

工程实例

DOI:10.19965/j.cnki.iwt.2022-0460

开放科学(资源服务)
标识码(OSID):



磁混凝工艺在山东某污水处理厂提标改造中的应用

陈智超¹, 陈 坤¹, 杨承峰², 刘汝鹏³, 张 震^{3,4}, 吴 震⁴

(1. 山东隆源环境科技有限公司, 山东济南 250101; 2. 山东瑞清环境科技发展有限公司, 山东济南 250101;

3. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101;

4. 山东建筑大学市政与环境学院, 山东济南 250101)

[摘要] 随着国家和地方污水排放标准的日益严格,我国污水处理厂的提标改造迫在眉睫。山东某污水处理厂进水工业废水占比大,水质波动大,出水 TP、SS 难以稳定达标。为响应当地环保政策,满足出水标准,现将原有混凝沉淀系统中的 1 组斜管沉淀池原位改造为磁混凝系统。改造前 2 组斜管沉淀池实际处理量为 25 000 m³/d,改造后 1 组磁混凝系统处理量即可达到 43 000 m³/d,且磁混凝出水超越 V 型滤池进入后续消毒单元进行处理后,出水 TP、SS 不但明显优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,甚至可满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准。经济性分析表明,改造后聚合硫酸铁(PFS)和聚丙烯酰胺(PAM)投加量分别节省 40% 和 30% 左右,实际运行功率降低 6.12%,吨水运行能耗降低 45.45%,共计可节约成本 0.056 4 元/t。

[关键词] 提标改造;污水处理厂;磁混凝;原位改造;节能降耗

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2023)03-0181-05

Application of magnetic coagulation process in upgrading and renovation of a sewage treatment plant in Shandong

CHEN Zhichao¹, CHEN Kun¹, YANG Chengfeng², LIU Rupeng³, ZHANG Zhen^{3,4}, WU Zhen⁴

(1. Shandong Longyuan Environmental Technology Co., Ltd., Ji'nan 250101, China; 2. Shandong Ruiqing

Environmental Technology Development Co., Ltd., Ji'nan 250101, China; 3. Resources and Environment

Innovation Institute, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; 4. School of Municipal and

Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: Along with the national and local discharge standard increasingly strict, the upgrade of sewage treatment plant is urgent. For a sewage treatment plant in Shandong, the proportion of influent industrial wastewater and the water quality fluctuated greatly, and the effluent TP and SS were difficult to meet the standard stably. In order to respond to local environmental protection policies and meet the effluent standard, one group of inclined tube sedimentation tanks in the original coagulation and sedimentation system was transformed into a magnetic coagulation system in-situ. Before the transformation, the actual treatment capacity of two sets of inclined tube sedimentation tanks was 25 000 m³/d. After the transformation, the treatment capacity of one set of magnetic coagulation system could reach 43 000 m³/d. After the magnetic coagulation water exceeded the V-shaped filter tank and entered the subsequent disinfection unit for treatment, the effluent TP and SS were not only obviously superior to the first-Class A standard of the Discharge Standard of Pollutants for Municipal Waste Water Treatment Plant (GB 18918—2002), even met the Class IV standard of the Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838—2002). The economic analysis showed that after the transformation, the dosage of PFS and PAM could be saved by about 40% and 30% respectively, the actual operating power could be reduced by 6.12%, and the energy consumption per ton of water could be reduced by 45.45%. The total cost could be saved by 0.056 4 yuan/t.

Key words: upgrading and renovation; sewage treatment plants; magnetic coagulation; in-situ renovation; energy saving and consumption reduction

随着城市发展及工业水平的提高,生活污水和工业废水排放相应增多,环保要求日益严格,污水处理厂出水监测越来越受到当地环保部门的重视。目前,污水处理厂传统混凝深度处理能力已经远远不能满足高负荷和较大波动水质的实际处理需求,磁混凝作为一种新型深度处理工艺脱颖而出。磁混凝工艺原理是,在传统混凝基础上投加磁粉,磁粉作为沉淀析出晶核,水中胶体颗粒与磁粉颗粒碰撞脱稳而形成含磁絮体被去除。一般来讲,含磁絮体可经高剪机高速切割分离,然后进入磁分离装置进行磁粉回收,回收的磁粉回流至磁粉反应池继续参与反应,从而提高混凝反应效率^[1-2]。

磁混凝工艺的作用机理除磁粉之间相互吸引促进絮体聚集沉淀外,还有吸附架桥、电中和、双电层压缩、网捕卷扫等作用^[3]。胶体颗粒与磁粉颗粒碰撞所形成的以磁粉为载体的絮体或者磁粉将污泥杂质等包裹而成的絮体较常规混凝抱团形成的絮体更密实,密度也会更大,导致其沉降速度快,同时沉淀污泥含水率较低。

相较于传统混凝工艺,磁混凝工艺具有混凝高效、沉降迅速、节省占地、抗冲击能力强、节省药能耗及可超越过滤池等特点^[4]。磁混凝工艺通过设置污泥回流系统,使得磁粉可循环使用,有利于节约混凝剂和絮凝剂^[5]。磁混凝工艺能满足污水处理厂在土地受限条件下水量、水质的提标需求,并能实现污水处理厂出水稳定达标排放。目前,磁混凝工艺已成功应用于大连某紧凑型污水处理厂提标改造^[6]及黑龙江某污水老厂提标改造工程^[7],实现了深度处理阶段对TP、SS的高效去除,满足了污水处理厂出水稳定达标要求,说明磁混凝工艺在污水处理领域有较大的应用价值,具有极好的应用前景^[8]。

山东某污水处理厂厂区内用地紧张,设备老化损坏现象较严重,虽对部分损坏设备进行了更换维修,但并没有彻底解决所有设备的老化损坏问题,进水中工业废水占比较高,出水TP和SS难以稳定达标,需要进行原位提标改造。经过方案对比分析,本工程拟将原有传统混凝沉淀工艺提标改造为磁混凝工艺,以期改造后出水TP、SS可满足排放标准。

1 污水处理厂概况及分析

1.1 污水处理厂概况

山东某污水处理厂始建于2005年5月,污水处理厂进水来源主要为县区生活污水及来自伊利乳业、齐鲁制药、热电厂、机械加工等企业的工业废水,重点排污企业废水均经过预处理后排入本污水处理

厂,废水中不含有毒有害物质及重金属离子,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准。2009年升级改造后,污水厂设计处理规模为40 000 m³/d,主体工艺采用“粗格栅+提升泵站+细格栅+旋流沉砂池+A²/O生化池+二沉池+二次提升泵站+混凝沉淀池+V型滤池+次氯酸钠消毒”组合工艺。因其后期服务范围内工业废水排放量增大,实际进水指标数值高于设计进水水质标准,尤其进水COD_{Cr}、SS、TP指标变化大,超出设计值30%以上,导致污水处理厂实际处理污水量为25 000 m³/d,出水水质也出现超标问题,具体见表1。

表1 出水水质与执行标准

Table 1 Comparison between effluent quality and executive standards

项目	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	pH
实际出水水质	20.1~40.4	5.2~8.5	8~20	12~15	0.54~1.02	0.2~4.0	6~9
出水标准	50	10	10	15	0.5	5(8)	6~9

注:当水温≤12℃时执行括号内标准。

随着城市发展,当地小区、工业企业数量增多,排入厂内的生活污水和工业废水增加,目前污水处理厂实际进水量可达43 000 m³/d,污水处理厂实际处于超负荷运行状态,出水水质急剧恶化。为使出水水质满足排放要求,拟定对该污水处理厂进行提标改造。

1.2 现状问题及难点分析

(1)污水处理厂进水工业废水占比约3/4,水质波动偏大,SS偏高,对污水处理厂冲击较大,造成混凝沉淀效果差,出水TP、SS不能稳定达标。

(2)实际处理规模仅为25 000 m³/d,远远达不到设计负荷40 000 m³/d。

(3)现状V型滤池石英砂出现板结问题,已无法起到相应的过滤作用,从而无法保障出水SS稳定达标。

(4)污水厂总占地面积仅3万m²,厂区内用地紧张,只能进行原位提标改造。

2 提标改造方案设计

2.1 提标改造方案

(1)针对污水处理厂出水TP、SS不能稳定达标,扩建土地受限问题,将混凝沉淀池2组中的1组改造为磁混凝沉淀池,另1组不做改造,由改造后的1组磁混凝系统处理污水处理厂全部进水,并将磁混凝产生的化学污泥排入原系统污泥调蓄池,经污泥干

化机脱水至含水率60%以下外运处置;

(2)针对现有V型滤池滤料出现板结问题,将其滤料更换为新的石英砂滤料;

(3)改造后污水处理厂可以利用现有高程实施磁混凝工艺,节省污水提升和反冲洗能源消耗;

(4)排泥管道采用压力流进行污泥外排,防止含有磁粉的高密度化学污泥堵塞管道;

(5)刮泥机更换为高功率及高扭矩的四臂式全齿轮中心刮泥机,刮除高黏度和高密度的底层污泥;

(6)为保护机电设备及减少水藻产生,对磁混凝池顶采取遮盖防光措施。

2.2 工艺流程

改造后,污水处理厂实行满负荷进水,即处理量为43 000 m³/d。污水依次经过水厂原有一、二级处理单元后,全部进入改造后的单组磁混凝系统进行深度处理,磁混凝出水可超越V型滤池进入消毒单元处理后,实现达标排放。工艺流程见图1。

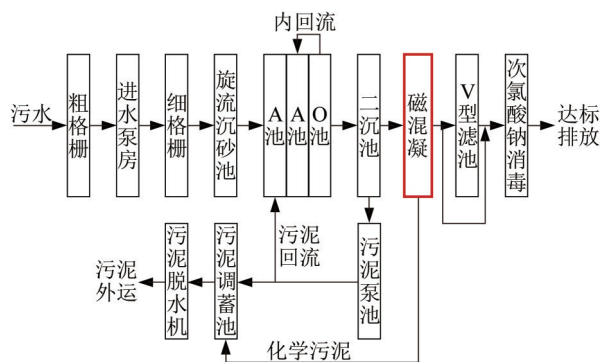


图1 改造后工艺流程

Fig. 1 Process flow chart after renovation

3 提标改造工程设计

3.1 磁混凝工艺特点

磁混凝工艺基于传统混凝沉淀原理发展创新而来,其利用磁粉增强混凝反应,以高效去除污水中污染物^[9]。磁混凝沉淀池依据高密度斜管沉淀池进行设计,表面负荷可达20~40 m³/(m²·h),沉淀池上部一般设计为立方体,下部设计为圆锥体,这样的设计是为了最大化保证磁粉的循环使用,从而增强磁混凝工艺混凝沉淀效果,实现污泥絮体快速沉淀,同时节省药剂投加,降低污水处理厂运营成本。

3.2 工程设计

3.2.1 磁混凝系统

磁混凝系统由原混凝沉淀系统中的1组斜管沉淀

池改造而来。

(1)原混凝沉淀单元有2组斜管沉淀池,现改建其中1组为磁混凝系统,另1组不做改造。改造后的磁混凝系统包括:混合反应池、磁粉反应池、絮凝反应池、污泥暂存池及斜管沉淀池,二沉池出水全部进入改造后的1组磁混凝系统进行深度处理。

(2)磁粉采用的是粒径为0.048~0.106 mm的Fe₃O₄颗粒,设计磁粉回收率为99%,改造后初次投加1 500 kg Fe₃O₄颗粒,污水磁粉保有量约为2.5 kg/m³;磁介质污泥回流量为设计水量的4%~5%,回流磁介质污泥质量浓度约8~12 g/L。改造后系统表面负荷由原来5.18 m³/(m²·h)提高到17.81 m³/(m²·h)。混凝剂采用聚合硫酸铁(PFS),助凝剂采用聚丙烯酰胺(PAM),投加量根据出水水质进行调整。

(3)将原混凝沉淀系统的混合反应池(总尺寸5 m×5 m×5.15 m,有效水深4.4 m,停留时间3.68 min)改建为磁混凝混合反应池(总尺寸3.2 m×2.35 m×5.15 m,有效水深4.4 m,停留时间1.11 min)、磁粉反应池(总尺寸3.2 m×2.35 m×5.15 m,有效水深4.4 m,停留时间1.11 min)及污泥暂存池(总尺寸5 m×1.5 m×5.15 m,停留时间120 min)。在改造后的磁混凝混合反应池上安装1台与磁混凝配套的超高速涡轮强化混合搅拌器,其 $n=960$ r/min,桨叶直径300 mm, $N=7.5$ kW。在磁粉反应池上安装1台全自动涡轮强化搅拌器,其 $n=50$ r/min,桨叶直径1 700 mm, $N=5.5$ kW。在磁粉反应池池顶一侧安装1套磁回收装置,磁回收装置包含磁分离机、高剪机及旋流初选机,其中磁分离机 $Q=50$ m³/h, $N=1.5$ kW,高剪机 $Q=50$ m³/h, $N=1.5$ kW,旋流初选机 $Q=50$ m³/h。在污泥暂存池内安装相应的污泥输送泵,将磁混凝产生的多余的生化污泥输送到原系统污泥调蓄池,污泥输送泵采用潜污泵,其 $Q=36$ m³/h, $H=150$ kPa, $N=3.0$ kW,共设置2台,1用1备。

(4)将原混凝沉淀的絮凝反应池(总尺寸5 m×5 m×5.15 m,有效水深4.65 m,停留时间3.68 min)改造为磁混凝絮凝反应池,并安装1台与磁混凝配套的全自动强化助凝装置,其 $n=18$ r/min,桨叶直径3 500 mm, $N=5.5$ kW。

(5)原混凝沉淀池(总尺寸11.5 m×11.5 m×5.65 m,有效水深4.85 m)为一侧进水,现将进水墙拆除,改为絮凝反应池一侧进水;将其内部中间的混凝土隔墙拆除,其末端的4个泥斗填平,并在距反应

池墙壁一侧 2.5 m 处新建一道隔墙(11.5 m×0.25 m×3.42 m)用来安装斜管填料;同时对池底进行混凝土二次浇筑,在池底中央新建一个圆台形污泥斗(D 0.4 m× D 0.8 m×0.5 m),通过预埋的 DN 200 HDPE 管将污泥斗收集的高浓度磁粉、污泥混合物由污泥泵提升至磁混凝前端反应池,实现磁粉的回收利用。混凝土二次浇筑的池底坡度设置为 1:12,同时将池底边缘进行倒角处理;拆除原沉淀池导链式刮泥机,更换为四臂式全齿轮中心刮泥机,其 $V=0.05$ m/s,刮臂直径 11.0 m, $N=2.2$ kW。通过对原混凝沉淀池以上的修建,最终将其改造为磁混凝斜管沉淀池(11.5 m×11.5 m×5.15 m,有效水深 4.0 m)。改造前停留时间约 75 min,改造后停留时间约 20 min。原传统混凝沉淀池(1组)平面布置见图 2,磁混凝沉淀池平面布置见图 3。

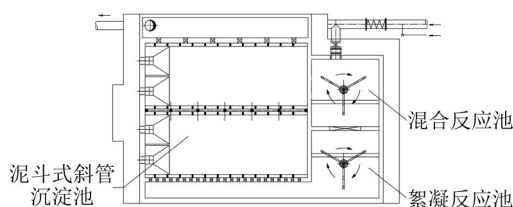


图 2 原混凝沉淀池(1组)平面布置

Fig. 2 Plan of original flocculation sedimentation tank (one group)

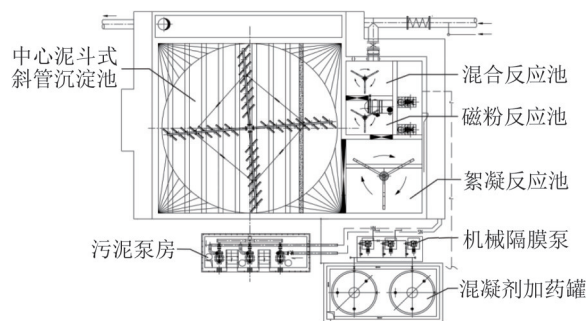


图 3 磁混凝沉淀池平面布置

Fig. 3 Plan of magnetic coagulation sedimentation tank

(6)将混凝剂加药装置安装在磁混凝沉淀池一侧,平面尺寸为 6.5 m×3.2 m。主要设备:混凝剂储罐, D 2.8 m×5.5 m, $V=30$ m³, 2套;混凝剂加药泵, $Q=0\sim 1\,000$ L/h, $H=0.4$ MPa, $N=0.75$ kW, 2用 1备。

(7)拆除污泥泵房原有污泥回流泵,更换为磁混凝配套的污泥泵,污泥泵采用适用于输送重介质的渣浆泵,其 $Q=60$ m³/h, $H=150$ kPa, $N=7.5$ kW, 2用 1备。

(8)磁混凝沉淀池土建改造及设备安装完毕后,在池顶新建一座钢结构遮盖,遮盖面积为 298 m²。

3.2.2 V型滤池改造

将V型滤池板结的石英砂滤料全部清除,更换为全新的石英砂滤料,滤料总体积 280 m³。同时在V型滤池进水端设置一条超越管,当V型滤池反洗不及时或滤料出现板结时,可以实现磁混凝出水超越V型滤池直接进入后续处理单元,保障污水处理厂整个系统不停车运行。

4 运行效果与经济技术分析

4.1 运行效果

本工程于 2020 年 4 月份改造完成,2020 年 5 月—12 月平均出水 TP、SS 见表 2。

表 2 2020 年 5 月—12 月平均出水 TP、SS

Table 2 Average TP, SS in effluent from May to December 2020

时间	TP/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)
5月	0.16	7
6月	0.14	6
7月	0.22	8
8月	0.25	8
9月	0.20	7
10月	0.11	5
11月	0.18	7
12月	0.23	8

工程提标改造前实际处理量约 25 000 m³/d,并且出水 TP、SS 时常超标,提标改造后处理规模为 43 000 m³/d。提标改造前后进水水质相差不大,TP 为 1.0~1.3 mg/L,SS 为 20~40 mg/L,改造后出水水质变化明显,其中改造前出水 TP 为 0.46~1.053 mg/L,SS 为 10~20 mg/L,改造后出水 TP 为 0.11~0.25 mg/L,SS 为 5~8 mg/L。可知经磁混凝处理后,可实现磁混凝出水超越V型滤池后出水 TP、SS 的大幅降低,且出水指标明显优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 出水标准,甚至能达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准,这充分体现出磁混凝在污水处理厂改造中深度去除 TP、SS 的巨大优势。

4.2 改造前后经济分析

本工程改造后需要投加磁粉 Fe₃O₄,但由于磁粉的回收率高达 99%,所以完成初次 2.5 kg/m³ 的磁粉投加后,后续 Fe₃O₄ 补加量极少。改造前需投加混凝剂 PFS 0.20 kg/m³、PAM 1.0~1.2 g/m³,改造后需投加 PFS 0.12 kg/m³、PAM 0.7~1.0 g/m³、磁粉 2.5 g/m³。PFS、PAM 投加量分别比改造前节省 40%、30% 左右。

能源消耗主要在搅拌机、污泥泵以及磁粉回收

系统。提标改造后,只需运行1组磁混凝装置便可满足污水处理厂实际进水量及出水水质要求。相较于改造前,实际运行功率及日运行能耗降低6.12%,吨水运行能耗降低45.45%,具体分析见表3。

表3 改造前后能耗分析

Table 3 Energy consumption analysis before and after renovation

项目	运行工艺组数/套	实际运行功率/kW	日运行能耗/(kW·h·d ⁻¹)	吨水运行能耗/(kW·h)
改造前	2	22.40	537.60	0.022
改造后	1	21.03	504.72	0.012

目前,PFS价格为600元/t,PAM价格为18 000元/t,磁粉价格为2 000元/t,电费单价为0.8元/(kW·h)。表4为改造前后药耗和能耗的分析对比。

表4 改造前后经济性分析

Table 4 Economic analysis before and after renovation

项目	混凝剂/(kg·m ⁻³)	PAM/(g·m ⁻³)	磁粉/(g·m ⁻³)	吨水能耗/(kW·h)	合计
改造前	0.20	1.0~1.2	0	0.022	—
改造后	0.12	0.7~1.0	2.5	0.012	—
降低	0.08	0.2~0.3	-2.5	0.010	—
节省费用/(元·t ⁻¹)	0.048 0	0.005 4	-0.005 0	0.008 0	0.056 4

可见,就药剂费、电费而言,改造后可节约成本0.056 4元/t。

5 结论

(1)通过将山东某污水处理厂混凝沉淀系统中的1组斜管沉淀池原位改造为磁混凝系统对废水进行磁混凝深度处理,解决了该污水处理厂进水超负荷,出水TP、SS不能稳定达标问题。磁混凝出水可不经V型滤池过滤即能稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A出水标准,甚至达到地表水Ⅳ类标准,可见磁混凝工艺有代替传统混凝沉淀池+V型滤池的潜力。

(2)提标改造后整个工程药剂(PAM、PFS)投加可节省30%~40%左右,实际运行功率及运行成本分别降低了6.12%、45.45%,吨水运行成本节省了0.056 4元。为响应国家节能降耗的号召,在污水厂提标改造或新建工程上,磁混凝工艺作为传统混凝深度处理工艺的升级工艺,值得在国内大力推广。

参考文献

[1] 王东升,张明,肖峰.磁混凝在水与废水处理领域的应用[J].环

境工程学报,2012,6(3):705-713.

WANG Dongsheng,ZHANG Ming,XIAO Feng. Application of magnetic coagulation in water and wastewater treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2012,6(3):705-713.

[2] 郑志佳,连来喜,刘彦华,等. MBBR+磁混凝用于CAST工艺升级改造的效果分析[J]. 中国给水排水,2020,36(1):7-12.

ZHENG Zhijia, LIAN Laixi, LIU Yanhua, et al. Upgrading and reconstruction of CAST process by MBBR and magnetic coagulation process[J]. China Water & Wastewater,2020,36(1):7-12.

[3] 陈文松,韦朝海,韩虹. 磁性絮团形成的最佳参数及机理研究[J]. 四川环境,2004,23(1):1-4.

CHEN Wensong, WEI Chaohai, HAN Hong. Study on optimum parameters and mechanism of forming magnetic composite flocs[J]. Sichuan Environment,2004,23(1):1-4.

[4] 唐凯峰,王旭阳,赵乐军,等. 磁加载混凝澄清技术在污水深度处理领域的应用[J]. 给水排水,2018,54(10):35-39.

TANG Kaifeng, WANG Xuyang, ZHAO Lejun, et al. Application of magnetic loading coagulation-clarification technology in advanced wastewater treatment[J]. Water & Wastewater Engineering,2018,54(10):35-39.

[5] 黑国翔. CoMag磁混凝工艺在一级A提标改造中的应用[J]. 中国给水排水,2011,27(22):97-99.

HEI Guoxiang. Application of CoMag magnetic coagulation to upgrading for first level A criteria[J]. China Water & Wastewater,2011,27(22):97-99.

[6] 刘强. 前置缺氧池+CAST+磁混凝工艺用于紧凑型污水厂提标改造[J]. 中国给水排水,2021,37(24):69-73.

LIU Qiang. Application of pre-anoxic tank/CAST/magnetic coagulation process in upgrading of a compact wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,2021,37(24):69-73.

[7] 郑心愿,华英豪. 磁加载多效澄清技术在城市黑臭水体治理和城市生活污水处理中的应用案例[J]. 环境工程学报,2021,15(9):3136-3142.

ZHENG Xinyuan, HUA Yinghao. Application of magnetic ballasted clarification technology in black and smelly water treatment and domestic sewage treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2021,15(9):3136-3142.

[8] 丁静,张建良,任焱,等. 混凝+A/O+气浮+臭氧+磁混凝工艺处理印染废水[J]. 中国给水排水,2021,37(20):112-115.

DING Jing, ZHANG Jianliang, REN Ye, et al. Treatment of dyeing wastewater by a combined process of coagulation, A/O, flotation, ozone, and magnetic coagulation[J]. China Water & Wastewater,2021,37(20):112-115.

[9] 李政,高健磊,周子鹏. 磁混凝工艺在化工废水预处理段的应用[J]. 工业水处理,2021,41(10):141-144.

LI Zheng, GAO Jianlei, ZHOU Zipeng. Application of magnetic coagulation in the pretreatment section of chemical wastewater[J]. Industrial Water Treatment,2021,41(10):141-144.

[作者简介] 陈智超(1990—),助理工程师。E-mail:chenzhichao_9@126.com。通讯作者:刘汝鹏,教授,博士。E-mail:13904@sdjzu.edu.cn。

[收稿日期] 2022-12-28(修改稿)