

新型净水剂在焦化废水深度处理中的实际应用

王国瑞, 马 凯, 冯春晖, 刘敬由, 李雁鸿

神美科技有限公司, 河北 河间

Email: wangguorui@shenmeikeiji.com

收稿日期: 2021年2月2日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

摘 要

焦化废水是一种典型的高浓度、难降解的工业废水, 其组成成分复杂、毒性大、处理难度大。按国内现有处理工艺, 生化处理后废水很难达到一级排放标准, 然而实施新的炼焦行业污染物排放标准, 使焦化废水的达标排放或回用成为迫切需要解决的难题。本文研究出新型焦化酚氰废水净水剂, 在焦化废水常规工艺的深度处理过程中强化混凝的技术实际应用, 不仅能够保证出水水质达到《炼焦化学工业污染物排放标准》的排放要求, 解决废水外排造成的环境污染问题, 提高水的重复利用率, 而且节省固定投资, 降低运行成本, 管理操作简易, 具有良好的示范意义和推广价值。

关键词

焦化废水, 废水处理, 深度处理, 新型焦化酚氰废水净水剂

Practical Application of New Water Purifying Agent in Advanced Treatment of Coking Wastewater

Guorui Wang, Kai Ma, Chunhui Feng, Jingyou Liu, Yanhong Li

Smedic Technology Co., Ltd., Hejian Hebei

Email: wangguorui@shenmeikeiji.com

Received: Feb. 2nd, 2021; accepted: Apr. 23rd, 2021; published: Apr. 30th, 2021

Abstract

Coking wastewater is a typical high-concentration, difficult-to-degrade industrial wastewater with complex composition, high toxicity, and difficult treatment. According to the existing domestic treatment

作者简介: 王国瑞, 男, 出生于 1982 年, 河北邢台人, 硕士研究生, 中级工程师, 主要从事污水处理药剂研发与应用工作。

文章引用: 王国瑞, 马凯, 冯春晖, 刘敬由, 李雁鸿. 新型净水剂在焦化废水深度处理中的实际应用[J]. 水资源研究, 2021, 10(2): 175-185. DOI: 10.12677/jwrr.2021.102018

technology, it is difficult for the wastewater after biochemical treatment to meet the first-level discharge standard. The implementation of the new coking industry pollutant discharge standard makes the discharge or reuse of coking wastewater become an urgent problem to be solved. The practical application of a new type of coking phenol-cyanide wastewater purifier in the advanced treatment process of conventional coking wastewater is introduced. It can not only ensure that the effluent water quality meets the discharge requirements of the "Coking Chemical Industry Pollutant Discharge Standard", solve the environmental pollution problem caused by the discharge of waste water, and improve the reuse rate of water, but also save fixed investment, reduce operating costs, and easy management and operation, which has demonstration significance and promotion value.

Keywords

Coking Wastewater, Wastewater Treatment, Advanced Treatment, New Water Purifier for Coking Phenol Cyanide Wastewater

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

焦化废水是炼焦、煤气净化和焦化产品回收等过程中产生的有机工业废水，主要特征污染物有 COD、氰化物、氨氮、酚类等，是一种典型的高浓度难降解有机工业废水，具有显著的毒性和致癌性[1] [2] [3]。现阶段，焦化废水的处理主要包括预处理和生化处理。经二级生化处理后，焦化废水中部分有机污染物得到有效去除，但对于某些难生物降解的有机污染物去除效果较差，不能满足《炼焦化学工业污染物排放标准》的要求[4]。据统计，我国每年焦化废水的排放量近 3 亿吨，若任意排放，将对水环境和人体健康造成严重危害。如何深度处理焦化废水使之达标排放以降低其对环境的影响，一直是国内外环保人士广泛关注的一个难点。

2012 年 10 月，环保部新起草的《炼焦化学工业污染物排放标准(GB16171-2012)》正式颁布并实施[4]。焦化废水的排放标准较原先的污水综合排放标准更加严格，COD_{cr}、氰化物等污染物的限值分别改为 80 mg/L 和 0.2 mg/L [4]。因此，无论是基于社会责任，还是出于国家的法律约束，企业都必须对现有处理工艺进行必要的完善补充，添加深度处理工艺，确保外排水水质达标。据调研，目前国内焦化废水处理企业的运行管理普遍出现两种情况。

其一采用生化处理工艺和混凝 - 沉淀 - 过滤的深度处理工艺，通过投加絮凝剂和混凝剂处理焦化废水，但效果普遍不理想，尤其对于氰化物的去除效果十分有限。焦化废水处理常用的药剂主要为有机高分子絮凝剂、无机盐类絮凝剂和无机高分子絮凝剂三类。对于细颗粒含量高、粘土含量高、难降解的有机污染物的焦化废水，需将无机絮凝剂与有机高分子絮凝剂配合使用[5] [6] [7]。投加无机絮凝剂的作用是增加溶液中正离子浓度和扩散层中反离子浓度，降低难降解有机污染物物表面负电位荷，压缩颗粒双电层，降低 ζ 电位，破坏焦化水胶体稳定性，促进颗粒絮凝沉淀[8]。投加有机高分子絮凝剂的作用是通过吸附架桥将多个颗粒联合起来形成絮团而沉降。常用的无机盐类絮凝剂主要有铝盐、铁盐等；无机高分子絮凝剂主要有聚合硫酸铁、聚合氯化铝、聚硅硫酸盐、聚合氯化铝铁等(聚合硫酸铁是硫酸铁水解产物，其中有各种核羟基络合物，如 $\text{Fe}_2(\text{OH})_3^{4+}$ ， $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{5+}$ ， $\text{Fe}_4(\text{OH})_6^{6+}$)；有机高分子絮凝剂主要是聚丙烯酰胺或其衍生物的高聚物或共聚物[9]，具体可分为非离子型、阴离子型和阳离子型。

其二采用生物法叠加高级氧化(芬顿)、多级过滤、膜分离等深度处理技术，其出水水质基本能得到保证，但运行管理复杂，设备投资及构筑物改造等工程投资巨大，甚至超出部分企业在环保治理方面的经济承受能力，

因此该技术工艺也很难推广。焦化废水处理行业迫切需要一种技术上可靠、经济上可行、运行管理便捷的技术方案，以期缓解新形势下的焦化废水处理压力。针对焦化废水的水质特点以及焦化行业的运行管理现状，本研究拟通过耦合混凝、吸附、络合等多种技术，制备新型复合混凝剂，提出一种基于常规水处理工艺及设施设备的“新型焦化酚氰废水净水剂强化混凝深度处理技术”，在中国专利网获取专利。通过山西某焦化厂实际应用案例，以为焦化废水的深度处理提供一种新的方法。

2. 焦化厂污水处理工艺概况

2.1. 焦化厂污水厂简介

处理污水以炼焦废水为主，同时接收和处理厂区生活污水，设计规模为 150 m³/h，现阶段进水量为 100 m³/h，经处理后的水作为熄焦水回用。

2.2. 水厂水质

焦化污水处理厂进出水指标，如表 1 所示。

Table 1. Water inlet and outlet indicators of coking wastewater treatment plant

表 1. 焦化污水处理厂进出水指标

水质指标	COD (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	PH 无量纲	氰化物(mg/L)
进水指标	>2000	70~150	2~3	90~200	6~9	>50
出水指标	<80	<10	<1	<20	6~9	<0.2

2.3. 工艺简介

工艺采用“预处理 + A²/O + 深度处理”，深度处理为混凝沉淀池，数量 2 座。其中混凝沉淀池分为搅拌混凝区、沉淀区，水力停留时间 1 h。本药剂选择焦化厂的生物接触氧化池(简称接触氧化池)出水也即混凝沉淀池进水进行试样验，实际应用在深度处理工艺上。工艺流程图如图 1 所示。

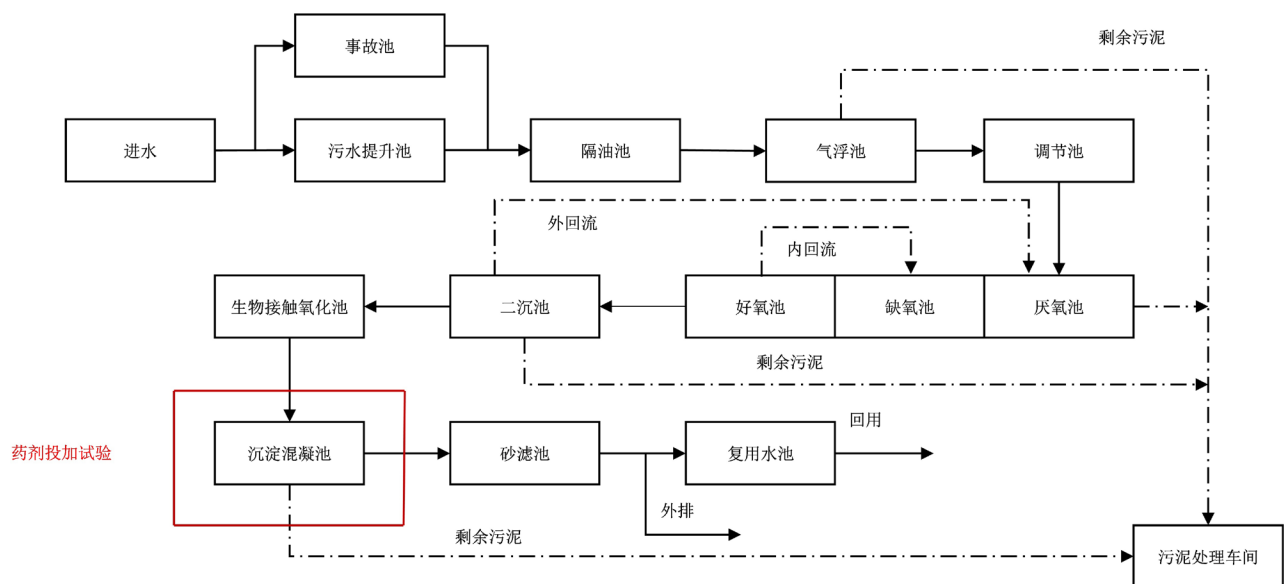


Figure 1. Process flow chart of wastewater treatment in coking plant

图 1. 焦化厂污水处理工艺流程图

3. 絮凝原理

新型焦化酚氰废水净水剂(简称 SM 净水剂),以凹凸棒土、膨润土、粉煤灰、沸石粉、硅烷偶联剂、二甲基二烯丙基氯化铵、过硫酸钾、羧甲基纤维素钠、聚合硫酸铁、聚合硅酸铝铁、硫酸亚铁、七水合硫酸镁、磷酸三钠、聚丙烯酰胺、聚乙烯吡咯烷酮和氢氧化钙为原料复配而成,通过采用硅烷偶联剂与聚合物对凹凸棒土的双层改性,能够在凹凸棒土层间发生化学键合与聚合反应,改变了凹凸棒土的表面吸水特性,同时增大了凹凸棒土的层间距,从而大大提高了凹凸棒土的吸附絮凝效果;进一步将此改性凹凸棒土联合复台粘土及有机无机高分子絮凝剂,使得各组分之间发挥协同增效作用,制得所述复合型净水剂兼具无机絮凝剂和有机絮凝剂的优点,能快速吸附、捕获、絮凝、卷扫焦化废水中的各种有机及无机质,对焦化废水的 COD、色度、浊度均具有较高的联合去除效果,具有加药量低、絮凝沉淀快的优势,针对焦化废水的 COD 去除率可达 70%以上,对色度的去除率在 90%以上,在除油、去除浊度、重金属、以及部分氨氮效果上也较为显著,且该净水剂环保无毒、稳定性高,具有较好的市场应用前景[10]。

4. 药剂投加试验方案

4.1. 运行条件

生产性试验期间,SM 净水剂投加利用原厂加药系统,并进行如下改造:由试验前的贮存同一种药剂同时向两组混凝沉淀池投加同种药剂,改造为 SM 净水剂与厂内原有投加药剂(PFS、PAM、脱色剂)两套药剂分别单独贮存,通过增加加药泵与管路开关的切换,实现分别向 1, 2 两系列混凝池投加的切换(改造由神美科技完成)。

采用平行试验的方式进行对比,即在其中的 1 系列混凝池中投加 SM 净水剂,2 系列混凝池投加原有药剂参照对比。两个系列的操作条件完全一致,通过研究出水水质,比较 COD、色度、浊度、氨氮的去除效果。

4.2. 操作条件

- 1) 控制 1、2 两系列混凝池进水量一致,排泥量一致;
- 2) 1 系列单独投加 SM 净水剂,2 系列投加现场药剂即脱色剂 + PFS + PAM;
- 3) 1、2 系列混凝池出水取样时间一致,接触氧化池出水取样时间提前 1 个小时。

4.3. 评价方法

主要评价指标为 COD、色度、浊度,氨氮。参考评价指标为耐负荷冲击度。

4.4. 试验目的

通过对比 1, 2 两个系列的出水指标,对比出水处理效果及使用经济性,验证 SM 净水剂的实际意义。

4.5. 检测依据

- GB11914-1989《水质-COD 的测定重铬酸钾法》
- GB11903-1989《标准目测比色法》
- HJ535-2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》
- HJ1075-2019《水质 浊度的测定浊度计法》

4.6. 数据测定周期

数据测定周期,如表 2 所示。

Table 2. Data measurement period
表 2. 数据测量周期

取样点	测量周期
接触氧化池出水	一天一次
1 系列混凝池出水	一天一次
2 系列混凝池出水	一天一次

4.7. 试验时间

2020 年 8 月 9 日至 2020 年 8 月 20 日。

4.8. 试验要求

生产试验期间，水厂总出水达到《炼焦化学工业污染物排放标准》一级排放标准(GB16171-2012)，即出水标准：COD < 80 mg/L，NH₃-N < 10 mg/L。

4.9. 神美新型焦化酚氰废水净水剂与现场药剂小试

4.9.1. 小试试验方法

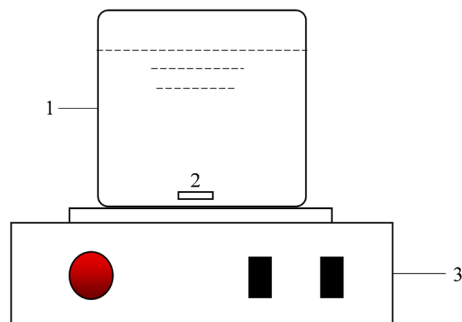
1) 取生物接触氧化池出水作为实验水样，分别取 1000 mL 水样于三个 1000 mL 烧杯中，并编号①②③，其中①为接触氧化池出水当做原水，②投加 SM 净水剂，③投加现场药剂(脱色剂 + PFS + PAM)；

2) SM 净水剂使用过程中控制 SM 净水剂单独投加且投加量与现场 PFS 投加量相同，现场药剂使用过程中先投加脱色剂，再投加 PFS，最后辅以 PAM 助凝；

3) 试验采用六联磁力搅拌器，药剂投加过程中，先快速搅拌(按 200 r/min) 3 min，后慢速搅拌(按 60 r/min) 7 min (现场 PAM 助凝剂使用过程中在慢速搅拌开启后加入)；

4) 搅拌完成后，静置沉淀 30 min，取上清液，测量 COD、NH₃-N、色度、浊度。

小试示意图，如图 2 所示。



1-烧杯；2-搅拌转子；3-恒温磁力搅拌器

Figure 2. Schematic diagram of on-site pilot test device
图 2. 现场小试试验装置示意图

4.9.2. 小试试验数据

取接触氧化池出水进行烧杯试验，控制 SM 净水剂与现场药剂 PFS 投加量相同，现场脱色剂、PFS 与 PAM 根据现场实际运行投加，分别投加 100 ppm、600 ppm、2 ppm。得出小试实验数据，如表 3、图 3 所示。

Table 3. Field test data
表 3. 现场小试试验数据

指标 类别	COD (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	色度(倍)	浊度(NTU)
原水	175.4	12.4	238.0	327.3
神美药剂	48.5	6.0	24.0	38.4
现场药剂	78.3	9.5	85.0	98.6
神美去除率%	72.3	51.6	89.9	88.3
现场去除率%	55.4	23.4	64.3	69.9

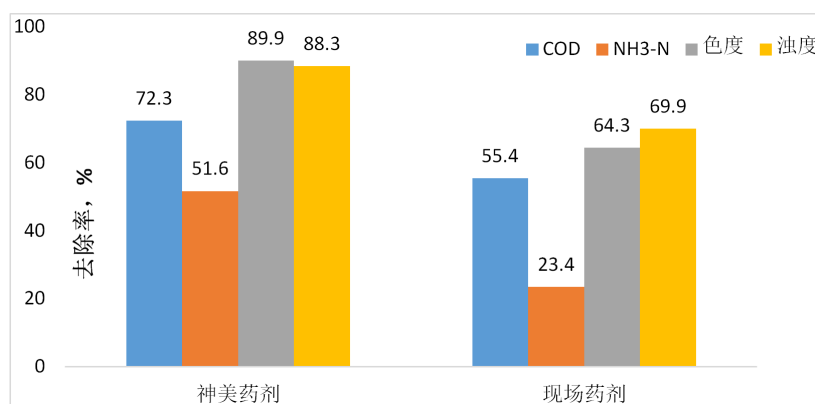


Figure 3. The removal rate of on-site small test indicators
图 3. 现场小试检测指标去除率

由图表可知：

- 1) SM 净水剂可以去除焦化废水中大部分难降解的有机物，COD 去除率高达 72%，现场药剂 COD 去除率为 55.4%。
- 2) SM 净水剂对焦化废水的色度、浊度、氨氮均具有较高的联合去除效果，综合使用效果优于现场投加传统药剂。
- 3) SM 净水剂可以替代现场投加药剂，并进行生产性试验。

5. 生产性试验数据分析

5.1. 生产性试验

实际运行中现场药剂投加量较大，为尽可能优化投加药剂成本，降低试验水厂的负担和出水超标风险。生产性试验分两个阶段：

第一阶段：2020 年 8 月 9 日至 2020 年 8 月 13 日，1 系列混凝池投加 SM 净水剂，投加量按照小试投加结果投加，投加 600 ppm，2 系列混凝池投加现场原有药剂，按照现场投加量投加，分别投加：脱色剂为 100 ppm，PFS 600 ppm，PAM 为 2 ppm，得出试验数据。如表 4 所示。

第二阶段：2020 年 8 月 14 日至 2020 年 8 月 20 日，根据第一阶段试验数据分析结果，第二阶段，降低 SM 净水剂投加量，投加量为 400 ppm (第一阶段试验分析计算出)，现场药剂投加量保持不变，得出试验数据。如表 5 所示。

Table 4. Data sheet of the first stage of production test
表 4. 生产性试验第一阶段数据表

项目指标	接触氧化池				混凝沉淀池第 1 系列				混凝沉淀池第 2 系列			
	COD _{Cr} mg/L	NH ₃ -N mg/L	色度 倍	浊度 NTU	COD mg/L	NH ₃ -N mg/L	色度 倍	浊度 NTU	COD mg/L	NH ₃ -N mg/L	色度 倍	浊度 NTU
2020.08.09	165.8	12.4	202.0	321.6	42.8	6.2	21.0	37.1	76.4	9.3	72.0	85.8
2020.08.10	168.2	13.3	228.0	311.4	43.6	6.6	22.0	35.4	79.5	10.1	81.0	83.9
2020.08.11	178.4	12.6	238.0	328.3	46.2	6.3	23.0	36.5	84.3	9.7	85.0	88.6
2020.08.12	188.6	12.0	212.0	301.8	48.4	6.0	20.0	34.2	89.2	9.1	74.0	81.3
2020.08.13	156.5	13.3	220.0	328.2	39.9	6.6	24.0	36.8	71.6	10.4	80.0	87.9

Table 5. Data sheet of the second stage of production test
表 5. 生产性试验第二阶段数据表

项目指标	接触氧化池				混凝沉淀池第 1 系列				混凝沉淀池第 2 系列			
	COD _{Cr} mg/L	NH ₃ -N mg/L	色度 倍	浊度 NTU	COD mg/L	NH ₃ -N mg/L	色度 倍	浊度 NTU	COD mg/L	NH ₃ -N mg/L	色度 倍	浊度 NTU
2020.08.14	148.7	13.0	214.0	347.4	58.5	9.9	71.0	89.4	71.3	10.1	76.0	94.6
2020.08.15	184.2	12.9	196.0	328.6	72.7	9.8	65.0	83.1	86.1	10.0	68.0	88.7
2020.08.16	172.7	11.9	209.0	332.8	67.1	9.0	69.0	84.5	82.7	9.2	74.0	89.4
2020.08.17	182.9	12.3	217.0	298.7	73.6	9.3	72.0	75.6	84.1	9.6	77.0	80.2
2020.08.18	166.1	13.1	226.0	309.5	64.4	9.7	75.0	78.4	77.9	10.2	80.0	84.2
2020.08.19	178.4	12.6	216.0	298.2	76.2	9.6	71.0	74.8	82.6	9.8	75.0	80.1
2020.08.20	181.6	11.8	229.0	307.5	70.6	8.9	76.0	78.2	86.7	9.2	81.0	82.6

5.2. 技术特性分析

整理表 4 与表 5 数据，得出神美新型焦化酚氰废水净水剂与现场药剂各项指标在深度处理阶段的去除率。如表 6，图 4~7 所示。

Table 6. Removal rate of each index of the first and second series of coagulation sedimentation tank
表 6. 混凝沉淀池第 1、2 系列各项指标去除率

项目	混凝沉淀池第 1 系列				混凝沉淀池第 2 系列			
	COD 去除率%	NH ₃ -N 去除率%	色度去除率%	浊度去除率%	COD 去除率%	NH ₃ -N 去除率%	色度去除率%	浊度去除率%
08.09	74.2	50.1	89.6	88.5	53.9	24.9	64.4	73.3
08.10	74.1	49.7	90.4	88.6	52.7	23.9	64.5	73.1
08.11	74.1	49.9	90.3	88.9	52.7	23.2	64.3	73.0
08.12	74.3	50.2	90.6	88.7	52.7	23.8	65.1	73.1
08.13	74.5	49.7	89.1	88.8	54.2	21.7	63.6	73.2
08.14	60.7	23.8	66.8	74.3	52.1	22.3	64.5	72.8
08.15	60.5	24.1	66.8	74.7	53.3	21.8	65.3	73.0
08.16	61.2	24.5	67.0	74.6	52.1	21.9	64.6	73.1

Continued

08.17	59.8	24.4	66.8	74.7	54.0	22.0	64.5	73.2
08.18	61.2	26.0	66.8	74.7	53.1	22.2	64.6	72.8
08.19	57.3	23.8	67.1	74.9	53.7	22.2	65.3	73.1
08.20	61.1	24.7	66.8	74.6	52.3	22.1	64.6	73.1

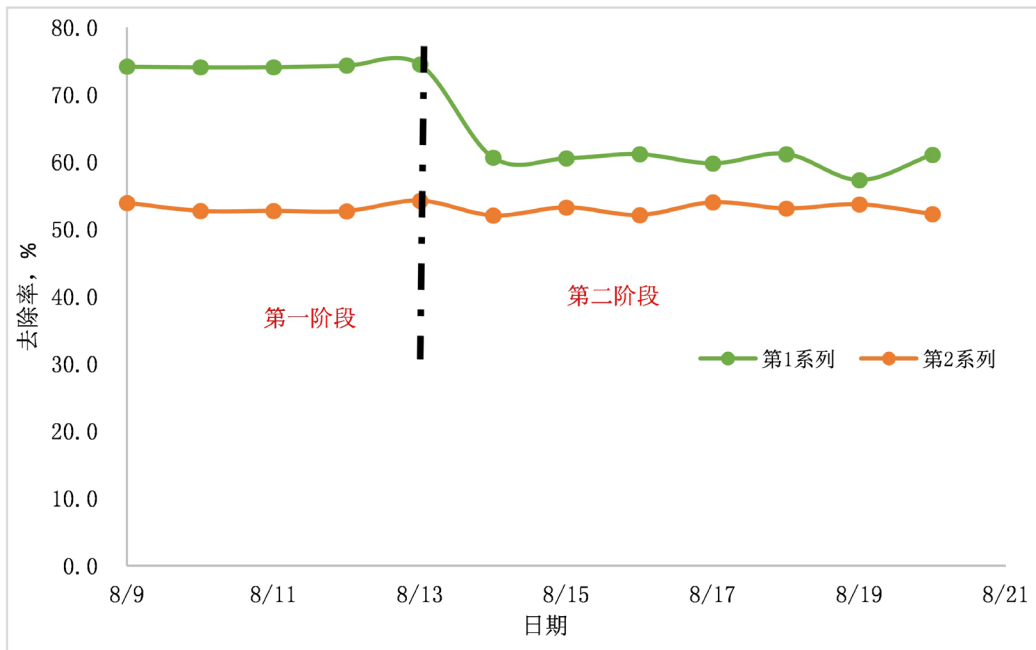


Figure 4. COD removal rate of the first and second series of coagulation sedimentation
图 4. 混凝沉淀第 1、2 系列 COD 去除率

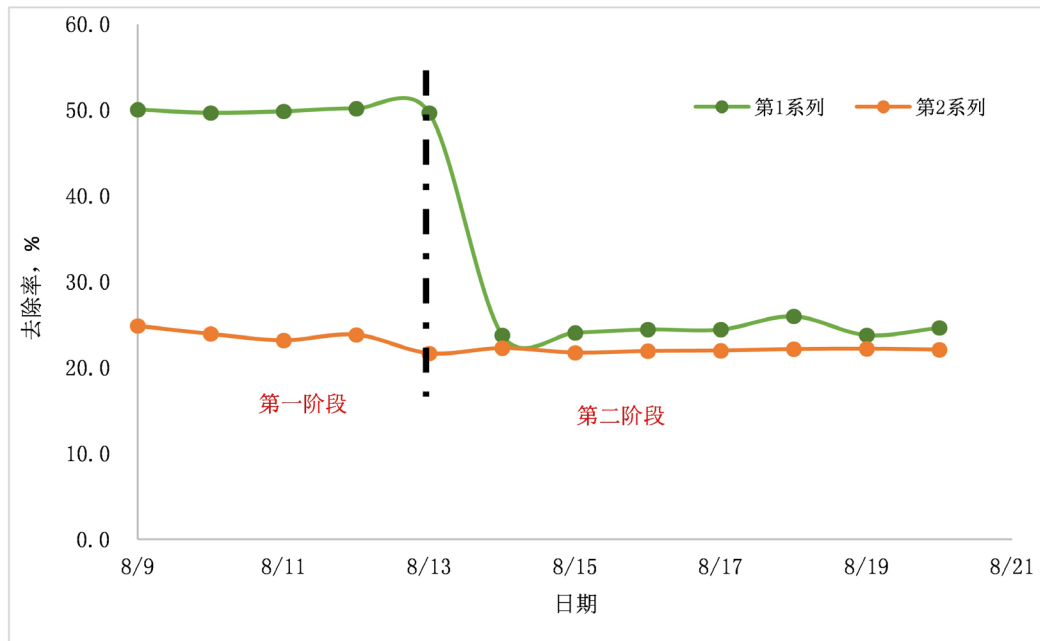


Figure 5. NH₃-N removal rate of the first and second series of coagulation sedimentation
图 5. 混凝沉淀第 1、2 系列 NH₃-N 去除率

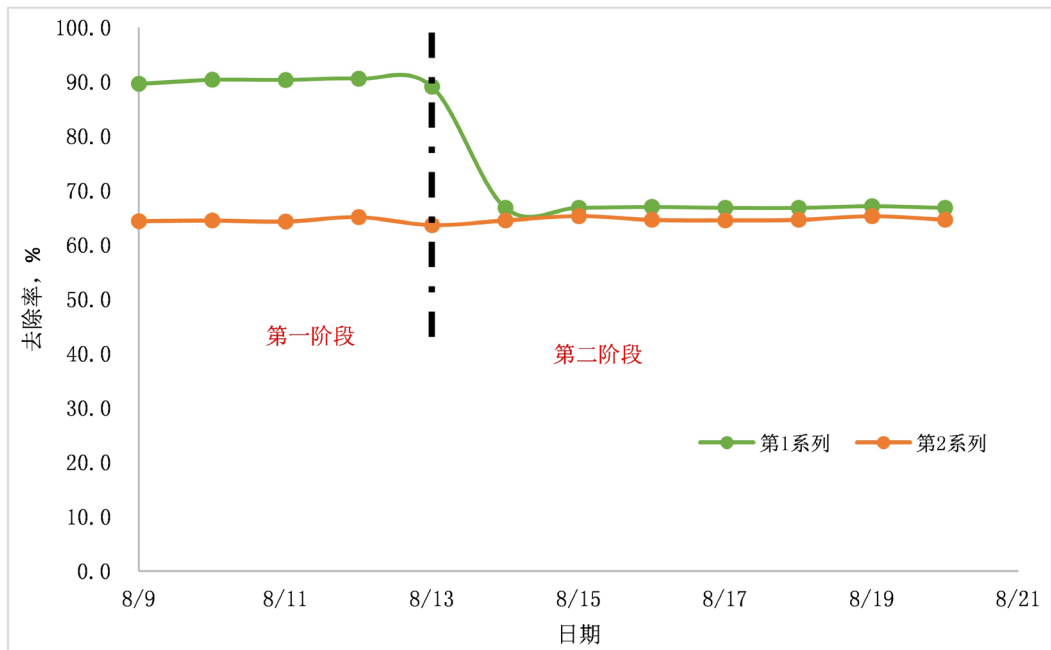


Figure 6. Color removal rate of the first and second series of coagulation sedimentation
图 6. 混凝沉淀第 1、2 系列色度去除率

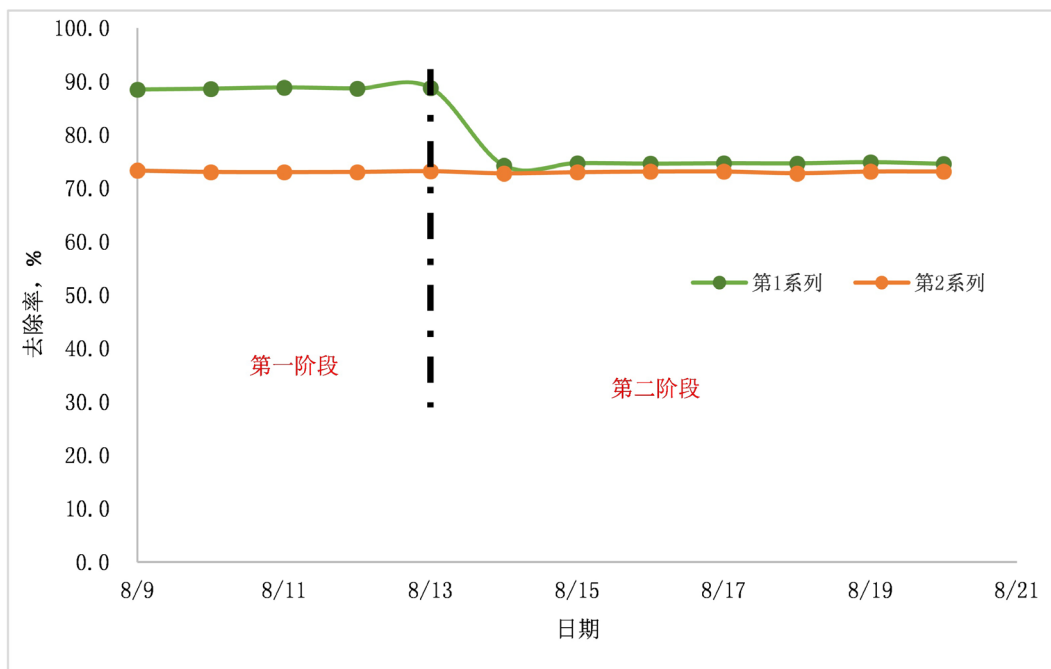


Figure 7. Turbidity Color removal rate of the first and second series of coagulation sedimentation
图 7. 混凝沉淀第 1、2 系列浊度去除率

试验小结：SM 净水剂强化深度处理技术可以使处理的焦化废水难降解的有机物大幅度降低，同时氨氮出水稳定在 10 mg/L 以下，达到《炼焦化学工业污染物排放标准》的排放要求；SM 净水剂对所处理的水的色度、浊度处理效果明显，在同等投加量下远优于传统混凝、絮凝剂；SM 净水剂对焦化废水深度处理技术抗冲击负荷能力强，出水水质稳定，相较于现场药剂没有出现超标现象。

6. 性价比分析

计算出去除 1 单位 COD 的药剂成本, 计算公式如下:

$$M = F/DN$$

其中, DN 为投加药剂对应 COD 去除量(gCOD/m³); M 为单位体积污水去除 1 单位 COD 的药剂成本(元/(gCOD)), F 为单位体积污水投加的药剂成本(元/m³)。

整理第二阶段试验数据, 得出混凝沉淀池第 1、2 系列 Δ COD。如表 7 所示。

Table 7. Δ COD data sheet of the first and second series of the first stage of the production test

表 7. 生产性试验第一阶段第 1、2 系列 Δ COD 数据表

时间项目指标	混凝沉淀池第 1 系列 Δ COD (mg/L)	混凝沉淀池第 2 系列 Δ COD (mg/L)
2020.08.14	90.2	77.4
2020.08.15	111.5	98.1
2020.08.16	105.6	90.0
2020.08.17	109.3	98.8
2020.08.18	101.7	88.2
2020.08.19	102.2	95.8
2020.08.20	111.0	94.9
均值	104.5	91.9

成本核算:

现场药剂: 脱色剂 12,000 元/吨, 投加量为 100 ppm; PFS 2000 元/吨, 投加量为 600 ppm; PAM 16,000 元/吨, 投加量为 2 ppm。对应的投加成本为 0.002432 元/L, 折算成吨水成本为 2.432 元/吨水。

SM 净水剂 5000 元/吨, 投加量为 400 ppm, 对应的投加成本为 0.002 元/L, 折算成吨水成本为 2 元/吨水;

M (现场药剂) = 0.002432 (元/L)/91.9 (mg/L) = 0.0265 (元/(gCOD));

M (SM 净水剂) = 0.002 (元/L)/104.5 (mg/L) = 0.0191 (元/(gCOD));

去除单位 COD 提升 = (0.0265 - 0.0191)/0.0191 = 38.7%。

7. 结论

1) 神美新型焦化酚氰废水净水剂的核心是新型复合混凝剂, 集成了混凝、吸附、络合等多种污染物降解作用, 对常用的混凝沉淀设施设备具有良好的兼容性, 不改变原有主体工艺, 不增加新的设备, 不增加现场的运行管理难度和工作量, 技改后见效快且效果稳定;

2) 神美新型焦化酚氰废水净水剂的焦化废水深度处理技术抗冲击负荷能力强, 出水水质能稳定达标;

3) 该技术对原有工艺设备改动小, 无基建改造成本无需添加大型构筑物和复杂设备;

4) 处理相同废水, 药剂投加量较传统混凝、絮凝剂(现场投加药剂)更低, 去除单位 COD 较现场药剂提升 38.7%, 操作管理简易, 投加药剂种类少, 显示出较高的推广应用价值。

参考文献

- [1] JIA, S. Y., HAN, H. J., HOU, B. L., *et al.* Advanced treatment of biologically pretreated coal gasification wastewater by a novel integration of three-dimensional catalytic electro-Fenton and membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 2015, 198: 918-921.

- [2] CHEN, H. L., YANG, G., FENG, Y. J., *et al.* Biodegradability enhancement of coking wastewater by-catalytic wet air oxidation-using aminated activated-carbon as catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 199(1): 45-51.
- [3] 汤敏. 焦化废水物化处理技术研究进展[J]. *广东化工*, 2016(6): 129-131.
TANG Min. Research progress of coking wastewater physical and chemical treatment technology. *Guangdong Chemical Industry*, 2016(6): 129-131. (in Chinese)
- [4] 环境保护部. GB16171-2012 炼焦化学工业污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
Ministry of Environmental Protection. GB16171-2012 pollutant emission standard for coking chemical industry. Beijing: China Environmental Science Press, 2012. (in Chinese)
- [5] 郭玲香, 胡明星, 郭世全. 新型阳离子聚合物治理煤泥水的应用研究[J]. *上海环境科学*, 1999(3): 127-129.
GUO Lingxiang, HU Mingxing, GUO Shiquan. Application research on the treatment of coal slurry water with new cationic polymers. *Shanghai Environmental Science*, 1999(3): 127-129. (in Chinese)
- [6] 毋光辉. 用聚合硫酸铁絮凝剂处理高浓度洗煤废水[J]. *环境保护*, 1992(2): 16-17.
WU Guanghui. Treating high-concentration coal washing wastewater with polymeric ferric sulfate flocculants. *Environmental Protection*, 1992(2): 16-17. (in Chinese)
- [7] 王萍, 刘裴文, 杜春文, 等. 复配絮凝剂 APSA 的研制与效果试验[J]. *水处理技术*, 1998(3): 179-182.
WANG Ping, LIU Peiwen, DU Chunwen, *et al.* Development and effect test of compound flocculant APSA. *Water Treatment Technology*, 1998(3): 179-182. (in Chinese)
- [8] 李少章, 高琳玉, 张志诚, 等. 絮凝剂性质对不同煤浆絮凝效果的影响[J]. *速煤技术*, 1996(6): 24-27.
LI Shaozhang, GAO Linyu, ZHANG Zhicheng, *et al.* The effect of flocculant properties on the flocculation effect of different coal slurry. *Speed Coal Technology*, 1996(6): 24-27. (in Chinese)
- [9] 谢广元, 施秀屏, 欧泽深, 等. 煤泥水处理中絮凝剂的正确选择和使用[J]. *选煤技术*, 1996(4): 33-36.
XIE Guangyuan, SHI Xiuping, OU Zeshen, *et al.* Correct selection and use of flocculants in the treatment of slime water. *Coal Preparation Technology*, 1996(4): 33-36. (in Chinese)
- [10] 马凯, 王国瑞, 周继柱, 等. 一种焦化酚氰废水净水剂及其制备方法与应用[P]. CN 111646534 A: 2020-09-11.
MA Kai, WANG Guorui, ZHOU Jizhu, *et al.* A water purifier for coking phenol cyanide wastewater and its preparation method and application. CN 111646534 A: 2020-09-11. (in Chinese)