

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.16.021

MSBR 工艺在高排放标准污水处理厂的应用

王文明¹, 杨淇棕¹, 蔡依廷², 郭建德¹, 古伟¹, 曾海燕¹, 陈博儒¹,
宋凤鸣¹, 陈琼¹

(1. 湖南先导洋湖再生水有限公司, 湖南长沙 410208; 2. 华中农业大学经济管理学院,
湖北武汉 430070)

摘要: 某高排放标准污水处理厂生化处理采用 10 单元 MSBR 工艺, 主要介绍了 10 单元 MSBR 工艺原理、工艺设计、调试过程及实际运行情况。运行结果表明, 新型 10 单元 MSBR 工艺出水主要指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 准 IV 类水质(TN ≤ 10 mg/L) 指标限值, 具有占地面积小、进水碳源利用率高、脱氮除磷效果好等优点, 是一种可用于高排放标准污水处理厂的先进生化工艺方案。

关键词: 10 单元 MSBR 工艺; 污水处理厂; 高排放标准; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)16-0111-05

Application of MSBR Process in Wastewater Treatment Plant with Stringent Discharge Standard

WANG Wen-ming¹, YANG Qi-liang¹, CAI Yi-ting², GUO Jian-de¹, GU Wei¹,
ZENG Hai-yan¹, CHEN Bo-ru¹, SONG Feng-ming¹, CHEN Qiong¹

(1. Hunan Pilot Yanghu Reclaimed Water Co. Ltd., Changsha 410208, China; 2. College of Economics and Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The process principle, design, commissioning and actual operation effect of a ten-unit MSBR process for biochemical treatment in a wastewater treatment plant with stringent discharge standard were discussed. The results showed that the major effluent quality indicators (TN ≤ 10 mg/L) reached level quasi IV criteria in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838 - 2002) and the process had the advantages of small footprint, high utilization rate of influent carbon source, high removal efficiency of nitrogen and phosphorus. Thus, the designed process could be used as an advanced biochemical treatment process for wastewater treatment plant with stringent discharge standard.

Key words: ten-unit MSBR process; wastewater treatment plant; stringent discharge standard; nitrogen and phosphorus removal

近年来,为加快流域性水环境问题的解决和适应城镇水环境管理的需要,我国 10 多个省、直辖市发布了有关城镇污水处理厂水污染物排放的地方标

准。污水处理厂为满足更高的出水排放标准,需要在二级生化工艺后增设膜生物反应器(MBR)、反硝化深床滤池或超滤膜等深度处理工艺^[1-5],然而日

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ3375); 长沙市科技计划经费资助项目(kh1902279)

本采用“二级生化+砂滤”工艺就能达到极其严格的出水水质(TN为5.5 mg/L、TP为0.06 mg/L)^[6],因此为助力我国污水处理行业节能减排和绿色发展,对二级生化工艺进行进一步改良设计和研究具有重要的意义。

1 工艺原理

改良式序批间歇反应器(MSBR)是20世纪80年代发展起来的二级生化工艺,综合了A²/O、SBR等工艺的优点,具有占地面积小、运行成本低、脱氮

除磷效果好、控制灵活等特点,在美国、加拿大、韩国等国家得到推广应用,经过不断改进和完善,出现了3、4、5、6、7、9等多单元工艺构型^[7-10]。

迄今为止我国已有40余座污水处理厂采用了MSBR工艺,其中80%采用了7单元MSBR工艺构型。针对低C/N比污水处理需求和当前更严格的氮磷排放标准,10单元改进型MSBR工艺已被开发应用^[11-12]。

10单元MSBR工艺原理如图1所示。

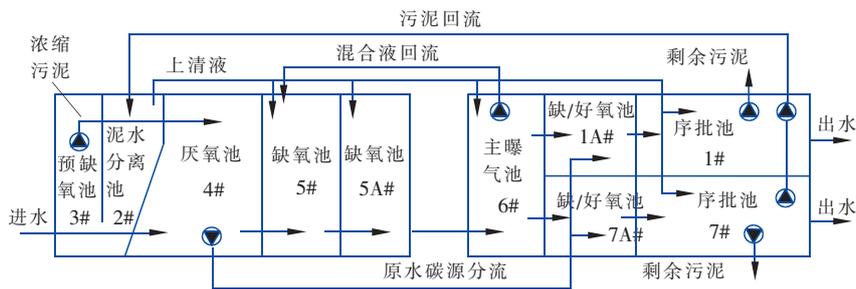


图1 10单元MSBR工艺原理

Fig.1 Principle of ten-unit MSBR

污水首先进入10单元MSBR的厌氧池(4#),与预缺氧池(3#)的回流污泥混合,富含磷的污泥在厌氧池(4#)进行释磷反应后依次进入第一缺氧池(5#)、第二缺氧池(5A#),两个缺氧池组成主缺氧反应功能区,主要用于反硝化脱氮。由主曝气池(6#)至第一缺氧池(5#)的回流系统提供富含硝酸盐的混合液,依次经第一缺氧池(5#)、第二缺氧池(5A#)进行反硝化脱氮。第二缺氧池(5A#)混合液进入主曝气池(6#),经有机物降解、硝化、磷吸收反应后再进入缺/好氧池(1A#)、序批池(1#)或缺/好氧池(7A#)、序批池(7#)。序批池(1#、7#)交替运行,如果序批池(1#)作为沉淀池,则序批池(7#)依次进行缺氧反应、好氧反应,或交替进行缺氧、好氧反应,其作用相当于串联了一个多级A/O反应器。在缺氧反应、好氧反应和出水阶段,序批池的混合液通过回流泵回流至泥水分离池(2#),分离池上清液可控制进入缺氧池(5#、5A#)、主曝气池(6#)、序批池(1#、7#),沉淀污泥进入预缺氧池(3#)经内源缺氧反硝化脱氮后,回流进入厌氧池(4#)与污水进水混合进行释磷反应,整个工艺依此循环运行。

针对低C/N值进水和当前更高脱氮除磷效率的技术需求,10单元改进型MSBR工艺在反应功能区、进水碳源的分配利用、污泥回流的设计和运行控

制上较之前多单元MSBR工艺更为合理。首先,厌氧池释磷处理后含较多剩余有机物的混合液与主曝气池回流的含高浓度硝态氮的混合液,在第一缺氧池以较高反应速率进行反硝化,之后含有相对较少有机物和硝态氮的混合液在第二缺氧池以较低反应速率进行反硝化,很明显在缺氧反应功能区体积相同的情况下,串联的两座缺氧池较一座缺氧池可以减缓反应池内的混合液短流现象和充分利用进水有机碳源,从而提高反硝化脱氮效率。其次,两座缺/好氧池可以接收厌氧池分流过来一定量的处理液或添加的外碳源,通过分流进水碳源或补充外碳源进一步提高脱氮效果。第三,两座缺/好氧池的运行状态可设置为多种模式,当设置为全过程搅拌缺氧反应状态,相当于增加了工艺反硝化时间,从而较好适应低C/N值进水水质和强化工艺脱氮效果;当设置为全过程曝气好氧反应状态,此时可看成主曝气池的衍生或扩大,比较适合高C/N值进水水质;设置为一段或多段缺氧、好氧反应交替运行状态,相当于在7单元MSBR工艺中多串联了一级或多级A/O反应器,从而改善脱氮除磷效果。最后,针对序批池到泥水分离池、预缺氧池、厌氧池的污泥浓缩和回流过程,10单元MSBR较之前的多单元MSBR增加了出水阶段更高浓度沉淀污泥的补充回流设置,这有

助于泥水分离池更好的泥水分离和预缺氧池更佳的内源反硝化反应,从而确保厌氧池具有更低的硝态氮浓度和足够的污泥浓度,相当于增加了厌氧池的实际水力停留时间,减少了对进水的稀释,提高了反应物浓度,提供了最佳的厌氧释磷条件,因而实现工艺更好的生物除磷效果。

2 工艺设计

某高排放标准污水处理厂设计规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,生化处理采用 10 单元 MSBR 工艺,设置 2 座 MSBR 生化池,单座 MSBR 池配置的设备包括浮筒搅拌器 10 台、硝化液内回流泵 2 台、污泥外回流泵 2 台、浓缩污泥输送泵 2 台、剩余污泥排放泵 4 台、空气出水堰 4 套、可提升微孔管式曝气器 10 套、固定微孔管式曝气器和电气自控设备等,单座 MSBR 池平面尺寸为 $92.6 \text{ m} \times 54.8 \text{ m}$,有效容积为 $32\,000 \text{ m}^3$ 、总水力停留时间为 19.2 h,其他主要设计参数如表 1 所示。与 7 单元 MSBR^[8] 相比,10 单元 MSBR 增加了第二缺氧池和第一、第二缺/好氧池 3 个单元,具有更长的缺氧反应水力停留时间,还增加了进水碳源分流设计和加大了硝化液内回流,这些都是针对更高出水排放标准进行的合理优化设计。在设计进水水量、水质和水温条件下,10 单元 MSBR 出水水质可达到更为严格的排放限值 ($\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$)。

表 1 10 单元 MSBR 工艺主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of ten-unit MSBR

项 目	设计值	
设计流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	40 000	
主曝气池污泥浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3 500	
污泥负荷/ $(\text{kgBOD}_5 \cdot \text{kg}^{-1} \text{MLVSS} \cdot \text{d}^{-1})$	0.043	
污泥龄/d	19.82	
水温/ $^{\circ}\text{C}$	12	
产泥率/ $(\text{kgDS} \cdot \text{kg}^{-1} \text{BOD}_5)$	0.4	
水力停留时间/h	厌氧池(4#)	1.34
	第一/第二缺氧池(5#/5A#)	1.47/1.47
	主曝气池(6#)	6.51
	泥水分离池(2#)	0.3
	预缺氧池(3#)	0.43
	第一/第二缺/好氧池(1A#/7A#)	0.78/0.78
	第一/第二序批池(1#/7#)	3.04/3.04
进水碳源分流比(4#→1A#,7A#)/%	10	
回流比/%	硝化液内回流(6#→5#)	350
	污泥外回流(1#,7#→2#)	150
	浓缩污泥回流(2#→3#)	50

3 工艺调试

工艺调试期间,进厂水量波动较大,当进水负荷超过设计负荷的 70% 时,10 单元 MSBR 的序批池从预沉淀状态切换到出水状态的第 10 min 开始,空气出水堰附近区域发现有污泥上翻现象,这造成 MSBR 出水 SS 较高,最高超过 200 mg/L ,远远超过出水 SS 设计限值(20 mg/L),但序批池在切换到出水状态约 45 min 以后,之前上翻污泥完全沉降变为上清液出水,从而恢复到正常运行状态,出水 SS 恢复到出水设计限值以下。

初步分析认为,工艺调试期间由于脱水污泥外运的管控,MSBR 系统没有及时合理排泥引起污泥浓度较高是出水 SS 超出设计限值的原因,检测也表明主曝气池污泥浓度约 $6\,000 \text{ mg/L}$,序批池污泥浓度约 $8\,000 \sim 10\,000 \text{ mg/L}$,序批池出水阶段的污泥层厚度超过 4 m,序批池上清液层厚度不足 2 m,进水负荷在短时间内波动较大时,出水水流容易引起序批池沉淀污泥上翻。经沟通协调后,有计划地加大剩余污泥排泥和序批池污泥回流,MSBR 序批池和主曝气池污泥浓度分别恢复到约 $4\,500 \sim 6\,000$ 、 $3\,000 \sim 4\,000 \text{ mg/L}$ 的正常水平,但序批池仍存在轻微的污泥上翻,出水 SS 略超出设计限值。

为进一步调查原因,进行了 MSBR 序批池运行工况调试试验,序批池序批周期和回流泵运行调试方案如图 2 所示。

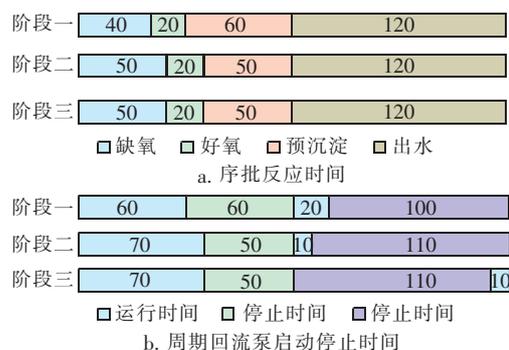


图 2 10 单元 MSBR 序批池序批周期和回流泵运行方案

Fig. 2 Scheme of sequencing cycle and reflow pump operation for sequencing batch reactor of ten-unit MSBR

首先,序批池参数设置如图 2(a) 和图 2(b) 阶段一所示,一个序批周期包括缺氧、好氧、预沉淀和出水 4 个时间段,时间分别为 40、20、60、120 min,总时间为 240 min,其中回流泵运行时间为缺氧 40 min、好氧 20 min 和出水前 20 min,总回流时间为 80

min。分析认为,序批池出水阶段污泥回流加大了进入序批池的混合液流量,再叠加进水负荷冲击,出水很容易将沉淀污泥带入上清液层而发生污泥上翻。然后,序批池参数设置调整为如图2(a)和图2(b)阶段二所示,缺氧反应时间由40 min增加到50 min,出水阶段污泥回流时间缩短到10 min,发现阶段二MSBR出水SS较阶段一有所降低,但仍没有将SS控制在出水设计限值以内。最后,将序批池参数设置调整为如图2(a)和图2(b)阶段三所示,出水前10 min的污泥回流调整到出水结束前最后10 min,发现调整后MSBR出水SS可以稳定控制在出水设计限值以内,分析认为10 min内污泥回流叠加进水负荷冲击引起的序批池污泥扰动或上翻影响还没有到达上清液层,更没有到达空气出水堰附近区域,此时序批池已进入下一个周期的缺氧搅拌反应阶段。因此,合理的补充回流设置不仅不会影响MSBR出水水质,而且有助于提高生物除磷效果。

通过上面的工艺调试过程,容易发现10单元MSBR和之前多单元MSBR工艺一样,具有抗冲击负荷能力不强和运行控制复杂的缺点,较大的进水负荷变化冲击叠加不合理的序批反应和污泥外回流

设置等对10单元MSBR出水水质影响较大,甚至引起出水水质超出设计限值的情况。

4 工艺运行效果

工艺调试完成后,10单元MSBR稳定运行期某月实际进、出水水质指标如表2所示。由表2可见,进水 $BOD_5/TN=3$,属于低C/N进水水质,进水经10单元MSBR工艺处理后,COD、BOD、 NH_3-N 、TN和TP都得到了明显的去除,出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准IV类水质($TN \leq 10 \text{ mg/L}$ 、 $TP \leq 0.3 \text{ mg/L}$)。10单元MSBR工艺通过合理分配进水碳源、增加缺氧反应时间、增加序批池沉淀污泥补充回流、精细化运行管理等措施,在不添加或少量添加碳源、PAC化学除磷药剂的情况下,可以显著提高低C/N污水生化处理的脱氮除磷效率,实现10单元MSBR工艺出水水质达到高排放标准的排放限值要求。

因此,与传统生化工艺相比,采用10单元改进型MSBR工艺并辅以精细化运行管理,可大幅提升脱氮除磷效率、降低运行成本和减少占地面积,满足我国当前高排放标准污水处理厂建设的技術需求,具有一定的推广应用价值。

表2 10单元MSBR稳定运行期进、出水水质

Tab.2 Influent and effluent quality of ten-unit MSBR during stable operation period

项 目	COD	BOD_5	SS	NH_3-N	TN	TP
进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	156	65.2	170	15.28	21.1	1.93
MSBR出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	19	1.8	8	0.58	4.76	0.22
MSBR去除率/%	87.8	97.2	95.3	96.2	77.4	88.6

5 结论

针对低C/N比污水处理需求和当前更严格的氮磷排放标准,10单元改进型MSBR工艺已被开发并获得了工程应用。与传统生化工艺相比,10单元MSBR工艺可以大幅提升脱氮除磷效率、降低运行成本和减少占地面积,出水主要指标可以稳定达到地表水准IV类水质($TN \leq 10 \text{ mg/L}$)标准,这为高排放标准污水处理厂的新建或升级改造工艺路线比选提供了新的方案。

参考文献:

- [1] 李采芳,杨丹,王志刚. A/O + 高效沉淀 + 深床滤池用于污水处理厂提标扩建[J]. 中国给水排水, 2018,34(16):88-92.
Li Caifang, Yang Dan, Wang Zhigang. Application of A/O, high efficiency sedimentation tank, denitrification

deep-bed filter process in upgrading and expansion of WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 88-92 (in Chinese).

- [2] 王春晖,邓磊,王春,等. AAO + MBR工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 79-81.
Wang Chunhui, Deng Lei, Wang Chun, et al. Application of AAO + MBR process in upgrading project of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 79-81 (in Chinese).
- [3] 陈建平,毛云飞. 传统污水处理厂类IV类水提标改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2017, 33(24): 87-91.
Chen Jianping, Mao Yunfei. Renovation of traditional wastewater treatment plant for the effluent quality similar to the fourth class [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(24): 87-91 (in Chinese).
- [4] 邓磊,侯晓庆,吴念鹏. MBR + 高级氧化工艺在高排

- 放标准污水处理厂的应用[J]. 给水排水,2017,43(8):37-40.
- Deng Lei, Hou Xiaoqing, Wu Nianpeng. Application of MBR and advanced oxidation process in high emission standard sewage treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43 (8): 37 - 40 (in Chinese).
- [5] 陈永玲,李伟,王丹. 高排放标准要求下污水处理厂的设计运行分析[J]. 给水排水,2017,43(7):7-11. Chen Yongling, Li Wei, Wang Dan. Design and operation of wastewater treatment plant in stringent discharge standard [J]. *Water & Wastewater Engineering*,2017,43(7):7-11(in Chinese).
- [6] 王文明,危建新,刘耘东,等. 日本污水脱氮除磷深度处理工艺分析[J]. 环境工程学报,2015,9(3):1194-1200. Wang Wenming, Wei Jianxin, Liu Yundong, *et al.* Analysis on sewage advanced treatment process for nitrogen and phosphorus removal in Japan[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9 (3): 1194 - 1200 (in Chinese).
- [7] 李探微,彭永臻,高旭,等. 一种新的污水处理技术——MSBR法[J]. 给水排水,1999,25(6):10-12. Li Tanwei, Peng Yongzhen, Gao Xu, *et al.* MSBR: A new process of wastewater treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 1999, 25 (6): 10 - 12 (in Chinese).
- [8] 吴卫国, Peter L Timpany. 连续进水、恒水位的改进型SBR系统[J]. 中国给水排水,2001,17(7):17-22. Wu Weigu, Peter L Timpany. Modified SBR system with continuous flow and constant level [J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17 (7): 17 - 22 (in Chinese).
- [9] 杨殿海,顾国维. 改进型MSBR工艺特点与运行效果[J]. 中国给水排水,2004,20(1):62-65. Yang Dianhai, Gu Guowei. Performance and operating results of modified MSBR process [J]. *China Water & Wastewater*,2004,20(1):62-65(in Chinese).
- [10] 刘华波,杨海真,顾国维. MSBR系统污泥周期性变化及其数学模拟研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(10):1328-1333. Liu Huabo, Yang Haizhen, Gu Guowei. Study on periodical variation of mixed liquor suspended solids and its mathematical modeling in modified sequencing batch reactor [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*,2005,33(10):1328-1333(in Chinese).
- [11] 杨企星. 多单元改良式序批间歇反应器及其应用[P]. 中国专利:ZL201710120381.0. X,2017-12-01. Yang Qixing. Multiunit Modified Sequencing Batch Reactor and Its Application [P]. Chinese Patent: ZL201710120381.0. X,2017-12-01(in Chinese).
- [12] 王文明,宋凤鸣,尹振文,等. MSBR+微絮凝过滤组合工艺在城市再生水厂的应用[J]. 中国给水排水,2019,35(18):102-106. Wang Wenming, Song Fengming, Yin Zhenwen, *et al.* Application of a combination process of MSBR and micro-flocculation filtration in urban reclaimed wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*,2019,35(18):102-106(in Chinese).



作者简介:王文明(1982-),男,四川平昌人,硕士,高级工程师,技术总监,主要从事水污染防治与生态修复技术研究。

E-mail:w. m. wang@126. com

收稿日期:2019-09-29