

doi:10.11920/xnmdzk.2025.02.005

# ZnO 纳米棒的制备及压电光催化性能研究

吴梦娇<sup>1,2</sup>, 张秋平<sup>1,2</sup>, 徐明<sup>1,2</sup>

(1. 西南民族大学电子信息学院, 四川 成都 610041; 2. 西南民族大学信息材料四川省高校重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:**为实现对有机污染物的高效压电光催化降解,采用温和的水热合成工艺,在不锈钢网格上制备了 ZnO 纳米棒。网状支撑的纳米材料不仅具有较大的活性表面积,还能够促进光的有效捕获,同时提高材料的可回收性。结果表明,所制备的 ZnO 纳米棒具有较大的比表面积,并存在大量氧空位缺陷,可供反应物吸附的活性位点增多,同时能有效捕获光生载流子。在模拟太阳光以及超声条件的协同作用下,生长在不锈钢网格上的 ZnO 纳米棒几乎能分别在 40 min、190 min 和 100 min 时间内实现对 4 mg/L 浓度 MB、MO 和 RhB 染料的完全降解。结论认为,归因于超声条件下 ZnO 纳米棒产生的内置压电场,可以有效地分离光激发产生的电子-空穴对,促进载流子的传输,极大程度上提高了样品的压电光催化性能。

**关键词:** ZnO 纳米棒; 水热法; 压电光催化

中图分类号: O643.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2025)02-0153-07

## Synthesis and piezo-photocatalytic properties of ZnO nanorods

WU Mengjiao<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiuping<sup>1,2</sup>, XU Ming<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic and Information, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China;

2. Key Laboratory of Information Materials of Sichuan Province, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** To achieve the high-efficiency piezo-photocatalytic degradation of organic pollutants, ZnO nanorods arrays were compactly aligned on stainless steel mesh by a simple hydrothermal method. The mesh-supported nanomaterials not only possessed a relatively large active surface area, but also could facilitate the effective capture of light and simultaneously improve the recyclability of the materials. The results showed that the prepared ZnO nanorods had a large specific surface area and a large number of oxygen vacancy defects, which led to an increase in the active sites available for reactant adsorption and enabled the effective capture of photogenerated carriers. Under the synergistic effect of simulated sunlight and ultrasonic conditions, the ZnO nanorods grown on the stainless steel meshes could almost completely degrade MB, MO and RhB dyes with a concentration of 4 mg/L within 40 minutes, 190 minutes and 100 minutes respectively. It was concluded that, due to the built-in piezoelectric field generated by the ZnO nanorods under ultrasonic conditions, the electron-hole pairs generated by photoexcitation could be effectively separated, the transport of carriers could be promoted, and the photocatalytic performance of the samples could be greatly improved.

**Keywords:** ZnO nanorod; hydrothermal method; piezo-photocatalytic

随着环境污染和能源危机问题的不断恶化,生态系统中顽固有机污染物的高效率、低能耗降解是促进全球经济循环和全球碳中和的关键<sup>[1]</sup>。其中,基于半

导体材料的光催化作为一种具有广泛前景的绿色纯化技术,在应对环境污染问题方面优势明显。与传统的吸附、过滤、沉降等处理方法相比,光催化只需要利

收稿日期: 2024-12-03

通信作者: 张秋平(1986-),男,讲师,博士,研究方向:光电功能材料,低维结构氧化物功能材料。E-mail: zhqpdq@163.com; 徐明(1969-),男,教授,博士,研究方向:光电功能材料,低维结构氧化物功能材料。E-mail: hsuming\_2001@aliyun.com

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2021M700688); 四川省自然科学基金青年科学基金项目(2022NSFSC0915); 西南民族大学研究生创新型科研项目(YCZD2024023)

用太阳能来驱动,且不需要复杂的后处理工序.这显著地降低了催化降解的能耗以及操作成本<sup>[2]</sup>.目前,在光催化领域中,纳米氧化锌(ZnO)是一种极具前景的材料,由于其具有高效、节能、无毒以及应用范围广等优点,近年来被广泛应用于光催化领域.然而 ZnO 受光激发产生的光生电子和空穴会在催化剂内部和表面迅速复合,无法将光生电荷迅速分离,这导致量子效率很低,削弱了 ZnO 的催化性能.此外,纳米 ZnO 的禁带宽度较大( $\sim 3.20$  eV),这意味着它只能响应紫外光(仅占太阳光谱中的 5%),这造成了 ZnO 对自然光的低利用率<sup>[3-4]</sup>,限制了其规模化应用.因此,开发新的策略以提高催化剂的可见光响应和光生电子-空穴对的分离率成为了 ZnO 基光催化领域的研究热点.

到目前为止,一些方法如改变纳米材料的形貌<sup>[5-6]</sup>、利用材料的压电效应<sup>[7-8]</sup>等已被证实能够显著地提高纳米 ZnO 催化剂的光催化性能.其中,改变纳米材料的形貌不仅能增大材料的比表面积,还能调控材料的表面缺陷(如原子缺失、错位、空位等),提供更多的活性位点.比如 Zhang F<sup>[9]</sup>等人采用溶剂热法结合化学还原工艺构建了三元 Ag-Cu<sub>2</sub>O/ZnO 纳米棒,其展现出高效的载流子分离/转移和二氧化碳吸附能力.Karakaya S<sup>[10]</sup>等人采取超声波喷雾热解法制备了 Ce 掺杂的 ZnO 纳米花,通过对 Ce 掺杂引发的一系列表面形貌、结构性能和表面缺陷(锌间隙和氧空位)进行讨论,揭示了缺陷对 MB 的光催化降解产生的影响.除此之外,压电效应作为 ZnO 的固有特性,在外部机械应力作用下,材料的正负电荷中心相对移动,在不对称晶体内诱导形成极化电场,从而驱动自由电子向催化剂界面迁移<sup>[11]</sup>,这能够将 ZnO 受光激发产生的光生载流子迅速分离,从而减少光生载流子的复合.比如 Li J<sup>[12]</sup>等人利用简易的水浴加热和回流缩合工艺,合成了 Au 负载的 CdS 纳米球异质结构,通过 Au NPs 的等离子共振效应和 CdS 的压电光电子学效应之间的协同作用,促进了光生载流子的产生与分离,相比单一的模拟阳光辐照,在超声-辐照下降解有机污染物 MO 的效率提高了近 230%.

本文采用了温和的水热合成工艺,在不锈钢网格衬底上生长出了直径约为 51 nm 的 ZnO 纳米棒.通过压电特性和光激发的耦合,产生压电光电子学效应,

从而促进光生载流子的分离,提升 ZnO 的光催化性能.并对生长在不锈钢网格上的 ZnO 纳米棒的结构、缺陷以及光学性能进行研究,以揭示压电光催化性能的调控机制和催化降解的反应机理.

## 1 实验

### 1.1 ZnO 纳米棒的制备

在实验过程中所使用到的化学试剂均为分析纯,所有实验中均采用电阻率为  $18.25 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  的去离子水.

其中用于样品制备的试剂有:六水合硝酸锌  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、购于天津市大茂化学试剂公司;二水乙酸锌  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、六次甲基四胺  $(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4)$  均购于成都市科隆化学品有限公司.制备过程包括 ZnO 种子层沉积和纳米棒的水热生长两个部分.首先,将 10 mM 的  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  乙醇溶液旋涂于不锈钢网格上,并用氮气吹干,将吹干后的不锈钢网格置于  $350^\circ\text{C}$  条件下退火 20 分钟,待自然冷却后进行下一次涂覆,重复三次以确保 ZnO 种子层完全均匀覆盖.其次,将涂有 ZnO 种子层的不锈钢网格浸入浓度为 20 mM 的  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$  混合水溶液中, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$  的摩尔比为 1:1,并置于高压反应釜中,加热至  $93^\circ\text{C}$  保持 6 小时用于 ZnO 纳米棒生长.最后,用去离子水和无水乙醇彻底冲洗不锈钢网格以去除残留的盐与背部沉淀,于  $80^\circ\text{C}$  下干燥 8 小时后得到完整 ZnO 纳米棒样品.

### 1.2 材料表征

样品的物相成分由 D8 Advance X 型射线衍射(X-ray Diffraction, XRD, 德国 Bruker 公司)仪测定,辐射源为 Cu K $\alpha$  射线( $\lambda = 0.15418 \text{ nm}$ ),扫描范围设定为  $20^\circ \sim 80^\circ$ .样品的表面形貌和微观结构分别采用 Apreo 2C 型场发射扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM, 美国 Thermo Fisher 公司)和 Talos F200S G2 型场发射式透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM, 美国 Thermo Fisher 公司)进行观测,运行加速电压分别为 10 kV 和 200 kV.样品的表面化学态由 Escalab Xi+型 X 射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS, 美国 ThermoFisher 公司)仪进行表征,辐射源为 Al K $\alpha$  射线( $h\nu = 1486.6 \text{ eV}$ ),

其中,结合能根据 284.8 eV 的 C1s 峰进行校正.样品的紫外-可见(Ultraviolet and Visible Spectrophotometry, UV-Vis)吸收光谱和光致发光(Photoluminescence, PL)光谱分别由带有积分球装置的 Lambda 750 型紫外/可见/近红外分光光度计(美国 PerkinElmer 公司)和 LS55 型荧光发光光谱仪(美国 PerkinElmer 公司)进行测量.

### 1.3 光催化性能测试

用于光催化测试的试剂有:亚甲基蓝(MB)染料、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na),购于天津福晨化学试剂有限公司;罗丹明 B(RhB)、甲基橙(MO),购于成都市科隆化学品有限公司;异丙醇(IPA),购于天津福晨化学试剂有限公司;对苯醌(BQ),购于上海阿拉丁科技股份有限公司.

取 96 ml 去离子水和 4 ml MB/RhB/MO 水溶液(浓度为 100 mg/L),配制成浓度为 4 mg/L 的有机污染物水溶液.随后加入 2.5 cm×2.5 cm 生长有 ZnO 纳米棒的不锈钢网格,置于模拟太阳光光源(北京泊菲 PLS-SXE300D 型高压氙灯)下,(中心区域的光辐射强度约为 180 mW/cm<sup>2</sup>),进行光催化降解,同时,将烧杯固定在超声波清洗器(KQ-200VDE 昆山超声仪器有限公司,频率 45 KHz,强度 100%)中,其作为外部机械源,以产生压电效应.

取适量溶液于离心管中,以 6 000 r/min 的转速进行离心后,将上清液倒入比色皿中测试其吸光度(V-1000D 可见分光光度计).根据公式(1)计算其降解率.

$$y = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\% = (A_0 - A_t) / A_0 \times 100\%. \quad (1)$$

其中  $C_0$  为初始浓度,  $C_t$  为  $t$  时刻浓度,  $A_0$  为初始吸光度,  $A_t$  为  $t$  时刻吸光度.式(2)为降解率的一级动力学拟合曲线.

$$k = \ln(C_0 / C_t) = \ln(A_0 / A_t). \quad (2)$$

其中  $k$  为拟合曲线的斜率,称为表观速率常数.

## 2 结果与分析

### 2.1 物相成分分析

图 1 所示为裸不锈钢网格(SSM)衬底和其表面水热生长了 ZnO 纳米棒阵列膜的 XRD 图谱.如图 1(b) 所示,在 ZnO 的 XRD 图谱中,除了不锈钢网格衬底自身产生的特征衍射峰外,在衍射角  $2\theta$  分别为

31.94°、34.08°、35.94°处出现了新的特征衍射峰,分别对应于六方纤锌矿结构 ZnO(JCPDS No. 36-1451)的(100)、(002)、(101)晶面,这些峰证实了 ZnO 晶体的成功合成.

基于 XRD 数据,依据谢乐公式(式 3)、布拉格方程(式 4)以及六方纤锌矿结构所对应的晶格常数计算公式(式 5):

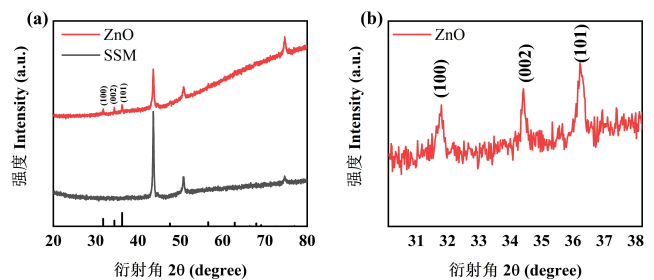
$$D = k\lambda / (\beta \cos \theta). \quad (3)$$

$$2d \sin \theta = n\lambda. \quad (4)$$

$$1/d_{hkl}^2 = 4(h^2 + hk + k^2) / 3a^2 + l^2 / c^2. \quad (5)$$

其中  $D$  为晶粒尺寸,  $\lambda$  为 X 射线的辐射波长,约为 1.54 Å,  $\beta$  为半峰宽,  $\theta$  为 X 射线与分射线夹角,  $n$  为衍射级数,值为 1,  $k$  是谢乐常数,值为 0.89.  $h$ 、 $k$ 、 $l$  为密勒指数,  $d$  为晶面间距,  $a$ 、 $c$  为晶胞的晶格常数.

计算得到不锈钢网格上生长的 ZnO 纳米棒阵列膜的晶粒尺寸和晶格参数,如表 1 所示, ZnO 的平均晶粒尺寸仅为 18.00 nm.



(a) ZnO 纳米棒与不锈钢网格衬底的 XRD 图谱;

(b) XRD 图谱局部放大图

图 1 ZnO 纳米棒的 XRD 图谱

Fig. 1 The XRD patterns of ZnO nanorods

表 1 ZnO 纳米棒的晶格参数

Table 1 Lattice parameters and crystallite sizes of the ZnO nanorods

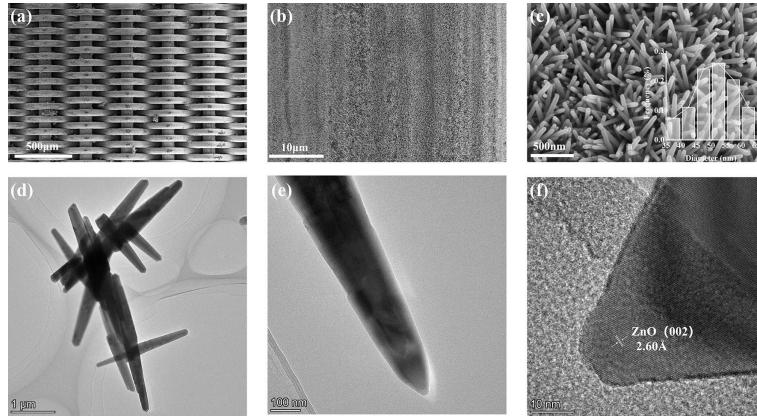
样品	晶粒尺寸 / nm	a / nm	c / nm
ZnO 纳米棒	18.00	0.305 1	0.528 4

### 2.2 形貌及微观结构分析

图 2(a)~(c) 所示为不同放大倍数下 ZnO 纳米棒阵列膜的 SEM 平面图像.从图中可以明显看到不锈钢网格整个表面被水热生长的纳米棒阵列紧密且均匀地覆盖,通过对图 2(c) 中纳米棒的大量取样分析,其平均直径约为 51 nm,平均长度超过 500 nm.图 2(d)~(f) 所示分别为不锈钢网格表面剥离下来的

ZnO 纳米棒的 TEM 和单根纳米棒的 HRTEM 图像. 如图所示, ZnO 纳米棒的轮廓分明, 并且表现出强的 (001) 择优取向生长, 其中 HRTEM 图像中显示的 2.60

Å 的晶格条纹间距对应于六方纤锌矿结构 ZnO 的 (002) 晶面. 除此之外, 纳米棒的边缘并不光滑, 表明表面存在一定的晶格缺陷.



(a) 500 $\mu\text{m}$  的 SEM 图; (b) 10 $\mu\text{m}$  的 SEM 图; (c) 500nm 的 SEM 图; (d) 1 $\mu\text{m}$  的 TEM 图; (e) 100nm 的 TEM 图; (f) 高分辨 TEM 图  
图 2 ZnO 纳米棒的 SEM 和 TEM 图.

Fig.2 SEM and TEM images of ZnO nanorods.

2.3 表面化学态分析

图 3 展示了不锈钢网格表面剥离下来的 ZnO 纳米棒的 XPS 结果. 如图 3(a) 所示的 XPS 全谱, 除了 C 1s 峰(主要来源样品测量和校正时外部引入的碳源), 在 ZnO 纳米棒中仅探测出与 Zn 和 O 元素相关的 XPS 信号, 表明样品具有高的纯净度, 不含有其他杂质, 这与 XRD 的结果一致. 为了进一步分析样品表面 Zn 和 O 元素的化学状态, 将 Zn 2p 和 O 1s 的 XPS 峰放大, 如图 3(b) 和 3(c) 所示. 在图 3(b) 中, 结合能位于 1 021.4 eV 和 1 044.5 eV 处的峰可分别归属于 Zn 2p<sub>3/2</sub> 和 Zn 2p<sub>1/2</sub>, 两峰之间的结合能差值为 23.1 eV, 这一结果表明, 所制备样品中的 Zn 元素以 Zn<sup>2+</sup> 离子的形式存在<sup>[13-14]</sup>. 在图 3(c) 中, O 1s 峰表现出不对称性, 在其右侧出现明显的肩峰, 表明 ZnO 纳米棒表面的 O 元素存在多种不同的化学状态. 基于高

斯拟合, 对 O 1s 谱进行了分峰处理, 得到了三个重叠的峰, 其分别位于结合能约为 530.1 eV、531.5 eV 和 532.5 eV 位置处, 分别标记为 O<sub>L</sub>、O<sub>V</sub> 和 O<sub>C</sub>. 其中, 结合能较低的 O<sub>L</sub> 峰通常归属于氧化锌晶格中的 O 原子, 结合能较高的 O<sub>V</sub> 和 O<sub>C</sub> 峰分别与 ZnO 纳米棒表面氧空位缺陷处解离吸附的羟基(·OH)以及物理吸附的 H<sub>2</sub>O 或 O<sub>2</sub> 中的 O 原子有关<sup>[15-17]</sup>. 因此, O<sub>V</sub> 和 O<sub>C</sub> 峰的出现说明 ZnO 纳米棒表面存在大量的氧空位缺陷(一种晶格缺陷), 这进一步证实了 HRTEM 的结论. 依据样品的 XPS 数据, 我们计算了不同化学状态 O 元素的含量, 如表 2 所示. 三种不同化学状态的氧原子的原子百分率分别为 56.55% (O<sub>L</sub>)、28.08% (O<sub>V</sub>) 和 15.37% (O<sub>C</sub>), 表面氧空位缺陷约占 43% (O<sub>V</sub> + O<sub>C</sub>).

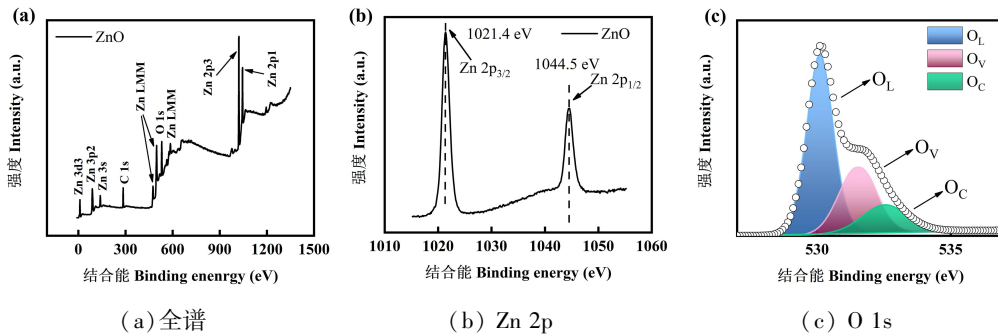


图 3 ZnO 纳米棒的 XPS 图谱

Fig.3 XPS image of ZnO nanorods

表 2 ZnO 表面 O 元素的 XPS 数据

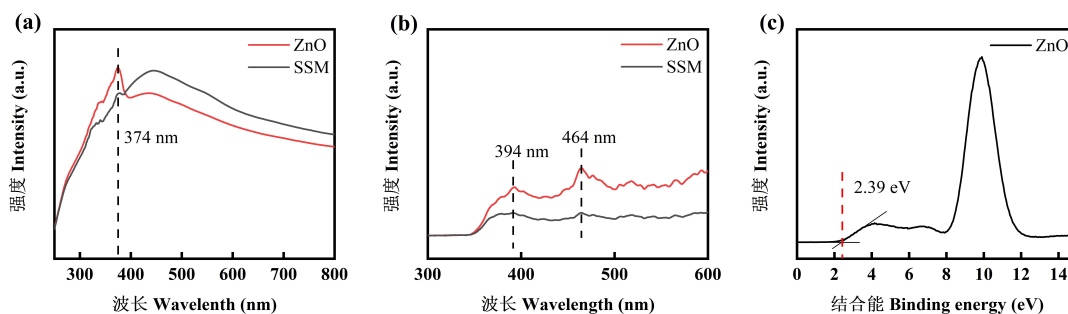
Table 2 XPS data of oxygen on the surface of ZnO

样品	晶格氧 $O_L$ 占比 (at. %)	空位氧 $O_V$ 占比 (at. %)	吸附氧 $O_C$ 占比 (at. %)	$O_L$ 结合能	$O_V$ 结合能	$O_C$ 结合能
ZnO 纳米棒	56.55	28.08	15.37	530.1	531.5	532.5

## 2.4 光学特性分析

一般而言,半导体光催化剂的光催化性能很大程度上取决于催化剂的带隙能和光生载流子的分离效率.图 4 揭示了不锈钢网格生长的 ZnO 纳米棒阵列膜的光电特性.如图 4(a) 所示,ZnO 纳米棒阵列膜在紫外波段(374 nm)呈现出较强的吸收,而由于不锈钢网格衬底的影响,可见光波段的吸收被掩盖.但是,ZnO 纳米棒表面的氧空位缺陷往往会诱导其带隙间形成缺陷能级,缺陷能级与 ZnO 导带(CB)或价带(VB)之间会产生低能量跃迁<sup>[18]</sup>,因此 ZnO 纳米棒阵列膜具有可观的可见光响应.这一点得到了 PL 光谱的证明,

如图 4(b) 所示,相比裸不锈钢网格,生长有 ZnO 纳米棒阵列膜的不锈钢网格在可见光波段展现出明显的发光.其中,位于 464 nm 处的蓝绿色发射峰就来源于 ZnO 纳米棒表面氧空位缺陷诱导的能级与其导带(或价带)间光生电荷复合而产生的辐射<sup>[19]</sup>.位于 394 nm 处的紫外发射峰与 ZnO 的本征激发有关,对应于带间光生电荷复合产生的辐射.依据带隙公式  $E_g = 1240/\lambda$ ,计算可得 ZnO 纳米棒的带隙能约为 3.15 eV,结合图 4(c) 中 XPS 价带谱估算出的价带顶位置对应能级为 2.39 eV,确定了 ZnO 纳米棒的导带底所处能级约为 -0.76 eV.



(a) 紫外-可见光吸收光谱;(b) 光致发光图谱;(c) XPS 价带谱

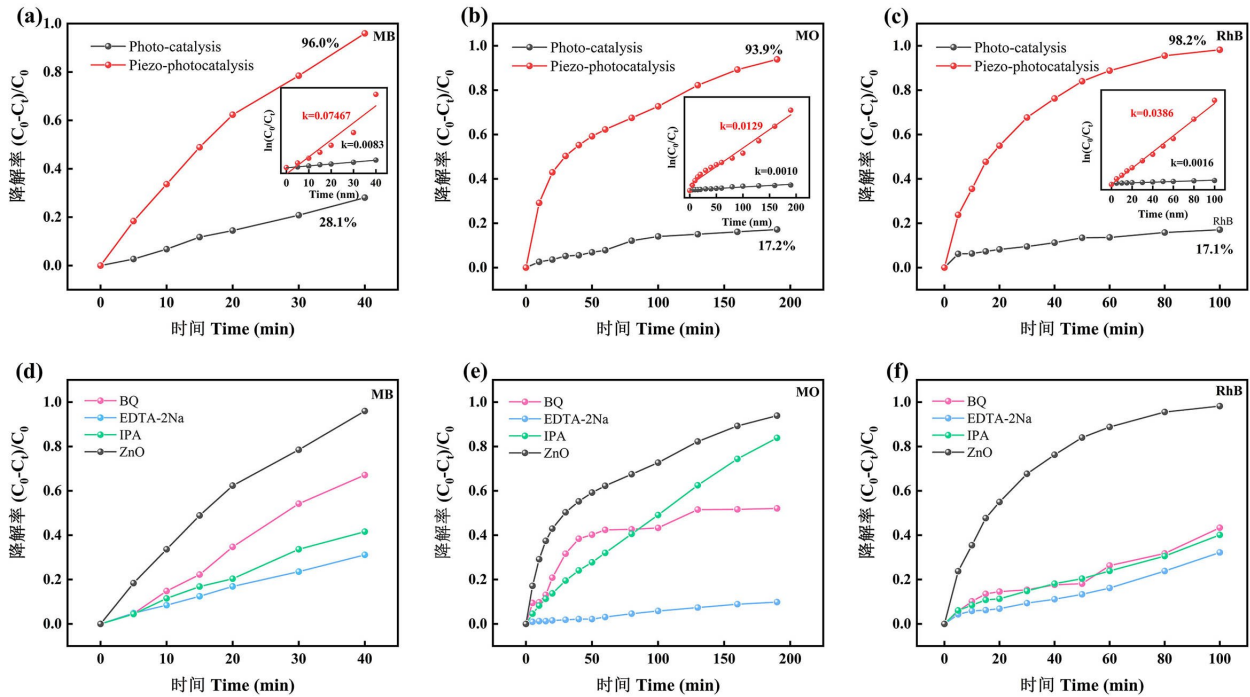
图 4 ZnO 样品的光谱

Fig. 4 Spectrum of the ZnO sample

## 2.5 压电光催化性能分析

为评价所制备 ZnO 纳米棒的压电光催化性能,在仅模拟太阳光照射、模拟太阳光照射与超声叠加两种条件下对 MB/RhB/MO 的水溶液进行了降解.如图 5(a)~(c) 所示,在超声-模拟光照叠加条件下,ZnO 纳米棒几乎分别在 40 min、190 min 和 100 min 时候实现对 MB、MO 和 RhB 的完全降解,但单一光催化条件下,同一时间内对 MB、MO 和 RhB 的降解率仅为 38.1%、17.2%和 17.1%,与此同时,从图 5(a)~(c) 中插图所给出的降解表观速率常数  $k$  可知,压电光催化降解速率分别是单一光催化条件下的 9 倍、12.9 倍和 24.1 倍.这表明,在超声诱导的内建电场作用下,极大地促进了载流子的分离效率和氧化还原反应活性.为了探索在压电光催化中参与 MB/MO/RhB 降解的优势活性物种,还用了 EDTA-2Na、BQ 和 IPA 三种

清除剂分别对  $h^+$ 、 $\cdot O_2^-$  和  $\cdot OH$  进行了诱捕实验.如图 5(d),对于 MB 染料而言,随着三种牺牲剂的加入,ZnO 的压电光催化效率都有不同程度的降低,这表明三种活性物种在压电光催化过程中都发挥着重要的作用,其中  $h^+$  和  $\cdot OH$  起主要作用.如图 5(e),随着 BQ 和 IPA 的加入,对 MO 的降解都有着较为显著的下降,尤其当加入 EDTA-2Na 时,几乎抑制了 ZnO 对染料的降解,这说明了  $h^+$  在降解 MO 的过程中起着决定性的作用.如图 5(f),同样地,随着三种牺牲剂的加入,都明显抑制了 RhB 的降解效率,意味着  $h^+$ 、 $\cdot O_2^-$  和  $\cdot OH$  在 RhB 降解中都起着重要的作用.显然在不同染料的光催化降解过程中,起主要作用的活性基团( $h^+$ 、 $\cdot O_2^-$  和  $\cdot OH$ ) 具有较大的差异性,这可能是不同染料的分子结构裂解所需能量不同所导致的.



(a) MB 降解;(b) MO 降解;(c) RhB 降解;(d) 牺牲剂下的 MB 降解;(e) 牺牲剂下的 MO 降解;(f) 牺牲剂下的 RhB 降解  
 图 5 模拟太阳光下样品对模拟污染物的降解率

Fig. 5 Degradation rate by sample under simulated sunlight

图 6 为 ZnO 纳米棒压电光催化降解有机污染物的机理图,在模拟太阳光的照射下,光照能量  $h\nu > E_g$  时,半导体材料价带中的电子跃迁至导带(CB),同时在价带(VB)中留下空穴.当电子所占据的导带位置比  $O_2/\cdot O_2^-$  的标准氧化还原电位更负,同时价带位置比  $OH^-/\cdot OH$  的标准氧化还原电位更正时,可将水中含有的  $OH^-$ 、 $O_2$  分别氧化、还原为具有强氧化性的  $\cdot OH$  和  $\cdot O_2^-$ ,从而将废水中的有机污染物分解为

$H_2O$ 、 $CO_2$  和其他低分子质量的有机基团<sup>[20-21]</sup>.在叠加超声条件下,ZnO 受到外部振动时产生形变,由于压电效应,在材料表面生成极化电荷,并形成内建电场.载流子在内建电场的作用下迁移至材料表面,参与氧化还原反应,同时电荷在半导体材料的 CB 和 VB 处积累,最终将导致 CB 和 VB 位置产生位移<sup>[22-23]</sup>.总而言之,耦合后产生的压电光电子学效应促使了光生载流子的高效分离,极大程度上提高了材料的催化效率.

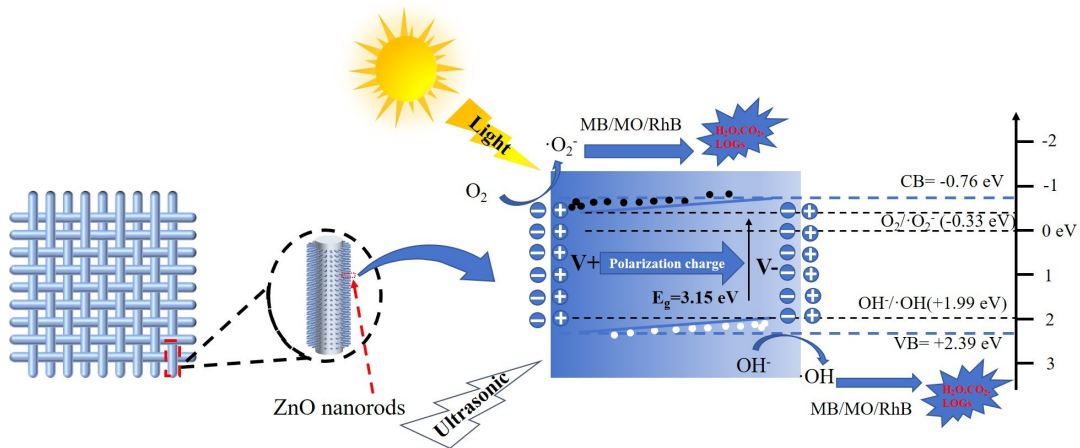


图 6 压电光催化降解机理图

Fig.6 Diagram of piezo-photocatalytic degradation mechanism

### 3 结论

采用温和的水热合成工艺制备出的 ZnO 纳米棒在不锈钢网上均匀紧凑排列,并在模拟太阳光-超声条件下表现出对 MB/MO/RhB 染料的高效催化降解性能.相比单一的光催化,采用压电光催化降解 MB/MO/RhB 染料的效果提升了近 9 倍、12.9 倍和 24.1 倍.这种较高的性能可以归因于超声条件下 ZnO 纳米棒产生的内置压电场,增强了载流子的分离和迁移,提升了光生载流子的利用率.此外,由于纳米棒的特殊形貌,还能一定程度上提高样品的晶格缺陷和光吸收能力,改善了单一催化剂的光催化性能.研究结果为实现可回收的压电光催化降解废弃污染物提供了一种切实可行的方案.

#### 参考文献

- [1] XIE L B, WANG P F, LI Y, et al. Pauling-type adsorption of O<sub>2</sub> induced electrocatalytic singlet oxygen production on N-CuO for organic pollutants degradation[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5560.
- [2] RIENTE P, FIANCHINI M, LLANES P, et al. Shedding light on the nature of the catalytically active species in photocatalytic reactions using Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 625.
- [3] CHEN X Y, PENG X, JIANG L B, et al. Photocatalytic removal of antibiotics by MOF-derived Ti<sup>3+</sup> and oxygen vacancy-doped anatase/rutile TiO<sub>2</sub> distributed in a carbon matrix[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 130945.
- [4] LIU C, MAO S, SHI M X, et al. Enhanced photocatalytic degradation performance of BiVO<sub>4</sub>/BiOBr through combining Fermi level alteration and oxygen defect engineering[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 449: 137757.
- [5] HONG D Y, ZANG W L, GUO X, et al. High piezo-photocatalytic efficiency of CuS/ZnO nanowires using both solar and mechanical energy for degrading organic dye[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(33): 21302-21314.
- [6] 高嵩, 赵薇芳, 蒋青青. 微波蚀刻制备超薄柔性 MXenes 及其纳米复合材料储钾机制[J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(02): 153-161.
- [7] YUAN J, HUANG X Y, ZHANG L L, et al. Tuning piezoelectric field for optimizing the coupling effect of piezo-photocatalysis[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 278: 119291.
- [8] WU J, KE K H, QIN N, et al. Magnetically retrievable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>@ZnO piezo-photocatalyst: Synthesis and multiple catalytic properties[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 636: 167-175.
- [9] ZHANG F, LI Y H, QI M Y, et al. Boosting the activity and stability of Ag-Cu<sub>2</sub>O/ZnO nanorods for photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 268: 118380.
- [10] KARAKAYA S, KABA L. Nanoflower-like cerium-doped ZnO photocatalyst deposited by spray pyrolysis for the degradation of methylene blue dye[J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 27: 100875.
- [11] PUNEETHA P, MALLEM S P R, BATHALAVARAM P, et al. Temperature dependence of the piezotronic effect in CdS nanospheres[J]. *Nano Energy*, 2021, 84: 105923.
- [12] LI J, XIE G Z, JIANG J, et al. Enhancing photodegradation of Methyl Orange by coupling piezo-phototronic effect and localized surface plasmon resonance[J]. *Nano Energy*, 2023, 108: 108234.
- [13] TU N, NGUYEN K T, TRUNG D Q, et al. Effects of carbon on optical properties of ZnO powder[J]. *Journal of Luminescence*, 2016, 174: 6-10.
- [14] LI H, SUN Y F, ZHANG Q P, et al. Facile synthesis of ZnO/Ag/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposites for multiple applications in photocatalytic degradation and photoactivated NO<sub>2</sub> sensing[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 638: 158010.
- [15] WANG J P, WANG Z Y, HUANG B B, et al. Oxygen vacancy induced band-gap narrowing and enhanced visible light photocatalytic activity of ZnO[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(8): 4024-4030.
- [16] WANG J, XIA Y, ZHAO H Y, et al. Oxygen defects-mediated Z-scheme charge separation in g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/ZnO photocatalysts for enhanced visible-light degradation of 4-chlorophenol and hydrogen evolution[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 206: 406-416.
- [17] ZHANG Q P, XIE G Z, DUAN M Y, et al. Zinc oxide nanorods for light-activated gas sensing and photocatalytic applications[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(19): 17445-17456.
- [18] 柏明辉, 刘宽, 张秋平, 等. 高稳定性 Mn: ZnO/Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米复合光催化剂的制备及光催化特性[J]. *光子学报*, 2023, 52(06): 321-334.
- [19] LIU Y, ZHANG Q, YUAN H, et al. Comparative study of photocatalysis and gas sensing of ZnO/Ag nanocomposites synthesized by one- and two-step polymer-network gel processes[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 868: 158723.
- [20] WANG J, LIU W, LUO G, et al. Synergistic effect of well-defined dual sites boosting the oxygen reduction reaction[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(12): 3375-3379.
- [21] ZHAO C X, LIU J N, LI B Q, et al. Multiscale construction of bifunctional electrocatalysts for long-lifespan rechargeable zinc-air batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(36): 2003619.
- [22] LIANG Z, YAN C F, RTIMI S, et al. Piezoelectric materials for catalytic/photocatalytic removal of pollutants: Recent advances and outlook[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 241: 256-269.
- [23] ZHANG Q C, JIA Y M, WU W W, et al. Review on strategies toward efficient piezocatalysis of BaTiO<sub>3</sub> nanomaterials for wastewater treatment through harvesting vibration energy[J]. *Nano Energy*, 2023, 113: 108507.

(责任编辑:肖丽,殷锋,付强,张阳,和力新;英文编辑:周序林,郑玉才)