

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.14.018

# 炭吸附机械搅拌澄清池用于深度处理去除有机物

刘志娟

(中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310052)

**摘要:** 粉末活性炭可用于污水深度处理去除有机物,但是常用的接触吸附-沉淀工艺吸附效率低,沉降分离性能差,成本高,通常只用于应急投加。炭吸附机械搅拌澄清池通过大回流比的泥渣循环形成活性炭污泥层,粉末活性炭在污水中的浓度提升百倍,同时延长了粉末活性炭与有机物的接触时间,促使粉末活性炭吸附有机物接近饱和。与接触吸附-沉淀工艺相比,活性炭使用量降低40%以上,有效降低了药剂成本及污泥处理处置费用。另外,炭吸附机械搅拌澄清池可利用现有的机械搅拌澄清池改造,可同时进行有机物吸附和SS的澄清分离。投加粉末活性炭后,出水SS与之前基本持平,色度明显改善。采用炭吸附机械搅拌澄清池后,整体工艺流程短,节约用地且节省投资。

**关键词:** 炭吸附机械搅拌澄清池; 污泥循环; 吸附; 分离; 粉末活性炭; 有机物

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)14-0109-05

## Application of Carbon Adsorption Accelerator in Wastewater Advanced Treatment for Organics Removal

LIU Zhi-juan

(China United Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310052, China)

**Abstract:** Powdered activated carbon (PAC) can be applied in wastewater advanced treatment to remove organic matter, however, the common contact adsorption and precipitation process has low adsorption efficiency, poor sedimentation separation performance and high cost, and usually only used for emergency adding. The carbon adsorption accelerator forms activated carbon sludge layer through large reflux ratio of sludge circulation, thus the concentration of PAC is increased hundreds of times, and the contact time of PAC and organic matter is prolonged, which make organic matter adsorption by PAC close to saturation. Compared with the contact adsorption and precipitation process, the use of activated carbon is reduced by over 40%, effectively reducing the cost of agents and sludge treatment and disposal. In addition, the existing mechanical accelerator can be used to transform to the carbon adsorption accelerator, which can simultaneously remove organics and SS. After adding the PAC, the effluent SS was basically the same as before, and the chroma was significantly improved. After using carbon adsorption accelerator, the overall process is short, thus saving land and investment.

**Key words:** carbon adsorption accelerator; sludge circulation; adsorption; separation; powdered activated carbon (PAC); organics

活性炭是一种多孔、疏水性吸附剂,对水中有机物有较强的吸附作用,可用于去除表面活性物质、酚

类、染料、农药、重金属等污染物<sup>[1]</sup>。因此,粉末活性炭经常投加到自来水厂及污水处理厂混合反应池中

进行吸附反应,并通过后续沉淀分离随污泥排出,实现去除有机物和色度等净水目标。因粉末活性炭价格高、产泥量大,一直以来,如何提升其吸附容量是设计关注的重点。

## 1 项目概况

某市政污水处理厂设计规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,实际平均进水量为 $5.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用交替式 $\text{A}^2/\text{O}$ 为主体工艺,工艺流程:粗格栅及进水泵房→细格栅及旋流沉砂池→配水井→水解池→初沉池→交替式 $\text{A}^2/\text{O}$ 池→二沉池→机械搅拌澄清池→纤维转盘滤池→紫外线消毒→外排泵房。原进水以市政生活污水为主,并含有少量工业废水,处理目标为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。该污水处理厂实际运行良好,出水能

够达标排放,近两年平均出水COD为 $31 \text{ mg/L}$ ,TN为 $11 \text{ mg/L}$ ,TP为 $0.3 \text{ mg/L}$ 。

为切实加快印染产业发展,减小无序发展对环境造成的污染破坏,当地政府组织推动对印染产业整合集聚提升,将全市印染企业搬迁至印染工业园。印染废水经园区污水厂集中预处理,工艺流程:格栅捞毛机→曝气沉砂池→初沉池→冷却池→水解池→ $\text{A}^2/\text{O}$ 池→二沉池→磁混凝沉淀池→臭氧催化氧化池→外排至市政污水处理厂。印染工业园区污水处理厂出水执行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)及其修改单中表2间接排放标准。

印染废水总量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,其设计进水水质指标见表1。

表1 印染废水水质

Tab.1 Printing and dyeing wastewater quality

项目	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	BOD <sub>5</sub> / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	苯胺/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	总锑/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	NH <sub>3</sub> -N/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH	色度/倍
设计进水	200	100	50	1.0	0.1	20	30	1.5	6~9	80

印染废水色度大,有机物含量高,成分复杂,致畸、致癌物较多<sup>[2]</sup>,属于难生物降解的有毒废水。经过印染工业园预处理后排放的废水(已经过长时间的水解酸化、二级生化甚至强氧化处理),虽然SS、氮、磷污染物负荷不高,但是可生化性极差,以溶解性不可生物降解的COD为主。对印染废水进行为期3个月的实测,进水COD平均为 $187 \text{ mg/L}$ 、NH<sub>3</sub>-N为 $9.99 \text{ mg/L}$ 、TN为 $18.26 \text{ mg/L}$ 、TP为 $0.62 \text{ mg/L}$ 。通过GC-MS分析,发现原水中有机物除了苯酚类外,还有硝基芳香羧酸、长碳酮酸化合物,不少有机物具有硝基、酰胺基、磺酰胺基等发色基团,以及羟基、—OR、—NR<sub>2</sub>等基团。因此,溶解性不可生物降解COD是本工程的重点去除污染物。

印染废水经预处理后采用专管输送进入该市政污水处理厂。为确保印染废水进厂后能够处理达标,需对市政污水处理厂进行提标改造。提标改造后COD、NH<sub>3</sub>-N、TN及TP执行浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018),其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,即:COD≤ $40 \text{ mg/L}$ ,BOD<sub>5</sub>≤ $10 \text{ mg/L}$ ,SS≤ $10 \text{ mg/L}$ ,色度≤30倍,NH<sub>3</sub>-N≤ $2(4) \text{ mg/L}$ ,TN≤ $12(15) \text{ mg/L}$ ,TP≤ $0.3 \text{ mg/L}$ ,

pH为6~9。

## 2 工艺流程

经预处理的印染工业园区废水进入本项目后,工业废水占比及实际处理水量同时增加,现有的处理工艺对有机物处理效果不理想,色度也时常超标。对溶解性有机物的去除通常有物理吸附和强氧化两种途径。一方面,印染工业园对废水的预处理已经有强氧化措施;另一方面,强氧化处理需要增加工程用地及电力负荷。本项目厂内没有扩建大型构筑物的场地,周边也无地可征,且没有条件再进行大负荷电力增容,因此,拟通过提高现有处理构筑物的处理效率进行提标改造,其中包括投加粉末活性炭进行物理吸附。

影响活性炭吸附的因素有:吸附剂与吸附质的性质、废水的pH、水温 and 接触时间,而接触时间又取决于吸附速率。吸附质的性质是进水水质固有的因素,难以改变;活性炭吸附过程以物理吸附为主,主要是放热反应,因此水温升高吸附容量下降,水温降低吸附容量增加。本工程冬季平均水温为 $15.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,夏季平均水温为 $25.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进水水温理论上可以通过冷却塔等方式下调,但由于工程规模大,冷却不具备经济可行性,因此,优选吸附剂、提高吸

附速率、调整适宜的 pH、延长接触时间是提升活性炭吸附容量的设计重点。

周玲等<sup>[3]</sup>采用椰壳、煤质、柱状、果壳和粉末活性炭对印染废水进行吸附试验,结果表明粉末活性炭的吸附效能更强,对 COD 的去除效果更好。从经济性和吸附性能两个方面考虑,本工程采用平均粒径为 10~50  $\mu\text{m}$  的粉末活性炭。

目前活性炭吸附常用工艺是接触吸附-沉淀工艺,在混凝沉淀池之前设置活性炭混合接触池进行吸附,经混凝沉淀后随污泥排出。该工艺的特点是附加投资低、运行成本高,因此通常作为水处理应急措施使用。粉末活性炭吸附应用于常规污水厂的接触吸附-沉淀工艺时,出于工程经济性考虑,吸附时间一般仅 20~30 min,通常远低于粉末活性炭达到吸附平衡所需的时间<sup>[4]</sup>。中国市政工程华北设计研究总院在多个工业废水深度处理项目的中试表明,采用接触吸附-沉淀工艺对二沉池出水进行活性炭吸附,去除 10 mg/L 的 COD 需消耗 50~100 mg/L 的粉末活性炭,活性炭投加量与 COD 的去除比例为 (5~10):1,运行成本很高。

袁煦等<sup>[5]</sup>以中置式高密度沉淀池为载体,向池内投加粉末活性炭,利用污泥回流系统对粉末活性炭进行富集和回用,显著提升了活性炭对江河原水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果。苏州某工业园区污水深度处理工段以磁混凝沉淀池为载体,污泥回流比为 5%,实际运行时,将 COD 由 60 mg/L 降至 40 mg/L,需要投加 100 mg/L 粉末活性炭,投加去除比为 5:1。上述案例表明,污泥回流有助于提升粉末活性炭的吸附效率。

《得利满水处理手册》<sup>[6]</sup>指出,污泥循环澄清池或悬浮污泥床澄清池能有效延长炭水接触时间,并使炭吸附接近或达到平衡饱和量,充分发挥活性炭的吸附能力。理论上, COD 去除率要求越高,去除单位 COD 的活性炭消耗量越大。该公司通过对污水处理厂二级出水进行试验并绘制吸附等温曲线(见图 1),试验时水温在 20  $^{\circ}\text{C}$  上下波动。进水 COD 为 35~40 mg/L、COD 去除率 <50%、最终出水 COD  $\geq 20$  mg/L 时表现出较强的经济性。投加 10~60 mg/L 的活性炭,可去除 10~30 mg/L 的 COD。

上向流炭吸附澄清池属于悬浮污泥床澄清池,根据调研结果,天津某开发区污水处理厂应用上向流炭吸附澄清池对二级出水进行深度处理,出水

COD  $\leq 40$  mg/L,去除 20 mg/L 的 COD 时粉末活性炭投加量仅为 40 mg/L,实际数据与图 1 较为接近。

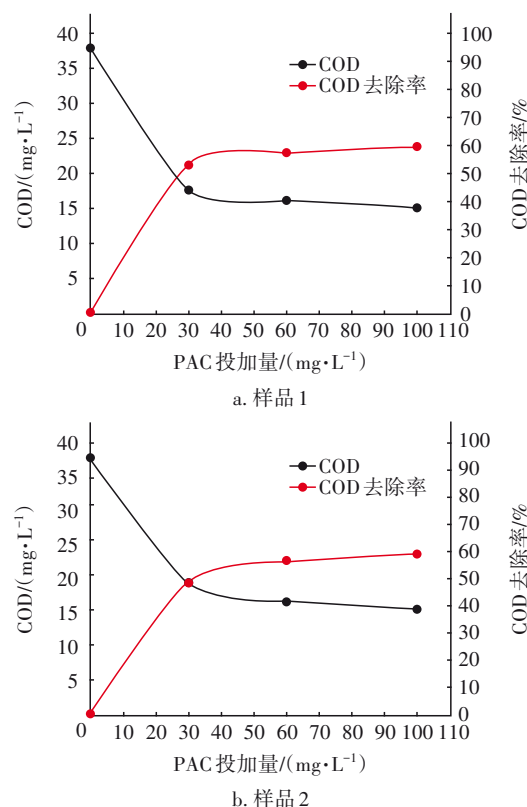


图1 不同粉末活性炭(PAC)投加量对 COD 的去除效果  
Fig.1 Effect of different powder activated carbon (PAC) dosing concentrations on COD removal

本项目现状工艺流程中的机械搅拌澄清池属于污泥循环澄清池,向澄清池进水中投加粉末活性炭,可形成炭吸附机械搅拌澄清池。在充分调研并经工艺提升模拟试验后,最终确定本项目工艺路线如下:印染废水→水解酸化→(与经过预处理的市政污水混合)MBBR 生物池→二沉池→炭吸附机械搅拌澄清池→纤维转盘滤池→紫外线消毒→外排泵房。

上述流程中,MBBR 生物池及炭吸附机械搅拌澄清池是改造构筑物,其余均为现状构筑物。

排入该污水处理厂的印染废水占比约 25%。印染产业园内最后一道工艺为臭氧催化氧化,对大分子有机物有解环断链作用。因此,首先对解环断链后的印染废水单独进行水解酸化,以提升废水可生化性。经水解酸化后,与市政污水混合进入由现状生物池改造的 MBBR 生物池,充分发挥生物降解作用,降低运行成本。水解酸化水力停留时间为



23.7 h, MBBR 生物池水力停留时间为 22.5 h。

经过预处理和二级处理后,污水进入炭吸附机械搅拌澄清池,出水进入后续纤维转盘滤池。

炭吸附机械搅拌澄清池设计进、出水水质见表 2。

表 2 炭吸附机械搅拌澄清池设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality of carbon adsorption accelerator

项目	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	色度/倍
设计进水	≤65	≤30	≤1.5	≤60
设计出水	≤40	≤10	≤0.5	≤30

经化验,进入炭吸附澄清池的难降解 COD,其代表组分为苯胺、丙烯酸酯聚合物、聚二甲苯、有机硅高分子等,其共同特性是分子链长、化学键比较稳定。

3 主要设计参数

对机械搅拌澄清池进行改造,投加粉末活性炭,形成炭吸附机械搅拌澄清池。该澄清池属于污泥循环澄清池,集絮凝、沉淀、澄清与吸附功能为一体,能够在第一反应区形成浓度高达 50 g/L 的活性炭悬浮污泥层,以及 1 h 以上的接触时间,这是充分发挥粉末活性炭吸附功能的关键。同时,协同絮凝剂和助凝剂投加,在澄清池分离区设置斜管,能够有效解决粉末活性炭沉降困难的问题。

该污水处理厂有 3 座机械搅拌澄清池,为正方形池,边长 19 m,水深 6.9 m,单池设计流量 26 667 m<sup>3</sup>/d。主要改造内容有:因粉末活性炭沉降难度大,为提升澄清池的沉降性能,改造工程在导流室增加导流板,在分离室增加斜管;为提高第一反应室的悬浮污泥层污泥浓度,确保搅拌和刮泥机能够正常运行,更换并加大机械搅拌和刮泥机的电机功率;投加粉末活性炭将导致排泥量大幅增加,因此更换了排泥泵,增大其排泥能力,并将螺杆泵改为转子泵,以降低机械磨损对排泥泵的损耗,降低检修频次。

改造后主要设备配置见表 3,主要设计参数见表 4。

该污水处理厂原有聚合硫酸铁、PAM、硫酸和氢氧化钠投加装置各 1 套。改造工程增设 1 套粉末活性炭投加装置。

加药设备主要设计参数见表 5。

表 3 单座炭吸附机械搅拌澄清池主要设备配置

Tab.3 Main equipment of each carbon adsorption accelerator

项目	规格型号	数量
涡轮搅拌机	N=11 kW, 叶轮直径 4.5 m, 叶轮开启度 0.41 m	1 台
刮泥机	N=5.5 kW, 刮臂直径 16 m	1 台
转子排泥泵	Q=80 m <sup>3</sup> /h, H=150 kPa, N=7.5 kW	2 台(1 用 1 备)
蜂窝斜管填料	斜长 1 m, 倾角 60°, 内切圆直径 Ø32 mm	160 m <sup>2</sup>
电动蝶阀	DN800	1 台

表 4 炭吸附机械搅拌澄清池主要设计参数

Tab.4 Main design parameters of carbon adsorption accelerator

项目	数值	项目	数值
泥渣回流比/倍	5	三角堰出流缝流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.35
总水力停留时间/h	2.2	搅拌叶片边缘线速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.8
第一絮凝室停留时间/min	60	提升叶轮进口流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.5
第二絮凝室停留时间/min	6.8	提升叶轮边缘线速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1.2
导流室停留时间/min	24	第二絮凝室上升流速/(mm·s <sup>-1</sup> )	36
分离室停留时间/min	40	导流室下降流速/(mm·s <sup>-1</sup> )	36
清水区高度/m	1.0	导流室出口流速/(mm·s <sup>-1</sup> )	60
池底坡度/%	5	泥渣回流缝流速/(mm·s <sup>-1</sup> )	150
进水管流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.61	斜管直径/mm	32
配水三角堰流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.35	斜板分离区上升流速/(mm·s <sup>-1</sup> )	1.5

表 5 加药设备主要设计参数

Tab.5 Main design parameters of dosing equipment

项目	粉末活性炭	聚合硫酸铁	PAM
投加位置	二沉池出水口	澄清池进水总管	澄清池进水总管
投加浓度	30~50	30	0.5
最大投加能力	100	50	2

4 主要运行参数及效果

通常酸性溶液中活性炭的吸附率比在碱性溶液中高,本工程工业废水为印染废水,偏碱性,进水 pH 为 8.1~8.9,因此在进入炭吸附沉淀池之前调整 pH 至中性。

炭吸附机械搅拌澄清池排泥不及时可能导致水质不合格,排泥量过大又可能导致活性炭吸附容量利用不充分,因此,合理的排泥是炭吸附机械搅拌澄清池关键运行参数之一。根据澄清池工作原理,排出泥量等于生成泥量,以保持悬浮污泥层相对稳定为运行标准。本工程以流量为基础,并以污泥沉降比试验结果为参照,每运行0.5 h排泥一次,每次排泥时长50 s。

经过3个月的运行调试,炭吸附机械搅拌澄清池满负荷运行并趋于稳定。粉末活性炭平均投加量为62 mg/L,COD平均去除23 mg/L,活性炭投加与COD去除比为2.7,平均去除10 mg/L的COD消耗27 mg/L粉末活性炭。从2021年至今,粉末活性炭实际投加量62 mg/L,聚合硫酸铁实际投加量30 mg/L,PAM投加量1 mg/L,第一反应区污泥浓度48 g/L,排泥量220 t/d,排泥含水率95%,可见,主要运行参数未偏离设计正常范围。实际进、出水水质见表6。

表6 炭吸附机械搅拌澄清池实际进、出水水质

Tab.6 Actual influent and effluent quality of carbon adsorption accelerator

项目	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	色度/倍
进水平均值	61	22	1.50	40
出水平均值	38	9	0.28	18
进水最大值	75	43	1.80	45
出水最大值	42	12	0.31	22

改造后,对SS和总磷的去除率未有明显变化;印染废水进厂后澄清池进水色度提升,出水色度未有明显变化。

改造后增加的费用:工程直接投资41元/m<sup>3</sup>,药剂费0.465元/m<sup>3</sup>,污泥处置费0.1元/m<sup>3</sup>。

## 5 结语

通过对现有机械搅拌澄清池进行改造,并投加粉末活性炭,形成能够同时去除溶解性难降解有机物、色度和SS的炭吸附机械搅拌澄清池,缩短了深度处理的工艺流程,节约用地,节省投资。与常规接触吸附-沉淀工艺相比,活性炭使用量降低40%以上,有效降低了药剂成本及污泥处理处置费用。

炭吸附机械搅拌澄清池应用于污水深度处理,流程短、投资省、成本低,为发挥粉末活性炭吸附功

能提供了更有效的途径,实现了其从应急投加向常规处理应用的转变。

## 参考文献:

- [1] 龙腾锐,何强. 排水工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:544.  
LONG Tengrui, HE Qiang. Drainage Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011:544 (in Chinese).
- [2] 刘忠,张兰翔. 浅析印染废水处理工艺现状[J]. 科技视界,2014(25):261,331.  
LIU Zhong, ZHANG Lanxiang. Analysis of dyeing wastewater treatment status [J]. Science & Technology Vision, 2014(25):261,331(in Chinese).
- [3] 周玲,张燕南,吴昊,等. 活性炭深度处理印染废水的研究[J]. 山东化工,2018,47(9):172-173,176.  
ZHOU Ling, ZHANG Yannan, WU Hao, et al. Study on the advanced treatment of activated carbon printing and dyeing wastewater [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(9): 172-173, 176(in Chinese).
- [4] 金伟,徐祖信,曹达文. 粉末活性炭处理原水中溶解性有机物的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008,36(12):1670-1673,1718.  
JIN Wei, XU Zuxin, CAO Dawen. Study on removal of dissolved organic compounds in raw water by powdered activated carbon[J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2008,36(12):1670-1673,1718(in Chinese).
- [5] 袁煦,许龙,王昭,等. 活性炭回流强化去除有机物的试验研究[J]. 中国给水排水,2013,29(7):45-47.  
YUAN Xu, XU Long, WANG Zhao, et al. Enhanced removal of organic compounds by PAC return[J]. China Water & Wastewater, 2013,29(7):45-47(in Chinese).
- [6] 杨燕华,刘灿生. 得利满水处理手册[M]. 北京:化学工业出版社,2021.  
YANG Yanhua, LIU Cansheng. The SUEZ's Water Treatment Handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021(in Chinese).

作者简介:刘志娟(1979- ),女,湖南澧县人,大学本科,高级工程师,主要从事工业及民用建筑给排水、工业及市政水处理研究工作。

E-mail:16477032@qq.com

收稿日期:2022-05-04

修回日期:2022-06-13

(编辑:衣春敏)