

6 改造后运行效果

2021 年 1 月初,MSBR 池 1 号池完成改造并通水试运行,之后陆续完成余下 3 池改造。2022 年监测期间,始终保持 1 号池满负荷运行,实际出水水质见表 3。其他 3 池 2 月—3 月为调试期,稳定后出水水质与 1 号池接近。全年监测期间,1 号池好氧区 MLSS 均值为 3 827.35 mg/L,斜板沉淀池前端未加除磷药剂时,沉淀池出水 TP 均值为 0.36 mg/L,90% 累积率数值为 0.70 mg/L,剩余污泥含水率均值 99.08%,SVI 均值为 104.06 mL/g; TN 仅有 5 d 为 10.2~11.6 mg/L;SS 有 15 d 超过 10 mg/L,13~14 mg/L 仅出现 3 次,其他指标均直接达到设计排放标准。在未经深度处理和投加除磷药剂的情况下,斜

板沉淀池出水即已基本达到地表水准Ⅳ类标准,全流程则完全稳定达到设计排放标准。沉淀池进水

端投加除磷药剂后,出水SS、TP将愈发改善,可进一步减轻后端生物滤池和高效沉淀池的负荷。

表3 实际出水水质

Tab.3 Actual effluent quality

mg·L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
最大值	28.0/15.0	5.5/2.3	14.0/8.0	11.60/9.16	1.80/0.38	1.20/0.13
最小值	2.0/7.0	0.3/0.5	2.0/2.0	2.22/2.18	0.09/0.12	0.02/0.06
平均值	13.8/11.4	1.5/1.3	5.5/4.3	6.00/5.70	0.51/0.30	0.36/0.10
90%累积率数值	18.3/14.5	2.3/2.1	11.6/6.7	7.4/6.80	0.76/0.32	0.70/0.12

注:“/”前为斜板沉淀池实际出水水质,“/”后为斜板沉淀池出水经深度处理后实际出水水质。

7 工程投资及效益

利用悬浮填料耦合一体化斜板沉淀池原位改造MSBR,取得了较好的社会效益、经济效益和环境效益,4池改造工程费用合计14 399.89万元,直接运行成本为0.65元/m³。本项目成功实现了MSBR池的原位扩容提标,土地、现有设施利用率高,极大减少了对水体环境的污染。整个系统运行稳定、药耗少、运行维护费用低,每年可减少污染物排放量:COD为1 825 t、TN为456 t、氨氮为320 t,乙酸钠投加量为800 t/a。分布式光伏发电于2022年7月投产,发电量月均值11.3×10⁴ kW·h,最高月为19.8×10⁴ kW·h,最低月为6.8×10⁴ kW·h,预计发电总量将达到125×10⁴ kW·h/a,折合标准煤450 t。

8 结语

① 悬浮填料耦合斜板沉淀系统具有除碳、硝化、脱氮及除磷的多重功能,高效稳定,出水水质好,是MSBR池实现原位同步扩容提标的较佳途径。

② 镶嵌式改造方式占地省,易于实施,对于一体化组团共壁结构的二级生化系统改造具有较好的借鉴和示范意义。

③ 提标改造工程应注意优先利用内部碳源,功能分区应能实现氮磷的强化去除,确保硝化充分,二级处理出水TN应控制在约10 mg/L,尽量少用或不用后置反硝化功能,以降低运行成本。

④ 平底结构的沉淀单元采用边侧单点排泥效果不佳时,可改用底部机械排泥,效果较好。

⑤ 斜板/管沉淀池等构筑物遮阳棚可采用一体化光伏屋顶,具有明显的经济效益、环境效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 任洁,顾国维. MSBR系统的特点及其除磷脱氮的机理分析[J]. 给水排水, 2002, 28(1): 22-24.
REN Jie, GU Guowei. Feature and P/N removal mechanism of MSBR [J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(1): 22-24 (in Chinese).
- [2] 李春鞠,顾国维,杨海真. 改善MSBR系统脱氮效果的试验研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(1): 9-14.
LI Chunju, GU Guowei, YANG Haizhen. Experimental study on the improving of nitrogen removal efficiencies with modified sequencing batch reactor [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(1): 9-14 (in Chinese).
- [3] 陈立,李成江,郭兴芳,等. 城镇污水处理厂提标改造的几点思考[J]. 水处理技术, 2011, 37(9): 120-122, 135.
CHEN Li, LI Chengjiang, GUO Xingfang, et al. A few of considerations on upgrading WWTPs to meet more stringent effluent requirements [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(9): 120-122, 135 (in Chinese).
- [4] 李成江. 地下式污水处理厂的发展与关键技术问题[J]. 给水排水, 2016, 42(8): 36-39.
LI Chengjiang. Development and key technologies for underground wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(8): 36-39 (in Chinese).

作者简介:刘影(1976—),男,湖南岳阳人,大学本科,正高级工程师,市政板块总工程师,主要研究方向为城镇供水和城镇污水处理。

E-mail: 329899068@qq.com

收稿日期: 2023-02-11

修回日期: 2023-02-22

(编辑:衣春敏)