

# AZO 中空纳米纤维的制备及光催化性能

Preparation and Photocatalytic Activity of AZO Hollow Nanofibers

夏永辉<sup>1</sup>, 高 强<sup>1,2,3</sup>, 王阳毅<sup>1,2</sup>, 李梦娟<sup>1,2</sup>

(1 江南大学 生态纺织教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2 江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122;

3 复旦大学 聚合物分子工程国家重点实验室, 上海 200438)

XIA Yong-hui<sup>1</sup>, GAO Qiang<sup>1,2,3</sup>, WANG Yang-yi<sup>1,2</sup>, LI Meng-juan<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Eco-textiles(Ministry of Education), Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2 College of Textile & Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3 State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers, Fudan University, Shanghai 200438, China)

**摘要:** 为了制备高效环保的光催化剂,首先通过静电纺丝制备了 PVA(聚乙烯醇)纳米纤维膜,再通过水热合成法在 PVA 纳米纤维外包覆一层锌铝氢氧化物制得 AZO(掺杂铝元素的氧化锌)前驱体@PVA,将 AZO 前驱体@PVA 在空气气氛下高温煅烧成功制备出 AZO 中空纳米纤维。采用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、X 射线光电子谱仪、热重分析仪、紫外分光光度计等对样品的形态、结构、性能进行测试表征,结果显示 AZO 中空纳米纤维具有良好的光催化降解染料性能。

**关键词:** 中空纳米纤维; 聚乙烯醇; 掺杂铝元素的氧化锌; 光催化

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2017.000920

**中图分类号:** TQ638    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2018)02-0016-06

**Abstract:** In order to prepare highly efficient and environmentally friendly photocatalysts, polyvinyl alcohol nanofibers coated with Al-doped ZnO precursor (AZO) were prepared via electrospinning and hydrothermal synthesis. Furthermore, AZO hollow nanofibers were successfully fabricated after calcination at high temperature. The morphology, structure and properties of the samples were characterized by scanning electron microscopy, X-ray diffractometer, X-ray photoelectron spectrometer, thermogravimetric analyzer and UV spectrophotometer. The results show that AZO hollow nanofibers have good photocatalytic degradation of dye.

**Key words:** hollow nanofiber; PVA; AZO; photocatalytic

我国是染料大国,染料废水已成为环境重点污染源之一。其中,甲基橙(methyl orange, 对二甲基氨基偶氮苯磺酸钠)是一种偶氮染料,常用于印染纺织品,不易被传统方法降解,破坏生态环境<sup>[1-3]</sup>。因此,甲基橙的降解脱色一直是染料废水处理的难题。

目前染料废水的处理方法主要有吸附法、膜分离法、化学氧化法、光催化氧化法、生化法等。其中光催化氧化法是一种新型染料废水处理技术,此法适用范围广,净化效率高,二次污染小,被认为是最具前景的环境污染深度净化技术。寻求绿色环保高效的新型半

导体光催化剂是当下亟需解决的问题。纳米 TiO<sub>2</sub> 粒子因对染料废水有很强的处理能力而受广大研究者青睐。He 等<sup>[4]</sup>在室温下利用水热合成法以氨水为氮源,以氢氟酸作为氟源,制备出了 N—F—TiO<sub>2</sub> 纳米粒子催化剂,在可见光下对 10mg/L 甲基橙溶液有高的催化降解效率。但由于 N—F—TiO<sub>2</sub> 纳米粒子催化剂粒径太小,反应后的回收十分困难,不利于二次利用。王韬等<sup>[5]</sup>采用超声沉淀法,制备了 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/氧化石墨烯(GO)复合微小颗粒。此法利用 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的磁性,反应后很容易从溶液中分离出来。但是,当 pH 值大于

3.5 时,此法制备的磁性氧化石墨烯表面带负电荷,而甲基橙表面也带负电荷,导致吸附效果明显降低。Tripathy 等<sup>[6]</sup>通过溶剂热法和光还原法制备了负载 Ag 纳米颗粒的 ZnO 纳米棒,使 ZnO 导带上的电子能迅速转移到 Ag 上,从而减弱了光生载流子的复合,有效提高了 ZnO 的光催化性能。芦佳等<sup>[7]</sup>通过一步水热合成法制备了还原氧化石墨烯(RGO)/ZnO 纳米棒,此法制备的 RGO/ZnO 纳米棒在紫外光照射 120min 后对甲基橙的降解率达到了 97.5%。ZnO 具有与 TiO<sub>2</sub> 相似的光催化机理,且价格更为低廉,与 TiO<sub>2</sub> 相比,具有更高的量子效率,其光催化活性甚至优于 TiO<sub>2</sub>,是最有可能替代 TiO<sub>2</sub> 的光催化剂<sup>[8]</sup>。

本工作主要探讨了一种新型的光催化剂:AZO 中空纳米纤维。采用静电纺丝技术制备出形貌良好的 PVA 纳米纤维,然后通过水热合成和高温煅烧,制备出具有中空结构的 AZO 纳米纤维。并通过改善 AZO 的包覆比和 Al 掺杂比后,AZO 中空纳米纤维的光催化性能得到显著提高,并且 Al 的掺杂有效缓解了 ZnO 的光腐蚀问题。通过中空结构来获得较大的比表面积,在提高甲基橙降解效率的同时,其整体呈片状的纳米纤维结构相对于纳米粒子回收容易。同时中空 AZO 纳米纤维的主要元素锌和铝的来源广泛,环境友好<sup>[9-12]</sup>,具有良好的应用前景。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PVA( $M_w=105600$ ,醇解度 99%,化学纯),日本 Kurary 公司;冰醋酸(分析纯),Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(分析纯),Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O(分析纯),NaOH(分析纯),HCl(分析纯),均购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 样品表征

样品的表面微观形态用扫描电子显微镜观察(SU15-10 型),电压 10kV;样品的物相和结构分析采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪,CuK<sub>α</sub> 射线源,扫描速率 4°/min;样品的热稳定性能采用热重分析仪(Q500 型)分析测定,氮气气氛,升温速率 10°C/min;样品的元素组成及价态分析采用 Thermo Scientific Escalab 250Xi 型光电子能谱仪分析测定;甲基橙浓度的测定采用 UV-2600 型紫外可见分光光度计测试。

### 1.3 制备方法

首先称取 PVA 粒子 1.8g,将其溶解于 20mL 稀醋酸水溶液(含 0.8mL 冰醋酸)中,充分搅拌 30min

后,制得质量分数为 9% 的 PVA 纺丝液。然后将 PVA 纺丝液放在静电纺丝机上,在纺丝电压为 13kV,收集距离为 15cm,挤出速率为 0.7mL/h 的条件下进行静电纺丝,用转速为 30r/min 的金属滚筒进行收集。8h 后,将收集好的 PVA 纳米纤维膜从锡箔纸上揭下来,然后放入 180°C 的烘箱中进行热处理至表面呈黄色,使其具有耐热水的特性。

将热处理后的 PVA 纳米纤维膜剪成 3cm×3cm 大小后称取一定质量,加入到三口烧瓶中,用去离子水浸润后放在 65°C 的恒温水浴锅中,低速搅拌。称取一定比例的 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O 和 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 固体溶于去离子水中,待三口烧瓶中水温升至 65°C 后,在三口烧瓶中同时滴入一定量 4.00mol/L NaOH 水溶液和配置好的锌盐铝盐混合溶液,在滴入过程中保持溶液 pH 值 = 8.0,滴定结束后继续搅拌 2h。反应结束后,取出 AZO 前驱体@PVA 纳米纤维膜,用去离子水洗净表面后将其平铺在聚四氟乙烯板上室温晾干。最后将晾干后的 AZO 前驱体@PVA 纳米纤维膜放置在高温管式炉内,于空气气氛中 600°C 下煅烧 120min,制得 AZO 中空纳米纤维,如图 1 所示。

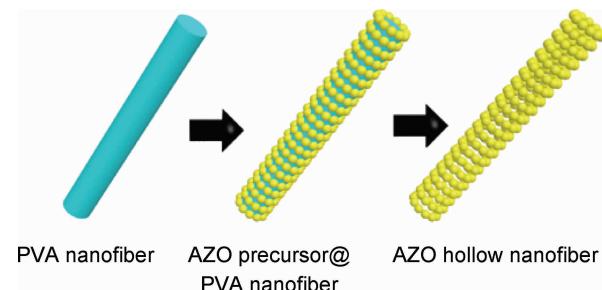


图 1 AZO 中空纳米纤维形成过程示意图  
Fig. 1 Formation process of AZO hollow nanofibers

## 2 结果表征

### 2.1 微观形态分析

图 2 是 AZO 前驱体@PVA 纳米纤维在空气环境下煅烧(煅烧温度 600°C,煅烧时间 2h)制备出的 AZO 中空纳米纤维的 SEM 图。包覆过程的水热合成温度为 65°C,溶液 pH 值 = 8,掺杂比(Al<sup>3+</sup>/Zn<sup>2+</sup>)为 10%(原子比,下同),包覆比(Zn<sup>2+</sup>/PVA)为 8%(质量分数,下同)。其中图 2(a),(b) 为 AZO 中空纳米纤维,可以看出 AZO 中空纳米纤维形态良好。在图 2(c),(d) 中箭头所指处可以看到明显的中空结构。经过测量,AZO 中空纳米纤维的平均直径为(340±45)nm,平均壁厚为(52±5)nm。由于纳米粒子在高温状态下极易团聚,当包覆比过大(10%)时 AZO 易团聚成球

状,难以形成纤维结构,如图 2(f)所示。而包覆比过小(5%)则导致 AZO 量不足,无法形成连续纤维,如图 2(e)所示。综上所述,在上述条件下,包覆比为 8%

时,AZO 纳米粒子之间依次排列,均匀且连续,无明显的团聚现象,总体呈现出良好的纤维形态和中空结构。

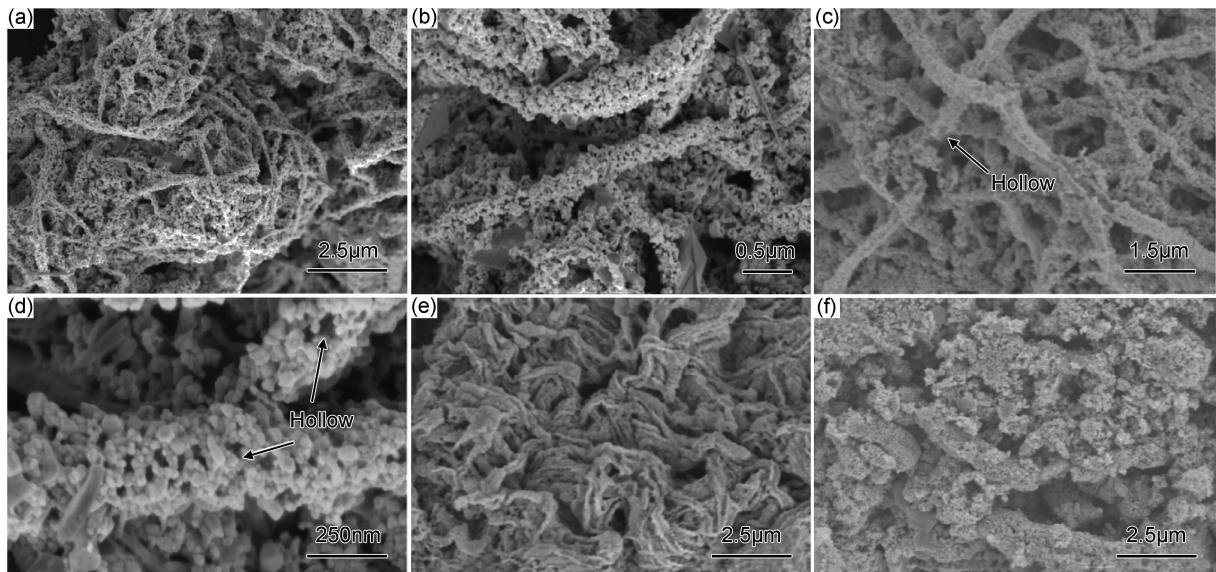


图 2 AZO 中空纳米纤维的 SEM 图

(a),(b)AZO 中空纳米纤维;(c),(d)AZO 纳米纤维的中空结构;

(e)包覆比为 5% 的 AZO 纳米纤维;(f)包覆比为 10% 的 AZO 纳米纤维

Fig. 2 SEM images of AZO hollow nanofibers

(a),(b)AZO hollow nanofibers;(c),(d) hollow structure of AZO nanofibers;

(e) AZO nanofibers with the coating ratio of 5%;(f) AZO nanofibers with the coating ratio of 10%

## 2.2 XRD 与 XPS 分析

图 3(a)为煅烧后 AZO 中空纳米纤维的 XRD 谱图。可以看出制得的 AZO 中空纳米纤维在  $2\theta$  角为  $31.8^\circ, 34.4^\circ, 36.2^\circ, 47.6^\circ, 56.6^\circ, 62.9^\circ, 66.4^\circ, 68.0^\circ, 69.2^\circ, 72.6^\circ$  和  $77.0^\circ$  处出现了 11 个衍射特征峰,可分别归属于 AZO 晶体的  $(100), (002), (101), (102),$

$(110), (103), (200), (112), (201), (004), (202)$  晶面,这与 ZnO 的衍射标准图谱(JCPDS No: 36-1451)吻合<sup>[13]</sup>。另外,由于 Al 元素的掺杂量太少,XRD 测试分析难以检测出 Al 的存在。由此表明,通过水热合成法和高温煅烧法制得的 AZO 中空纳米纤维晶粒生长良好,主要成分为 ZnO。

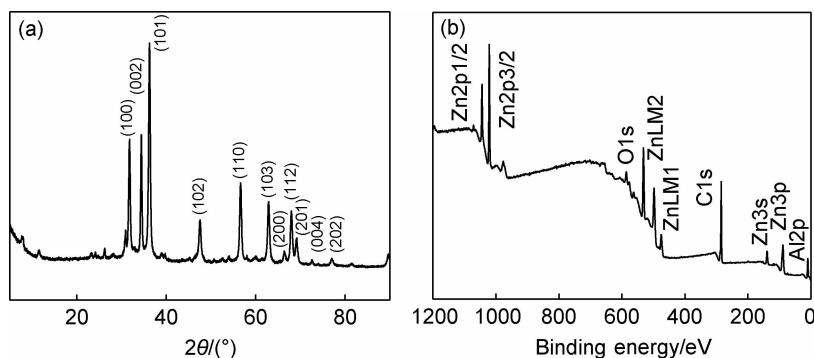


图 3 AZO 中空纳米纤维的 XRD 与 XPS 谱图 (a)XRD 谱图;(b)XPS 谱图

Fig. 3 XRD and XPS patterns of AZO hollow nanofibers (a)XRD;(b)XPS

X 射线光电子能谱(XPS)是一种表面分析方法,用以表征物质的表面成分以及表面元素所处的状态。图 3(b)是 AZO 中空纳米纤维(包覆比为 8%,掺杂比

为 10%)的 XPS 全谱扫描结果。从图中可以明显看到 Zn,O,C,Al 所对应的光电子峰,其中检测到的 C 元素可能是由于试样在测试过程中真空系统和密封部

件有机物污染造成的。ZnLM1 和 ZnLM2 为 Zn 的俄歇谱线。Zn3s 和 Zn3p 电子峰的位置分别在 139.6 eV 和 88.3 eV 处, 说明 Zn 处于 +2 价, 对应 ZnO。Zn2p 处的峰较尖锐, 在 1021.02 eV 处, 和金属状态的 Zn 中 Zn2p 的结合能(1021.1 eV)较接近, 比 ZnO 中 Zn2p 的结合能(1021.75 eV)略小, 说明 AZO 中空纳米纤维中 Zn 以单质 Zn 和 ZnO 的形式共存。O1s 的主峰位在 531.6 eV 处, 主要来源于纤维表面吸附的 H<sub>2</sub>O (O1s 结合能为 533 eV) 和 OH (O1s 结合能为 531.5 eV), O1s 的肩峰在 530.28 eV 处, 接近于 Zn—O 和 Al—O 键中 O1s 的结合能(530.4 eV)。此外, Al2p 的峰处在 74.14 eV 处, 属于标准的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中 Al2p 结合能(73.72~74.7 eV)范围内, 说明 Al 以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的形式存在。综上所述, AZO 中空纳米纤维中, Zn 以 ZnO 和 Zn 共存的形式存在, Al 以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的形式存在, 这与 XRD 的测试结果相符。

### 2.3 热重分析

图 4 为 AZO 前驱体@PVA 纳米纤维膜的热失重曲线。从图中可以看出, 在 0℃ 到 100℃ 的区间内, AZO 前驱体@PVA 纳米纤维膜有轻微失重, 主要是前

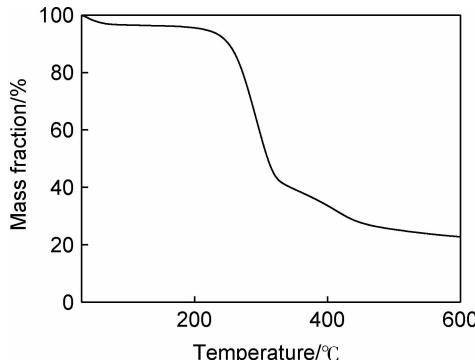


图 4 AZO 前驱体@PVA 纳米纤维膜热失重曲线

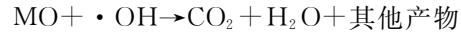
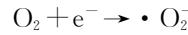
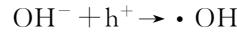
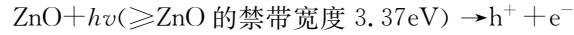
Fig. 4 TG curve of AZO precursor@PVA nanofibers

驱体内残留水分子的挥发。在 100℃ 到 250℃ 的区间内, AZO 前驱体的热稳定性良好, 质量基本保持不变。在 250℃ 到 300℃ 的区间内, 前驱体的质量快速减少, 失重约占总质量的 58%, 这主要是由于在温度升高至 300℃ 的过程中, PVA 分子链断裂, 逐渐分解为水、醋酸和巴豆醛等<sup>[14]</sup>。在 300℃ 到 450℃ 的区间内, 失重约占总质量的 18%, 复合纤维内的 PVA 彻底煅烧干净, 形成了 AZO 中空纳米纤维。450℃ 以后, 整体质量趋于稳定。综上所述, 将煅烧温度设定在 600℃, 可以在保证 PVA 分子去除完全的前提下, 又不会影响 AZO 的结构, 形成良好的中空纳米纤维。

### 2.4 对甲基橙的光催化降解性能

ZnO 在室温下的禁带宽度为 3.37 eV, 激子束缚能为 60 meV。其光催化降解机理和 TiO<sub>2</sub> 相似, 当 ZnO 受到光能( $h\nu$ )大于或等于其禁带宽度的光照射后, 价带上的电子( $e^-$ )就可以被激发跃迁到相应的导带, 在价带上产生空穴( $h^+$ ), 从而形成电子-空穴对。然后光生电子和空穴发生有效分离, 分别转移到 ZnO 表面, 水中的 OH<sup>-</sup> 和空穴( $h^+$ )作用产生高活性的  $\cdot\text{OH}$  自由基, 水中的 O<sub>2</sub> 和电子作用形成超氧负离子  $\cdot\text{O}_2^-$ 。 $\cdot\text{OH}$  和  $\cdot\text{O}_2^-$  都具有强氧化性, 可将甲基橙(MO)氧化分解为水、二氧化碳等产物, 其原理图如图 5 (a) 所示。

主要化学反应如下:



纳米尺寸的 ZnO 一方面可明显减小电子和空穴移到 ZnO 表面的时间。另一方面, ZnO 的粒径越小, 比表面积就越大, 增加了与甲基橙的接触面积, 从而提高了 ZnO 光催化降解的速度<sup>[15]</sup>。

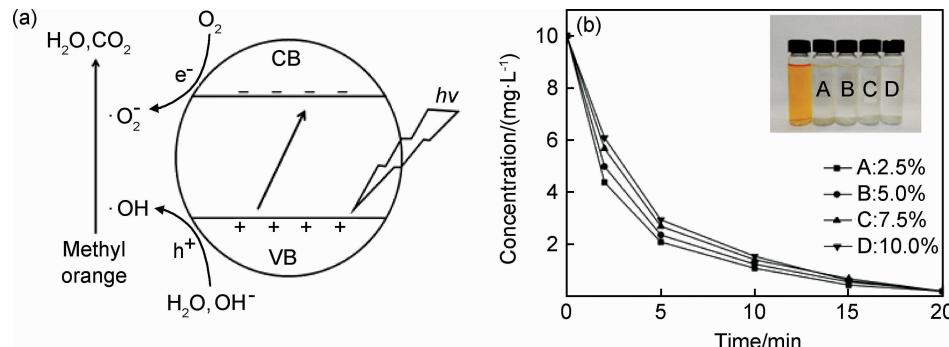


图 5 AZO 的光催化图 (a) 光催化原理图; (b) 光催化降解 MO 的浓度曲线

Fig. 5 Photocatalytic images of AZO

(a) photocatalytic mechanism; (b) concentration curves of MO under photodegradation

图5(b)为AZO中空纳米纤维对甲基橙水溶液的光催化降解浓度曲线(其中A,B,C,D依次代表使用 $\text{Al}^{3+}/\text{Zn}^{2+}$ 掺杂比为2.5%,5.0%,7.5%,10.0%的AZO中空纳米纤维)。首先,在5个瓶内加入10mL浓度为10mg/L的甲基橙溶液。然后,再在A,B,C,D4个瓶中分别加入10mg所制得的掺杂比为2.5%,5.0%,7.5%,10.0%原子比的AZO中空纳米纤维。将所有瓶子置于太阳光下照射,并分别于2,5,10,15,20min后用紫外分光光度计测定甲基橙浓度。从图中可以看出,掺杂比为2.5%的中空纳米纤维AZO的降解速度最快,并且,整体降解速度随着掺杂比的增加呈下降趋势。这是因为当Al的掺杂量增加时,掺杂的Al会成为电子和离子空位,使催化速度略有下降。但照射20min后,所有瓶中甲基橙的降解效果趋于一致,甲基橙基本降解完毕(图中右上角为5个瓶子在阳光下照射20min后的效果图,可见A,B,C,D4个瓶子中的甲基橙溶液都已经变成无色透明状)。

将上述降解完的A,B,C,D4个瓶子中的溶液取出(留下AZO中空纳米纤维),再重新加入10mL质量分数为10mg/L的甲基橙溶液,重复实验,进行多次降解。图6为AZO中空纳米纤维对甲基橙水溶液重复光催化降解10次的浓度曲线。可以看出,A,B,C,D4个瓶子中的溶液颜色逐渐变淡,掺杂比为10%的AZO中空纳米纤维(D瓶)的催化降解效果最好。随着降解次数的增加,掺杂比低的AZO中空纳米纤维降解效率和速度下降明显,而掺杂比较高的AZO中空纳米纤维降解效率和速度下降较少。这是因为Al可以作为光生电子和空穴的捕获陷阱,降低电子和空穴在ZnO内部的复合率,提高了ZnO的光催化效率,有效缓解ZnO的光腐蚀现象,延长ZnO的光催化寿命<sup>[16]</sup>。

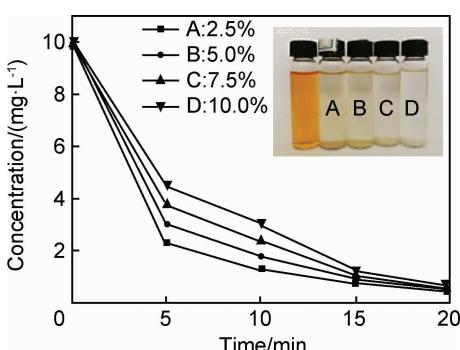


图6 AZO中空纳米纤维重复使用10次后对甲基橙的光催化降解

Fig. 6 Photocatalytic degradation rate of MO after using AZO hollow nanofibers for 10 cycles

### 3 结论

(1)静电纺PVA纳米纤维膜在包覆比( $\text{Zn}^{2+}/\text{PVA}$ )为8%,一定的掺杂比( $\text{Al}^{3+}/\text{Zn}^{2+}$ ),以及pH值为8的条件下通过水热合成法得到的AZO前驱体@PVA,再经过高温煅烧所制得的AZO中空纳米纤维具有良好的中空纳米纤维形态和优良的光催化性能。

(2)掺杂比为2.5%时,短期光催化降解速度最快,掺杂比为10%时,重复利用效果较好,可用于多次降解甲基橙。同时AZO中空纳米纤维原料来源丰富,绿色环保,在染料降解、废水处理方面具有良好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 胡明江.  $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$ 复合纳米纤维光催化降解醛酮类污染物的研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1):215-221.  
HU M J. Preparation of  $\text{CeO}_2\text{-TiO}_2$  composite nanofibers for photocatalytic degradation of aldehyde and ketone[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1):215-221.
- [2] SHEN Y, WANG W X, XIAO K J. Synthesis of three-dimensional carbon felt supported  $\text{TiO}_2$  monoliths for photocatalytic degradation of methyl orange [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(1):1259-1266.
- [3] TRABELSI H, ATHEBA G P, HENTATI O, et al. Solar photocatalytic decolorization and degradation of methyl orange using supported  $\text{TiO}_2$ [J]. Journal of Advanced Oxidation Technologies, 2016, 19(1):79-84.
- [4] HE Z, QUE W, CHEN J, et al. Photocatalytic degradation of methyl orange over nitrogen-fluorine codoped  $\text{TiO}_2$  nanobelts prepared by solvothermal synthesis[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(12): 6816-6826.
- [5] 王韬,刘泽玲.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GO}$ 复合材料对甲基橙的吸附性能[J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(4):28-33.  
WANG T, LIU Z L. Adsorption properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GO}$  composite for methyl orange [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2016, 35(4):28-33.
- [6] TRIPATHY N, AHMAD R, KUK H, et al. Rapid methyl orange degradation using porous ZnO spheres photocatalyst [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2016, 161: 312-317.
- [7] 芦佳,王辉虎,董一帆,等. RGO/ZnO纳米棒复合材料的合成及光催化性能[J]. 材料工程, 2016, 44(12):48-53.  
LU J, WANG H H, DONG Y F, et al. Synthesis and photocatalytic performance of RGO/ZnO nanorod composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(12):48-53.
- [8] LEE S, BANG S, PARK J, et al. AZO/Au/AZO multilayer as a transparent conductive electrode[J]. Physica Status Solidi, 2012, 209(4): 698-701.
- [9] PAN L, MUHAMMAD T, MA L, et al. MOF-derived C-doped ZnO prepared via a two-step calcination for efficient photocatalysis[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 189:181-191.

- [10] SHI R X, YANG P, SONG X L, et al. ZnO flower: self-assembly growth from nanosheets with exposed {11bar00} facet, white emission, and enhanced photocatalysis[J]. Applied Surface Science, 2016, 366:506-513.
- [11] 傅天华, 高倩倩, 刘斐, 等. Fe-Ni 共掺杂 ZnO 的制备及其光催化降解甲基橙活性[J]. 催化学报, 2010, 31(7): 797-802.
- FU T H, GAO Q Q, LIU F, et al. Preparation of (Fe, Ni)-co-doped ZnO and its photocatalytic activity for degradation of methyl orange[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2010, 31(7): 797-802.
- [12] AL-GHAMDI A A, AL-HARTOMY O A, EI O M, et al. Semiconducting properties of Al doped ZnO thin films[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2014, 131: 512-517.
- [13] TAGHIZADEH M T, YEGANEH N, REZAEI M. The investigation of thermal decomposition pathway and products of poly(vinyl alcohol) by TG-FTIR[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(25):42117.
- [14] 陈沾, 朱雷, 汪恂. 氧化锌纳米材料的制备及其光催化性能[J]. 环境工程学报, 2016, 10 (8): 4104-4108.
- CHEN Z, ZHU L, WANG X. Preparation and photocatalytic properties of ZnO nanomaterial[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8): 4104-4108.
- [15] 王元有, 龚爱琴, 余文华. ZnO/BiOI 微球的合成及其光催化性能(英文)[J]. 无机化学学报, 2017, 33(3):509-518.
- WANG Y Y, GONG A Q, YU W H. Synthesis and photocatalytic characterization of ZnO microsphere[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2017, 33(3):509-518.
- [16] HTWE Z M, ZHANG Y D, YAO C B, et al. Ultrafast carrier dynamics and third order nonlinear optical properties of aluminum doped zinc oxide (AZO) thin films[J]. Optical Materials, 2017, 66:580-588.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(21504033);国家重点研发计划子课题(2016YFB0302901-3);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSR51723B);江苏省高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2011]-118)

**收稿日期:**2017-07-16; **修订日期:**2017-11-15

**通讯作者:**高强(1983—),男,副教授,博士,主要研究方向为功能纤维的制备与开发,联系地址:江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道 1800 号江南大学纺织服装学院(214122),E-mail:qianggao83@gmail.com

(本文责编:高磊)