

# 表面改性磁种强化絮凝过程 处理含油废水研究

王冰, 李纪元\*, 范芷萱, 赵洵萱, 李昂, 宋涛

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**为增强含油废水中的化学需氧量(COD)和石油类污染物的去除效果,利用表面改性磁种 $Fe_3O_4$ 增强絮凝处理技术。采用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、比表面积分析等技术,详细表征了改性磁种的形貌与结构。结果显示,改性磁种相比普通磁种具有更小的孔径和更大的孔容,有利于污染物吸附。通过单因素实验确定最佳工况条件为:改性磁种用量 $3\text{ g/L}$ 、絮凝剂聚合氯化铝 $250\text{ mg/L}$ 、助凝剂聚丙烯酰胺 $2\text{ mg/L}$ 、沉降时间 $6\text{ min}$ 、 $\text{pH}$ 为 $7$ 、温度 $25^\circ\text{C}$ 。在此条件下,COD和石油去除率分别达到 $75.6\%$ 和 $93.8\%$ 。此外,研究了磁种的再生性能,表明改性磁种经过多次再生后仍能满足回注水标准。本研究不仅提升了磁絮凝的吸附性能,而且为含油废水的磁絮凝处理提供了宝贵的理论参考。

**关键词:**表面改性磁种;絮凝;含油废水;COD;石油去除率

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)07-0174-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.07.028

## Study on surface-modified magnetic seeds enhanced flocculation for treating oily wastewater

WANG Bing, LI Ji-yuan\*, FAN Zhi-xuan, ZHAO Wei-xuan, LI Ang, SONG Tao

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** A surface-modified magnetic seeds ( $Fe_3O_4$ ) enhanced flocculation treatment technique is utilized to improve the removal efficiencies of chemical oxygen demand (COD) and petroleum pollutants from oily wastewater. The morphology and structure of the modified magnetic seeds are characterized in detail through using SEM, XRD, and specific surface area analysis. Results demonstrate that the modified magnetic seeds have smaller pore size and larger pore volume than unmodified seeds, which facilitates their adsorption for pollutants. Through single-factor experiments, the optimum operating conditions are determined as follows: the dosages of modified magnetic seeds, polyaluminum chloride flocculant and polyacrylamide coagulant aid are  $3\text{ g/L}$ ,  $250\text{ mg/L}$  and  $2\text{ mg/L}$ , respectively, the settling time is  $6\text{ min}$ ,  $\text{pH}=7$ , and the temperature is  $25^\circ\text{C}$ . Under these conditions, the removal rates of COD and petroleum reach  $75.6\%$  and  $93.8\%$ , respectively. Furthermore, it is found from the regeneration performance study that the modified seeds after multiple regeneration cycles maintain their efficacy and can meet the standards for reinjection water. This study enhances the adsorption properties of magnetic flocculation, and also provides valuable theoretical insights for the magnetic flocculation treatment of oily wastewater.

**Key words:** surface-modified magnetic seeds; flocculation; oily wastewater; COD; removal rate of petroleum

随着全球石油勘探和生产活动的持续扩大,油田废水的排放量也在迅速增长。这类废水的成分复杂,主要含有高浓度的有机物和石油类污染物<sup>[1]</sup>,对环境造成重大威胁。含油废水处理技术主要包括重力分离<sup>[2]</sup>、离心分离<sup>[3]</sup>、气浮<sup>[4]</sup>、混凝<sup>[5]</sup>、生物处理<sup>[6]</sup>、高级氧化<sup>[7]</sup>及膜分离<sup>[8]</sup>等方法。其中,混凝作为一种常见的水处理手段,使废水中的胶体粒子和微小颗粒聚集,进而提高去除效果。该过程包括凝聚和絮凝阶段:凝聚使胶体粒子脱稳形成微小聚集体,絮凝使微小颗粒聚结成较大颗粒<sup>[9]</sup>。

近年来,混凝剂的研究重点逐步转向低成本、低

毒性和高效能的发展方向。无机高分子混凝剂具有良好的污染物去除效果和较高的相对分子量,但其毒性和腐蚀性较强<sup>[10]</sup>。相比之下,合成有机高分子混凝剂在减少污泥生成、降低处理条件影响方面表现优异,但成本较高,同时其高分子聚合物中的残留单体对生物体可能具有潜在危害,如基因突变、异常生长和致癌风险<sup>[11]</sup>。天然混凝剂因其无毒和无二次污染的特性具有一定优势,但其混凝活性较低,单独使用时处理效果有限。因此,有机混凝剂与天然混凝剂的联合使用已被证明能够在一定程度上改善处理效果<sup>[12]</sup>。

收稿日期:2024-10-22;修回日期:2025-04-30

基金项目:辽宁省教育厅重点项目(LJ212410153008)

作者简介:王冰(1983-),女,博士,教授,研究方向为油田污水及污泥处理研究,18202460111@163.com;李纪元(2000-),男,硕士生,研究方向为污水处理,通讯联系人,2573811561@qq.com。

与此同时,磁性絮凝是一种新兴水处理技术,备受关注。研究表明,磁性种子的引入可以显著提升絮凝效率,形成更致密、更重的絮凝体,从而增强污染物的去除能力和沉降速度<sup>[13-14]</sup>。Lu等<sup>[15]</sup>通过乙醇和硬脂酸对四氧化三铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )磁性颗粒进行改性,使用其处理油水混合物,油水分离率高达99%。Jiang等<sup>[16]</sup>合成了聚合氯化铝与纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 相结合的材料,并成功利用改性磁性种子处理微囊藻。Farahat等<sup>[17]</sup>开发了一种由蛇纹石、膨润土和氧化铁制成的磁性吸附剂,对正负电荷污染物均表现出优异的吸附性能。

本实验采用表面改性的磁性种子作为载体,以增强传统絮凝过程,进一步提升有机污染物的去除效率。通过扫描电子显微镜(SEM)、比表面积孔隙分析和X射线衍射(XRD)等对磁种的形貌和孔隙结构特性进行详细分析,并比较了改性磁种与普通磁种在处理油田废水中对化学需氧量(COD)和石油污染物的去除效果,此外,采用单因素法控制磁种的投加量、絮凝剂浓度和助凝剂浓度,系统分析了各因素对废水处理效果的影响。该研究确定磁性絮凝的最佳工艺条件,为污染物高效去除提供重要的理论依据和实验数据,对油田废水处理具有重要的研究意义与实践指导价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验用水

实验用水为某油田经三相分离器油水分离后的含油废水,其中含油质量浓度为62.6 mg/L、COD为1 511 mg/L、pH为7.6。

### 1.2 实验仪器和药品

仪器:紫外-可见分光光度计、电子天平、pH计、比表面积孔隙分析仪、鼓风干燥箱、磁力搅拌器、扫描电子显微镜等。

药品: $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,天津市科密欧化学试剂有限公司;重铬酸钾( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )、硫酸铝钾[ $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$ ],上海阿拉丁化学有限公司;钼酸铵[ $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ ],上海麦克林生化科技有限公司;氢氧化钠(NaOH),天津市大茂化学试剂厂;盐酸(HCl),沈阳市新化试剂厂;无水乙醇,天津市富宇精细化工有限公司;试验试剂均为分析纯。

### 1.3 磁种制备及回收

将50 g  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 浸入500 mL质量分数为2%的盐酸中2.5 h。随后,将100 g的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 加入1 L水中充分搅拌至铁盐完全溶解。将 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 从盐

酸中分离,加入铁盐溶液中。使用1 mol/L的NaOH溶液搅拌至pH为8~9,低速搅拌1.5 h。然后将混合物置于100℃的水浴中40 min。混合物过滤得到固相,用去离子水洗涤。洗涤后的固相在110℃的鼓风炉中干燥5 h,得到改性磁种的最终质量为75.2 g,将其储存在密封容器中。

本试验对使用后的磁种在外加磁场的条件下进行回收,并通过乙醇和去离子水充分洗涤磁种,考察普通磁性磁种和表面改性磁种二次使用时处理性能变化。

### 1.4 实验

采用单因素实验法,在若干个500 mL烧杯中加入200 mL的含油废水,分别控制磁种的投加量(1、2、3、4、5、6、7 g)、絮凝剂聚合氯化铝的浓度(50、100、150、200、250、300、350、400 mg/L)、助凝剂聚丙烯酰胺的浓度(0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5 mg/L)、沉降时间(1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 min)、pH(2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12)、温度(10、15、20、25、30、35℃),通过比较两种磁种的COD和石油的去除率来确定磁絮凝阶段最佳条件。

### 1.5 分析方法

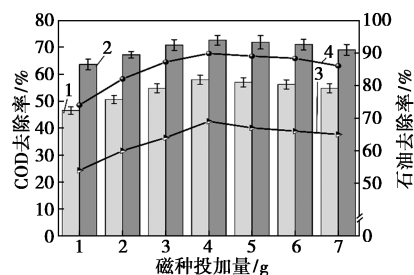
实验通过准一级吸附动力学模型、准二级吸附动力学模型对磁种吸附COD和石油的实验数据进行拟合。取相同稀释后的含油污水250 mL于两个500 mL锥形瓶中,分别加入1 g的普通磁性磁种和改性磁种,以200 r/min的转速置于恒温振荡器内,取样时间为0、1、2、3、5、10、15、20、30、40、50 min。每次分别取样3 mL和10 mL,测定所取样品中COD与石油的含量。

采用密度泛函理论(DFT)法分析磁种的孔径分布;通过SEM对磁种表面形貌进行分析;利用XRD对物相组成进行分析;紫外分光光度法与重铬酸钾法用以测定含油量<sup>[18]</sup>和COD<sup>[19]</sup>。

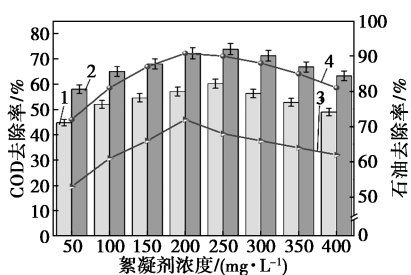
## 2 结果与讨论

### 2.1 磁絮凝处理含油废水的影响因素

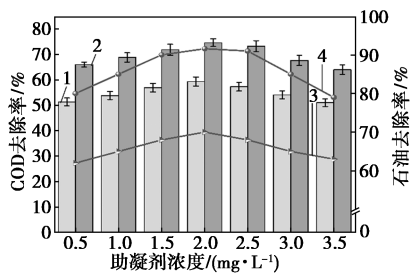
不同因素下对含油废水的处理效果如图1所示。



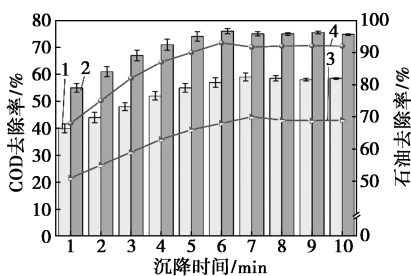
(a) 磁种投加量对COD、石油去除的影响



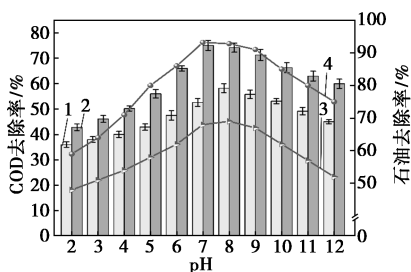
(b) 絮凝剂浓度对 COD、石油去除的影响



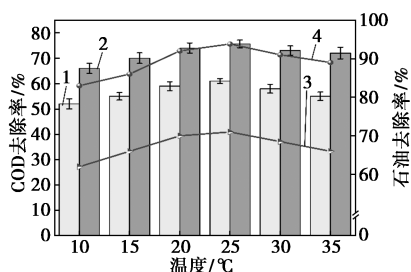
(c) 助凝剂浓度对 COD、石油去除的影响



(d) 沉降时间对 COD、石油去除的影响



(e) pH 对 COD、石油去除的影响



(f) 温度对 COD、石油去除的影响

1—普通磁种的 COD 去除率;2—改性磁种的 COD 去除率;  
3—普通磁种的石油去除率;4—改性磁种的石油去除率

图 1 不同因素对含油废水的处理效果

从图 1(a)中可以看出,只改变磁种的投加量, COD 与石油的去除率随磁种投加量的增加而增加,达到最佳去除率后,继续投加磁种,去除率有所下降

但基本保持不变。投加普通磁种 4 g 时效果最佳, COD 与石油去除率分别为 57.9%、72.6%。改性磁种的投加量为 4 g 时效果最佳, COD 与石油去除率分别为 69.0%、89.8%。投加磁种增强去除效果是因为其为污染物絮体提供了载体,絮体吸附在磁种表面,并沉降得以去除。

从图 1(b)中可知,随着絮凝剂聚合氯化铝投加浓度增加, COD 与石油的去除率上升,但当絮凝剂浓度过高时,去除率反而下降。普通和改性磁种在絮凝剂浓度为 250 mg/L 时 COD 去除率最佳,分别为 60.2%和 73.8%;对石油的去除效果在 200 mg/L 时最佳,去除率分别为 72.0%和 90.8%。这是因为絮凝剂吸附水中的羟基到胶体颗粒上,导致互补配位、架桥和各向异性电荷中和。这个过程最终导致  $Al(OH)_3$  胶体沉淀物的形成,促进胶体颗粒之间的碰撞粘结<sup>[20]</sup>。较低浓度絮凝剂产生的正离子中和污染物上的负电荷,然而产生的絮体不足以克服浮力,阻止了有效的沉淀<sup>[21]</sup>。过高的絮凝剂浓度会导致带正电的颗粒过量,从而增加排斥力并破坏系统的稳定性<sup>[22]</sup>。综合考虑絮凝剂浓度为 250 mg/L 时,对 COD 和石油去除效果最佳。

从图 1(c)中可知,随着助凝剂聚丙烯酰胺投加浓度的增加,水中 COD 和石油的去除率增加,但当投加助凝剂的浓度过高时, COD 和石油的去除率反而会下降。普通磁种和改性磁种在助凝剂浓度为 2 mg/L 时处理效果最佳, COD 去除率分别为 59.3%和 74.6%,石油的去除率分别为 70.0%和 91.6%。聚丙烯酰胺是一种高分子助凝剂,引入其能快速形成枝多尺寸大的絮体,使吸附架桥能力加强从而强化絮凝效果。而过多的助凝剂会使水中已经脱稳的杂质颗粒重新获得稳定,使处理效果变差。

图 1(d)可知, COD 和石油的去除率随沉降时间增加而增大,达到最高值后趋于稳定。普通磁种在 7 min 沉降时效果最佳, COD 去除率为 59.0%,石油去除率为 70.1%;而改性磁种在 6 min 时效果最佳, COD 去除率为 75.5%,石油去除率为 92.1%。初期,由于絮凝剂和助凝剂作用, COD 和石油迅速脱稳并与磁种共同沉降。随着时间延长,絮凝剂消耗殆尽,磁种表面被污染物覆盖,去除率趋于稳定。改性磁种因包裹了铁氧化物,密度更大,沉降更快,比普通磁种更具优势。

从图 1(e)中可知,仅改变溶液酸碱度, COD 和石油的去除率随 pH 升高而增大,当 pH 过高时,去

除率反而下降。普通磁种对 COD 与石油最佳去除率分别为 58.2%、69.1%;改性磁种在 pH 为 7 时效果最佳, COD 去除率为 69.0%, 石油去除率为 93.2%。这是因为随着 pH 升高, 氢氧根离子 OH<sup>-</sup> 取代水合铝离子 Al(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub><sup>3+</sup> 中的配位水分子, 促进水解和聚合作用。此过程形成 Al(OH)<sub>3</sub> 胶体沉淀, 增强絮凝效果, 提高 COD 与石油的去除效果。pH 超过 8 时, 部分 Al(OH)<sub>3</sub> 溶解为 Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>, 影响絮凝效果。

从图 1(f) 可知, 随着温度升高, COD 和石油的去除率增加, 但温度过高时去除率略有下降。普通磁种在 25℃ 时效果最佳, COD 去除率为 61.0%, 石油去除率为 71.1%; 改性磁种在同一温度效果更佳, COD 去除率为 75.6%, 石油去除率为 93.8%。温度过低时, AlCl<sub>3</sub> 水解困难, 水的高粘度不利于絮凝; 温度升高提高了化学反应活化能和反应速率, 增强絮凝效果; 温度过高时, 因疏水基团缔合作用、离子基团热运动和水化作用的变化影响液体粘度, 对助凝剂的作用产生不利影响。

综上所述, 该反应的最佳条件为: 磁种投加量 3 g、絮凝剂浓度 250 mg/L、助凝剂浓度 2 mg/L、沉降时间 6 min、pH 为 7、温度为 25℃。改性磁种对 COD 与石油的去除率分别为 75.6%、93.8%。

### 2.2 再生实验结果分析

磁种再生实验结果如表 1 所示。可以看出, 经过多次再生-吸附-再生实验, 磁种对含油废水的吸附效果逐次降低, 这是因为再生的磁种随着解吸次数的增加, 每次并不能完全地去掉污染物, 导致表面的活性位点和吸附孔隙有所减少, 但是实验后的水质依然满足回注水排放标准。

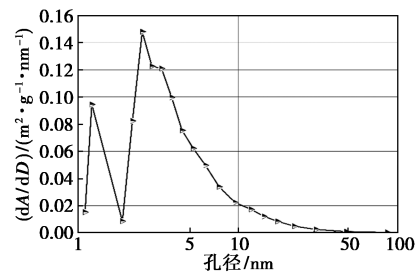
表 1 再生实验结果

再生次数	1	2	3	4	5
COD 去除率/%	73.4	70.1	66.5	64.6	61.3
石油去除率/%	91.2	88.9	85.2	83.1	80.6

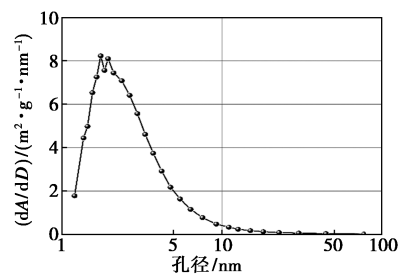
### 2.3 比表面积和孔径分布分析

从图 2 可知, 普通磁种的孔径主要分布在 3~6 nm 之间, 而表面改性后的磁种的孔径主要分布在 2~5 nm 之间, 孔径明显变小。由表 2 可知, 改性磁种相比普通磁种具有更大的孔容, 普通磁种单点法孔容和 t-plot 微孔孔容分别为 0.002 847 cm<sup>3</sup>/g 和 0.000 526 cm<sup>3</sup>/g, 改性磁种单点法孔容和 t-plot 微孔孔容分别为 0.092 874 cm<sup>3</sup>/g 和 0.002 976 cm<sup>3</sup>/g, 这种小孔径大孔容的特点更有利于磁种对水中污染

物的进行吸附。



(a) 普通磁种孔径分布



(b) 改性磁种孔径分布

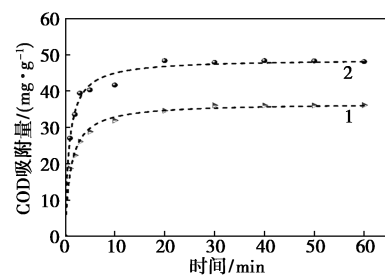
图 2 普通磁种和改性磁种的孔径分布图

表 2 磁种改性前后孔容对比

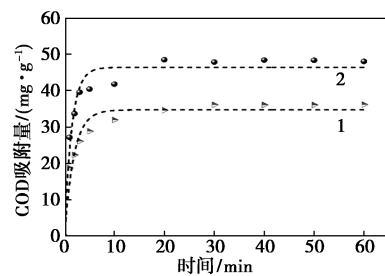
磁种	单点法孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	t-plot 微孔孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )
普通磁种	0.002847	0.000526
改性磁种	0.092874	0.002976

### 2.4 磁种吸附动力学分析

普通磁种和改性磁种对 COD 和石油的准一级吸附动力学模型和准二级吸附动力学模型如图 3、图 4 所示。从



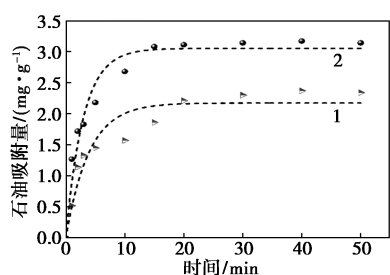
(a) 准一级吸附动力学模型(COD)



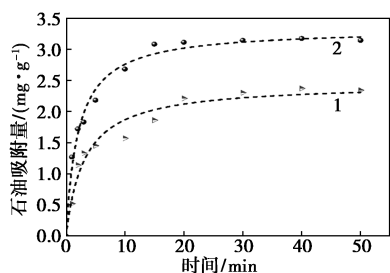
(b) 准二级吸附动力学模型(COD)

1—普通磁种; 2—改性磁种

图 3 准一级和准二级吸附动力学模型(COD)



(a) 准一级吸附动力学模型(石油)



(b) 准二级吸附动力学模型(石油)

1—普通磁种;2—改性磁种

图 4 准一级和准二级吸附动力学模型(石油)

中可以看出,前 5 min 吸附速率很快,15 min 后,随着磁种吸附饱和,吸附量趋于平衡;其中改性磁种在 13 min 时,吸附效果开始出现平稳趋势,进而达到平衡。

表 3 为准一级动力学模型、准二级动力学模型相关参数。从表 3 中可以看出,准一级动力学模型和准二级动力学模型将普通磁种对 COD 的吸附过程拟合后相关系数  $R^2$  为 0.93、0.97;改性磁种对 COD 的吸附过程拟合后相关系数  $R^2$  为 0.95、0.99。

表 3 准一级动力学模型、准二级动力学模型  
相关参数(COD)

磁种 类型	实验吸 附量/mg	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
		$R^2$	$Q_e$	$K_1$	$R^2$	$Q_e$	$K_2$
普通磁种	36.11	0.93	34.70	0.533	0.97	36.7	0.023
改性磁种	48.39	0.95	46.36	0.700	0.99	48.8	0.024

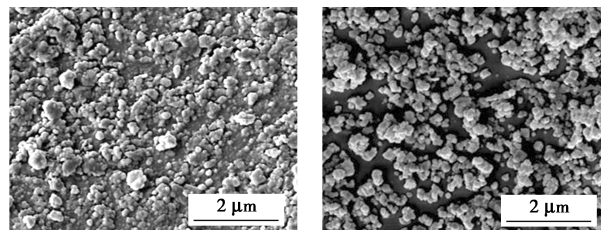
表 4 为准一级动力学模型、准二级动力学模型相关参数(石油)。从表 4 中可以看出,普通磁种对石油的吸附过程拟合后相关系数  $R^2$  为 0.92、0.96;改性磁种对石油的吸附过程拟合后相关系数  $R^2$  为 0.95、0.98。磁种的准二级动力学模型  $R^2$  更大,拟合度更高。准二级吸附动力学模型更符合普通磁种和改性磁种吸附 COD 和石油的过程。

表 4 准一级动力学模型、准二级动力学模型  
相关参数(石油)

磁种 类型	实验吸 附量/mg	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
		$R^2$	$Q_e$	$K_1$	$R^2$	$Q_e$	$K_2$
普通磁种	2.4	0.92	2.17	0.256	0.96	2.45	0.130
改性磁种	3.2	0.95	3.05	0.337	0.98	3.33	0.145

### 2.5 表征分析

图 5 为磁种 SEM 图。如图 5 所示,普通磁种主要呈球形,其特点是粒径小且分散性强。相比之下,改性磁种表现出不规则的颗粒状形态,具有不同的颗粒大小,普遍存在较大的颗粒,表面凹凸不平,且有许多微小的孔隙。改性磁种表面覆盖一层铁的氧化物,导致其表面形貌发生转变。改性磁种的多孔、粗糙和异质特性为随后的实验奠定了基础。

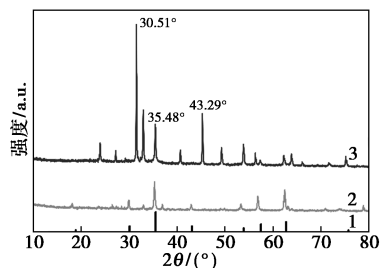


(a) 普通磁种的 SEM 图

(b) 改性磁种的 SEM 图

图 5 普通和改性磁种的 SEM 图

图 6 为磁种 XRD 谱图。从图 6 可知,改性磁种的特征峰位于  $2\theta = 30.51^\circ$ 、 $35.48^\circ$ 、 $43.29^\circ$ ,分别对应(220)、(311)、(400)晶面。与  $Fe_3O_4$  的标准衍射光谱相比,普通磁种的特征峰与其相对应;而改性磁种的特征峰发生改变,表明磁种改性成功。与改性磁种的衍射光谱相比,可以看出普通磁种的衍射峰强度较弱,主要是因为小粒径和光滑表面的磁种晶面减小,导致微弱的衍射峰变得更加不明显甚至消失。普通磁种改性后,峰高明显增加,峰形变得更尖锐,分辨率提高,微弱的衍射峰也变得更加明显。改性磁种三个强峰表明其具有良好的结晶度,由于比表面积和孔隙的增大,污染物与  $Fe_3O_4$  晶面碰撞时具有更好的吸附性能。



1— $Fe_3O_4$ (PDF#26-1136);2—普通磁种;3—改性磁种

图 6 XRD 光谱图

### 3 结论

利用改性磁种通过磁絮凝处理含油废水以及吸附剂再生试验可以得到以下结论。

(1)去除含油废水中污染物的最佳条件为:磁种 3 g,絮凝剂聚合氯化铝浓度 250 mg/L,助凝剂聚丙烯酰胺浓度 2 mg/L,沉降时间 6 min, pH 为 7,水温为 25℃。

(2)最佳条件下,改性磁种对 COD 和石油去除效果明显, COD 与石油去除率分别为 75.6%、93.8%。通过对使用后磁种的再生性能分析,再生实验满足《碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》(SY/T 5329—2012)的回注水标准。

(3)通过表面形态分析发现,普通磁种主要呈球形,粒径较小,表面较光滑。而改性磁种多为不规则的块状,粒径大小不均匀,表面粗糙。改性磁种小孔径大孔容的结构特点使磁种具有更高的吸附量,更快达到吸附平衡。

(4)通过拟合吸附动力学模型发现,拟二阶动力学模型更适合磁种的吸附,说明吸附反应包含物理吸附和化学吸附,其中化学吸附对吸附效果影响很大。

### 参考文献

- [1] Liu D, Wang P, Wei G, *et al.* Removal of algal blooms from freshwater by the coagulation-magnetic separation method [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(1): 60-65.
- [2] 余洋,何梦婷,李瑞,等.重力驱动油水分离膜的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(18): 22-31.
- [3] Bai Z, Wang H, Tu S. Oil-water separation using hydrocyclones enhanced by air bubbles [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89(1): 55-59.
- [4] Hoseini S M, Salarirad M M, Moghaddam M R A. TPH removal from oily wastewater by combined coagulation pretreatment and mechanically induced air flotation [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 53(2): 300-308.
- [5] Santo C E, Vilar V J P, Botelho C M S, *et al.* Optimization of coagulation-flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 183: 117-123.
- [6] Pendashteh A R, Abdullah L C, Fakhru'l-Razi A, *et al.* Evaluation of membrane bioreactor for hypersaline oily wastewater treatment [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2012, 90(1): 45-55.
- [7] 王冰,李婷,李嘉妮,等.电混凝-电催化氧化耦合法处理油田采出水实验研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(6): 80-84.
- [8] Motta A, Borges C, Esquerre K, *et al.* Oil produced water treatment for oil removal by an integration of coalescer bed and microfiltration membrane processes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 469: 371-378.
- [9] Ye H, Chen L, Kou Y, *et al.* Influences of coagulation pretreatment on the characteristics of crude oil electric desalting wastewaters [J]. *Chemosphere*, 2021, 264: 128531.
- [10] Sun P, Hui C, Bai N, *et al.* Revealing the characteristics of a novel bioflocculant and its flocculation performance in *Microcystis aeruginosa* removal [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 17465.
- [11] Goswami G, Kumar R, Sinha A, *et al.* A low-cost and scalable process for harvesting microalgae using commercial-grade flocculant [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(67): 39011-39024.
- [12] Gou S, Li S, Feng M, *et al.* Novel biodegradable graft-modified water-soluble copolymer using acrylamide and konjac glucomannan for enhanced oil recovery [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(4): 942-951.
- [13] Liu Y, Yang J, Jiang W, *et al.* Experimental studies on the enhanced performance of lightweight oil recovery using a combined electrocoagulation and magnetic field processes [J]. *Chemosphere*, 2018, 205: 601-609.
- [14] Pinto J, Athanassiou A, Fragouli D. Surface modification of polymeric foams for oil spills remediation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 872-889.
- [15] Lu J, Liu X, Zhang T C, *et al.* Magnetic superhydrophobic polyurethane sponge modified with bioinspired stearic acid@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@PDA nanocomposites for oil/water separation [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 624: 126794.
- [16] Jiang C, Wang R, Ma W. The effect of magnetic nanoparticles on *Microcystis aeruginosa* removal by a composite coagulant [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 369(1/3): 260-267.
- [17] Farahat M M, Abdel Khalek M A, Sanad M M S. Affordable and reliable cationic-anionic magnetic adsorbent: Processing, characterization, and heavy metals removal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 360: 132178.
- [18] 庞艳华,丁永生,公维民.紫外分光光度法测定水中油含量[J]. *大连海事大学学报*, 2002(4): 68-71.
- [19] 邱婧伟,于国峰,赵静,等.低污染低成本 COD 快速测定方法的研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(8): 129-132.
- [20] Ganjidoust H, Tatsumi K, Wada S, *et al.* Role of peroxidase and chitosan in removing chlorophenols from aqueous solution [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(10): 151-159.
- [21] Zheng H, Zhu G, Jiang S, *et al.* Investigations of coagulation-flocculation process by performance optimization, model prediction and fractal structure of flocs [J]. *Desalination*, 2011, 269(1/3): 148-156.
- [22] Jia H, Liu W, Wang J, *et al.* Optimization of sensing performance in an integrated dual sensors system combining microbial fuel cells and upflow anaerobic sludge bed reactor [J]. *Chemosphere*, 2018, 210: 931-940. ■