

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.04.007

α -Bi₂O₃ 纳米纤维的制备及其光催化性能研究

杨帆, 姚秉华, 张亭

(西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用静电纺丝法制备了 α -Bi₂O₃ 纳米纤维, 并研究了煅烧温度对其形貌和光催化活性的影响。利用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、紫外可见漫反射光谱(UV-vis DRS)、热重-差热分析(TG-DTA)和 N₂ 吸附-脱附等温线(BET)等技术对样品进行了表征。以罗丹明 B(RhB)和四环素(Tc)为降解模型, 评价了 Bi₂O₃ 纳米纤维材料的光催化性能。结果表明, 前驱体复合纤维 PVP/Bi(NO₃)₃ 在空气氛围下经 450 °C、500 °C 和 550 °C 煅烧处理后, 其产物 Bi₂O₃ 的晶型均为单斜相 α -Bi₂O₃。随着煅烧温度的升高, Bi₂O₃ 的形貌由直径较细的纤维(~100 nm)逐渐变粗(~150 nm), 最后断裂成球状颗粒。发现经 450 °C 煅烧温度处理得到的 α -Bi₂O₃ 纤维具有最佳的可见光催化活性, 在氙灯(150 W)照射下, 180 min, 对 RhB 和 Tc 的降解率分别达到 98.1% 和 94.5%。

关键词: 静电纺丝; 三氧化二铋; 纳米纤维; 光催化; 抗生素

中图分类号: O643

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)04-0422-06

Preparation and photocatalytic property of α -Bi₂O₃ nanofibers

YANG Fan, YAO Binghua, ZHANG Ting

(School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an 740048, China)

Abstract: α -Bi₂O₃ nanofibers were prepared by electrospinning, and with the effects of the calcination temperature on morphology and photocatalytic activity of the α -Bi₂O₃ nanofibers studied. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric differential-thermal analysis (TG-DTA), ultraviolet-visible diffuse reflection spectrum (UV-vis DRS) and N₂ adsorption-desorption isotherm (BET), respectively. The photocatalytic properties of the prepared samples were evaluated by photocatalytic degradation of Rhodamine B (RhB) and tetracycline (Tc), which were used as the degradation models. The results showed that the crystal structure of Bi₂O₃ samples was all monoclinic phase α -Bi₂O₃ after calcining the composite of fiber precursor PVP/Bi(NO₃)₃ at 450 °C, 500 °C and 550 °C in air atmosphere. In addition, the morphology of Bi₂O₃ samples was gradually changed from small diameter fiber (~100 nm) to crude (~150 nm), and finally broken into spherical particles at 550 °C with the increase of calcination temperature. It was also found that the Bi₂O₃ nanofiber obtained at 450 °C exhibits the excellent visible-light photocatalytic activity for the degradation of RhB and Tc with the degradation rates of 98.1% and 94.5% within 180 min under Xe lamp (150 W) irradiation.

Key words: electrospinning; Bi₂O₃; nanofiber; photocatalysis; antibiotic

一维纳米材料以其优异的磁^[1]、电^[2]、光^[3]性能以及广泛的应用如传感器^[4]、电池^[5]、功能材料^[6]等而备受关注。同时由于其比表面积大、电子-空穴对的分离效率高等特点在光催化领域也有较多研究。

Bi₂O₃ 是一种先进的功能材料, 具有 α 、 β 、 γ 等多种晶体结构, 其带隙在 2.6~2.8 eV 之间, 属窄带隙半导体氧化物。研究表明, Bi₂O₃ 的形貌和结构对其性能有较大影响, 为获得性能优异的 Bi₂O₃ 粉体, 许

收稿日期: 2017-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21276208); 陕西省尾矿资源综合利用重点实验室(商洛学院)开放基金资助项目(2014SKY-WK003)

作者简介: 杨帆, 男, 硕士生, 研究方向为纳米光催化材料。E-mail: 1344837934@qq.com

通讯作者: 姚秉华, 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为纳米光催化材料。E-mail: bhyaoy@xaut.edu.cn

多学者在形貌控制方面进行了大量研究,如三维网^[7]、空心球^[8]、纳米片^[9]、纳米棒^[10]、纳米纤维^[11]等。其中,纳米纤维由于其比表面积大、表面能高和表面活性强等特点而备受人们关注。Park 等^[12]在 Bi-Al 共溅射膜上生长了铋纳米线,进而在低压氧化气氛下制得具有单晶结构的 Bi_2O_3 纳米纤维。Shen 等^[13]使用 $\text{Bi}(\text{S}_2\text{CNEt}_2)_3$ 前驱体,采用化学气相沉积法制得直径在 50~100 nm 之间、长度几十微米的 Bi_2O_3 纳米纤维。李跃军等^[14]以聚丙烯腈(PAN)和硝酸铋作为先驱体,采用溶胶-凝胶法与静电纺丝技术相结合的方法制备 Bi_2O_3 纳米纤维,发现纳米纤维的直径、晶型和光催化性能与烧结温度有关。在 500 °C 煅烧的产物为纯 β - Bi_2O_3 相(四方晶型),其光催化活性最好,在 50 W 高压汞灯下,120 min,罗丹明 B(RhB)脱色率达 95.1%,TOC 去除率为 48.7%。随着煅烧温度升高,产物 Bi_2O_3 由 β 相向 α 相(单斜晶型)转变,纤维直径变粗,光催化活性下降。Wang 等^[15]以 PAN 和硝酸铋为先驱体,用静电纺丝技术制备了 PAN/ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 先驱体纤维,探讨了不同煅烧温度下 Bi_2O_3 的晶型和光催化性能。研究发现在空气氛围 500 °C 煅烧时其产物为 β - Bi_2O_3 相纳米纤维,而在 550 °C 和 600 °C 煅烧时,除 β - Bi_2O_3 相外,还有少量 α - Bi_2O_3 相。在高压汞灯(50 W,主波长 313 nm)下,120 min,RhB 降解率分别为 93%(500 °C)、54%(550 °C)和 35%(600 °C), Bi_2O_3 纤维的光催化活性随热处理温度的升高而降低。虽然 Bi_2O_3 纳米纤维的制备方法较多,但大都集中在对 β - Bi_2O_3 相的性能研究,迄今采用静电纺丝技术并通过煅烧温度对 α - Bi_2O_3 形貌的控制及可见光催化活性的研究鲜有报道。本工作以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)以及硝酸铋为先驱体,采用静电纺丝技术制备了 PVP/ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 复合纤维,进而对所制备的样品在不同温度下进行高温处理,探讨了煅烧温度(450 °C~550 °C)对 α - Bi_2O_3 纳米材料形貌及可见光催化活性的影响,获得 α - Bi_2O_3 纳米纤维静电纺丝法制备的最佳条件,并以罗丹明 B(RhB)和四环素(Tc)为降解模型,对所制备的样品进行了光催化性能评价。

1 实验

1.1 试剂

硝酸铋($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, AR,天津科密欧化学试剂有限公司)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP K30, AR,天津市大茂化学试剂厂)、N,N-2-甲基甲酰胺(DMF, AR,天津市大茂化学试剂厂)、冰乙酸

(HAc, AR,天津市大茂化学试剂厂)、罗丹明 B(RhB, AR,国药集团化学试剂有限公司)、四环素(Tc, AR,广州白云山制药有限公司)。全部实验使用超纯去离子水。

1.2 Bi_2O_3 纳米纤维的制备

取 4.0 g PVP 溶于 10 mL DMF 中,磁力搅拌溶解,记为 A 溶液。另取 5.0 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 于 10 mL HAc 和 DMF 的混合液(V:V=1:1)中,磁力搅拌溶解,得溶液 B。在室温下按 1:1(体积比)比例将 A 液与 B 液混合,搅拌 2 h,得到淡黄色澄清透明纺丝先驱体溶液。其次,将先驱体溶液置于 20 mL 注射器中,以不锈钢针头为正极,以铝箔作为负极及收集器进行纺丝,纺丝距离为 12 cm,纺丝电压为 18 kV,纺丝速度为 0.24 mL/h。最后,将制得的 PVP/ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ 复合纳米纤维置于马弗炉中进行高温处理,升温速率为 1 °C/min。当温度分别升至 450 °C、500 °C、550 °C 时,保温 1 h,然后自然降温至室温,得黄色 Bi_2O_3 样品。

1.3 Bi_2O_3 纳米纤维的表征

采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜(日本电子株式会社)进行样品的表面形貌表征;采用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪(日本岛津公司)对样品的晶体结构进行分析,X 射线源为 Cu K α 线,扫描速率 10°/min,波长 $\lambda=0.154\ 05\ \text{nm}$,加速电压为 40 kV,电流为 30 mA,扫描范围 2θ 为 10°~80°;紫外可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)采用 TU-1901 型双光束紫外可见光分光光度计(北京普析通用仪器有限公司)检测;采用 DTG-60AH 型差热热重分析仪(日本岛津公司)对复合纤维的去模板过程进行了 TG-DTA 分析;采用 JW-BK122W 型静态氮吸附仪(北京精微高博仪器有限公司)测定样品比表面积及孔径分布。

1.4 Bi_2O_3 纳米纤维光催化性能评价

光催化实验在自制的光催化反应器中进行。光催化反应器由光源(氙灯,150 W),石英试管(长 22.0 cm,直径为 2.0 cm,距离光源 10.0 cm)、冷阱、通气管等构成。光催化反应时,将通气管插入石英管底部,通入空气以维持催化剂悬浮于降解液中。在石英反应管中加入被降解液 50 mL 和 0.050 g 光催化剂,在无光照下通气暗吸附 30 min 后,开启光源并开始计时,每隔一定时间取样、离心,随后取上层清液测定被降解物在最大吸收波长处的吸光度。根据 Lambert-Beer 定律,测定上清液中被降解物的浓度,以 c_t/c_0 的大小进行 α - Bi_2O_3 纳米纤维光催化剂的光催化性能评价,其中 c_0 为被降解物质的起始

质量浓度(mg/L), c_t 为反应 t 时间被降解物质的质量浓度(mg/L)。

2 结果与讨论

2.1 SEM 分析

图1为静电纺丝 PVP/Bi(NO₃)₃ 复合纳米纤维(前驱体纤维)以及不同煅烧温度下 Bi₂O₃ 样品的 SEM 照片。由图1(a)可知,前驱体纤维直径约为200 nm,并且长径比较大,表面光滑。热处理后纤维明显变短,且表面变得相对粗糙,这主要是因为热处理过程中支撑体发生氧化而被除去,导致体积缩小,同时氧化过程产生的气体会使纤维变得粗糙,会使纤维的比表面积增大,有利于光催化的进行。当煅烧温度在450 °C(图1(b))和500 °C(图1(c))时,纤维形貌明显且较为均匀,500 °C时的纤维(直径约150 nm)较450 °C时粗(直径约100 nm),550 °C时纤维断裂变成了相对光滑的球状颗粒。这是由于起初形成的 Bi₂O₃ 纳米小晶粒之间随着煅烧温度的升高不断融合,促使晶粒不断长大,导致纤维逐渐变粗,继续升高温度至550 °C时,出现纤维熔断,形成球状 Bi₂O₃ 颗粒。

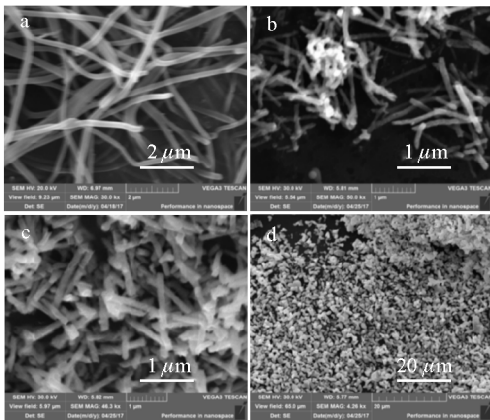


图1 前驱体纤维(a)及在450 °C(b)、500 °C(c)和550 °C(d)煅烧温度下所制 Bi₂O₃ 样品的 SEM 照片

Fig. 1 SEM images of the precursor nanofibers (a) and Bi₂O₃ samples calcined at 450 °C (b), 500 °C (c) and 550 °C (d)

2.2 XRD 分析

图2为不同煅烧温度下 Bi₂O₃ 样品的 XRD 图谱。由图可见,在450 °C、500 °C和550 °C煅烧温度下,在25.7°(002)、26.9°(111)、27.4°(120)、28.0°(012)、33.0°(121)、33.2°(200)、35.0°(210)、37.6°(112)、46.3°(221)、52.4°(-322)、54.8°(-241)处有明显的特征衍射峰,峰形尖锐,与单斜晶型 α-Bi₂O₃ 标准卡片(JCPDS; No. 71-2274, $a=0.5849$, $b=0.8166$, $c=0.7510$)中的峰位相吻合,表明所制备的 Bi₂O₃ 属单斜晶型的 α-Bi₂O₃。图中没有其他

杂峰,说明所制样品 α-Bi₂O₃ 纯度高,不含其他氧化物或盐的杂质,这与文献^[14-15]研究结果有所不同,由此说明, Bi₂O₃ 纳米材料的相结构不仅与煅烧温度有关,而且与前驱体组成也有很大关系。同时发现经过煅烧处理后的 Bi₂O₃ 纳米纤维是由无数小晶粒组成,根据 Scherrer 公式:

$$D = \frac{K \cdot \gamma}{B \cdot \cos \theta}$$

式中: B 为实测样品衍射峰的半高宽; K 为 Scherrer 常数,取 $K=0.89$; D 为晶粒垂直于晶面方向的平均厚度(nm); θ 为衍射角; γ 为 X 射线波长。计算得到样品晶粒分别为51.2 nm(450 °C)、52.5 nm(500 °C)和56.9 nm(550 °C)。随着煅烧温度的升高,晶粒逐渐变大,这可能是因为随着温度的升高,样品的结晶度提高,小晶粒因熔点低而逐渐融合长大,最后形成较大晶粒。这与 SEM 的测试结果相一致。

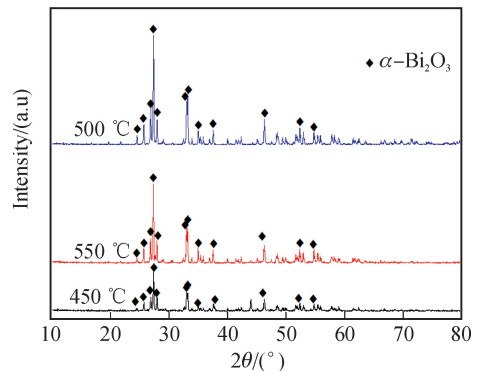


图2 不同煅烧温度 Bi₂O₃ 样品的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the Bi₂O₃ samples calcined at different temperatures

2.3 TG-DTA 分析

图3为前驱体纤维的 TG-DTA 曲线图。

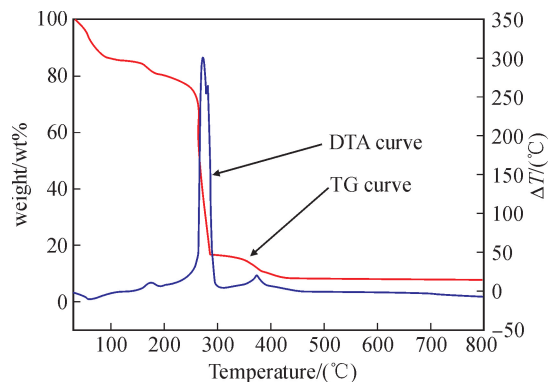


图3 前驱体纤维的 TG-DTA 曲线

Fig. 3 TG-DTA curves of the precursor nanofibers

由图3可以看出,样品的失重可分为四个阶段。第一阶段在30 °C~15 °C之间,失重约15.0%,由DTA曲线可以看出该阶段是一个吸热过程,主要是失去结合水或羟基脱水和溶剂的挥发;第二阶段在

150 °C~24 °C之间,失重约 5.0%,主要是残留 DMF 的去除(DMF 沸点:153 °C)以及有机物的初步氧化,对应于一个小的放热峰;第三阶段失重在 240 °C~350 °C之间,失重约 62.0%,主要是 PVP 的热分解失重,对应于一个很大的放热峰;第四阶段失重在 350 °C~450 °C之间,失重约 9.0%,主要是 Bi(OH)₃ 脱水分解生成 Bi₂O₃,理论失重为 9.2%,与实验结果基本吻合。375 °C的放热峰可能是无定型 Bi₂O₃ 向单斜晶型 Bi₂O₃ 转变时的热效应。

2.4 UV-vis DRS 分析

图 4 为不同煅烧温度下 Bi₂O₃ 样品的 UV-vis DRS 图谱。由图 4(a)可知,Bi₂O₃ 样品在紫外区和可见区都有较为明显的吸收,在本实验煅烧温度范围内,其吸收边界没有明显差别。图 4(b)是根据 Tauc 法则得到的 $(ah\nu)^2-h\nu$ 关系曲线,其中 $h\nu$ 是入射光子的能量, α 是样品的吸收系数。由此求得不同煅烧温度下 α -Bi₂O₃ 样品的禁带宽度分别为:2.72 eV (450 °C)、2.73 eV (500 °C)、2.78 eV (550 °C),与文献报道 α -Bi₂O₃ 的禁带宽度 2.85 eV^[20] 相比,减小了约 0.1 eV。三个样品的谱图趋势一致且比较靠近,这说明煅烧温度对样品的禁带宽度影响不明显。

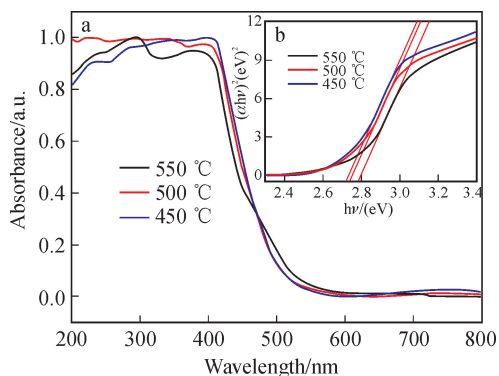


图 4 不同煅烧温度下 Bi₂O₃ 样品的 UV-vis 漫反射光谱图(a)及 $(ah\nu)^2-h\nu$ 曲线(b)

Fig. 4 UV-vis DRS of the Bi₂O₃ samples calcined at different temperatures (a) and the insert as the plots of $(ah\nu)^2$ vs $h\nu$ (b)

2.5 BET 分析

图 5 为 450 °C 和 550 °C 煅烧温度下 Bi₂O₃ 样品的 N₂ 吸附-脱附等温线(a)以及对应的孔径分布图(b)。从图 5 中可以看出,样品的 N₂ 吸附-脱附等温线相似,且都为 IV 类 H3 型滞后环,这说明样品具有介孔结构。煅烧温度为 450 °C 的样品比表面积为 16.901 cm²/g,平均孔径为 7.022 nm;煅烧温度为 550 °C 样品比表面积为 14.058 cm²/g,平均孔径为 4.708 nm。显然,随着煅烧温度的升高,样品的比表面积以及孔径均有明显的下降。这是因为煅烧温度升高有利于样品的晶粒长大,以提高结晶度,导致

样品的一些孔出现塌陷,从而孔径变小。这与样品的 XRD、SEM 分析结果相一致。

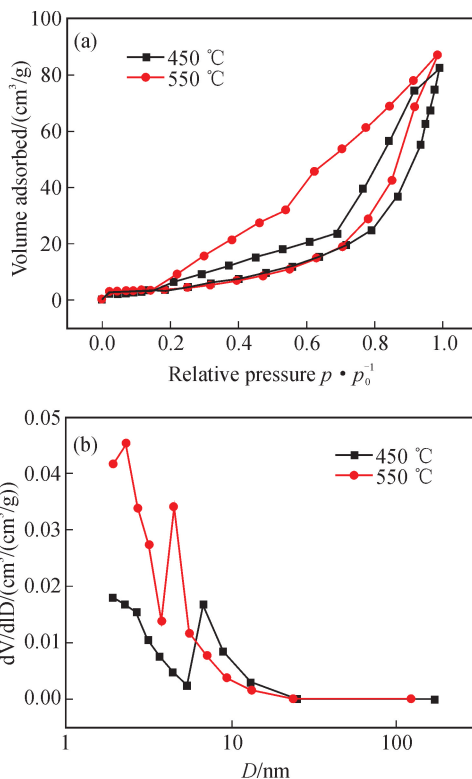


图 5 Bi₂O₃ 样品的吸(脱)附曲线(a)和孔径分布图(b)
Fig. 5 N₂ adsorption-desorption isotherm curves (a) and pore size distribution curves (b) of the Bi₂O₃ samples

2.6 光催化性能评价

以 RhB 和 Tc 的降解为模型反应,研究了 Bi₂O₃ 样品的光催化性能。图 6(a)和 7(a)分别为煅烧温度对催化剂降解性能的影响对比图。由图 6 (a)可以看出,30 min 的暗吸附几乎相同,说明不同煅烧温度下的三种催化剂 α -Bi₂O₃ 对 RhB 的吸附性能相差不大;随着煅烧温度增加,Bi₂O₃ 样品的光催化降解性能在下降,450 °C 煅烧的 α -Bi₂O₃ 样品的光催化性能最好,光照 180 min,RhB 的降解率为 98.1%。根据图 6(a)数据绘制 $\ln c_0/c_t \sim t$ 曲线,发现 $\ln c_0/c_t$ 与 t 并非直线,说明 α -Bi₂O₃ 催化剂对 RhB 的光催化降解不服从一级动力学规律,而服从多项式降解规律: $\ln c_0/c_t = -0.00160t^4 + 4.67 \times 10^{-4}t^3 - 5.11 \times 10^{-6}t^2 + 2.44 \times 10^{-8}t$ ($R^2=0.9999$, 450 °C), $\ln c_0/c_t = -4.10 \times 10^{-4}t^2 + 2.28 \times 10^{-4}t$ ($R^2=0.9979$, 500 °C) 和 $\ln c_0/c_t = 3.80 \times 10^{-3}t^2 + 2.79 \times 10^{-5}t$ ($R^2=0.9991$, 550 °C)。

图 6(b)是 450 °C 煅烧的 α -Bi₂O₃ 样品的光催化降解 RhB 的紫外可见吸收曲线。由此可以发现,经 180 min 降解后,RhB 的主要吸收峰几乎为零,说明 RhB 完全被光催化降解矿化。

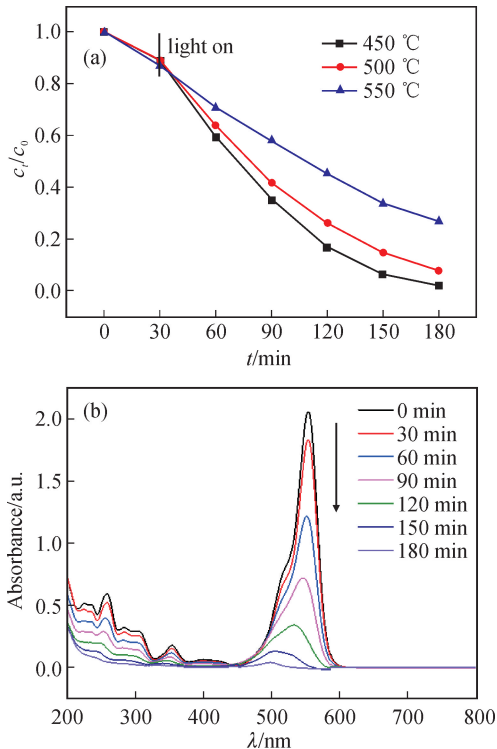


图6 煅烧温度对光催化降解 RhB 的影响(a) 以及 RhB 的吸光度变化曲线(b)

Fig. 6 Effects of calcined temperatures on photocatalytic degradation of RhB (a) and UV-vis absorbance of RhB solution at different degradation times (b)

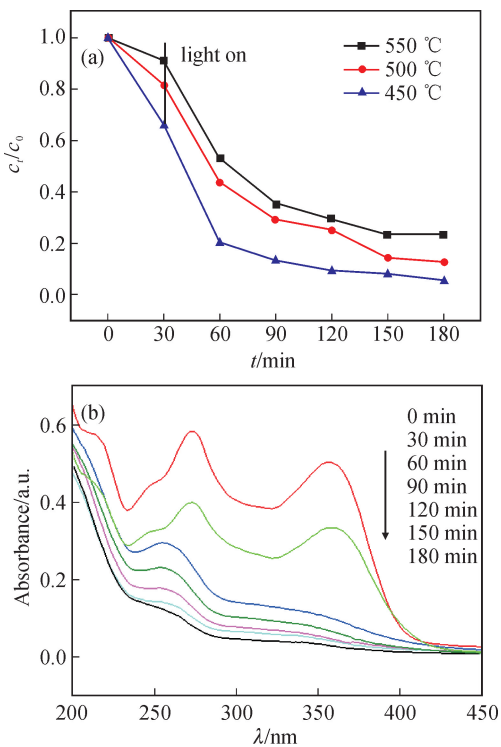


图7 煅烧温度对光催化降解 Tc 的影响(a) 以及 Tc 的吸光度变化曲线(b)

Fig. 7 Effects of calcined temperatures on the photocatalytic degradation of Tc (a) and UV-vis absorbance of Tc solution at different degradation times (b)

由图 7(a)可以看出,三种催化剂对 Tc 均有不同的吸附性能,450 °C 煅烧后的样品表现出较好的吸附性和光催化降解性能,光照 180 min, TC 的降解率为 94.5%。

根据图 7(a)数据绘制 $\ln c_0/c_t \sim t$ 曲线,发现 $\ln c_0/c_t$ 与 t 呈良好的线性直线,说明 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 催化剂对 TC 的光催化降解服从一级动力学规律,求得不同温度下光催化降解 TC 的反应速率常数 k 分别为 $1.80 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (450 °C)、 $1.22 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ (500 °C)和 $9.30 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ (550 °C)。

图 7(b)是 450 °C 煅烧的 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 样品的光催化降解 Tc 的紫外可见吸收曲线,由此可以看出,经 180 min 光催化降解后,目标降解物 Tc 的两个主要吸收峰的吸光度接近零,说明所制备的催化剂 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 纳米纤维具有优异的可见光催化性能,用于降解抗生素也是可行的。

3 结论

建立了一种新的静电纺丝法制备纯单斜相 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 纳米纤维的方法,具有热处理温度低,晶型好、无杂相等优点。结果表明:以 PVP/Bi(NO₃)₃ 复合纳米纤维为前驱体纤维,在 450 °C 到 550 °C 范围内,所得产物均为 $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 相纳米材料,随着煅烧温度的升高,Bi₂O₃ 纳米材料的结晶度提高,纤维逐渐变粗,最后熔断变为球状颗粒;Bi₂O₃ 纳米材料的比表面积和平均孔径也随煅烧温度的升高而逐渐减小;当煅烧温度为 450 °C 时, $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 纳米纤维的光催化活性最高,在氙灯照射下,180 min,RhB 和 Tc 的降解率分别达到 98.1%和 94.5%,前者服从多项式降解规律,而后者服从一级动力学降解规律。

参考文献:

- [1] THEJASWINI T V L, PRABHAKARAN D, AKHILA MAHESWARI M. Ultrasound assisted synthesis of nano-rod embedded petal designed $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ nanoparticles and their ultra-responsive visible light induced photocatalytic properties [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2017, 335: 217-229.
- [2] TAMILVANAN S, GURUMOORTHY G, THIRUMARAN S, et al. Synthesis, characterization, cytotoxicity and antimicrobial studies on Bi(III) dithiocarbamate complexes containing furfuryl group and their use for the preparation of Bi₂O₃ nanoparticles [J]. Polyhedron, 2017, 121: 70-79.
- [3] OUDGHIRI-HASSANI H, RAKASSA S, WADAANI F T A. Synthesis, characterization and photocatalytic activity of $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ nanoparticles [J]. Journal of Taibah

- University for Science, 2015, 9(4): 508-512.
- [4] HUANG Yongchao, FAN Wenjie, LONG Bei, et al. Visible light $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ photocatalyst for effective degradation of organic pollutions [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 185: 68-76.
- [5] WEI L, ZHAO T S, ZENG L, et al. Highly catalytic and stabilized titanium nitride nanowire array-decorated graphite felt electrodes for all vanadium redox flow Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2017, 341: 318-326.
- [6] LI Zhen, ZHANG Wei, TAN Yueyue, et al. Three-dimensionally ordered macroporous β - Bi_2O_3 with enhanced electrochemical performance in a Liion battery [J]. Electrochimica Acta, 2016, 214: 103-109.
- [7] 马占营, 姚秉华, 何仰清, 等. 网状结构 Bi_2O_3 光催化剂的合成及其光催化性能 [J]. 功能材料, 2013, 44(4): 507-516.
- MA Zhanying, YAO Binghua, HE Yangqing, et al. Synthesis and photocatalytic activity of reticular Bi_2O_3 photocatalysts [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(4): 507-516.
- [8] YAN Yunhui, ZHOU Zhaoxian, CHENG Yun, et al. Template-free fabrication of α - and β - Bi_2O_3 hollow spheres and their visible light photocatalytic activity for water purification [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 605: 102-108.
- [9] KARNAN T, SAMUEL S. An novel bio-mimetic approach for the fabrication of Bi_2O_3 nanoflakes from rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel extract and their photocatalytic activity [J]. Ceramics International, 2016, 42(4): 4779-4787.
- [10] SOOD S, Umar A, MEHTA S K, et al. α - Bi_2O_3 nanorods: An efficient sunlight active photocatalyst for degradation of Rhodamine B and 2, 4, 6-trichlorophenol [J]. Ceramics International, 2015, 41(34): 3355-3364.
- [11] PEI C C, LEUNG W W F. Photocatalytic oxidation of nitrogen monoxide and o-xylene by $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ nanofibers: Optimization, kinetic modeling and mechanisms [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2015, 174-175: 515-525.
- [12] PARK Y W, JUNG H J, YOON S G. Bi_2O_3 nanowire growth from high-density Bi nanowires grown at a low temperature using aluminum-bismuth co-deposited films [J]. Sensors and Actuators B, 2011, 156(2): 709-714.
- [13] SHEN Xiaoping, WU Shikui, ZHAO Hui, et al. Synthesis of single-crystalline Bi_2O_3 nanowires by atmospheric pressure chemical vapor deposition approach [J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2007, 39(1): 133-136.
- [14] 李跃军, 曹铁平, 张健. Bi_2O_3 纳米纤维的制备、表征及光催化性能 [J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 598-601.
- LI Yuejun, CAO Tieping, ZHANG Jian. Synthesis characterization and photocatalysis of the Bi_2O_3 nanofibers [J]. Journal of Hebei Normal University (Natural science edition), 2011, 35(6): 589-601.
- [15] WANG Changhua, SHAO Changlu, WANG Lianjia, et al. Electrospinning preparation, characterization and photocatalytic properties of Bi_2O_3 nanofibers [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 333(1): 242-248.

(责任编辑 王绪迪)