

城镇给排水工程设计案例专栏

彭展, 谢依廷, 张玥, 等. 纯膜 MBBR 与磁沉淀组合工艺处理村镇生活污水工程实例[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 166–171, 181.

PENG Z, XIE Y T, ZHANG Y, et al. Example of combined process of pure membrane MBBR and magnetic sedimentation for rural domestic wastewater treatment project [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 166–171, 181.

纯膜 MBBR 与磁沉淀组合工艺处理村镇生活污水工程实例

彭展, 谢依廷*, 张玥, 黄世全, 黎继红

(中建环能科技股份有限公司, 四川成都 610045)

摘要 【目的】以湖北某村镇污水处理工程项目为例, 对纯膜移动床生物膜反应器 (MBBR) + 磁混凝沉淀组合工艺处理村镇生活污水的设计参数、处理效果和效益进行分析, 分析该组合工艺在村镇生活污水处理上的适用性。【方法】项目设计总处理规模为 $4\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 在 3 个村镇生活污水收集点附近各建 1 座污水处理站对各个站点的村镇生活污水进行处理, 根据进出水水质要求, 设计采用预处理+纯膜 MBBR+磁混凝沉淀处理工艺对该污水进行处理。【结果】该系统工艺对化学需氧量 (COD_{Cr})、氨氮和总磷 (TP) 指标的平均去除率分别可达到 85.71%、80.38% 和 90.82%, 设计出水主要指标优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的要求。该系统的生物工艺采用纯膜 MBBR, MBBR 池后端不设二沉池且无污泥回流装置, 泥水分离和深度处理单元通过磁混凝沉淀池工艺完成。吨水直接运行成本较类似工艺经营成本更省。【结论】该组合工艺具有处理效果好、运行方便、流程简单、占地小、投资省和运营费用低等优点, 不仅适用于进水低氨氮的提标改造等项目 (一般进水氨氮 $\leq 8\text{ mg/L}$), 也适用于村镇污水等进水氨氮较高的情况, 可为我国村镇生活污水及分散污水高标准处理与回用提供设计借鉴与案例参考。

关键词 纯膜 MBBR 磁混凝沉淀 村镇生活污水 工程应用 高排放标准

中图分类号: TU992 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0177(2025)04-0166-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.020

Example of Combined Process of Pure Membrane MBBR and Magnetic Sedimentation for Rural Domestic Wastewater Treatment Project

PENG Zhan, XIE Yiting*, ZHANG Yue, HUANG Shiquan, LI Jihong

(CSCEC SCIMEE Sci. & Tech. Co., Ltd., Chengdu 610045, China)

Abstract [Objective] Taking a wastewater treatment project in a village in Hubei as an example, the design parameters, treatment effects and benefits of the pure moving-bed biofilm reactor (MBBR) + magnetic coagulation sedimentation combined process for treating village domestic wastewater are analyzed, and analyzes the applicability of this combined process for treating village domestic wastewater. [Methods] The total design treatment scale of the project is $4\,000\text{ m}^3/\text{d}$. A wastewater treatment station is been built near three village and town domestic wastewater collection points to treat the village and town domestic wastewater at each site. According to the water quality requirements of the influent and effluent, the design adopted pretreatment + pure MBBR + magnetic coagulation sedimentation treatment process treated this wastewater. [Results] The average removal rate of chemical oxygen demand (COD_{Cr}), ammonia nitrogen and total phosphorus (TP) indices of system are reached 85.71%, 80.38% and 90.82%, respectively. The main indices of designed water quality are better than the *Environmental Quality Standards for surface water* (GB 3838—2002).

[收稿日期] 2024-08-22

[基金项目] 四川省科技成果转化示范项目 (2023ZHCG0052-01)

[作者简介] 彭展 (1980—), 男, 高级工程师, 研究方向市政污水处理、流域水治理, E-mail: whhndm@163.com。

[通信作者] 谢依廷, 硕士研究生, E-mail: 983093252@qq.com。

The biological process of this system uses pure MBBR. There is no secondary sedimentation tank at the back end of the MBBR tank and no sludge return device. The sludge-water separation and advanced treatment unit are completed through the magnetic coagulation sedimentation tank process. [**Conclusion**] This combined process has the advantages of good treatment effect, convenient operation, simple process, small footprint, low investment and low operating costs. It is not only suitable for projects such as the standard improvement and transformation of low influent ammonia nitrogen (generally, influent ammonia nitrogen is ≤ 8 mg/L), it is also suitable for rural wastewater and other situations where incoming water ammonia nitrogen is high, and can provide design reference and case reference for high-standard treatment and reuse of domestic wastewater and dispersed wastewater in villages and towns in our country.

Keywords pure MBBR magnetic coagulation and sedimentation rural domestic wastewater project application stricter discharge standard

随着我国农村经济的快速发展,由此引起的水环境污染问题日益严重。与城镇生活污水相比,农村污水具有水质不稳定、可生化性好、几乎无毒无害等特点^[1],但农村地区缺乏排水渠道和污水处理系统,从而导致污水收集处理率较低以及污水的无序排放^[2]。改善农村污水的处理现状已刻不容缓,经过多年的发展,我国村镇污水处理技术逐渐成熟,与此同时,村镇污水处理排放标准总体朝着因地制宜、宽严并济的方向发展,但排放至重要水体或环境敏感地区的村镇污水处理设施仍需执行较高排放标准^[3],如本工程作为“长江大保护”专项行动的一环,执行了更高的环境标准。

现有的农村生活污水处理工艺有物理法、化学法、生物法和生态法^[4-5],生物法主要包括生物膜法、厌氧-缺氧-好氧(AAO)或缺/厌氧-好氧(AO)工艺^[6]、人工湿地^[7]、膜生物反应器^[8]等。近年来,以移动床生物膜反应器(MBBR)为代表的生物膜处理技术,因其耐受性强、无需反冲洗、占地面积小等优点^[9],可稳定有效地去除化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮等污染物,被广泛采用。但面对较高排放标准时,仍难满足总磷(TP)深度处理要求。磁混凝沉淀技术可深度去除污水中的TP、悬浮物质(SS)污染物,

陶光辉等^[10]的研究结果显示,国内外品牌的磁混凝沉淀池作为提标工艺均能使出水稳定达到一级A标准,沈浩等^[11]将磁混凝沉淀工艺用作污水厂深度处理工艺时,出水TP平均质量浓度约为0.17 mg/L,磁混凝沉淀工艺在市政污水处理领域应用成熟,但在村镇污水处理领域应用案例较少。本项目通过耦合纯膜MBBR与磁沉淀工艺,实现村镇污水的高标准处理,分析和总结工程设计与运行效果,为环境敏感地区村镇污水处理工程的设计和运行提供案例参考。

1 项目概况

该工程主要对湖北省某县村镇污水进行处理,项目在3个村镇生活污水收集点附近各建1座污水处理站,对各个站点的村镇生活污水进行处理,设计出水主要指标执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅲ类标准[不含总氮(TN)],出水达到出水标准或满足设计要求去除率后排入附近水域。

3个站点总处理规模为4 000 m³/d,1#站点处理规模为1 000 m³/d,变化系数(K_z)=1.2;2#站点处理规模为1 500 m³/d, K_z =1.2;3#站点处理规模为1 500 m³/d, K_z =1.2。

该项目设计进、出水水质指标如表1所示。

表1 3个点位污水处理场站设计进出水水质及去除率要求

Tab. 1 Designed Influent and Effluent Quality and Removal Rate Requirements for 3 Wastewater Treatment Stations

指标	COD _{Cr}	氨氮	TP	pH 值
1#点设计进水/(mg·L ⁻¹)	≤90	≤5	≤2.0	6~9
2#和3#点设计进水/(mg·L ⁻¹)	≤120	≤5	≤2.0	6~9
设计出水/(mg·L ⁻¹)	≤20	≤1	≤0.2	6~9
设计要求去除率	≥80%	≥75%	≥85%	/

注:进水中难降解 COD_{Cr} ≤2 mg/L,难氨化的有机氮质量浓度小于0.5 mg/L。

2 工程设计

2.1 方案设计

根据项目进出水水质可以看出,项目主要要求去除的水质指标是 COD_{Cr} 、氨氮和 TP,因而可采用好氧生化处理工艺对水中的有机物和氨氮进行去除、高效沉淀工艺对 TP 进行处理,由于进水中氨氮的浓度较低且出水对氨氮的要求较高,因而采用对低浓度氨氮具有很好处理效果的好氧纯膜 MBBR 工艺;由于该项目要求出水 $\text{TP} \leq 0.2 \text{ mg/L}$,因而该项目采用对 TP 去除效果更好、占地面积更小的磁

混凝沉淀工艺。

因而该项目的设计采用“预处理+生化处理+深度处理”工艺,并确定工艺方案。

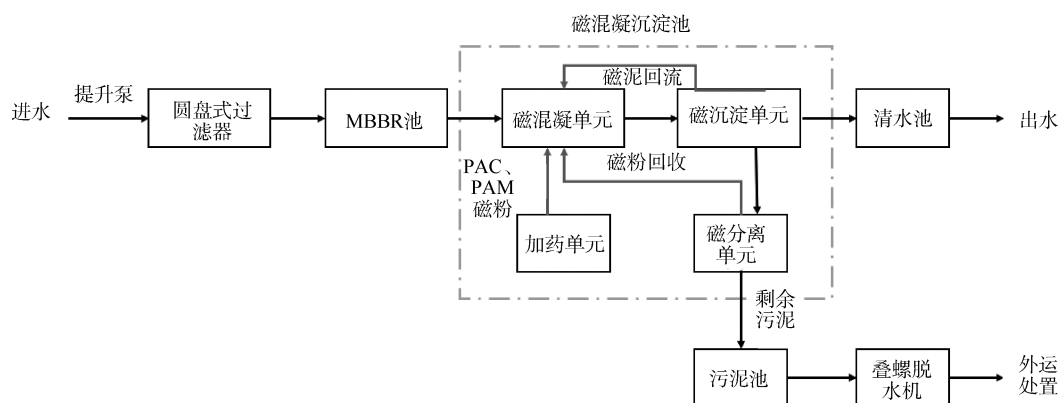
(1) 预处理阶段采用提升泵+圆盘式过滤器;

(2) 生化处理阶段采用纯膜 MBBR 工艺,即在有氧区投加悬浮填料,微生物存在形式为生物膜;

(3) 深度处理阶段采用磁混凝沉淀池;

(4) 污泥脱水采用“重力浓缩+叠螺脱水”方案,污泥含水率降至约 80% 后进行外运处置。

工艺流程如图 1 所示。



注:PAC 为聚合氯化铝;PAM 为聚丙烯酰胺。

图 1 工艺流程

Fig. 1 Process Flow

污水经过提升泵提升至圆盘式过滤器对水中大颗粒悬浮物、垃圾等进行去除,后进入纯膜 MBBR 池对水中有机物、氨氮等进行去除后进入磁混凝沉淀池进行深度除磷处理,通过在混凝系统中投加磁种、混凝剂和絮凝剂,使 SS 在药剂的作用下形成大颗粒磁性絮团,最后在斜管沉淀池中由重力作用进行泥水分离,从而对非生化性的 COD_{Cr} 、SS 和 TP 进行去除,后进入清水池后出水达标排放。

磁混凝沉淀池中分离出的污泥一部分回流至混凝单元,一部分进入磁分离单元进行磁种与污泥的分离,回收的磁种回流至混凝单元再利用,剩余污泥进入污泥池暂存后进入叠螺脱水机脱水处理后外运处置。

2.2 主体工艺设计参数说明

MBBR 池和磁混凝沉淀池均采用集装箱式一体化设备,能够快速进行安装、调试运行,且能多台组合使用。其设计参数如表 2 所示。

3 运行效果

3 个处理站自 2021 年至今已稳定运行 2 年多,

根据 2022 年 1 月—2022 年 12 月的水质数据对运行效果进行分析,对其中具有代表性的考核指标 COD_{Cr} (图 2)、氨氮 (图 3、图 4) 和 TP (图 5) 的进出水水质进行分析,其数据来源均为第三方水质检测报告。

该项目 3 个站点的 COD_{Cr} 设计出水水质指标为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) (20 mg/L 以下) 或平均去除率 $\geq 80\%$ 。由图 2 可知,3 个站点的 COD_{Cr} 进水水质指标主要集中在 80~130 mg/L,进水 COD_{Cr} 月平均质量浓度分别是 89、112 mg/L 和 109 mg/L,实测进水 COD_{Cr} 除了部分指标异常超标外,其余时间基本在设计水质范围内, COD_{Cr} 平均去除率分别是 84.1%、86.4% 和 86.7%。出水 COD_{Cr} 均满足设计出水水质要求。

该项目 3 个站点的氨氮设计出水水质指标为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) (1.0 mg/L 以下) 或平均去除率 $\geq 75\%$ 。该项目所用的纯膜 MBBR 工艺在国内的工程应用报道最早开始于微污染水处理,主要解决低基质条件下氨氮去除问题,出

表 2 主要工艺设计参数
Tab. 2 Design Parameters of Main Process

类别	项目	1#处理站	2#处理站	3#处理站
工程基本情况	处理规模/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	1 000	1 500	1 500
	变化系数	1. 2	1. 2	1. 2
	出水水质	地表准Ⅲ类标准或满足设计要求去除率		
纯膜 MBBR 池	单池尺寸(长×宽×高)/m	7. 00×2. 82×3. 50	16. 10×2. 92×3. 60	16. 00×2. 80×3. 60
	数量/组	4	2	2
	池体有效容积/(m^3)	227	285	290
	污泥质量浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	4. 0	4. 0	4. 0
	污泥产率/[$\text{VSS} \cdot (\text{kg BOD}_5)^{-1}$]	0. 6	0. 6	0. 6
	COD _{Cr} 容积负荷/[$\text{kg COD}_{\text{Cr}} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]	0. 352	0. 526	0. 570
	氨氮容积负荷/[$\text{kg 氨氮} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]	0. 084	0. 126	0. 124
	移动床生物填料填充比	30%	30%	30%
	填料尺寸/mm	直径(Φ)25×10	Φ 25×10	Φ 25×10
	填料比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)	800	800	800
	停留时间/h	5. 45	4. 56	4. 64
	气水比	12 : 1	10 : 1	10 : 1
	混凝池尺寸(长×宽×高)/m	0. 90×0. 90×1. 60	2. 68×1. 10×2. 60	2. 68×1. 10×2. 60
	数量/个	1	1	1
	混凝池停留时间/s	96	127	127
磁混凝沉淀池	混凝池设计梯度/(s^{-1})	670	509	509
	絮凝池尺寸(长×宽×高)/m	1. 25×1. 25×1. 60	2. 68×1. 48×2. 60	2. 68×1. 48×2. 60
	数量/个	1	1	1
	絮凝池停留时间/s	181	236	236
	絮凝池设计梯度/(s^{-1})	468	362	362
	沉淀池尺寸(长×宽×高)/m	2. 10×2. 05×2. 55	2. 73×2. 60×2. 50	2. 73×2. 60×2. 50
	数量/个	1	1	1
	沉淀池斜管有效面积/ m^2	2. 89	5. 88	5. 88
	平均水量表面负荷/[$\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]	14. 42	10. 64	10. 64
	最大水量表面负荷/[$\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]	17. 30	12. 76	12. 76

水氨氮可低于 0.5 mg/L^[12-13]。因而考虑设计进水水质条件下,设计出水为 1.0 mg/L,但由图 3 可知,3 个站点的氨氮进水水质指标主要集中在 15~30 mg/L,由于 3 个站点实际进水水质中氨氮指标远高于设计进水水质(5 mg/L),因而出水水质氨氮指标执行去除率满足 75%。3 个站点的进水氨氮月平均质量浓度分别是 19.8、19.8 mg/L 和 18.4 mg/L,氨氮平均去除率分别是 80.1%、80.7%和 80.4%。进一步对氨氮去除率进行研究,由图 4 可知,按照氨氮去除率作为考核指标,则所有点位的氨氮去除率

均≥75%,完全满足考核标准。

该项目 3 个站点的 TP 设计出水水质指标为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(0.2 mg/L)或平均去除率≥85%。由图 5 可知,3 个站点的 TP 进水水质指标主要集中在 1.2~3.0 mg/L,进水 TP 月平均质量浓度分别是 1.7、2.0 mg/L 和 1.5 mg/L,实测进水 TP 除了个别指标异常超标外,其余均在设计进水水质范围内,TP 平均去除率分别是 91%、90.8%和 90.7%,出水 TP 除了个别指标在 0.2~0.3 mg/L,其余时间均满足设计出水水

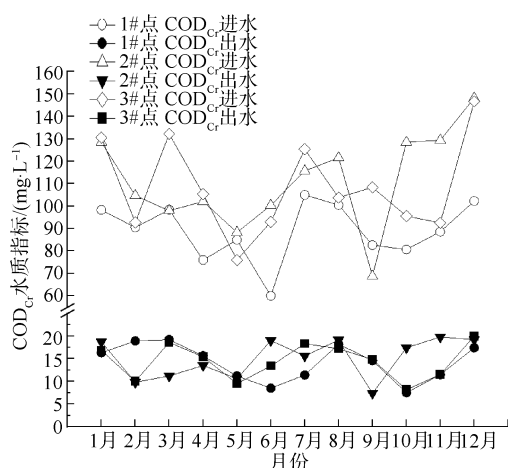
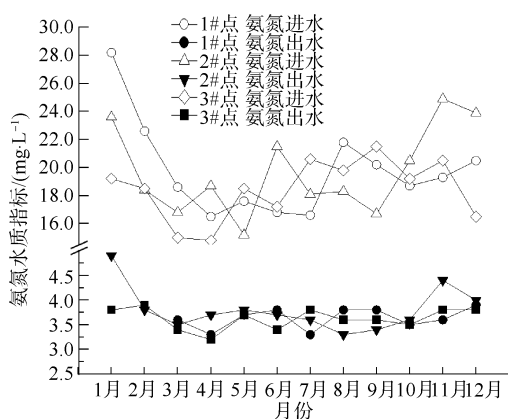
图2 3个站点 COD_{Cr} 进出水水质指标Fig. 2 Influent and Effluent Quality Indices of COD_{Cr} at 3 Sites

图3 3个站点氨氮进出水水质指标

Fig. 3 Influent and Effluent Quality Indices of Ammonia Nitrogen at 3 Sites

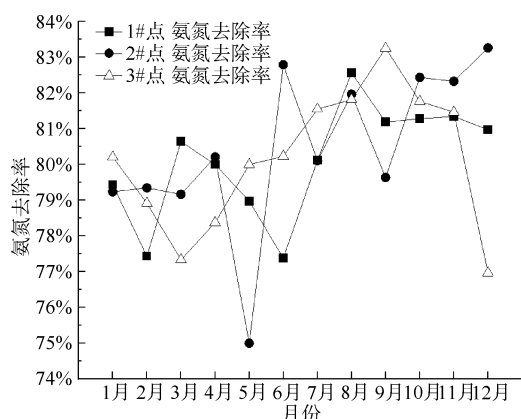


图4 3个站点氨氮去除率

Fig. 4 Ammonia Nitrogen Removal Rates at 3 Sites

质要求。

由以上分析可知,“纯膜 MBBR+磁混凝沉淀”

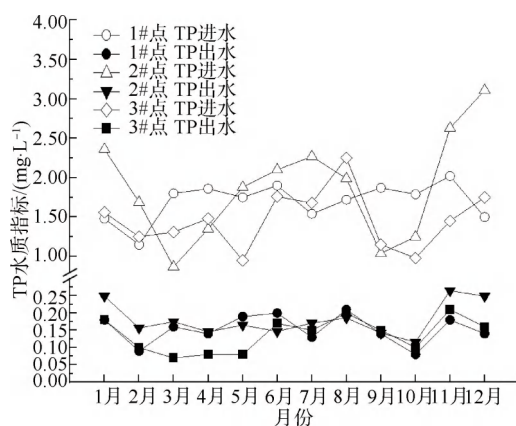


图5 3个站点 TP 进出水水质指标

Fig. 5 Influent and Effluent Quality Indices of TP at 3 Sites

组合工艺能很好地应用于村镇生活污水中及其相似场景中,对 COD_{Cr}、氨氮和 TP 等指标的平均去除率分别可达到 85.71%、80.38% 和 90.82%,出水主要指标能够稳定达标。

运行结果分析如下。

1) 二级生物处理采用 MBBR 技术,微生物主要以附着生物膜形态存在。该工程好氧段采用的纯膜 MBBR 负荷高、占地省,同等条件下水力停留时间(HRT)为活性污泥法的 40%~60%,对于已建污水厂,意味着可提高 100% 的处理能力^[14]。以该项目为例,3 个站点好氧池的停留时间分别是 5.45、4.56、4.65 h,与常规好氧活性污泥法相比,停留时间仅约为常规活性污泥法的一半,但对氨氮的去除率也能达到 75%~85%。

2) 深度处理采用磁混凝沉淀工艺,该工艺以磁粉作为重介质,结合混凝剂和絮凝剂,通过混凝和絮凝反应使污染物形成大颗粒絮团在重力作用下进行澄清分离,能够去除部分非生化性的 COD_{Cr},并对 SS 和 TP 有很好的去除效果,由于该项目进水 TP 指标较低,出水 TP 指标能稳定达到地表Ⅲ类水水质标准。与传统的高效沉淀池+滤布滤池工艺相比,磁混凝工艺不仅除磷效果好、占地小、流程简单、运营简便。

3) 同时,该项目工程在纯膜 MBBR 池后端加磁混凝沉淀池,一方面,由于纯膜 MBBR 工艺中,生物膜不仅要完成硝化,还需执行脱氮、脱碳的功能,脱落的生物膜含水率比活性污泥低,易于聚集沉降,同时脱落生物膜胞外聚合物含量较高,停留时间长时

易发生内源反硝化导致产气上浮和出水 SS 为 50~150 mg/L^[15],若利用传统二沉池作为泥水分离则需将污泥沉淀池表面水力负荷取得较活性污泥法的二沉池更小才能满足要求,一方面,采用磁混凝沉淀工艺可增加絮团直径和比重从而实现悬浮物的高效去除^[16];另一方面,由于该工程纯膜 MBBR 工艺未设厌氧区,因而生化除磷效果有限,可通过磁混凝沉淀工艺对水中 TP 进行高效去除,同步实现泥水分离和化学除磷的功能,能够更大程度地节省项目用地和投资。磁混凝沉淀工艺对污水中 TP 的高效去除原理主要是:通过在传统混凝沉淀工艺基础上通过引入磁介质,由于磁介质的比重较大,通过在絮凝反应过程中和絮体有效地进行结合,使絮体大而密实,可以有效提高絮体的比重,在澄清池中高速沉降,从而实现 TP 进行高效去除。

4) 运行过程问题及解决方案:①系统实际进水氨氮指标与设计进水氨氮指标差别较大,运营过程通过根据进水氨氮水质指标调整好氧池曝气量或者多次培养投加污泥保证污泥浓度的方式解决该问题;②项目进水水量不稳定,存在部分点位实际水量较设计水量小,运营过程通过调整好氧池的过水量以保证好氧池及后端工艺单元进水的均匀性。

4 工程投资与运行成本分析(或技术经济性分析)

该项目直接运行费用含水耗、电耗、药耗费用,其电耗成本为 0.6 元/m³,水耗成本为 0.04 元/m³,药剂成本为 0.43 元/m³,其中,除磷剂 PAC 投加量为 316.9 kg/d,投加质量分数为 5%,碳源乙酸钠投加量为 82.7 kg/d,投加质量分数为 20%,絮凝剂 PAM 阳离子和 PAM 阴离子投加量分别是 17.3 kg/d 和 7.6 kg/d,投加质量分数均为 2‰,直接运行成本 1.07 元/m³(根据当地情况,电费按 0.8 元/m³,水费按 4 元/m³,直接运行费用只包括水费、电费和药剂费,不同地区运行费用根据当地电价和水价有所不同)。与类似工艺相比,如祝年俊等^[17]在某村镇污水处理中采用 AAO+MBR 工艺单位经营成本为 1.89 元/m³,总成本为 3.78 元/m³。本项目采用工艺直接运营成本更省。

5 结论

1) 采用“纯膜 MBBR+磁混凝沉淀”工艺处理村镇生活污水,各类污染物均能得到很好的去除,对

COD_{Cr}、氨氮和 TP 等指标的平均去除率分别可达到 85.71%、80.38%和 90.82%,出水主要指标优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅲ类标准或满足设计要求去除率,说明纯膜 MBBR 不仅对于进水低氨氮的提标改造等项目有很好的去除效果^[12](一般进水氨氮≤8 mg/L),同时在村镇污水等进水氨氮较高的情况下也能得到很好的应用。

2) 组合工艺纯膜 MBBR 池后端不设二沉池且无需污泥回流装置,采用磁混凝沉淀工艺进行泥水分离和作为深度处理单元,一方面可增加絮团直径和比重从而实现悬浮物的高效去除^[16];另一方面,由于本工程纯膜 MBBR 工艺未设厌氧区,因而生化除磷效果有限,可通过磁混凝沉淀工艺对水中 TP 进行高效去除。该组合工艺具有处理效果好、出水水质稳定、运行管理方便、工艺流程简单且占地面积极小、投资省和运营费用低等优点,可为我国村镇生活污水及分散污水高标准处理与回用提供设计借鉴与案例参考。

3) 在与该项目进、出水水质要求类似的工程建设中,纯膜 MBBR+磁混凝沉淀组合工艺中的纯膜 MBBR,设计氨氮容积负荷建议取值为 0.8~1.4 kg 氨氮/(m³·d),其中,磁混凝沉淀工艺设计平均沉淀负荷建议取值 10~20 m³/(m²·h),以应对进水量、水质波动情况较大纯膜 MBBR 池体运行情况不理想而导致的污泥沉降效果较差等情况。

参考文献

- [1] 杨亮,马军,陈志强.我国农村污水处理现状综述[J].中国给水排水,2024,40(10):28-35.
YANG L, MA J, CHEN Z Q. Current situation of rural sewage treatment in China: A review [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(10): 28-35.
- [2] ZHENG T L, XIONG R, LI W K, et al. An enhanced rural anoxic/oxic biological contact oxidation process with airlift reflux technique to strengthen total nitrogen removal and reduce sludge generation [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 348: 131371. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131371.
- [3] 生态环境部审议并原则通过《关于进一步推进农村生活污水治理的指导意见》[J]. 给水排水, 2023, 59(12): 149-149.
The Ministry of Ecology and Environment reviewed and adopted in principle the Guiding Opinions on Further Promoting Rural Domestic Sewage Treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(12): 149-149.

(下转第 181 页)

- on AAO and modified process coupled with MBR [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 26-31, 62.
- [3] 林胜. 曝气生物滤池在高标准污水处理厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(7): 153-159.
- LIN S. Application of biological aeration filter in high standard WWTP upgrading and reconstruction [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7): 153-159.
- [4] 余琴芳, 余太平, 杜敬, 等. 污水处理反硝化滤池的应用综述[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 35-41, 106.
- YU Q F, YU T P, DU J, et al. Application review on denitrification filter in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 40(6): 35-41, 106.
- [5] 齐亚玲, 狄剑英, 林甲, 等. 曝气生物滤池多模式运行用于城镇污水厂深度处理[J]. 中国给水排水, 2022, 38(20): 85-89.
- QI Y L, DI J Y, LIN J, et al. Application of biological aerated filter with multi-mode operation in advanced treatment of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(20): 85-89.
- [6] 马超, 杨海燕. 微砂沉淀工艺处理河道直排生活污水的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 121-124.
- MA C, YANG H Y. Application of micro-sand sedimentation technology in treatment of domestic sewage discharged directly into river [J]. China Water & Wastewater, 2019, 38(7): 121-124.
- (上接第 171 页)
- [4] 柯艳春, 李晓琳, 刘豹, 等. MABR 技术在污水处理中的应用及研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(11): 18-24.
- KE Y C, LI X L, LIU B, et al. Application and research progress of MABR technology in wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(11): 18-24.
- [5] 徐波, 周正兵, 甘雁飞, 等. 不同填料曝气生物滤池处理生活污水效能研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(6): 126-129, 140.
- XU B, ZHOU Z B, GAN Y F, et al. Study on the treatment efficiency of domestic wastewater by biological aerated filter with different fillers [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(6): 126-129, 140.
- [6] 赵会芳, 何国钢, 钟翔, 等. 农村污水一体化设备工艺研究新进展[J]. 农业与技术, 2022, 42(1): 61-64.
- ZHAO H F, HE G G, ZHONG X, et al. New progress in research on rural sewage integrated equipment technology [J]. Agricultural and Technology, 2022, 42(1): 61-64.
- [7] SHENG X L, QIU S K, XU F, et al. Management of rural domestic wastewater in a city of Yangtze delta region: Performance and remaining challenges [J]. Bioresource Technology Reports, 2020, 11: 100507. DOI: 10.1016/j.biteb.2020.100507.
- [8] 李社锋, 张家琛, 冯巍, 等. 膜生物反应器研究新进展与应用[J]. 环境工程, 2024, 42(1): 37-46.
- LI S F, ZHANG J C, FENG W, et al. Overview and research progress of membrane bioreactor process [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(1): 37-46.
- [9] 赖竹林, 周雪飞. 移动床生物膜反应器(MBBR)的研究现状及进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(10): 7-11.
- LAI Z L, ZHOU X F. Research status and progress of moving bed biofilm reactor (MBBR) [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(10): 7-11.
- [10] 陶光辉, 吴艳华, 叶克, 等. 南方地区 9 座污水厂提标工艺、造价和运营成本后评估[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 196-205.
- TAO G H, WU Y H, YE K, et al. Post evaluation of upgrading process, construction cost and operation cost of 9 WWTPs in southern area [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 196-205.
- [11] 沈浩, 杨忠启, 汪凡, 等. MBBR+磁混凝沉淀工艺用于用地受限污水厂改造[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 112-119.
- SHEN H, YANG Z Q, WANG F, et al. Application of MBBR and magnetic coagulation precipitation process in retrofitting of a WWTP with limited construction land [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 112-119.
- [12] 刘妍, 滕一杰, 周家中, 等. 纯膜 MBBR 用于南方某大型水质净化厂改造效果分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 1-8.
- LIU Y, TENG Y J, ZHOU J Z, et al. Operation effect of pure MBBR process used in a large-scale water purification plant in south China [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 1-8.
- [13] 王毅, 井添祺, 周家中, 等. 盐城市某原水预处理厂设计与运行分析[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 24-29, 34.
- WANG Y, JING T Q, ZHOU J Z, et al. Analysis of design and operation for a raw water pretreatment plant in Yancheng City [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 24-29, 34.
- [14] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜 MBBR 工艺在国内外的工程应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 37-47.
- ZHOU J Z, WU D, ZHENG L A. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-47.
- [15] 周家中, 韩文杰, 吴迪, 等. MBBR 工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12): 1-12.
- ZHOU J Z, HAN W J, WU D, et al. Discussion on series solutions of MBBR Process applied to municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 1-12.
- [16] 张淳, 徐东耀, 康赛, 等. 磁混凝预处理小城镇混合污水的效能与混凝机制研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(7): 268-278.
- ZHANG C, XU D Y, KANG S, et al. The application and coagulation mechanism of magnetic coagulation in treating mixed sewage from small towns [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(7): 268-278.
- [17] 祝年俊, 贺阳, 孙政, 等. AAO-MBR 工艺用于村镇污水处理厂提标改造[J]. 水处理技术, 2022, 48(12): 140-144.
- ZHU N J, HE Y, SUN Z, et al. AAO-MBR process for upgrading and reconstruction in series rural wastewater treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(12): 140-144.