

Growth Mechanism and Photocatalytic Performance of ZnO Nanorod Arrays

Chunwei Liu, Yang Wan, Shenghai Zhuo, Sha Luo*

College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang
Email: 3226833587@qq.com, *luo.sha.85@163.com

Received: Apr. 22nd, 2018; accepted: May 9th, 2018; published: May 16th, 2018

Abstract

Well-defined ordered ZnO nanorod arrays were successfully prepared on activated carbon fibers by combining sol-gel with a hydrothermal method. The growth mechanism was proposed by SEM, XRD and N₂ physisorption. Concentration of zinc acetate had a regulatory effect on the morphology of ZnO nanorods. ZnO films provided the nucleus for oriented growth of nanorods, promoting its preferential growth along the c-axis direction of activated carbon fibers. The photocatalytic tests showed the catalytic performance of ZnO nanorod arrays/activated carbon fibers was influenced obviously by zinc acetate. When the Zn(CH₃COO)₂ concentration was 0.15 mol·L⁻¹, its removal efficiency of methylene blue reached 90% during 120 min. After five regeneration cycles, its photocatalytic efficiency remained 82%.

Keywords

Zinc Oxide, Nanorod Array, Activated Carbon Fiber, Growth Mechanism, Photocatalysis

ZnO纳米棒阵列生长机理及光催化性能研究

刘春闹, 万 阳, 卓盛海, 罗 沙*

东北林业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: 3226833587@qq.com, *luo.sha.85@163.com

收稿日期: 2018年4月22日; 录用日期: 2018年5月9日; 发布日期: 2018年5月16日

*通讯作者。

摘要

本文以活性炭纤维(ACFs)为基底,采用溶胶-凝胶法-水热法合成了尺寸均一、高度定向、均匀生长的ZnO纳米棒阵列。通过SEM、XRD、N₂物理吸附提出了ZnO纳米棒的生长机理,醋酸锌浓度对ZnO纳米棒的形貌起到调控作用,ZnO薄膜为纳米棒的定向生长提供了晶核,促进了其沿着活性炭纤维c轴方向择优生长。通过光催化性能测试表明醋酸锌浓度显著影响了ZnO纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料的光催化性能,当醋酸锌浓度为0.15 mol·L⁻¹时,120 min内对亚甲基蓝的去除率高达90%,经五次再生循环后,其光催化效率仍能保持在82%。

关键词

氧化锌, 纳米棒阵列, 活性炭纤维, 生长机理, 光催化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

纳米 ZnO 具有化学稳定性高、氧化能力强、绿色环保和价格低廉等优点[1] [2] [3] [4], 在光催化降解有机废水方面表现出潜在的应用前景[5]。ZnO 纳米棒阵列具有明显的表面效应、量子尺寸效应和高度有序的取向结构[6], 能够促进光生载流子的定向传输, 提高光生电子-空穴的界面分离效率, 使其具有较高的光催化转化效率[7]。

继 Vayssieres 在硅片上成功制备出有序生长的 ZnO 纳米棒和纳米线[8], 研究者开始尝试在掺氟氧化锡玻璃[9]、氮化镓[10]、金属薄板[11]上合成 ZnO 纳米棒, 但是目前 ZnO 纳米棒的生长多局限于刚性载体上。与传统的刚性基底相比, 活性炭纤维具有柔韧性好[12]、比表面积大、吸附速率快、解吸容易[13] [14]等优点, 可实现多种形貌 ZnO 纳米材料的负载。活性炭纤维作为吸附中心可为 ZnO 纳米棒提供高浓度反应环境, 提高催化剂反应速率和矿化效率; ZnO 纳米棒作为催化中心能够使活性炭纤维得以原位再生, 增加其平衡吸附量。王中林等成功地在活性炭纤维上合成出纳米棒阵列并在光催化降解方面得到很好的应用[15]。

本文以活性炭纤维为基底, 采用溶胶-凝胶法-水热法制备了 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料; 利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、全自动比表面积和孔隙度分析仪等手段对催化剂的表面形貌、晶体结构及孔结构特征进行了表征; 以亚甲基蓝为模型污染物, 考察了催化剂的光催化降解效率和循环利用性。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

扫描电子显微镜(FEI Quanta 200, 荷兰 FEI); X 射线衍射仪(RigakuD/MAX 2200, 日本理学); 全自动比表面积和孔隙度分析仪(Micromeritics ASAP 2020, 美国 Micromeritics), 紫外-可见分光光度计(TU 1950, 北京普析)。

活性炭纤维, 秦皇岛紫川; 盐酸, 醋酸锌, 乙二醇甲醚, 乙醇胺, 硝酸锌, 六次甲基四胺, 所有化学试剂均为分析纯。

2.2. 实验方法

2.2.1. 活性炭纤维预处理

将活性炭纤维毡($3.0 \times 3.0 \text{ cm}^2$)置于(1+9)盐酸中浸泡 30 min, 以除去活性炭纤维表面吸附的杂质, 取出后用去离子水洗涤至中性, 然后超声清洗 20 min, 烘干备用。

2.2.2. ZnO 薄膜制备

将一定量醋酸锌溶解于 50 mL 乙二醇甲醚中, 再加入等摩尔的稳定剂乙醇胺, 在 60°C 水浴条件下, 剧烈搅拌 30 min, 形成溶胶。采用浸渍提拉法将其均匀涂覆在活性炭纤维上, 然后经 80°C 干燥、 500°C 焙烧, 得到 ZnO 薄膜/活性炭纤维复合材料。

2.2.3. ZnO 纳米棒阵列制备

将一定量硝酸锌溶解于等摩尔六次甲基四胺溶液中, 转移至聚四氟乙烯内衬的反应釜, 保持 60% 的填充度。再将涂覆 ZnO 薄膜的活性炭纤维垂直浸渍于反应釜中, 于 95°C 水热反应 4 h, 取出后用无水乙醇和去离子水反复洗涤。然后置于 80°C 烘干, 制得 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料。

2.2.4. ZnO 纳米棒阵列表征

利用 SEM 观察 ZnO 纳米棒阵列的表面形貌, 将复合光催化剂超声处理后用导电胶粘在样品台上, 镀金, 制成样品。利用 XRD 表征材料的晶体结构, 测定条件为 $\text{CuK}\alpha$ 射线, 管电压 40 kV, 管电流 30 mA, 扫描范围 $10^\circ\sim 80^\circ$ 。利用全自动比表面积和孔隙度分析仪分析材料的孔结构特征, 测定条件为 77 K 下 N_2 吸附, 吸附测试前, 样品预先在 150°C 真空条件下脱气 4 h。

2.2.5. 光催化性能测试

光催化活性测试在石英/玻璃夹套式反应器中进行, 内置 8 W 低压汞灯(主波长 365 nm)为紫外光源, 反应器外层以铝箔包覆。在光催化反应前避光磁力搅拌 2 h, 以使 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚甲基蓝溶液在复合材料表面达到吸附-脱附平衡。开启紫外光源, 每隔 15 min 取样, 以紫外-可见分光光度计检测亚甲基蓝浓度变化。

3. 结果与讨论

3.1. SEM 分析

图 1 为活性炭纤维、ZnO 溶胶薄膜/活性炭纤维和 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料的 SEM 图。由图 1(b)可知, $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸锌浓度下制备的 ZnO 薄膜上纳米粒子为单分散微球, 且在活性炭纤维表面分布均匀、粒径均一, 尺寸集中在 250 nm~350 nm 范围内。锌的可溶性有机盐二水合醋酸锌在溶剂乙二醇甲醚和螯合剂乙醇胺的作用下发生水解聚合反应, 得到透明均质溶胶。在醋酸锌浓度适中($0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的情况下, 成核过程平稳进行, 能够得到分散良好的微球晶粒。

水热反应后 ZnO 由最初的纳米颗粒生长为棒状结构, 其生长方向高度一致, 沿着活性炭纤维的径向均匀、有序生长[图 1(c)和图 1(h)]。ZnO 纳米棒尺寸均一, 其棒径约为 250 nm, 棒长在 $2 \mu\text{m}\sim 3 \mu\text{m}$ 之间, 长径比约为 10:1。较高的长径比意味着 ZnO 纳米棒具有更高的电子迁移率, 为电子的传输提供了导电通道[16], 从而降低光生电子-空穴的复合率, 使得催化剂的光催化性能显著提高。由不同醋酸锌浓度下 ZnO 纳米棒阵列的 SEM 图[图 1(d)~(f)]可知, 随着 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度的增加, ZnO 纳米棒阵列的分布由稀疏逐渐过渡到密集状态, 这与 ZnO 溶胶微粒的分布状态相一致。由此可以推断, 在 ZnO 纳米棒阵列的生长发育过程中, ZnO 薄膜为纳米棒的生长提供了晶核。

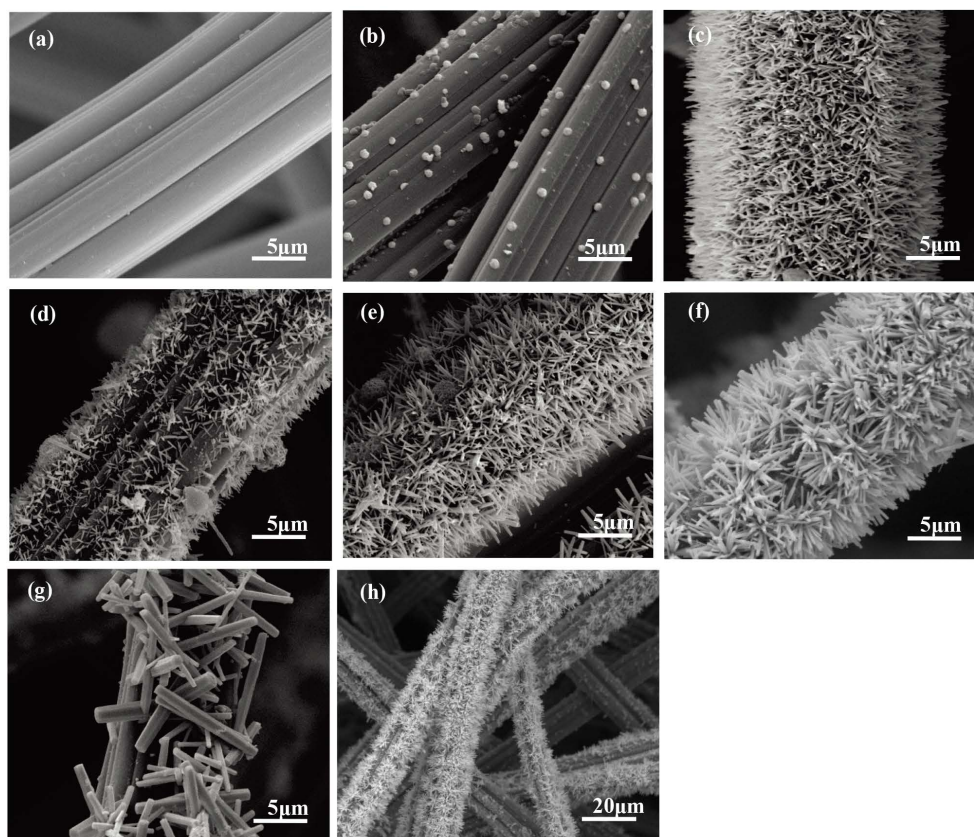


Figure 1. SEM images of ACFs (a), ZnO thin films/ACFs (b), ZnO nanorods/ACFs (g) and ZnO nanorod arrays/ACFs at different concentrations of zinc acetate (c, d, e, f, h), (c, h) $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (d) $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (e) $0.20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (f) $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

图 1. 活性炭纤维(a)、ZnO 薄膜/活性炭纤维(b)、ZnO 纳米棒/活性炭纤维(g)及不同 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度下制备的 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维(c, d, e, f, h) SEM 图, (c, h) $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (d) $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (e) $0.20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (f) $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

以活性炭纤维为基底的 ZnO 纳米棒阵列生长机理如图 2 所示。水热过程中, ZnO 体相中的生长基元经过界面进入晶格, 通过晶格重排作用形成 ZnO 纳米棒[17]。与预先覆膜的 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维相比, 仅由水热一步合成的 ZnO 纳米棒实验重复性差, 生长出的纳米棒分布杂乱无章, 多为堆叠生长, 其棒径分布范围较宽, 在 $0.7 \mu\text{m}\sim 1 \mu\text{m}$ 之间[图 1(g)]。推测其原因可能是活性炭纤维与 ZnO 之间晶格不匹配, 无法为纳米棒提供成核中心, 产生的生长基元则通过均相成核作用附着在活性炭纤维表面, 形成堆叠生长的纳米棒。因此, 活性炭纤维的预涂覆是使得 ZnO 纳米棒阵列沿着活性炭纤维外延生长的必要手段。而未经覆膜处理生成的 ZnO 纳米棒与活性炭纤维表面结合不牢固, 极易脱落, 限制了 ZnO 纳米棒/活性炭纤维复合光催化剂的应用。

3.2. XRD 分析

活性炭纤维、ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料的 XRD 谱图如图 3 所示。由图 3 可知, 除活性炭纤维的特征衍射峰外, ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料在 31.7° 、 34.4° 和 36.2° 位置上还出现了明显的衍射峰, 可以归属为 ZnO 六方纤锌矿结构的(100)、(002)、(101)晶面(标准 JCPDS 卡片 36-1451)。从图 3 还可以看出, 样品的衍射峰强度随 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度的增加而增强, 峰形更加尖锐, 晶型发育更加完整, 说明醋酸锌浓度的提高对样品的结晶度有促进作用。此外, 由(0001)-Zn 和 $(000\bar{1})$ -O 面组成的极

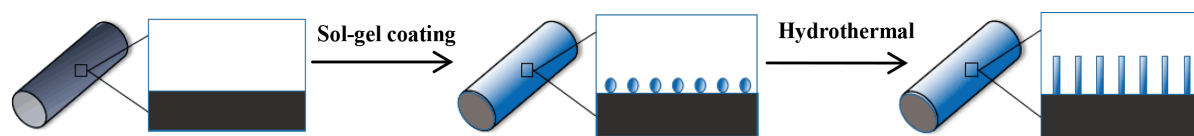


Figure 2. Schematic diagram of the growth mechanism of ZnO nanorod arrays on activated carbon fibers
图 2. 活性炭纤维上 ZnO 纳米棒阵列的生长机理示意图

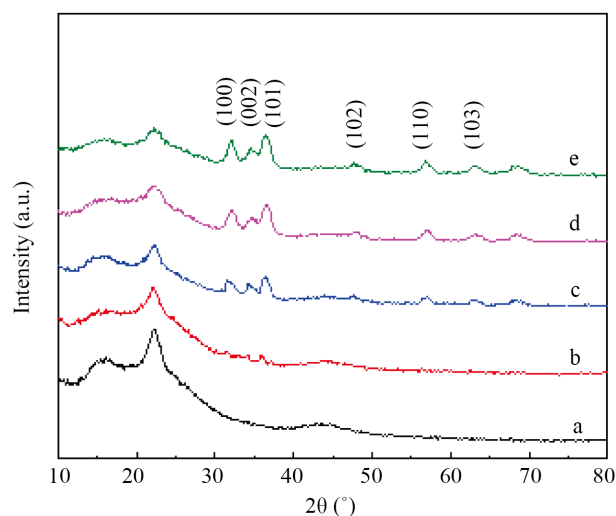


Figure 3. XRD patterns of ACFs and ZnO nanorod arrays/ACFs at different concentrations of zinc acetate. (a) ACFs, (b) $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (c) $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (d) $0.20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (e) $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

图 3. 活性炭纤维及不同 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度下制备的 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维的 XRD 图。(a) ACFs, (b) $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (c) $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (d) $0.20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (e) $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

性(002)端面作为 ZnO 纳米棒生长发育的反应活性面,促进了其沿着 c 轴择优生长的倾向,呈现规整有序的取向结构[18]。

3.3. N_2 物理吸附分析

表 1 所示为活性炭纤维、ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料的孔结构参数。由表 1 可知,随着 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度由 $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,样品的比表面积由 $685.0 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 下降至 $303.0 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,总孔容由 $0.48 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 下降至 $0.17 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 。结合 ZnO 纳米棒在活性炭纤维上的生长机理可知,纳米棒的生长发育会堵塞活性炭纤维表面的微孔结构,使得活性炭纤维的吸附能力有所下降。但是,ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合光催化剂的催化性能不仅受其材料自身吸附能力的影响,光催化活性位点也起到至关重要的作用。

3.4. 光催化反应性能

图 4 为活性炭纤维、ZnO 溶胶薄膜/活性炭纤维、ZnO 纳米棒/活性炭纤维和 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料对亚甲基蓝的光催化降解测试结果。由图 4 可知,在紫外光作用下,活性炭纤维对亚甲基蓝不具有光催化降解能力。ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维的光催化活性较 ZnO 薄膜/活性炭纤维和 ZnO 纳米棒/活性炭纤维有明显提高。且随着 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度的增加,ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合光催化剂对亚甲基蓝的降解效率呈现先增大后减小的趋势。当 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度为 $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,样品的

Table 1. Textural parameters of ACFs and ZnO nanorod arrays/ACFs
表 1. 活性炭纤维和 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维的孔结构参数

Sample	$C_{\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2}$ ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	S_{BET} ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	V_{total} ($\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)
a	—	939.7	0.48
b	0.10	685.0	0.39
c	0.15	504.6	0.27
d	0.20	392.5	0.20
e	0.25	303.0	0.17

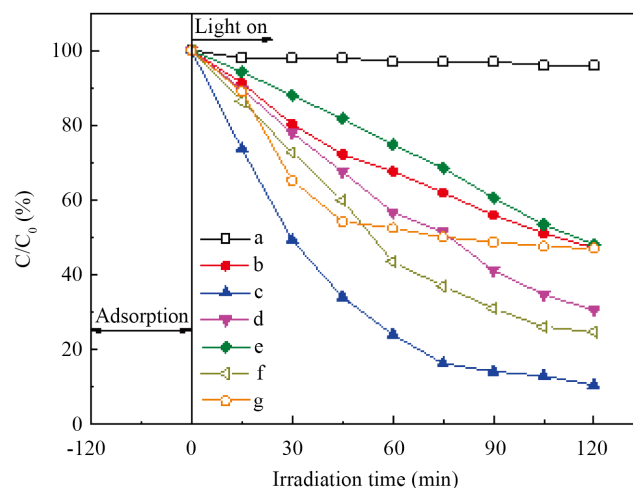


Figure 4. Photocatalytic efficiency of ACFs (a), ZnO thin films/ACFs (f), ZnO nanorods/ACFs (g) and ZnO nanorod arrays/ACFs at different concentrations of zinc acetate (b, c, d, e). (b) $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (c) $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (d) $0.20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (e) $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

图 4. 活性炭纤维(a)、ZnO 薄膜/活性炭纤维(f)、ZnO 纳米棒/活性炭纤维(g)和不同 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度下制备的 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维(b,c,d,e)对亚甲基蓝的光催化降解效率。(b) $0.10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (c) $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (d) $0.20 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, (e) $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

光催化反应性能最佳, 在最初 30 min 内即表现出较高的催化活性, 120 min 内对亚甲基蓝的去除率可高达 90%。但是当 $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度进一步增加时, 复合光催化剂对亚甲基蓝的降解率有所下降, 这可能是由于密集的 ZnO 纳米棒一方面很大程度上堵塞了活性炭纤维表面微孔, 致使其表面富集的污染物浓度显著降低; 另一方面较大程度上阻碍了其对外光的吸收, 影响了光催化剂的催化效率。

此外, 本实验还对 $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 浓度下制备的 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合材料进行了光催化循环测试(图 5)。从图 5 可以看出, 新鲜光催化剂对亚甲基蓝的降解率为 90%, 经过五次连续再生循环后, 其光催化性能没有明显降低, 第五次再生循环后仍能表现出较高的光催化降解能力, 其对亚甲基蓝的去除率为 82%, 说明该催化剂具有很好的光催化循环再生能力。

4. 结论

本文以活性炭纤维为基底, 采用溶胶-凝胶法-水热法合成了 ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维复合光催化剂, 利用 SEM、XRD、 N_2 物理吸附等手段对 ZnO 纳米棒的生长机理进行了研究, 并以亚甲基蓝为模型污染物, 考察了复合光催化剂的催化活性和再生能力。研究表明, 随着醋酸锌浓度的提高, ZnO 纳米棒分布由稀疏过渡到密集状态, 晶型发育更加完整, 但比表面积和总孔容有所降低。ZnO 薄膜为纳米

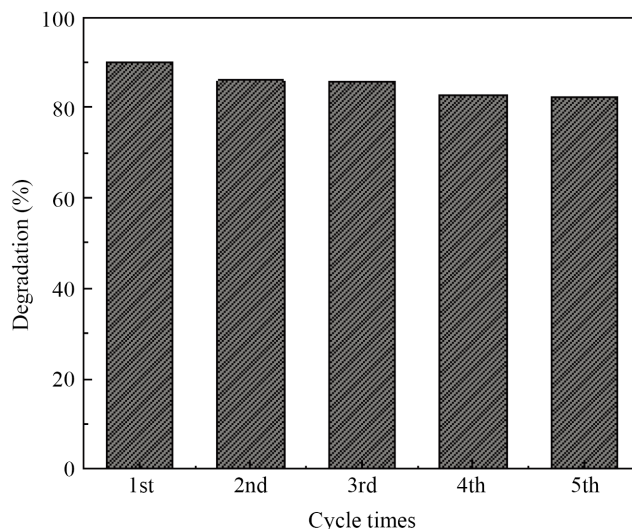


Figure 5. Photocatalytic cycle test of ZnO nanorod arrays/ACFs
图 5. ZnO 纳米棒阵列/活性炭纤维的光催化循环测试

棒的生长提供了晶核，促进了其沿着 c 轴择优取向的程度，是 ZnO 纳米棒阵列沿着活性炭纤维外延生长的必要条件。当醋酸锌浓度为 $0.15 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，120 min 内复合光催化剂对亚甲基蓝的去除率高达 90%，且经过五次再生循环后，其光催化效率仍能保持在 82%。该复合光催化剂具有较高的催化活性和良好的再生能力，在光催化降解有机染料方面具有潜在的应用前景。

致 谢

感谢东北林业大学大学生校级创新训练计划项目(201710225208);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572016BB02)对本研究工作的支持。

参考文献

- [1] Hu, H., Hu, S. and Dong, P.H. (2017) Synthesis of New Type ZnO Nanomaterial and Its Application for Electrochemical Detection of p-Nitrophenol. *Chemical Journal of Chinese Universities-Chinese*, **38**, 1171-1177.
- [2] Azouz, I., Habba, Y.G. and Capochichi-Gnambodoe, M. (2018) Zinc Oxide Nano-Enabled Microfluidic Reactor for Water Purification and Its Applicability to Volatile Organic Compounds. *Microsystems & Nanoengineering*, **4**, 1-7. <https://doi.org/10.1038/micronano.2017.93>
- [3] Bobowska, I., Aleksandra, W.P. and Opasinska, A. (2017) Effect of Heat Treatment on the Structure and Morphology of ZnO Nanorod Array and Its Composite with Titania Precursor. *Phase Transit*, **90**, 44-53. <https://doi.org/10.1080/01411594.2016.1212195>
- [4] Zhu, Q., Xie, C.S. and Li, H.Y. (2016) A Method for Modeling and Deciphering the Persistent Photoconductance and Long-Term Charge Storage of ZnO Nanorod Arrays. *Nano Research*, **9**, 2972-3002. <https://doi.org/10.1007/s12274-016-1182-y>
- [5] Yang, Y.W., Que, W.X. and Zhang, X.Y. (2016) Facile Synthesis of ZnO/CuInS₂ Nanorod Arrays for Photocatalytic Pollutants Degradation. *Journal of Hazardous Materials*, **5**, 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.080>
- [6] Zhang, Y.Z., Xu, J.P. and Shi, S.B. (2016) Development of Solution-Processed ZnO Nanorod Arrays Based Photodetectors and the Improvement of UV Photoresponse via AZO Seed Layers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 22647-22657. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b06700>
- [7] Duan, L., He, F.N. and Tian, Y. (2017) Fabrication of Self-Powered Fast-Response Ultraviolet Photodetectors Based on Graphene/ZnO:Al Nanorod-Array-Film Structure with Stable Schottky Barrier. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 8161-8168. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14305>
- [8] Vayssieres, L. (2003) Growth of Arrayed Nanorods and Nanowires of ZnO from Aqueous Solutions. *Advanced Mate-*

- rials, **15**, 464-466. <https://doi.org/10.1002/adma.200390108>
- [9] Lee, H.B., Ginting, R.T. and Tan, S.T. (2016) Controlled Defects of Fluorine-Incorporated ZnO Nanorods for Photovoltaic Enhancement. *Scientific Reports*, **6**, 1-11.
- [10] Shen, P.P., Tong, Y.Z. and Sheng, D. (2017) Modulating the Morphology of ZnO Nanorod Arrays on SiO_x-Mask-Patterned GaN Template. *Materials Letters*, **195**, 22-25. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.02.047>
- [11] Zhao, Y.Y., Tong, P.F. and Ma, D. (2017) A Facile Route to the Preparation of Highly Uniform ZnO@TiO₂ Core-Shell Nanorod Arrays with Enhanced Photocatalytic Properties. *Journal of Chemistry*, **2017**, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2017/8579896>
- [12] Xiong, L., Zhan, F. and Liang, H.B. (2018) Chemical Grafting of Nano-TiO₂ onto Carbon Fiber via Thiol-Ene Click Chemistry and Its Effect on the Interfacial and Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites. *Journal of Materials Science*, **53**, 2594-2603. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1739-5>
- [13] Tian, M.J., Liao, F. and Ke, Q.F. (2017) Synergetic Effect of Titanium Dioxide Ultralong Nanofibers and Activated Carbon Fibers on Adsorption and Photodegradation of Toluene. *Chemical Engineering Journal*, **328**, 962-976. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.109>
- [14] Liu, R.F., Li, W.B. and Peng, A.Y. (2018) A Facile Preparation of TiO₂/ACF with C-Ti Bond and Abundant Hydroxyls and Its Enhanced Photocatalytic Activity for Formaldehyde Removal. *Applied Surface Science*, **427**, 608-616. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.209>
- [15] Guo, W., Zhang, F. and Lin, C.J. (2012) Rectangular Bunched Rutile TiO₂ Nanorod Arrays Grown on Carbon Fiber for Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society*, **134**, 4437-4441. <https://doi.org/10.1021/ja2120585>
- [16] Zhang, C., Huang, X.H. and Liu, H.F. (2016) Large-Area Zinc Oxide Nanorod Arrays Templated by Nanoimprint Lithography: Control of Morphologies and Optical Properties. *Nanotechnology*, **27**, 1-9. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/48/485604>
- [17] Tao, J.J., Gong, Z.Z. and Yao, G. (2016) Hydrothermal Growth of Nanorod Arrays and *In-Situ* Conversion to Nanotube Arrays for Highly Efficient Ag-Sensitized Photocatalyst. *Journal of Alloys and Compounds*, **689**, 451-459. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.001>
- [18] Zhang, X.Y., Qin, J.Q. and Xue, Y.N. (2013) Effect of Aspect Ratio and Surface Defects on the Photocatalytic Activity of ZnO Nanorods. *Scientific Reports*, **4**, 1-8.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org