

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.020

# 炭加载磁混凝高效沉淀工艺用于柯桥江滨污水厂

张建良<sup>1</sup>, 谢 未<sup>2</sup>, 蔡建峰<sup>2</sup>, 罗 灿<sup>2</sup>, 任 烨<sup>2</sup>, 丁 静<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程东北设计研究总院有限公司, 吉林 长春 130000; 2. 绍兴柯桥江滨水处理有限公司, 浙江 绍兴 312072)

**摘 要:** 随着进水变化以及现有设备损耗,污水处理厂的达标排放压力越来越大。绍兴柯桥江滨水处理有限公司需新建深度处理工程,采用炭加载磁混凝高效沉淀工艺。详细介绍了该工程的设计、运行效果及经济性能等情况,总结了运行管理经验。该工程自2019年4月投运以来,运行稳定,运行成本约0.84元/m<sup>3</sup>,出水COD、TN、TP等14项指标均满足《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)中新建污水处理厂直接排放标准。该工程实践证明,炭加载磁混凝高效沉淀工艺是综合印染废水深度处理的较好工艺选择之一。

**关键词:** 炭加载; 磁混凝高效沉淀; 综合印染废水; 深度处理

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0120-06

## Application of Carbon-loaded Magnetic Coagulation and High Efficiency Sedimentation in Keqiao Jiangbin WWTP

ZHANG Jian-liang<sup>1</sup>, XIE Wei<sup>2</sup>, CAI Jian-feng<sup>2</sup>, LUO Can<sup>2</sup>, REN Ye<sup>2</sup>, DING Jing<sup>2</sup>

(1. China Northeast Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Changchun 130000, China; 2. Shaoxing Keqiao Jiangbin Wastewater Treatment Co. Ltd., Shaoxing 312072, China)

**Abstract:** It is more difficult to meet wastewater discharge standards with influent quality change and treatment equipment damage. Hence, Keqiao Jiangbin wastewater treatment plant (WWTP) in Shaoxing needs to build a new advanced treatment project, which adopts carbon-loaded magnetic coagulation and high efficiency sedimentation process. The design, operation effect, economic performance of the project are elaborated, and then operation management experience is summarized. Since April 2019, it had been running steadily, with the operating cost of about 0.84 yuan/m<sup>3</sup>, and 14 indicators such as effluent COD, TN, TP could satisfy the direct discharge standard for new WWTP in *Discharge Standards of Water Pollutants for Dyeing and Finishing of Textile Industry* (GB 4287-2012). The project practice has proved that carbon-loaded magnetic coagulation and high efficiency sedimentation is a good choice for advanced treatment of comprehensive printing and dyeing wastewater.

**Key words:** carbon-loaded; magnetic coagulation and high efficiency sedimentation; printing and dyeing wastewater; advanced treatment

绍兴柯桥江滨水处理有限公司作为国内规模最大的印染废水处理厂,承担着绍兴滨海印染产业集聚区内印染企业直接排放的印染废水处理任务。

2016年7月20×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>/d规模全流程直排工程投运,采用混凝沉淀+氧化沟+气浮+臭氧+活性炭滤池工艺,出水水质执行《纺织染整工业水污染物排放标

准》(GB 4287—2012)中的直接排放标准。随着进水水质发生变化及设备老化,污水达标排放的压力越来越大。因此,需要新建深度处理工程作为工艺保障段,确保总出水COD等指标稳定达标。

## 1 进、出水水质及工艺选择

现有污水厂主要处理园区内企业直排的印染废水,具有水量大( $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )、有机污染物含量高(主要指标  $\text{COD} \leq 2000 \text{ mg/L}$ )、可生化性差、水质变化大等特点,是难处理的工业废水之一。

近年来污水处理厂进水水质发生较大变化,TDS逐年升高,使得生化处理效率降低。混凝沉淀COD去除率为40%~50%,生化系统COD去除率为70%~80%。生化出水COD由开始不到200 mg/L逐渐上升到250 mg/L。生化停留时间为50 h,出水氨氮稳定在1 mg/L左右,出水中基本为难生物降解COD。生化处理后气浮单元COD去除率为40%~50%,臭氧+活性炭滤池联合工艺去除COD不超过30 mg/L。稳定达标排放压力大,且活性炭滤池的活性炭再生及更换复杂,炭炭处置费用高。

本次新建深度处理工程进水为厂区活性炭滤池出水,设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。出水水质执行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)中的直接排放标准。设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项 目	进水	出水	备注
$\text{COD}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\leq 120$	$\leq 80$	
$\text{SS}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\leq 50$	$\leq 10$	设计控制值
pH	6~9	6~9	
色度/倍	$\leq 20$	$\leq 20$	设计控制值

该工程重点去除污染物是COD,工艺选择分析如下:

① 由于厂区内预留地有限,需要在有限的土地上尽快建设一套深度处理保障措施,确保出水稳定达标,因此新建工程暂不考虑建设周期长、流程较为复杂的工艺。考虑到粉末活性炭吸附污染物快速、可用于应急处理等特点,因此新建深度处理采用粉末活性炭吸附技术,投产后根据实际运行水质灵活确定粉炭的投加量。

② 基于活性炭粉末不易沉淀的特点,工艺段又处于流程末端,处理效果好坏将直接影响出水水质;同时本工程可使用土地面积有限,首选占地面

积较小的沉淀工艺。考虑到磁混凝高效沉淀具有快速沉淀以及节省占地的优势,拟选择炭加载磁混凝高效沉淀池的形式,辅以投加混凝剂和助凝剂,能有效地加速粉末活性炭对COD的吸附和自身沉淀过程。

增加深度处理段后的总体工艺流程见图1。

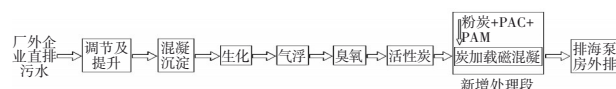


图1 增加深度处理段后的总体工艺流程

Fig.1 General process flow after adding advanced treatment section

## 2 炭加载磁混凝高效沉淀的优势

炭加载磁混凝高效沉淀技术将活性炭和磁混凝沉淀技术有机结合(见图2),可以发挥两者的优势。

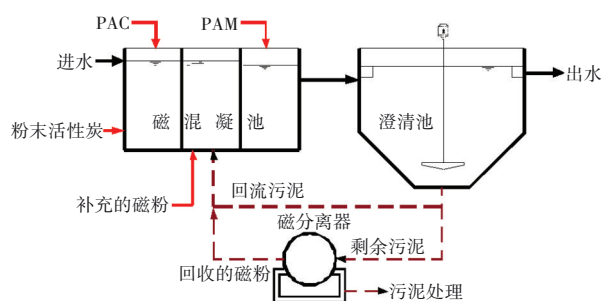


图2 炭加载磁混凝高效沉淀池流程

Fig.2 Flow chart of carbon-loaded magnetic coagulation and high efficiency sedimentation

### 2.1 活性炭吸附技术

活性炭吸附利用活性炭的固体表面对水中的一种或多种物质进行吸附,以达到净化水质的目的。活性炭的吸附能力与活性炭的孔隙大小和结构有关。一般来说,颗粒越小,则孔隙扩散速度越快,活性炭的吸附能力越强。活性炭可以快速吸附水中溶解性物质,有效去除溶解性COD、色度等<sup>[1-2]</sup>。

### 2.2 磁混凝技术

#### 2.2.1 磁混凝技术原理

磁混凝技术是在传统混凝沉淀技术基础上的发展创新,通过在化学絮凝反应过程中投加可循环利用的磁种,提高混凝絮体密度,达到快速沉降和高效固液分离的目的,从而大大提高单位面积的处理能力和出水水质。其原理是向原水中投加适量混凝剂、磁种、助凝剂等,使污染物快速絮凝,同时

磁种可大幅提高絮体的质量,加快絮体沉降速度,提高沉淀池的表面负荷,缩短水力停留时间,提高处理效率及出水水质标准(对SS、TP、COD、BOD<sub>5</sub>等都有较好的去除效果)。

### 2.2.2 磁混凝技术的优势

磁混凝技术主要有以下优势:①净化时间短。由于磁种的引入,絮体密度大,沉淀速度快<sup>[3-5]</sup>。②污染物去除率高,能够高效去除磷、悬浮物和非溶解性COD等。③耐冲击负荷能力强。在高水量或高污染情况下依然可以稳定运行,操作管理简便易行。④磁种可循环使用,磁种回收率可高达99%以上。⑤集成化程度高。模块化部件集成为车载式或撬装式装置,具有可移动性、多点循环处理的特点。⑥占地面积小,为常规沉淀工艺的1/3~1/2。⑦自动化程度高,系统处理效率高,可实现傻瓜式操作,日常维护简单易行。⑧智能化运行控制,与普通运行控制相比,能节省10%~20%药剂投加量,设备使用寿命长,二次投入小。

### 2.3 活性炭+磁混凝技术的独特优势

活性炭+磁混凝技术在本工程运用的独特优势:①在高效去除磷、悬浮物和非溶解性COD的同时,大量去除溶解性COD,确保总出水COD稳定达标;②絮体密度大,沉淀速度快,有效地解决了普通活性炭沉淀池出水漂炭的问题;③占地面积小,利用厂内有限的空地实现了良好的沉淀效果,比普通高效沉淀池节省占地约1/2。

## 3 主要构筑物及设计参数

根据本工程处理水量,设置4组磁混凝澄清池,每组平均流量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用钢筋混凝土结构,每组主要构筑物包括混凝反应池、澄清池、污泥系统、磁粉回收以及加药系统等。土建部分总投资约1750万元,设备安装部分投资约1850万元。

### 3.1 混凝反应池

每组磁混凝反应池设置6格反应池,前4格为活性炭反应池,后2格为PAC、PAM反应池,磁粉补充在最后一格活性炭反应池。单组反应池总停留时间为36.4 min,其中活性炭反应27.8 min、混合反应4.3 min、絮凝反应4.3 min。

### 3.2 澄清池

澄清池设有进水区、沉淀区、底部污泥区。设4座澄清池,单座澄清池平均表面水力负荷为13.5

$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,每座澄清池设计有效停留时间为36.7 min。

### 3.3 污泥系统及磁粉回收

磁混凝澄清池设有污泥回流,剩余污泥进入高剪机与磁分离机。设置污泥流量计,记录并控制回流污泥及剩余污泥流量。回收后的磁粉进入磁粉反应池。

## 4 运行效果和经济分析

### 4.1 运行效果

该工程投产以后运行稳定,从开始运行至今进出水COD、COD去除率,进出水SS及SS去除率分别如图3、4所示。可以看出,自该工程运行以来,尽管进水有一定波动,进水COD为54~127 mg/L,均值为96 mg/L,但出水COD始终保持在80 mg/L以下,均值为71 mg/L,COD去除率均值为26%;进水SS为9~16 mg/L,均值为13 mg/L,出水SS为4~12 mg/L,均值为8 mg/L,SS去除率均值为39%。同期其他出水指标见表2。

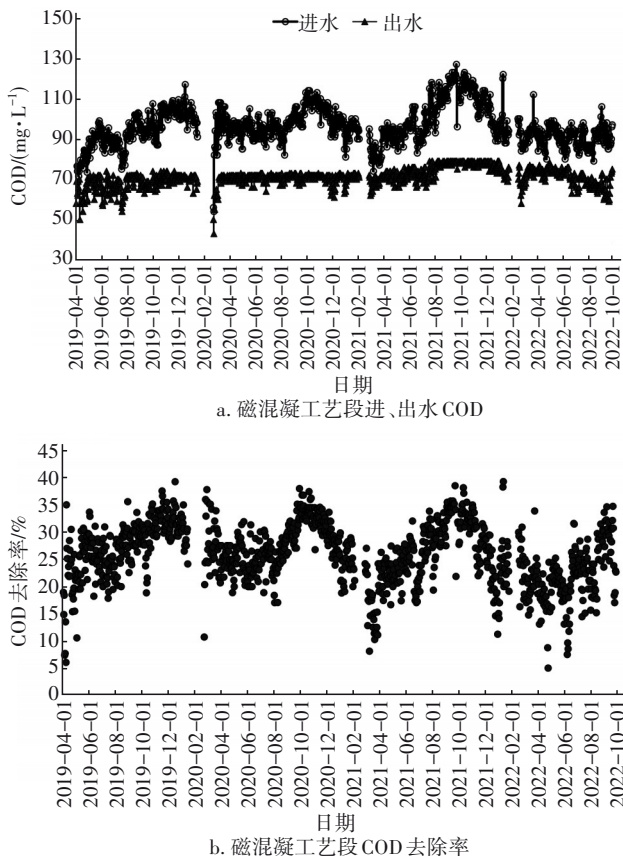


图3 磁混凝工艺段进、出水COD及COD去除率变化曲线

Fig.3 Change of COD and COD removal rate in influent and effluent of magnetic coagulation process



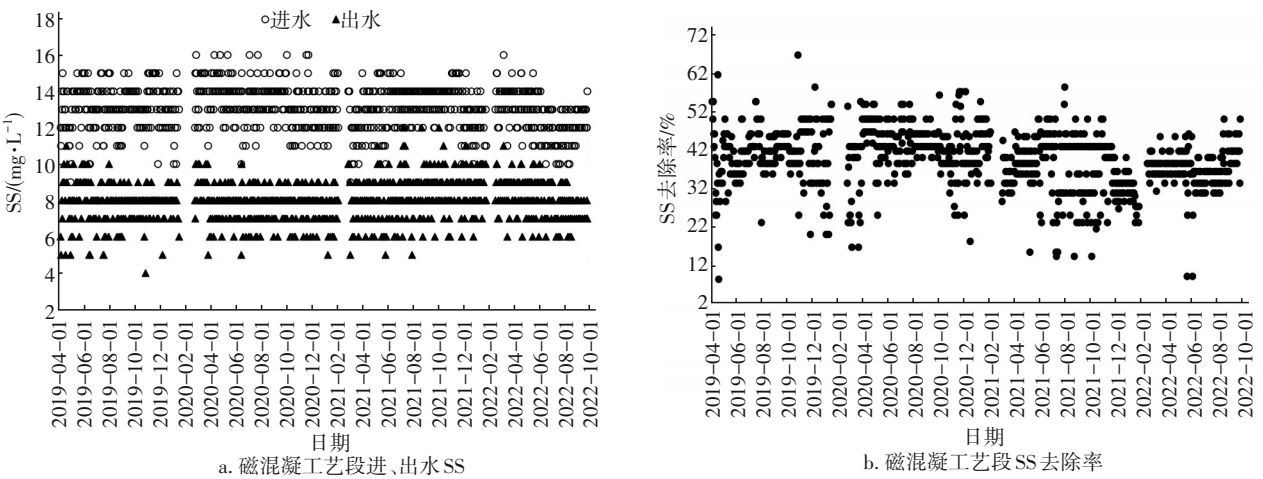


图4 磁混凝工艺段进、出水SS及SS去除率变化曲线  
Fig.4 Change of SS and SS removal rate in influent and effluent of magnetic coagulation process

表2 2019年—2022年大部分出水指标情况

Tab.2 Most effluent indicators from 2019 to 2022

年份	pH	氨氮/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总氮/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总磷/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	色度/倍	苯胺/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	六价铬/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	硫化物/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总锑/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	AOX/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	二氧化 氯/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	BOD <sub>5</sub> / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
2019	7.0	1.78	8.58	0.036 7	7	0.130	0.015 2	<0.005	0.012 9	0.049 0	<0.09	7.4
2020	6.9	1.72	10.00	0.052 0	7	0.196	<0.004	<0.005	0.027 0	0.048 8	<0.09	7.5
2021	6.8	0.92	10.10	0.129 0	8	0.176	<0.004	<0.005	0.017 1	0.066 7	<0.09	3.3
2022	6.7	2.15	11.30	0.203 0	8	0.213	<0.004	<0.005	0.032 1	0.081 5	<0.09	1.8

从表2可以看出,其他指标均满足《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)中新建企业直接排放标准的要求。

活性炭投加量和1 mg/L活性炭去除COD量随时间的变化见图5。

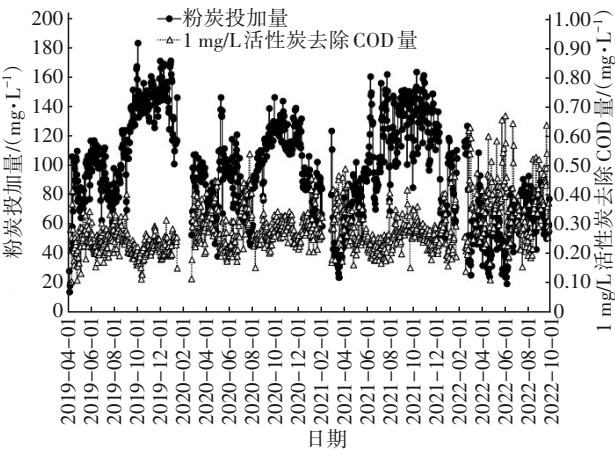


图5 活性炭投加量和1 mg/L活性炭吸附COD量随时间的变化  
Fig.5 Change of activated carbon dosage and COD adsorption per 1 mg/L activated carbon with time

从图5可以看出,活性炭对COD有较好的吸附

能力,1 mg/L活性炭吸附COD多为0.25 mg/L;总体而言,活性炭投加量增大时,活性炭吸附能力(1 mg/L活性炭吸附COD)有降低的趋势。为进一步分析活性炭吸附能力随活性炭投加量的变化,模拟现场条件进行烧杯混凝实验,聚合氯化铝、磁粉、聚丙烯酰胺投加量分别为50 mg/L、8 g/L、1 mg/L,活性炭投加量分别为0、60、80、100、120、140 mg/L,反应后上清液COD相应为92、80、75、71、69、69 mg/L。可以看出,随着活性炭投加量不断增大,COD不断降低,当COD降到一定程度,则基本不再降低,活性炭吸附能力下降。

总体而言,活性炭对COD在一定范围内有较好的吸附效果,但达到一定程度后,吸附能力会逐渐下降。

4.2 污泥处理

污泥主要来自投加药剂PAC、粉末活性炭和悬浮物,污泥理论核算量按照1 t PAC(液体,含 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为10%)产绝干污泥0.155 t、1 t粉末活性炭产绝干污泥1 t、去除悬浮物5 mg/L计算。2019年—2022年各项产泥情况见表3,年均理论核算绝干污泥量为

0.000 112 t/m<sup>3</sup>,实际绝干污泥量为0.000 099 t/m<sup>3</sup>。

表3 污泥占比分析

Tab.3 Analysis of sludge proportion

项 目	2019年—2022年平均投 加量或去除值/(mg·L <sup>-1</sup> )	各项产泥/ (t·m <sup>-3</sup> )	各项产泥 占比/%
PAC	64	0.000 010	9
粉炭	97	0.000 097	87
悬浮物去除	5	0.000 005	4

表4 主要运行费用及占比分析

Tab.4 Analysis of main operation cost and its proportion

项 目	药剂				电	污泥处理	总计
	活性炭	PAC	PAM	磁粉			
单价	6 970 元/t	435 元/t	15 500 元/t	3 600 元/t	0.65 元/(kW·h)	201 元/t	
用量或产量	97 mg/L	64 mg/L	1 mg/L	0.5 mg/L	0.055 kW·h/m <sup>3</sup>	0.000 424 t/m <sup>3</sup>	
费用/(元·m <sup>-3</sup> )	0.676	0.028	0.016	0.002	0.036	0.085	0.843
费用占比/%	80	3	2	1	4	10	100

## 5 运行管理经验

运行管理经验主要包括4个方面:活性炭投加泵的选型、粉炭的选型、氯离子对设备的影响和污泥泵密封形式的优化。

### 5.1 活性炭投加泵的选型

活性炭一般采用螺杆泵输送,螺杆泵转子为不锈钢材质,定子采用钢制外套,内衬橡胶。但活性炭属于颗粒物质且较硬,定子橡胶经常磨损。本工程采用橡胶转子泵,钢制叶轮外层包裹橡胶,端面及圆周面为不锈钢耐磨衬套,在实际使用过程中转子因有橡胶层包裹具有一定弹性,损坏不多,但不锈钢衬套损坏较多,故障频发。因此对该活性炭投加泵进行了3次改造,最终将橡胶转子泵改为渣浆泵,故障大幅减少。改造历程:第一次改造考虑不锈钢耐磨性不足,尝试对端面及圆周面衬套进行镀瓷制作,虽然使用周期比第一次有所增加,但因镀瓷层与不锈钢之间黏合力度不足,造成瓷层脱落,仍无法满足使用需求。第二次改造分析可能是转子泵转速偏高(529 r/min),对设备进行重新选型,将转速降至240 r/min,并同时提高转子泵输出量,但还是无法解决耐磨板磨损问题。第三次将橡胶转子泵更换为渣浆泵。经过改造后,运行情况良好,至今未因磨损造成设备故障。

### 5.2 粉炭的选型

由于进水水质的变化,需要阶段性对活性炭进行选型,选型主要注意:

## 4.3 经济分析

该深度处理工程主要运行费用包括药剂费、电费、污泥处理费等(人工费不计),其中污泥处理费按照201元/t(含水率为76.66%)计,则药剂、电、污泥处理及各项费用占比情况分别如表4所示。

从表4可以看出,活性炭、PAC、PAM、磁粉、污泥处理、电费用占比分别为80%、3%、2%、1%、10%、4%,总费用为0.843元/m<sup>3</sup>。

① 根据水质应用的不同环境,确定需要去除的COD范围。根据长期运行经验,该工程粉炭投加浓度与对应的COD处理效果的关系见表5。

表5 粉炭投加浓度与对应的COD处理效果

Tab.5 Dosing concentration of powdered carbon and corresponding COD treatment effect

原水 COD 区间	投炭浓度	出水 COD 要求
≤90	100	≤70
90~100(含100)	120	≤70
100~110(含110)	140	≤75
>110	150	≤75

② 确定合适的活性炭类型(针对木质、煤质等不同种类进行筛选,考虑药剂本身的成本以及产生的污泥)、适合的参数,且在应用中要防止再生炭的使用。为防止废炭及其他污染物引入,该工程主要从总氮和总磷的输入进行控制,粉炭投加量为100 mg/L时,处理水总磷增加量≤0.2 mg/L、总氮增加量≤0.15 mg/L。

### 5.3 氯离子对设备的影响

运行近一年后,刮泥机和磁分离机故障频发,且4组池子相继出现问题。后来逐个清空沉淀池,发现刮泥机水下SS304螺栓腐蚀严重。拆开现场4台磁分离机,发现鼓筒端盖的螺栓腐蚀严重。原因可能是原水为综合印染废水,进水氯离子浓度高于常规的生活污水,达到1 000~1 500 mg/L。后将刮泥机水下SS304螺栓全部更换为SS316螺栓,磁分离

机鼓筒端盖的螺栓更换为SS316螺栓。设备平稳运行至今再未发生类似问题。

#### 5.4 污泥泵密封形式的优化

磁混凝高效沉淀池设置污泥回流泵8台、剩余污泥泵6台,均为渣浆泵,采用机械密封。运行不到一年,发现密封处漏损较为严重。初步分析由于污泥中混合了磁粉和活性炭,杂质多、硬度高,磨损严重导致密封处漏损。及时更换成双机械密封形式后,运行效果好,基本无故障。

### 6 结论

① 经过运行实践,炭加载磁混凝高效沉淀工艺能够稳定将综合印染废水处理到符合《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)的直接排放标准,运行成本约0.84元/m<sup>3</sup>。该工艺在国内最大的综合印染废水处理中的成功运用可为类似难生物降解的工业废水处理提供借鉴。

② 活性炭对一定范围内的COD有较好的吸附效果,但工程实践表明,达到一定程度后,吸附能力会逐渐下降。

③ 活性炭投加泵从橡胶转子泵改为渣浆泵后,故障大幅减少;活性炭需要阶段性选型;此外,必须考虑工业废水特别是印染废水的高浓度氯离子对设备的腐蚀及磁粉混合炭粉对设备的磨损;与水接触的设备的关键部位需要采用不锈钢SS316以上的材质;污泥泵需要采用双机械密封形式才有较好的耐磨性,避免漏损严重的问题。

#### 参考文献:

- [1] 王文清,高乃文,刘宏,等.粉末活性炭在饮用水处理中应用的研究进展[J].四川环境,2008,27(5):84-88.  
WANG Wenqing, GAO Naiwen, LIU Hong, et al.

Research advance of drinking water treatment using powdered activated carbon [J]. Sichuan Environment, 2008, 27(5): 84-88 (in Chinese).

- [2] 沈曾民.活性炭材料的制备与应用[M].北京:化学工业出版社,2006.

SHEN Zengmin. Preparation and Application of Activated Carbon Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006 (in Chinese).

- [3] 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):705-712.

WANG Dongsheng, ZHANG Ming, XIAO Feng. Application of magnetic coagulation in water and wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(3): 705-712 (in Chinese).

- [4] 马放,王强,朱雪松,等.磁技术在污水处理中的应用现状及发展趋势[J].中国给水排水,2010,26(14):34-37.

MA Fang, WANG Qiang, ZHU Xuesong, et al. Application status and development trend of magnetic technology in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(14): 34-37 (in Chinese).

- [5] 邱敬贤,刘君,黄献.磁混凝技术在水处理中的研究进展[J].再生资源与循环经济,2018,11(10):40-44.

QIU Jingxian, LIU Jun, HUANG Xian. Research progress of magnetic coagulation technology in water treatment [J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2018, 11(10): 40-44 (in Chinese).

作者简介:张建良(1983-),男,江苏溧阳人,学士,高级工程师,主要从事水处理设计工作。

E-mail:xl613@163.com

收稿日期:2022-10-10

修回日期:2023-04-11

(编辑:衣春敏)

贯彻落实《中华人民共和国河道管理条例》