

银负载铁酸铋复合纳米纤维的制备及催化还原对硝基苯酚性能

陈 欢, 高宇宏, 张 翱, 周雪娇*

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年12月20日; 录用日期: 2026年1月13日; 发布日期: 2026年1月22日

摘 要

对氨基苯酚在医药和显影等领域有重要应用, 利用催化还原法将废水中的毒性较高的对硝基苯酚(4-NP)转换为对氨基苯酚(4-AP)具有重要意义。本文利用超长一维结构的铁酸铋纳米纤维(BiFeO₃ NFs)为载体, 采用原位还原法负载Ag纳米粒子, 其负载量约为2.27%。实验表明, BiFeO₃/Ag NFs在8 min内催化4-NP还原为4-AP, 其转化率为98.3%。根据反应动力学曲线获得BiFeO₃/Ag NFs的动力学速率常数 k_{app} 为0.295 min⁻¹。这种优异的性能这是由于Ag具有更高的功函数, 能够与BiFeO₃形成异质结构, 有效促进界面电子快速转移到半导体BiFeO₃, 有效提高了催化剂的催化活性。此外, BiFeO₃ NFs的特殊结构也使其具有良好的循环稳定性, 制备的复合催化剂在3次循环使用后经过8 min对4-NP的还原率依然可以达到96.7%, 这种循环使用性能良好且性能优异的一维结构催化剂有望在有机染料等污染物处理等领域表现出优异的潜力。

关键词

BiFeO₃ NFs, AgNPs, 静电纺丝技术, 催化还原4-NP

Preparation of Silver-Loaded Bismuth Ferrite Nanofibers and Their Catalytic Performance for P-Nitrophenol Reduction

Huan Chen, Yuhong Gao, Xuan Zhang, Xuejiao Zhou*

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: December 20, 2025; accepted: January 13, 2026; published: January 22, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈欢, 高宇宏, 张翱, 周雪娇. 银负载铁酸铋复合纳米纤维的制备及催化还原对硝基苯酚性能[J]. 材料科学, 2026, 16(1): 95-103. DOI: 10.12677/ms.2026.161011

Abstract

It is of great significance to convert highly toxic p-nitrophenol (4-NP) in wastewater into p-aminophenol (4-AP) via the reduction method. In this study, ultra-long one-dimensional bismuth ferrite nanofibers (BiFeO₃ NFs) were used as the support, and Ag nanoparticles were loaded by the in-situ reduction method with a loading capacity of approximately 2.27%. Experimental results show that BiFeO₃/Ag NFs can catalyze the reduction of 4-NP to 4-AP within 8 minutes, achieving a conversion rate of 98.3%. The apparent kinetic rate constant (k_{app}) of BiFeO₃/Ag NFs obtained from the reaction kinetic curve is 0.295 min⁻¹. This excellent performance is attributed to the higher work function of Ag, which can form a heterostructure with BiFeO₃, effectively promoting the rapid transfer of interfacial electrons to the semiconductor BiFeO₃ and thus significantly enhancing the catalytic activity of the catalyst. In addition, the special structure of BiFeO₃ NFs endows it with good cyclic stability. After 3 cycles of use, the prepared composite catalyst still maintains a reduction rate of 96.7% for 4-NP within 8 minutes. This one-dimensional structured catalyst with excellent performance and good reusability is expected to exhibit great potential in the treatment of organic dyes and other pollutants.

Keywords

BiFeO₃ Nanofibers, Silver Nanoparticles, Electrospinning, Catalytic Reduction of 4-NP

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

4-硝基苯酚(4-NP)是一种常见的化工中间体, 广泛应用与农药、医药、染料等行业。4-硝基苯酚的过量使用已造成严重的环境负担, 其中水污染问题尤为突出, 对生态环境及动植物、人类健康构成严重威胁[1][2]。因此, 对硝基苯酚被认为是环境污染中具有代表性的污染物。根据已有文献, 降解 4-硝基苯酚污染的方法主要包括物理吸附法、微生物处理法及化学氧化法。但这些方法存在能耗过高、产生二次污染、效率低下等难以避免的问题[3][4]。值得关注的是, 4-硝基苯酚的还原产物对氨基苯酚(4-AP)具有良好的生物降解性, 常作为医药原料、照相显影剂及染料生产的反应中间体[5][6]。因此, 寻找高效催化剂, 通过选择性加氢还原将对硝基苯酚的硝基转化为对氨基苯酚, 具有重要的现实意义与紧迫性[7]。贵金属催化剂(如: Au、Ag、Pt 等)因其高功函的特性被广泛应用与 4-NP 的还原。但其表面自由能高易引起团聚, 进而导致催化活性明显下降的缺点较为明显。为了解决这一问题, 研究人员致力于将贵金属负载到一维纳米纤维材料表面, 防止贵金属团聚并增加与反应物接触面积[8][9]。并且由于磁性材料可以进行磁分离的特性, 纳米复合材料可以使用外部磁铁从反应混合物中分离出来, 降低催化剂的损失。铁酸铋(BiFeO₃)因为其良好的可见光响应能力, 优异的稳定性以及磁可分离特性, 受到了广泛的关注和研究[10]。磁性 BiFeO₃ 纳米纤维由于其良好的稳定性、易于分离和卓越的催化作用, 已被用于亚甲基蓝, 罗丹明 B 等污染物的降解[11][12]。

因此, 本文利用静电纺丝技术制备具有一维结构的 BiFeO₃ 纳米纤维为基底, 采用原位合成法对 BiFeO₃ 负载银纳米粒子修饰, 形成双相催化体系, 旨在发挥双催化剂的协同作用, 研究其协同还原硝基苯衍生物及其潜在的反应机理, 考察催化剂增强还原对硝基苯酚的催化活性。

2. 实验部分

2.1. 化学试剂与仪器

试剂：聚乙烯基吡咯烷酮(PVP)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、乙二醇甲醚($C_3H_8O_2$)、丙酮(C_3H_6O)、乙醇胺(PVP)、冰乙酸(CH_3COOH)、五水合硝酸铋($Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$)、九水合硝酸铁($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$)、硝酸银($AgNO_3$)、对硝基苯酚(4-NP)、硼氢化钠($NaBH_4$)、盐酸(HCl)、氢氧化钠(NaOH)、甲醇(CH_3OH)、对苯醌(BQ)、异丙醇(IPA)。

仪器：烘箱(WL881-1)、扫描电子显微镜(HITACHI SU70)、X 射线衍射仪(Rigaku D/max2600)、X 射线能量散射光谱(EDX)、紫外-可见分光光度计(UV759)、电化学工作站(CHI 660E)。

2.2. $BiFeO_3/Ag$ 纳米纤维的制备

本研究采用静电纺丝技术制备了 $BiFeO_3$ 纳米纤维。将 1.94 g 五水硝酸铋和 1.61 g 九水硝酸铁溶于 0.025 mL 乙醇胺、2.5 mL 冰乙酸、5 mL 乙二醇甲醚的混合液中。磁力搅拌 2 h 后，获得橙色透明溶液，将此溶液标记为 A。将 1.7 g 的 PVP 加入到 2.75 mL 丙酮和 5.5 mL DMF 的混合溶液中，磁力搅拌 4 h 后获得澄清无色溶液 B。将 A 溶液缓慢加入到 B 溶液中，并搅拌 12 h，获得橙色透明的纺丝前驱体溶液。将 2 mL 纺丝前驱体溶液倒入到塑料注射器中，再将不锈钢针头夹在注射器前端并连接高压电源，铝箔作为接收端。在不锈钢针头和滤波板之间施加 10 kV 的高压直流电，针头与铝箔板之间的距离约为 15 cm。五小时后将收集到的纤维置于马弗炉中，以 5℃/min 的速率升温到 550℃保温 120 min，最终获得铁酸铋纳米纤维($BiFeO_3$ NFs)。

2.3. $BiFeO_3/Ag$ 复合纳米纤维的制备

采用原位还原法将银纳米颗粒均匀加载到 $BiFeO_3$ NFs 表面。在制备氨银溶液之前，将 $BiFeO_3$ NFs 浸入 4 mM 的 $SnCl_2$ 溶液中，活化 12 小时。将 0.02 g $AgNO_3$ 溶解于 17 mL 去离子水中，再加入 3 mL 稀释后的氨水(氨水和去离子水 1:1 混合)，得到银氨溶液。最后，将活化后的 $BiFeO_3$ NFs 加入制备好的氨银溶液中，反应 1 分钟。所得样品记录为 $BiFeO_3/Ag$ NFs。

2.4. 表征

采用扫描电子显微镜(SEM)观察制备的纳米纤维的形貌，采用 X 射线衍射仪(XRD)记录样品的 X 射线衍射图谱，并利用附在扫描电子显微镜上的 X 射线能量散射光谱(EDX)系统进行了能谱分析；通过紫外-可见分光光度计对还原反应后的 4-NP 溶液的剩余浓度进行分析，以研究其催化性能的变化。

2.5. 催化活性测试

通过过量 $NaBH_4$ 还原 4-硝基苯酚(4-NP)，考察了 $BiFeO_3/Ag$ NFs 的催化活性，在典型工艺中，将 $NaBH_4$ (50 mL, 20 mM)加入 0.05 mM 的 4-NP (50 mL)的水溶液中，将混合悬浮液剧烈搅拌 5 min 以确保吸附-解吸平衡的建立，混合溶液由淡黄色变为亮黄色[13] [14]。随后，将 5 mg 制备好的催化剂均匀分布到上述混合溶液中。最后，以 2 min 为时间间隔取 2.5 mL 以上混合物于石英池中，通过紫外-可见分光光度计分析还原过程。循环试验采用相似的实验流程，同时进行 3 个平行实验。第一次循环试验结束后，通过磁分离技术回收催化剂，经去离子水洗涤数次后烘干[15]。回收的样品总量平均分成 5 mg，平行进行第二次循环实验。第二循环试验结束后，所有样品回收，以此类推。通过三次循环试验来评价催化剂的稳定性和可重用性。

3. 结果与讨论

通过 SEM 对 BiFeO_3 纳米纤维的微观结构进行观察。图 1(a)和图 1(b)为不同尺度下 BiFeO_3 静电纺纳米纤维的 SEM 图像。 BiFeO_3 NFs 的形貌为光滑、均匀、连续的一维纤维形态，纤维相互交错，取向随机排列。有多孔网络的一维形貌有利于电荷的传输，并且一维形貌赋予催化剂比纳米颗粒更高的表面体积比和更多的活性位点，从而增强了催化性能。图 1(c)和图 1(d)为 BiFeO_3/Ag NFs 的 SEM 图像，由于氨水的腐蚀性，纤维表面光滑结构受到了一定的破坏，但是并未改变其一维形貌。然而，由于负载的银纳米粒子较小，并没有在 SEM 电镜中观察到其微观形貌。

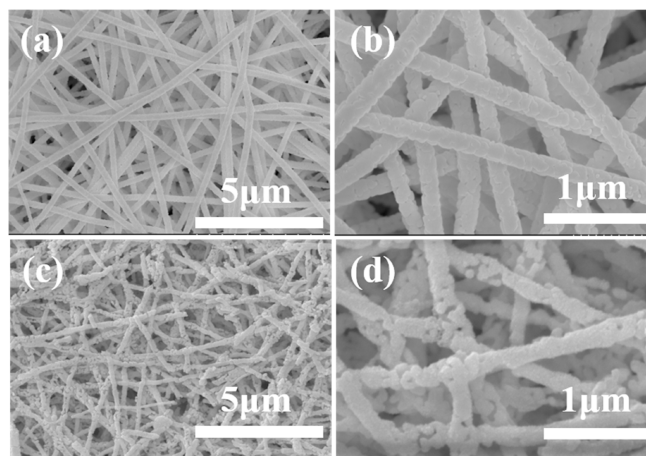


Figure 1. SEM images of different sizes of BiFeO_3 NFs (a) and (b) and BiFeO_3/Ag NFs (c) and (d)

图 1. BiFeO_3 NFs (a)和(b)和 BiFeO_3/Ag NFs (c)和(d)在不同倍率下的 SEM 图像

利用 XRD 图谱测试研究了所制备样品的晶体结构。如图 2 所示，其在 $2\theta = 22.4^\circ$ 、 31.8° 、 32.1° 、 39.5° 、 45.8° 、 51.30 和 57.0° 处的衍射峰，分别对应于六方相 BiFeO_3 (JCPDS 71-2494)的(012)、(104)、(110)、(202)、(024)、(116)和(214)晶面。此外，XRD 图谱中没有观察到其他杂质峰，这证明此方法制备的铁酸铋具有较高的纯度。

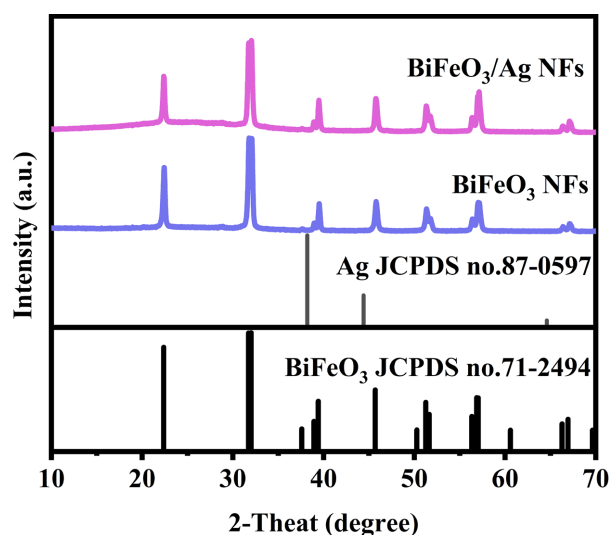


Figure 2. XRD images of BiFeO_3 NFs, BiFeO_3/Ag NFs

图 2. BiFeO_3 NFs、 BiFeO_3/Ag NFs 的 XRD 图像

由于样品中 Ag 的含量较少,所以在 BiFeO₃/Ag NFs 的光谱线中没有观察到属于 Ag 的衍射峰。因此,我们进一步采用能量色散 x 射线(EDX)谱图来对样品的组成元素进行表征。图 3 为 EDX 谱图, BiFeO₃/Ag NFs 中存在 Bi、Fe、和 Ag 元素,所制备的样品中元素的原子含量与组成基本一致。其中,Ag 原子含量是 2.27%,间接表明 Ag NPs 在 BiFeO₃ 纳米结构上的成功修饰了。结合 SEM 电镜照片,成功制备了具有一维超长结构的 BiFeO₃/Ag NFs 复合纳米纤维催化剂材料。

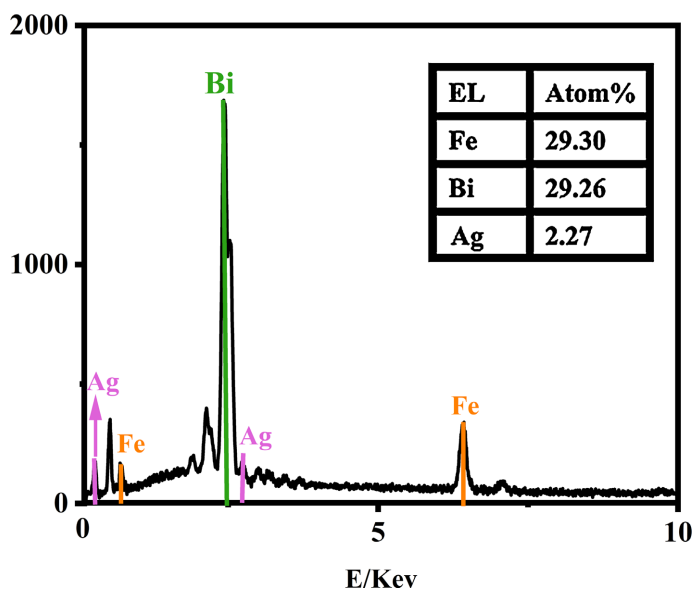


Figure 3. EDX images of BiFeO₃/Ag NFs

图 3. BiFeO₃/Ag NFs 的 EDX 图像

3.1. 催化剂活性测试

为了评估复合催化剂的催化活性,选择 NaBH₄ 还原 4-NP 作为模型反应。实验过程中不附加额外光源,并且多次实验证明,太阳光和室内照明灯对实验结果无影响,故不进行暗态实验对照。实验对于 4-NP 的还原过程,可以通过测量 400 nm 处吸光度的变化来判断反应的程度。纯 4-NP 溶液在 317 nm 处有吸收。加入新鲜制备的 NaBH₄ 水溶液后,吸收峰移至 400 nm,颜色由浅黄色变为亮黄色。400 nm 处的吸收峰是由于 NaBH₄ 在碱性条件下形成 4-硝基苯酚离子所致。未加入催化剂的条件下,400 nm 处的峰基本保持不变。当催化剂加入含 NaBH₄ 的 4-NP 溶液,300 nm 处出现明显的吸收峰,并且 400 nm 的峰位逐渐衰减直至消失。此外,不同样品在 400 nm 处的峰值衰减速度不同,其中 BiFeO₃/Ag NFs 相较于 BiFeO₃ NFs 的催化活性显著提高。仅在 8 min 内完成 4-NP 到 4-AP 的转化。对应图 4(a)展现了不同催化剂对废水样品中 4-NP 的移除效率。当反应进行到 8 min 时,仅以 NaBH₄ 为还原剂不含催化剂对 4-NP 的移除率只有 4.2%。其中 BiFeO₃/Ag NFs 和 BiFeO₃ NFs 对废水样品中 4-NP 的移除率分别达到 98%和 79%。其中 BiFeO₃/Ag NFs 的活性最高。可见用分散良好的银纳米粒子装饰 BiFeO₃ NFs 可以显著提高催化性能。根据吸收强度与浓度之间的线性关系,构造了 C/C_0 随反应时间 t 的曲线。4-NP 到 4-AP 的转化可以描述为伪一级反应或

$$\ln(C/C_0) = -kt \quad (1)$$

其中 k 为动力学速率常数, C 和 C_0 分别提供了反应时间 t 时的 4-NP 浓度和初始浓度[16][17]。 $\ln(C/C_0)$ 与反应时间 t 的关系图(图 4(b))清楚地显示了所有催化剂的线性关系,表明 4-NP 的催化还原反应确实按照

准一级动力学进行。BiFeO₃/Ag NFs 催化剂表现出最好的性能。这是因为将 Ag NPs 加载到金属氧化物上, 金属氧化物作为载体可以提供更稳定的分散环境, 减少 Ag NPs 的团聚, 从而保持其较高的催化活性, 同时 Ag NPs 与金属氧化物之间的界面相互作用也有助于提高催化性能。

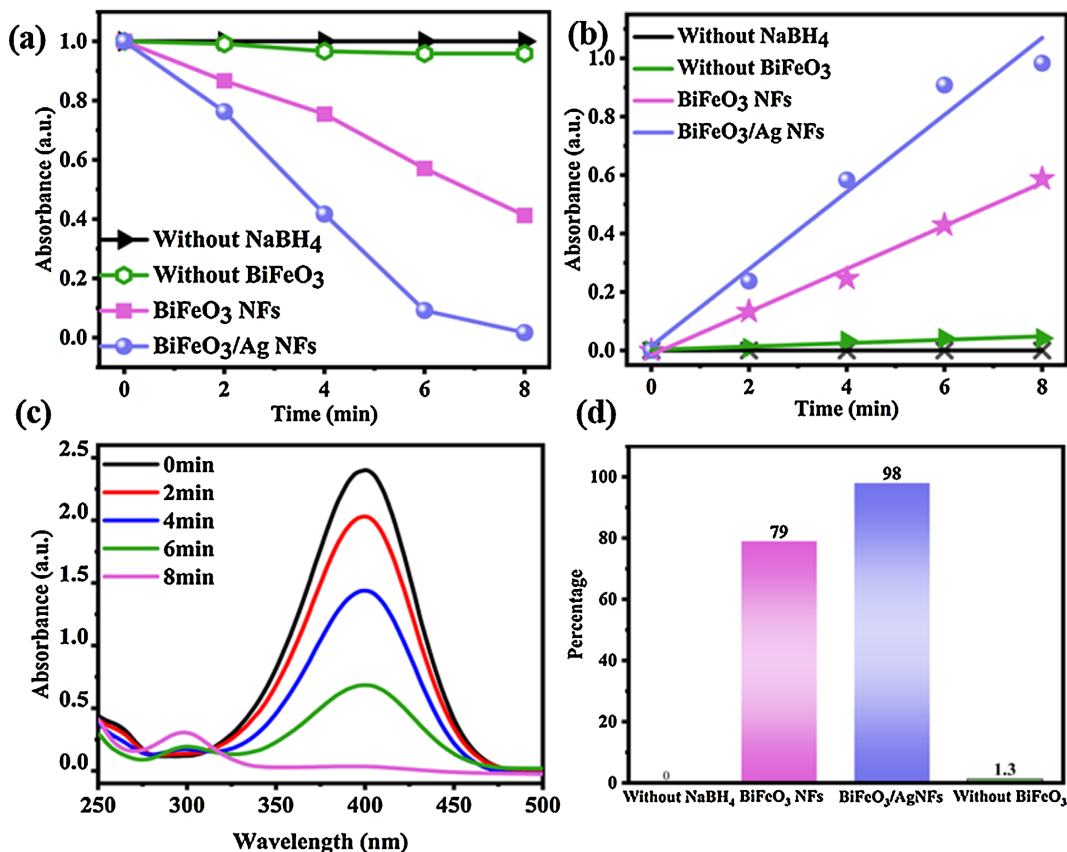


Figure 4. (a) Comparison of 4-NP degradation; (b) Reduction rate within 8 minutes; (c) Ultraviolet-visible absorption spectra of 4-NP reduction catalyzed by BiFeO₃/Ag NFs composites; Comparison of the removal rates of 4-NP reduction in different samples; (d) Comparison of the removal rates of 4-NP reduction in different samples

图 4. (a) 还原 4-NP 对比图; (b) 8 min 内还原 4-NP 移除率图; (c) BiFeO₃ NFs/Ag 催化还原 4-NP 的紫外 - 可见吸收光谱图; (d) 8 min 内还原率柱状图

结合现有文献中报道的结果[18], 可能的催化反应过程如图 5 所示, 在 NaBH₄ 参与下, 4-NP 在纤维表面负载的 Ag NPs 上发生了催化还原反应。由于 Ag 高功函的特性, 作为电子的富集点, 在反应的过程中充当了界面电子转移的介质。通过吸附 4-NP 和氢化物离子在其表面上实现电子转移。这种相互作用降低了活化能, 促进了电子从 NaBH₄ 向 4-NP 的转移。其次, BH₄⁻ 与水反应生成硼酸盐(BO₃²⁻)和活性氢, 后者转移到 Ag NPs 表面形成活性表面氢 Ag-H。第三, Ag NPs 的表面活性氢 Ag-H 攻击 4-NP 的硝基, 使其还原为 4-AP。

为评估复合催化剂的酸碱性溶液中的催化活性, 在 pH 值范围 3~9 区间内研究催化还原 4-NP 的催化活性的影响因素。从图 6 可以看出, 还原速率随着 pH 值的增加而降低。该催化剂在较低的 pH 条件下表现出较高的效率。NaBH₄ 的水解包括两个步骤: 水分子的水解和硼氢化物离子的水解:



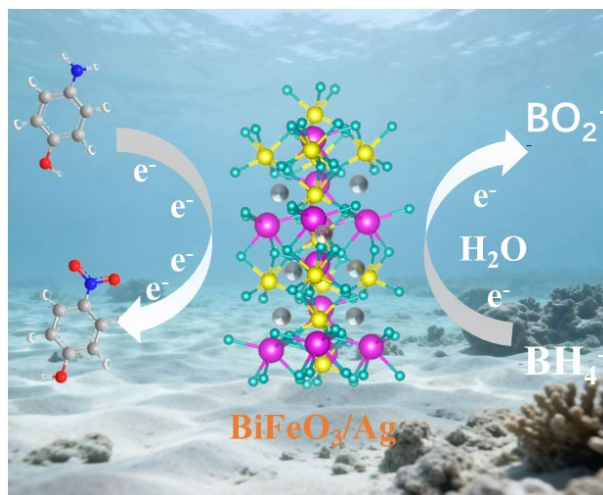


Figure 5. Schematic diagram of the reaction process
图 5. 反应流程示意图

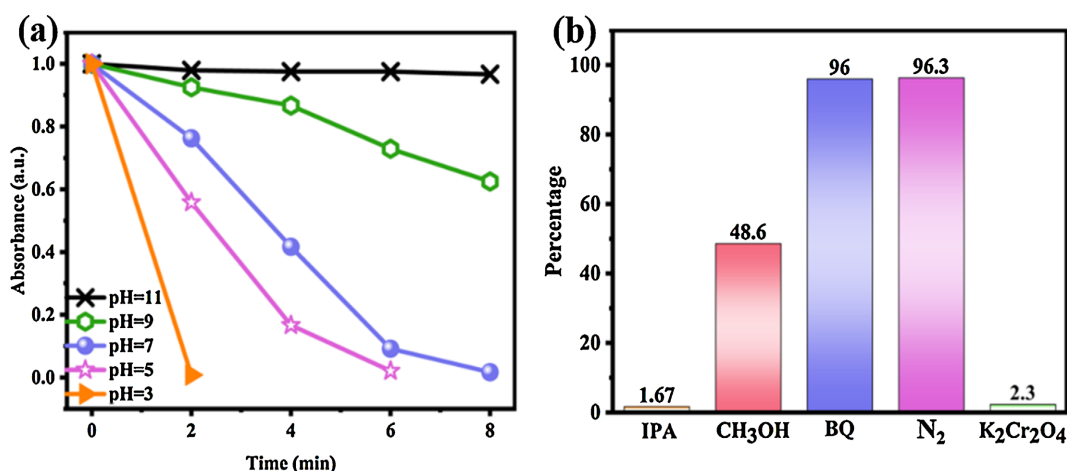


Figure 6. (a) Comparison of BiFeO₃/Ag NFs reduction of 4-NP in different pH environments; (b) Comparison of the effects of different scavengers on the reduction of BiFeO₃/Ag NFs to 4-NP

图 6. (a) 在不同 pH 环境中 BiFeO₃/Ag NFs 还原 4-NP 对比; (b) 不同捕获剂对 BiFeO₃/Ag NFs 还原 4-NP 影响的对比

硼氢化物离子的水解比水分子的水解慢,使其成为反应速率的决定步骤。在较低的 pH 值下,溶液中的质子很容易与硼氢化物离子中的氢原子结合,导致硼氢化物离子的水解速度加快,4-NP 在碱性条件下,可用于反应的质子减少;因此,水解速率降低。

为探讨催化机理,使用捕获剂对溶液中可能参与反应的活性物质进行研究。在反应体系中,以氮气(N₂)为超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)捕获剂,以异丙醇(IPA)为羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的捕获剂,以甲醇(CH₃OH)为空穴(h^+)捕获剂,重铬酸钾(K₂Cr₂O₄)为电子(e^-)的捕获剂。图 6(b)显示了不同捕获剂对 BiFeO₃/Ag NFs 还原 4-NP 的影响,结果表明, e^- 和 $\cdot\text{OH}$ 是主要活性物质,该结论与文献报道结果一致[19]。

3.2. 循环性能测试

此外,催化剂在降解有机废水中的稳定性和可重复使用性是实际应用中需要考虑的重要因素。试验中选择 BiFeO₃/Ag NFs 进行 4-NP 催化还原实验。从图可以看出,经过三次循环实验, BiFeO₃/Ag NFs 对 4-NP 的还原效率轻微下降。然而,经过第三次循环后,样品仍保留了 96.67% 的还原 4-NP 活性。此外,

选择 BiFeO_3 作为载体减轻了催化剂的损失并且由于其具有弱磁性而易于回收如图 7(c)所示, 相较于常规的自然沉积, 磁吸附回收法仅需 2 min 即可回收样品, 这极大的节约了时间成本, 并且有效减少催化剂的浪费。因此, 该样本表现出出色的稳定性和可重用性。

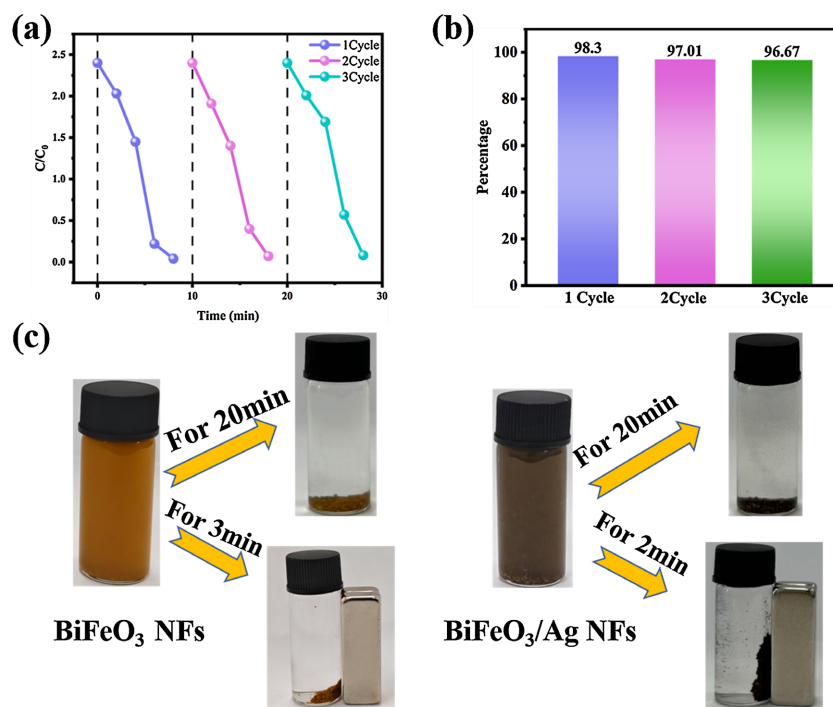


Figure 7. (a) Cyclic catalytic test images of BiFeO_3/Ag NFs; (b) Histogram of Cyclic catalytic test; (c) Schematic diagram of magnetic recovery

图 7. (a) BiFeO_3/Ag 循环催化测试图像; (b) 催化测试柱状图; (c) 磁性回收示意图

4. 结论

本实验采用静电纺丝技术结合原位还原法成功制备了铁酸铋负载纳米银的复合纳米纤维。制备的复合纳米纤维呈开放的三维网络纳米结构, Ag NPs 均匀地负载到 BiFeO_3 NFs 上, 形成多级结构纳米纤维。在硼氢化钠存在下, BiFeO_3/Ag NFs 在室温下表现出优异的还原硝基苯酚的催化活性。进一步在不同 pH 环境下以及采用不同清洗剂对还原 4-NP 的影响进行测试。实验结果表明, 在 BiFeO_3/Ag NFs 还原 4-NP 的过程中, e^- 和 $\cdot\text{OH}$ 是主要活性物质且该催化剂在较低的 pH 条件下表现出较高的效率。此外, 此外在以还原 4-NP 为模型反应 8 min 进行 3 次循环使用后, BiFeO_3/Ag NFs 的催化活性仍可以保持 96.67%, 结果证明, BiFeO_3/Ag NFs 作为一种弱磁材料, 同时具有可重复性及易回收性的优点。因此, 制备的 BiFeO_3/Ag NFs 可以作为一种高效的纳米催化剂, 将有机的硝基苯转化为低毒的氨基苯化合物, 在有机染料等污染物处理等领域中有一定的应用前景。

参考文献

- [1] Han, L., Liu, S.G., Liang, J.Y., Ju, Y.J., Li, N.B. and Luo, H.Q. (2019) Ph-Mediated Reversible Fluorescence Nanoswitch Based on Inner Filter Effect Induced Fluorescence Quenching for Selective and Visual Detection of 4-Nitrophenol. *Journal of Hazardous Materials*, **362**, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.025>
- [2] Balasubramanian, P., Balamurugan, T.S.T., Chen, S.M. and Chen, T.W. (2019) Simplistic Synthesis of Ultrafine CoMnO_3 Nanosheets: An Excellent Electrocatalyst for Highly Sensitive Detection of Toxic 4-Nitrophenol in Environmental Water Samples. *Journal of Hazardous Materials*, **361**, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.070>

- [3] Li, B., Hao, Y., Shao, X., Tang, H., Wang, T., Zhu, J., *et al.* (2015) Synthesis of Hierarchically Porous Metal Oxides and Au/TiO₂ Nanohybrids for Photodegradation of Organic Dye and Catalytic Reduction of 4-Nitrophenol. *Journal of Catalysis*, **329**, 368-378. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2015.05.015>
- [4] Kang, H., Kim, M. and Park, K.H. (2015) Effective Immobilization of Gold Nanoparticles on Core-Shell Thiol-Functionalized GO Coated TiO₂ and Their Catalytic Application in the Reduction of 4-Nitrophenol. *Applied Catalysis A: General*, **502**, 239-245. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.05.032>
- [5] Prakasam, S., Latha Chellamuthu, D.K., Krishnan, G. and Chinnathambi, S. (2024) Ratiometric Strategy Assisted Electrochemical Detection of 4-Nitrophenol in Water Samples Using Nanostructured CuO. *Journal of Materials Chemistry C*, **12**, 12458-12467. <https://doi.org/10.1039/d4tc02144d>
- [6] Li, Y., Ren, D., Guo, S., Wang, M., Zhai, J., Zhang, S., *et al.* (2024) Preparation of Nickel-Doped Iron-Based Bimetallic Organic Framework Carbonized Derivatives for Heterogeneous Catalytic Hydrogen Peroxide Degradation of 4-NP. *Journal of Molecular Structure*, **1299**, Article ID: 137058. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.137058>
- [7] Quan, X. and Yan, B. (2024) In Situ Construction of Covalent-Organic Framework on Hydrogen-Bond Organic Framework: Fluorescence Detection and Removal of 4-Nitrophenol and Metamitron in Aqueous Media. *Journal of Colloid and Interface Science*, **674**, 862-872. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.06.234>
- [8] Mahto, B., Barhoi, A., Ali, H. and Hussain, S. (2024) Deciphering the Mechanistic Insights of 4-Nitrophenol Reduction Catalyzed by a 1D-2D Bi₂S₃ Nanostructured Catalyst. *Nanoscale*, **16**, 8060-8073. <https://doi.org/10.1039/d4nr00153b>
- [9] Wang, P., Li, D., Wang, L., Guo, S., Zhao, Y., Shang, H., *et al.* (2024) Ultrafine Coni Alloy Nanoparticles Anchored on Surface-Roughened Halloysite Nanotubes for Highly Efficient Catalytic Hydrogenation of 4-Nitrophenol. *Chemical Engineering Journal*, **495**, Article ID: 153631. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153631>
- [10] Ayodhya, D. and Veerabhadram, G. (2019) Influence of g-C₃N₄ and g-C₃N₄ Nanosheets Supported CuS Coupled System with Effect of pH on the Catalytic Activity of 4-NP Reduction Using NaBH₄. *FlatChem*, **14**, Article ID: 100088. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2019.100088>
- [11] Goyal, A., Bansal, S. and Singhal, S. (2014) Facile Reduction of Nitrophenols: Comparative Catalytic Efficiency of MFe₂O₄ (M= Ni, Cu, Zn) Nano Ferrites. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, Article No: 4895. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.050>
- [12] Wang, Y., Gao, P., Wei, Y., Jin, Y., Sun, S., Wang, Z., *et al.* (2021) Silver Nanoparticles Decorated Magnetic Polymer Composites (Fe₃O₄@PS@Ag) as Highly Efficient Reusable Catalyst for the Degradation of 4-Nitrophenol and Organic Dyes. *Journal of Environmental Management*, **278**, Article ID: 111473. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111473>
- [13] Wang, C., Yang, L., Yuan, X., Zhou, W., Xu, M. and Yang, W. (2021) Fabrication of Ag Nanoparticles Supported on Amino-Functionalized Peeled-Watermelon Structured Silica-Coated Nano-Fe₃O₄ with Enhanced Catalytic Activity for Reduction of 4-Nitrophenol. *Colloid and Interface Science Communications*, **45**, Article ID: 100521. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100521>
- [14] Zhang, X.Q., Shen, R.F., Guo, X., Yan, X., Chen, Y., Hu, J., *et al.* (2021) Bimetallic Ag-Cu Nanoparticles Anchored on Polypropylene (PP) Nonwoven Fabrics: Superb Catalytic Efficiency and Stability in 4-Nitrophenol Reduction. *Chemical Engineering Journal*, **408**, Article ID: 128018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128018>
- [15] Cao, H.L., Liu, C., Cai, F., Qiao, X., Dichiara, A.B., Tian, C., *et al.* (2020) In Situ Immobilization of Ultra-Fine Ag NPs onto Magnetic Ag@RF@Fe₃O₄ Core-Satellite Nanocomposites for the Rapid Catalytic Reduction of Nitrophenols. *Water Research*, **179**, Article ID: 115882. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115882>
- [16] Hou, C., Zhao, D., Chen, W., Li, H., Zhang, S. and Liang, C. (2020) Covalent Organic Framework-Functionalized Magnetic CuFe₂O₄/Ag Nanoparticles for the Reduction of 4-Nitrophenol. *Nanomaterials*, **10**, Article No. 426. <https://doi.org/10.3390/nano10030426>
- [17] Lv, Z., Zhu, X., Meng, H., Feng, J. and Wang, A. (2019) One-Pot Synthesis of Highly Branched Pt@Ag Core-Shell Nanoparticles as a Recyclable Catalyst with Dramatically Boosting the Catalytic Performance for 4-Nitrophenol Reduction. *Journal of Colloid and Interface Science*, **538**, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.11.109>
- [18] Song, M., Wu, Y., Xu, C., Wang, X. and Su, Y. (2019) Synergistic Effects of Multi-Active Sites in Silver Modified Bi₁₀-BiVO₄ toward Efficient Reduction of Aromatic Nitrobenzene. *Journal of Hazardous Materials*, **368**, 530-540. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.083>
- [19] Zhang, G., Yang, J., Huang, Z., Pan, G., Xie, B., Ni, Z., *et al.* (2023) Construction Dual Vacancies to Regulate the Energy Band Structure of ZnIn₂S₄ for Enhanced Visible Light-Driven Photodegradation of 4-NP. *Journal of Hazardous Materials*, **441**, Article ID: 129916. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129916>