

# 膨胀珍珠岩负载纳米铁降解酸性大红与甲基橙的研究

郭波\*, 李赛, 徐婷婷, 张磊

(太原理工大学环境科学与工程学院, 山西太原 030024)

**摘要:**利用自行合成的膨胀珍珠岩负载型纳米零价铁(EP-nZVI)去除偶氮染料酸性大红(AR)和甲基橙(MO)。考察了EP-nZVI质量浓度、初始pH、温度和单一染料初始质量浓度对EP-nZVI去除染料的影响。实验证明EP-nZVI可以快速高效地降解溶液中的AR和MO。SEM和XRD表征结果表明,负载于膨胀珍珠岩(EP)的纳米铁粒子具有良好的分散性;对照实验显示EP具有一定的吸附作用,EP-nZVI去除AR和MO的效果优于nZVI。动力学研究表明,EP-nZVI去除AR和MO是一个快速吸附同时发生氧化还原的过程,是受表面控制的反应。紫外-可见光谱分析表明,EP-nZVI通过断裂AR和MO分子中的偶氮基实现快速降解染料。

**关键词:**膨胀珍珠岩;纳米铁;甲基橙;酸性大红

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)08-0107-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.08.023

## Degradation of acid scarlet and methyl orange by nanoscale zero-valent iron supported on expanded perlite

GUO Bo\*, LI Sai, XU Ting-ting, ZHANG Lei

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Expanded perlite supported nanoscale zero-valent iron (EP-nZVI) is synthesized and applied to the degradation of acid scarlet and methyl orange. The effects of EP-nZVI dosage, initial pH value, temperature and initial dyes concentration on the removal of acid scarlet or methyl orange are investigated. Excellent performances on the removal of dyes are observed. In 10 min comparison experiments, 98.2% of acid scarlet and 98.3% of methyl orange are removed respectively by EP-nZVI, while only 83.3% of acid scarlet and 81.3% of methyl orange are removed by using nZVI alone, and only 13.8% of acid scarlet and 11.7% of methyl orange are removed by expanded perlite alone. The results by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) show that expanded perlite reduces the aggregation of nZVI. Both pseudo first-order and pseudo second-order kinetic models can be employed to describe the degradation of acid scarlet or methyl orange by EP-nZVI and an excellent fit with pseudo second-order model for the adsorption process is observed. The results from kinetics study indicate the removal of acid scarlet or methyl orange by EP-nZVI is a prompt adsorption and simultaneous redox process, also a surface-controlled reaction. UV-Vis absorption spectra for the mixed reaction solution of acid scarlet and methyl orange indicate that the azo bond of dyes is cleaved by EP-nZVI. In a sum, the degradation of acid scarlet and methyl orange by EP-nZVI shows excellent degradation efficiency.

**Key words:** expanded perlite; degradation; nanoparticles; kinetics; thermodynamic; methyl orange; acid scarlet

偶氮染料作为一种最重要的有机合成染料,占到印染产品总量的60%~70%<sup>[1-2]</sup>。偶氮基的不稳定和易反应性引发了偶氮染料废水的毒性和致癌性<sup>[3]</sup>,对生态环境构成严重威胁。近些年,纳米零价铁(nZVI)因其巨大表面能和高度反应性,被用于降解偶氮染料<sup>[4-5]</sup>。采用nZVI进行偶氮染料脱色研究显示,nZVI不仅能够去除偶氮基,还可以将染料分子分解成较易生物降解的中间产物,如磺胺酸、N,N-二甲基-p-亚苯基-联氨、N-甲基-p-苯二胺等<sup>[6-7]</sup>。另外,nZVI降解偶氮染料快速高效,如对溶

液中甲基橙的降解可以在约10 min完成<sup>[8]</sup>。而采用绿色合成纳米铁/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的类芬顿法降解甲基橙,反应150 min降解率可达90%以上<sup>[9]</sup>。

nZVI的强还原性和高表面能使得nZVI粒子极易被氧化和团聚,从而导致其反应活性的降低。而将nZVI粒子负载于某种材料上,可以有效减少粒子间的聚集;同时,材料的机械强度、化学稳定性尤其是吸附能力和结构特性都将有助于污染物的去除<sup>[10]</sup>。

膨胀珍珠岩(EP)具有化学性质稳定、价格低廉、吸附能力强等特点,在废水处理等领域具有广阔

收稿日期:2020-04-30;修回日期:2020-06-06

基金项目:山西省重点研发计划项目(201803D31040);山西省应用基础研究计划项目(201901D111070);国家自然科学基金(U1610105)

作者简介:郭波(1968-),女,博士,副教授,研究方向为水处理及资源能源化,通讯联系人,guobo@tyut.edu.cn。

的应用前景<sup>[11]</sup>。笔者选择膨胀珍珠岩(EP)为载体,制备负载型 nZVI(EP-nZVI),以偶氮染料酸性大红(AR)和甲基橙(MO)为目标物,分别考察了温度、pH、EP-nZVI 投加量、染料初始浓度和反应时间对染料去除率的影响;并对其反应动力学及去除偶氮染料的机理进行了研究与探讨。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 材料

膨胀珍珠岩(EP),信阳中原珍珠岩厂生产;硫酸亚铁、硼氢化钠、甲基橙、酸性大红、无水乙醇、硫酸、氢氧化钠,均为分析纯。

### 1.2 分析测试仪器

UV-1900PC 型紫外-可见光分光光度计;DJ-120A 型电子天平;PHS-3C 型 pH 计;THZ-C 型磁力加热搅拌器;DZF-6021 型真空干燥箱;H1650R 型离心机;日本 JEOL/JSM-6700F 型扫描电子显微镜;D8 Advance 型 X 射线衍射仪,德国 Bruker 公司生产。

### 1.3 EP-nZVI 的制备

将膨胀珍珠岩(EP)烘干,磨碎,过 200 目(0.075 mm)筛,将粉末状的 EP 放入一定量的  $\text{Fe}^{2+}$  乙醇溶液中,常温下搅拌浸渍 12 h;将一定比例的硼氢化钠溶液逐滴加入至上述混合液中,溶液变灰色并产生黑色物质,搅拌下继续反应至无明显气泡产生,离心,所得沉淀依次使用蒸馏水、无水乙醇冲洗 3~5 次,真空干燥得固体 EP-nZVI。

### 1.4 EP-nZVI 去除酸性大红(AR)和甲基橙(MO)的实验

取染料 AR 或 MO 以及两者的混合溶液 100 mL,投加一定量的负载质量比  $m(\text{Fe}):m(\text{EP})=1:2$  的 EP-nZVI,于搅拌状态下(转速 60 r/min),每隔一定时间进行取样,经滤膜过滤,利用分光光度法测定溶液中染料的浓度。计算染料的去除率:

$$R(\%) = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_0$  为染料的初始质量浓度,mg/L; $C_t$  为在反应进行  $t$  min 时染料的质量浓度,mg/L。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 EP-nZVI 的表征

#### 2.1.1 扫描电子显微镜(SEM)的表征

膨胀珍珠岩(EP)、新鲜 EP-nZVI、与 AR 和 MO 的混合染料反应后的 EP-nZVI 的 SEM 形貌图如图

1 所示。由图 1(a)中可以看出,膨胀珍珠岩呈无定形片状结构,表面相对平坦;由图 1(b)可以看出,新鲜片状 EP-nZVI 表面负载的纳米铁颗粒较分散,粒径为 30~80 nm;由图 1(c)可以看出,EP-nZVI 表面出现更多的、较分散的纳米级粒子,显示纳米铁粒子的团聚不显著。

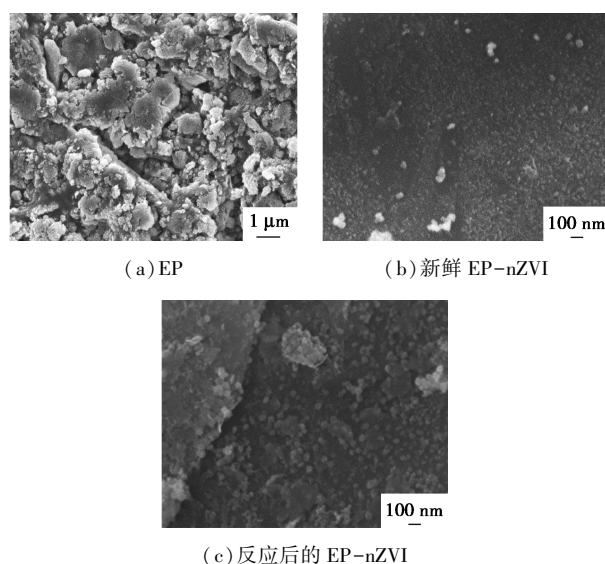
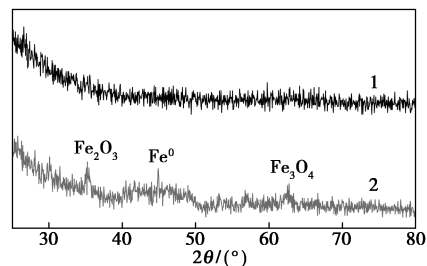


图 1 EP、新鲜 EP-nZVI 和反应后的 EP-nZVI 的 SEM 照片

#### 2.1.2 X 射线衍射(XRD)的表征

EP 和 EP-nZVI 的 XRD 的表征结果如图 2 所示。由图 2 中可以看出,对照 EP 图谱,EP-nZVI 的 X 射线衍射图中约在  $2\theta$  为  $45^\circ$  处出现  $\text{Fe}^0$  的特征峰,表明  $\text{Fe}^0$  成功负载于 EP 上,形成负载型 EP-nZVI;同时衍射角  $32^\circ$  和  $62.5^\circ$  出现的特征峰分别对应于铁氧化物  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>[12-13]</sup>,表明制备和表征过程中  $\text{Fe}^0$  发生了部分氧化。



1—EP;2—EP-nZVI

图 2 XRD 分析的图谱

### 2.2 EP-nZVI 去除单一染料 AR 或 MO 的影响因素

#### 2.2.1 EP-nZVI 质量浓度的影响

EP-nZVI 质量浓度对染料去除效果的影响如

图3所示。由图3中可以看出,随着EP-nZVI质量浓度的增加,AR或MO的去除率提高。EP-nZVI质量浓度为1 g/L时,反应30 min,AR和MO的去除率分别达91.7%和84.5%;EP-nZVI质量浓度为2 g/L时,反应15 min,AR和MO的去除率分别达98.7%和97.6%;EP-nZVI质量浓度增至3 g/L,反应5 min即达到平衡,AR和MO接近完全去除。综合考虑,EP-nZVI质量浓度选取为2 g/L。

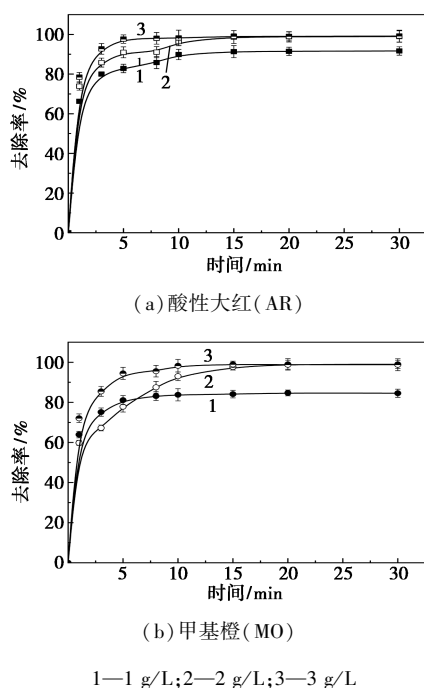
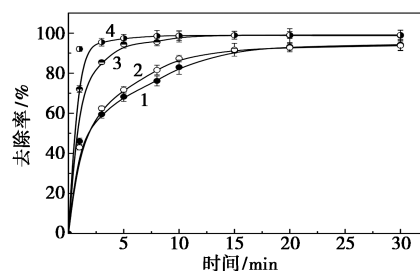
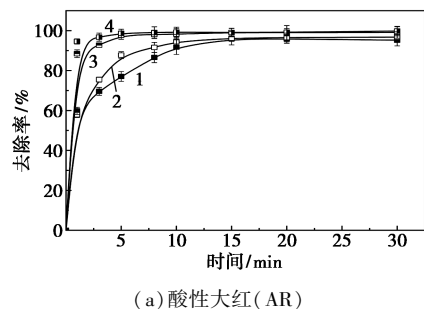


图3 EP-nZVI质量浓度对染料去除效果的影响

注:  $T=308\text{ K}$ ;  $\text{pH}=6.8$ ;  $C_{\text{AR/MO}}=100\text{ mg/L}$ 。

### 2.2.2 温度的影响

温度对染料的去除效果如图4所示。由图4中可以看出,AR或MO的去除率均随温度的升高而增大,反应达到平衡的时间缩短。如温度从298 K升高到313 K,EP-nZVI去除AR和MO的反应达到平衡的时间从20 min缩短到10 min。说明提高温度有利于降解反应的进行。综合考虑,实验的操作温度选取308 K。



(b) 甲基橙 (MO)

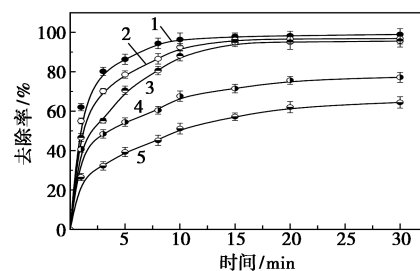
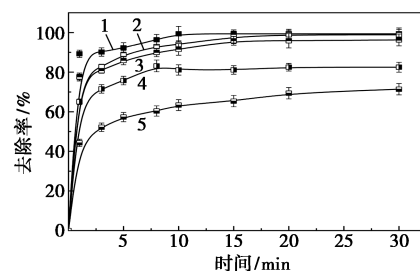
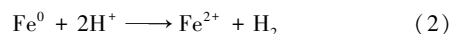
1—298 K; 2—303 K; 3—308 K; 4—313 K

图4 温度对染料去除效果的影响

注:  $\text{pH}=6.8$ ;  $C_{\text{AR/MO}}=100\text{ mg/L}$ ;  $C(\text{EP-nZVI})=2\text{ g/L}$ 。

### 2.2.3 pH的影响

pH对染料去除效果的影响如图5所示。由图5中可以看出,随着溶液初始pH的增加,EP-nZVI对染料的去除率下降。pH在3~7范围内,反应15 min基本达到平衡,且AR和MO的去除率均可达95%以上;而提高pH至9~11,反应达到平衡的时间延长,染料的去除率显著降低,反应30 min时,pH为9和11的AR和MO的去除率分别为82.5%、77.2%和71.4%、64.5%。原因是pH减小,增强了nZVI的腐蚀,促进了染料的还原降解<sup>[14-15]</sup>,如式(2)所示<sup>[14]</sup>。另外,铁表面带正电,当环境pH小于染料等电点时,染料中的磺酸基带负电(如甲基橙的等电点约为8),这样有利于染料吸附于铁表面<sup>[16]</sup>。



(b) 甲基橙 (MO)

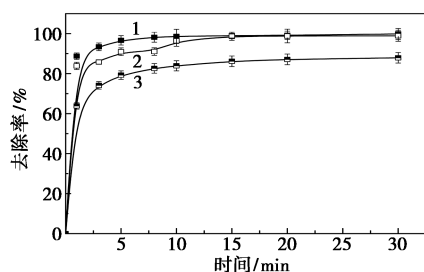
1—pH=3; 2—pH=5; 3—pH=7; 4—pH=9; 5—pH=11

图5 pH对染料去除效果的影响

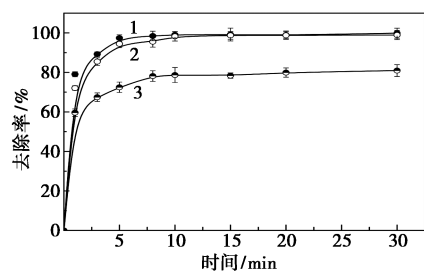
注:  $T=308\text{ K}$ ;  $C_{\text{AR/MO}}=100\text{ mg/L}$ ;  $C(\text{EP-nZVI})=2\text{ g/L}$ 。

### 2.2.4 染料初始质量浓度对降解效果的影响

染料初始质量浓度对降解效果的影响如图 6 所示。由图 6 可以看出,AR 和 MO 的去除非常相似,随着染料质量浓度的增加,染料去除率下降。这一结果与文献[15]中的报道一致。不过质量浓度为 50、100 mg/L 时,反应 15 min 后,两者的染料去除率趋于一致;而当染料初始质量浓度增加至 150 mg/L 时,反应 15 min 后基本达到平衡,但 AR 和 MO 的去除率分别降至 86.2% 和 78.4%。当 EP-nZVI 投加量一定时,溶液中零价铁的活性位点一定,随着染料分子增多,活性点位的竞争加剧,未被吸附的染料分子可能得不到还原去除<sup>[3,17]</sup>。



(a) 酸性大红 (AR)



(b) 甲基橙 (MO)

1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—150 mg/L

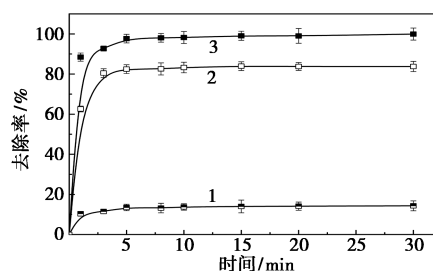
图 6 染料初始质量浓度对 AR 和 MO 去除效果的影响

注:  $T=308\text{ K}$ ;  $\text{pH}=6.8$ ;  $C(\text{EP-nZVI})=2\text{ g/L}$ 。

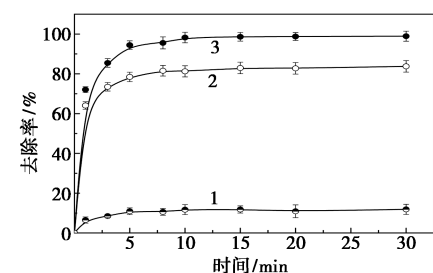
### 2.3 对照实验

EP、市售 nZVI、EP-nZVI 分别去除 AR 或 MO 的效果如图 7 所示。由图 7 中可以看出,反应 10 min 各体系基本达到平衡,EP、nZVI 和 EP-nZVI 的 AR 去除率分别为 13.8%、83.3% 和 98.3%,EP-nZVI 的去除率略大于 EP 和 nZVI 去除率之和;EP、nZVI 和 EP-nZVI 的 MO 去除率分别为 11.7%、81.3% 和 98.3%,EP-nZVI 的去除率高于 EP 和 nZVI 去除率之和 (93.0%) 约 5.3%;说明负载型 EP-nZVI 性能优于 nZVI。结合 SEM 表征结果,这是由于负载体中活性组分纳米铁颗粒具有较好的分

散性,保持了组分的良好活性。另外,EP 对染料分子有一定的吸附作用。



(a) 酸性大红 (AR)



(b) 甲基橙 (MO)

1—0.667 g/L EP; 2—1.333 g/L nZVI; 3—2 g/L EP-nZVI

图 7 EP、nZVI 和 EP-nZVI 分别去除染料的影响

注:  $T=308\text{ K}$ ;  $\text{pH}=6.8$ ;  $C_{\text{AR/MO}}=100\text{ mg/L}$ 。

### 2.4 EP-nZVI 去除 AR 或 MO 的还原降解动力学研究

EP-nZVI 还原降解 AR 和 MO 的过程分别采用伪一级和伪二级动力学模型进行模拟,模拟结果及还原动力学参数如表 1 所示。

表 1 EP-nZVI 去除 AR 和 MO 的还原动力学参数

温度/K	$C_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	伪一级模型		伪二级模型	
		$k_{\text{obs1}}/(\text{min}^{-1})$	$R^2$	$K_{\text{obs2}}/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	$R^2$
酸性大红 (AR)					
298 K	100	0.1190	0.9944	0.1988	0.9899
303 K	100	0.1721	0.9293	0.2036	0.9003
308 K	100	0.1776	0.8686	0.2049	0.8622
313 K	100	0.2602	0.9383	0.2668	0.9374
甲基橙 (MO)					
298 K	100	0.0824	0.8996	0.1038	1.0000
303 K	100	0.1107	0.9328	0.1447	0.9467
308 K	100	0.2885	0.9511	0.3193	0.8910
313 K	100	0.2911	0.9998	0.3211	0.8690

伪一级动力学模型通常用于模拟 nZVI 基的还原反应过程<sup>[18-19]</sup>。

$$\ln(C_t/C_0) = -k_{\text{obs1}}t \quad (3)$$

式中: $k_{\text{obs1}}$ 为一阶表观反应速率常数, $\text{min}^{-1}$ ,可根据 $\ln(C_t/C_0)$ 与 $t$ 作图所得直线斜率计算得出。

伪二级动力学模型<sup>[19]</sup>:

$$\ln(1/C_t - 1/C_0) = k_{\text{obs2}}t \quad (4)$$

式中: $k_{\text{obs2}}$ 为二阶反应速率常数, $\text{L}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ ,可由 $\ln(1/C_t - 1/C_0)$ 与 $t$ 作图所得直线斜率计算得出。

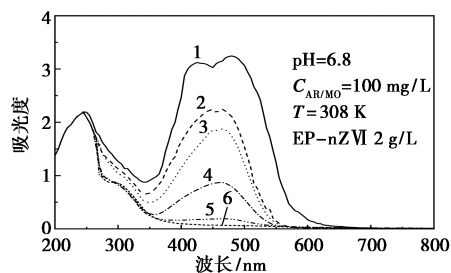
由表1可知,伪一级模型描述不同温度下 EP-nZVI 还原降解 AR 和 MO 所得相关系数分别为  $R_{\text{AR}}^2 = 0.8686 \sim 0.9944$ 、 $R_{\text{MO}}^2 = 0.8996 \sim 0.9998$ ;伪二级模型模拟所得相关系数分别为  $R_{\text{AR}}^2 = 0.8622 \sim 0.9899$ 、 $R_{\text{MO}}^2 = 0.8690 \sim 1.0000$ 。2种模型均可以用来拟合 EP-nZVI 还原 AR 和 MO 的行为,表明 EP-nZVI 对染料去除既有还原降解又有吸附作用。随着温度的升高,各级反应速率增大,说明还原降解反应是一个吸热的过程。还原降解反应的表观活化能  $E_a$  可根据阿伦尼乌斯公式求得<sup>[20]</sup>:

$$\ln k_{\text{obs1}} = -E_a/RT + \ln A_0 \quad (5)$$

计算得到 EP-nZVI 还原降解 AR 和 MO 的表观活化能  $E_a$  分别为 36.9 kJ/mol 和 73.8 kJ/mol。活化能  $E_a > 29$  kJ/mol 的反应受表面控制<sup>[21]</sup>,由此判断 EP-nZVI 还原降解 AR 或 MO 是受表面控制的反应。

### 2.5 EP-nZVI 去除混合染料(AR 和 MO)

不同反应时间 EP-nZVI 去除混合染料溶液(AR 和 MO 质量浓度均为 100 mg/L)的紫外-可见光谱图如图8所示。由图8中可以看出,混合染料光谱图中 350~600 nm 范围内出现的主吸收峰是由2种染料的偶氮特征吸收峰叠加而成(特征吸收峰 AR 509 nm 和 MO 465 nm),该峰强度随反应的进行快速减弱直至消失,反应 15 min,偶氮特征吸收峰基本消失;而反应开始即出现于紫外光区 245 nm 处的吸收峰没有随反应的进行而变化,此吸收峰归属于磺胺酸的特征峰<sup>[8]</sup>。



1—0 min; 2—1 min; 3—3 min; 4—5 min; 5—10 min; 6—15 min

图8 EP-nZVI 降解 AR 和 MO 混合染料的紫外-可见光谱图

根据吸光度的加和性(混合物的总吸光度等于混合物中各组分的吸光度之和),采用解联立方程法<sup>[22]</sup>,由图8中的吸收光谱图求取混合染料溶液中的 AR 和 MO 的去除率,相同操作条件下,其结果与单一染料的去除效果基本一致。证明 EP-nZVI 对混合染料废水的脱色是可行的。

### 3 结论

膨胀珍珠岩负载型 EP-nZVI 去除偶氮染料 AR 和 MO 的实验结果证明,EP-nZVI 可以快速有效降解溶液中的 AR 和 MO。降解反应 15 min 内即可达到平衡。

(1) SEM、XRD 的表征及对照实验表明,经负载制备的 EP-nZVI 中,纳米铁粒子具有良好的分散性;EP 不仅是负载体,同时还具有一定的吸附作用,可以将染料分子吸附在纳米铁粒子周围,促进染料分子的还原降解;EP-nZVI 去除 AR 和 MO 的效果优于市售 nZVI,EP-nZVI 反应活性更高。

(2) 伪一级和伪二级反应动力学模型均可以描述 EP-nZVI 降解还原 AR 和 MO 的行为;伪二级吸附动力学模型极好地拟合了 EP-nZVI 吸附 AR 和 MO 的过程,说明 EP-nZVI 去除 AR 和 MO 是一个快速吸附同时发生氧化还原的过程,表观活化能显示此过程受表面控制。

(3) 紫外-可见光谱分析表明,EP-nZVI 通过断裂 AR 和 MO 分子中的偶氮基实现快速降解溶液中的染料。

### 参考文献

- [1] Lin J, Sun M, Liu X, *et al.* Functional kaolin supported nanoscale zero-valent iron as a Fenton-like catalyst for the degradation of Direct Black G[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 664-672.
- [2] Balapure K, Bhatt N, Madamwar D. Mineralization of reactive azo dyes present in simulated textile waste water using down flow microaerophilic fixed film bioreactor[J]. *Bioresour Technol*, 2015, 175: 1-7.
- [3] Zhang J, Feng M, Jiang Y, *et al.* Efficient decolorization/degradation of aqueous azo dyes using buffered  $\text{H}_2\text{O}_2$  oxidation catalyzed by a dosage below ppm level of chloroperoxidase[J]. *Chem Eng J*, 2012, 191: 236-242.
- [4] O'Carroll D, Sleep B, Krol M, *et al.* Nanoscale zero valent iron and bimetallic particles for contaminated site remediation[J]. *Adv Water Resour*, 2013, 51: 104-122.
- [5] Crane R A, Scott T B. Nanoscale zero-valent iron: Future prospects

- for an emerging water treatment technology [J]. *J Hazard Mater*, 2012, 211-212: 112-125.
- [6] Saxe J P, Lubenow B L, Chiu P, *et al.* Enhanced biodegradation of azo dyes using an integrated elemental iron-activated sludge system: I. Evaluation of system performance [J]. *Water Environ Res*, 2006, 78: 19-25.
- [7] Ma L, Zhang W. Enhanced biological treatment of industrial wastewater with bimetallic zero-valent iron [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 5384-5389.
- [8] Fan J, Guo Y, Wang J, *et al.* Rapid decolorization of azo dye methyl orange in aqueous solution by nanoscale zero valent iron particles [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 166: 904-910.
- [9] 李美玲, 李赛, 田瑜, 等. 绿色合成纳米铁联用过氧化氢降解水中酸性大红的研究 [J]. *应用化工*, 2018, 47(10): 2103-2106.
- [10] Luo S, Qin P, Shao J, *et al.* Synthesis of reactive nanoscale zero valent iron using rectorite supports and its application for orange II removal [J]. *Chem Eng J*, 2013, 223: 1-7.
- [11] 白德忠, 冯辉霞, 刘剑普, 等. 膨胀珍珠岩的改性方法及应用研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2018, 46(3): 257-260.
- [12] Shahwan T, Sirriah S A, Nairat M, *et al.* Green synthesis of iron nanoparticles and their application as a Fenton-like catalyst for the degradation of aqueous cationic and anionic dyes [J]. *Chem Eng J*, 2011, 172: 258-266.
- [13] Huang L L, Weng X L, Chen Z L, *et al.* Green synthesis of iron nanoparticles by various tea extracts: Comparative study of the reactivity [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, 30: 295-301.
- [14] Stefaniuk M, Oleszczuk P, Ok Y S. Review on nano zero valent iron (nZVI): From synthesis to environmental applications [J]. *Chem Eng J*, 2016, 287: 618-632.
- [15] Wang T, Jin S, Jin X, *et al.* Functional clay supported bimetallic nZVI/Pd nanoparticles used for removal of methyl orange from aqueous solution [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 262: 819-825.
- [16] O'Carroll D, Sleep B, Krol M, *et al.* Nanoscale zero valent iron and bimetallic particles for contaminated site remediation [J]. *Adv Water Resour*, 2013, 51: 104-122.
- [17] Hou M, Li F, Liu X, *et al.* The effect of substituent groups on the reductive degradation of azo dyes by zero valent iron [J]. *J Hazard Mater*, 2007, 145: 305-314.
- [18] Wang T, Lin J, Chen Z, *et al.* Green synthesized iron nanoparticles by green tea and eucalyptus leaves extracts used for removal of nitrate in aqueous solution [J]. *J Clean Prod*, 2014, 83(83): 413-419.
- [19] Chen Z, Wang T, Jin X, *et al.* Multifunctional kaolinite-supported nanoscale zero-valent iron used for the adsorption and degradation of crystal violet in aqueous solution [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2013, 398: 59-66.
- [20] Shi L, Zhang X, Chen Z. Removal of Chromium (VI) from wastewater using bentonite-supported nanoscale zero-valent iron [J]. *Water Res*, 2011, 45(2): 886-892.
- [21] Lien H, Zhang W. Nanoscale Pd/Fe bimetallic particles: Catalytic effects of palladium on hydrodechlorination [J]. *Appl Catal B Environ*, 2007, 77(1-2): 110-116.
- [22] 雷波. 分光光度法对混合染料浓度的同时测定 [J]. *染整技术*, 2003, 25(3): 35-37. ■
- (上接第 106 页)
- [3] 赵文莉, 王广智, 弋凡, 等. 过硫酸盐活化技术的研究进展 [J]. *现代化工*, 2018, 38(7): 53-56.
- [4] 刘红梅, 褚华强, 陈家斌, 等. 过硫酸盐在地下水和土壤修复中的应用 [J]. *现代化工*, 2015, 35(4): 42-46.
- [5] 史宸菲, 薛瑞杰, 李雨濛, 等. 不同活性炭活化过硫酸盐的效能及机理的规律研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1501-1508.
- [6] Liang C, Lin Y T, Shin W H. Persulfate regeneration of trichloroethylene spent activated carbon [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168: 187-192.
- [7] 杨鑫, 杨世迎, 王雷雷, 等. 活性炭催化过二硫酸盐降解水中 A07 [J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1960-1966.
- [8] 程爱华, 邵新岚, 王倩. 活性炭活化过硫酸盐处理含酚废水的实验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(35): 347-351.
- [9] 杨梅梅, 周少奇, 刘聃, 等. 活性炭催化过硫酸钠降解金橙 G 动力学 [J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 962-967.
- [10] Liang C, Huang C F, Chen Y J. Potential for activated persulfate degradation of BTEX contamination [J]. *Water Research*, 2008, 42: 4091-4100.
- [11] Huang K C, Zhao Z, Hoag G E, *et al.* Degradation of volatile organic compounds with thermally activated persulfate oxidation [J]. *Chemosphere*, 2005, 61: 551-560.
- [12] 肖鹏飞, 姜思佳. 活化过硫酸盐氧化法修复有机污染土壤的研究进展 [J]. *化工进展*, 2018, 37(12): 4862-4873.
- [13] 姜思佳, 张碧涵, 单潇清, 等. 热活化过硫酸钠氧化降解水中 2,4-二氯苯酚的研究 [J]. *现代化工*, 2019, 39(4): 94-98.
- [14] 马国峰, 高美玉, 贺春林. 活性炭活化过硫酸钠降解罗丹明 B 的规律研究 [J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2018, 30(5): 345-349.
- [15] 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 等. 热活化过硫酸盐降解三氯生 [J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1661-1667.
- [16] 李永涛, 赖连珏, 岳东. 无机阴离子对热活化过硫酸盐体系中降解 MDEA 模拟废水的影响 [J]. *环境工程学报*, 2018, 12(3): 788-795.
- [17] Han K C, Zhao Z, Hong G E, *et al.* Degradation of volatile organic compounds with thermally activated persulfate oxidation [J]. *Chemosphere*, 2005, 61: 551-560. ■