

工业水处理

曾骏, 曹涵昱, 孙红波, 等. 工业废水 AAO 工艺尾水的磁混凝深度处理工艺的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 124–135.

ZENG J, CAO H Y, SUN H B, et al. Application of magnetic coagulation process in advanced treatment of industrial wastewater for AAO process tailwater[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 124–135.

工业废水 AAO 工艺尾水的磁混凝深度处理工艺的应用

曾 骏*, 曹涵昱, 孙红波, 王书蓉, 徐玥璘

(盐城高新水务有限公司, 江苏盐城 224000)

摘 要 【目的】 为了分析磁混凝相较于传统混凝在工业废水处理领域的优势与运用前景。【方法】 文章以盐城市国家高新技术开发区工业污水处理厂为试验平台, 工业园区废水经格栅、混合反应、初沉、水解酸化、厌氧-缺氧-好氧 (AAO) 及二沉处理后作为目标处理水, 再经过磁混凝实现污染物的深度去除。本试验在保障厂区正常生产的前提下, 依次停止投加磁性粉末颗粒、关闭磁回收循环并停止磁污泥回流。通过记录整个试验周期内不同运行工况下磁混凝澄清池进出水各项检测指标, 对比分析各指标及药耗量在操作前后的变化, 讨论磁性粉末颗粒对混凝工艺的影响。【结果】 依据不同试验条件、试验周期磁混凝澄清池进出水污染浓度变化可知, 磁混凝相较于传统混凝在额外消耗 12.5 kg/d 磁粉及 0.78 kW·h/kt 电能条件下, 能保障出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 类的基础, 并且总磷 (TP) 和悬浮物 (SS) 去除率分别提高了 7.36%、6%, 降低 16.67% 聚合硫酸铁 (PFS) 及 27.27% 阴离子型聚丙烯酰胺 (APAM) 的消耗, 降低 SS 浓度且磁粉回收率达 95.21%。【结论】 因此, 磁混凝在低浓度工业废水的深度处理领域比传统混凝除磷率更高、药耗更低且反应更迅速, 是水处理实现节能降耗、提质增效的有效途径。

关键词 磁混凝 磁粉 工业废水 深度处理 节能降耗

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)10-0124-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.014

Application of Magnetic Coagulation Process in Advanced Treatment of Industrial Wastewater for AAO Process Tailwater

ZENG Jun*, CAO Hanyu, SUN Hongbo, WANG Shurong, XU Yuelin

(Yancheng High-Tech Water Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

Abstract [Objective] In order to analyze the advantages and application prospects of magnetic coagulation compared with traditional coagulation in the field of industrial wastewater treatment. [Methods] In this paper, the industrial wastewater treatment plant of Yancheng National High-Tech Development Zone was used as the experimental platform. The wastewater from the industrial park was treated by grating, mixing reaction, primary sedimentation, hydrolytic acidification, anaerobic-anoxic-oxic (AAO) and secondary sedimentation as the target treated water, and then the deep removal of pollutants was achieved by magnetic coagulation. Conducted under the premise of ensuring normal plant operations, the experiment involved sequentially discontinuing the addition of magnetic powder particles, deactivating the magnetic recovery circulation, and halting the return of magnetic sludge. By recording various influent and effluent quality measured indicator dataset from the magnetic mixing clarifier across different operational phases throughout the entire test period, changes in these indices and chemical consumption before and after the procedures were compared, assessed the effects of magnetic powder particles on the coagulation process. [Results] According to different experimental conditions and changes in pollutant concentrations influent and effluent of the magnetic mixing clarifier during the experimental period, compared with conventional coagulation, magnetic coagulation can guarantee the effluent quality to meet the *Discharge Standard of Pollutants for*

[收稿日期] 2024-04-11

[通信作者] 曾骏 (1996—), 男, 主要从事污水厂污水处理工艺改良与水处理技术研究等工作, E-mail: 15735158955@163.com。

Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918—2002) on the basis of class A, with an additional consumption of 12.5 kg/d magnetic powder and 0.78 kW·h/kt electrical energy. The removal rate of total phosphorus (TP) and suspended solids (SS) could be increased by 7.36% and 6%, the consumption of polymerized ferric sulfate(PFS) (16.67%) and anionic polyacrylamide (APAM) (27.27%) could be reduced. The concentration of SS was reduced and the recovery of magnetic powder reached 95.21%. [**Conclusion**] Therefore, magnetic coagulation in the field of deep treatment of low concentration industrial wastewater has a higher phosphorus removal rate, lower chemical consumption and faster response than traditional coagulation, which is an effective way to achieve energy saving and consumption reduction, upgrading and efficiency improvement in water treatment.

Keywords magnetic coagulation magnetic powder industrial wastewater advanced treatment energy saving and consumption reduction

工业废水处理是水处理领域难点^[1-5]。混凝沉淀工艺因运行便捷、除污高效且技术成熟成为传统废水处理工艺中运用最广泛的工艺之一^[6-9]。近些年,在处理技术更迭、排污标准提高以及水务行业提

质增效等内外压力驱使下,改良型混凝沉淀工艺发展迅速^[10-14]。表1统计了部分国内外具有代表性的混凝沉淀法及其延伸工艺,各种工艺对应的应用领域及特点如下。

表 1 各类混凝沉淀工艺的应用领域与优缺点对比
Tab. 1 Application Areas, Advantages and Disadvantages of Coagulation and Sedimentation Processes

工艺名称	应用领域	优点	缺点	引用文献
混凝法	饮用水除磷	去除大部分 TP 和微生物有效磷	可溶性磷酸盐难去除	[15]
	淀粉废水预处理	有效去除 COD 和 SS	COD 和 SS 余量高	[8]
	可持续猪浆管理	SS 和 COD 去除效率高、运输成本低	-	[16]
	加药除磷	有效沉淀除磷	不适合小型工厂	[17]
混凝+二氧化氯	城市污水深度处理	有效去除总有机碳(TOC)、SS 和 TP	-	[6]
粉末活性炭+混凝	富营养化湖水除磷	改善沉淀、加强 COD、TP 去除	污泥产量增大且活性炭不可回收	[10]
静态混凝+导流沉淀+溢流污泥法	去除 TP	除磷率高、沉淀效果好、SS 去除快	过程复杂	[11]
快速砂滤+超滤强化混凝	城市污水除磷及其他微污染物	有效降低 TP 和 BOD ₅	无法有效去除卡马西平、磺胺甲恶唑和甲氧苄啶等药物	[13]
混凝+溶解气浮	降解污水厂常见污染物和抗生素抗性基因(ARGs)	有效去除 TP、SS 和 ARGs	-	[14]
混凝+砂滤	去除饮用水处理厂微塑料	能有效去除较大尺寸微塑料、纤维微塑料	对聚丙烯酰胺(PAM)的去除有负面影响、出水中 PAM 的浓度高	[12]

混凝沉淀法及其改良工艺在处理各领域污水中应用广泛且效果显著。但药耗量大、产泥量大、不稳定^[9],处理浓度范围小、非选择性处理性能差、空间需求量大、过程复杂且改良技术存在缺陷等问题仍然存在。磁强化混凝沉淀技术(简称“磁混凝”)因高效迅速,周期短且占地面积小被广泛运用于生活和工业废水处理^[18-21]。其过程按磁混凝机理可分4个阶段:投加阶段,通过投加磁性粉末颗粒(简称“磁粉”)增大体系密度,提高颗粒物有效碰撞概率^[22];促凝阶段,以磁粉为核心形成高密度、重力梯度优势磁性絮体,通常为多个磁粉均匀分布于絮体内形成以磁粉团为核心的聚集体^[23];促沉阶段,磁

粉增大絮体重力加速絮体沉降^[24];分离阶段,磁粉在磁场作用下能够加速絮体沉淀并实现磁泥分离^[25]。通过污泥回流再沉淀与回收投入再循环使磁粉持续维持反应体系高颗粒物密度实现颗粒物快速成核、吸附、絮凝,进而加速沉淀,最终在有限空间内实现目标污染物快速去除并降低药耗^[25-26]。磁混凝及其耦合工艺在国内运用案例具体效果与适应性如表2所示。

上述研究表明,磁混凝较传统混凝优势明显,但该工艺深度处理低浓度工业废水还鲜有研究。为弥补该领域空白,本研究依托盐城市国家高新技术开发区工业污水处理厂为试验平台,以厂区磁混澄清

表 2 国内各类磁混凝沉淀工艺的应用领域与特点对比
Tab. 2 Application Fields and Characteristics of Magnetic Coagulation at Home

工艺名称	应用领域	优点	参考文献
磁混凝	煤矿井水处理	出水水质均优于拟采用限值	[27]
	污水处理工艺提标	处理效果好、抗冲击性强、占地面积小、实现提标增效且社会效益显著	[7]
	高磷废水处理	能去除难降解溶解性 COD	[28]
	化工废水预处理	解决煤气化废水 SS 混凝沉淀困难	[29]
缺氧/好氧交替式矩形环流生物反应器 (A/RPIR)+磁混凝	分散式污水处理工程	占地面积小、投资省、造速快、效果稳定	[30]
磁混凝+紫外(UV)/臭氧(O ₃)	诺氟沙星制药废水处理	能有效去除 COD、SS、色度	[31]
改良厌氧-缺氧-好氧(AAO)+磁混凝	污水处理厂提标改造	投资省、运行稳定且调配灵活	[32]
改良 AAO+磁混凝+臭氧+活性炭	城镇污水处理	结构紧凑、效果稳定、方便维护、费用低	[33]
两级 AAO+磁混凝	农村生活污水处理	安装简单、管理方便、TP 和 SS 去除效果显著	[34]

池及关联设备为基础,试验研究磁混凝处理低浓度工业废水的实效,对比磁粉投加前后能耗变化,分析磁混凝处理低浓度工业废水的性能与局限,为其将来市场推广提供经验和借鉴。

1 工艺流程与设备方法

1.1 工艺流程

盐城市国家高新技术产业开发区工业废水来源为盐城市盐都区包含饲料、食品、包装、余热、机械、微电子、新能源、汽车、智能装备、电器等领域共 69 家企业,各企业废水经预处理后排入污水管道流至高新区工业污水处理厂,经前处理流向磁混澄清池进行深度处理。作为 AAO 生反阶段后、加氯消毒阶段前的深度处理工艺,磁混澄清池结构及工艺流程如图 1 所示,该池设备主要包含 4 个反应池、4 台搅拌机、1 个斜管沉淀池、1 台刮泥机、1 个储泥池、1 台污泥

回流泵、1 台磁粉回收泵、1 台高速剪切机和 1 台磁分离器。其反应过程及原理是将聚合硫酸铁(PFS)投加在反应池前端,与进水同时经过 1 号、2 号反应池后快速搅拌混匀,体系中颗粒物在 3 号反应池与磁粉混合加速絮体形成,再于 4 号池与阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)发生吸附、架桥形成沉淀进入斜管沉淀池,最后经过锯齿形挡板滤池实现泥水分离。池底部分沉淀污泥通过污泥回流泵和污泥回流管道回流至 3 号反应池,另一部分污泥则通过磁粉回收泵和磁粉回收管道回流至高速剪切机,之后在磁分离器的作用下,回收磁粉并将磁粉再次投入 3 号反应池循环使用,而经过筛选后磁粉含量极少的剩余污泥则排入储泥池,由排泥泵泵向污泥浓缩池。

依据《盐城市人民政府关于印发盐城市水污染

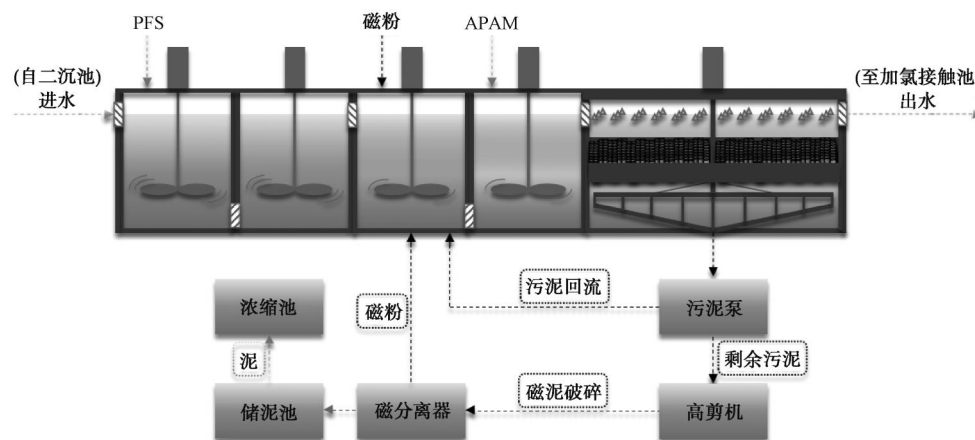


图 1 磁混澄清池结构及流程

Fig. 1 Structure and Process Flow of Magnetic Mixing Clarifier

防治工作方案的通知》(2016 年版),全面推行工业集聚区企业废水和水污染物纳管总量双控制度,对高新技术产业开发区重点企业工业废水进行“分类收集、分质处理、一企一管”的方式,并且集聚区内工业废水必须经预处理达到集中处理要求后,方可进入污水集中处理设施^[34]。因为预处理过程已去除大部分有机物和包含重金属等有害物质在内的其他无机物,所以本试验所在污水处理厂仅要求处理并检测以下常规指标。统计近 2 年水厂进水仪表各项指标监测数据日均范围如表 3 所示。

如表 3 所示,进水各污染项目含量低且波动范围大。经过粗格栅过滤直到二沉池沉淀后,废水变为磁混澄清池目标处理水,该池各项进水指标及设计出水指标如表 4 所示,设定指标均符合《城镇污

水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放标准。

表 3 2021 年 1 月—2022 年 9 月污水厂进水各项指标监测数据

Tab. 3 Monitoring Datas of Influent Indices of WWTP from January 2021 to September 2022

指标	进水仪表数据
COD/(mg·L ⁻¹)	58~177
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	15.2~46.2
TP/(mg·L ⁻¹)	0.34~3.40
氨氮/(mg·L ⁻¹)	2.87~26.40
TN/(mg·L ⁻¹)	7.84~33.50
SS/(mg·L ⁻¹)	16~134
pH 值	6.45~8.19

表 4 AAO 生反池出水浓度范围及磁混澄清池设计出水指标(单位:mg/L)

Tab. 4 Effluent Concentration Range at AAO Effluent and Design Effluent Indices of Magnetic Mixing Tank(Unit: mg/L)

项目	COD	TP	TN	SS
AAO 生反池后端出水	12~28	1.26~1.77	4.62~7.64	6~15
磁混澄清池设计出水	<40	<0.40	<9.00	<9

废水经 AAO 生反池处理后,COD<50 mg/L、TN<15 mg/L 均达排放标准,而 TP<0.5 mg/L、SS<10 mg/L 未达标。因此,本试验主要分析磁混澄清池去除 AAO 后端低浓度废水中 TP、SS 的实际效果以及该工艺对 COD、TN 的影响。

1.2 药剂设备

盐城市国家高新技术开发区工业污水处理厂磁混澄清池——东池(满负荷处理能力为 40 000 m³/d)、二沉池出水、PFS 溶液、磁粉(主要成分为铁单质)、APAM、搅拌机、污泥回流泵、磁粉回收泵、高速剪切机、磁分离器、管道阀门等设施以及国标法检测 COD、TP、TN、SS 指标所需的各类药剂、仪器和设备。

1.3 试验方法

由于本试验是基于现状运行的污水处理厂来研究磁混凝在污水处理厂实际运行中的提质增效性能,因此必须保障水厂出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准进行试验,本试验具有实际运用的代表性。试验共分为 4 个周期,第 1 周期为 14 d,其余每个周期均为 7 d。每日的 7:00、15:00、23:00 从磁混澄清池进、出水口取样,COD 采用《水质 化学需氧量的测

定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)检测 15:00 的瞬时样获得,TP 采用《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)检测混合样获得,TN 采用《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)检测混合样获得,SS 采用《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901—1989)检测混合样获得。第 1 周期正常运行、第 2 周期停止投加磁粉、第 3 周期停止磁回收装置、第 4 周期停止污泥回流系统,检测 4 个阶段磁混澄清池出水各项指标及 PFS 投加量的变化,同时比较磁粉投加前后各 3 个月 APAM 消耗。由于污泥回流管道污泥与磁粉回收泵管道污泥均来自斜管沉淀池,因此磁粉回收率(R)通过检测通向集泥井管道内单位体积混合污泥中磁粉含量和污泥回流管道内单位体积混合污泥中磁粉含量进行计算,每天消耗 12.5 kg 磁粉的情况下取出污泥,之后用离心烘干磁选回收法快速获得混合液中磁粉并计算其回收率,计算如式(1)。

$$R = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (1)$$

其中: R ——磁粉回收率;

C_1 ——污泥回流管道内单位体积混合污

泥磁粉质量浓度, g/L;

C_2 ——通向集泥井管道内单位体积混合污泥磁粉质量浓度, g/L。

2 试验结果与讨论

2.1 TP 质量浓度变化

图 2 为磁混凝澄清池正常运行时 4 个周期进、出水 TP 日均质量浓度, 进水和出水质量浓度较低为 1.26~1.77 mg/L 和 0.17~0.45 mg/L, 4 个周期进水 TP 质量浓度均值为 1.45、1.67、1.58、1.58 mg/L, 出水 TP 质量浓度均值为 0.26、0.30、0.24、

0.26 mg/L, 4 个周期进、出水 TP 质量浓度均值变化分别为 1.19、1.37、1.34、1.32 mg/L。因第 2 周期磁粉停止投加导致出水 TP 陡然增高, 随即增加 PFS 用量加快除磷, 保障水质达标排放, 这是磁粉停止投加和进水 TP 上升协同作用下的结果。图 3 中投加磁粉导致 TP 去除率升高。另外, 结合第 4 周期进、出水 TP 浓度、PFS 药耗及试验条件分析, 停止投加磁粉、停止回流无法维持相对低 PFS 药耗条件下保证出水水质, 说明磁粉和污泥回流都能强化混凝, 磁粉对体系 TP 去除率具体增效如图 3 所示。

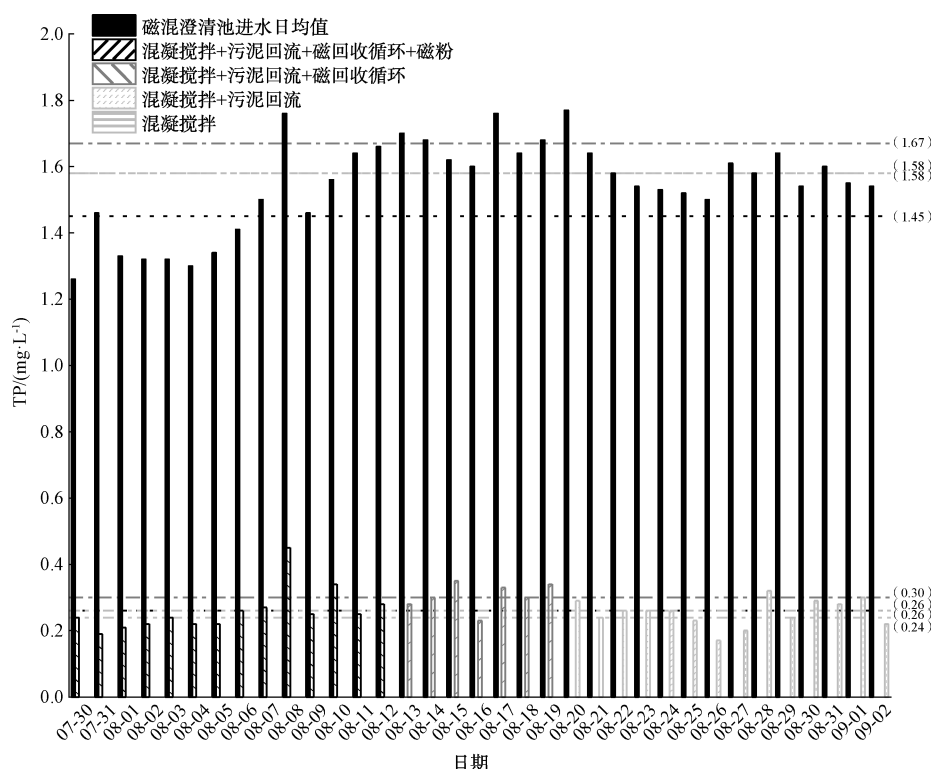


图 2 不同运行条件下磁混凝澄清池进出水 TP 浓度日均值

Fig. 2 Daily Average Values of TP Concentration in Influent and Effluent of Magnetic Mixing Clarifier under Different Operation Conditions

2.2 PFS 去除 TP 的效率变化

图 3 表示每消耗 1 kg PFS 去除 TP 的日均值, 4 个试验周期的 PFS 消耗均值分别为 19.25、17.93、17.63、14.85 g/kg, 比较第 1、2 周期, 消耗 12.5 kg/d 磁粉的磁混凝去除 TP 效果比混凝高 1.32 g/kg, 表明磁粉促进 PFS 对 TP 的除去。第 3 周期关闭磁循环装置 TP 去除率比第 2 周期略低, 说明磁循环亦有利于 TP 去除, 第 4 周期消耗单位质量 PFS 的 TP 去除效果明显低于其他周期, 表明关闭污泥回流对 PFS 除磷不利。试验 4 个周期条件变化使体系内磁

粉含量直接或间接发生改变, 证实磁混凝较于混凝对去除 TP 具有促进作用。

2.3 SS 质量浓度变化

由图 4 可知, 4 个周期进水 SS 质量浓度均值为 9.36、12.29、12.43、10.14 mg/L, 出水 SS 质量浓度均值为 3.64、5.57、5.57、6.86 mg/L, 各周期平均 SS 去除质量浓度为 5.72、6.72、6.86、3.28 mg/L, 去除率分别为 61.11%、54.68%、55.19%、32.35%, 第 1 周期投加磁粉时 SS 的去除率是第 2 周期不投加磁粉的 1.12 倍, 效率低于磁混凝处理高浓度生活废

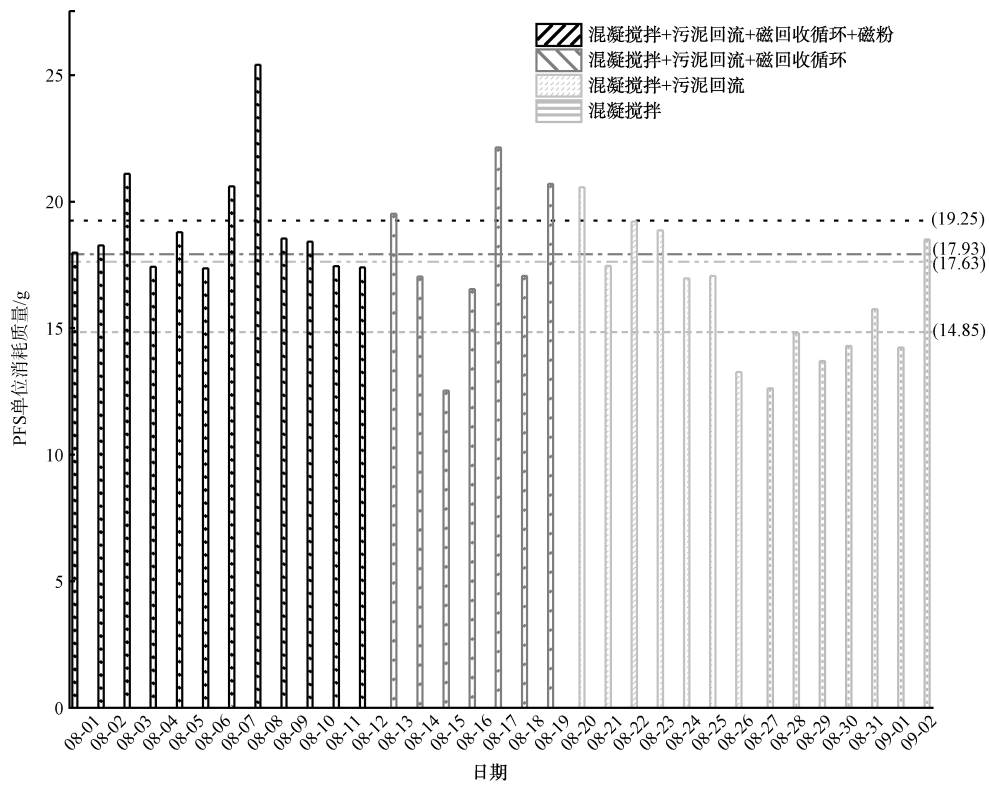


图 3 不同运行条件下磁混澄清池单位消耗质量 PFS 所能去除 TP 量的日均值

Fig. 3 Daily Average Values of TP Removal per Unit Mass of PFS Consumed by Magnetic Mixing Clarifiers under Different Operation Conditions

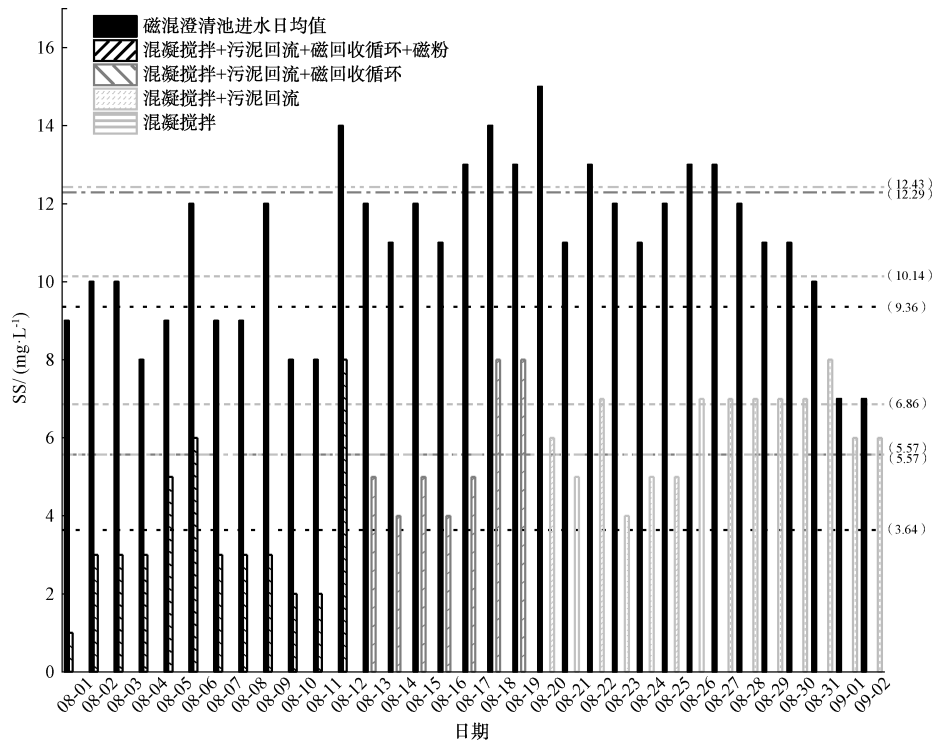


图 4 不同运行条件下磁混澄清池进、出水 SS 质量浓度日均值

Fig. 4 Daily Average Values of SS Mass Concentration in Influent and Effluent of Magnetic Mixing Clarifier under Different Operation Conditions

水^[22],第2、3周期变化较小。第3周期SS去除率是第4周期的1.71倍,可见污泥回流是加速SS沉淀去除的重要条件。磁混凝设备于5月份投产,结合表5分析2月—4月(混凝)与5月—7月(磁混凝)进水和出水的SS月均质量浓度,磁粉投加前、

后SS月均去除率分别为93.33%、93.91%,说明磁粉投加后SS去除率有所升高。污水厂在实际生产过程中出于节能降耗考虑时刻对混凝剂投加量进行调整,以确保出水达标条件下降低成本,因此SS去除率变化较小。

表5 2022年2月—7月污水厂进、出水SS月均质量浓度及去除率

Tab. 5 Monthly Average SS Mass Concentration in Influent and Effluent and Removal Rate from February to July 2022

项目	磁粉投加前			磁粉投加后		
	2月	3月	4月	5月	6月	7月
进水SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	89	97	99	96	103	97
出水SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	6	6	7	5	6	7
去除率	93.26%	93.81%	92.93%	94.79%	94.17%	92.78%

2.4 TN 浓度变化

由图5可知,各周期磁混澄清池进水TN质量浓度均值为5.72、6.20、5.82、6.95 mg/L ,出水TN平均质量浓度分别为5.57、6.04、5.67、6.65 mg/L ,各周期进出水TN平均质量浓度变化分别为0.15、0.16、0.15、0.30 mg/L ,前3周期TN质量浓度均值

变化基本持平,说明投加磁粉不影响TN去除。而第4周期TN去除质量浓度是第3周期的2倍,说明关闭污泥回流有利于去除TN,可能是该过程使已沉淀的溶解性氮通过机械搅动再次释放,具体原因需要跟进试验论证。

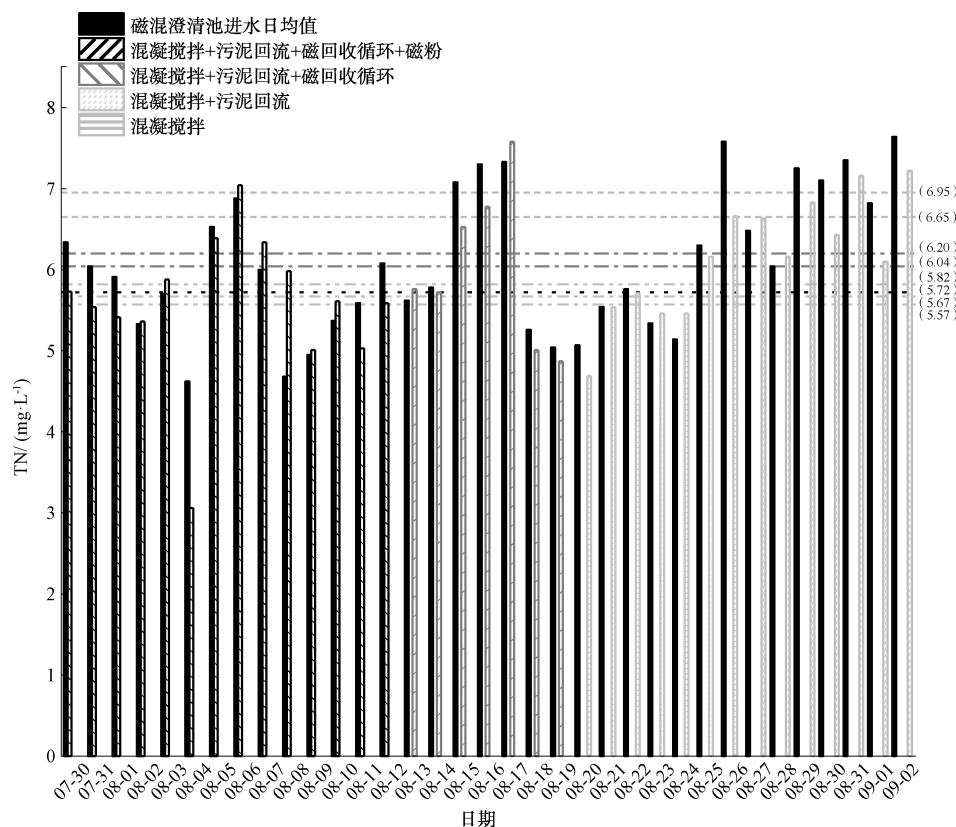


图5 不同运行条件下磁混澄清池进、出水TN质量浓度日均值

Fig. 5 Daily Average Values of TN Mass Concentration in Influent and Effluent of Magnetic Mixing Clarifier under Different Operation Conditions

2.5 COD 质量浓度变化与磁粉回收率

图 6 为不同周期磁混澄清池进出水 COD 质量浓度变化,4 个周期进水 COD 质量浓度均值为 19.07、20.43、18.14、19.00 mg/L,出水 COD 质量浓度均值分别为 15.64、14.57、13.57、14.43 mg/L,各阶段 COD 的去除质量浓度分别为 3.43、5.86、4.57、4.57 mg/L,去除率分别为 17.99%、28.68%、25.19%、24.05%,第 2 周期 COD 去除率是第 1 周期的 1.59 倍,第 3、4 周期关闭磁循环与污泥回流后

COD 去除率相较于第 2 周期有所下降,但明显高于第 1、2 周期,说明投加磁粉不利于 COD 去除。为研究磁粉对 COD 的影响,开展小试验证;取污水厂 8 g 磁粉溶解到 1 L 磁混澄清池进水水样中,用磁力搅拌器搅拌 3.5 h 后取上清液检测,反应前后 COD 变化如表 6 所示。投加磁粉后水样 COD 质量浓度均值从 19.0 mg/L 上升至 26.5 mg/L。可见磁粉会向水中引入微量可溶性还原物质,但能保证出水达标排放。

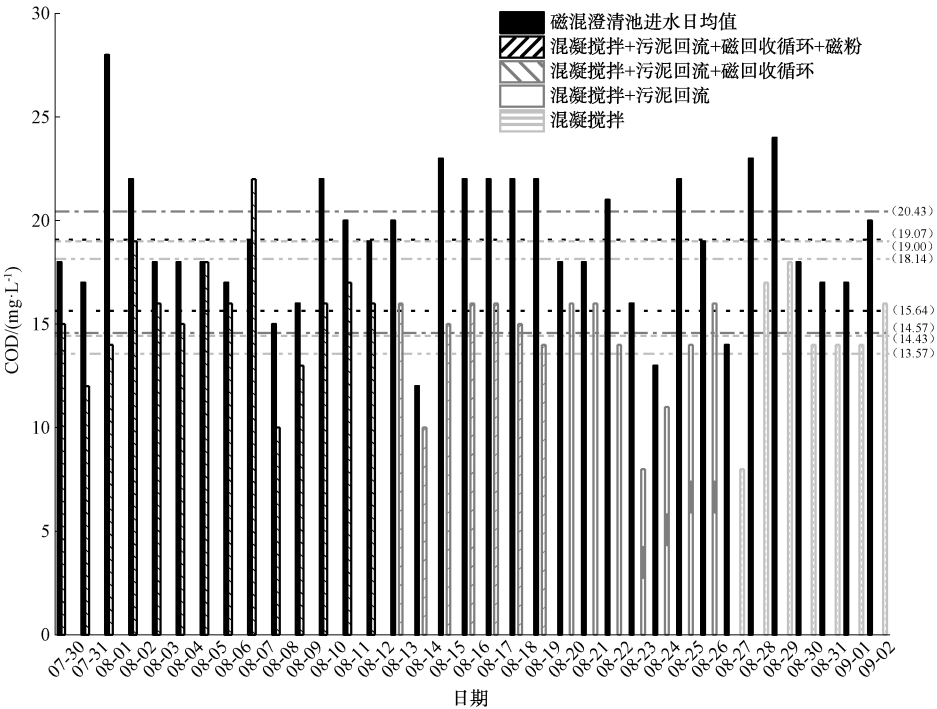


图 6 不同运行条件下磁混澄清池进、出水 COD 质量浓度日均值
Fig. 6 Daily Average Values of COD Mass Concentrations in Influent and Effluent of Magnetic Mixing Clarifier under Different Operation Conditions

表 6 磁粉对磁混澄清池进水 COD 的影响
Tab. 6 Effect of Magnetic Powder on COD in Influent of Magnetic Mixing Clarifier

时间/h	进水投加磁粉 COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	进水不投加磁粉 COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
0	19.0	18.5
1.75	21.5	16.5
3.50	26.5	17.0

在第 1 周期内,随机选取某天 3 个时间段泥样检测磁粉含量计算回收率,样品经离心、烘干、磁选回收、称量后得到进、排泥管中磁粉浓度数据如表 7 所示,磁粉日平均回收率为 95.21%。

表 7 磁分离器进、出泥管磁粉质量浓度及回收率
Tab. 7 Magnetic Powder Mass Concentration and Recovery Rate of Magnetic Separator in Inlet and Outlet Sludge Pipes

取样时间	$C_1/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$C_2/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	回收率
8:00	0.585	0.025	95.73%
16:00	0.770	0.040	94.81%
24:00	0.715	0.035	95.10%

2.6 PFS 日均消耗量变化

由图 7 可知,4 个周期 PFS 日均消耗量呈上升趋势,第 1~4 周期 PFS 消耗速度为 0.065、0.078、0.077、0.093 kg/d。第 1 周期 PFS 消耗量较第 2 周期减少 16.67%,说明投加磁粉有利于降低 PFS

的消耗,节省药剂成本。第4周期 PFS 用量明显高于第3周期,结合图2进水 TP 浓度及图3单位质量 PFS 消耗下达到的 TP 去除率分析,开启污泥回流也利于节省 PFS 消耗,与图2中污泥回流提

升 PFS 利用率的分析一致。根据磁粉、PFS 市场价及二者消耗量分析,盐城高新污水处理厂在该处理规模投加磁粉能节省 PFS 药剂费用为 11 703 元/a。

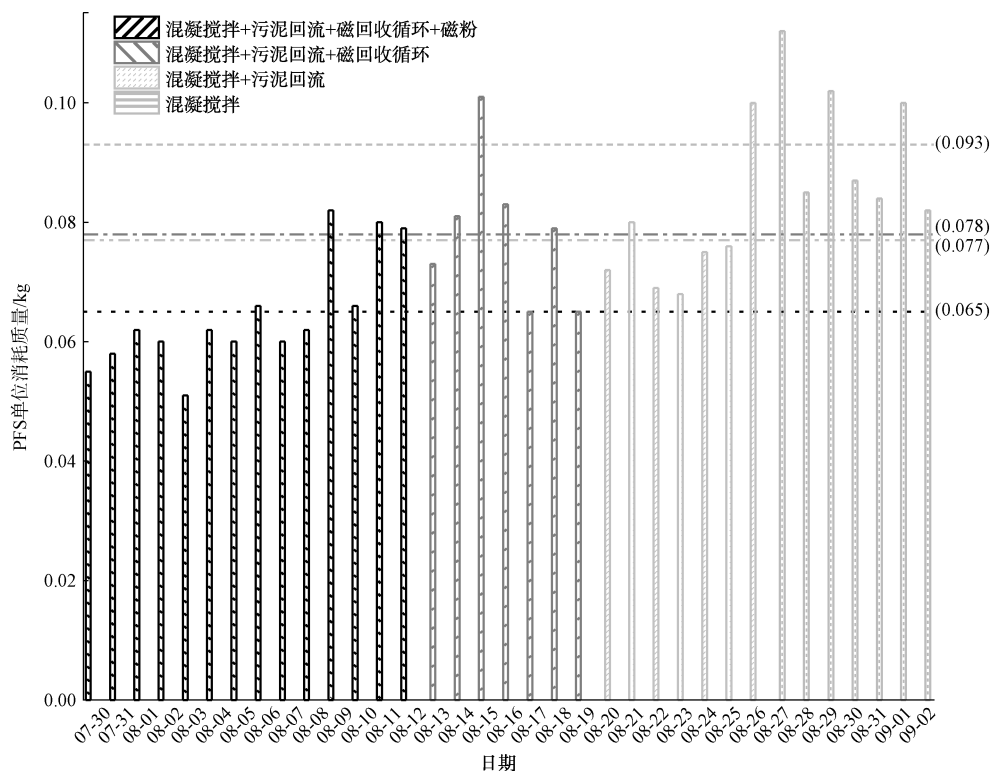


图7 不同周期的 PFS 日均消耗量变化

Fig. 7 Variation of Average Daily Consumption of PFS in Different Cycles

2.7 APAM 月均消耗量与能耗成本对比

由图8可知,2月—4月与5月—7月数据为磁粉投加前、后磁混澄清池处理每千t废水 APAM 月均消耗量。比较前3月月均消耗为 0.55 kg/kt 与后3月月均消耗为 0.40 kg/kt 数据,投加磁粉减少了 27.27% APAM 药耗。依据盐城高新污水处理厂 APAM 年度用量预估及市场价格推导,理想状态下投加磁粉能节省 APAM

药剂费 4 752 元/a。

磁粉投加前后6个月磁混澄清池电耗对比如表8所示。依据盐城市用电收费标准,税前电价为 0.67 元/(kW·h),投加磁粉条件下(5月—7月)的平均电耗为 46.50 元/kt,较磁粉投加之前(2月—4月)的平均电耗的 44.60 元/kt 增长了 4.3%,按每天处理水量 10 000 t 计,则运行磁强化系统后的年均电耗成本将会增长 6 935 元。

表8 2月—7月磁粉投加前后磁混澄清池电耗对比

Tab. 8 Comparison of Electricity Consumption before and after Magnetic Powder Dosing from February to July

项目	磁粉投加前			磁粉投加后		
	2月	3月	4月	5月	6月	7月
电耗/(kW·h·月 ⁻¹)	6 024	6 080	6 072	6 960	6 352	7 040
单耗/(kW·h·kt ⁻¹)	25.57	19.13	21.86	24.93	22.97	21.50
平均电耗/(元·kt ⁻¹)		44.60			46.50	

混凝工艺与磁混凝工艺总体运营成本如表9所示。磁混澄清池(东池)在目前运行背景下,实际处

理规模只有总设计规模的 1/8,远低于设计负荷,较传统混凝工艺能够节省成本 8 474 元/a。因此,未

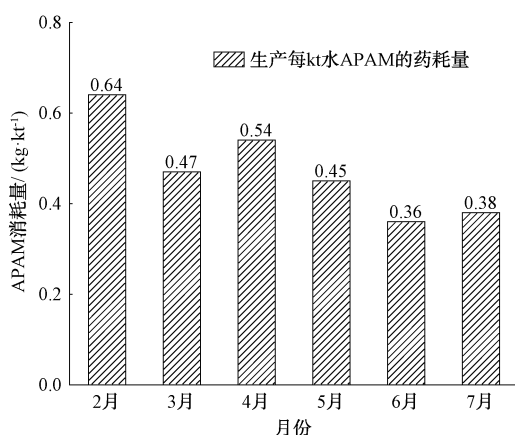


图8 2月—7月磁混澄清池单位排水体积 APAM 消耗量月均值

Fig. 8 Monthly Average Values of APAM Consumption per Unit Discharge Capacity in Magnetic Mixing Clarifiers from February to July

来随着实际处理水量逐渐增加并趋于设计规模,磁混凝工艺预计能够节省 67 792 元/a 的成本。另外,随着盐城市各区域污水处理再分配的开展引起进水污染物浓度升高及设备维养条件改善,降本增效将更加显著。

表9 本试验平台传统混凝工艺与磁混凝工艺的运营总成本对比

Tab. 9 Comparison of Overall Operation Costs between Traditional Coagulation Process and Magnetic Coagulation Process in Experimental Platform

项目	传统混凝工艺/ (元·a ⁻¹)	磁混凝工艺/ (元·a ⁻¹)
PFS 药耗	75 094	63 391
磁粉(铁)消耗	0	547
APAM 药耗	17 465	12 702
电耗	162 790	169 725
维修成本	1 500	2 010
运营总成本	256 849	248 375

2.8 磁混凝优于传统混凝的原因

上述研究表明,磁粉能在低进水浓度增强 TP、SS 去除效果,磁混凝 TP、SS 去除率分别高于传统混凝 7.36%、6%,这是因为磁粉能加快颗粒物碰撞、加速絮体形成、加快沉淀,进而加速 TP、SS 去除。另外,整个过程磁粉、电耗、维修增加的成本低于 PFS、APAM 减少的成本,且不影响出水 TN、COD 达标,因此磁混凝优于传统混凝。

3 结论

综上所述,磁粉能促进混凝反应,在低进水浓度且水厂运行规模远不及设计的局限下,磁混凝能耗更低。由此推断,磁混凝的优势随着处理规模、浓度增大更显著。可见该工艺能够实现降本增效。处理浓度范围广、处理效率高使磁混凝可作为传统工业废水处理工艺的良好替代。此外,AAO 后端耦合磁混凝深度处理工艺既能发挥二者的协同优势又能避免除磷剂对活性污泥系统的影响,为磁混凝结合活性污泥法处理低浓度工业废水提供可靠借鉴。

4 现状与展望

1) 水处理行业正处于技术更迭时期,随着磁混凝研究的深入与该工艺在市场普及,其优势可能被发挥到各行业废水或原水处理过程。因此,磁混凝工艺可能是未来水处理行业的核心工艺之一。

2) 磁混凝工艺对低浓度工业废水处理体系中的 COD 的影响是消极的,这与以往该工艺处理高浓度废水时的结论相反,且磁粉回收循环系统存在价格昂贵、电耗高、回收再投入的磁粉不易扩散以及装置本身存在的结构缺陷等问题,总之,磁混凝需要继续深入研究。

3) 可以预见,磁混凝在未来的运用中应当注意设备规格应与水厂实际规模相匹配,使用高纯度、大比表面积铁粉或四氧化三铁是磁混凝处理低浓度工业废水降本增效的有效方法。因此,高效、低 COD 扰动的磁粉会是未来磁混凝改良和应用的另一个方向。此外,为了更科学地体现磁粉、除磷剂对污染物的去除能力,建议将来延长试验周期来削弱进水污染物浓度波动的影响,用去除单位质量污染物所消耗磁粉与除磷剂的量去分析能耗变化。

参考文献

- [1] AN Y C, GAO X X, JIANG W L, et al. A critical review on graphene oxide membrane for industrial wastewater treatment[J]. Environmental Research, 2023, 223: 115409. DOI: 10.1016/j.envres. 2023. 115409.
- [2] ADARSH S, ASHISH S, DUDUKU S, et al. Advancements of sequencing batch reactor for industrial wastewater treatment: Major focus on modifications, critical operational parameters, and future perspectives[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 317: 115305. DOI:10.1016/j.jenvman. 2022. 115305.
- [3] SATHINATHAN P, PARAB H M, YUSOFF R, et al. Photobioreactor design and parameters essential for algal

- cultivation using industrial wastewater: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113096. DOI: 10.1016/j.rser.2022.113096.
- [4] 杨俊杰, 刘瑞浩, 杨子彦, 等. 工业废水水质综合评价研究——基于理化指标和生物毒性分析[J]. *环境保护科学*, 2022, 48(3): 76–80.
- YANG J J, LIU R H, YANG Z Y, et al. Research on comprehensive evaluation of industrial wastewater quality —— Based on physicochemical indicators and biological toxicity analysis[J]. *Environmental Protection Science*, 2024, 48(3): 76–80.
- [5] 刘俊逸, 黄青, 李杰, 等. 印染工业废水处理技术的研究进展[J]. *水处理技术*, 2021, 47(3): 1–6.
- LIU J Y, HUANG Q, LI J, et al. Research progress on the treatment technologies of industrial printing and dyeing wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(3): 1–6.
- [6] CHENG L H, HE A H, BI X J, et al. Advanced treatment of municipal wastewater effluent by coagulation/sedimentation and chlorine dioxide disinfection [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 71/78: 2792–2796. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.2792.
- [7] 庄建成. 磁混凝沉淀技术在污水处理工艺提标中的应用[J]. *河南科技*, 2021, 40(23): 143–145.
- ZHUANG J C. Application of magnetic coagulation sedimentation technology in standard raising of sewage treatment process[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(23): 143–145.
- [8] TIAN X, SHI Y X, LIN G L, et al. Study on environmental materials with treatment of sweet potato starch wastewater by coagulation precipitation method [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 703: 33–36. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.703.33.
- [9] 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 J X, LIU J, HUANG X. Research progress of magnetic coagulation technology in water treatment [J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2018, 11(10): 40–44.
- [10] CHO K C, LEE M H, PARK J H, et al. A study on removal of dissolved organic matter and phosphorus in eutrophic lake by coagulation process using powdered activated carbon[J]. *Journal of Wetlands Research*, 2012, 14(4): 629–635.
- [11] GUO H, OH S, CHA S M, et al. Advanced total phosphorus removal approach: System design and combined sewer overflows (CSOs) sludge application [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51 (19/20/21): 4072–4080. DOI: 10.1080/19443994.2013.781103.
- [12] WANG Z, LIN T, CHEN W. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP)[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 700: 134520. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134520.
- [13] MITCHELL S M, ULLMAN J L. Removal of phosphorus, BOD, and pharmaceuticals by rapid rate sand filtration and ultrafiltration systems[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, 142 (11): 0001137.
- [14] CHOI S, SHIN J, CHAE K J, et al. Mitigation via physiochemically enhanced primary treatment of antibiotic resistance genes in influent from a municipal wastewater treatment plant[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 247: 116946. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116946.
- [15] JIANG D L, CHEN Y H, NI G W. Phosphorus in drinking water and it's removal in conventional treatment process [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 461: 453–456. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.461.453.
- [16] FRAGOSO R A, DUARTE E A, PAIVA J. Contribution of coagulation-Flocculation process for a more sustainable pig slurry management[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226(5): 131.
- [17] BUNCE J T, NDAM E, OFITERU I D, et al. A review of phosphorus removal technologies and their applicability to small-scale domestic wastewater treatment systems [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 00008. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00008.
- [18] 朱能煌. 磁混凝沉淀技术在城市污水处理中的应用[J]. *广东化工*, 2019, 46(14): 260–261.
- ZHU N H. Application of magnetic coagulation and sedimentation technology in urban sewage treatment[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2019, 46(14): 260–261.
- [19] 刘志鹏. 磁混凝沉淀工艺在污水处理行业的应用[J]. *当代化工研究*, 2021(24): 98–100.
- LIU Z P. Application of magnetic coagulation sedimentation process in sewage treatment industry [J]. *Modern Chemical Research*, 2021(24): 98–100.
- [20] 蒋海, 安琳, 欧芳. 磁混凝沉淀技术在城市污水处理中的应用[J]. *市政技术*, 2012, 30(1): 108–113.
- JIANG H, AN L, OU F. Application of magnetic coagulating sedimentation technology in urban sewerage treatment [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2012, 30(1): 108–113.
- [21] 张勋, 孔殿超, 张强, 等. 磁混凝沉淀技术在白炭黑生产废水处理中的应用[J]. *广州化工*, 2021, 49(14): 65–66.
- ZHANG X, KONG D C, ZHANG Q, et al. Application of magnetic coagulation in treatment of wastewater from silica production[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2021, 49(14): 65–66.
- [22] 胡家玮, 李军, 卞伟. 城市废水磁混凝预处理及其表征分析[J]. *给水排水*, 2014, 40(s1): 221–225.
- HU J W, LI J, BIAN W. Magnetic coagulation pretreatment and characterization analysis of urban wastewater [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 40(s1): 221–225.
- [23] 陈啸, 伍喜庆, 岳涛, 等. 矿山尾矿水的磁种絮凝处理及机

- 理研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11): 1313-1318.
- CHEN X, WU X Q, YUE T, et al. Study on the magnetic seed flocculation treatment of mine tailings water and its mechanism [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(11): 1313-1318.
- [24] 黄光华, 王哲晓, 吉青青, 等. 超磁分离污泥脱水性能影响因素的研究[J]. 节能与环保, 2019(10): 79-81.
- HUANG G H, WANG Z X, JI Q Q, et al. The study on Influencing Factors of sludge dewatering performance by ultra-magnetic separation [J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2019(10): 79-81.
- [25] 贺聪慧, 王祺, 梁瑞松, 等. 磁强化处理技术在城市污水处理中的应用进展[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 54-69.
- HE C H, WANG Q, LIANG R S, et al. Analyse of magnetically enhanced treatment in municipal sewage system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(1): 54-69.
- [26] 张淳, 徐东耀, 康赛, 等. 磁混凝预处理小城镇混合污水的效能与混凝机制研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(6): 1-11.
- ZHANG C, XU D Y, KANG S, et al. The application and coagulation mechanism of magnetic coagulation in treating mixed sewage from small towns [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(6): 1-11.
- [27] 景长勇, 张尊举, 雷兆武, 等. 磁混凝沉淀工艺处理煤矿矿井水实验研究[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(10): 79-99.
- JING C Y, ZHANG Z J, LEI Z W, et al. Experimental study on treatment of coal mine water by magnetic coagulation sedimentation process [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48(10): 79-99.
- [28] 周传庭, 陈广, 周振. 磁混凝高效沉淀池用于处理高磷废水[J]. 中国市政工程, 2020(3): 53-55, 130-131.
- ZHOU C T, CHEN G, ZHOU Z. Treatment of high phosphorus wastewater with high efficiency sedimentation tank of magnetic coagulation [J]. China Municipal Engineering, 2020(3): 53-55, 130-131.
- [29] 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 Z, GAO J L, ZHOU Z P. Application of magnetic coagulation in the pretreatment section of chemical wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 141-144.
- [30] 彭冠平, 邹静, 石稳民, 等. A/RPIR+磁混凝沉淀用于临时分散式污水处理工程[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 93-98.
- PENG G P, ZHOU J, SHI W M, et al. Application of A/RPIR and magnetic coagulation sedimentation in a temporary decentralized sewage treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(6): 93-98.
- [31] 高健磊, 柳振铎, 闫怡新, 等. 磁混凝-UV/O₃ 深度处理诺氟沙星制药废水工艺研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(5): 44-51.
- GAO J L, LIU Z Z, YAN Y X, et al. Advanced treatment process of norfloxacin pharmaceutical wastewater by magnetic coagulation-UV/O₃ [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(5): 44-51.
- [32] 侯亚红, 顾雪锋, 李海龙, 等. 改良 AAO+磁混凝工艺在污水厂提标改造项目中的应用——以山东某污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2022, 41(4): 126-133.
- HOU Y H, GU X F, LI H L, et al. Application of modified process of AAO + magnetic coagulation in upgrading and reconstruction project of WWTP——Case study of a WWTP in Shandong [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4): 126-133.
- [33] 陈斌, 唐晶, 叶青徽, 等. 改良型 AAO-磁混凝沉淀-臭氧-活性炭工艺在城镇污水处理厂中的应用实例[J]. 工业用水与废水, 2021, 52(4): 81-84.
- CHEN B, TANG J, YE Q H, et al. An application example of improved AAO-magnetic coagulation sedimentation-ozone-activated carbon process in urban sewage treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 52(4): 81-84.
- [34] 丁付革, 沈志伟, 张骏, 等. 两级 A²/O+磁混凝工艺处理农村生活污水工程实例[J]. 工业水处理, 2023, 43(5): 162-167.
- DING F G, SHEN Z W, ZHANG J, et al. An engineering case of rural domestic sewage treatment by two-stage A²/O+magnetic coagulation process [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(5): 162-167.

(上接第 63 页)

- LIU L J, ZHOU Y L, RUAN J M, et al. Decomposition characteristics and chlorate formation rules of sodium hypochlorite disinfectant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(6): 54-58.
- [13] 苍岩, 郭晗, 张小磊. 二氧化氯无机消毒副产物的控制现状[J]. 净水技术, 2024, 43(5): 35-44, 79.
- CANG Y, GUO H, ZHANG X L, et al. Present status of inorganic DBPs control for chlorine dioxide [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(5): 35-44, 79.