

## 城镇给排水工程设计案例专栏

吴明明,周毅,熊珍,等.某地下污水厂MBR膜运行效率及工艺控制分析[J].净水技术,2024,43(5):176-181.

WU M M, ZHOU Y, XIONG Z, et al. Analysis of operation efficiency and process control of MBR membrane for an underground WWTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5):176-181.

## 某地下污水厂 MBR 膜运行效率及工艺控制分析

吴明明,周毅,熊珍,张诗雄,陈俊,高芳,刘畅\*,黄凯

(中建三局绿色产业投资有限公司,湖北武汉 430100)

**摘要** 近年来缺氧-厌氧-好氧+膜生物反应器(AAO+MBR)工艺在污水处理厂的应用越来越广泛,但广大专家、学者对MBR膜的运行效率、工艺控制研究较少。文中结合武汉市近年来建设的一座10万m<sup>3</sup>/d规模的全地下式污水处理厂的运行经验,对AAO+MBR工艺设计概况、运行效率、工艺控制要点、运行电耗进行研究,尤其对MBR膜的处理效率进行了重点研究。结果表明,MBR膜对进膜污水中的COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN、TP均有一定的降解处理能力,除TN的去除率较低(10%~37%)外,其他污染物指标去除率均可达到40%以上。其中,氨氮、TN的降解速率影响因素与传统生化处理一致,主要为温度、碳源。研究以期后续类似项目设计、运行管理提供参考。

**关键词** AAO+MBR MBR运行效率 地下污水厂 电耗分析 工艺控制

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2024)05-0176-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.05.020

## Analysis of Operation Efficiency and Process Control of MBR Membrane for an Underground WWTP

WU Mingming, ZHOU Yi, XIONG Zhen, ZHANG Shixiong, CHEN Jun, GAO Fang, LIU Chang\*, HUANG Kai

(China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co., Ltd., Wuhan 430100, China)

**Abstract** In recent years, the AAO + MBR process has been widely used in the wastewater treatment plants (WWTPs), but there are few studies on the operational efficiency and process control of MBR membrane system at home. Based on the operating experience of a 100 000 m<sup>3</sup>/d underground WWTP built in Wuhan City in recent years, the general situation of AAO + MBR process design, operation efficiency, key points of process control and operation power consumption are studied, especially the treatment efficiency of MBR membrane system is studied emphatically. The results show that the MBR membrane system can degrade COD<sub>Cr</sub>, ammonia nitrogen, TN and TP, and the removal rate of TN is low (10% ~ 37%), the removal rate of other pollutants can reach more than 40%. The factors affecting the degradation rate of ammonia nitrogen and TN are the same as those of traditional biochemical treatment, mainly temperature and carbon source. The research is conducted to provide reference for the similar project design and operation management of follow-up similar projects.

**Keywords** AAO + MBR MBR operation efficiency underground wastewater treatment plant (WWTP) energy consumption analysis process control

[收稿日期] 2023-03-06

[作者简介] 吴明明(1988—),男,硕士,工程师,主要从事水环境、污水处理技术管理及运营管理工作, E-mail: 769744836@qq.com。

[通信作者] 刘畅,男,博士,高级工程师,主要从事水环境、污水处理技术管理及运营管理工作, E-mail: 601996084@qq.com。

随着城市发展,很多大型城市的污水厂面临用地紧张、出水水质要求高等问题,地理式AAO+MBR污水处理厂已成为解决这些问题的一条有效途径,具有分离效果好、占地面积小、污泥浓度高、去除效果良好等特点<sup>[1-2]</sup>。

国内学者主要对缺氧-厌氧-好氧+膜生物反应器(AAO+MBR)工艺的设计及整体处理效果进行研究,如王雪等<sup>[3]</sup>研究了AAO+MBR工艺在集约化高排放标准半地下式污水处理厂的设计应用;孟涛等<sup>[4]</sup>研究了MBR在青岛某全地下污水处理厂的设计应用;于翔等<sup>[5]</sup>对厌氧-缺氧-好氧-缺氧+膜生物反应器(AAO+MBR)工艺的设计及整体运行效果进行分析;贾海涛等<sup>[6]</sup>对地下式MBR污水处理厂的整体运行效果进行研究,以上研究均侧重对组合工艺的整体运行效果进行研究,缺少MBR膜单元处理效率的研究及工艺控制的分析。室外排水设计标准中关于MBR设计规定了污泥负荷,同样未规定MBR膜对各污染物的去除效率,对采用MBR膜进行设计及运营MBR膜的人员造成困扰。因此,笔者对地下污水厂中MBR膜的处理效率及工艺控制进行重点分析,同时对AAO+MBR的电耗进行研究,以期积累数据,为将来MBR膜工艺的规范设计及运行优化提

供参考,弥补该方面研究不足的问题。

## 1 设计概况

### 1.1 工程概况

该项目为武汉市某新建全地下污水厂处理厂,设计规模为10万m<sup>3</sup>/d,总变化系数K<sub>z</sub>=1.3,服务面积为18.4km<sup>2</sup>,服务人口约为87万人。服务范围排水体制为雨、污合流制,污水厂处理后的尾水排入明渠,作为明渠的生态补水水源。该项目于2022年3月10日进入试运行。

### 1.2 设计进出水水质

该项目出水标准达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,主要指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类水质标准(除TN≤15mg/L、SS≤10mg/L外,其他主要指标均执行地表Ⅳ类水质标准)。具体指标如表1所示。

表1 设计进出水水质

Tab. 1 Designed Influent and Effluent Water Quality

水质指标	COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	粪大肠菌群/(个·L <sup>-1</sup> )
设计进水	<240	<35	<40	<160	<3.2	/
设计出水	≤30	≤1.5	≤15	≤10	≤0.3	≤1 000
去除率	≥87.5%	≥95.71%	≥62.5%	≥93.75%	≥90.6%	/

### 1.3 设计工艺

本工程污水处理采用“预处理+AAO生物池+MBR膜池”作为主体处理工艺,污水消毒采用紫外线消毒,辅以次氯酸钠消毒。污泥处理采用机械浓缩脱水一体化工艺,经过脱水处理达到80%含水率后外运。具体如图1所示。

(1)地下部分包括一座管理楼和一座整体地下处理车间,地下处理车间总建筑面积为22 410.5 m<sup>2</sup>,管理楼建筑面积为2 025.02 m<sup>2</sup>。

(2)地下处理车间内设处理设施单元有:细格栅及曝气沉砂池、膜格栅、AAO生物池、MBR膜池及膜设备间、紫外线消毒装置。根据进出水的实际情况,进水结合井和尾水巴氏计量槽单独设置,为地理式设计。处理车间内附属设施包括鼓风机房、加药间、污泥脱水机房、配电间、排水泵房、应急溢流调节泵房,以及通风、除臭、消防设施等。

(3)地面部分包括驿站、楼梯间、风机房、风井等以及地面的绿化景观。

### 1.4 设计参数

设计平均时流量Q=4 166.67 m<sup>3</sup>/h,设计最大时流量Q<sub>max</sub>=5 416.67 m<sup>3</sup>/h。污水厂除生物池按平均时流量设计外,其余按最大时流量设计,包括连通道管渠等。

(1)进水结合井:粉碎型格栅栅隙为9 mm。

(2)细格栅:过滤孔板孔径为5 mm。

(3)曝气沉砂池:水力停留时间为6.5 min,水平流速为0.07 m/s,曝气量为0.2 N·m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>污水。

(4)膜格栅:过滤孔板孔径为1 mm。

(5)AAO生物池:污泥质量浓度(MLSS)为5 000~8 000 mg/L,污泥负荷为0.055 kg BOD<sub>5</sub>/(kg MLSS·d),总氮负荷率≤0.05 kg TN/(kg MLSS·d),容积负荷为0.264 kg BOD<sub>5</sub>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),泥龄为12 d,厌氧区停留时间为1.6 h,缺氧区停留时间为3.65 h,好氧区停留时间为5.10 h,生物池总停留时间为10.35 h。缺氧区回流到厌氧区回流比为100%~200%;好氧区回流到缺氧区回流比为300%~

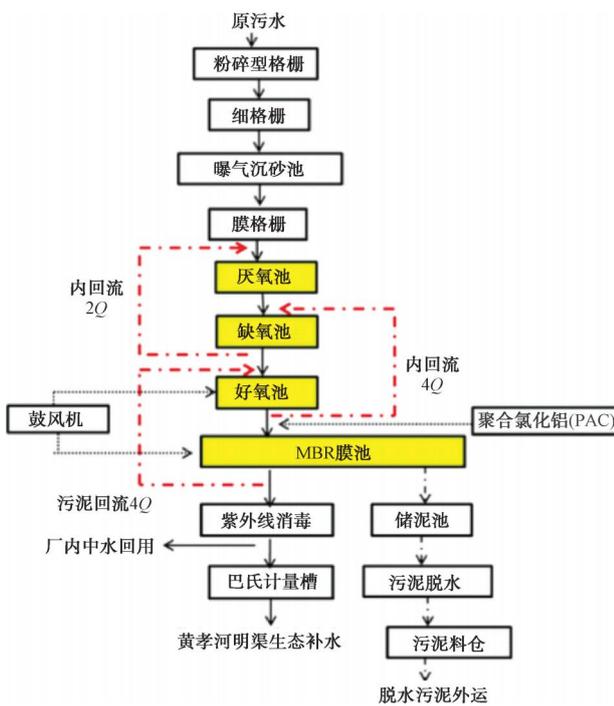


图1 工艺流程

Fig. 1 Technological Process

400%;膜池回流到好氧区回流比为 300%~400%。

(6) MBR 膜池:有效容积为 6 935 m<sup>3</sup>,停留时间为 1.6 h;选用聚偏氟乙烯(PVDF)浸没式中空纤维膜,单个膜箱产水量为 1 190 m<sup>3</sup>/d,共 84 个,平均运行膜通量为 17.5 L/(m<sup>2</sup>·h),最大跨膜压差为 0.05 MPa<sup>[7]</sup>。产水泵 Q=917 m<sup>3</sup>/h,扬程 H=19.5 m,功率 N=75 kW,7 用 2 备;产水周期为运行 9 min,停歇 1 min;反洗周期为 2 h 反洗 1 次,利用停歇的 1 min 进行反洗。

(7) 鼓风机房:曝气池气水比为 5.2:1.0,膜池气水比为 9:1。

(8) 污泥脱水机房:最大污泥产量为 16 000 kg/d(干重),进泥含水率约为 99.4%,药剂种类为聚丙烯酰胺(PAM),每日运行时间为 16 h,脱水后干污泥质量分数≥20%。

## 2 MBR 膜运行效率

本项目自 2022 年 3 月开始试运行,经过接近一年的运行,处理水量达到设计处理能力的 70%~80%,出水水质稳定达到Ⅳ类水质标准。在 MBR 膜池进水口且曝气均匀处,取水下 1 m 处水样进行化验分析,化验各项指标前采用滤纸过滤。下面对 AAO+MBR 工艺的运行效果及 MBR 膜处理效率进

行分析,并进行电耗分析。

### 2.1 COD<sub>Cr</sub> 处理效果

由图 2 可知,运行期间,进水 COD<sub>Cr</sub> 波动较大,月平均质量浓度为 67~221 mg/L,经过 AAO 工艺处理后,进膜 COD<sub>Cr</sub> 月均值为 18.5~38.3 mg/L,经过 MBR 膜处理后,出水 COD<sub>Cr</sub> 月均值为 8.43~22.5 mg/L,且除 3 月份因处于试运行初始阶段,出水 COD<sub>Cr</sub> 较高,其他月份出水 COD<sub>Cr</sub> 均低于 17 mg/L,低于设计出水标准 30 mg/L。

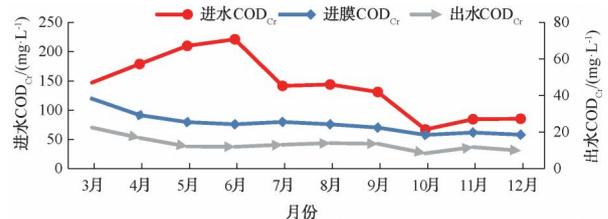


图2 进出水 COD<sub>Cr</sub> 趋势

Fig. 2 Influent and Effluent Trend of COD<sub>Cr</sub>

由图 3 可知,MBR 膜降解 COD<sub>Cr</sub> 的月均绝对值为 8~16 mg/L,月均 COD<sub>Cr</sub> 去除率为 40%~55%,降解绝对值与去除率呈正相关关系。

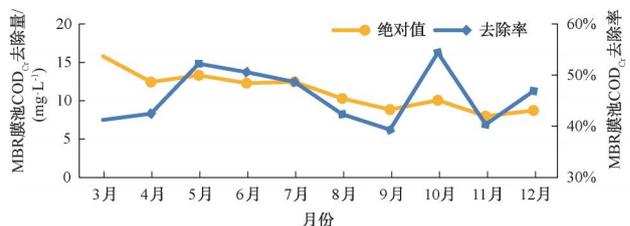


图3 MBR 工艺 COD<sub>Cr</sub> 降解绝对值与去除率

Fig. 3 Absolute Value and Removal Rate of COD<sub>Cr</sub>

### Degradation in MBR Process

该组合工艺对有机物的处理效率,明显优于传统活性污泥工艺。这一方面是由于膜处理法的高效固液分离效果使出水中的 SS 浓度极低;另一方面是因为本工程中膜处理工艺使处理系统中维持了较高的 MLSS 值,膜分离区 MLSS 为 6~10 g/L,有利于一些大分子难降解有机物的分解,提高系统容积负荷,强化了处理系统的抗冲击负荷能力<sup>[6]</sup>。

### 2.2 TP 处理效果

由图 4 可知,运行期间,进水 TP 月平均质量浓度为 1.04~2.25 mg/L,经过 AAO 工艺处理后,进膜 TP 月均值为 0.30~0.57 mg/L。经过 MBR 膜处理后,出水 TP 月均值为 0.08~0.28 mg/L,因 3 月—5 月,加药系统处于调试阶段,出水 TP 偏高。6 月—

12月的月均值低于 0.2 mg/L, 低于设计出水标准 (0.3 mg/L)。由图 5 可知, MBR 膜降解 TP 月平均质量浓度为 0.11~0.37 mg/L, 月均 TP 去除率为 33.6%~64.25%, 6月—12月月均 TP 去除率为 45.00%~64.25%。

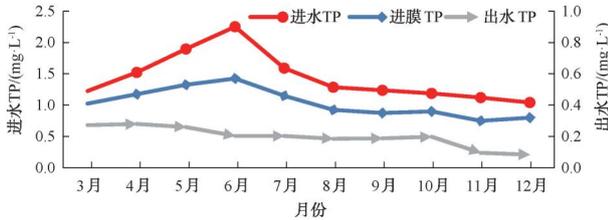


图 4 进出水 TP 趋势

Fig. 4 Influent and Effluent Trend of TP

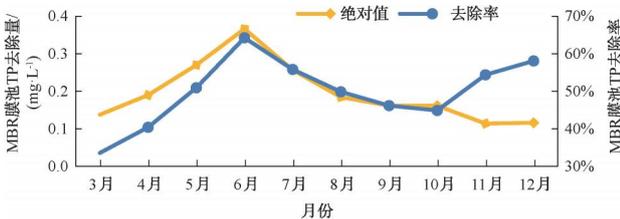


图 5 MBR 工艺 TP 降解绝对值与去除率

Fig. 5 Absolute Value and Removal Rate of TP

Degradation in MBR Process

### 2.3 氨氮处理效果

由图 6 可知, 运行期间, 进水氨氮月平均质量浓度为 8~17 mg/L, 经过 AAO 工艺处理后, 进膜氨氮月均值为 0.22~2.46 mg/L。经过 MBR 膜处理后, 出水氨氮月均值为 0.05~1.22 mg/L, 且除 3 月份因处于试运行初始阶段, 出水氨氮较高, 其他月份出水氨氮均低于 0.18 mg/L, 远低于设计出水标准 (1.5 mg/L)。由图 7 可知, MBR 膜降解氨氮的月均绝对值为 0.17~1.24 mg/L, 月均氨氮去除率为 50%~85%。考虑 MBR 膜能高效地进行固液分离, 将废水中的悬浮物质、胶体物质、生物单元流失的微生物菌群与已净化的水分离, 可防止各种微生物菌群的流失, 有利于生长速度缓慢的细菌 (硝化细菌等) 的生长, 从而使系统维持较高的氨氮去除效率。

### 2.4 TN 处理效果

由图 8 可见, 运行期间, 进水 TN 月平均质量浓度为 11.38~18.22 mg/L, 经过 AAO 工艺处理后, 进膜 TN 月均值为 9.67~12.88 mg/L, 经过 MBR 膜处理后, 出水 TN 月均值为 6.83~10.65 mg/L, 其中 6 月—8 月出水 TN 月均值均低于 8 mg/L, 远低于设计出水标准 15 mg/L。

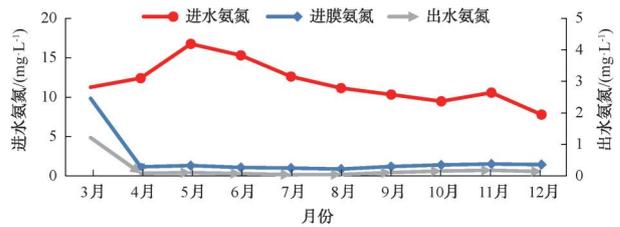


图 6 进出水氨氮趋势

Fig. 6 Influent and Effluent Trend of Ammonia Nitrogen

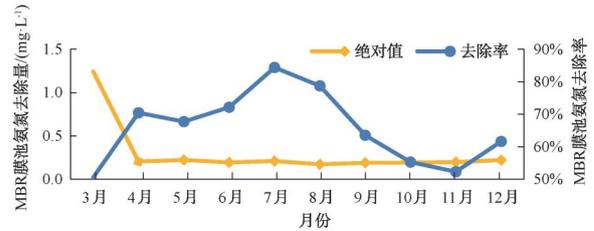


图 7 MBR 工艺氨氮降解绝对值与去除率

Fig. 7 Absolute Value and Removal Rate of Ammonia Nitrogen Degradation in MBR Process

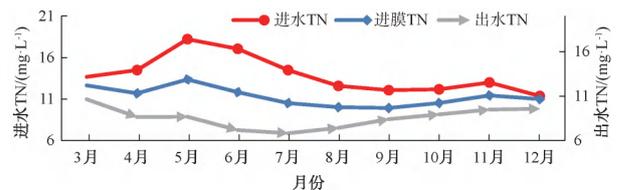


图 8 进出水 TN 趋势

Fig. 8 Influent and Effluent Trend of TN

由图 9 可知, MBR 膜降解 TN 的月均绝对值为 1.09~4.27 mg/L, 月均 TN 去除率为 10%~37%, 4 月—9 月 TN 去除率明显高于其他月份, 一是因为 4 月—9 月进水  $COD_{Cr}$  高于其他月份, 为反硝化细菌提供了较为充足的碳源, 二是因为反硝化反应适宜的温度是 20~40 °C, 低于 15 °C 时, 反硝化细菌反硝化速率下降<sup>[8]</sup>。

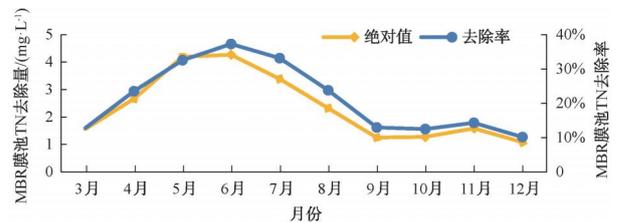


图 9 MBR 工艺 TN 降解绝对值与去除率

Fig. 9 Absolute Value and Removal Rate of Ammonia Nitrogen Degradation in MBR Process

### 2.5 SS 处理效果

由图 10 可知, 运行期间, 进水 SS 月平均质量浓度为 64~141 mg/L, 经过 MBR 膜泥水分离后, 出水 SS 月均值为 2.35~6.12 mg/L, 其中 6 月—12 月出水 SS

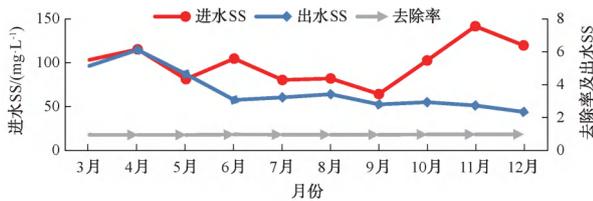


图 10 进出水 SS 趋势

Fig. 10 Influent and Effluent Trend of SS

月均值均低于 3.3 mg/L, 稳定低于设计出水标准

表 2 AAO+MBR 工艺控制参数对比

Tab. 2 Comparison of AAO+MBR Process Control Parameters

项目	生化池 MLSS/ (g·L <sup>-1</sup> )	膜池 MLSS/ (g·L <sup>-1</sup> )	平均膜通量/ [L·(m <sup>2</sup> ·h) <sup>-1</sup> ]	生化池污泥负荷/ [kg BOD <sub>5</sub> ·(kg MLSS·d) <sup>-1</sup> ]	MBR 膜池污泥负荷/ [kg BOD <sub>5</sub> ·(kg MLSS·d) <sup>-1</sup> ]
标准	2.5~4.5	6~15	15~25	0.05~0.10	0.03~0.10
项目设计	5~8	6~8	17.5	0.055	/
运行(8月)	4.5	9.5	22	0.076 5	0.044
运行(3月—12月)	2.8~5.1	5.4~9.9	12.5~22.0	0.039~0.111	0.016~0.051

注:8月处理水量达到 9.4 万 m<sup>3</sup>/d, 接近设计规模 10 万 m<sup>3</sup>/d; 膜池实际停留时间为 1.5~2.0 h, 变化不大, 污染物处理效率与停留时间变化关系不明显; 为防止膜堵塞, 加大冲刷力度, DO 质量浓度控制在 6~8 mg/L。

本研究中实际运行时的膜池 MLSS 约为生化池 MLSS 的 2 倍, 两者呈正相关关系, 且与标准推荐值接近。因进水水量、水质波动较大, 本研究中生化池、MBR 膜池出现明显低负荷或高负荷运行, 污泥负荷范围超出标准推荐值, 因此标准污泥负荷推荐值主要适用于工艺设计<sup>[1-7]</sup>, 实际运行工艺控制中应根据进水水质、水温进行调整优化。结合项目实际运行经验, 对于进水浓度较低的净水厂, 3 月—11 月水温适宜微生物繁殖, 为避免污泥过度繁殖, 建议生化池、MBR 膜池 MLSS 分别维持在 4.5、10 g/L 以下; 12 月—次年 2 月水温低于 12 ℃, 不利于硝化细菌、反硝化细菌繁殖, 建议生化池 MLSS 维持在 4~5 g/L, 水温低 MBR 通量下降明显, 污泥浓度过高易导致污泥老化, 加速膜堵塞, 建议 MBR 膜池 MLSS 维持在 6~8 g/L。

#### 4 电耗分析

本项目运行期间, 当处理水量达到设计规模的约 70% 时, 电耗为 0.48 kW·h/m<sup>3</sup>, MBR 系统电耗约为 0.135 kW·h/m<sup>3</sup>, 占比为 28%。根据王琦等<sup>[9]</sup>关于膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析研究, MBR 工艺单位水量电耗值为 0.45~0.91 kW·h/m<sup>3</sup>, 该水厂电耗处于较低水平。分析以上现象产生的原因: 一是本项目进水污染物浓度较低; 二是水厂进水采用自流方式, 相比一般污水厂减少了一级提升; 三

10 mg/L。MBR 膜具有极强的物理分离能力, 因此, 出水 SS 可以实现稳定达标, 去除率达到 95% 以上。

#### 3 工艺控制分析

AAO+MBR 工艺的控制参数主要是 MLSS、污泥负荷、膜通量、溶解氧(DO)及停留时间。结合《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中相关工艺参数设计推荐取值及本项目工艺参数设计及实际运行控制值, 进行对比分析, 如表 2 所示。

是通过应用智慧管控平台, 节能降耗约 15%。

#### 5 结论

(1) 该项目采用的 AAO+MBR 工艺对污水具有较好的处理能力, 在低进水污染物浓度下, MBR 膜对进膜污水中的 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN、TP 均有一定的降解处理能力, 除 TN 的去除率较低, 其他污染物指标去除率均可达到 40% 以上。其中, 氨氮、TN 的降解速率影响因素与传统生化处理一致, 主要为温度、碳源。该结果可为 MBR 工艺的项目设计、运行工艺调控提供一定的参考。

(2) 本研究中的 MLSS、污泥负荷、膜通量等工艺控制参数, 均是根据规范、设计在实际生产运行中探索而来, 对于采取类似工艺的项目设计及运行控制, 具有一定参考价值。

(3) 该项目设计采用重力流进水, 应用智慧管控平台, 节能降耗效果明显。运行期间, 在处理水量达到设计规模的约 70% 时, 电耗为 0.48 kW·h/t, 与其他 MBR 工艺单位水量电耗值相比处于低值, 其中 MBR 系统电耗约为 0.135 kW·h/m<sup>3</sup>, 占比为 28%。

#### 参考文献

- [1] 刘绪为, 尤颖, 王利剑, 等. MBR 工艺应用于全地下污水处理厂的设计特点[J]. 中国给水排水, 2015, 31(2): 62-65.  
LIU X W, YU Y, WANG L J, et al. Design characteristics of underground sewage treatment plant with MBR process [J].

- China Water & Wastewater, 2015, 31(2): 62-65.
- [ 2 ] 胡松, 阜崑, 姜若菡, 等. 地下式污水处理厂 MBR 膜污染分析及应对策略[J]. 给水排水, 2021, 47(5): 45-51.  
HU S, FU W, JIANG R H, et al. Analysis and countermeasures of MBR membrane pollution in underground wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 45-51.
- [ 3 ] 王雪, 戴仲怡, 张晓临, 等. A<sup>2</sup>/O+MBR 工艺用于集约化高排放标准半地下式污水厂 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(4): 53-56.  
WANG X, DAI Z Y, ZHANG X L, et al. Application of A<sup>2</sup>/O+MBR process in intensive high discharge standard semi-underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(4): 53-56.
- [ 4 ] 孟涛, 于小强, 宋永健. 青岛某全地下 MBR 污水处理厂的设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 96-100.  
MENG T, YU X Q, SONG Y J. Design of an underground MBR wastewater treatment plant in Qingdao [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 96-100.
- [ 5 ] 于翔, 李捷, 罗凡, 等. AAOA-MBR 工艺在工程中的应用分析[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 133-137.  
YU X, LI J, LUO F, et al. Applied analysis of AAOA-MBR process in actual wastewater treatment project[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(3): 133-137.
- [ 6 ] 贾海涛, 周厚方, 贺佳杰, 等. 地下式 MBR 污水处理厂运行效果及能耗分析[J]. 给水排水, 2016, 42(8): 40-43.  
JIA H T, ZHOU H F, HE J J, et al. Analysis of operation effect and energy consumption of MBR in underground wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(8): 40-43.
- [ 7 ] 夏云峰, 赵皇, 周艳, 等. 武汉市某地下式污水处理厂工程设计实例[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 56-61.  
XIA Y F, ZHAO H, ZHOU Y, et al. Engineering design case of an underground sewage treatment plant in Wuhan [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 56-61.
- [ 8 ] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程(下册)[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
ZHANG Z J, LIN R C, JIN R L. Drainage engineering (volume 2)[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [ 9 ] 王琦, 樊耀波. 膜生物反应器在污水处理与回用中的能耗分析[J]. 膜科学与技术, 2012, 32(3): 95-103.  
WANG Q, FAN Y B. Analysis of energy consumption in membrane bioreactors for wastewater treatment and reuse [J]. Membrane Science and Technology, 2012, 32(3): 95-103.

## (上接第 165 页)

- [ 6 ] 谭琼, 李田, 张建频, 等. 调蓄池提高已建系统排水能力的水力模拟研究[J]. 给水排水, 2006, 32(9): 34-38.  
TAN Q, LI T, ZHANG J P, et al. Modeling of applying detention tanks to increase drainage capacity for existing sewer system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(9): 34-38.
- [ 7 ] 韩松磊, 吕永鹏, 张楠. 海绵城市建设对上海中心城区雨水排水提标的效果研究[J]. 给水排水, 2022, 58(s1): 100-104.  
HAN S L, LÜ Y P, ZHANG N. Effect of sponge city construction to improve the drainage capacity in central Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(s1): 100-104.
- [ 8 ] 孙铮, 王建龙, 张长鹤, 等. 基于 SWMM 模型的城市已建区排水防涝提标改造途径探讨[J]. 环境工程, 2022, 40(9): 199-207.  
SUN Z, WANG J L, ZHANG C H, et al. Discussion on pathways for capacity upgrading of stormwater drainage and flooding alleviation in developed urban areas based on SWMM [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9): 199-207.
- [ 9 ] 魏媛媛, 李玲, 阎轶婧, 等. 浅层调蓄设施对内涝提标改造贡献率的研究——以南湖小学改造工程为例[J]. 给水排水, 2018, 54(s2): 39-43.  
WEI Y Y, LI L, YAN Y J, et al. Research on contribution rate of shallow storage facilities to waterlogging relief: A case study of Hunan Primary School renovation project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(s2): 39-43.
- [ 10 ] 谭琼, 李田, 周永潮, 等. 城市雨水管网模型参数的率定与评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008(1): 31-35.  
TAN Q, LI T, ZHOU Y C, et al. Calibration and assessment of stormwater system model for urban area [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2008(1): 31-35.
- [ 11 ] 汉京超. 城市排水管网模型模拟结果准确性的便捷校验方法[J]. 给水排水, 2018, 54(11): 123-127.  
HAN J C. Convenient checkout method on simulation results of urban drainage pipe network model [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(11): 123-127.
- [ 12 ] 柯杭. 调蓄设施布局设计模型研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(3): 83-85, 89.  
KE H. Study on layout design model of storage facilities [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(3): 83-85, 89.
- [ 13 ] 莫祖澜, 王盼, 朱五星, 等. 海绵城市设施与雨水管道提标调蓄设施的容积换算方法研究[J]. 给水排水, 2022, 48(3): 29-34.  
MO Z L, WANG P, ZHU W X, et al. Volume conversion method for sponge city facilities and storage tank for improving the drainage capacity of stormwater conduit [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(3): 29-34.