

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.04.016

MBBR+反硝化生物滤池+磁混凝沉淀池用于 污水处理厂原位提标

李玉胜¹, 白华清¹, 孙政¹, 傅驿凯¹, 王世雄²

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610000; 2. 成都北控蜀都投资有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 成都某10万m³/d工业园区集中式污水处理厂,出水标准需由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准提升至《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)。该污水处理厂存在进水TP远超设计值、进水泥沙含量大、出水水质不稳定等问题。设计采用固液快速分离+移动床生物膜反应器(MBBR)+反硝化生物滤池+磁混凝沉淀池的主体工艺,提标改造后出水水质全面优于设计标准,水质稳定,处理能耗仅为0.32 kW·h/m³,用地指标为0.67 m²/(m³·d⁻¹)。

关键词: 固液快速分离; 移动床生物膜反应器; 反硝化生物滤池; 磁混凝沉淀池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)04-0108-06

Upgrading In-situ by MBBR + Denitrifying Biofilter + Magnetic Coagulation Sedimentation Process in a Sewage Treatment Plant

LI Yusheng¹, BAI Huaqing¹, SUN Zheng¹, FU Yikai¹, WANG Shixiong²

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610000, China; 2. Chengdu Beikong Shudu Investment Co. Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: A sewage treatment plant in Chengdu has a treatment of 100 000 m³/d and initially adhered to the first level A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002), the effluent standard of which now upgraded to the *Discharge Standard of Water Pollutants for Minjiang and Tuojiang River Basins in Sichuan Province* (DB51/2311-2016). The current situation of the sewage treatment plant has problems such as influent TP far exceeding the design value, large sediment content in the influent, and unstable effluent quality. The main process of solid-liquid rapidly separation + MBBR module + denitrifying biofilter + magnetic coagulation sedimentation tank was adopted in the design. After the upgrading and reconstruction, the effluent quality was better than the design standard, with the overall treatment energy consumption of effluent quality only 0.32 kW·h/m³ and the land use index 0.67 m²/(m³·d⁻¹).

Keywords: solid-liquid rapidly separation; MBBR; denitrifying biofilter; magnetic coagulation sedimentation tank

污水处理厂提标改造一般采用增加深度处理单元以降低出水中的TN、TP、SS,但是由于很多已建污

水处理厂的占地有限,常规处理工艺用于实现原位提标的难度较大。以成都某工业园区集中式污水处

理厂的提标改造工程为例,分析了现状污水处理厂进、出水水质和实际存在的问题,梳理了限制提标的关键影响因素,确定以固液快速分离+移动床生物膜反应器(MBBR)+反硝化生物滤池+磁混凝沉淀作为提标改造工艺路线。改造后出水水质稳定达到《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016),并且在不新增占地的前提下实现了原位改造。

1 项目概况

1.1 项目背景

成都某规模 10 万 m³/d 的工业园区集中式污水处理厂于 2013 年投产运行,采用曝气沉砂池+AAO+二沉池+D 型滤池+紫外消毒工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,处理水量为(9.1~11.8)万 m³/d,工业废水占比约 48%。随着 2017 年《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016)发布,该污水处理厂需执行其中的工业园区集中式污水处理厂排放标准。现状污水处理厂出水基本能达到一级 A 标准,但出水水质波动大,偶有 TN、TP 超标情况,同时存在进水泥沙含量高导致曝气沉砂池需频繁放空清淤等问题,因此对该厂进行提标改造十分必要。

1.2 进、出水水质

根据 2017 年和 2018 年的统计数据,原设计进水水质与实际进 waters 水质的比较见表 1。

表1 设计进水、实际进水水质对比

Tab.1 Comparison between design and actual

influent quality mg/L						
指标	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
设计进水	400	200	200	35	40	4
实际进水	269.6	103.3	329	24.9	32	7.75

注: 实际进水水质为统计 2017 年、2018 年实测数据,取 95% 保证率水质。

从表 1 可以看出,实际进水 COD、BOD₅ 低于原设计值,而进水 SS、TP 远超原设计值。

将 2017 年和 2018 年实际出水水质、原设计出水标准、新出水标准进行对比,结果见表 2。对比新、旧标准可知,对 COD、NH₃-N 要求提高,其余指标不变。从表 2 可以看出,按照旧出水标准,在 100% 保证率下 TP、TN 不能稳定达标;按照新出水标准,NH₃-N 即使在 95% 保证率下也不能稳定达

标。因此,实现 TP、TN、NH₃-N 稳定达到新排放标准是本次提标改造的重点。

表2 出水水质对比

Tab.2 Comparison of effluent quality mg/L

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
实际出水 95% 保证率	22.3	5.8	8	4.6	12.1	0.44
实际出水 100% 保证率	31.6	7.7	9	4.9	15.2	0.81
原设计出水标准	50	10	10	5(8)	15	0.5
新出水标准	40	10	10	3(5)	15	0.5

注: 实际出水水质为统计 2017 年、2018 年实测数据,取 95%、100% 保证率水质。

1.3 存在问题

① 进水 SS 长期远超设计值,主要表现为进水泥沙含量大,曝气沉砂池底部极易淤积,需频繁放空清淤,严重影响污水处理厂的正常运行。

② 现状 AAO 生化池总停留时间为 12.5 h,好氧区停留时间为 8 h,有 5 条好氧廊道,硝化液回流泵设置在最后一条好氧廊道的起端,导致此廊道硝化功能未被有效利用;缺氧区停留时间仅为 2.5 h,反硝化能力不足。

2 提标改造设计方案

2.1 设计水质调整

根据 2017 年、2018 年实测进水水质,对设计进水水质做出预测,将进水 BOD₅ 设计值降低,SS、TP 设计值提高,同时各指标的设计值相对实测值保有一定余量。提标改造设计进、出水水质见表 3。

表3 设计进、出水水质及去除率

Tab.3 Design influent,effluent quality and removal rates

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
原设计进水/(mg/L)	400	200	200	35	40	4
新设计进水/(mg/L)	400	150	350	35	40	8
新设计出水/(mg/L)	40	10	10	3(5)	15	0.5
去除率/%	90.00	93.33	97.14	91.43 (85.71)	62.50	93.75

2.2 提标改造方案

该污水处理厂提标改造的限制条件主要有:①需原位完成,无新增用地;②进水泥沙含量大,曝气沉砂池需频繁放空清淤,新建初沉池同样面临泥沙淤积问题;③改造完成后运行成本需控制在较低水

平。考虑上述限制条件,结合提标改造的需求,确定各处理段的工艺路线。

2.2.1 预处理段强化

预处理效果直接关系到生化池能否长期正常运行。该厂进水泥沙含量高,曝气沉砂池负担过重,势必导致部分泥沙进入生化池。设计采用一种快速固液分离技术对预处理进行强化,其原理是使原水流过连续回转的滤布,实现固液分离,并用中水对滤布截留的固体杂质进行连续冲刷刮落^[1]。该技术的特点之一是过滤精度高,滤布孔径为0.2 mm,是常规细格栅孔径的1/15,能将90%以上的浮渣、细砂、毛发等杂质截留,显著提高预处理效果。特点之二是处理负荷高、占地少,其水力停留时间仅为5 s左右。

在提标改造中,设计在粗格栅后设置3套快速固液分离装置,提供3万m³/d的预处理能力,占地184 m²,与原细格栅+曝气沉砂池并联使用,原细格栅+曝气沉砂池减量运行。

污水处理厂服务工业园区的排污企业主要为机械制造、电子产品、显示器制造类,特征污染物有重金属、氟化物、难降解COD等。企业排水满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)。为应对突发有毒污染物冲击,在厂内设计新建一座应急事故池,有效容积3.3万m³,采用全地理式,地上为厂区绿化和道路。

2.2.2 生化段改造

TP、NH₃-N、TN的去除均需在生化处理段得到

强化。受用地限制,在总池容无法增加的情况下,本工程对原AAO生化池进行了3项原位改造,具体如下:

① 增加缺氧区停留时间

原生化池缺氧区停留时间仅为2.5 h,设计将好氧区第1廊道改为缺氧廊道,缺氧区停留时间增至4.0 h。新增缺氧区保留了曝气器,使其可进行好氧、缺氧功能转换。

② 调整内回流点位

将内回流泵的位置从最后一条好氧廊道起端移至末端,硝化时间增加约1.5 h,由于好氧区调整1条廊道给缺氧区,相互抵消,总硝化时间不变。

③ 嵌入MBBR模块

向生化池投入悬浮填料形成MBBR,是近年来对生化池进行效能提升的一种经济、有效的方案^[2]。MBBR的优势在于能维持反应器内较高比例的活性生物量,从而提高系统处理效能和抗冲击性能。附着生长在填料上的生物膜泥龄较长,为硝化菌等世代时间较长的微生物创造优势环境,提高了系统的脱氮能力。设计拆除原好氧区第2、3廊道间的隔墙,投入填料,形成MBBR区域,并围绕MBBR功能的实现采取了3项措施:a. 为避免水力短流,新建1条进水渠道,改变MBBR区进水方向;b. 为使填料流化充分,在底部增加辅助流化曝气系统;c. 为避免填料在出水端堆积,堵塞拦截筛网,在拦截筛网上设置曝气冲刷系统。

整个生化池改造如图1所示。

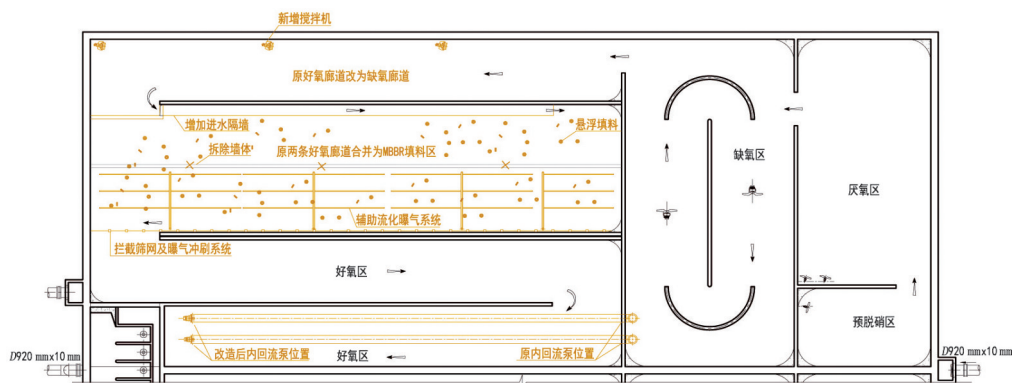


图1 生化池改造平面示意

Fig.1 Schematic plan of biochemical tank renovation

2.2.3 深度处理段改造

深度处理段的作用是确保TN、TP、SS的最终达标。反硝化滤池和高效沉淀池的深度处理技术组

合应用案例较多,是较成熟的技术路线,本工程拟采用。在反硝化滤池和高效沉淀池具体类型的选择上,本工程的考虑和分析如下:

① 反硝化滤池

目前国内应用较多的为反硝化深床滤池和反硝化生物滤池,《给水排水设计手册 第5册 城镇排水(第3版)》和《脱氮生物滤池通用技术规范》(GB/T 37528—2019)对这两种滤池设计参数的规定见表4。

表4 标准规范中反硝化滤池主要设计参数

Tab.4 Main design parameters of denitrification filter in standards and codes

滤池类型	滤料种类	过滤方向	滤料滤径/mm	滤料高度/m	滤速/(m/h)	反硝化负荷/[$\text{kgNO}_3^-/\text{N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$]	停留时间/min
反硝化生物滤池	生物陶粒	上向流应用较多	3.0~5.0	2.5~4.5	8.00~15.00	0.5~3.0	15~25
反硝化深床滤池	石英砂	下向流应用较多	1.8~3.5	1.2~1.8	2.50~5.00	0.8~1.8	20~30

可以看出,采用上向流生物陶粒滤料的反硝化生物滤池相比采用下向流石英砂滤料的反硝化深床滤池,具有更高的滤速和反硝化负荷。有研究表明,生物陶粒滤料相对石英砂滤料,具有生物膜载量高、碳源利用率高、挂膜时间短、微生物菌落分布均匀的优势,而石英砂滤料的优势在于其对TN、SS的极限去除能力更强^[3-4]。上向流池型相对下向流池型,有更长的反冲洗周期和更小的过滤水头损失^[5]。

本工程用地紧张,并且提标后的出水标准对TN、SS去除要求没有提高。综合考虑,选择上向流生物陶粒滤料的反硝化生物滤池作为深度处理的反硝化单元。同时,在滤池前设置孔径1 mm的内径流孔板式精细格栅,减少进入滤池的颗粒杂质。

② 高效沉淀池

设计采用磁混凝沉淀池。磁混凝沉淀池通过向进水中投加磁介质+聚合氯化铝(PAC)+聚丙烯酰胺(PAM),经过混合絮凝形成紧实的絮凝体,从而获得高沉速,表面水力负荷可达 $20\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,远高于普通高效沉淀池的 $6\sim13\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ^[6]。磁混凝沉淀池除对TP、SS具有较好的去除效果外,对一些难降解COD、重金属、色度也有一定的去除效果^[7]。本工程用地紧张,且进水中含有一定比例的工业废水,磁混凝(高效)沉淀池更为适用。

③ 综合考虑

本工程将反硝化生物滤池置于磁混凝沉淀池之前,主要考虑可充分利用二沉池出水中剩余 BOD_5 作为反硝化碳源。在滤池之前设计超越管,污水可超越滤池自流进入磁混凝沉淀池,节约二次提升能耗。整个提标改造工艺流程见图2。

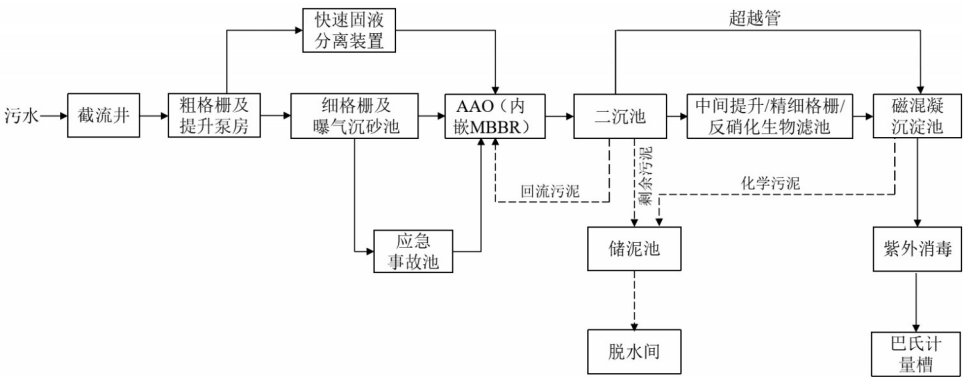


图2 提标后工艺流程

Fig.2 Process flow after upgrading

2.3 主要构筑物及设计参数

① 预处理

原细格栅、曝气沉砂池处理规模由 $10\text{万 m}^3/\text{d}$ 降至 $7\text{万 m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池水力停留时间由 11.42 min 增至 16.32 min ;新增3套快速固液分离装置,与原细格栅+曝气沉砂池并联运行,处理规模 $3\text{万 m}^3/\text{d}$,

停留时间 5 s ,滤布宽度 2.0 m ,滤布孔径 0.2 mm ,总装机功率 30.7 kW ,中水消耗量 $12\text{ m}^3/\text{h}$ 。

② AAO生化池(内嵌MBBR)

生化池改造后各段停留时间:预脱硝区 0.5 h 、厌氧区 1.5 h 、缺氧区 4.0 h 、MBBR区 3.5 h 、好氧区 3.0 h 。MBBR填料段有效生物膜面积 174万 m^2 ,填

充比 16.5%, 填料容积负荷 2.76 kgBOD₅/(m³·d)。

③ 反硝化生物滤池

按 10 万 m³/d 规模设 1 座反硝化生物滤池, 分 2 组, 共 8 格, 陶粒滤料粒径 3.0~5.0 mm, 滤料层高度 3.0 m, 反硝化负荷 0.51 kgNO₃⁻-N/(m³·d), 总停留时间 21.60 min, 正常滤速 8.35 m/h, 强制滤速 12.40 m/h。

④ 磁混凝沉淀池

按 10 万 m³/d 规模设 1 座磁混凝沉淀池, 分 2 格, 单格直径 13 m, 总停留时间 29.26 min, 混合区停留时间 1.73 min, 磁混凝区停留时间 1.73 min, 絮凝区停留时间 3.51 min, 斜管沉淀区表面水力负荷 16.50 m³/(m²·h), 停留时间 22.00 min。

3 运行效果分析

3.1 固液快速分离装置运行效果

固液快速分离装置运行期间耗电量为 9.12×10⁻⁴ kW·h/m³; 分离出的杂质包括生活垃圾、细砂、固态油脂、毛发纤维物等; 出渣平均含水率 72.31%, 干渣产量为 104.6 kg/万 m³, 厂区传统预处理设施干渣产量为 37.3 kg/万 m³, 固液快速分离装置干渣产量为传统预处理产量的 2.8 倍。取装置的进、出水进行烘干称重测定, 结果显示, 0.2 mm 孔径滤布对渣砂毛发等杂质的拦截效率为 92.99%~94.95%。截至目前, 该装置已稳定运行 3 年。

3.2 生化池运行效果

对改造前(2018 年)和改造后(2023 年)的进、出水水质的全年平均值数据进行统计, 如表 5 所示。

表 5 改造前后生化池进、出水水质

Tab.5 Water quality of influent and effluent of biochemical tank before and after renovation

		mg/L				
项目		COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP
改造前	进水	186.90±37.79	75.49±13.87	14.56±5.76	20.65±4.62	4.51±1.97
		12.08±3.98	3.63±0.89	0.74±1.06	9.44±1.18	0.26±0.11
	出水	194.92±83.25	96.87±40.03	18.53±3.42	26.35±5.63	3.57±1.61
		10.28±2.41	3.16±0.71	0.28±0.42	7.04±1.01	0.16±0.09

可以看出, 改造后生化池出水水质得到全面提升, COD、BOD₅、NH₃-N、TN、TP 分别下降 14.94%、

12.95%、62.28%、25.41%、39.16%, 其中 NH₃-N、TN、TP 降幅最大。同时, 各项出水指标的稳定性也显著提高。

改造后生化池活性污泥的有机质含量有所增加, 根据检测数据, 2018 年 MLVSS/MLSS 平均值为 0.58, 2023 年为 0.63, 增加了 8.6%。有机质含量增加说明污泥的活性变好, 主要有两方面原因: 一是预处理得到加强, 更多泥沙等无机物在快速固液分离装置被截留, 使活性污泥中的无机成分比例减少; 二是生化池嵌入 MBBR 系统, 微生物总量增加使活性污泥中的有机成分增加。

8 月测定生化池的预脱硝区、厌氧区、缺氧区、MBBR 区的污泥浓度, 污泥外回流比为 100%, 内回流比为 200%。取 3 组平行样, 测定结果平均值如表 6 所示。

表 6 生化池各处理单元污泥浓度

Tab.6 Sludge concentration of each unit in the biochemical tank

项目	预脱硝区	厌氧区	缺氧区	MBBR 区
MLSS	4 764.46	4 731.68	5 106.45	5 287.81
MLVSS	2 940.74	2 883.61	3 180.25	3 269.54

可以看出, 生化池的 4 个处理单元污泥浓度有所差异, 其中 MBBR 区污泥浓度最高, 缺氧区次之。分析原因, MBBR 填料挂载的生物膜在摩擦碰撞、水力冲刷作用下不断脱落并混于活性污泥中, 使此区域污泥浓度增加, 相对于缺氧区增加约 3.54%。缺氧区由于硝化液回流, 也保持了较高的污泥浓度。

3.3 深度处理运行效果

由于生化池出水已经实现 TN 的稳定达标, 为节约运行成本, 实际未在反硝化生物滤池投加额外碳源, 根据 2023 年水质数据统计, 生化池出水 TN 为 (7.04±1.01) mg/L, 不考虑二沉池对 TN 的去除, 反硝化生物滤池出水 TN 为 (6.43±0.92) mg/L, 去除率为 8.7%。生化池出水 TP 为 (0.16±0.09) mg/L, 不考虑二沉池对 TP 的去除, 磁混凝沉淀池出水 TP 为 (0.08±0.04) mg/L, 去除率为 50%。

4 改造及运行成本测算

此次提标改造工程的总费用为 19 738.27 万元, 设计测算直接处理成本为 1.83 元/m³, 设计全流程平均耗电 0.39 kW·h/m³; 实际处理直接成本为 1.46 元/m³, 全流程平均耗电为 0.32 kW·h/m³; 整厂

用地指标为 $0.67 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。

5 结论

成都市某工业园区集中式污水处理厂需要由一级A排放标准提标至《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB51/2311—2016),且存在进水泥沙含量大、出水水质波动大和无新增用地等限制条件。采用固液快速分离技术作为预处理强化措施,具有去除效率高、占地小、运行稳定的优势;主体工艺采用MBBR+反硝化生物滤池+磁混凝沉淀池,具有提高生化池污泥活性、出水水质优良稳定、占地少、能耗低等优势;整个工艺路线适用于工业园区集中式污水处理厂原位提标改造。

参考文献:

- [1] 范海涛. 一种快速高效去除污水中泥渣砂油的过滤设备:CN115159597A[P]. 2022-10-11.
FAN H T. The Utility Model Relates to a Filter Equipment for Removing Sludge Sand Oil in Sewage Quickly and Efficiently:CN115159597A[P]. 2022-10-11 (in Chinese).
- [2] 张鹏,袁辉洲,柯水洲. MBBR法处理城市污水去除污染物的特性研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(10): 91-96.
ZHANG P, YUAN H Z, KE S Z. Study on the characters of treating urban sewage to remove pollutants with MBBR process[J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(10):91-96(in Chinese).
- [3] 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]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 35-41, 106 (in Chinese).

- [4] 郑俊,孙楠. 不同性质滤料的反硝化生物滤池脱氮试验研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(9):73-76.
ZHENG J, SUN N. Research on nitrogen removal by denitrification biofilters with media of different characteristics [J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(9):73-76(in Chinese).
- [5] 栗文明,高敏,周军,等. 反硝化滤池污水处理工艺应用调研及设计要点[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 100-105.
LI W M, GAO M, ZHOU J, et al. Application survey and design points of the denitrification filter in wastewater treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22):100-105(in Chinese).
- [6] 霍槐槐. SediMag™磁絮凝沉淀用于污水处理提标改造和深度除磷[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 53-56.
HUO H H. Applications of SediMag™ magnetic sedimentation technology in upgrading reconstruction and phosphorus removal of wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 53-56 (in Chinese).
- [7] 吴震,陈飞勇,刘汝鹏,等. 磁介质混凝沉淀技术的现状及探索[J]. 净水技术, 2023, 42(2):23-38.
WU Z, CHEN F Y, LIU R P, et al. Current situation and exploration of magnetic medium coagulation and sedimentation technology[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2):23-38(in Chinese).

作者简介:李玉胜(1987—),男,河北唐山人,硕士,高级工程师,主要研究方向为市政污水处理。

E-mail:lysh870908@163.com

收稿日期:2024-07-30

修回日期:2024-10-16

(编辑:衣春敏)