

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.06.011

# AAO+MBR组合工艺各工段设计要点

田海成, 杨红红, 焦文海, 杨曦凯, 王刘煜

(济南市市政工程设计研究院<集团>有限责任公司, 山东 济南 250001)

**摘要:** 随着各地污水处理厂排放标准的日趋严格,工艺流程短、出水效果好的AAO+MBR组合工艺得以快速普及,尤其对于用地面积紧张、景观环境要求高的地下式污水处理厂,其更受青睐。然而AAO+MBR组合工艺并非传统AAO和新型膜技术的简单叠加,其预处理、AAO、MBR等单元的设计与传统AAO均存在明显区别。结合国内众多工程案例,详细分析了AAO+MBR组合工艺的设计要点,如预处理工段需根据进水水质选择设置初沉池,同时应设置膜格栅以避免纤维、毛发等造成膜丝缠绕;AAO工段的特殊性在于三级回流比的确定、AAO各区设计污泥浓度的计算、AAO+MBR各区实际流量的计算、需氧量的计算以及强化脱氮措施的设计等;MBR工段的特殊性在于膜通量计算、膜区设计污泥浓度的确定、产水泵流量和扬程的计算、膜区底部吹扫设计以及膜清洗设计等。

**关键词:** AAO; MBR; 设计要点

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)06-0071-07

## Key Points for Each Section Design of AAO and MBR Combined Process

TIAN Hai-cheng, YANG Hong-hong, JIAO Wen-hai, YANG Xi-kai, WANG Liu-yu

(Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute <Group> Co. Ltd., Jinan 250001, China)

**Abstract:** With the increasingly stringent discharge standards of sewage treatment plants in China, the AAO and MBR combined process with short process flow and good effluent quality has been rapidly popularized, especially for underground sewage treatment plants with limited footprint area and high landscape environment requirements. However, the combined process is not a simple superposition of traditional AAO and new membrane technology, and the design of pretreatment, AAO, MBR and other units are obviously different from that of traditional AAO. Based on many domestic engineering cases, this paper analyzed the design points of AAO and MBR combined process in detail. For example, a primary sedimentation tank should be set according to the influent quality in the pretreatment section, and an ultrafine screen should be set to avoid the filament entanglement caused by fiber and hair. The particularity of AAO section lay in the determination of the three-stage reflux ratio, the calculation of the designed sludge concentration in each AAO section, the calculation of the actual flow of each section of AAO/MBR, the calculation of oxygen demand and the design of enhanced denitrification measures. The particularity of MBR section lay in the calculation of membrane flux, the determination of designed sludge concentration in membrane area, the calculation of pump flow and head, the design of the membrane air scouring structure at the bottom of membrane area and the design of membrane cleaning method.

**Key words:** AAO; MBR; key points of design

随着水环境治理的深入推进,北京、天津、浙江、安徽巢湖流域、四川岷江和沱江流域、江苏太湖流域等相继出台了严于一级A标准的污水排放标准。同时为缓解我国水资源供需矛盾,《关于推进污水资源化利用的指导意见》(发改环资〔2021〕13号)明确要求将污水处理达到特定水质标准后作为再生水替代常规水资源。

在“水环境”与“水资源”的双重约束下,AAO+MBR组合工艺凭借其高标准的出水水质而在新建、改建、扩建污水处理厂项目中得到了广泛应用。同时因景观效果好,占地面积省,地下污水厂正如火如荼地建设,截至2020年底,我国地下式污水处理厂数量达到109座,总处理规模达到 $1\,586\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[1]</sup>,而AAO+MBR组合工艺凭借其工艺流程短、处理能力强、占地面积省、土建投资低等独特优势而更受青睐。

然而AAO+MBR组合工艺并不是传统AAO和新型膜技术的简单叠加,该工艺流程中的预处理、二级处理、膜池等工段的设计要点都与传统工艺存在一定区别,因此笔者通过对众多AAO+MBR组合工艺应用案例的充分分析比较,详细阐述AAO+MBR组合工艺设计特点,以期后续工程设计提供参考。

## 1 预处理工段设计要点

当进水悬浮物或总磷浓度较高时,预处理工段宜设置初沉池,从而缓解后续膜格栅的运行压力、提高AAO内的MLVSS/MLSS、避免大量投加除磷药剂加剧膜污染以及因污泥浓度过高而造成氧传递效率的下降。同时与传统AAO工艺不同,为避免纤维、毛发等造成膜丝缠绕,预处理工段应设置膜格栅,孔径常采用1 mm。

## 2 AAO工段设计要点

### 2.1 污泥回流比的确定

传统AAO工艺常设置两级回流,其中污泥外回流由沉淀池回流至厌氧区首端,主要作用在于维持AAO内的微生物量,回流比一般为50%~100%;硝化液内回流由好氧区出水回流至缺氧区首端,主要作用在于将好氧区的硝态氮回流至缺氧区进行反硝化脱氮,回流比视总氮的进水水质以及出水水质要求确定,一般为200%~400%,传统AAO工艺流程见图1。

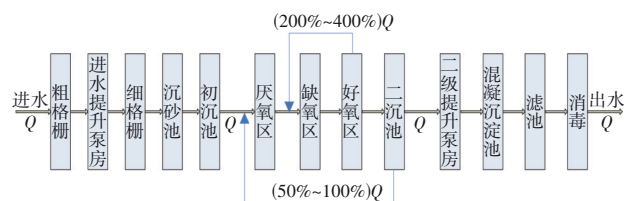


图1 传统AAO工艺流程

Fig.1 Flow chart of traditional AAO process

AAO+MBR组合工艺为避免污泥外回流中溶解氧过高而影响厌氧区释磷效果,常采用膜区至好氧区首端、好氧区出水至缺氧区首端、缺氧区出水至厌氧区首端的三级回流方式,AAO+MBR组合工艺流程见图2。

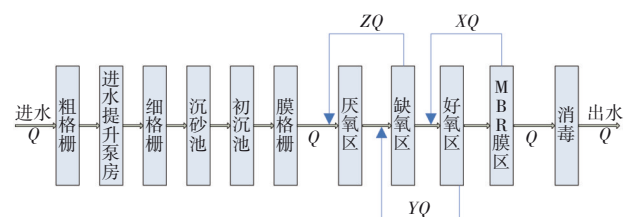


图2 AAO+MBR组合工艺流程

Fig.2 Flow chart of AAO+MBR combined process

其中膜区至好氧区首端回流作用在于维持好氧区微生物量,同时将膜区高溶解氧回流至好氧区进行充分利用,回流比一般为400%~500%;好氧区出水至缺氧区首端回流作用在于将好氧区硝态氮回流至缺氧区进行反硝化脱氮,同时维持缺氧区的微生物量,回流比视总氮的进水水质以及出水水质要求确定,一般为300%~400%;缺氧区出水至厌氧区首端回流作用在于维持厌氧区的微生物量,回流比一般为100%~200%。

### 2.2 AAO+MBR各区污泥浓度的确定

#### 2.2.1 膜区设计污泥浓度

膜技术具有卓越的泥水分离功能,在不排泥的情况下污泥浓度可以达到15 g/L甚至更高,生物池内的污泥浓度是微生物增长量与污泥衰减量之间的动态平衡,因此维持较高的污泥浓度依赖于较高的基质浓度,同时维持较高的污泥浓度会造成MLVSS/MLSS比值的下降、微生物活性的下降、氧传递效率的降低以及膜污染的加剧,AAO所需的曝气量以及膜吹扫曝气量也会随之增高。因此MBR膜区的正常设计污泥浓度不宜取值过高,建议为8~10 g/L(进水基质浓度较低时取下限值,进水基质浓度较高时取上限值),冬季低温运行期间可以将提高

污泥浓度作为延长泥龄应对出水氨氮超标的保留手段。国内部分工程案例的回流比及膜区设计污泥浓度如表 1 所示。

表 1 国内部分工程案例的回流比及膜区设计污泥浓度  
Tab.1 Return sludge ratio and membrane tank MLSS of some domestic engineering cases

工程名称	设计进水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )						设计出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )						膜区设计 污泥浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	三级回 流比(X: Y:Z)Q
	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	SS	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	SS		
四川省内江市某污水厂 <sup>[2]</sup>	450	230	35	45	4	320	30	6	1.5(3)	10	0.3	10	8	4:4:2
秦皇岛贾河污水处理厂 <sup>[3]</sup>	600	350	45	70	8	400	40	10	2(3.5)	10	0.4	5	10	5:4:2
成都市某污水处理厂 <sup>[4]</sup>	400	200	40	50	4.5	240	30	6	1.5	15	0.3	10	10	4:4:2
温州某城镇污水处理厂 <sup>[5]</sup>	350	150	30	40	3	200	50	10	5(8)	15	0.5	10	10	5:4:2
山东某污水处理 <sup>[6]</sup>	450	220	50	60	7	400	45	10	2(3.5)	15	0.4	10	10	5:3:2
成都某污水处理 <sup>[7]</sup>	350	150	35	45	6	350	30	6	1.5	15	0.3	5	10	4:3:2
山西某污水处理 <sup>[8]</sup>	560	250	45	60	6	250	50	10	5(8)	15	0.5	10	10	5:4:3
昆明市第九污水处理厂 <sup>[9]</sup>	400	180	30	45	5	300	50	10	5	15	0.5	10	10	5:3:2
昆明市第十污水处理厂 <sup>[9]</sup>	400	180	30	45	5	300	50	10	5	15	0.5	10	10	5:3:2
张家港市金港污水处理厂 <sup>[10]</sup>	350	180	30	40	4	150	50	10	5(8)	15	0.5	10	9	4:3:2
济南华山水质净化厂 <sup>[11]</sup>	450	220	70	80	7	300	30	6	1.5	15	0.3	10	10	4:4:2

2.2.2 AAO各区设计污泥浓度

传统 AAO 工艺设计中常将 AAO 内各区看作一个整体,按照统一的污泥浓度进行设计计算,而 AAO+MBR 组合工艺由于采用三级回流方式导致 AAO 内各区污泥浓度差别较大。

工程设计过程中宜根据设定的膜区污泥浓度以及三级回流比来推算 AAO 内各区的污泥浓度,以便于更真实准确地计算 AAO 内各区所需的停留时间。

计算公式如下:

$$A = \frac{Z}{(Z + 1) \times B}$$
 (1)

$$B = \frac{Y}{(Y + 1) \times C}$$
 (2)

$$C = \frac{X}{(X + 1) \times D}$$
 (3)

式中:A 为厌氧区污泥浓度,g/L;B 为缺氧区污泥浓度,g/L;C 为好氧区污泥浓度,g/L;D 为膜区污泥浓度,建议为 8~10 g/L;X 为膜区至好氧区首端回流比,一般为 400%~500%;Y 为好氧区出水至缺氧区首端回流比,一般为 300%~400%;Z 为缺氧区出水至厌氧区首端回流比,一般为 100%~200%。

利用式(1)~(3)计算常用膜区设计污泥浓度及三级回流比,AAO 各区的污泥浓度计算结果如表 2 所示。

表 2 AAO 各区设计污泥浓度计算

Tab.2 Calculation of MLSS in AAO

膜区设计 污泥浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	三级回流 比 (X:Y:Z)Q	好氧区设计 污泥浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	缺氧区设计 污泥浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	厌氧区设计 污泥浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
8	4:3:1	6.4	4.8	2.4
8	4:3:2	6.4	4.8	3.2
8	4:4:1	6.4	5.1	2.6
8	4:4:2	6.4	5.1	3.3
8	5:3:1	6.7	5.0	2.5
8	5:3:2	6.7	5.0	3.3
8	5:4:1	6.7	5.3	2.7
8	5:4:2	6.7	5.3	3.6
10	4:3:1	8.0	6.0	3.0
10	4:3:2	8.0	6.0	4.0
10	4:4:1	8.0	6.4	3.2
10	4:4:2	8.0	6.4	4.3
10	5:3:1	8.3	6.3	3.1
10	5:3:2	8.3	6.3	4.2
10	5:4:1	8.3	6.7	3.3
10	5:4:2	8.3	6.7	4.4

2.3 AAO+MBR 各区实际流量的计算

AAO+MBR 组合工艺由于采用三级回流方式造成各区实际流量远高于传统 AAO 工艺,实际流量的增大不仅造成实际水力停留时间的减少,也影响着各区回流渠道、连通洞口、出水堰的尺寸及相应水头损失和堰上水头的计算,因此各区实际流量的准

确计算是保障水流顺畅及混合效果良好的前提。AAO+MBR各区实际流量见图3。

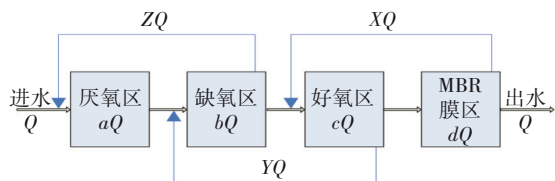


图3 AAO+MBR各区实际流量

Fig.3 Actual flow of each zone in AAO+MBR

各区实际流量可根据三级回流比进行推算：

$$a = Z + 1 \quad (4)$$

$$b = Y + Z + 1 \quad (5)$$

$$c = X + Y + 1 \quad (6)$$

$$d = X + 1 \quad (7)$$

式中： $a$ 为厌氧区内实际流量， $nQ$ ； $b$ 为缺氧区内实际流量， $nQ$ ； $c$ 为好氧区内实际流量， $nQ$ ； $d$ 为膜区内实际流量， $nQ$ 。

利用式(4)~(7)计算常用三级回流比情况下AAO+MBR组合工艺各区实际流量，具体结果如表3所示。

表3 AAO+MBR各区实际流量计算

Tab.3 Calculation of actual flow in AAO+MBR

三级回流比 (X:Y:Z)Q	厌氧区内流量 (aQ)	缺氧区内流量 (bQ)	好氧区内流量 (cQ)	膜区内流量 (dQ)
4:3:1	2Q	5Q	8Q	5Q
4:3:2	3Q	6Q	8Q	5Q
4:4:1	2Q	6Q	9Q	5Q
4:4:2	3Q	7Q	9Q	5Q
5:3:1	2Q	5Q	9Q	6Q
5:3:2	3Q	6Q	9Q	6Q
5:4:1	2Q	6Q	10Q	6Q
5:4:2	3Q	7Q	10Q	6Q

## 2.4 AAO好氧区需氧量的计算

AAO+MBR组合工艺中AAO好氧区需氧量计算公式可参照《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中的公式计算，需要注意之处如下：

① 计算公式中的第一项(去除碳源污染物所需氧量)时，考虑到部分甚至全部 $BOD_5$ 已在缺氧区用于异养反硝化脱氮，建议按照进入好氧区的 $BOD_5$ 所需氧量进行计算。

② MBR膜区至好氧区首端回流液中的溶解氧通常可达4~8 mg/L，按回流比500%计算，理论上

可满足4.38 mg/L的氨氮氧化需求(溶解氧按4 mg/L计，1 mg氨氮氧化需氧量按4.57 mg测算)，因此AAO好氧区需氧量的计算应考虑予以扣除， $O_{扣除}(kgO_2/d) = (4 \sim 8)XQ(m^3/d)/1000$ 。

③ 研究表明氧传递效率随着污泥浓度的增大而降低，AAO+MBR组合工艺内各区污泥浓度显著高于传统AAO工艺，因此在由需氧量转化为所需曝气量过程中应考虑氧传递效率降低的影响。

④ 由于污水厂的实际进水量是波动的，而AAO+MBR组合工艺中各区实际流量又远高于传统AAO工艺，在AAO出水堰宽固定的情况下，其水位波动一般可达0.3 m之多，好氧区水深的变化不仅会影响曝气量的变化，还会造成空气管道背压的波动，因此AAO+MBR组合工艺各系列之间建议采取曝气量的精确控制措施，同时各组AAO之间宜采取连通措施平衡液位差。

## 2.5 AAO强化脱氮措施

近年来各地对污水处理厂出水总氮要求不断提高，而AAO+MBR组合工艺虽然工艺流程短，但是也面临着提标改造困难的问题，因此在AAO+MBR组合工艺设计之初宜考虑进水总氮升高或者出水总氮标准提高的可能，采取更加灵活的工艺组合方式，如采用AAOA+MBR或者AAOAO+MBR等工艺形式强化总氮的去除(工艺流程见图4、5)，在设置后缺氧区情况下，建议优先采用从后缺氧区中部或末端回流至第一缺氧区的回流方式。

具体工程案例见表4。

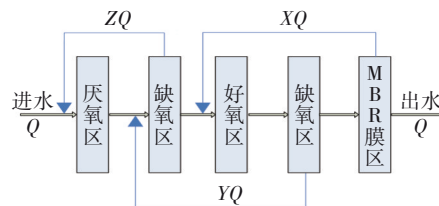


图4 AAO+MBR工艺流程

Fig.4 Flow chart of AAOA+MBR process

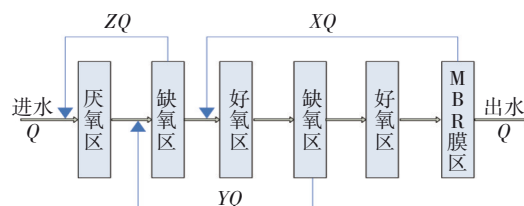


图5 AAOAO+MBR工艺流程

Fig.5 Flow chart of AAOAO+MBR process



表4 AAO+MBR组合工艺常用形式

Tab.4 Common form of AAO+MBR combined process

mg·L<sup>-1</sup>

工程名称	设计进水总氮	设计出水总氮	工艺形式
长沙市湘湖污水处理厂 <sup>[12]</sup>	27	8	AAO+MBR
十堰神定河污水处理厂 <sup>[13]</sup>	30	15	AAO+MBR
四川省某座城市污水处理 厂 <sup>[14]</sup>	40	10	AAO+MBR
张家港市金港污水处理 厂 <sup>[10]</sup>	40	15	AAO+MBR
武汉市铁路桥污水厂	35	15	AAO+MBR
秦皇岛贾河污水处理厂 <sup>[3]</sup>	70	10	AAO+MBR
上海市某污水处理厂 <sup>[15]</sup>	45	15	AAO+MBR
成都市某污水处理厂 <sup>[4]</sup>	50	15	AAO+MBR
温州某城镇污水处理厂 <sup>[5]</sup>	40	15	AAO+MBR
成都某污水处理厂 <sup>[7]</sup>	35	15	AAO+MBR
山西某污水处理厂 <sup>[8]</sup>	60	15	AAO+MBR
济南华山水质净化厂 <sup>[11]</sup>	80	15	AAO+MBR
武汉北湖污水处理厂 <sup>[16]</sup>	35	15	改良 AAO+MBR
广州京溪污水处理厂工 程 <sup>[17]</sup>	35	15	改良 AAO+MBR
昆明市第九污水处理厂 <sup>[9]</sup>	45	15	AAOA+MBR
昆明市第十污水处理厂 <sup>[9]</sup>	45	15	AAOA+MBR
山东某污水处理厂 <sup>[6]</sup>	60	15	AAOA+MBR
四川省内江市某污水厂 <sup>[2]</sup>	45	10	AAOA+MBR
某城镇污水处理厂 <sup>[18]</sup>	40	10	AAOAO+MBR
北京市门头沟第二再生水 厂 <sup>[19]</sup>	70	10	AAOAO+MBR

3 MBR 工段设计要点

3.1 膜通量计算

膜通量是跨膜压差与实际过滤阻力之间动态平衡的结果,受膜材料性质、混合液特征、操作条件等因素影响,实际工程中膜通量取值范围变化较大,一般在 15~25 L/(m<sup>2</sup>·h)之间。

国内部分工程案例的设计平均膜通量如表5所示。

对于平均膜通量、运行膜通量的设计取值以及峰值通量、强制通量的校核在《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中已有相关要求,此外,工程设计中需要注意之处在于运行通量、峰值通量和强制通量的计算过程中还需要考虑厂区自用水(包括加药间、污泥脱水间、膜池反洗等所需的回用水)的影响。

表5 国内部分工程案例的膜通量

Tab.5 Membrane flux of some domestic engineering cases

工程名称	设计规模/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	设计平均膜通量/ (L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
武汉北湖污水处理厂 <sup>[16]</sup>	40	13.78
成都某污水处理厂 <sup>[7]</sup>	4	14.0
四川省内江市某污水厂 <sup>[2]</sup>	1.8	14.5
广州京溪污水处理厂工程 <sup>[17]</sup>	10	14.5
成都市某污水处理厂 <sup>[4]</sup>	15	15.0
北京市门头沟第二再生水 厂 <sup>[19]</sup>	8	15.5
上海市某污水处理厂 <sup>[15]</sup>	20	16.04
十堰神定河污水处理厂 <sup>[13]</sup>	14	16.2
济南华山水质净化厂 <sup>[11]</sup>	3	16.3
温州某城镇污水处理厂 <sup>[5]</sup>	1	16.53
山西某污水处理厂 <sup>[8]</sup>	12	17.26
四川省某座城市污水处 理厂 <sup>[14]</sup>	3.5	17.36
武汉市铁路桥污水厂	10	17.5
长沙市湘湖污水处理厂 <sup>[12]</sup>	14	17.81
秦皇岛贾河污水处理厂 <sup>[3]</sup>	7	18.27
昆明市第九污水处理厂 <sup>[9]</sup>	10	19.61
昆明市第十污水处理厂 <sup>[9]</sup>	15	19.61
山东某污水处理厂 <sup>[6]</sup>	10	24.1
张家港市金港污水处理厂 <sup>[10]</sup>	5	25.0

3.2 产水泵流量、扬程计算

产水泵需要根据膜区实际液位实现阶梯恒通量运行模式,避免膜通量频繁变化造成的跨膜压差快速增加,产水泵宜采用流量-扬程曲线变化平缓的变频泵。产水泵流量应按照强制膜通量进行计算,尤其对于易受水淹的地下式污水处理厂,产水泵流量应留有充分余量。大中型污水处理厂几乎都采用配有抽真空系统的普通离心泵,为防止水泵发生气蚀,宜采取放大吸水总管管径、降低吸水总管高度等方式降低吸水总管水头损失与跨膜压差之和,同时设备采购时宜选择气蚀余量小于 2.5 m 的优质离心泵。

3.3 安全设计

为防止进水流量过大或产水泵故障等极端情况造成水淹事故,膜区液位信号应与进水泵联动控制,膜区液位较高时进水泵宜降频运行,膜区液位达到报警液位时进水泵应停止运行,液位降低至膜区正常液位时再恢复运行。同时应在膜区或者

AAO设置溢流措施,水位过高时可溢流至进水泵房,这一点对于地下式污水处理厂尤为重要。

### 3.4 膜区底部吹扫设计

为保障各系列布水均匀,膜池进水渠流速较低,为避免污泥在进水渠、回流渠内沉积,同时避免膜池内短流等因素造成污泥沉积,建议在进水渠、污泥渠、膜池底部设置曝气吹扫系统,气源可接自膜池吹扫干管,通过阀门进行控制。

### 3.5 膜清洗设计

采用酸、碱药剂对膜箱进行清洗有利于缓解膜污染,降低跨膜压差。膜清洗分为低浓度在线清洗和高浓度离线清洗,当在线清洗无法有效降低膜通量时,应及时进行离线清洗。离线清洗包括整系列原位离线清洗和逐个吊装至清洗池的离线清洗,原位离线清洗速度快,膜箱无需吊装,但是清洗前需要关闭进出水闸门并进行放空,清洗时会显著增加其他系列产水负荷且清洗药剂存在一定的污染。因此,建议优先选择清洗池逐个清洗方式,可更有效降低跨膜压差。此外,无论采用哪种离线清洗方式,膜池及清洗池均应采取防腐措施。

## 4 结论

① AAO+MBR组合工艺具有出水效果好、工艺流程短、占地面积省等优点,可满足各地城镇污水处理厂排放标准日趋严格以及推动污水资源化利用的需要,尤其是对于节地要求较高的地下污水处理厂具有显著优势。但与传统AAO工艺相比,AAO+MBR组合工艺具有自身的特点。

② AAO+MBR组合工艺中,预处理工段需根据进水水质选择设置初沉池,同时应设置膜格栅;AAO工段的特殊性在于三级回流比的确定、AAO各区设计污泥浓度的计算、AAO+MBR各区实际流量的计算、需氧量的计算以及强化脱氮措施的设计等;MBR工段的特殊性在于膜通量计算、膜区设计污泥浓度的确定、产水泵流量和扬程的计算、膜区底部吹扫设计以及膜清洗设计等。

### 参考文献:

[1] 王凯军,宫徽.在生态文明框架下推动污水处理行业高质量发展[J].给水排水,2021,47(8):1-7.  
WANG Kaijun, GONG Hui. Pursue ecological civilization and promote high quality development of wastewater treatment [J]. Water & Wastewater

Engineering,2021,47(8):1-7(in Chinese).

[2] 白玉华,张欣宇,黄政鑫,等. AAO-MBR强化脱氮工艺用于内江市某污水厂提标改造[J]. 中国给水排水,2020,36(24):87-91.

BAI Yuhua, ZHANG Xinyu, HUANG Zhengxin, *et al.* AAO-MBR enhanced denitrification process for upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Neijiang [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 87-91(in Chinese).

[3] 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).

[4] 白玉华,马林伟,贾韬,等. AAO-MBR工艺用于污水处理厂的不停产扩能提标改造[J]. 环境工程,2021,39(4):20-24.

BAI Yuhua, MA Linwei, JIA Tao, *et al.* Application of AAO-MBR process for non-stop capacity expansion and upgrading of a wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(4): 20-24 (in Chinese).

[5] 谢晓旺,李露泽. AAO-MBR工艺在某城镇污水处理厂中的应用[J]. 净水技术,2020,39(8):23-27.

XIE Xiaowang, LI Luze. Application of AAO-MBR process in a urban wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 23-27 (in Chinese).

[6] 郑枫,慕杨,孙逊. MBR工艺用于山东省某污水处理厂扩建工程[J]. 中国给水排水,2020,36(18):81-84.

ZHENG Feng, MU Yang, SUN Xun. MBR process used in expansion project of a sewage treatment plant in Shandong Province [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 81-84(in Chinese).

[7] 于弢,肖国仕,陈爱宁,等. 某污水处理厂提标改造工程设计[J]. 工业用水与废水,2020,51(2):73-76,80.

YU Tao, XIAO Guoshi, CHEN Aining, *et al.* Upgrading and reconstruction project design of a wastewater treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(2): 73-76,80(in Chinese).

[8] 尹利军,刘雪林,柏星安,等. 山西某污水处理厂工艺设计案例解析[J]. 绿色科技,2019(12):64-68.

- YIN Lijun, LIU Xuelin, BAI Xing'an, *et al.* A case study of water treatment plant design in Shanxi Province [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019 (12): 64-68 (in Chinese).
- [9] 邱维. 昆明市第九、第十地下污水处理厂设计实例分析[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(10): 22-27.
- QIU Wei. Design principle of the ninth and the tenth underground wastewater treatment plants in Kunming City [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(10): 22-27(in Chinese).
- [10] 施卫娟,李培培. 金港地下污水处理厂工程建设及设计特点[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(18): 81-83.
- SHI Weijuan, LI Peipei. Construction and design features of underground wastewater treatment plant of Jingang [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(18): 81-83(in Chinese).
- [11] 杨曦凯,田海成,王冠,等. 济南华山全地下水水质净化厂AAO+MBR工艺设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(22): 59-62.
- YANG Xikai, TIAN Haicheng, WANG Guan, *et al.* Design of AAO and MBR process of Huashan underground wastewater purification plant in Jinan [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(22): 59-62 (in Chinese).
- [12] 潘兆宇,张文,吴未红,等. AAO-MBR工艺在湘湖污水处理厂提标改造工程中的应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(8): 26-31.
- PAN Zhaoyu, ZHANG Wen, WU Weihong, *et al.* Application of AAO-MBR process in upgrading and reconstruction project of Xianghu WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(8): 26-31 (in Chinese).
- [13] 侯晓庆,邓磊,高海英,等. MBR工艺在神定河污水处理厂升级改造中的应用[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(22): 66-70.
- HOU Xiaoqing, DENG Lei, GAO Haiying, *et al.* Application of MBR process in the upgrading and reconstruction project of Shending River wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(22): 66-70(in Chinese).
- [14] 许敏,刘梦楠. 改良型氧化沟扩容改造AAO-MBR工艺工程设计[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(2): 48-52.
- XU Min, LIU Mengnan. Design of AAO-MBR process for modified oxidation ditch expansion [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(2): 48-52(in Chinese).
- [15] 高原. AAO-MBR工艺提标改造小型城市污水处理厂[J]. *水处理技术*, 2018, 44(8): 126-128.
- GAO Yuan. Upgrading and reconstruction of small urban wastewater treatment plant by AAO-MBR technology [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(8): 126-128(in Chinese).
- [16] 陈宝玉,杨涛,刘东征,等. 武汉北湖污水处理厂设计关键节点分析及组合流程的应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(24): 92-98.
- CHEN Baoyu, YANG Tao, LIU Dongzheng, *et al.* Essential analysis of design key node and application of combined process in Beihu wastewater treatment plant in Wuhan [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(24): 92-98(in Chinese).
- [17] 陈贻龙. 地下式MBR工艺在广州京溪污水处理厂的应用[J]. *给水排水*, 2010, 36(7): 51-54.
- CHEN Yilong. Application of underground MBR in Guangzhou Jingxi wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(7): 51-54 (in Chinese).
- [18] 谢益佳,戴仲怡,李树苑,等. 污水处理厂微氧曝气-多段AO工艺优化运行实践[J]. *给水排水*, 2021, 47(8): 45-48.
- XIE Yijia, DAI Zhongyi, LI Shuyuan, *et al.* Application of micro oxygen aeration multi stage AO process in optimal operation mode of wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(8): 45-48(in Chinese).
- [19] 吴念鹏,贾芳芳,王国华,等. 高出水标准地下式再生水厂运行难点探讨[J]. *给水排水*, 2019, 45(10): 42-46.
- WU Nianpeng, JIA Fangfang, WANG Guohua, *et al.* Discussion on difficulties in operation of underground reclaimed water treatment plant with high discharge standard [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(10): 42-46(in Chinese).

**作者简介:**田海成(1991- ),男,黑龙江黑河人,硕士,工程师,注册公用设备工程师(给水排水),一级建造师(市政工程),注册咨询工程师(投资),从事城镇供排水设计、咨询工作,曾获山东省及济南市优秀工程勘察设计奖9项。

**E-mail:**shjytc@jnszy.com

**收稿日期:**2022-01-03

**修回日期:**2022-02-20

(编辑:孔红春)