

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.017

Fe³⁺/Fe²⁺对MNPs催化芬顿反应和回收性能的影响

王浩羽¹, 高诗¹, 张大奕², 孙建鸿³, 宋建昕⁴, 彭铮⁴,
谢恩¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130021; 3. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125; 4. 株洲市城市排水有限公司, 湖南 株洲 412005)

摘要: 采用磁性纳米颗粒(MNPs)催化类芬顿反应来降解有机物已被广泛应用,但关于Fe³⁺/Fe²⁺(物质的量之比)对磁性纳米颗粒催化性能和磁回收性能差异的研究较少。基于此,通过共沉淀法合成了3种不同Fe³⁺/Fe²⁺的MNPs,并用其催化类芬顿体系降解溴化乙锭(EtBr),分析pH、催化剂投加量和H₂O₂投加量对系统催化效率的影响,并讨论了3种MNPs的重复利用性能。结果表明,pH对系统的催化效率有显著影响($p < 0.05$),同时发现在碱性条件下EtBr也出现了一定程度的降解(降解率为38.48%)。Fe³⁺/Fe²⁺为2:1的MNPs(MNPs-A)综合性能最佳,在最佳实验条件下(pH≈3, MNPs投加量为0.5 g/L, H₂O₂投加量为0.05 mol/L),4 h内EtBr的降解率最高可达98.97%,且降解过程符合一级动力学($k=1.1439\text{ h}^{-1}$, $r^2=0.9987$)。经过5次回收循环, MNPs-A依然保持65.49%的催化效率。

关键词: Fe³⁺/Fe²⁺; 磁性纳米颗粒; 芬顿反应; 溴化乙锭; 反应动力学

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0104-07

Effect of Fe³⁺/Fe²⁺ on Catalytic Fenton Reaction and Recycling Performance of MNPs

WANG Hao-yu¹, GAO Shi¹, ZHANG Da-yi², SUN Jian-hong³, SONG Jian-xin⁴,
PENG Zheng⁴, XIE En¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China; 3. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 4. Zhuzhou Urban Drainage Co. Ltd., Zhuzhou 412005, China)

Abstract: Magnetic nanoparticles (MNPs) catalyzed Fenton-like reaction has been widely applied in degrading organic compounds. However, there are few studies on the difference between the catalytic performance and magnetic recovery performance of magnetic nanoparticles under different Fe³⁺/Fe²⁺ ratios (molar ratio). In this study, three kinds of MNPs with different Fe³⁺/Fe²⁺ ratios were synthesized by co-precipitation method, and then were used as catalysts to degrade ethidium bromide (EtBr) in a Fenton-like system. The effects of pH, catalyst dosage and H₂O₂ dosage on the catalytic efficiency of the system were analyzed, and the reuse performance of the three MNPs was discussed. pH had a significant

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0192500)

通信作者: 谢恩 E-mail: xe@cau.edu.cn

effect on the catalytic efficiency of the system ($p < 0.05$), and EtBr was also degraded to a certain extent under alkaline conditions (degradation rate was 38.48%). MNPs with Fe³⁺/Fe²⁺ ratio of 2:1(MNPs-A) had the best comprehensive performance. Under the optimal conditions (pH of 3, MNPs dosage of 0.5 g/L and H₂O₂ dosage of 0.05 mol/L), the degradation rate of EtBr reached 98.97% within 4 h, and the degradation process conformed to the first-order kinetics ($k=1.1439 \text{ h}^{-1}$, $r^2=0.9987$). The MNPs-A still maintained a catalytic efficiency of 65.49% after five recovery cycles.

Key words: Fe³⁺/Fe²⁺; magnetic nanoparticles; Fenton reaction; ethidium bromide; reaction kinetics

高级氧化(AOPs)是目前处理难降解和有毒有害有机废水的常用技术^[1],其中芬顿及类芬顿氧化^[2]因其高效率、低成本^[3]等优点,成为了使用最广泛的高级氧化技术之一。标准的芬顿反应工艺运行简单,但也存在以下缺点:首先,会生成大量的铁泥,因此后续处理费用较高且易造成二次污染^[4];其次,催化剂(Fe²⁺)以液相形式分散于溶液中,只能一次性使用,不符合可持续理念。因此,对可重复使用的异相类芬顿反应体系的研究逐渐受到重视^[5]。

磁性纳米颗粒(MNPs)是异相类芬顿反应最常用的可重复使用催化剂^[6]。由于MNPs具有超顺磁性,因此易被磁场吸引,且在零磁场时磁性可很快消失^[7],具备重复使用潜力。催化过程中,MNPs的特性确保了铁离子不会无序溶出,使催化剂在较宽pH范围内以稳定固态存在;另外,MNPs表面存在羟基($\equiv\text{Fe}-\text{OH}$)作为活性催化点位,可与H₂O₂进行产生氧自由基的链式反应^[5]。在Fe₃O₄对H₂O₂的活化过程中,既存在MNPs表面的异相芬顿过程,也存在溶液中均相芬顿过程,具体取决于pH大小和催化剂的性质^[8]。

在前期研究基础上,笔者探讨了不同Fe²⁺/Fe³⁺(物质的量之比)条件下制备的3种MNPs催化类芬顿反应对目标污染物——溴化乙锭(EtBr)降解效率的影响。EtBr作为一种核酸染料具有强烈的生物毒性,难以用生物方法去除^[9];此外EtBr在紫外线辐照下能够产生高分辨率的荧光,可以显著提高量化降解效率的准确性^[10]。因此,EtBr可以作为理想的有毒有害有机目标污染物。基于此,研究了MNPs的催化性能、微观特性和磁性能对Fe²⁺/Fe³⁺变化的响应效应,评估3种MNPs催化剂的重复利用潜力。同时,为扩大MNPs的应用范围,针对传统芬顿反应pH仅限于酸性的较窄范围,分析了碱性条件下EtBr

的降解效果,旨在为难降解和有毒有害有机废水的高效处理提供一个新思路。

1 材料与方法

1.1 磁性纳米颗粒的合成

3种MNPs均采用共沉淀法合成^[11],以1 mol/L FeCl₃和2 mol/L FeCl₂按不同Fe³⁺/Fe²⁺比例合成3种MNPs(MNPs-A, 2:1; MNPs-B, 1:1; MNPs-C, 1:2)。通过重量法测定MNPs的浓度分别为10.6、11.2和18.5 g/L。

1.2 实验方法

所有实验均在避光、恒温振荡(25 °C, 150 r/min)条件下进行。EtBr初始浓度为100 mg/L, MNPs投加量为0.1~2 g/L。采用HCl或NaOH溶液调节pH。采用H₂O₂启动类芬顿反应。采用荧光分光光度法在激发波长为525 nm、发射波长为600 nm处表征EtBr浓度。为了测试MNPs的重复利用潜力,在最佳条件下(MNPs浓度为1 g/L、H₂O₂浓度为0.05 mol/L、pH=3)进行循环利用实验,共进行5个循环。

采用振动样品磁强计测量磁性纳米颗粒材料的磁性。采用X射线光电子能谱仪(XPS)进行元素分析。采用X射线衍射仪(XRD)测量MNPs的结晶性。

2 结果与讨论

2.1 磁性纳米颗粒表征结果

反应前后MNPs-A、MNPs-B、MNPs-C的磁化曲线如图1所示。可以看出,反应前,MNPs-A、MNPs-B、MNPs-C的饱和磁化强度分别为 33.13×10^{-3} 、 55.45×10^{-3} 、 $78.71 \times 10^{-3} \text{ J}/(\text{T} \cdot \text{g})$ 。反应后MNPs-A的饱和磁化强度与反应前几乎相等,其余两种材料则均显著下降,分别为 33.14×10^{-3} 、 43.86×10^{-3} 、 $55.57 \times 10^{-3} \text{ J}/(\text{T} \cdot \text{g})$ 。此外,磁滞曲线显示,当排除外部磁场的影响后,所有MNPs的矫顽力和剩

余磁化强度约为0,表明MNP_s的磁性可以随着外部磁场的去除而快速消除,该性质有利于MNP_s的回收和再利用。总体来说,合成的MNP_s具有良好的磁分选和回收潜力。

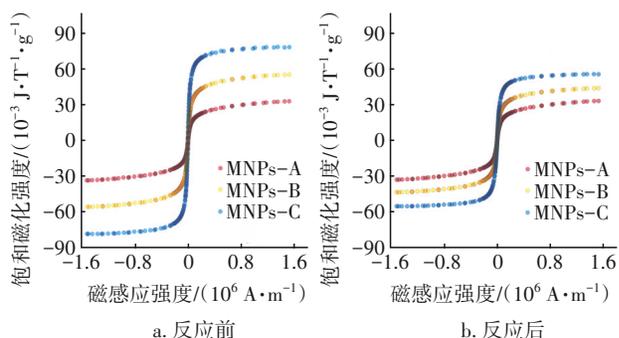


图1 反应前后MNP_s-A、MNP_s-B和MNP_s-C的磁化曲线
Fig.1 Saturated magnetism of MNP_s-A, MNP_s-B and MNP_s-C before and after reaction

图2为MNP_s-A、MNP_s-B和MNP_s-C的XPS图谱。

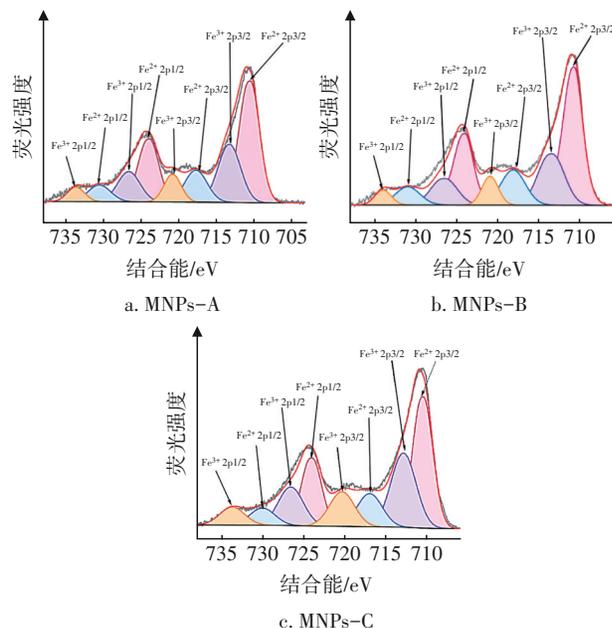


图2 MNP_s-A、MNP_s-B和MNP_s-C的XPS图谱
Fig.2 XPS profiles of MNP_s-A, MNP_s-B and MNP_s-C

Fe₃O₄中同时存在Fe²⁺和Fe³⁺两种价态,结合能为710.45~717.67 eV的峰对应Fe²⁺ 2p_{3/2}轨道;结合能为723.82~730.47 eV的峰对应Fe²⁺ 2p_{1/2}轨道;结合能为713.25~720.77 eV的峰对应Fe³⁺ 2p_{3/2}轨道;结合能为726.57~733.57 eV的峰对应Fe³⁺ 2p_{1/2}轨道^[12]。结合能约为718 eV和732 eV的峰说明MNP_s-A、MNP_s-B、MNP_s-C中存在少量零价铁^[13]或FeOOH^[14]。由Fe³⁺和Fe²⁺的比例可推断,MNP_s主要

由Fe₃O₄和Fe₂O₃构成。其中,MNP_s-A中Fe²⁺比例最高,可达49.95%。由于Fe²⁺是异相芬顿反应中重要的催化离子,因而推测MNP_s-A可能具有最佳催化效果。

MNP_s-A、MNP_s-B和MNP_s-C的XRD图谱如图3所示。通过将MNP_s的XRD图谱与PDF标准卡(JCPDS 88-0866, Fe₃O₄)进行比对后可以发现,30.121°、35.479°、43.119°、53.495°、57.026°、62.622°处分别为Fe₃O₄的(220)、(311)、(400)、(422)、(511)、(440)晶面。这再次说明合成产物的主要晶相为Fe₃O₄。

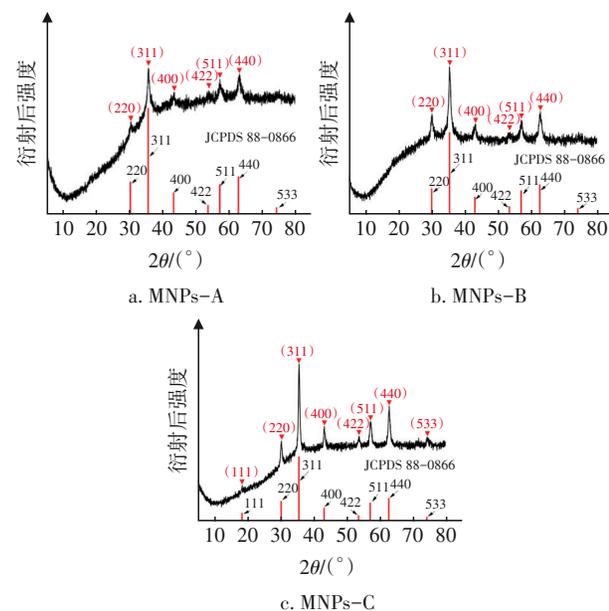


图3 MNP_s-A、MNP_s-B和MNP_s-C的XRD图谱
Fig.3 XRD profiles of MNP_s-A, MNP_s-B and MNP_s-C

2.2 类芬顿体系降解EtBr的反应条件

当EtBr浓度为100 mg/L、MNP_s投加量为0.5 g/L、H₂O₂投加量为0.01 mol/L、pH为1.9~2.1时,分析类芬顿反应的条件,结果如图4所示。可以看出,不同反应条件下,EtBr降解速率存在一定差异,其中仅添加HCl组的EtBr浓度未下降,而类芬顿反应体系实验组的EtBr降解速率最高,6 h后的降解率达到(53.70±5.24)%,显著高于EtBr+MNP_s+HCl组的(14.67±4.20)%和EtBr+H₂O₂+HCl组的(10.39±3.91)%,推测前者EtBr浓度的降低主要是由于MNP_s表面活性点位的吸附作用,而后者可能主要是由于酸性条件下H₂O₂的强氧化性,两组实验对EtBr的降解效果均显著低于MNP_s催化的异相类芬顿反应体系产生的·OH^[5]等活性基团对EtBr的氧化

效果。

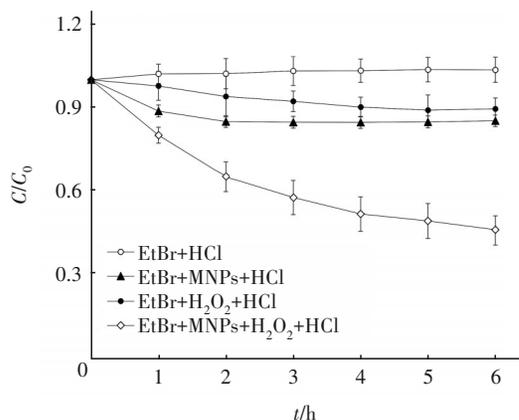


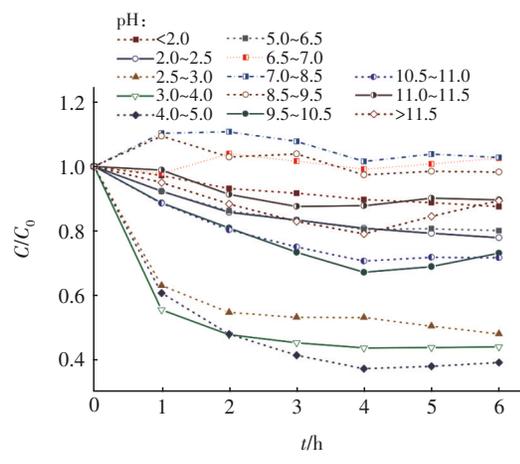
图4 不同反应条件下EtBr降解率的变化

Fig.4 Change of EtBr degradation rates under different reaction conditions

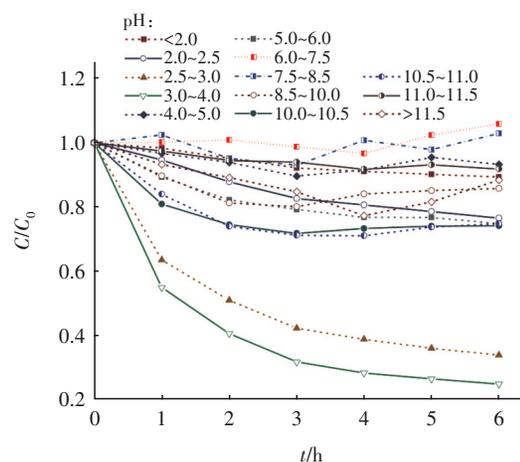
2.3 类芬顿体系降解 EtBr 的影响因素

当3种MNP_s分别作为催化剂时,分析了pH、MNP_s浓度、H₂O₂浓度等因素对类芬顿反应降解率的影响。当H₂O₂投加量为0.05 mol/L、MNP_s投加量为0.5 g/L时,pH对类芬顿反应体系效率的影响见图5。pH是影响EtBr降解的显著因素。总体上看,当pH为2.5~4.0时,系统对EtBr的降解均能取得良好效果(平均降解率为60.53%~80.00%),而中性条件(pH=6.5~8.5)下EtBr几乎不降解。值得注意的是,MNP_s催化系统在碱性条件(pH=10.5~11.0)下取得了意外的降解效果,降解率可以达到38.48%(MNP_s-A组)。

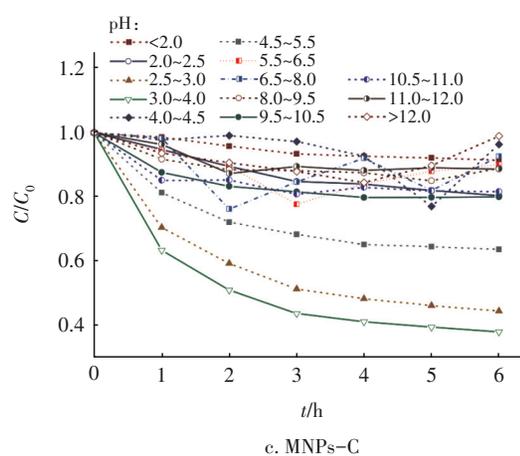
pH被认为是影响类芬顿反应分解率的重要因素^[15],其通过影响MNP_s表面催化点位的活性影响界面反应,并可影响铁离子的存在形式,进而影响离子反应。例如,在中性条件下,Fe²⁺可能会与H₂O₂反应生成Fe(IV)^[16];同时有研究表明^[16],Fe(IV)主要以中间产物形式存在,并且对类芬顿反应并无明显的催化作用。本研究中,pH对EtBr降解率的影响可能与以下因素有关:首先,pH会影响MNP_s中Fe²⁺的溶解度;其次,在不同pH范围内,类芬顿反应产生的活性氧种类不同,且彼此间还原电位差异很大。因此,类芬顿反应的最佳pH范围较小,本研究为2.5~3.5,与前人研究提出的类芬顿反应最适pH相符合^[17]。但本研究中,在碱性条件下观测到EtBr的显著降解,这在以往报道中很少被提及。



a. MNP_s-A



b. MNP_s-B



c. MNP_s-C

图5 pH对EtBr降解率的影响

Fig.5 Effect of pH on EtBr degradation rates

MNP_s投加量对EtBr降解率的影响如图6所示。可知,EtBr降解速率与催化剂投加量在一定范围内存在正相关关系。在pH约为3、H₂O₂投加量为0.05 mol/L条件下,当MNP_s-A投加量为1 g/L时,4 h内EtBr的降解率为98.97%,且反应符合一级动力学过

程($k=1.1439\text{ h}^{-1}$, $r^2=0.9987$)。但更高的MNP投加量对降解EtBr的促进作用并不明显。推测是由于MNP投加量上升导致体系内 Fe^{2+} 催化结合点位增多,有利于链式反应的进行,导致游离自由基含量升高,进而提高了反应速率,但当结合点位达到饱和后,继续提高MNP投加量将不再对反应速率产生影响。结合图6(b)、(c)可以发现,若综合考虑效率和经济成本,该实验条件下的最优MNP投加量为 0.5 g/L 。

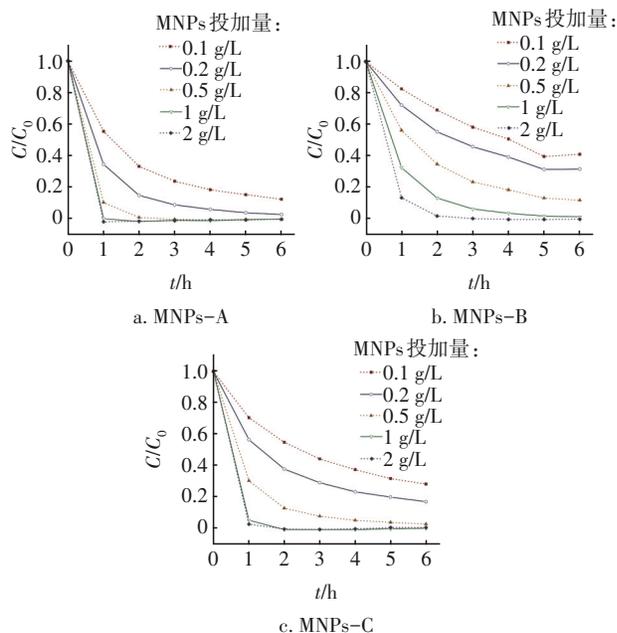


图6 MNP投加量对EtBr降解率的影响

Fig.6 Effect of MNP dosage on EtBr degradation rates

H_2O_2 投加量对EtBr降解率的影响如图7所示。在pH约为3、MNP投加量为 0.5 g/L 的条件下,随着 H_2O_2 投加量的增加,整体上各组反应速率均有不同程度的提高。虽然 H_2O_2 投加量对MNP-C组EtBr降解率的影响不显著($p>0.05$),但对MNP-A组和MNP-B组均有显著影响($p<0.01$),直至 H_2O_2 投加量达到 0.05 mol/L 后反应速率基本保持不变。这是由于 H_2O_2 浓度和 $\cdot\text{OH}$ 的产生量在一定范围内呈线性关系,但当其浓度超过该范围后,较高浓度的 H_2O_2 可能成为链式反应的清除剂,继而导致主反应的速率不再增加甚至降低^[18]。因此,认为最优 H_2O_2 投加量为 0.05 mol/L 。同时,根据MNP-C组的结果可以推测,更高的 Fe^{2+} 比例有助于反应更快达到该实验条件下的平衡,这与已知的芬顿反应机理是契合的。

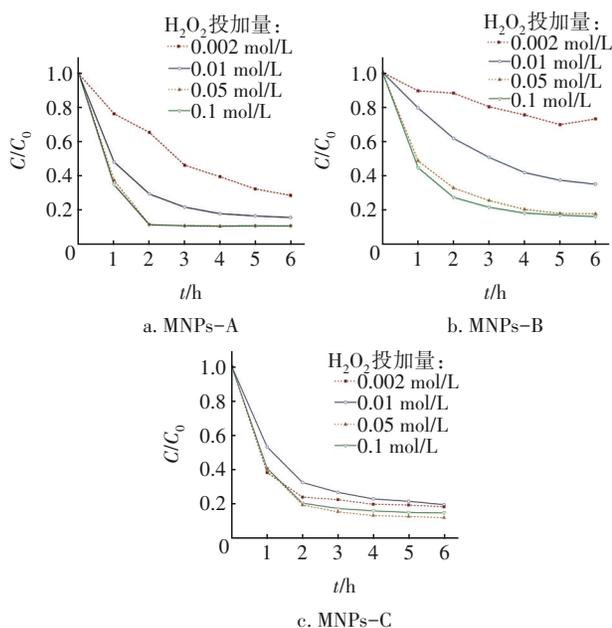


图7 H_2O_2 投加量对EtBr降解率的影响

Fig.7 Effect of H_2O_2 dosage on EtBr degradation rates

2.4 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 对降解EtBr效果的影响

针对 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 对芬顿反应体系性能的影响,比较了最佳反应条件(pH约为3、MNP投加量为 0.5 g/L 、 H_2O_2 投加量为 0.05 mol/L)和碱性条件(pH约为10,其余同最佳条件)下不同催化剂对EtBr降解效果的影响。实验结果表明,在最佳反应条件下,3种催化剂对EtBr均有较高的催化效率[MNP-A、MNP-B、MNP-C组对EtBr的降解率分别为 $(93.50\pm 6.12)\%$ 、 $(82.64\pm 15.08)\%$ 和 $(86.93\pm 12.97)\%$],虽然MNP-A的降解率较高,但通过双尾 t 检验未发现三者之间有显著差异。另一方面,在碱性条件下3种催化剂的催化效率均相对较低,从MNP-A的 $(42.94\pm 14.20)\%$ 降低到MNP-C的 $(22.10\pm 15.38)\%$ 。这说明碱性条件下 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 可以显著影响其催化效率。除此之外, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 还显著影响催化剂的磁性能,因此推测其可进一步影响到MNP的磁回收性能和重复利用的稳定性。

2.5 MNP催化类芬顿反应降解EtBr的稳定性

MNP循环使用的稳定性是影响其重复利用的关键因素。MNP-A、MNP-B和MNP-C在5次循环利用过程中催化降解EtBr的效果如图8所示。可知,MNP-A、MNP-B和MNP-C经过5次循环利用后,对EtBr的降解率分别由 99.62% 、 91.84% 、 96.32% 降低至 65.49% 、 69.61% 、 63.54% 。通过双尾 t 检验得出,MNP-A的降解率与MNP-B、MNP-C

C的降解率在前4次循环中均存在显著差异($p < 0.05$)。此外,3种MNP_s反应前后磁性能的情况表明,虽然MNP_s-C具有最高的初始磁通密度,但随着反应的进行,MNP_s-A表现出最稳定的磁性质,这可使MNP_s-A具有更好的重复利用稳定性。因此,认为3种材料中MNP_s-A的综合性能最佳。随着回收次数的增加,MNP_s的催化效率逐渐降低,这可能是由于MNP_s的损失和催化点位活性的减弱^[19]综合导致的。总体来说,合成的MNP_s在类芬顿催化反应中较为稳定,具有重复使用价值。

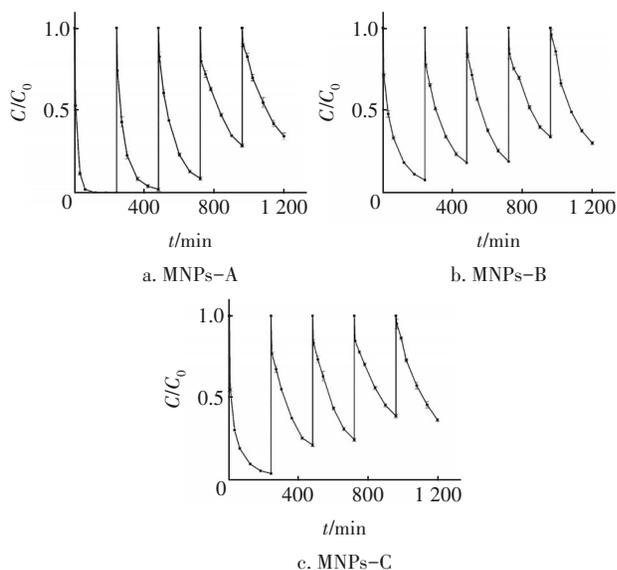


图8 MNP_s-A、MNP_s-B和MNP_s-C循环催化降解EtBr的效果
Fig.8 Effect of MNP_s-A, MNP_s-B and MNP_s-C recycling on EtBr degradation

3 结论

合成了3种不同的MNP_s,发现Fe³⁺/Fe²⁺可显著影响磁性纳米颗粒的磁性能,其中MNP_s-C的初始磁通密度最大,但MNP_s-A在反应后的磁稳定性最高。通过EtBr降解实验确定了最佳类芬顿反应条件:pH≈3、MNP_s投加量为0.5 g/L、H₂O₂投加量为0.05 mol/L。进一步探究发现,不同Fe³⁺/Fe²⁺导致的MNP_s催化效率存在一定的差异,其中MNP_s-A作为催化剂时可取得最佳降解效果(4 h内降解率达到98.97%),但与其他两种材料不存在显著差异。同时发现在碱性条件下类芬顿反应也可对EtBr进行一定程度上的分解,特别是在MNP_s-A的催化条件下,EtBr的降解率可达38.48%,显著高于其他催化剂。另外,优异的催化效率和良好的重复利用稳定性表明合成的MNP_s,特别是Fe³⁺/Fe²⁺为2:1的MNP_s

可作为一种环境友好的催化材料,能够用于有毒有害有机物的高效处理。

参考文献:

- [1] 冯桂学,陈燕,孙韶华,等. Fenton氧化法降解水中致嗅物质2,3,6-三氯苯甲醚[J]. 中国给水排水, 2022, 38(13): 78-82.
FENG Guixue, CHEN Yan, SUN Shaohua, *et al.* Fenton oxidation for degradation of odorous compound 2, 3, 6-trichloroanisole in water [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(13): 78-82 (in Chinese).
- [2] BRILLAS E. A critical review on ibuprofen removal from synthetic waters, natural waters, and real wastewaters by advanced oxidation processes [J]. Chemosphere, 2022, 286(Part3): 131849.
- [3] XIE E, ZHENG L, DING A Z, *et al.* Mechanisms and pathways of ethidium bromide Fenton-like degradation by reusable magnetic nanocatalysts [J]. Chemosphere, 2021, 262: 127852.
- [4] 吕来,胡春. 多相芬顿催化水处理技术与原理[J]. 化学进展, 2017, 29(9): 981-999.
LÜ Lai, HU Chun. Heterogeneous Fenton catalytic water treatment technology and mechanism [J]. Progress in Chemistry, 2017, 29(9): 981-999 (in Chinese).
- [5] 侯琳萌,清华,吉庆华. 类芬顿反应的催化剂、原理与机制研究进展[J]. 环境化学, 2022, 41(6): 1843-1855.
HOU Linneng, QING Hua, JI Qinghua. Research progress on catalysts, principles and mechanisms of Fenton-like reactions [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(6): 1843-1855 (in Chinese).
- [6] KOUHPANJI M R Z, STADLER B J H. A guideline for effectively synthesizing and characterizing magnetic nanoparticles for advancing nanobiotechnology: a review [J]. Sensors, 2020, 20(9): 2554.
- [7] MANDIĆ L, SADŽAK A, ERCEG I, *et al.* The fine-tuned release of antioxidant from superparamagnetic nanocarriers under the combination of stationary and alternating magnetic fields [J]. Antioxidants, 2021, 10: 1212.
- [8] HE Z Q, GAO C, QIAN M Q, *et al.* Electro-Fenton process catalyzed by Fe₃O₄ magnetic nanoparticles for degradation of C. I. reactive blue 19 in aqueous solution: operating conditions, influence, and mechanism [J]. Industrial & Engineering Chemistry

- Research, 2014, 53(9): 3435-3447.
- [9] TAHARA H, YAMAGIWA Y, HARANOSONO Y, *et al.* Time-course changes in DNA damage of corneal epithelial cells in rabbits following ocular instillation with genotoxic compounds[J]. *Genes and Environment*, 2022, 44(1): 14.
- [10] RAMANA M M V, BETKAR R, NIMKAR A, *et al.* *In vitro* DNA binding studies of antiretroviral drug neftinavir using ethidium bromide as fluorescence probe [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2015, 151: 194-200.
- [11] NKURIKIYIMFURA I, WANG Y M, SAFARI B, *et al.* Temperature-dependent magnetic properties of magnetite nanoparticles synthesized *via* coprecipitation method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 846: 156344.
- [12] BAGUS P S, NELIN C J, BRUNDLE C R, *et al.* Combined multiplet theory and experiment for the Fe 2p and 3p XPS of FeO and Fe₂O₃ [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2021, 154(9):094709.
- [13] WANG Y, GONG Y S, LIN N P, *et al.* Enhanced removal of Cr(VI) from aqueous solution by stabilized nanoscale zero valent iron and copper bimetal intercalated montmorillonite [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 606: 941-952.
- [14] DING C X, ZENG W A, ZHAO A J, *et al.* Montmorillonite-supported nanoscale zero-valent iron for thiamethoxam removal: response surface optimization and degradation pathway [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(18): 23113-23122.
- [15] CHEN M J, SHEN H, LI X, *et al.* Facile synthesis of oil-soluble Fe₃O₄ nanoparticles based on a phase transfer mechanism [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 307: 306-310.
- [16] 奚凯,杨忠林,孟祥天,等. 类Fenton氧化技术在废水处理中的应用研究进展[J]. *应用化工*, 2020, 49(5): 1297-1303.
- XI Kai, YANG Zhonglin, MENG Xiangtian, *et al.* Advances in the application of Fenton-like oxidation technology in wastewater treatment [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(5): 1297-1303 (in Chinese).
- [17] NIDHEESH P V, GANDHIMATHI R. Effect of solution pH on the performance of three electrolytic advanced oxidation processes for the treatment of textile wastewater and sludge characteristics [J]. *RSC Advances*, 2014 (4): 27946-27954.
- [18] 张柯,闫云涛,董勇. Fe³⁺/H₂O₂类芬顿降解性能及反应机理 [J]. *高校化学工程学报*, 2022, 36(2): 249-257.
- ZHANG Ke, YAN Yuntao, DONG Yong. Degradation performance and reaction mechanism of Fe³⁺/H₂O₂ Fenton-like systems [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2022, 36(2): 249-257(in Chinese).
- [19] WANG J, ZHANG Y J, DIAO J Y, *et al.* A MoS₂ nanocatalyst with surface-enriched active sites for the heterogeneous transfer hydrogenation of nitroarenes [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2018, 39(1): 79-87.

作者简介:王浩羽(2002-),男,黑龙江海林人,本科在读,主要研究方向为高级氧化技术与有机水体污染治理。

E-mail:2031330245@qq.com

收稿日期:2022-10-05

修回日期:2022-11-08

(编辑:任莹莹)