

磁絮凝水处理技术综述

梁友福, 冯如, 吴昫宸*, 李金玥, 汪俊杰, 向桐, 康群

湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年3月3日; 录用日期: 2023年4月6日; 发布日期: 2023年4月13日

摘要

磁絮凝水处理技术是通过磁场力直接作用于污染物质或目标物质,使其与原水系统分离,不会引起化学、生物反应,无二次污染,在水处理方面有着广阔的应用前景。本文综述了磁絮凝水处理技术在国内外的研究发展现状,阐述了利用磁絮凝技术去除工业废水、生活污水和地表水中氮、磷和重金属、油类和藻类等污染物的处理工艺、设备及净化效率,分析了实施中遇到的问题,提出了发展热点与方向。本文可为磁絮凝技术在水处理领域的进一步研究提供参考。

关键词

磁絮凝, 工业废水, 生活污水, 地表水, 藻类, 净化, 综述

Overview of Magnetic Flocculation Technology for Water Treatment

Youfu Liang, Ru Feng, Yunchen Wu*, Jinyue Li, Junjie Wang, Tong Xiang, Qun Kang

Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan Hubei

Received: Mar. 3rd, 2023; accepted: Apr. 6th, 2023; published: Apr. 13th, 2023

Abstract

Magnetic flocculation water treatment technology directly acts on pollutants or target substances through magnetic force to separate them from the raw water system, without causing chemical or biological reactions and secondary pollution. It has broad application prospects in water treatment. This article summarizes the research and development status of magnetic flocculation technology in water treatment at home and abroad, expounds the treatment process, equipment, and purification efficiency of using magnetic flocculation technology to remove pollutants such as nitrogen, phosphorus, and heavy metals, oil, and algae from industrial wastewater, domestic wastewater

*通讯作者。

ter, and surface water, analyzes the problems encountered in implementation, and puts forward development hotspots and directions. This article can provide a reference for further research on magnetic flocculation technology in the field of water treatment.

Keywords

Magnetic Coagulation, Industrial Wastewater, Domestic Sewage, Surface Water, Alga, Purify, Overview

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

目前污水构成的发展趋向于复杂化,不但对水环境造成了污染,也严重影响到其周围环境,水污染的治理成为焦点问题。常规的污水处理技术包括吸附法、化学沉淀法、离子交换法、生物法等,然而这些方法存在使用效率低,费用较高,容易造成二次污染等问题[1]。与传统的水处理技术相比,磁絮凝技术是通过磁场力直接作用于污染物质或目标物质,使其与原水系统分离,且不会引起化学、生物反应,无二次污染,在污水处理方面有着广阔的应用前景[2]。

本文综述了国内外磁絮凝技术在水处理中的应用现状及发展热点方向,可为该技术领域的研究者提供参考。

2. 污水磁絮凝净化技术国内外研究现状

混凝和絮凝是处理生活污水、工业废水最有效的技术手段之一[1],对微生物、天然有机质、合成有机碳、颗粒物、金属离子等的去除具有直接和间接的效果。但是传统的混凝与絮凝的处理时间长,分离效率不高。磁絮凝技术是在常规絮凝的过程中加入磁种,通过电荷中和、吸附架桥、压缩双电层和卷扫网捕等作用,磁种和絮凝剂与水体中胶体颗粒结合形成比重较大且致密的复合磁性絮体[3]。在重力或外加磁场力的作用下,可高效快速地去去除水中的悬浮物、有机物、重金属以及氮磷等污染物。磁絮凝技术具有处理效率高,絮体沉降性能好,经济环保等优点,在实际工程应用中可减少沉淀池占地面积,降低建设费用[2]。

2.1. 净化工业废水

工业生产中会产生大量的工业废水,若未经深度处理而直接排放至河流湖泊,则会对环境及人体健康产生巨大危害。磁絮凝已被证明是一种有效的强化絮凝的技术,对重金属废水、矿井水、含油废水等均具有显著的絮凝效果[4]。

2.1.1. 重金属废水

(1) 国内研究现状

在国内,相关研究表明磁絮凝法在处理重金属废水方面有较好的效果。2022年郑怀礼等[5]成功合成了一种新型磁性壳聚糖絮凝剂(FSCAD),并研究该材料对Cr(VI)的去除性能。实验结果表明,在FSCAD投加量为900 mg/L、pH值为3、反应时间为60 min时FSCAD对低浓度Cr(VI)废水的去除效果可达到

90.48%。2022 年李乐[6]通过 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CPAM}$ 磁絮凝材料处理燃速催化剂生产废水的研究发现, 当 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CPAM}$ 投加量为 0.8 g/L, 最佳沉降时间为 30 min 时, $\text{Pb}(\text{I})$ 、 $\text{Cu}(\text{II})$ 去除率分别为 99.83%和 99.81%。经 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CPAM}$ 处理后, 重金属残留浓度在 0.1 mg/L~0.5 mg/L 之间, 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中的排放标准。

2020 年徐少华等[7]利用微磁絮凝沉淀工艺处理综合电镀废水, 试验发现总锌、总镍、总铬和总铜的去除率分别为 99.7%、93.3%、97.9%和 96.5%。其中总锌和总铬含量已达《电镀污染物排放标准》(GB21900-2008)规定的限值要求, 其沉降速率较常规絮凝也大大提高。2013 年林峰等[8]采用高压脉冲电絮凝和加载絮凝工艺处理电镀废水发现, 该技术对镀锌、铬、铜等重金属离子综合废水的处理有显著优势, 对六价铬离子、锌离子、铜离子去除率均在 99%以上。

(2) 国外研究现状

在国外对于重金属废水的研究中, 2020 年印度 Bharti Verma 等[9]制备了镍铁氧体纳米复合材料(NFNC), 并将其用于从电镀工业废水中去除六价铬。NFNCs 的高效可回收性和去除电镀废水中其他重金属的适用性表明其是一种很有前途的废水处理材料。

2.1.2. 矿井水

(1) 国内研究现状

对于矿井水的研究中, 2022 年胡梦园等[10]以磁性粉煤灰为磁种, CaCl_2 为凝聚剂, APAM 为絮凝剂对高浊度矿物污水进行了磁絮凝沉降研究。结果表明, 磁絮凝技术比常规絮凝法具有更快的沉降速率和更好的澄清作用, 当加入磁种 3.2 g/L、外加 250 mT 的磁场时, 磁絮凝沉降速度较常规絮凝提升了 48%; 沉降 10 min 后上清液透光率可达 84.2%, 比常规的絮凝法提高了 6.7%。

2019 年陈啸等[11]采用磁种絮凝技术对赤铁矿尾矿水进行处理, 发现添加磁种可明显增大絮凝体的粒度, 产生更加致密的絮凝体。采用 2 mg/L 阴离子聚丙烯酰胺(APAM)与 2 g/L 天然磁种(体积平均粒度为 22.46 μm)协同作用可以得到较好的处理效果。

2018 年张晓航等[12]利用磁絮凝技术对高悬浮物矿井水进行了处理, 结果显示, 当 PAC 投加量为 60 mg/L, PAM 投加量为 4 mg/L, 一级、二级、三级反应池搅拌强度分别为 300、200、100 r/min 时, 投加磁种可以明显地减少沉淀时间, 在 15 s 之内水中的絮体就可以沉淀完毕, 出水的浊度去除率达到 95%以上。

2017 年杨海权等[13]为山西兴县华润联盛峁底煤业有限公司矿井废水处理站引进高效超磁絮凝系统, 提高了矿井废水的沉淀效率, 从而提升矿井水处理站的出水水质。取样化验结果表明改造后出水水质完全符合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类水水质标准。

2016 年 Li 等[14]制备粉煤灰基磁性絮凝剂进行了室内超细泥化全尾砂动态絮凝沉降实验, 发现在磁场强度为 0.3 T, 助凝剂 FAMC 投加量为 200 mL/t, 絮凝剂 PAM 投加量为 30 g/t, 进料速度为 0.6 t/($\text{m}^2\cdot\text{h}$)时, 絮凝剂单耗、溢流水浊度和含固量分别降低约 50%、90%和 80%。

(2) 国外研究现状

在国外, 一些研究报道通过添加人工合成的复合磁性絮凝剂来处理矿井水。2016 年南非 Kankeu 等[15]制备了一种刺梧桐树胶水凝胶纳米复合絮凝剂, 将这种磁性絮凝剂应用到处理矿井水中, 取得了较好的磁絮凝处理效果。合成的水凝胶纳米复合材料显示出作为絮凝剂和吸附剂的巨大潜力, 可用于去除悬浮颗粒和重金属离子, 并可用于改善矿山废水的质量。

2.1.3. 含油废水

(1) 国内研究现状

在国内对于含油废水的研究中,2022年万涛等[16]为探讨磁絮凝-电催化氧化组合工艺处理变电站事故油池废水的效果,进行了动态模拟试验。试验结果表明,油、COD、浊度和氨氮的去除率分别达到96.99%、85.98%、90.85%和78.86%,说明该组合工艺处理变电站事故油池含油废水具有良好的效果。

2019年Tang等[17]采用磁絮凝法对含油微污染的地表水体进行了处理,发现在絮凝过程中加入 Fe_3O_4 与聚合氯化铝,不但对水体中的油污有较高的去除率,而且能够使絮凝物迅速沉降,减少反应时间。随着 Fe_3O_4 与聚合氯化铝比值的增加,除油效率提高到85%~90%,最高可达91.78%~91.99%。磁性絮体可以为油性污染物提供更多的吸附位点,经过8次重复使用后,其去除率仍然可达到近80.6%,由此可见其回收利用潜力巨大。

2018年Lü等[18]采用共沉淀法合成 Fe_3O_4 磁性纳米颗粒,用二氧化硅和氨丙基进行表面包覆成功合成了一系列季铵化壳聚糖(QC)接枝的磁性纳米粒子(MNPs)用于水环境中的破乳,采用各种技术对合成的磁性絮凝剂进行表征,结果表明,高QC接枝率的MNPs表现出增强的分离效率。接枝的QC层赋予混合MNPs永久的正表面电荷,从而使它们能够通过静电贴片絮凝带负电荷的油滴,外加磁场不仅可以加速所得絮体的分离,还可以去除MNPs包裹的分散油滴。

2014年管大祥等[19]通过对煤制油废水的磁絮凝处理实验,发现其对煤制油废水的处理效果明显好于常规混凝法。添加了磁粉后,絮体聚团迅速,且较为密实,沉降速度明显加快。在最优条件下,该工艺对水中COD的去除率为56.9%,对浊度的去除率可达99.7%。

(2) 国外研究现状

在国外对于含油废水的研究中,2017年美国Seyyedali等[20]使用含有聚乙烯吡咯烷酮(PVP)的磁性纳米离子处理含油废水,发现在强磁场(0.56T)和1h的混合时间下,磁混凝达到了95%的除油率和80%以上的烷烃去除率。

2.2. 净化生活污水

随着人口数量的增长,以及人民生活水平的持续提高,生活污水的排放量也在逐年增大,传统的生活污水处理方法都有其不足之处,利用磁絮凝技术可以对生活污水进行节能高效的处理。

(1) 国内研究现状

2019年段志辉等[21]为改善生活污水的出水水质,采用磁絮凝技术处理经常规工艺处理后的生活污水处理厂的二沉池出水。通过单因素和正交实验确定了磁絮凝的最优条件为 $\text{pH} = 8$,磁粉投加量100 mg/L、PAC投加量40 mg/L、PAM投加量0.5 mg/L,投加顺序为磁粉、PAC、PAM。在此最优条件下,SS、COD、TP的去除率分别为97%、89%、74%,出水达到一级A标准。

2018年曹一诺[22]通过实验探讨磁絮凝技术在城镇生活污水深度除磷中的技术可行性和经济可行性。首先在实验室得出最佳工艺参数为磁粉浓度40 mg/L, PAC浓度30 mg/L, PAM浓度1 mg/L,沉淀时间20 min,进而在最优条件下进行连续性动态试验。研究发现,磁絮凝技术对悬浮物、COD和TP的去除率分别能够达到87.71%、73.09%和97%,与未投加磁粉相比均有所提高。这说明磁絮凝技术可以应用于实际生活污水的处理,并且可以达到较好的处理效果。周碧雯等[23]探讨絮凝剂不同药剂投加量、快搅速度和时间以及慢搅速度和时间等变量对磁絮凝处理生活污水的影响。发现在磁粉投加量350 mg/L、PAC投加量30 mg/L、PAM投加量2.5 mg/L、快搅速度350 r/min (4 min)、慢搅速度100 r/min (3 min)的条件下浊度去除率可达95.3%。占强等[24]考察了投药量、搅拌时间和沉淀时间等参数对磁絮凝技术处理城镇污水效果的影响。试验结果表明,在磁粉投加量100 mg/L、PAC投加量250 mg/L、PAM投加量1 mg/L、搅拌时间90 s、沉淀时间2 min的最佳工艺参数下,磁絮凝技术对污水COD、SS的去除率分别可达65%、75%,该技术有效地改善了污水的可生化性能,并为后续处理提供了便利。

2016年王延强[25]利用了磁絮凝处理厨房污水,研究磁粉添加量和混凝剂投加量对厨房污水中的油类及悬浮物浓度的影响。在磁粉投加量 200 mg/L、絮凝剂投加量 1.5 mg/L 的条件下,污水中的油类和悬浮物的浓度分别减少了 96.1%和 77.4%。

(2)国外研究现状

在国外,2010年Chin等[26]利用磁絮凝技术对城市污水处理厂高浊度水进行预处理,通过研究发现,当磁粉浓度为 1 g/L 时,浊度可以有效地从约 10,000 NTU 降低到小于 1000 NTU,效果十分明显,并且水中低浓度的 TOC 对于磁絮凝反应的进行有促进作用,但当浓度过高时则会抑制磁絮凝反应。

2.3. 净化地表水

随着生活污水、工业废水和农业污水的排入,许多河流湖泊都遭受了不同程度的污染,其富营养化程度逐渐加深。河流湖泊的富营养化是指水体中氮、磷超标引起的水体环境污染,这会造成水体中的藻类大量繁殖,使水体中氧含量下降,从而导致其它水生生物不能生存。通过磁絮凝技术可以达到较高的氮磷去除率,有效抑制藻类生长,改善水体富营养化。

在国内,相关研究发现,磁絮凝技术可以很好的改善地表水的污染,并且将磁絮凝技术与其他技术耦合联用后对受污染地表水的处理效果非常明显。2022年张彪[27]采用磁絮凝+碳纤维水草耦合纳米曝气技术研究对黑臭水体的修复。实验首先采用磁絮凝技术进行污染物的去除,降低水体黑臭程度;在此基础上,采用新型碳纤维生态水草耦合纳米曝气技术实现对水体的持续净化。实验结果发现,磁絮凝技术可以有效降低污水的黑臭程度,耦合碳纤维水草耦合纳米曝气技术后对 COD、氨氮、TP 的去除率分别达到了 88%、97%和 68.6%。2022年程颖思等[28]采用磁絮凝-吸附技术进行去除黑臭水体浊度、氨氮和总磷的实验。在磁絮凝过程中,通过聚合硫酸铁(PFS)、磁粉(MPs)和聚丙烯酰胺(PAM)复配使用,利用电荷中和效应去除浊度和 TP;在吸附过程中,通过吸附剂质化壳聚糖-沸石(PCZ)的离子交换作用去除氨氮以及静电吸附作用去除 TP。通过对实际黑臭水体进行处理发现,出水浊度可达到城镇污水处理厂污染物排放一级标准,TP 和氨氮也分别能符合地表水环境质量 III 类标准和 V 类标准要求。

2021年袁文璟等[29]运用二次通用旋转组合设计研究磁絮凝工艺处理苏州河道水的效果,在最佳设计条件下(PAC 投加量 15 mg/L、PAM 投加量 0.58 mg/L、磁粉投加量 2.7 mg/L、沉淀时间 2.1 min)进行试验,得到实际浊度为 0.82 NTU,实际浊度去除率可达 96.9%。

2017年Wang等[30]研究了集循环混凝、磁强化絮凝和膜过滤于一体的循环式磁絮凝膜过滤(RMFMF)工艺对四环素污染地表水的处理效果,考察了浊度、254 nm 紫外吸光度(UV254)、总有机碳和四环素等水质指标。实验结果表明,在 20 mg/L FeCl₃、4 mg/L Fe₃O₄ 和 6 mg/L 再生磁絮体的最佳投加量下,RMFMF 工艺对上述指标的去除率在 55.8%~92.9%之间,去除效果最好。同时,絮体的平均粒径最大,分形维数最高,这不仅表现出最佳的混凝效果,有利于提高对多种污染物的去除性能,而且形成疏松多孔的滤饼层,有利于降低渗透通量下降和膜污染。

2014年李继香等[31]采用磁絮凝和常规絮凝两种方法分别对微污染河水进行了浊度、COD 及总磷的去除效果试验。结果证实,磁絮凝产生的絮体平均直径从普通絮凝的 50.1 μm 增长至 68.6 μm,对浊度、COD 和 TP 的去除率分别为 99.3%、54.2%和 75.8%。2013年郭超等[32]采用磁絮凝技术对被受污染景观河水进行处理,结果表明,在磁絮凝作用下,总磷、浊度、COD 的去除率分别为 91.0%、96.3%和 72.5%,满足地表水 V 类标准,但其对 NH₄⁺的处理效果较弱,仅为 30.8%。沸石是对 NH₄⁺高选择性的吸附剂,沸石吸附可以很好地去除水中 NH₄⁺,将磁絮凝技术与沸石吸附联合应用,可发挥两者的优势,达到高效处理受污染水体的目的。

对于藻类的去除,2019年张羽涵等[33]分别采用亚铁盐+铁盐(方案一)和亚铁盐+高锰酸钾(方案

二)处理淡水蓝藻,研究在外磁场作用下2种方案对水中铜绿微囊藻的去除效果及机理。结果表明,在合适投药配比情况下,方案一、方案二在絮凝过程中分别自发生成磁核颗粒 Fe_3O_4 与 MnFe_2O_4 并实现藻絮体的快速磁分离。在各自最佳投药配比的条件下,方案一和方案二的浊度去除率为97.58%和95.65%。

在国外关于磁絮凝除藻的研究中,2019年西班牙Abo Markeb Ahmad等[34]利用磁铁矿纳米粒子($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{NPs}$)作为吸附剂来捕获实际废水中的微藻。实验表明,在磁性吸附剂浓度为0.14 g/L,接触时间为27 min,磁分离时间为8 min时,捕获率最高,可达到95%以上,在5次循环使用后,仅使捕获效率下降5.9%。2016年美国Barekati Goudarzi等[35]将长链聚精氨酸(PA)与 Fe_3O_4 进行复合改性,制备出磁性絮凝剂,对藻类废水的处理效果显著。试验结果发现,在磁性絮凝剂投加量为216 mg/L, pH值为7.23时,小球藻最佳去除率可达到94%。

3. 结论与展望

3.1. 结论

(1) 在工业废水处理方面,磁絮凝技术对于重金属废水、矿井水、含油废水等都有比较好的处理效果,磁絮凝相较于常规絮凝有着明显的提高效果。

(2) 在生活污水处理方面,利用磁絮凝技术可以做到高效节能去除污水中SS、COD、TP等,使出水达标。

(3) 在地表水处理方面,磁絮凝技术能够改善地表水的污染,对藻类的去除也有很好的效果。其中,磁絮凝技术耦合联用其他水处理技术对于污染地表水的改善效果非常明显,可以在后续继续进行深入研究。

3.2. 展望

磁絮凝技术作为一种具有广阔前景的水处理技术,是未来水处理研究与应用的一个重要方向。目前磁絮凝技术已用于处理工业废水、生活污水、地表水等,随着磁技术与磁种技术的发展,其应用领域还有扩展的潜力。

在实际水处理中磁絮凝技术仍面临着一些困难与挑战,如:磁种的选择、制备与回收等仍需改进,有些磁性絮凝剂会造成二次污染、磁分离装置效率仍需提升等,这些导致了运行费用的增加与处理效果的降低,在今后磁絮凝技术的发展中需要进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 刘楚玉,黄自力,袁晨光,等.磁分离技术在水处理中的应用[J].现代化工,2022,42(4):72-76.
- [2] 郑利兵,佟娟,魏源送,等.磁分离技术在水处理中的研究与应用进展[J].环境科学学报,2016,36(9):3103-3117.
- [3] 冯召清,关智杰,杨贤,等.磁絮凝高效处理高浊度废水的性能及机理研究[J].环境科学学报,2022,42(3):197-206.
- [4] 王淑军,李恩泽,齐文豪,等.磁絮凝技术在水处理中的应用研究进展[J].应用化工,2021,50(1):244-249.
- [5] 郑怀礼,钟政,邹宏,等.磁性阳离子型壳聚糖絮凝剂去除 Cr(VI) [J].中国环境科学,2022,42(2):745-752.
- [6] 李乐.磁分离材料的制备及在铅铜重金属废水处理中的应用[D]:[硕士学位论文].太原:中北大学,2022.
- [7] 徐少华,林恬盛,张红英.微磁絮凝沉淀工艺处理综合电镀废水[J].电镀与涂饰,2020,39(19):1362-1366.
- [8] 林峰,姜素华,涂云鹏.高压脉冲电絮凝-加载磁絮凝工艺处理电镀废水[J].广州化工,2013,41(8):149-150.
- [9] Verma, B. and Balomajumder, C. (2020) Synthesis of Magnetic Nickel Ferrites Nanocomposites: An Advanced Remediation of Electroplating Wastewater. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **112**, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.07.006>

- [10] 胡梦园, 李建军, 王浩宇, 等. 以磁性粉煤灰为磁种的磁絮凝沉降研究[J]. 矿山工程, 2022, 10(3): 219-227.
- [11] 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.
- [12] 张晓航, 何绪文, 王浩, 等. 磁絮凝工艺对含悬浮物矿井水处理效果的研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(4): 122-125+132.
- [13] 杨海权, 武剑. 高效超磁絮凝系统在矿井水处理站改造中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017(18): 124-125.
- [14] Li, S., Wang, X.M. and Zhang, Q.L. (2016) Dynamic Experiments on Flocculation and Sedimentation of Argillized Ultrafine Tailings Using Fly-Ash-Based Magnetic Coagulant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **26**, 1975-1984. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64308-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64308-X)
- [15] Fosso-Kankeu, E., Mittal, H., Waanders, F., *et al.* (2016) Preparation and Characterization of Gum Karaya Hydrogel Nanocomposite Flocculant for Metal Ions Removal from Mine Effluents. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **13**, 711-724. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0915-x>
- [16] 万涛, 车垚, 刘恒, 等. 基于磁絮凝-电催化氧化组合工艺的变电站事故油池废水处理[J]. 湖南电力, 2022, 42(5): 69-74.
- [17] Tang, J., Wang, J., Jia, H., *et al.* (2019) The Investigation on Fe₃O₄ Magnetic Flocculation for High Efficiency Treatment of Oily Micro-Polluted Water. *Journal of Environmental Management*, **244**, 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.068>
- [18] Lv, T., Zhang, S., Qi, D.M., *et al.* (2018) Enhanced Demulsification from Aqueous Media by Using Magnetic Chitosan-Based Flocculant. *Journal of Colloid and Interface Science*, **58**, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.02.024>
- [19] 管大祥, 袁丽梅, 徐金有, 等. 磁絮凝法强化煤制油废水处理的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 141-144.
- [20] Mirshahghassemi, S., Ebner, A.D., Cai, B., *et al.* (2017) Application of High Gradient Magnetic Separation for Oil Remediation Using Polymer-Coated Magnetic Nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, **179**, 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.067>
- [21] 段志辉, 李彦, 李光柱, 等. 磁絮凝深度处理生活污水[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 110-113+118.
- [22] 曹一诺. 磁絮凝技术对城镇污水深度除磷效果的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [23] 周碧雯, 张军, 李日标, 等. 磁加载絮凝工艺处理城市生活污水的试验研究[J]. 当代化工, 2018, 47(10): 2085-2088.
- [24] 占强, 常素云, 李楠楠, 等. 磁絮凝技术对城市污水的处理效果研究[J]. 现代化工, 2018, 38(4): 110-113.
- [25] 王廷强. 混凝磁分离技术净化厨房污水[J]. 广东化工, 2016, 43(13): 158-159.
- [26] Chin, M. and Fan, Z.G. (2010) Magnetic Seeding Aggregation of High Turbid Source Water. *Journal of Environmental Engineering & Management*, **20**, 145-150.
- [27] 张彪. 基于磁絮凝 + 碳纤维水草耦合纳米曝气技术的黑臭水体修复研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(2): 86-90.
- [28] 程颖思, 何皓, 刘云. 磁絮凝-吸附技术对黑臭水体中浊度、氨氮和总磷的去除效果及机理[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 481-493.
- [29] 袁文璟, 唐利, 何圣兵. 二次通用旋转组合设计下磁絮凝工艺处理河道水效果[J]. 中国给水排水, 2021, 37(3): 92-98.
- [30] Wang, Y.F., Jia, H., Zhang, H.W., *et al.* (2017) Performance of a Novel Recycling Magnetic Flocculation Membrane Filtration Process for Tetracycline-Polluted Surface Water Treatment. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, **76**, 490-500. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.218>
- [31] 李继香. 应用加载磁混凝处理微污染河水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7): 2901-2905.
- [32] 郭超, 魏连雨, 宋连朋, 等. 磁加载混凝处理受污染景观河水的试验研究[J]. 天津建设科技, 2013, 23(6): 29-32.
- [33] 张羽涵, 万俊力, 邓芸, 等. 磁核颗粒自生成的磁絮凝除藻特性[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(10): 95-100.
- [34] Llimos-Turet, J., Ferrer, I., *et al.* (2019) The Use of Magnetic Iron Oxide Based Nanoparticles to Improve Microalgae Harvesting in Real Wastewater. *Water Research*, **159**, 490-500. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.023>
- [35] Barekati-Goudarzi, M., Reza, M.M., Poursagharian, R.F., *et al.* (2016) Rapid Separation of Microalga *Chlorella vulgaris* Using Magnetic Chitosan: Process Optimization Using Response Surface Methodology. *Particulate Science and Technology*, **34**, 165-172. <https://doi.org/10.1080/02726351.2015.1054973>