

# WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维的制备及其光催化性能

王璐<sup>1,2</sup>, 韩萍芳<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学 生物与制药工程学院, 江苏 南京 211816)

(2. 南通职业大学, 江苏 南通 226007)

**摘 要:** 采用静电纺丝技术结合高温煅烧制备了一系列不同 W/Nb 摩尔比的 WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维, 探究了 WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维的结构、性质及 WO<sub>3</sub> 含量对其光催化性能的影响。结果表明, WO<sub>3</sub> 的引入明显改善了光催化剂的光吸收能力并有效抑制了光生载流子的闭合。在以甲基橙作为目标污染物的光催化降解实验中, WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维展现了良好的光催化性能, 当 W/Nb 摩尔比为 15% 时, WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维的光催化活性最高。在可见光照射 150 min 后, 其对甲基橙的降解率达到 96.4%, 动力学常数为 0.0222 min<sup>-1</sup>, 分别是纯 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 WO<sub>3</sub> 纳米纤维的 13.1 和 5.8 倍。

**关键词:** Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; WO<sub>3</sub>; 异质结; 静电纺丝; 光催化

**中图分类号:** O643

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)11-4251-07

自 1972 年 Fujisima 等<sup>[1]</sup>利用 TiO<sub>2</sub> 光解水制氢以来, 半导体光催化作为一种绿色、低成本的技术用于降解有机污染物修复环境备受人们关注, 各种半导体化合物如 TiO<sub>2</sub>、ZnO、WO<sub>3</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等作为活性光催化剂也随之在光催化等领域得以广泛研究和应用<sup>[2-7]</sup>。其中, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 因具有低毒、热力学稳定、光催化活性高等特点, 在太阳能电池、光解水产氢、光降解污染物等新能源、环境污染治理领域具有广阔的应用前景<sup>[8]</sup>。

近年来, 人们合成了各种形貌的纳米 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 材料, 如纳米粒<sup>[9]</sup>、纳米棒<sup>[8]</sup>、纳米管<sup>[10]</sup>、分级结构微球<sup>[11]</sup>和纳米纤维<sup>[12]</sup>等, 在光催化降解污染物应用中取得了良好的效果。然而, 研究者发现, 纯 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 与 TiO<sub>2</sub> 相似, 因禁带较宽 (约 3.2 eV) 而只能被紫外光激发, 使其对太阳能的利用效率较低<sup>[13]</sup>。此外, 光催化过程中形成的光诱导电子-空穴对的快速闭合导致了 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 光催化活性较低<sup>[14]</sup>。针对于此, 研究者们开发了非金属<sup>[8]</sup>或金属掺杂<sup>[5]</sup>、贵金属沉积<sup>[15]</sup>及窄带半导体复合<sup>[13, 16]</sup>等改性方法, 以提升 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 对太阳光的吸收效率及光催化活性。其中, 与窄禁带半导体复合是一种较为常用且有效的方法。一方面, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 与窄禁带半导体复合可以在很大程度上提高其对可见光的吸收能

力, 使其在可见光下具有光催化活性成为可能; 另一方面, 半导体间耦合形成内部电场能够有效抑制光生电荷的闭合, 从而提高半导体光催化材料的光催化活性<sup>[17]</sup>。WO<sub>3</sub> 是一种重要的窄带半导体金属氧化物, 常直接用于光催化降解污染物或修饰宽禁带半导体制备异质结光催化材料<sup>[18, 19]</sup>。本研究通过静电纺丝层层组装技术结合高温处理制备 WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维 (WN NFs), 对其结构和性能进行表征, 并考察 WO<sub>3</sub> 加入量对电纺异质结纳米纤维光催化性能的影响。

## 1 实 验

### 1.1 WN NFs 的制备

采用静电纺丝层层组装技术制备 WN NFs。将 0.27 g NbCl<sub>5</sub> 和 0.35 g 聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 顺次溶于 2.65 mL N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) 中, 在室温下磁力搅拌 8 h 得透明溶液 A, 备用。另将 0.15 g 偏钨酸铵和 0.35 g PVP 顺次溶于 2.65 mL DMF 中, 搅拌相同时间得透明溶液 B, 备用。将上述溶液 A 和 B 分别注入 5 mL 的注射器中 (配有 25 gauge 针头), 开启电源交替进行静电纺丝 (收集器与针头之间的距离为 15 cm, 高压直流电源电压为 18 kV, A 溶液的推进速率为 0.3 mL/h, B

收稿日期: 2022-01-28

基金项目: 南通市科技计划项目 (JC2021165, JC2021063); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (18KJB610016)

作者简介: 王璐, 女, 1982 年生, 博士生, 南京工业大学生物与制药工程学院, 江苏 南京 211816, E-mail: hpf@njtech.edu.cn

溶液的推进速率为 0.1 mL/h)。纺丝完成后,将所得样品置于 600 °C 的马弗炉中处理 1 h (升温速率为 10 °C/min) 即得 WN NFs。为考察 WO<sub>3</sub> 加入量对 WN NFs 光催化性能的影响,通过控制溶液 A 和 B 纺丝时间,分别制备了不同 W/Nb 摩尔比的 WN NFs,如 A 和 B 溶液交替各纺丝 20 min,即得 W/Nb 摩尔比为 20% 的 WN NFs,命名为 20WN NFs。固定 A 溶液纺丝时间不变,调整 B 溶液纺丝时间可得 5WN NFs、10WN NFs 和 15WN NFs 样品。另外,分别制备了纯 WO<sub>3</sub> 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 纳米纤维,分别命名为 WO<sub>3</sub> NFs 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NFs。

## 1.2 WN NFs 的表征

采用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku ULTIMA IV) 获得样品的晶体结构数据,扫描范围为 10°~80°。采用扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi SU8010) 和透射电子显微镜 (TEM, JEOL JEM 2100) 对样品的形貌和结构进行表征。通过 X 射线光电子能谱仪 (XPS ThermoFisher Scientific K-ALPHA) 分析样品的元素组成和元素的电子状态。采用氮气吸附仪 (Micromeritics ASAP2460) 分析样品的比表面积及孔隙结构。在紫外-可见漫反射分光光度计 (UV-Vis-DRS, Shimadzu UV-2600) 上记录样品的紫外-可见漫反射光谱。在电化学工作站 (上海辰华仪器有限公司 CHI660B) 上测定了样品的光电流强度。通过荧光光谱仪 (Hitachi F-4600) 在 325 nm 激发光下测试了样品的稳态光致发光 (PL) 光谱。

## 1.3 光催化实验

光催化降解实验在光化学反应仪 (上海比朗仪器制造有限公司 BL-GHX-II) 上进行,光源为 300 W 氙灯 (外加  $\lambda > 420$  nm 滤波片),反应温度恒定为 25 °C,目标降解物为 100 mL 的甲基橙 (MO) 溶液 (10 mg/L)。实验开始前,将加有 0.1 g 光催化剂的上述 MO 溶液置于光化学反应仪中遮光搅拌 30 min 至吸附平衡。开启实验,每反应 30 min 吸取 2 mL 溶液,离心取上清液,用紫外-可见分光光度计 (上海美普达仪器有限公司 UV-1800) 在 463 nm 处测定其吸光度,计算浓度,根据公式 (1) 计算 MO 的降解率。

$$\eta = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为降解率,  $C_0$  为 MO 的初始浓度,  $C_t$  为一定时间时 MO 的浓度。

## 1.4 活性物种捕获实验

在上述光催化降解实验中,分别加入重铬酸钾 (K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub>)、草酸铵 (AO)、异丙醇 (IPA) 和对苯醌 (BQ) 作为光生电子 (e<sup>-</sup>)、空穴 (h<sup>+</sup>)、羟基自由基 (·OH) 和超氧自由基 (·O<sub>2</sub><sup>-</sup>) 的捕获剂,进行活性

物种捕获实验,考察不同活性物种在光催化降解过程中的作用。实验条件同 1.3。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

图 1 为样品的 XRD 图谱。图谱中 WO<sub>3</sub> NFs 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NFs 的 XRD 衍射峰分别与正交相 WO<sub>3</sub> (JCPDS card 83-0950) 和正交相 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (JCPDS card 30-0873) 标准图谱一致,且衍射峰较强,说明结晶性较好。对于 WN NFs,在其 XRD 图谱中同时出现了正交相 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和正交相 WO<sub>3</sub> 的特征衍射峰。同时,随着 W/Nb 摩尔比的增大,正交相 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的特征衍射峰略有减弱,而正交相 WO<sub>3</sub> 的特征衍射峰随之增强,说明经过静电纺丝层层组装和高温煅烧过程正交相 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NFs 与正交相 WO<sub>3</sub> NFs 成功复合在一起。

### 2.2 SEM 分析

图 2 是样品 15WN NFs 的 SEM 形貌。从图 2a 可以看到,样品呈现随机取向一维纳米纤维形态,长度可达数十微米。图 2b 为 15WN NFs 的高倍 SEM 形貌,从中可以看到 2 种形貌的纳米纤维,一种表面较为光滑,平均直径为 160 nm 左右,为 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NFs,另一种为 WO<sub>3</sub> NFs,其整体长度、直径与 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NFs 相似,但是表面较为粗糙,呈现念珠式结构,即其由直径约 80 nm 的 WO<sub>3</sub> 纳米粒子构成。结合文献可推测电纺异质结纳米纤维的形成机理:纺丝液滴在高压静电作用下雾化形成射流,继而射流中的 DMF 溶剂挥发固化成 PVP-偏钨酸铵 (或 NbCl<sub>5</sub>) 复合物,在高温处理过程中,复合物中的 PVP、钨 (钽) 源发生分解,即形成 WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维<sup>[20, 21]</sup>。念珠结构 WO<sub>3</sub> 的形成是由于纺丝速率较小导致。WO<sub>3</sub> 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2 种纳米纤维间的无序接触一方面增加了异质结的比表面积,减少团聚,更为重要的是由 2 种纳米纤维形

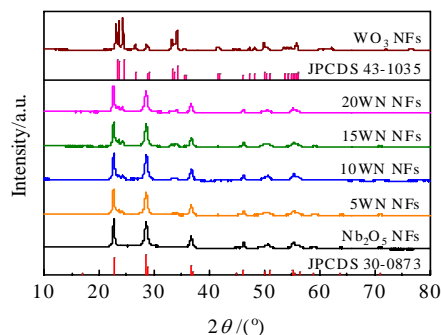


图 1 样品的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of the samples

成的异质结可以增强光生电荷的传输, 抑制光生电荷的闭合, 进而提高光催化活性<sup>[22]</sup>。

### 2.3 TEM 分析

图 3a 为样品 15WN NFs 的 TEM 像, 从中可以清晰地看到 2 种形貌的纤维, 一种是表面较为光滑的  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs, 另一种是表面粗糙、由纳米颗粒组成的  $\text{WO}_3$  NFs, 与 SEM 表征结果一致。图 3b 为 15WN NFs 的选区电子衍射花样 (图 3a 蓝色标记区域), 从中可以看出电纺异质结纳米纤维具有高结晶度的多晶性质, 衍射斑环分别指向正交相  $\text{WO}_3$  的 (002)、(120) 和 (202) 晶面<sup>[23]</sup>和正交相  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  的 (001)、(180) 和 (200) 晶面<sup>[24]</sup>, 进一步表明所制备的异质结纳米纤维由  $\text{WO}_3$  和  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  组成。图 3c 为 15WN NFs 的高倍 TEM 像, 从中可以明显看到 2 种晶格条纹, 分别与  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (181) 晶面 ( $d=0.245$  nm)、 $\text{WO}_3$  (002) 晶面 ( $d=0.384$  nm) 相一致<sup>[25,26]</sup>。此外, 可以看到 2 种纤维间紧密连接, 表明  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{WO}_3$  2 种纳米纤维经静电纺丝和高温煅烧后成功地附着在一起。

### 2.4 XPS 分析

图 4 为 15WN NFs 的 XPS 图谱。从 XPS 全谱 (图 4a) 可以看出该电纺异质结纳米纤维由 Nb、O 和 W 元素组成。图 4b 为 Nb 的 XPS 高分辨图谱, 在结合能为 206.8 和 209.5 eV 处的衍射峰分别归因于 Nb 3d<sub>5/2</sub> 和 Nb 3d<sub>3/2</sub><sup>[8]</sup>。图 4c 为 W 的 XPS 高分辨图谱, 结合能为 35.2、37.8 和 40.9 eV 处的衍射峰分别对应于 W 4f<sub>7/2</sub>、W 4f<sub>5/2</sub> 和 W 4f<sub>3/2</sub><sup>[23]</sup>。以上结果表明 Nb 和 W 元素分别

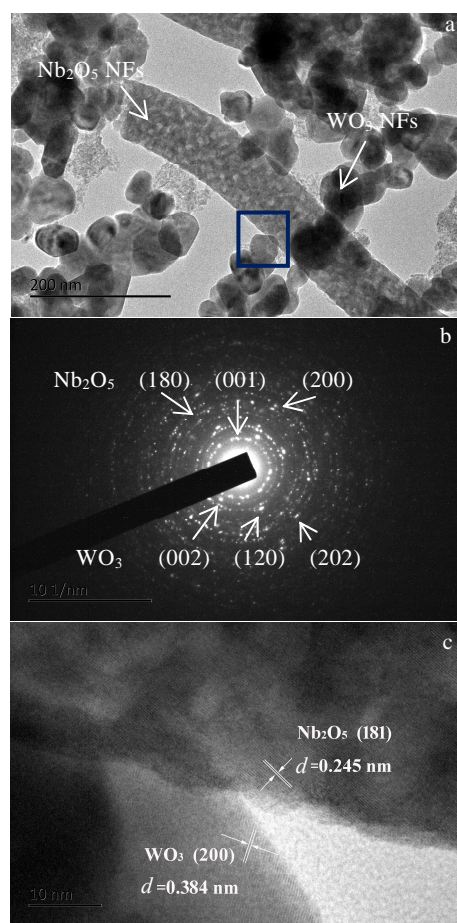


图 3 15WN NFs 的 TEM 像及 SAED 花样  
Fig.3 TEM image (a) and SAED pattern of box zone (b); lattice fringe of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (181) and  $\text{WO}_3$  (002) (c) for 15WN NFs

以  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{WO}_3$  的形式存在于所制备的电纺异质结纳米纤维中, 与 XRD 分析结果一致。图 4d 为 O 的 XPS 高分辨图谱, 在结合能为 529.8 和 532.0 eV 处拟合出 2 个特征峰, 分别对应于  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  中的 Nb-O 键和  $\text{WO}_3$  中的 W-O 键<sup>[27]</sup>。

### 2.5 $\text{N}_2$ 吸附-脱附等温线分析

图 5 为  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、15WN NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的  $\text{N}_2$  吸附-脱附等温线, 可以看出, 等温线都呈现典型的 IV 类 H1 型, 说明电纺纳米纤维具有介孔结构<sup>[28]</sup>。 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、15WN NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的比表面积分别为 104.4、71.2 和 24.5  $\text{m}^2/\text{g}$ , 孔容分别为 0.12、0.09 和 0.05  $\text{cm}^3/\text{g}$ 。图 5 插图 3 个样品的孔径分布曲线, 可以看出, 3 种纳米纤维的孔径主要分布于 2~20 nm 之间。相比于纯  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs, 层层组装电纺异质结纳米纤维具有较高的比表面积和较大的孔容, 为光催化反应提供更多的活性点位<sup>[29]</sup>。

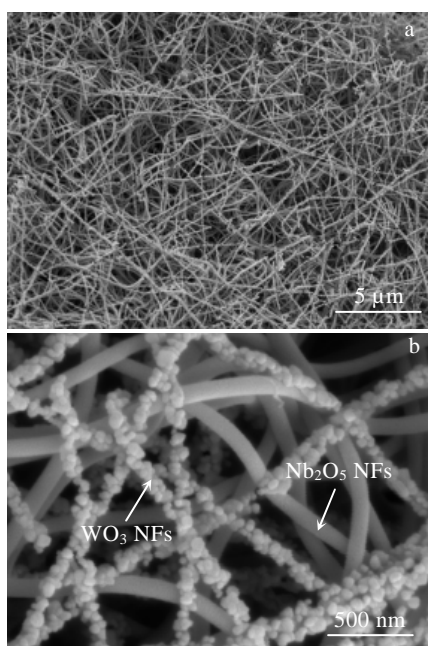


图 2 15WN NFs 的 SEM 形貌  
Fig.2 SEM morphologies of 15WN NFs

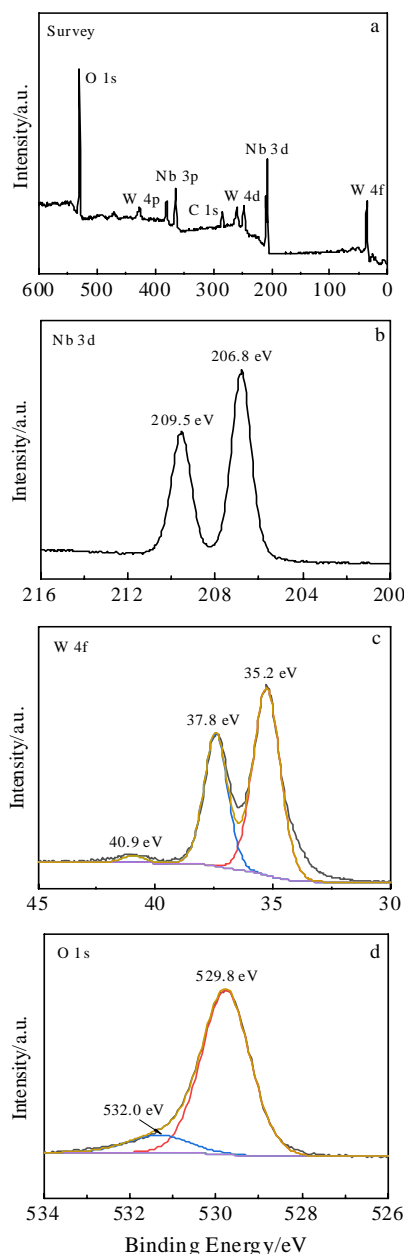


图 4 15WN NFs 的 XPS 全谱和 Nb 3d、W 4f、O 1s 高分辨谱图

Fig.4 XPS survey spectrum (a) and high-resolution spectra of Nb 3d (b), W 4f (c), O 1s (d) of 15WN NFs

## 2.6 UV-Vis-DRS 分析

图 6 为样品的 UV-Vis-DRS 图谱。可以看出,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 的吸收边约为 400 nm,  $\text{WO}_3$  NFs 的吸收边约为 510 nm。相比  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs, WN NFs 的吸收边向可见光区域发生明显红移, 并随着  $\text{WO}_3$  含量的增加, WN NFs 在可见光区的吸收逐渐增强。通过 Kubelka-Munk 方程估算样品的带隙能 ( $E_g$ ), 结果如图 6b 所示,

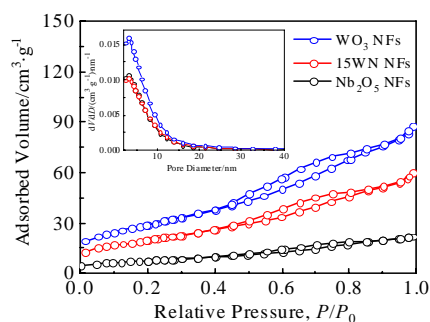


图 5  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、15WN NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的  $\text{N}_2$  吸附脱附曲线 (插图为孔径分布曲线)

Fig.5  $\text{N}_2$  adsorption-desorption curves and pore size distribution curves (inset) of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs, 15WN NFs and  $\text{WO}_3$  NFs

$\text{WO}_3$  NFs、5WN NFs、10WN NFs、15WN NFs、20WN NFs 和  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 的  $E_g$  分别为 2.70、2.91、2.95、3.01、3.15 和 3.23 eV。WN NFs 的  $E_g$  均小于  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 的  $E_g$ , 说明所制备的 WN NFs 在可见光区域具有光催化活性。

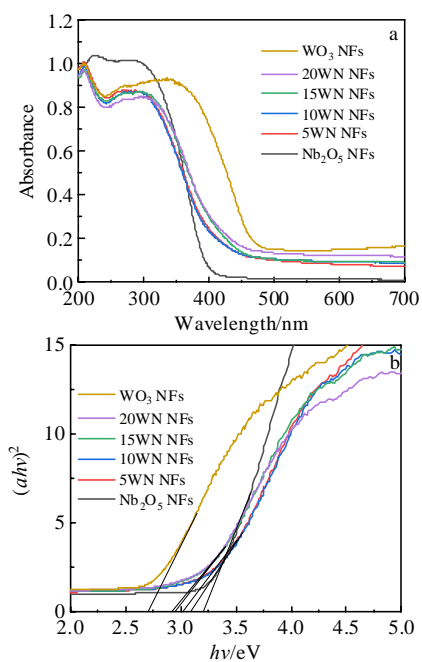
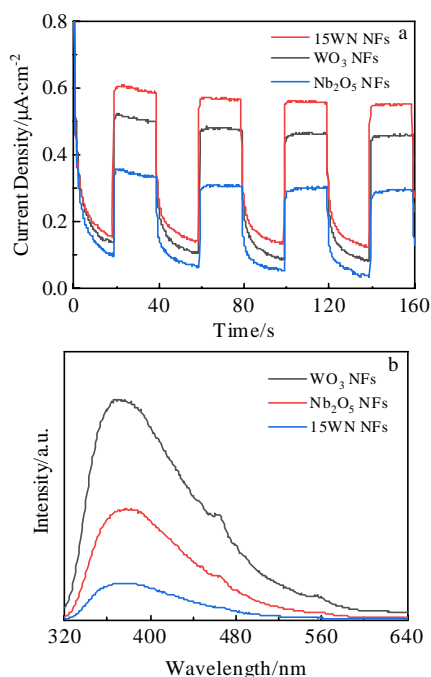
## 2.7 光电流和 PL 分析

图 7a 为  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、 $\text{WO}_3$  NFs 和 15WN NFs 的光电流曲线, 如图所示, 纯  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的光电流密度较弱, 说明其光生电荷闭合较快, 形成异质结后, 光电流密度明显增强, 说明静电纺丝层层组装构建的异质结能够有效抑制光生载流子的闭合。图 7b 为  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、 $\text{WO}_3$  NFs 和 15WN NFs 的 PL 谱。可以观察到, 纯  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的发射峰强度较强。相比于  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、 $\text{WO}_3$  NFs, 15WN NFs 的发射峰强度明显降低, 进一步说明纯  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的光生电子-空穴对闭合率较高, 而所制备的 WN NFs 异质结有效提升了载流子的分离效率, 抑制了光生电荷的闭合<sup>[30]</sup>。

## 2.8 光催化降解性能和机理

图 8a 为在可见光下所制备样品对 MO 的光降解曲线。可以看出, 溶液中 MO 的浓度随反应时间延长而逐渐降低。其中,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的对 MO 的光催化降解率较低, 而 WN NFs 都表现出了良好的光催化降解性能, 且随着  $\text{WO}_3$  含量的增加光催化降解性能先增强再降低, 15WN NFs 的光催化降解性能最佳, 反应 150 min 后, 对 MO 的光降解率达到 96.4%。根据伪一级动力学反应模型  $[\ln(C/C_0) = -kt]$  对降解曲线进行拟合, 结果见图 8b,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、5WN NFs、10WN NFs、15WN NFs、20WN NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 降解 MO 的速率常数分别为 0.0017、0.0064、0.0093、0.0222、0.0134



图 6 样品的 UV-Vis-DRS 图谱和  $(ahv)^2-hv$  关系Fig.6 UV-Vis DRS spectra (a) and curves of  $(ahv)^2$  vs  $h\nu$  (b) for the samples图 7  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs、 $\text{WO}_3$  NFs、15WN NFs 的光电流响应图谱和 PL 光谱Fig.7 Transient photocurrent spectra (a) and PL spectra (b) of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs,  $\text{WO}_3$  NFs, 15WN NFs

和  $0.0038 \text{ min}^{-1}$ , 15WN NFs 的速率常数最大, 分别是  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  NFs 和  $\text{WO}_3$  NFs 的 13.1 倍和 5.8 倍。此外, 从活性物种捕获实验结果 (图 8c) 可以看出, 加入

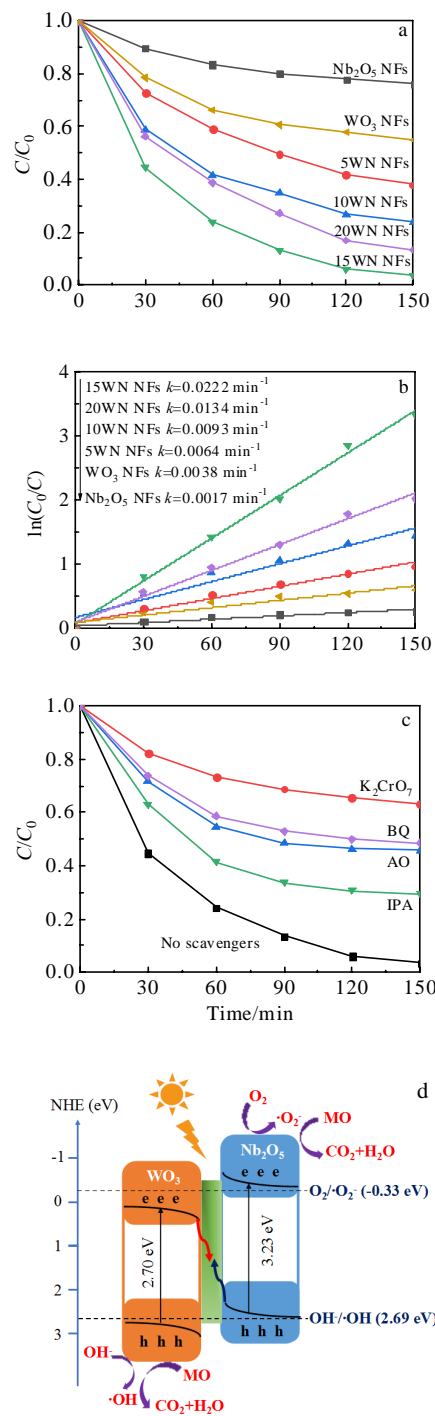


图 8 样品对 MO 的光降解曲线和动力学曲线, 不同活性物种捕获剂对光催化降解率的影响, 15WN NFs 光催化降解 MO 机理图

Fig.8 Photodegradation efficiency (a) and photocatalytic kinetics curves (b) of the as-prepared samples towards MO; effects of various scavengers on photocatalytic degradation rate (c); proposed mechanism of MO photocatalytic degradation by 15WN NFs (d)

K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub>、AO、IPA 和 BQ 后, 15WN NFs 对 MO 的光催化降解率分别下降到 36.9%、54.3%、70.6% 和 61.5%, 说明 e<sup>-</sup>、h<sup>+</sup>、·OH 和 ·O<sub>2</sub><sup>-</sup> 在光催化过程中都发挥了作用, 降解作用大小依次为 e<sup>-</sup>>h<sup>+</sup>>·O<sub>2</sub><sup>-</sup>>·OH, 这可能是因为 WO<sub>3</sub> 与 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 间形成了 S 型异质结<sup>[31]</sup>。WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维光催化降解 MO 机理如图 8d 所示。

### 3 结 论

1) 采用静电纺丝技术和高温煅烧方法将 WO<sub>3</sub> 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 纳米纤维层层组装在一起, 制备得到 WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维光催化剂。

2) 通过扫描电镜图发现 WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维由 2 种纤维无序交织构成。WO<sub>3</sub> 和 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2 种纳米纤维经静电纺丝层层组装和高温煅烧后紧密附着形成异质结。

3) Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 纳米纤维与 WO<sub>3</sub> 纳米纤维复合形成异质结后, 吸收边由紫外光区扩展至可见光区, WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维在可见光下具有光催化活性, 且随 WO<sub>3</sub> 加入量的增加先增强后减弱。W/Nb 摩尔比为 15% 时, WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 电纺异质结纳米纤维的光催化降解性能最佳。

#### 参考文献 References

- [1] Fujishima Akira, Honda Kenichi. *Nature*[J], 1972, 238(5358): 37
- [2] Mei Zihui(梅子慧), Wang Guohong(王国宏), Yan Suding(严素定) et al. *Acta Physico-Chimica Sinica*(物理化学学报)[J], 2021, 37(6): 200 9097
- [3] Wang Sheng, Kuang Panyong, Cheng Bei et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 741: 622
- [4] Adhikari S, Chandra K, Kim D et al. *Advanced Powder Technology*[J], 2018, 29(7): 1591
- [5] Wang Lu, Li Ya, Han Pingfang et al. *RSC Advances*[J], 2021, 11(1): 462
- [6] Liao Yuwei, Yang Jing, Wang Guohong et al. *Rare Metals*[J], 2020, 39: 125
- [7] Liao Yuwei, Wang Guohong, Wang Juan et al. *Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2021, 587: 110
- [8] Xue Jiao, Wang Runwei, Zhang Zongtao et al. *Dalton Transactions*[J], 2016, 45(41): 16 519
- [9] Lopes Osmando F, Paris Elaine C, Ribeiro Caue. *Applied Catalysis B: Environmental*[J], 2014, 144: 800
- [10] Yan Chenglin, Xue Dongfeng. *Advanced Materials*[J], 2008, 20(5): 1055
- [11] Chen Junli, Wang Hai, Huang Gailing et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 728: 19
- [12] Zhang Ying, Zhao Hu, Zhao Xiaofei et al. *Science China Materials*[J], 2019, 62(2): 203
- [13] Oliveira Luiz C A, Oliveira Henrique S, Mayrink Giovanna et al. *Applied Catalysis B: Environmental*[J], 2014, 152-153: 403
- [14] Hashemzadeh Fatemeh, Gaffarinejad Ali, Rahimi Rahmatollah. *Journal of Hazardous Materials*[J], 2015, 286: 64
- [15] Lin Hsin Yu, Yang Hsien Chang, Wang Wei Lin. *Catalysis Today*[J], 2011, 174(1): 106
- [16] Wang Lu, Li Ya, Han Pingfang. *Scientific Reports*[J], 2021, 11: 22 950
- [17] Wang Lu, Li Ya, Han Pingfang et al. *RSC Advances*[J], 2020, 10(38): 22 432
- [18] Li Yesheng(黎业生), Zhao Man(赵 曼), Zhang Weibo(张伟波) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(7): 1836
- [19] Khan Hayat, Rigamonti Marco G, Patience Gregory S et al. *Applied Catalysis B: Environmental*[J], 2018, 226: 311
- [20] Cheong Jun Young, Jung Ji-Won, Youn Doo-Young et al. *Journal of Power Sources*[J], 2017, 360: 434
- [21] Xiao Yi, He Zeqing, Wang Renshan et al. *Colloids and Surfaces A*[J], 2019, 580: 123 752
- [22] Chang Guoqing, Ullah Wajid, Li Aike et al. *New Journal of Chemistry*[J], 2019, 43(38): 15 405
- [23] Xu Shang, Fu Dingfa, Song Kai et al. *Chemical Engineering Journal*[J], 2018, 349: 368
- [24] Devarayapalli Kamakshaiah Charyulu, Surya Veerendra Vattikuti Prabhakar, Sreekanth Thupakula Venkata Madhukar et al. *Chemistry Select*[J], 2019, 4(45): 13 250
- [25] Lou Linzhen, Kong Xiangzhong, Zhu Ting et al. *Science China Materials*[J], 2019, 62(4): 465
- [26] Szilágyi Imre Miklós, Santala Eero, Mikko Heikkilä et al. *Chemical Vapor Deposition*[J], 2013, 19(4-6): 149
- [27] Zhao Ting, Qian Ruifeng, Zhou Guanda et al. *Chemosphere* [J], 2021, 263: 128 344
- [28] Zhou Shuai(周 帅), Wang Juan(王 娟). *Chemical Journal of Chinese Universities*(高等学校化学学报)[J], 2021, 42(4): 1284
- [29] Duan Lianwei(段连威), Zhu Yabo(朱亚波). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(8): 2567
- [30] Hu Liming, Yan Juntao, Wang Chunlei et al. *Chinese Journal of Catalysis*[J], 2019, 40(3): 458
- [31] Wang Juan, Wang Guohong, Cheng Bei et al. *Chinese Journal of Catalysis*[J], 2021, 42(1): 56

## Preparation and Photocatalytic Activity of WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Electrospun Heterojunction Nanofibers

Wang Lu <sup>1,2</sup>, Han Pingfang <sup>1</sup>

(1. College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

(2. Nantong Vocational University, Nantong 226007, China)

**Abstract:** A series of WO<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> electrospun heterojunction nanofibers (WN NFs) with different W/Nb molar ratios were fabricated based on an electrospinning technology combined with calcination treatment. The structure and properties as well as the effect of WO<sub>3</sub> content on the photocatalytic activity of WN NFs were investigated. The results confirm that the coupling of WO<sub>3</sub> with Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> results in a remarkable red shift in the optical response of the heterojunction samples and inhibits the recombination of photoinduced carriers. In the photocatalytic degradation experiment towards methyl orange as the target pollutant, the as-prepared WN NFs exhibit remarkably enhanced photocatalytic activity. Particularly, the WN NFs with W/Nb molar ratio of 15% demonstrate the largest degradation rate, exhibiting a prominent value of 96.4% in 150 min under visible light irradiation. And the kinetic constant is 0.0222 min<sup>-1</sup>, approximately 13.1-fold and 5.8-fold higher than these of pure Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and WO<sub>3</sub> nanofibers, respectively.

**Key words:** Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; WO<sub>3</sub>; heterojunction; electrospinning; photocatalysis

---

Corresponding author: Han Pingfang, Ph. D., Professor, College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China, E-mail: hpf@njtech.edu.cn