

纳米 Fe/Ni 双金属的制备及其对水中 2, 4-二氯酚的还原效果

范先媛, 孙熠, 阮霞, 李哲, 刘红

武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081

摘要 采用液相还原法制备了纳米 Fe/Ni 双金属材料, 分析了 FeCl₂ 浓度、 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 和 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 物质的量之比对制得的 Fe/Ni 双金属还原水中 2, 4-二氯酚(2, 4-DCP)效果的影响, 明确了 Fe/Ni 对 2, 4-DCP 的还原脱氯途径。结果表明: 在 FeCl₂ 浓度为 3 mol/L、 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})=4\%$ 、 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=1$ 的条件下制备的 Fe/Ni 双金属对 2, 4-DCP 的去除率接近 100%, 且其中 95% 被还原成苯酚。纳米 Fe/Ni 为球形颗粒, 粒径约为 50 nm, 在自身磁力作用下相互链接为枝状, 又通过静电稳定作用分散聚集, 形成海绵状多孔结构, BET 比表面积为 44.8 m²/g。纳米 Fe/Ni 还原 2, 4-DCP 的途径主要是苯环上的 2 个 C—Cl 键依次被加氢还原, 先脱去一个氯生成 2-氯酚或 4-氯酚, 再进一步脱氯转化为稳态的苯酚。

关键词 纳米材料; Fe/Ni 双金属; 2, 4-二氯酚; 还原

由于芳环结构和氯原子的存在, 氯代酚有毒且化学性质稳定, 直接采用化学或者生物法难使其降解^[1], 在处理时往往需要先通过化学还原使氯代有机物脱氯, 转化为毒性较小、易于降解的物质。近年来将零价铁技术用于氯代有机物污染控制和地下水修复成为研究热点^[2-3], 但存在零价铁与氯代有机物反应速率慢、还原效率低等问题。随着纳米技术的兴起, 产生了纳米零价铁(Fe⁰), 但纳米尺寸使其易发生团聚, 且单一的纳米零价铁还原速率和效率仍不能令人满意, 往往需数小时或数天^[4-6]。

为提高纳米零价铁对氯代有机物的还原效率和速率, 研究者在纳米零价铁表面复合另一种金属, 如钯、镍、银等, 作为加氢催化剂^[7], 可将分子氢转化为活性原子氢, 加快氯代有机物的脱氯还原。由于钯、银等贵金属价格昂贵, 而镍相对廉价, 在环境污染控制与修复中更有应用价值^[8-10]。

本课题组通过液相还原法制备纳米 Fe/Ni 双金属复合材料, 分析 FeCl₂ 浓度、 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 、 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 等因素对制备的 Fe/Ni 双金属还原性能的影响, 探讨 Fe/Ni 双金属还原降解 2, 4-二氯酚(2, 4-DCP)的途径。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

扫描电子显微镜(XL30TMP型, 荷兰 Philips 公司), 高效

液相色谱仪(UltiMate 3000 Series, 美国戴安公司), X射线衍射仪(D/Max-RB型, 日本理学公司), 比表面积测定仪(ASAP 2020, 美国麦克仪器公司)。

氯化亚铁、硼氢化钠、氯化镍、2, 4-二氯酚为分析纯, 甲醇为色谱纯。

1.2 纳米 Fe/Ni 双金属及纳米零价铁材料的制备

配制一定浓度的 FeCl₂ 溶液, 取 10 mL 置于通有氮气保护的三口烧瓶中, 在 160 r/min 转速搅拌下, 按照预定的 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 物质的量之比将 40 mL 一定浓度的 NaBH₄ 溶液逐滴加入烧瓶, 滴加完毕后持续搅拌 30 min, 按一定 Ni 比例加入 1 mol/L NiCl₂ 溶液, 并按与 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 相同的 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{NiCl}_2)$ 比例加入 NaBH₄ 溶液, 使镍还原后沉积在纳米铁表面。将产物抽滤后, 以去离子水冲洗 3 遍, 在真空干燥箱中干燥 3 h, 制得纳米 Fe/Ni 双金属材料。

纳米零价铁单金属的制备方法同上, 但无须加 NiCl₂ 溶液。

1.3 纳米 Fe/Ni 双金属对水中 2, 4-二氯酚的还原

取 0.061 mmol/L (10 mg/L) 的 2, 4-DCP 溶液 (pH 值约为 5.5) 80 mL, 置于 250 mL 的磨口具塞锥形瓶中, 按 2 g/L 的投加量加入纳米 Fe/Ni, 然后将锥形瓶置于 25°C 的恒温振荡器中振荡。分别在反应进行的第 5、15、30、60、90、120 min 用注射器取反应后液体 2 mL, 经孔径为 0.45 μm 的滤膜过滤后, 装

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2016-09-21

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB821)

作者简介: 范先媛, 工程师, 研究方向为水污染控制技术, 电子邮箱: 406061894@qq.com; 孙熠(共同第一作者), 研究方向为水污染控制技术, 电子邮箱: 411701514@qq.com

引用格式: 范先媛, 孙熠, 阮霞, 等. 纳米 Fe/Ni 双金属的制备及其对水中 2, 4-二氯酚的还原效果[J]. 科技导报, 2016, 34(22): 43-47; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.22.005

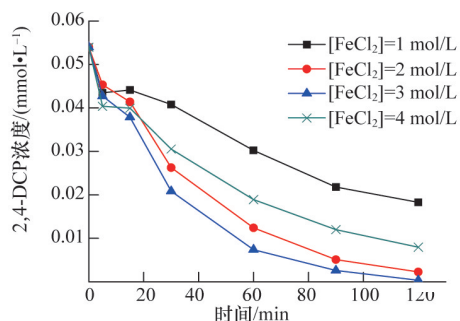
入细胞瓶中,用高效液相色谱仪检测溶液中残余 2, 4-DCP 及其还原产物 2-氯酚(2-CP)、4-氯酚(4-CP)和苯酚的浓度,流动相为甲醇与超纯水的混合物($V_{\text{甲醇}}:V_{\text{水}}=3:1$),色谱柱为 C18 柱,柱温 35℃,流速 1 mL/min,检测波长为 275 nm(CA)、280 nm(2, 4-DCP)、285 nm(2-CP、4-CP)。

2 结果与讨论

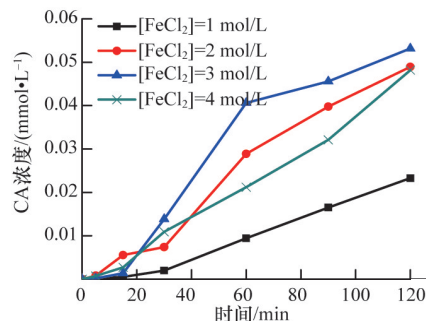
2.1 制备条件对纳米 Fe/Ni 双金属还原 2, 4-DCP 性能的影响

2.1.1 FeCl₂ 浓度的影响

配制 FeCl₂ 浓度分别为 1、2、3、4 mol/L 的 4 份溶液(25℃时 FeCl₂ 的溶解度为 62.5 g,相当于 3.1 mol/L,所以 4 mol/L 的溶液实际是一种悬浮液,有一些未溶解的 FeCl₂ 固体分散在其



(a) 反应物 2, 4-DCP 浓度的变化



(b) 产物 CA 浓度的变化

图 1 FeCl₂ 浓度对 Fe/Ni 双金属还原 2, 4-DCP 性能的影响

Fig. 1 The effect of FeCl₂ concentration on the reduction of 2, 4-DCP by Fe/Ni bimetal

对不同 FeCl₂ 浓度制备的纳米 Fe/Ni 双金属去除 2, 4-DCP 进行准一级反应动力学拟合,准一级反应动力学方程式为

$$\ln(C/C_0) = -k_{\text{obs}}t \quad (1)$$

式中, C 为 2, 4-DCP 在反应 t 时刻的浓度, mmol/L; C_0 为 2, 4-DCP 的初始浓度, mmol/L; k_{obs} 是反应的表观速率常数, min⁻¹。

拟合结果如表 1 所示。

表 1 不同 FeCl₂ 浓度制备的 Fe/Ni 双金属还原 2, 4-DCP 的表观速率常数

Table 1 The apparent rate constants of 2, 4-DCP reduction by Fe/Ni bimetal with prepared in different FeCl₂ concentration

FeCl ₂ 浓度/(mol·L ⁻¹)	表观速率常数 k_{obs} /(min ⁻¹)	相关系数 (R^2)
1	0.0095	0.9610
2	0.0260	0.9964
3	0.0381	0.9718
4	0.0166	0.9802

中),分别按照物质的量之比 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=1$ 的比例加入 NaBH₄ 溶液、物质的量之比 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 为 4% 加入 NiCl₂ 溶液,制备纳米 Fe/Ni 双金属材料。以制得的 4 种纳米 Fe/Ni 材料对 2, 4-DCP 进行还原,结果如图 1 所示。

由图 1(a) 可以看到,随着 FeCl₂ 浓度增大,制得的 Fe/Ni 材料还原性能提高,FeCl₂ 浓度为 3 mol/L 时制备的 Fe/Ni 双金属对 2, 4-DCP 的还原性能最好,反应 120 min 后 2, 4-DCP 的浓度接近 0,且还原产物 CA 的浓度也最大(图 1(b)),90% 以上的 2, 4-DCP 在 120 min 后都被脱去 2 个氯原子生成了苯酚。FeCl₂ 浓度为 4 mol/L 时,制得的 Fe/Ni 还原性能较 3 mol/L 时制得的略低,可能的原因是其中未溶解的 FeCl₂ 固体部分进入到了 Fe/Ni 材料中,且被氧化为三价铁丧失了还原性,从而导致材料的还原性能变差。

从表 1 拟合情况来看,纳米 Fe/Ni 双金属对 2, 4-DCP 的还原能较好地符合表观一级反应,并且表观速率常数与其还原性能呈现一致的变化规律,3 mol/L FeCl₂ 制得的 Fe/Ni 还原 2, 4-DCP 的表观速率常数是 1 mol/L FeCl₂ 所制 Fe/Ni 的 4 倍。究其原因,可能是 FeCl₂ 浓度的增大导致溶液离子强度增大,所制备的纳米 Fe/Ni 材料静电稳定性增强,团聚趋势相对减弱,因而有更多的活性位点对 2, 4-DCP 进行还原。

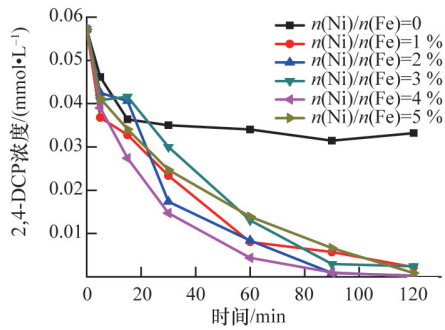
2.1.2 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 的影响

选择 3 mol/L 的 FeCl₂ 溶液,按 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=1$ 和 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 分别为 0、1%、2%、3%、4%、5% 制备纳米 Fe/Ni 材料,以分析 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 对所制备纳米 Fe/Ni 还原 2, 4-DCP 性能的影响,结果如图 2。

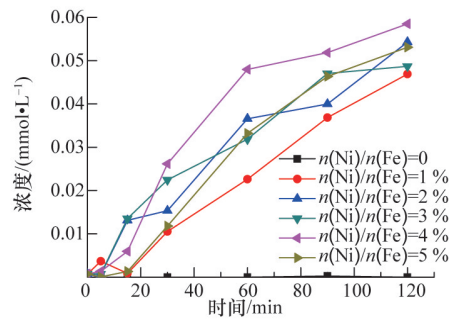
由图 2 可以看出,单纯纳米零价铁对 2, 4-DCP 的还原性能很差,反应 120 min 后几乎无苯酚产物生成,仅能吸附去除 42% 左右的 2, 4-DCP。这是因为单纯纳米零价铁腐蚀失电子的速率很慢,导致还原 2, 4-DCP 的速率也很慢,同时由于缺少 Ni 原子的催化,分子态的 H₂ 不能转化为原子形态的氢(H[·])去取代苯环上的氯原子,所以几乎没有 2, 4-DCP 被加氢

还原^[11-12]。添加NiCl₂后,制得的Fe/Ni双金属还原性能大幅提高, $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})=1\%$ 时,制备的Fe/Ni在120 min内可将0.027 mmol/L的2,4-DCP还原为苯酚。相对其他的镍比例, $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})=4\%$ 时制备的Fe/Ni双金属还原性能最佳,反应120 min后,2,4-DCP浓度被降低至0.0001 mmol/L,去除率达到

99.8%,而CA浓度上升至0.058 mmol/L,亦即2,4-DCP还原转化为CA的效率高达95%。 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})=5\%$ 时制得的Fe/Ni还原性能反而比4%时差,主要是因为 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 较高时,有较多的镍原子沉积、覆盖在零价铁表面,遮蔽了零价铁的活性位点,使其不能与2,4-DCP有效地进行反应^[13-14]。



(a) 反应物 2,4-DCP 浓度的变化



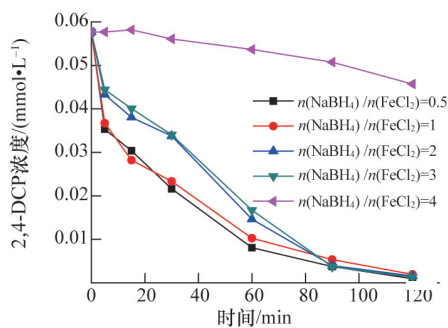
(b) 产物 CA 浓度的变化

图2 $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ 对Fe/Ni双金属还原2,4-DCP性能的影响Fig. 2 The effect of $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$ on the reduction of 2,4-DCP by Fe/Ni bimetal

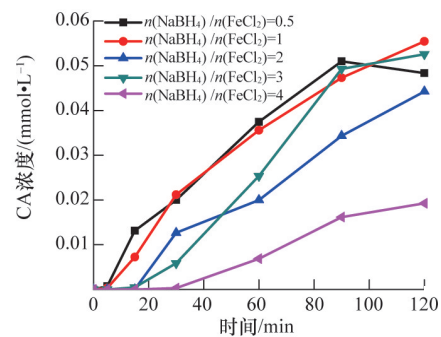
2.1.3 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 的影响

按照FeCl₂浓度为3 mol/L, $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})=4\%$, $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 分别为0.5、1、2、3、4制备Fe/Ni双金属,并以制得的材料还原2,4-DCP,结果如图3所示。

由图3可知,随着制备时 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 的减小,Fe/Ni双金属对2,4-DCP的还原性能逐渐增强, $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 为0.5和1时,2,4-DCP浓度降低很快,同时转化为还原产物CA。



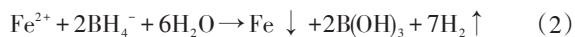
(a) 反应物 2,4-DCP 浓度的变化



(b) 产物 CA 浓度的变化

图3 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ 对Fe/Ni双金属还原2,4-DCP性能的影响Fig. 3 The effect of $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ on the reduction of 2,4-DCP by Fe/Ni bimetal

液相还原法制备Fe/Ni双金属的反应方程式如下:



NaBH_4 将 Fe^{2+} 完全还原为 Fe^0 的理论物质的量之比为2:1,当 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2) < 2$ 时,部分 Fe^{2+} 未被还原而吸附在Fe/Ni表面,能直接与2,4-DCP发生还原反应,表现为Fe/Ni材料的还原性能提高。 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=0.5$ 时,虽然制备的Fe/Ni还原2,4-DCP效果较好,但表面较多的 Fe^{2+} 易被氧化为 Fe^{3+} 而使材料发黄。当 $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=3$ 或4时,过量的

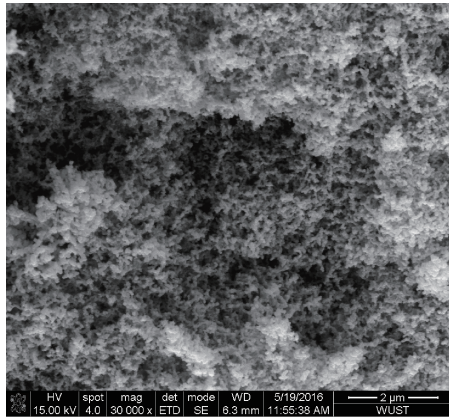
NaBH_4 使反应后溶液为碱性,零价铁在碱性溶液中易被钝化而失活,还原性能反而降低。综合考虑各方面因素, $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=1$ 是较适宜的制备条件。

2.2 纳米Fe/Ni双金属的微观形貌

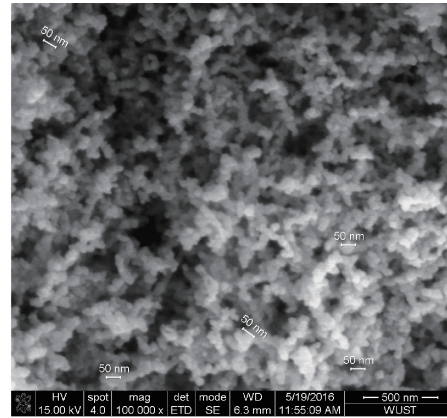
图4是FeCl₂浓度为3 mol/L, $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})=4\%$, $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=1$ 条件下制备的纳米Fe/Ni双金属的扫描电子显微镜(SEM)图。由图4可以看到,Fe/Ni材料呈球形颗粒,粒径为50 nm左右,在自身磁力作用下相互之间链接为枝状,并由于

静电稳定作用分散堆积,形成海绵状多孔结构,较少有团聚,测得其BET比表面积为44.8 m²/g。这种多孔结构和较大的

比表面积使材料易与溶液中2,4-DCP发生接触和反应,起到良好的还原效果。



(a) 放大30000倍



(b) 放大100000倍

图4 纳米Fe/Ni双金属的SEM图

Fig. 4 SEM images of nanoscale Fe/Ni bimetal((a)30000 times, (b)100000 times)

2.3 纳米Fe/Ni双金属还原2,4-DCP途径

为探讨Fe/Ni双金属还原2,4-DCP的途径,以选择的最佳条件制备Fe/Ni双金属,并测定反应过程中2,4-DCP和可能的中间产物2-CP、4-CP以及完全脱氯产物CA的浓度变化,结果如图5所示。

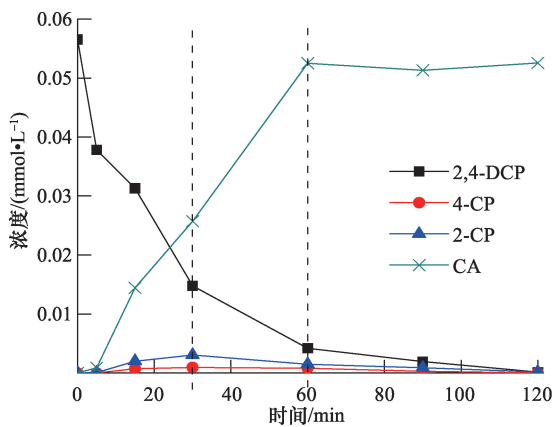


图5 Fe/Ni还原2,4-DCP过程中各物质浓度变化

Fig. 5 The variation of concentration of reactants and products in the reduction process of 2,4-DCP

由图5可看出,在2,4-DCP脱氯反应的初始阶段(0~30 min),2,4-DCP浓度快速降低,CA浓度急剧增加,同时产生了少量2-CP、4-CP,且产生的2-CP比4-CP多,可能是羟基对位上的Cl比羟基邻位上的Cl易于脱除。在脱氯反应的第二阶段(30~60 min),CA产生量仍快速增加,而2-CP浓度逐渐降低、4-CP浓度基本不变,说明2-CP和4-CP作为中间产物进一步被脱氯还原为CA。有机物的加成反应会产生稳态

的中间产物和带有自由基的瞬态产物,而瞬态产物用高效液相色谱仪不能检测到^[5]。图5中从30~60 min,CA增加了0.0268 mol/L,而2,4-DCP、2-CP和4-CP一共减少了0.0123 mol/L,溶液中可以检测到的苯环量大大增加,可能是由于无法检测到的瞬态的2-CP和4-CP中间体直接加氢还原为CA。在脱氯反应第三阶段(60~120 min),2,4-DCP的脱氯还原基本完成,浓度变化很小,同时产物CA量也基本不变。纳米Fe/Ni还原水中2,4-DCP的反应途径可用图6表示。

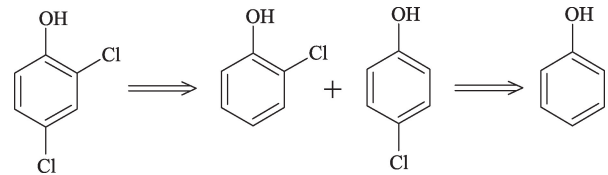


图6 纳米Fe/Ni双金属还原2,4-DCP途径

Fig. 6 The pathway of reduction of 2,4-DCP by Fe/Ni

3 结论

1) 在FeCl₂浓度为3 mol/L、n(Ni)/n(Fe)=4%、n(NaBH₄)/n(FeCl₂)=1的条件下制备的Fe/Ni双金属对水中2,4-DCP的还原性能最佳,对2,4-DCP去除率接近100%,其中脱氯还原成CA的比例达到95%。

2) Fe/Ni材料为球形颗粒,粒径为50 nm左右,在自身磁力作用下相互之间链接为枝状,并由于静电稳定作用分散聚集,形成海绵状多孔结构,BET比表面积为44.8 m²/g。

3) 纳米Fe/Ni还原2,4-DCP的途径主要是苯环上先脱去一个氯生成2-氯酚或4-氯酚,再进一步脱氯转化为苯酚。

参考文献 (References)

- [1] 施汉昌, 赵胤慧. 氯酚废水的生物处理技术的研究与进展[J]. 化学通报, 1998(8): 1-5.
Shi Hanchang, Zhao Yin-hui. The research and development of the biological treatment of chlorophenol wastewater[J]. Chemistry Bulletin, 1998(8): 1-5.
- [2] 常影. 纳米 Pd/Fe 双金属催化剂对水中氯代甲烷催化还原脱氯的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Chang Ying. Catalytic dechlorination of chloromethanes in water by nanoscale Pd/Fe bimetallic particles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [3] 周涛. 氯酚类物质在零价铁强化还原/氧化体系中的降解研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
Zhou Tao. Study of enhanced reductive/oxidative zero-valent iron technologies in the degradation of chlorophenols[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [4] 陈郁, 全燮. 零价铁处理污水的机理及应用[J]. 环境科学研究, 2000, 13(5): 24-26.
Chen Yu, Quan Xie. The mechanism of the treatment of wastewater using zero-valent iron and its application[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(5): 24-27.
- [5] Cheng R, Wang J L, Zhang W X. Comparison of reductive dechlorination of p-chlorophenol using Fe⁰ and nanosized Fe⁰ [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(1): 334-339.
- [6] Yanghsin S, Yutsung T. Reaction of decabrominated diphenyl ether by zero valent iron nanoparticles [J]. Chemosphere, 2010, 78(10): 1200-1206.
- [7] Kustov L M, Finashina E D, Shuvalova E V, et al. Pd-Fe nanoparticles stabilized by chitosan derivatives for perchloroethene dechlorination[J]. Environment International, 2011, 37(6): 1044-1052.
- [8] 张卫华. 纳米 Ni/Fe 及超声辅助纳米 Ni/Fe 对水中氯代有机物脱氯研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2008.
Zhang Weihua. The study on dechlorination of chlorinated organic compounds in water by Ni/Fe nanoparticles and with assistance of ultrasound[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2008.
- [9] 何小娟, 李旭东, 汤明皋, 等. 零价铁、镍-铁和铜-铁双金属对四氯乙烯的脱氯性能研究[J]. 化工环保, 2006, 26(6): 451-454.
He Xiaojuan, Li Xudong, Tang Minggao, et al. Study on dechlorination capabilities of zero-valent iron, nickel-iron or copper-iron bimetal on tetrachloroethylene[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2006, 26(6): 451-454.
- [10] 卫建军. 纳米级 Pd/Fe 双金属对水中氯酚的催化脱氯研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Wei Jianjun. Catalytic dechlorination of chlorophenols in water by nanoscale Pd/Fe bimetallic particles[D]. Hanzhou: Zhejiang University, 2010.
- [11] 沈帆, 杨恩, 阮霞, 等. 纳米 Fe/Ni 还原水中 2, 4-二氯酚途径及 pH 的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 151-155.
Shen Fan, Yang En, Ruan Xia, et al. Pathway of the reduction of 2, 4-dichlorophenol by nanoscale modified Fe/Ni and the effects of pH[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(6): 151-155.
- [12] 魏红, 李克斌, 徐志嫻. Ni/Fe 二元金属对对氯苯酚废水的催化降解作用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(10): 122-126.
Wei Hong, Li Kebin, Xu Zhiqiang. Catalytic degradation of p-chlorophenol-contaminated water by Ni/Fe bimetallic[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(10): 122-126.
- [13] 汪茜, 阮霞, 刘红, 等. 镍质量比对纳米 Fe/Ni 还原水中 2, 4-二氯酚的影响[J]. 环境科学与技术, 2014(12): 57-61.
Wang Qian, Ruan Xia, Liu Hong, et al. Effects of mass ratio of Ni on the reduction of 2, 4-dichlorophenol by nanoscale Ni/Fe[J]. Environmental Science & Technology, 2014(12): 57-61.
- [14] Pratt A R, Blowes D W, Ptacek C J. Products of chromate reduction on proposed subsurface remediation material [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(9): 2492-2498.
- [15] 赵曦蕾. Fenton 法降解对硝基苯酚的机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
Zhao Xilei. Mechanism study on degradation of p-nitrophenol by Fenton reagent[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.

Study on the preparation of nanoscale Fe/Ni bimetal and its reduction of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution

FAN Xianyuan, SUN Yi, RUAN Xia, LI Zhe, LIU Hong

College of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

Abstract Nanoscale Fe/Ni bimetal is prepared by the liquid phase reduction method. The effects of the FeCl₂ concentration, $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})$, and $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)$ on the reduction of 2, 4-dichlorophenol (2, 4-DCP) are investigated and the reduction pathway of 2, 4-DCP is confirmed. The results show that when the concentration of the FeCl₂ solution is 3 mol/L, $n(\text{Ni})/n(\text{Fe})=4\%$, and $n(\text{NaBH}_4)/n(\text{FeCl}_2)=1$, the removal efficiency of 2, 4-DCP is nearly 100%, with 95% of 2, 4-DCP being reduced to phenol. The morphology of the nano Fe/Ni is spherical particles with diameter of about 50 nm. The Fe/Ni particles are linked into branches by their inherent magnetic force and are aggregated dispersedly owing to the electrostatic stabilization. The BET surface area of the Fe/Ni particles reaches 44.8 m²/g. The pathway of 2, 4-DCP is mainly attributed to the fact that two C-Cl bands are broken in turns to form 2-chlorophenol or 4-chlorophenol, and then dechlorinated to phenol.

Keywords nano materials; Fe/Ni bimetal; 2,4-dichlorophenol; reduction

(编辑 田恬)