

新型仿生磁性纳米破乳剂的制备及其性能研究

蔡苗苗^{1,2*}, 杜金泽¹

(1.天津大学浙江研究院,浙江 宁波 315200;
2.宁波市绿色石化碳减排技术与装备重点实验室,浙江 宁波 315200)

摘要:针对磁性破乳剂存在表面改性层易脱落从而导致回收性能差的问题,提出了在 Fe_3O_4 纳米颗粒表面仿生改性接枝聚醚表面活性剂的解决方案。对比了聚多巴胺改性 Fe_3O_4 ($\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$)以及聚多巴胺仿生粘附聚醚改性 Fe_3O_4 ($\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$)两种磁性破乳剂的破乳效果,并研究了磁性破乳剂浓度、破乳时间和破乳温度对其破乳效果的影响。研究表明,当 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 用量为600 mg/L、破乳时间为80 min以及破乳温度为60℃时,其破乳效率最高,可达99.55%。此外,对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 进行回收实验, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 前8次的破乳效率均在99%以上,证明其具备优异的循环利用性以及破乳效率。

关键词:仿生;磁性破乳剂;聚醚;破乳;回收

中图分类号:TQ423.99

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)05-0171-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.05.028

Preparation of novel bionic magnetic nano-demulsifier and study on its properties

CAI Miao-miao^{1,2*}, DU Jin-ze¹

(1.Zhejiang Institute of Tianjin University, Ningbo 315200, China; 2.Ningbo Key Laboratory of Green Petrochemical Carbon Dioxide Emission Reduction Technology and Equipment, Ningbo 315200, China)

Abstract: Focusing on the problem that the surface modification layer of magnetic demulsifier is easy to fall off, which leads to poor recovery performance, a surface bionic modification solution that grafts polyether surfactant on the surface of Fe_3O_4 nanoparticles is proposed. The demulsification effects of polydopamine modified Fe_3O_4 ($\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$) and polydopamine bionic adhesion polyether modified Fe_3O_4 ($\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$) are compared, and the influences of magnetic demulsifier concentration, demulsification time and demulsification temperature on the demulsification effect are studied. Demulsification experiment results show that the best demulsification efficiency, 99.55%, is realized when the dosage of $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ is 600 mg·L⁻¹, the demulsification time is 80 min, and the demulsification temperature is 60℃. In addition, the recovery experiments are conducted for $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ to compare their recyclable performance. The demulsification efficiency of $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ remains above 99% in the first 8 times, proving its excellent recyclable performance and demulsification efficiency.

Key words: bionic; magnetic demulsifier; polyether; demulsification; recycling

石油作为“工业血液”,一直是人类社会生存与发展的重要支撑。然而,伴随着油田开采的不断深入以及二次或三次采油技术的推广使用,各大油田开采过程中产生的油水乳液中的含水量不断提高,导致乳化现象严重,处理不当则会对环境造成严重污染^[1]。化学破乳(表面活性剂)是当前油水乳液的主流处理方式。目前化学破乳剂主要包括阴离子型破乳剂、阳离子型破乳剂和非离子型破乳剂,其中非离子型破乳剂应用最为广泛,非离子型破乳剂中的嵌段聚醚类破乳剂种类众多且破乳效果较好^[2]。然而,嵌段聚醚类破乳剂存在无法回收的缺陷。

随着纳米材料技术迅速发展,各种基于纳米材料的处理剂广泛应用于石油化工行业。大比表面积

的纳米材料具备表面效应、宏观量子隧道效应、量子尺寸效应等特殊效应^[3]。其中表面效应是指当固体颗粒的半径减小到纳米尺度以及比表面积增大时会增加固体颗粒表面能,使其表现出强化学性和强吸附性能。基于纳米材料的这个特性,石油化工油水分离领域的研究者们对其展开研究。纳米破乳剂分为磁性纳米破乳剂和非磁性纳米破乳剂。磁性纳米破乳剂相比非磁性纳米破乳剂,不仅具备优异的化学性能和吸附性能,还可通过磁回收重复利用,因此更具应用前景^[4-5]。然而,目前市面上常规的破乳剂对油水乳液破乳效率低且破乳时间长。因此,有必要探寻一种破乳效率高的磁性纳米破乳剂。

Fe_3O_4 颗粒具有制备简单、成本低、相容性好等

收稿日期:2024-07-26;修回日期:2025-03-10

基金项目:宁波市绿色石化碳减排技术与装备重点实验室开放基金项目(ZITJU2023-ZYDK011)

作者简介:蔡苗苗(1997-),女,硕士,研究方向为含油废水处理,通讯联系人,Cnm0344@163.com。

特点,但未进行改性的 Fe_3O_4 纳米颗粒破乳性能不强。贾新磊等^[6]将功能化后的碳纳米管(CNTs)和 Fe_3O_4 进行复合,通过溶剂热法制备磁性破乳剂 CNTs/ Fe_3O_4 ,在循环利用 4 次后破乳效率仍然可达 91.43%。涂福琳等^[7]在磁化破乳剂上枝接聚乙烯亚胺(PEI),改善了其表面润湿性,制备得到 Fe_3O_4 -PEI 磁化破乳剂, Fe_3O_4 -PEI 使用 2 h 后破乳效率仍可达到 98.3%。但上述破乳剂存在改性层易脱落从而导致回收性能差的问题。

本文利用仿生聚多巴胺(PDA)粘附磁性纳米颗粒对其进行表面改性,该法具备操作简单、条件温和、无污染等优点。随后对 PDA 粘附磁性纳米颗粒进行功能化设计,将 PDA 分子中的氨基和邻苯二酚同时与表面活性剂分子形成氢键结合,将表面活性剂牢牢固定在磁性纳米颗粒表面,实现表面改性的同时,防止其脱落,以提高磁性纳米破乳剂的重复利用率。研究磁性破乳剂浓度、破乳时间、破乳温度以及回收次数对破乳剂破乳效果的影响,并探讨了磁性破乳剂的破乳机理,为其工程性应用提供理论指导。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:司班 80(SP-80,CP)、无水乙醇(AR),国药集团化学试剂有限公司; Fe_3O_4 (AR)、盐酸多巴胺(DA,98%)、丙酮(AR),上海阿拉丁生物化工科技有限公司;乙二醇嵌段聚醚(EDEP,99%),临析绿森;柴油(DO),浙江石油化工有限公司;超纯水,实验室自制。所有化学产品均未经进一步纯化。

仪器:透射电镜(TEM),日本电子株式会社;显微红外光谱仪(FT-IR),德国布鲁克公司;高分辨 X 射线衍射仪(XRD),日本理学;卡尔费休水分仪,瑞士梅特勒-托利多;纯水机,四川优普超纯科技有限公司;超声清洗机,宁波新芝。

1.2 实验方法

1.2.1 磷酸盐缓冲溶液的制备

将 6.76 g 的磷酸氢二钠和 0.288 g 磷酸二氢钠在 100 mL 的超纯水里搅拌至溶解,装入 1 L 的容量瓶,用超纯水定容至 1 L,制备得到 pH=8.5 的磷酸盐缓冲溶液(PS),放置备用,保质期两周。

1.2.2 Fe_3O_4 @PDA 的制备

如图 1 所示,将 0.15 g 的 PDA 投入 400 mL 的 PS 溶液搅拌溶解后,加入 0.2 g 的 Fe_3O_4 并超声分散 5 min,在 100 r/min 下黑暗有氧搅拌 24 h,用乙醇

和水交替清洗 3 次后通过磁分离制备得到 Fe_3O_4 @PDA,在 45℃ 真空干燥 2 h,存放备用。

1.2.3 Fe_3O_4 @PDA-EDEP 的制备

如图 1 所示,将 0.15 g Fe_3O_4 @PDA 投入 200 mL PS 溶液搅拌均匀,加入 0.15 g 的 EDEP。在 100 r/min、365 nm 紫外光照射下有氧搅拌 2 h,用乙醇和水交替清洗 3 次后通过磁分离制备得到 Fe_3O_4 @PDA-EDEP,在 45℃ 真空干燥 2 h,存放备用。

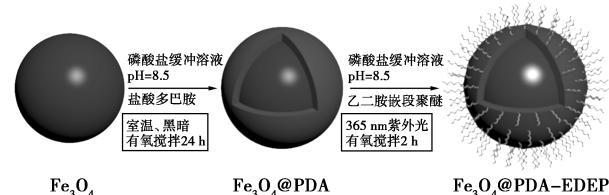


图 1 Fe_3O_4 @PDA-EDEP 的制备示意图

1.3 破乳测试

首先配制质量分数 5%(柴油:水)的柴油乳液,采用瓶试法对仿生磁性纳米破乳剂的破乳性能进行评估^[5]。首先,将 40 mL 乳液分别加入 100 mL 的带编号具塞比色管中。具塞比色管中分别加入一定量的磁性纳米破乳剂,其中一支不加破乳剂作为空白对照。将这些具塞比色管放入 60℃ 水浴加热 5 min,并在 1 min 内充分摇晃使破乳剂与原油乳液混合均匀。以破乳剂浓度、破乳时间、破乳温度为变量,记录不同状态的破乳效果。使用公式计算原油乳状液的破乳效率:

$$R = (1 - C_1/C_0) \times 100\%$$

式中: R 为破乳效率,%; C_0 和 C_1 分别为破乳前后的乳液含油量,%。

1.4 磁性破乳剂回收测试

在每次破乳实验结束后,通过磁分离回收仿生磁性纳米破乳剂,用丙酮对回收产物进行超声清洗 10 min,之后同样通过磁分离回收破乳剂,洗涤 2~3 次后,将破乳剂置于 45℃ 真空烘箱干燥 8 h,重复下一次破乳实验。

2 结果与讨论

2.1 磁性破乳剂的表征

2.1.1 TEM 分析

通过 TEM 表征可以直观获得磁性破乳剂的表面形貌、尺寸和结构。从图 2(a)中可以看到,原始 Fe_3O_4 纳米颗粒呈不规则形貌,尺寸在 100~500 nm。同时发现 Fe_3O_4 纳米颗粒之间分散性较差,出现团聚现象。如图 2(b)所示,经过 PDA 表面

改性后, Fe_3O_4 纳米颗粒表面附着一层 PDA 层, 该层厚度约为 100~200 nm, 由于 PDA 层为两亲性且具备二次粘附性, 为 Fe_3O_4 纳米颗粒表面提供了一定空间位阻的同时有利于进一步改性。如图 2(c) 所示, 经过 EDEP 改性过后, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的分散性得到进一步提高, 这将更有益于其分散在油水两性界面, 改善破乳效率。

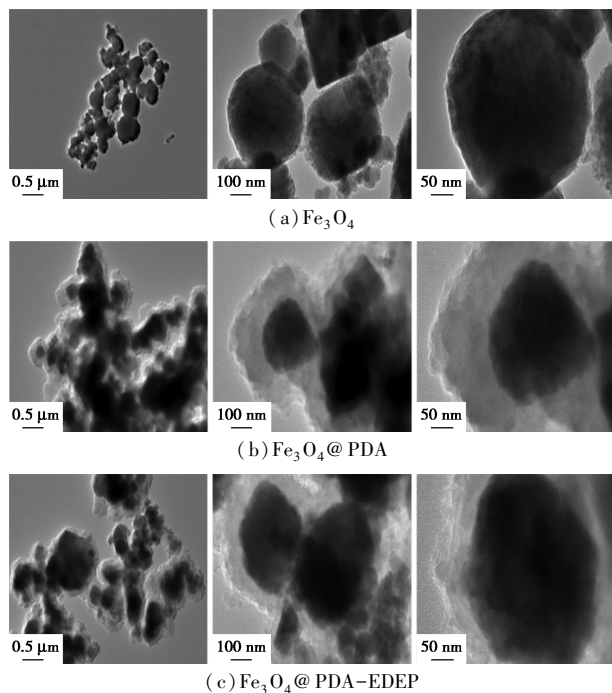
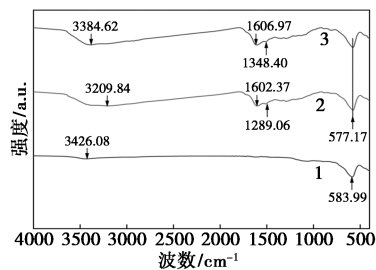


图 2 Fe_3O_4 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的 TEM 图

2.1.2 FT-IR 分析

图 3 为磁性纳米破乳剂的 FT-IR 谱图。由图 3 可知, 3426.08 cm^{-1} 处为羟基的伸缩振动峰, 583.99 cm^{-1} 处为属于强 Fe-O 吸收带的伸缩振动峰^[7]。PDA 在 Fe_3O_4 表面负载过后并未掩盖 Fe_3O_4 的 Fe-O 键伸缩振动峰, 仅发生轻微偏移, 特征峰位于 577.17 cm^{-1} 。 1289.06 cm^{-1} 和 1602.37 cm^{-1} 处特征峰分别为 PDA 的 C-O-C 拉伸振动和 C-CH_2 的拉伸振动,



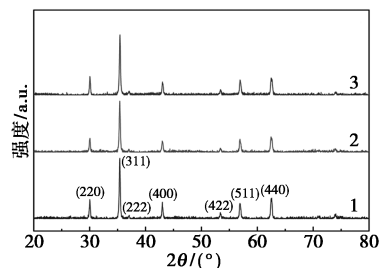
1— Fe_3O_4 ; 2— $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$; 3— $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$

图 3 Fe_3O_4 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的 FT-IR 谱图

3209.84 cm^{-1} 处峰为 N-H 的伸缩振动。这说明 PDA 纳米层在 Fe_3O_4 表面上成功负载。经过 EDEP 的进一步改性后, 1289.06 cm^{-1} 和 1602.37 cm^{-1} 处特征峰偏移到 1348.40 cm^{-1} 和 1606.97 cm^{-1} , 此外, N-H 的伸缩振动峰偏移到 3384.62 cm^{-1} , 分析属于 EDEP 上的氨基与 PDA 上的氨基发生强氢键连接, 证明 EDEP 成功修饰到 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 表面。

2.1.3 XRD 分析

Fe_3O_4 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的 XRD 图谱如图 4 所示。样品的衍射峰出现在 30.23° 、 35.50° 、 37.10° 、 43.15° 、 53.40° 、 56.90° 和 62.45° 处, 分别对应 Fe_3O_4 的 (220)、(311)、(222)、(400)、(422)、(511) 和 (440) 晶面, 所得结果与 Fe_3O_4 的标准物质卡一致, 且图中没有其他杂峰出现, 结晶度良好, 纯度很高^[8]。 Fe_3O_4 的衍射峰强度高于 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$, 其原因是 PDA 附着于 Fe_3O_4 表面, 使结晶粒子尺寸发生了变化。 EDEP 进一步包裹后的 Fe_3O_4 纳米颗粒仍具有高结晶度和纯度, 可用于顺利开展实验。



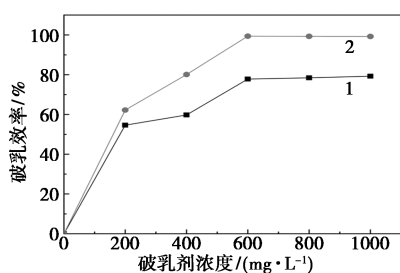
1— Fe_3O_4 ; 2— $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$; 3— $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$

图 4 Fe_3O_4 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的 XRD 图谱

2.2 破乳影响因素

2.2.1 磁性破乳剂质量浓度

图 5 为破乳时间 80 min 和破乳温度 60°C 时, 不同 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 质量浓度对破乳效率的影响。由图 5 可以看出, 磁性破乳剂质量浓度 $0\sim 1000 \text{ mg/L}$ 时, 破乳效率逐渐增大并趋于平稳。当破乳剂质量浓度为 600 mg/L 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的破乳效率分别为 77.82% 和 99.28%。经过 EDEP 进一步接枝改性后, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 表面的亲水性得到改善, 在油水界面的分散性得到提高。因此相比 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的破乳效率提升超过 20%。当破乳剂质量浓度进一步增加, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA-EDEP}$ 的破乳效率并未提高, 说明破乳剂质量浓度 600 mg/L 最佳。

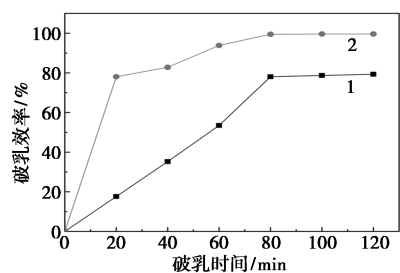


1—Fe₃O₄@PDA; 2—Fe₃O₄@PDA-EDEP

图 5 不同质量浓度下 Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 的破乳效率

2.2.2 破乳时间

图 6 是以破乳时间作为变量,固定磁性破乳剂质量浓度 600 mg/L 和破乳温度 60℃, Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 破乳效率的变化趋势。如图 6 所示, Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 的破乳效率随着破乳时间的增加而上升。在破乳时间为 80 min 时, Fe₃O₄@PDA-EDEP 的破乳效率达到 99% 以上,破乳时间进一步增加,破乳效率趋于平稳。

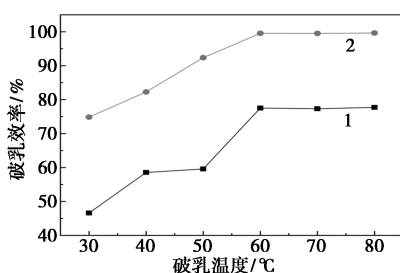


1—Fe₃O₄@PDA; 2—Fe₃O₄@PDA-EDEP

图 6 不同破乳时间下 Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 的破乳效率

2.2.3 破乳温度

图 7 为破乳剂质量浓度 600 mg/L 和破乳时间 80 min 时,不同破乳温度对 Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 破乳效率的影响。由图 7 可以看出,随



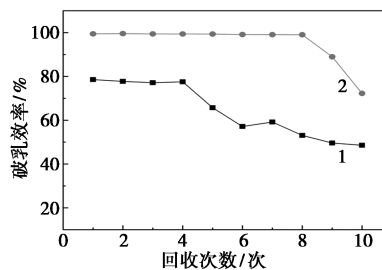
1—Fe₃O₄@PDA; 2—Fe₃O₄@PDA-EDEP

图 7 不同破乳温度下 Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 的破乳效率

着温度升高,破乳效率也在上升,并且在 60℃ 时, Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 的破乳效率分别达到 77.53% 和 99.55%。当温度继续上升并达到 80℃ 时, Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 的破乳效率分别为 77.73% 和 99.63%, 相比 60℃ 时并未有太大提升,因此选择最佳破乳温度为 60℃。

2.2.4 循环利用性

循环利用性实验的破乳剂投加量为 600 mg/L、破乳温度为 60℃、处理时间为 80 min, Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 循环 10 次处理乳液的破乳效果如图 8 所示。Fe₃O₄@PDA 的破乳效率由最初的 78.57% 下降到第 5 次时的 65.71%, 之后越来越低, 到第 10 次时降到 48.57%。而经过 EDEP 进一步改性的 Fe₃O₄@PDA-EDEP 破乳效率最初为 99.45%, 第 8 次时仍大于 99%, 在第 9 次时下降到 88.98%, 这归因于乳液中的油相组分吸附在磁性破乳剂表面, 使 Fe₃O₄@PDA-EDEP 失去了破乳作用。PDA 仿生粘附 EDEP 可以提高表面活性剂在磁性纳米颗粒表面的接枝强度, 因此 Fe₃O₄@PDA-EDEP 展现出优异的循环利用性, 回收次数可达 8 次, 在一定程度上降低了生产成本, 有利于保护环境。



1—Fe₃O₄@PDA; 2—Fe₃O₄@PDA-EDEP

图 8 Fe₃O₄@PDA 和 Fe₃O₄@PDA-EDEP 的循环利用性

2.2.5 破乳机理

Fe₃O₄ 在磁场作用下会相互吸附, 形成磁性团簇。而在经过表面活性剂改性后, Fe₃O₄ 表面的空间位阻得到增强, 使磁性破乳剂更易分散在乳液中。Fe₃O₄@PDA-EDEP 中的表面活性剂成分能够吸附到乳液的油/水界面上, 取代原来的乳化剂分子, 从而改变它们的润湿性能^[9]。这种吸附作用会降低油水界面膜的强度, 使得乳液中的细小油滴更容易聚并成大液滴。随着液滴的聚并和增大, 油相和水相之间的界限变得更加清晰。在重力和磁场力的共同作用下, 油相和水相会逐渐分离, 从而实现破乳的目的。

(下转第 182 页)

Cu(II)和Pb(II)为物理化学协同作用,主要表现为与地聚合物四面体结构中的 Na^+ 进行离子交换;对Cr(VI)吸附为物理吸附,表现为带正电的吸附剂与带负电的 HCrO_4^- 通过静电力及络合作用吸附。本文制备的地聚合物吸附剂在为高炉镍铁渣资源化利用提供新思路的同时,还达到了以废治废的目的,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] Maleki A, Hajizadeh Z, Sharifi V, et al. A green porous and eco-friendly magnetic geopolymer adsorbent for heavy metals removal from aqueous solutions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 1233–1245.
- [2] Liang K, Yang G, Wang X Q, et al. Development of effective porous geopolymer adsorbent with high strength for Cu^{2+} removal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 449: 141752.
- [3] Fei Y, Hu Y H. Recent progress in removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review [J]. *Chemosphere*, 2023, 335: 139077.
- [4] Saleh T A, Mustaqeem M, Khaled M. Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review [J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2022, 17: 100617.
- [5] Rajendran S, Priya A K, Kumar P S, et al. A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater: A review [J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 135146.
- [6] Xiang H, Min X, Tang C J, et al. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 103023.
- [7] Hu X, Yan L, Wang Y, et al. Self-assembly of binary oppositely charged polysaccharides into polyelectrolyte complex hydrogel film

(上接第 174 页)

3 结论

本研究通过操作简单、条件温和、无污染的溶液浸渍表面改性法制备了一种新型仿生磁性纳米破乳剂 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}-\text{EDEP}$ 。实验表明, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}-\text{EDEP}$ 在破乳剂质量浓度 600 mg/L 、破乳时间 80 min 、破乳温度 60°C 时可有效破坏乳液的稳定结构,实现油水高效分离,其破乳效率最高可达 99.55% ,显著优于传统破乳剂。在外部磁场的作用下可实现循环回收利用,最高可回收利用 8 次,且破乳效率均大于 99% ,说明 $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}-\text{EDEP}$ 具有良好的循环利用性。

参考文献

- [1] 杨瑞,张翻.含油废水处理技术进展[J].*当代化工*,2018,47(8):1695–1697,1701.

for facile and efficient Pb^{2+} removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 388: 124189.

- [8] 李望,白雪雨,朱晓波.以赤泥为原料制备聚合铝铁絮凝剂进行高浊度废水处理的综合性实验[J].*实验技术与管理*,2022,39(1):126–129.
- [9] Nafi A W, Taseidifar M. Removal of hazardous ions from aqueous solutions: Current methods, with a focus on green ion flotation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115666.
- [10] Yang L, Hu W, Chang Z, et al. Electrochemical recovery and high value-added reutilization of heavy metal ions from wastewater: Recent advances and future trends [J]. *Environment International*, 2021, 152: 106512.
- [11] 龙雪莲,刘品祯,石开仪,等.核桃壳制备生物炭及其对矿井水中铜、锌、铬离子的吸附研究[J].*河南化工*,2024,41(6):5–8,14.
- [12] Elboughdiri N. The use of natural zeolite to remove heavy metals Cu(II), Pb(II) and Cd(II), from industrial wastewater [J]. *Cogent Engineering*, 2020, 7(1): 1782623.
- [13] Mariana M, HPS A K, Mistar E M, et al. Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 43: 102221.
- [14] Ghani U, Hussain S, Imtiaz M, et al. Laterite clay-based geopolymer as a potential adsorbent for the heavy metals removal from aqueous solutions [J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2020, 24(11): 874–884.
- [15] Cilla M S, Colombo P, Morelli M R. Geopolymer foams by gelcasting [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(4): 5723–5730.
- [16] 邵周军,周新涛,黄静,等.电炉镍铁渣在化学键合陶瓷材料中的应用研究现状与展望[J].*现代化工*,2020,40(8):44–48.
- [17] Sindhunata, Deventer J V, Lukey G C, et al. Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2006, 45(10): 3559–3568. ■

- [2] 王众.聚醚类原油破乳剂的改性及其性能的研究[D].石河子:石河子大学,2019.
- [3] Al-Janabi O Y T, Abdulkareem H A, Waheed I F, et al. $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{SiO}_2$ functionalized PEG-PPG-PEG triblock copolymer-grafted graphene oxide as novel magnetic nanodemulsifier for water-in-crude oil emulsion separation [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 676: 132228.
- [4] 黄志明.纳米破乳剂的制备及其在原油乳液中的破乳性能研究[D].荆州:长江大学,2019.
- [5] 李哲,张临,刘超,等.磁性碳纳米球破乳剂的制备及性能研究[J].*现代化工*,2021,41(12):146–149.
- [6] 贾新磊,李哲,常小妮,等.CNTs/ Fe_3O_4 磁性破乳剂的制备及性能研究[J].*油田化学*,2022,39(2):360–365.
- [7] 涂福琳,于小荣,魏晓静,等. $\text{Fe}_3\text{O}_4-\text{PEI}$ 磁化破乳剂的制备及性能研究[J].*合成化学*,2020,28(12):1065–1069.
- [8] 龙彪.磁性纳米破乳剂的制备及其对含固体颗粒原油乳液的破乳研究[D].大庆:东北石油大学,2022.
- [9] Husain A, Al-Harhi M A. Chemical treatment of oilfield wastewater and the effect of temperature on treatment efficiency: A review [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 220: 111089. ■