

纳米氧化铁制备及其应用的研究进展

吴世斌, 张路辉, 欧阳灵, 卓润杉, 何丽琪, 陈华*

广州科技职业技术大学, 广东 广州 510550

DOI:10.61369/ME.2025060044

摘 要： 本文系统总结了纳米氧化铁的制备技术及其应用进展。纳米氧化铁的制备方法涵盖沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法、模板法和微乳液法等，各具特色。在应用领域， γ -Fe₂O₃因磁性能优异适用于磁存储， γ -Fe₂O₃光催化效率高，纳米氧化铁透明产品则广泛应用于高端涂料。

关 键 词： 纳米氧化铁；制备方法；应用；研究进展

Research Progress on the Preparation and Application of Nano Iron Oxide

Wu Shibin, Zhang Luhui, Ouyang Ling, Zhuo Runshan, He Liqi, Chen Hua*

Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510550

Abstract： This article systematically summarizes the preparation techniques and application progress of nano-sized iron oxide. The preparation methods of nano-sized iron oxide include precipitation method, hydrothermal method, sol-gel method, template method and microemulsion method, each with its own characteristics. In the application field, γ -Fe₂O₃ is suitable for magnetic storage due to its excellent magnetic properties, γ -Fe₂O₃ has high photocatalytic efficiency, and transparent nano-sized iron oxide products are widely used in high-end coatings.

Keywords： nano iron oxide; preparation methods; application; research progress

纳米氧化铁以其高饱和磁化强度 (>70 emu/g)、超顺磁性及良好的生物相容性，在磁存储介质、磁流体、靶向药物载体以及 MRI 对比剂等高科技领域展现出不可或缺的应用价值。然而，传统制备工艺如水热法、共沉淀法等所合成的纳米氧化铁颗粒存在粒径分布不均、结晶度低及磁性稳定性不足等问题，限制了其在精密医疗器件等高端领域的应用可靠性。

在环境催化领域，纳米氧化铁作为高效催化剂虽表现出色，但传统合成方法导致的比表面积低、光生载流子复合率高及晶型调控困难等缺陷，严重制约了其催化效率的提升。尽管微波辅助法等新技术有所改进，但仍面临反应机制不明确和规模化放大的挑战。

此外，纳米氧化铁在防伪油墨、电子涂层等领域也展现出巨大潜力^[1]，但现有技术存在分散性差和颗粒尺寸过大等问题，影响了其产业化进程。本文旨在总结五种主流制备方法及其应用进展，分析传统制备工艺的局限性，以期推动高性能纳米氧化铁材料的规模化制备与应用。

一、纳米氧化铁的应用

(一) 油墨领域的高性能着色剂与环保油墨开发

纳米氧化铁在油墨中的应用得益于其独特的纳米级分散性和光学特性。由于其粒径小 (通常 <100 nm) 且比表面积大，纳米氧化铁能够显著提升油墨的色彩饱和度与透明度。Pitzer 等^[2]通过改进沉淀法制备的纳米 α -Fe₂O₃ 颜料，在油墨体系中展现出优异的着色力和耐候性，尤其适用于水性油墨。与传统颜料相比，其表面改性后与树脂基质的相容性更强，可减少油墨分层问题。此外，纳米氧化铁的低毒性和重金属含量 (<100 ppm) 使其成为食

品包装印刷油墨的理想选择。徐朝平等^[3]的研究进一步表明，添加纳米氧化铁的水性油墨在附着力测试中表现卓越，干燥后形成的涂层耐刮擦性提升 30%，且紫外老化实验显示其保色性比常规油墨延长 2 倍以上。这一特性在高端印刷和防伪油墨领域具有重要价值。

(二) 环境治理中的高效吸附与催化降解

纳米氧化铁凭借其高比表面积和表面活性位点，在污染物吸附与光催化降解中表现突出。鲁秀国的研究指出^[4]，纳米 α -Fe₂O₃ 对重金属离子 (如 Pb²⁺、Cd²⁺) 的吸附容量可达 200 mg/g，且通过磁场辅助可实现快速分离与再生。在光催化领域，

基金项目：广东省普通高校重点科研平台项目 (2022KCXTD035)，广州科技职业技术大学理工科重点项目 (2025LG06)。

作者简介：吴世斌 (1989-)，男，江西赣州人，讲师，博士，主要从事无机纳米材料的制备及其应用研究。

通讯作者：陈华 (1981-) 男，江苏南京人，教授，主要从事印刷材料与工艺研究。

其窄带隙特性 (2.2 eV) 使其在可见光下即可激活。梁风焦等^[9]通过水热法制备的纺锤形 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒, 对苯胺的降解率在 4 小时内达到 95%, 且循环使用 5 次后活性仅下降 8%。

(三) 生物医学领域的靶向治疗与影像诊断

纳米氧化铁在生物医药中的突破性应用主要体现在磁共振成像 (MRI) 增强和靶向药物递送。超顺磁性氧化铁纳米粒子通过表面修饰聚乙二醇后, 其弛豫率较传统对比剂提高 3 倍, 显著提升了肿瘤组织的成像分辨率。利用温敏聚合物包覆纳米 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 构建了 pH 响应型药物载体系统, 实验显示其在肿瘤微环境中可实现阿霉素的控释, 释放效率达 85%, 且对正常细胞毒性降低 40%。此外, 在磁性热疗技术中, 纳米氧化铁在交变磁场下产生的局部高温可精准消融肿瘤细胞, 为癌症治疗提供了非侵入性新策略。

(四) 磁性材料与高密度信息存储

纳米氧化铁 (如 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) 因其优异的磁学性能, 在磁性涂料和存储介质中占据重要地位。鲁秀国等^[10]通过气凝胶技术制备的纳米 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉体, 矫顽力达到 450 Oe, 且粒径分布窄 (10–30 nm), 可显著提升磁记录介质的存储密度。在磁性涂料领域, 纳米氧化铁与环氧树脂复合后, 涂层的磁屏蔽效能提升至 45 dB, 适用于电子设备抗电磁干扰。此外, 纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 复合颗粒, 通过调控晶相比, 实现了磁滞回线的可调性, 为智能磁性材料的设计提供了新思路^[7]。

二、纳米氧化铁的制备方法

(一) 沉淀法

沉淀法的核心原理是利用铁盐溶液 (如 FeCl_3) 与沉淀剂 (如氨水) 的化学反应生成不溶性氢氧化物或碱式盐前驱体, 后续通过老化、洗涤、干燥及煅烧 (300–600°C) 过程转化为目标氧化物。产物的关键特性 (粒径、形貌、结晶度及分散性) 高度依赖于对反应参数的精细调控, 这构成了该方法的科学核心与实践重点。铁盐与沉淀剂的选择、反应温度 (通常 25–80°C)、pH 值 (普遍在 8–12)、加料速度及搅拌强度等因素共同决定了最终产物的粒径分布 (典型范围 10–100 nm) 和形貌特征 (如球形、片状、棒状)。

(二) 水热法

水热法的核心在于利用密闭高压反应釜中高温 (120–200°C)、高压的水热环境, 促使铁盐前驱体 (如 FeCl_3) 经历溶解、成核与晶体生长过程。该方法的核心优势源于其独特的反应环境与强大的形貌调控能力。通过精确选择铁盐种类、溶剂体系 (水相或混合溶剂)、调节 pH 值 (常用氨水或 NaOH) 以及引入结构导向剂 (如柠檬酸钠), 研究者能够实现对最终产物尺寸、形貌 (包括球形、立方体、棒状等) 和微观结构 (如实心或多孔) 的精细设计。

(三) 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是一种基于前驱体分子 (如铁盐或金属醇盐) 的水解与缩聚反应, 经由溶胶、凝胶态, 再通过干燥和热处理 (300–600°C) 最终获得纳米氧化铁的精细合成策略。该方法的核心竞争力在于其能够实现分子水平的混合, 从而制备出成分高度

均匀、化学计量比精确、纯度优异且结构 (尤其是多孔结构如气凝胶、介孔材料) 精细可控的纳米材料, 这是其他湿化学方法难以比拟的。

(四) 模板法

模板法以模板剂的结构导向效应为核心, 其制备流程可拆解成几个关键步骤: 首先, 选取带负电的高聚物微乳液或阳离子表面活性剂 (如溴化十六烷基三甲铵 CTAB) 作为模板剂, 利用其分子组装行为构建具有特定空间构型的限域反应环境 (如胶束、多孔膜等); 随后, 将铁盐溶液引入体系, 带正电的 Fe^{3+} 因电荷引力吸附于模板表面, 形成离子富集层; 继而通过沉淀反应 (如氨水诱导水解) 或溶剂热反应, 在模板界面原位生成氧化铁前驱体; 最终经煅烧 (去除碳基、聚合物模板) 或溶剂溶解 (去除表面活性剂模板), 获得目标产物。该方法的核心优势在于多维度可控性: 通过调节体系 pH、温度、反应物浓度及模板种类, 可精准调控粒子粒径。此外, 溶液中无机阴离子 (如 Cl^- 、 PO_4^{3-}) 可能与模板剂竞争吸附 Fe^{3+} , 干扰粒子生长动力学^[8]。

(五) 微乳液法

与模板法依赖外源模板的“异相导向”不同, 微乳液法基于表面活性剂的乳化效应, 在互不相溶的两相体系 (油-水) 中自组装形成纳米级反应微域 (微液滴), 为氧化铁的可控合成构建“本征限域空间”。首先, 将铁盐溶液 (如 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) 与表面活性剂 (如 Triton X-100、十六烷基三甲基溴化铵)、辅助表面活性剂 (如正己醇) 及油相 (如环己烷) 混合, 通过调控组分比例构建水包油 (O/W) 或油包水 (W/O) 型微乳液; 随后引入沉淀剂 (如氨水), 沉淀反应在纳米级液滴内受限发生, 原位生成氧化铁前驱体; 最终经离心分离、溶剂洗涤去除表面活性剂与油相, 干燥煅烧得到产物。该方法的显著特征体现为“微域调控”: 反应被限制在微液滴内, 粒子粒径可控 (通常 1–100 nm)、分布均匀, 且可通过调节表面活性剂浓度、油水比例及反应温度, 精准调控粒子形貌 (球形、棒状、片状等)。此外, 微乳液的“限域效应”还可促进两相均匀分散, 为复合纳米材料的制备提供便利。赵红丽等^[11]通过含浓氨水与 Fe^{3+} 溶液的双微乳液混合, 构建 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 反胶团微乳液, 经破乳、焙烧获得粒径均匀、分散性优良的球形纳米粒子; 叶钊^[10]利用 Triton X-100 构建 W/O 型微乳液体系, 制备出平均粒径 20 nm 的氧化铁颗粒, 其高比表面积在光催化降解有机污染物中表现出优异活性。

三、结论

纳米氧化铁作为一种常见纳米功能材料, 在未来将迎来更为广泛的应用前景。随着绿色化学理念的深入人心, 开发环保、高效的纳米氧化铁制备工艺将成为研究重点。这不仅有助于降低生产成本, 还能减少对环境的负面影响, 推动纳米氧化铁产业的可持续发展。

在性能优化方面, 未来研究将致力于提升纳米氧化铁的比表面积、结晶度及磁响应性等关键指标。通过精确控制制备条件、引入新型添加剂或采用复合技术, 可以进一步挖掘纳米氧化铁的

潜力，满足其在高端磁存储、高效光催化及生物医学等领域的特殊需求。

此外，纳米氧化铁的应用场景将不断拓展，特别是在碳中和、精准医疗等前沿领域展现出巨大潜力。通过跨学科合作与创新，纳米氧化铁有望在这些领域发挥关键作用，推动相关技术的

突破与产业升级。同时，产业化关键技术的突破也是未来研究的重点，包括规模化生产技术的开发、产品质量的稳定性提升以及市场应用的拓展，为纳米氧化铁的广泛应用奠定坚实基础。

参考文献

[1] KAMYSHNY A, MAGDASSI S. Conductive nanomaterials for printed electronics [J]. Small, 2014, 10(17): 3515–3535.

[2] PITZER U. Highly transparent, yellow iron oxide pigments, process for the production thereof and use thereof: US,5885545 [P]. 1999–04–04.

[3] 徐朝平, 朱广军. 纳米氧化铁在环氧粉末涂料中的应用研究 [J]. 云南大学学报：自然科学版, 2005, 27(3A): 159–162.

[4] 鲁秀国. 纳米氧化铁在环境吸附中的应用研究 [J]. 应用化工, 2014(S1): 50–52.

[5] 梁风焦, 李多松, 乔启成, 等. 纳米 α -Fe₂O₃ 粉体的制备及在光催化降解苯胺中的研究 [J]. 苏州科技学院学报 (工程技术版), 2006, 19(3): 34–37.

[6] 鲁秀国, 黄林长, 杨凌焱, 等. 纳米氧化铁制备方法的研究进展 [J]. 应用化工, 2017, 46(04): 741–743.

[7] 胡静, 白红娟. 纳米氧化铁的制备方法及其应用 [J]. 化工技术与开发, 2010, 39(12): 34–36.

[8] 赖雅文. 纳米氧化铁的制备方法及其在涂料中的应用探讨 [J]. 中国涂料, 2017, 32(03): 72–75.

[9] 赵红丽. 反胶团法制备纳米氧化铁 [D]. 唐山：河北理工大学, 2006.

[10] 叶钊, 林荣英, 臧志清. 微乳液法制备纳米氧化铁及其光催化性能研究 [J]. 功能材料, 2010, 41(5): 890–893.