

# MBR 与 MBBR + 磁混凝技术路线比较与工程实践

高伟楠<sup>1</sup>, 纪海霞<sup>1</sup>, 程树辉<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2</sup>

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 国家对于水环境的要求日益严格, 污水处理标准不断提升, 现阶段的新(改、扩)建污水厂均需达到一级 A 标准(GB 18918—2002), 部分地区需要达到准Ⅳ类标准, MBR 工艺因此得以广泛应用, 但存在投资高、运行费用高等缺点。通过对 MBR 路线、MBBR + 磁混凝路线的比较, 认为两种路线均能实现生物处理能力翻倍, 且与水厂现况工艺契合度高, 均属占地集约型工艺; 针对一级 A 出水水质要求, 对于升级改造项目和扩容项目, MBBR 路线更优, 对于新建项目, MBR 路线与 MBBR 路线选择需根据占地的紧缺程度判定; 当设计出水水质需达到准Ⅳ类水质时, MBBR 路线可增加高精度滤池强化 SS 处理效果; MBBR + 磁混凝路线, 投资和运行费用省, 在工程实践中表现出较好的效果。

**关键词:** 膜生物反应器; 移动床生物膜反应器; 磁混凝

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)08-0063-05

## Comparison and Engineering Practice of Technology Route between MBR and MBBR + Magnetic Coagulation

GAO Wei-nan<sup>1</sup>, JI Hai-xia<sup>1</sup>, CHENG Shu-hui<sup>1</sup>, WU Di<sup>2</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Environmental protection requirement in China has become increasingly stringent, and sewage effluent quality standards have to be continually improved. At present, the new construction (reconstruction or expansion) WWTP need to meet the first class A standard (GB 18918-2002), even the quasi-Ⅳ water quality standards have been required to meet in some areas. Therefore, MBR was widely applied, even with disadvantages of high investment and high treatment costs. Through comparing MBR with MBBR + magnetic coagulation, the conclusions could be obtained as follows: both processes, as intensive technologies, could double the biological treatment capacity and be highly compatible with the current process of WWTP; For reconstruction and expansion projects, MBBR + magnetic coagulation was better than MBR under the requirement of the first class A effluent. For new construction projects, whether choosing MBR process or MBBR + magnetic coagulation process should be judged according to the shortage extent of area occupation; When the effluent quality needed to reach quasi-Ⅳ water quality standards, MBBR process was recommended to increase the effect of enhanced SS treatment with high precision filter; The MBBR + magnetic coagulation process could save investment and treatment costs,

and showed good effect in engineering practice.

**Key words:** MBR; MBBR; magnetic coagulation

近年来,国家对于水环境的要求日益严格,污水处理厂出水标准不断提升,现阶段的新(改、扩)建污水厂均需达到一级A标准,部分地区需要达到准IV类水质标准。国内改造中,膜生物反应器(MBR)、移动床生物膜工艺(MBBR)、磁混凝等集约型工艺逐步受到关注,并得以广泛应用,均获得了良好的工程实践效果<sup>[1-2]</sup>。污水厂升级改造面临的首要问题即占地,需要选择与现况条件契合度高、节约占地、投资运行费用合理的工艺进行提标改造。当占地紧缺时,以MBR为核心的升级改造路线受到广泛应用,但是随着越来越多的MBR污水厂运行投产、停产<sup>[3]</sup>,其投资高、运行费用高的缺点日益凸显,而伴随着MBBR、磁混凝工艺的日益成熟,MBBR+磁混凝的工艺路线应用日趋广泛。笔者对MBR、MBBR+磁混凝(简称MBBR路线)两工艺路线,从提标潜能、工艺占地、与现况工艺契合度、投资、运行成本等方面进行对比,分析两种技术改造路线的适用场景,为国内污水厂提标改造提供参考。

## 1 MBR与MBBR路线概述

MBR,通过膜过滤实现泥水分离,可在生化池内富集更高污泥浓度,强化处理效果;且膜工艺可有效满足高排放标准对于SS的要求,若生化指标(有机物、TN、TP、氨氮等)达到标准,出水消毒即可排放,集成度较高。为保护膜组件,对预处理要求严格,需设置超细格栅、沉砂池等;动力出水,若进水超过设计流量极限只能原水排放;膜冲洗曝气高、回流比大、药剂使用量大,是典型的高能耗、高药耗工艺。

MBBR,通过向反应器内投加悬浮载体,强化生化处理效果,可实现原位改造、原位提标;但MBBR属于生化强化技术,对于SS、TP无法实现最终出水保障,需要匹配其他深度处理工艺;磁混凝,通过对混凝阶段加载磁粉,强化混凝沉淀效果,保障SS及TP处理效果,能够与MBBR联合互补,形成集约型占地的工艺组合。

## 2 MBR与MBBR路线技术比较

### 2.1 生物池提标潜能比较

受二沉池运行效果及处理能力的影响,一般生物池设计污泥浓度在3~4 g/L,在此按照原生物池设计平均污泥浓度3 g/L进行计算, $f=0.7$ ,即2.1

gVSS/L。由于生物反应受温度及水质影响较大,不同地区进水水质及温度存在明显差异,故对能够增加的最大等效生物量进行比较,不讨论其他因素。

根据膜的形式不同,MBR又分为平板膜和中空纤维膜,由于中空纤维膜较平板膜堆积密度更高,且应用更为广泛,故采用中空纤维膜MBR进行分析。现阶段,一般运行良好的MBR生物池,最大污泥浓度为8 g/L, $f=0.5$ ,即提标后,其最大生物量为4 gVSS/L,是提标前的1.90倍。

MBBR为泥膜复合工艺,其生物量由两部分组成,即池内的活性污泥和填料表面的料上污泥。MBBR并非两者简单的叠加,二者会相互影响。当系统加入填料后,生物膜会对活性污泥的处理能力产生一定的影响,按照改造前处理能力的80%计算,取 $f=0.7$ ,即活性污泥项的等效污泥浓度为1.68 g/L;而生物膜等效污泥浓度,按照填料挂膜量12 g/m<sup>2</sup>计算,填料有效比表面积取800 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,填充率为30%(全池计,相当于好氧区HRT占50%且好氧区填充率60%,MBBR最大允许填充率为67%,已有工程中最大为62%), $f=0.9$ ,则生物膜上生物量等效污泥浓度为2.59 g/L,即MBBR工艺总生物量为4.27 gVSS/L,提标后,最大生物量是提标前的2.03倍。

经比较可知,从生物量的角度,MBR与MBBR对生物池进行提标的最大能力是基本一致的,有效生物量MBBR略高。MBR可提高运行污泥浓度,MBBR可增加悬浮载体投加量提高生物量。仅生化段(不包括膜池或二沉池),两种工艺均可实现处理能力翻倍,不论是从一级B向一级A提标,甚至直接提标至地表水准IV标准,均能够满足处理要求。

### 2.2 与现况工艺契合度

① 预处理,现阶段我国一般污水厂预处理采用两级格栅,即粗格栅和细格栅,对应栅条间距多为15~20、6~10 mm,由于MBR工艺膜丝较细,为延缓堵塞,要求进水前增加一道1~2 mm精细格栅(膜格栅);而MBBR防止堵塞的机制在于填料和筛网之间水力学的良好设计,而非通过强化进水拦截。

② 生物处理,现况工艺为SBR类工艺时,对于MBR路线,可扩建膜池,实现SBR转连续流运

行;现况工艺为连续流工艺时,对于 MBR 路线,一般新建膜池,原有沉淀池废弃或作他用。而对于 MBBR 路线,其镶嵌式改造的特点,与两类工艺均能较好嵌合,且合理利用已有构筑物和工艺。

③ 曝气系统,由于生物量的增加,一般情况下,两工艺路线均需对曝气系统进行改造,均需要采用底部曝气。

④ 加药系统,两工艺路线对于加药系统均无明显影响,磁混凝部分需增加的 PAM 及磁粉投加系统可设置于磁混凝澄清池上部,无需改变原有加药系统及新增用地。

⑤ 污泥系统,由于处理能力提升,剩余污泥量及化学污泥量均有一定程度的提高,两工艺路线均需对污泥系统进行扩容。根据规范, $A^2O$  污泥龄为 10 ~ 20 d,MBR 污泥龄为 15 ~ 30 d,即 MBR 污泥龄是改造前的 1.5 倍,而 MBR 反应池污泥量是改造前的 2 倍,故改造后剩余污泥量是改造前的 133%,化学污泥量因除磷量的增加有略微上升;而对于

MBBR 路线,其等效污泥量为改造前的 2 倍,等效污泥龄约为改造前的 1.7 倍,故改造后剩余污泥总量为改造前的 120%,化学污泥量与 MBR 基本一致。

综上,两工艺路线对于现况工艺的契合度均较高,能够在最小的改动下实现污水厂的提标。

2.3 工艺占地

对于升级改造,两种路线均无需扩建生化池,但均涉及新增占地。MBR 路线,其主要的新增工艺占地为膜池及设备间;MBBR 路线,其主要的新增工艺占地为磁混凝澄清池。两种路线升级改造的典型案例分析数据比较见表 1。MBR 部分,设计时除了考虑变化系数外,还要考虑膜通量下降对于膜组件的补充,设计时一般预留 10% ~ 20%,同时,尽管膜通量各异,但随着规模的增大,吨水占地指标将减小,MBR 工艺污水厂的新增占地在  $280 \sim 450 \text{ m}^2/10^4 \text{ m}^3$ 。磁混凝澄清池工艺占地受表面负荷影响,一般可取  $20 \sim 40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,万吨水占地在  $60 \sim 100 \text{ m}^2/10^4 \text{ m}^3$ ,远小于 MBR 的占地,仅为其 1/3 以下。

表 1 MBR、MBBR + 磁混凝工艺对比

Tab. 1 Comparison between MBR and MBBR + magnetic coagulation process

| 项目  | A 污水厂                                      | B 污水厂                                      | C 污水厂  | D 污水厂  | E 污水厂  | F 污水厂  |
|---|--|--|--|--|--|--|
| 工艺路线  | MBR  | MBR,全地下                                    | MBR  | MBBR + 磁混凝                                     | MBBR + 磁混凝                                     | MBBR + 磁混凝                                   |
| 规模/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$      | 3  | 10   | 15   | 5  | 15   | 25   |
| 膜通量/表面负荷  | $17 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | $19 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | $16.3 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | $27.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | $18.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ | $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ |
| 占地/ $(\text{m} \times \text{m})$                  | $44 \times 28.8$                           | $96 \times 35.2$                           | $151 \times 28.5$                            | $22.4 \times 20.8$                             | $31.6 \times 33.8$                             | $29.1 \times 55.7$                           |
| 新增占地/<br>$(\text{m}^2 \cdot 10^4 \text{ m}^{-3})$ | 422  | 338  | 287  | 93.2   | 71.2   | 64.8   |
| 设备费/万元  | 2 745                                      | 7 280                                      | 11 350                                       | $2\,330 + 820$                                 | $4\,502 + 1\,616$                              | $7\,200 + 2\,936$                            |
| 土建费用/万元   | 858.5                                      | 3 838.8                                    | 2 781  | 190  | 1 070  | 2 445  |
| 总投资/万元  | 3 603.5                                    | 11 118.8                                   | 14 131                                       | 3 340  | 7 188  | 12 581                                       |
| 设备:总投资/%  | 76   | 66   | 80   | 94   | 86   | 81   |
| 吨水投资(设备)/<br>$(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$     | 915  | 728  | 756.7  | 630  | 408  | 405  |
| 比较运行成本/<br>$(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$       | $0.318 + 0.329$                            | $0.294 + 0.199$                            | $0.275 + 0.207$                              | $0.051 + 0.128$                                | $0.040 + 0.082$                                | $0.034 + 0.079$                              |

对于新建工程,相比于传统工艺,MBBR 或 MBR 均可将生化池占地缩小 50%。但 MBBR 需新增沉淀池,考虑周进周出矩形二沉池表面负荷较高且占地利用率高,一般取  $0.8 \sim 1.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,沉淀池和深度处理的占地仍需  $400 \sim 600 \text{ m}^2/10^4 \text{ m}^3$ 。此时需根据占地要求选择,当占地要求  $< 400 \text{ m}^2/10^4 \text{ m}^3$  时,MBR 工艺可满足要求,当占地要求  $\geq 400 \text{ m}^2/10^4 \text{ m}^3$  时,优先推荐 MBBR + 磁混凝路线。

对于原生化池提量,两种路线均能实现生化池

处理能力提升 100%。当提量 100%、处理能力翻倍时,MBBR 路线需扩建一半规模二沉池,新增占地在  $230 \sim 360 \text{ m}^2/10^4 \text{ m}^3$ ,小于 MBR 路线占地。

当设计出水水质需达到准 IV 类水质时,两路线的核心差别在于 SS。MBR 可实现出水  $\text{SS} < 5 \text{ mg/L}$ ,而目前尚无磁混凝出水 SS 稳定达到  $5 \text{ mg/L}$  以下的报道,需要在此技术上新增过滤单元。过滤单元可采用高精度纤维转盘滤池,高精度滤布当量孔径为  $5 \text{ }\mu\text{m}$ ,其设计滤速应控制在  $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$



以内,其万吨水占地在 $50\text{ m}^2/10^4\text{ m}^3$ 以下,吨水投资在 $50\sim 100\text{ 元/m}^3$ ,运行费用小于 $0.05\text{ 元/m}^3$ 。

具体到工程项目中,因各污水厂仍存在差异,如现况沉淀池是否需改造或扩建、已有深度处理工艺流程及运行情况等,均可能对两种路线的占地需求产生影响,选择时仍需要结合具体项目具体分析。

### 3 MBR 与 MBBR 路线投资运行比较

#### 3.1 投资对比

对于污水处理厂,投资与工艺路线的选择息息相关,需要在满足出水水质要求的情况下,尽量降低投资及运行成本。

MBR 投资主要由设备费和土建费用组成,其中,设备费占较大比重,一般在60%以上,伴随着MBR技术的研发日益成熟,MBR设备费近年来显著降低,从原来的吨水投资3 000元以上<sup>[3]</sup>,下降到现在的 $600\sim 1\,000\text{ 元}$ ,未来有望进一步降低,这也是这几年国内能够大规模应用MBR的关键;土建费用受污水厂形式(全地下、半地下、地上式)、场地条件影响较大,无法统一衡量,对于地上式污水厂,土建费用一般在设备费用的 $1/3$ 左右。

因MBBR部分无土建变动,其投资全部为设备费用,受设计水质影响较大,一般吨水投资在 $200\sim 500\text{ 元/m}^3$ ;而磁混凝吨水设备投资在 $150\sim 250\text{ 元/m}^3$ ,由于工艺负荷较高,土建占地面积小,其土建投资一般在 $100\text{ 元/m}^3$ 以下,路线整体投资在 $350\sim 750\text{ 元/m}^3$ 。同MBR路线相比,MBBR路线在投资上具有较大优势。

#### 3.2 运行成本

表1中仅比较运行成本的差异项,非全部运行成本。无论是采用MBR工艺还是MBBR工艺,其运行成本主要由以下几部分组成:药剂费、电费和易耗品折旧费用(MBR为膜、MBBR为填料)。由于两种工艺的生物池部分曝气量、设备功率基本一致,且除磷加药量相当,因此该部分费用不计入比较。即药剂费的对比仅对比除磷药剂外的其他药剂,电费的对比仅对比MBR工艺设备及磁混凝工艺设备的电费,由于全厂变压器容量不同带来的基本电费差异不计入比较。

通过对几个实际污水厂运行数据分析,MBR工艺的吨水电费及吨水折合膜更换费用(按照使用年限为5年计算)均在0.2元以上,药剂费用在0.01元左右,MBR工艺的平均运行成本在 $0.5\text{ 元/m}^3$ 以

上。对于MBBR工艺路线,仅计算其填料折旧费用,按照使用年限为10年计算,其吨水成本在0.1元以下;而磁混凝工艺的吨水药剂费用在0.02元左右,吨水电费在0.02元左右,因此,MBBR+磁混凝其总运行费用在0.2元以下。MBBR+磁混凝工艺路线在运行费用上较MBR工艺具有较大的优势。

### 4 工程案例

北方某污水厂于2011年建成投产,设计规模为 $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,采用以CAST池为核心的生物处理工艺,设计出水水质执行一级B标准,现在需进行提标扩容,使改扩建后污水处理厂规模达到 $25\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质满足一级A标准要求。厂区用地紧张,且无重新征地的可能,采用MBBR+磁混凝技术路线升级改造。一期生物处理段采用CAST-MBBR工艺进行提标,二期生物处理段采用Bardenpho-MBBR+矩形周进周出二沉池,厂区深度处理段采用磁混凝澄清池+紫外消毒工艺。设计进水 $\text{BOD}_5$ 、COD、SS、氨氮、TN、TP分别为220、500、400、40、60、8 mg/L,出水达到一级A标准。

#### 4.1 CAST池改造设计

CASS池原设计规模为 $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,共设3个系列,每系列8格CASS池,共24格,每系列生物池总平面尺寸为 $197\text{ m}\times 49\text{ m}$ ,池有效水深为5.5 m,选择区有效容积为 $1\,115.4\text{ m}^3$ 。滗水器最大滗水深度为1.9 m,池内高水位水深为5.5 m,低水位水深为4.1 m,原停留时间为19.7 h。原设计泥龄为20.1 d;负荷(不含沉淀期)为 $0.1\text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS}\cdot \text{d})$ ;剩余污泥为 $30\text{ tDS/d}$ ,含水率为99.4%, $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ;回流比为25%;周期设计,进水0.5 h,边进水边曝气1 h,曝气2 h,沉淀1 h,滗水1.5 h,周期时间为6 h;每日周期数:4个。

本次改造要点如下:

① 时序调整,本次改造设计维持原有设计周期不变,6 h为一周期,减少滗水时间,增加单独进水时间,提高反应池反硝化脱氮能力,改造后运行周期为进水1 h,边进水边曝气0.5 h,曝气2.5 h,沉淀1 h,滗水1 h。

② 主反应区重新划分,维持现况厌氧区及缺氧区尺寸不变,将一部分好氧池容调整为缺氧池,每格反应池增加1台内回流泵,用于回流污泥及硝化液,提高低温下生物反硝化脱氮能力,新增缺氧区增加潜水搅拌器;主反应区投加悬浮载体。

## 4.2 Bardenpho - MBBR 设计

Bardenpho - MBBR 已在青岛李村河、宁波新周等污水厂得以应用<sup>[4]</sup>,TN 去除效果显著,碳源投加量少。本次设计采用此路线,厌氧区、第一缺氧区、第一好氧区、第二缺氧区、第二好氧区的 HRT 分别为 1.8、6.0、8.2、3.0、1.9 h。好氧区投加 SPR-3 型悬浮载体,MBBR 区填充率为 44%,悬浮载体直径为  $(25 \pm 0.5)$  mm,高为  $(10 \pm 1)$  mm,挂膜后密度与水接近,有效比表面积大于  $450 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)行业标准。

## 4.3 磁混凝澄清池设计

磁混凝澄清池主要用于化学除磷以及进一步去除水中的悬浮物。磁混凝澄清池设计规模为  $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设计表面负荷为  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,共设 4 个系列,每系列包括:混合池、磁粉絮凝池、PAC 絮凝池、沉淀池各一个,4 个系列共用 PAM 投加系统、磁粉投加系统及污泥泵房。混合池平面尺寸为  $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ ,有效水深为 6.7 m,混合时间为 90 s,向混合池内投加 PAC,与污水充分混合;磁粉絮凝池平面尺寸为  $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ ,有效水深为 6.7 m,混合时间为 90 s,向磁粉絮凝池内投加磁粉及回流污泥,与进水及混合池投加 PAC 充分混合;PAM 絮凝池平面尺寸为  $4.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ ,有效水深为 6.7 m,絮凝时间为 120 s,向絮凝池内投加 PAM,与进水充分絮凝;澄清池平面尺寸为  $13 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ 。PAM 投加系统、磁粉投加及收集系统、污泥泵房均配套设置,用以向磁混凝澄清池投加磁粉、PAM,实现污泥回流、剩余磁粉的收集、剩余污泥的排放,PAC 的制备及投加装置统一设置于厂区加药间内。

## 4.4 运行效果

现阶段,污水厂刚刚完成升级改造进入试运行阶段,处理效果稳定,各主要指标达到设计要求。

## 5 结论

① MBR 与 MBBR + 磁混凝路线均属集约型工艺,占地省,可满足国内污水厂升级改造、扩容或新建需求,生物池处理能力可提高 100%;

② 对于升级改造项目和扩容项目,MBBR 路线更优,对于新建项目,MBR 路线与 MBBR 路线选择需根据对占地的紧缺程度判定;

③ 当设计出水水质需达到准 IV 类水质时,MBBR 路线可增加高精度滤池,强化 SS 处理效果;

④ MBBR + 磁混凝路线,投资和运行费用省,在工程实践中表现出较好的效果。

## 参考文献:

- [1] 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).
- [2] 熊建英. MBBR + 磁混凝工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水,2018,34(20):50-55.  
Xiong Jianying. Application of MBBR + magnetic coagulation process for upgrading of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20):50-55 (in Chinese).
- [3] 郝晓地,陈峤,李季,等. MBR 工艺全球应用现状及趋势分析[J]. 中国给水排水,2018,34(20):7-12.  
Hao Xiaodi, Chen Qiao, Li Ji, et al. Status and trend of MBR process application in the world[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20):7-12 (in Chinese).
- [4] 杨宇星,吴迪,宋美芹,等. 新型 MBBR 用于类地表 IV 类水排放标准升级改造[J]. 中国给水排水,2017,33(14):93-98.  
Yang Yuxing, Wu Di, Song Meiqin, et al. Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class IV surface water standard[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14):93-98 (in Chinese).



作者简介:高伟楠(1989—),男,内蒙古锡林浩特人,硕士,工程师,主要从事给排水工程设计与水环境恢复研究等工作。

E-mail:494780017@qq.com

收稿日期:2018-12-05