

# Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> 复合催化剂光催化降解 盐酸环丙沙星的研究

宋鸿超,董海山\*,李庆,汪泠

(西南交通大学环境科学与工程学院,四川成都610000)

**摘要:**利用液相共沉淀法与溶胶-凝胶法制备不同掺杂量的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 异质结催化剂,通过扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和振动样品磁强计(VSM)对复合材料形貌、晶型结构和磁性进行表征,以盐酸环丙沙星(CIP-HCl)为目标污染物探究其光催化性能。实验表明,5%(质量分数)Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂具有最佳的光催化性能,且重复使用效果较好。在自由基捕获实验中发现, h<sup>+</sup> 和 ·OH 是反应主要的活性物种。

**关键词:**四氧化三铁;盐酸环丙沙星;光催化;二氧化钛

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)10-0235-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.10.037

## Study on photocatalytic degradation of ciprofloxacin hydrochloride over Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> composite catalyst

SONG Hong-chao, DONG Hai-shan\*, LI Qing, WANG Ling

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> heterojunction catalysts with different doping amount are synthesized by using the liquid-phase co-precipitation method and the sol-gel method jointly. The morphology, crystalline structure, and magnetic properties of the catalysts are characterized by mean of scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and vibrating sample magnetometry (VSM), and the photocatalytic performance is evaluated through using ciprofloxacin hydrochloride as a model pollutant. It is indicated that the 5% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> composite catalyst exhibits the highest photocatalytic activity, along with favorable reusability. It is found in radical scavenger experiments that h<sup>+</sup> and ·OH are the primary reactive species involved in the photocatalytic process.

**Key words:** ferroferric oxide; ciprofloxacin hydrochloride; photocatalysis; titanium dioxide

盐酸环丙沙星(CIP-HCl)是一种典型的第3代喹诺酮类抗生素,常用于治疗呼吸道、泌尿系统和皮肤感染<sup>[1]</sup>。部分未经生物体完全降解的盐酸环丙沙星可能经多种途径进入水环境引发污染,对生态环境和人体健康带来威胁<sup>[2]</sup>。为此,迫切需要寻找一种绿色、高效的处理方法降解水体中盐酸环丙沙星。

在众多的水体有机物处理技术中,光催化技术被认为是解决有机废水的最有效途径之一<sup>[3]</sup>。作为一种新型光催化材料,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>反式尖晶石结构铁氧体具有比表面积高、化学稳定性强和超顺磁性等优点<sup>[4]</sup>,但单独应用时光催化降解污染物效率却不尽人意。为了克服上述缺点,有必要对Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>进行改性。TiO<sub>2</sub>是一种常见的N型半导体,在光催化领域凭借其廉价易得、无毒无害、抗光腐蚀性强等优点而受到研究者的广泛关注<sup>[5-6]</sup>。基于上述背景,本

研究通过液相共沉淀法与溶胶-凝胶法构建不同复合比例的Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub>复合催化剂,通过扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和振动样品磁强计(VSM)表征复合催化剂的形貌、晶型结构和磁性,通过单因素实验评价其对盐酸环丙沙星的光催化降解效果,通过循环实验和自由基捕获实验确定复合催化剂的稳定性和降解机理。

## 1 材料和方法

### 1.1 试剂

六水氯化铁(FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)、七水硫酸亚铁(FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O)、氨水(NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O)、钛酸四丁酯(C<sub>16</sub>H<sub>36</sub>O<sub>4</sub>Ti)均为分析纯,无水乙醇(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)纯度为99.7%,冰醋酸(CH<sub>3</sub>COOH)纯度为99.5%,盐酸环丙沙星(C<sub>17</sub>H<sub>18</sub>FN<sub>3</sub>O<sub>3</sub>·HCl)纯度为98%,实验用水均为去离子水。

收稿日期:2025-01-08;修回日期:2025-08-12

作者简介:宋鸿超(2000-),男,硕士生,研究方向为水污染控制工程,hongcsong@163.com;董海山(1975-),男,副教授,研究方向为水污染控制工程,通讯联系人,1305080092@qq.com。

## 1.2 仪器

紫外-可见分光光度计(UV-4802H, 尤尼柯(上海)仪器有限公司)、35 W 氙气灯(JJY-1280, 俱竞阳科技有限公司)、磁力搅拌水浴锅(HH-4J, 常州朗越仪器制造有限公司)、扫描电子显微镜(Gemini 300, ZEISS)、X 射线衍射仪(Rigaku Ultima IV, 日本理学株式会社)和振动样品磁强计(7404 型, 美国 LakeShore 公司)。

## 1.3 材料的制备

### 1.3.1 纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的制备

分别称取一定量  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  溶于蒸馏水中, 在  $50^\circ\text{C}$  水浴条件下保持 1 h 后缓慢滴加氨水并剧烈搅拌, 生成黑色絮状物质, 用氨水调节反应体系 pH 至 10。搅拌 1 h 后磁力分离出  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁流体, 分别用蒸馏水和无水乙醇交替洗涤数次, 在  $60^\circ\text{C}$  下干燥 12 h, 研磨后得到磁性纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。

### 1.3.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ 复合催化剂的制备

称取一定量的自制  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒, 均匀分散到数份由 10 mL 无水乙醇与 2 mL 蒸馏水组成的混合液中, 得到  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  悬浮液; 将数份装有 10 mL 钛酸四丁酯和 30 mL 无水乙醇混合液的锥形瓶置于电动搅拌器下搅拌, 同时缓慢滴加 5 mL 冰醋酸, 混合均匀后将上述  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  悬浮液滴加至其中并持续搅拌 2 h, 再转入  $80^\circ\text{C}$  水浴锅内经陈化后获得  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  凝胶。将凝胶置于  $60^\circ\text{C}$  恒温干燥箱内烘干, 制得  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  前驱体。再将前驱体放入马弗炉中  $500^\circ\text{C}$  煅烧 2 h, 研磨后得到磁性纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ 。

## 1.4 材料的表征

分别利用 SEM、XRD 和 VSM 对所制材料的表面形貌特征、晶体结构与晶格变化、磁性能进行分析。

## 1.5 光催化剂性能测试

本研究以自制不同掺杂量的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  复合物为光催化剂、35 W 全波长氙气灯为模拟光源进行光催化降解盐酸环丙沙星模拟废水实验, 考察 CIP-HCl 降解率与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  掺杂量、光催化剂投加量、CIP-HCl 初始浓度和溶液初始 pH 之间的关系。实验时, 将盛有 150 mL 盐酸环丙沙星溶液和一定量催化剂的反应体系置于无光条件下保持 30 min 达吸附平衡后再开启光源。每次取样后, 在 274 nm 波长处测定样品吸光度, 按标准曲线转化为浓度后依照下式计算污染物降解率:

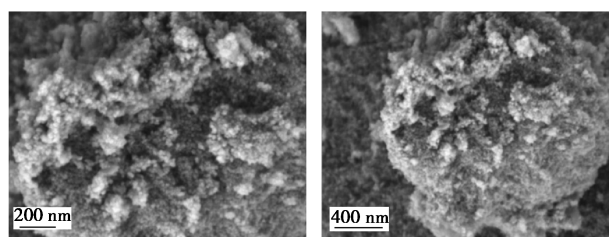
$$\eta = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100\%$$

式中,  $\eta$  为 CIP-HCl 降解率, %;  $C_0$  为 CIP-HCl 初始浓度, mg/L;  $C_t$  为降解  $t$  min 后 CIP-HCl 浓度, mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM 分析

复合催化剂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  扫描电子显微镜结果如图 1 所示。由图可知复合催化剂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  近似呈现为许多不规则颗粒组成的类球形聚集体, 样品表面较为粗糙, 颗粒之间存在一定的空隙, 成功制备出纳米级别复合催化剂。

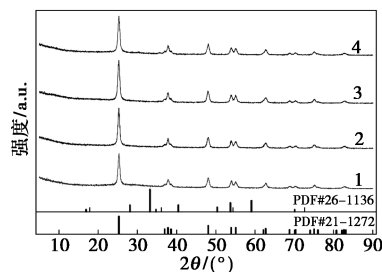


(a) 放大 50 000 倍 (b) 放大 25 000 倍

图 1  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  的 SEM 图

### 2.2 XRD 分析

图 2 为  $x\%$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  复合催化剂 XRD 图。可以看出自制的  $x\%$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  均与锐钛矿型二氧化钛 XRD 标准 PDF 卡片 (PDF#21-1272) 匹配良好, 即复合过程中没有改变  $\text{TiO}_2$  的晶型结构, 但  $x\%$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  复合催化剂 XRD 图中没有出现明显的与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  标准 PDF 卡片 (PDF#26-1136) 相对应的特征衍射峰, 可能是由于制备过程中  $\text{TiO}_2$  前驱体水解时包覆了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒。此外, 锐钛矿型  $\text{TiO}_2$  较强的衍射峰可能也掩盖了  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的信号。未观察到新的杂峰, 说明掺杂未引入明显的杂质, 复合材料的纯度较高。



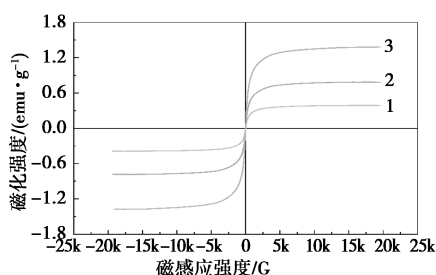
1— $\text{TiO}_2$ ; 2—2.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ ; 3—5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ ;  
4—7.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$

图 2  $\text{TiO}_2$  与复合催化剂  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  的 XRD 图

### 2.3 VSM 分析

样品的磁性能可通过振动样品磁强计获得的磁

滞回线进行分析,并可据此判断样品是否具有超顺磁性。



1—2.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ ; 2—5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ ;  
3—7.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$

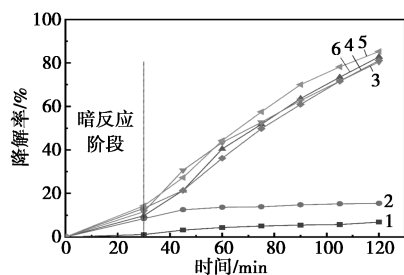
图3  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  磁滞回线

从图3可知,随  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  掺杂量的增加,  $x\%$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  的饱和磁化强度也逐步升高,说明  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  是复合催化剂主要的磁性来源。在磁场强度为0时,  $x\%$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  的剩磁和矫顽力均几乎为0,表明  $x\%$   $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  未出现磁滞现象且具有超顺磁性。

## 2.4 光催化性能研究

### 2.4.1 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 掺杂量对盐酸环丙沙星降解的影响

图4为添加50 mg自制  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{TiO}_2$  和不同掺杂量的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  复合催化剂在模拟太阳光条件下光催化降解盐酸环丙沙星效率图。由图可知,经90 min光反应后各催化剂在相同条件下降解率排序为5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  > 7.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  > 2.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  >  $\text{TiO}_2$  >  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,且所有复合催化剂降解率均可达80%以上,其中5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  复合催化剂光催化具有最佳降解效果,因此选择该掺杂量开展后续探究实验。



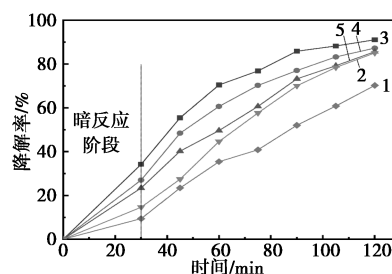
1—空白; 2— $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; 3— $\text{TiO}_2$ ; 4—2.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ ;  
5—5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$ ; 6—7.5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$

图4 不同  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  掺杂量对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  光催化降解 CIP-HCl 的影响

### 2.4.2 催化剂投加量对盐酸环丙沙星降解率的影响

为探究催化剂投加量对 CIP-HCl 降解率的影响,分别测定 25、50、75、100、125 mg 的 5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -

$\text{TiO}_2$  复合催化剂经光反应 90 min 后降解率,结果如图5、表1所示。CIP-HCl 降解率随催化剂投加量的增加表现出先上升后下降的趋势,催化剂投加量为 75 mg 时,其降解率最高达 91.1%。这可能是当催化剂投加量处于较低水平时,随投加量的增加与 CIP-HCl 接触的催化剂活性位点随之增加,提高了光催化效率;当催化剂投加过量后,因催化剂粒子浓度过大从而加强对光的反射和折射,降低了催化剂对光的吸收,最终表现为 CIP-HCl 降解率降低<sup>[7]</sup>。因此 75 mg 催化剂投加量为该实验模式下的最佳投加量,并以此继续探索其余影响因素对降解率的影响。



1— $m(\text{催化剂})=25\text{ mg}$ ; 2— $m(\text{催化剂})=50\text{ mg}$ ;  
3— $m(\text{催化剂})=75\text{ mg}$ ; 4— $m(\text{催化剂})=100\text{ mg}$ ;  
5— $m(\text{催化剂})=125\text{ mg}$

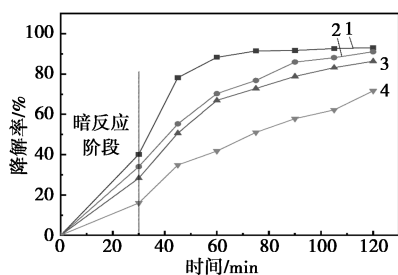
图5 5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  复合催化剂投加量对光催化降解 CIP-HCl 的影响

表1 5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{TiO}_2$  复合催化剂不同投加量的光催化降解率

投加量/mg	25	50	75	100	125
降解率/%	70.2	85.2	91.1	87.1	85.5

### 2.4.3 模拟废水中 CIP-HCl 的初始浓度对盐酸环丙沙星降解的影响

据图6、表2可知,CIP-HCl 降解率随初始浓度的升高呈现出逐步下降的趋势。当 CIP-HCl 初始浓度为 5 mg/L 时,光反应 90 min 降解率高达 93.2%,远超 CIP-HCl 初始浓度为 20 mg/L 时光反应 90 min 对应的降解率,后者仅为 71.7%。其原因可能是一定质量的催化剂所能提供活性位点的数目是固定的,当溶液浓度升高到某一程度时只有一部分 CIP-HCl 分子能与光催化剂提供的活性位点结合,其余部分未完全参与到光催化反应当中,此外,光催化反应过程中产生的中间产物也会竞争活性位点,导致抗生素降解率降低。在该反应体系下选择 CIP-HCl 初始浓度为 5 mg/L 继续探究复合催化剂降解 CIP-HCl 最优条件的其他因素。



1—5 mg/L; 2—10 mg/L; 3—15 mg/L; 4—20 mg/L

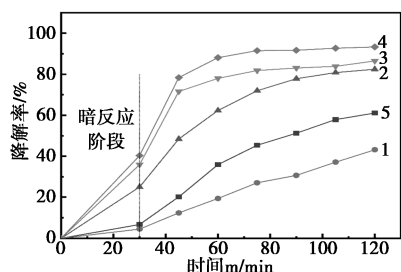
图 6 溶液浓度对复合催化剂光催化降解 CIP-HCl 的影响

表 2 CIP-HCl 初始质量浓度对光催化效率的影响

CIP-HCl 初始质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	5	10	15	20
降解率/%	93.2	91.1	86.4	71.7

#### 2.4.4 溶液初始 pH 对盐酸环丙沙星降解的影响

图 7 为溶液不同初始 pH 下复合催化剂光催化降解 CIP-HCl 的降解曲线。可以看出, CIP-HCl 的降解率随溶液 pH 的升高在暗反应吸附阶段和光催化阶段都表现为先上升后下降, 保持溶液 pH 为 8.5 时具有最高的光催化降解率, 达 93.2%。在过酸或过碱的条件下 CIP-HCl 的降解率均不及 70%。



1—pH=3; 2—pH=5; 3—pH=7; 4—pH=8.5; 5—pH=11

图 7 溶液初始 pH 对复合催化剂光催化降解 CIP-HCl 的影响

pH 对复合催化剂光催化降解抗生素有着多方面的影响(表 3)。在 CIP-HCl 分子中, 哌嗪环、氟原子和羧酸侧链等结构对光催化降解过程有重要影响。低 pH 条件下, CIP-HCl 分子主要以阳离子形式存在, 这会导致其与溶液中的 H<sup>+</sup> 离子之间发生竞争吸附, 进而降低了 CIP-HCl 分子与催化剂的接触机会, 从而影响了光催化降解效率, 表现为降解率下降<sup>[8]</sup>。此外, 在较低的 pH 下, 光降解效率低甚至可能与催化剂在酸性介质中的分解和腐蚀有关<sup>[9]</sup>。

表 3 溶液初始 pH 对光催化效率的影响

溶液初始 pH 值	3	5	7	8.5	11
降解率/%	43.1	82.4	86.6	93.2	61.1

pH 的变化会改变溶液中 H<sup>+</sup> 和 OH<sup>-</sup> 浓度, 进而影响由这些离子参与生成的活性物质如 ·OH 和 ·O<sup>2-</sup><sup>[10]</sup>。过酸或过碱性的体系环境还会对催化剂的表面电荷、能级位置等产生影响<sup>[11]</sup>, 降低催化剂降解效率。pH 在过酸和过碱的情况下催化剂表面和 CIP-HCl 之间的静电排斥力也会变得更强, 抑制催化剂与污染物分子的结合, 降低催化降解率<sup>[12]</sup>。

结果显示, 溶液 pH = 8.5 时光催化降解 CIP-HCl 效果最佳, 因此溶液初始 pH = 8.5 为该降解模式下的最佳条件。

#### 2.4.5 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂稳定性试验

为探究催化剂的复用稳定性, 在上述实验中确定的最佳降解条件下开展催化剂复用实验, 结果如图 8 所示。

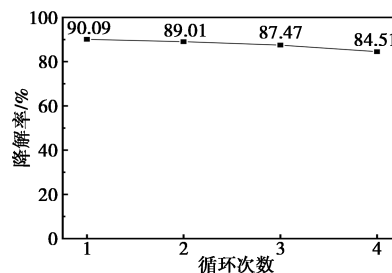


图 8 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂稳定性测试

由图 8 可知, 5% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂在经过 4 次循环使用后对 CIP-HCl 仍表现出良好的降解效果, 降解率达 84%。每次循环使用后, 复合催化剂的降解率均低于前一次, 这可能是由于复合催化剂在分离回收、洗涤过程中存在轻微的损耗。经 4 次循环实验后, 催化剂光催化降解效果降低幅度不大, 因此自制 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂具有优良的稳定性和可重复利用性。

#### 2.4.6 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂光催化降解 CIP-HCl 机理分析

光催化降解过程中各种自由基起到了关键作用, 为测试不同自由基在复合催化剂光催化过程中贡献程度, 取 5% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂在最佳反应条件下开展自由基捕获实验, 分别加入草酸铵(AO)和叔丁醇(TBA)作为 h<sup>+</sup> 和 ·OH 的捕获剂, 结果如表 4 所示。

表 4 不同自由基捕获剂对 5% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合催化剂光催化性能的影响

捕获剂	空白对照	TBA	AO
降解率/%	93.2	66.4	56.9

在不添加自由基捕获剂时, CIP-HCl 降解率达 93.2%。分别投加 TBA 与 AO 淬灭  $\cdot\text{OH}$  和  $\text{h}^+$  后, CIP-HCl 降解率大幅下滑, 仅为 66.4% 和 56.9%。证明  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$  复合催化剂在光催化降解 CIP-HCl 过程中产生了大量  $\cdot\text{OH}$  和  $\text{h}^+$ , 两种自由基对  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$  复合催化剂光催化降解 CIP-HCl 贡献大小排序为  $\text{h}^+ > \cdot\text{OH}$ 。

### 3 结论

(1) 通过液相共沉淀与溶胶-凝胶法成功制备出不同掺杂量的  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$  复合催化剂, 以盐酸环丙沙星为目标污染物, 该类复合催化剂具有较好的光催化性能。

(2)  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$  复合催化剂磁滞回线表明其在磁场作用下具有可被磁性分离的特性, 在光催化剂降解 CIP-HCl 过程中具有一定的回收价值。

(3) 单因素实验表明:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  掺杂量为 5% 时, 复合催化剂具有最佳的光催化降解效果。在 CIP-HCl 初始浓度为 5 mg/L、溶液初始 pH = 8.5、催化剂投加量为 75 mg 的条件下, 5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$  复合催化剂对盐酸环丙沙星降解率最高达 93.2%。

(4) 5%  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TiO}_2$  复合催化剂具有较好的复用稳定性, 经 4 次循环实验后降解率达 84%。自由基捕获实验表明光催化反应过程中产生了  $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{h}^+$  两种活性物质, 其中贡献较大的为  $\text{h}^+$ 。

### 参考文献

- [1] Cai Z, Dwivedi A D, Lee W N, *et al.* Application of nanotechnologies for removing pharmaceutically active compounds from water: Development and future trends[J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, 5(1): 27-47.
- [2] Danner M C, Robertson A, Behrends V, *et al.* Antibiotic pollution in surface fresh waters: Occurrence and effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 793-804.
- [3] Li Y, Yin W, Yang N, *et al.* Ag/AgCl/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BiFeO<sub>3</sub>@zeolite for photocatalytic degradation of levofloxacin hydrochloride[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 308: 128189.
- [4] 唐凯. 尖晶石铁氧体纳米吸附剂在废水处理中的应用研究[J]. *应用化工*, 2019, 10: 1-6.
- [5] 韩世同, 刁海玲, 史瑞雪, 等. 半导体光催化研究进展与展望[J]. *化学物理学报*, 2003, 16(5): 339-349.
- [6] Rocha J M, Lima E C, da Silva-Ferreira N, *et al.* Titanate nanotubes from titanium dioxide powder with polymorphic mixture for Rhodamine B degradation[J]. *Optical Materials*, 2024, 149: 114998.
- [7] Liu Y, Ohko Y, Zhang R, *et al.* Degradation of malachite green on Pd/WO<sub>3</sub> photocatalysts under simulated solar light[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184(1/3): 386-391.
- [8] 朱颖, 张蕾, 张寒冰, 等. BiVO<sub>4</sub> 光催化去除废水中的四环素和环丙沙星[J]. *分子科学学报*, 2020, 36(1): 41-48.
- [9] Daneshvar N, Aber S, Dorraji M S S, *et al.* Photocatalytic degradation of the insecticide diazinon in the presence of prepared nanocrystalline ZnO powders under irradiation of UV-C light[J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 58(1): 91-98.
- [10] Kutuzova A, Dontsova T, Kwapinski W. TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> nanocomposites: Effect of acid-base and structural-adsorption properties on photocatalytic performance[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2020, 30(8): 3060-3072.
- [11] Siffert B, Metzger J M. Study of the interaction of titanium dioxide with cellulose fibers in an aqueous medium[J]. *Colloids and Surfaces*, 1991, 53(1): 79-99.
- [12] Al-Musawi T J, pour Bahrami P, Rahimpour R, *et al.* Enhanced photocatalytic degradation of ciprofloxacin antibiotics using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-EN@Zn-Al layered double hydroxide nanocomposites under the COVID-19 pandemic[J]. *Results in Engineering*, 2024, 24: 103396. ■

### 圣奥泰国第 60 000 t 橡胶防老剂产品下线

近日, 圣奥泰国生产的第 60 000 t 橡胶防老剂产品顺利下线, 标志着圣奥化学推进“全球生产 本地服务”战略取得里程碑式突破。

为满足海外客户日益多样化的需求, 2019 年, 圣奥化学启动“全球生产 本地服务”战略, 加快国际化步伐。圣

奥泰国工厂于 2020 年 3 月 9 日开工建设, 2022 年 5 月 19 日顺利投产运营。投产以来, 圣奥泰国持续打造敏捷、高效、智能的现代化工厂, 不断强化本地化运营能力, 提升产品交付质量和服务响应速度, 实现产量跨越式增长。

(圣奥化学)