

二氧化钛纳米纤维的制备和光催化性能研究

刘洋洋¹ 张学强² 楚润善³ 张潇允³ 张岩³

1. 青岛检验检疫技术发展有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 青岛耀杰时装有限公司, 山东 青岛 266299;

3. 苏州大学 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215000

摘要: 纳米二氧化钛(TiO_2)是目前使用最为广泛的纳米材料之一, 因具有良好的化学稳定性和耐腐蚀性, 受到诸多关注。 TiO_2 作为光催化材料, 具有效率高、产物绿色环保等优点。以钛酸四丁酯(TBT)为钛源、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为高聚物模板、冰醋酸为还原剂, 采用静电纺丝技术制备复合纳米纤维膜, 再经高温煅烧, 得到 TiO_2 纳米纤维材料。研究表明: TiO_2 纳米纤维材料具有较高的光催化效率和循环稳定性。其中, 由 TBT 质量分数为 16% 的纺丝液制备的 TiO_2 纳米纤维材料, 光催化效果最好, 光催化效率为 99%; 3 轮光催化降解试验后, TiO_2 纳米纤维材料的光催化效率保持在 85% 以上。研究结果可为静电纺丝技术制备一维纳米结构 TiO_2 光催化材料及其在印染废水处理等领域的应用, 提供参考。

关键词: 二氧化钛; 纳米纤维; 溶胶-凝胶法; 静电纺丝; 光催化; 降解率; 印染废水处理

中图分类号: TQ619.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)09-0010-10

Research on preparation and photocatalytic performance of TiO_2 nanofibers

Liu Yangyang¹, Zhang Xueqiang², Chu Runshan³, Zhang Xiaoyun³, Zhang Yan³

1. Qingdao Inspection and Quarantine Technology Development Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China;

2. Qingdao York Fashion Manufacture Co., Ltd., Qingdao 266299, Shandong, China;

3. College of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu, China

Abstract: Nano-titanium dioxide (TiO_2) is one of the most widely used nanomaterials at present. It has attracted much attention because of its good chemical stability and corrosion resistance. TiO_2 , as a photocatalytic material, has the advantages of high efficiency and environmental protection. Using tetrabutyl titanate (TBT) as the titanium source, polyvinylpyrrolidone (PVP) as the polymer template, and glacial acetic acid as the reducing agent, composite nanofiber membranes were prepared via electrospinning technology. Subsequently, TiO_2 nanofiber materials were obtained through high-temperature calcination. The research results showed that the TiO_2 nanofiber materials exhibited high photocatalytic efficiency and cyclic stability. Specifically, the TiO_2 nanofiber material prepared from a spinning solution with a TBT mass fraction of 16% showed the best photocatalytic effect, with a photocatalytic efficiency of 99%. After three rounds of photocatalytic degradation experiments, the photocatalytic efficiency of the TiO_2 nanofiber material remained above 85%. The

收稿日期: 2025-04-29

作者简介: 刘洋洋, 女, 1985 年生, 工程师, 主要从事功能性纺织材料的研究工作

通信作者: 张学强, 主要从事功能性纺织材料的研究工作, robertzhang1985@126.com

research results can provide reference for the preparation of one-dimensional nanostructured TiO_2 photocatalytic materials using electrospinning technology and their application in the treatment of printing and dyeing wastewater.

Keywords: titanium dioxide; nanofiber; sol-gel method; electrospinning; photocatalysis; degradation rate; dyeing wastewater treatment

纳米二氧化钛 (TiO_2) 作为一种新型无机功能材料,凭借优异的光催化性能、较高的氧化还原电位、廉价无毒的特性,以及良好的化学稳定性与热稳定性等,成为当前备受关注的一种环保型光催化材料。以纳米 TiO_2 为代表的光催化技术,在空气净化、水体油污控制、杀菌消毒等领域的应用日益广泛^[1-9]。光催化降解污染物是处理水体或溶剂污染的一种有效方法。以纺织印染行业为例,光催化技术可利用太阳能产生的强氧化性活性物质,将印染废水中的有机染料氧化降解为无毒小分子。该技术在印染废水处理方面优势独特且经济环保^[10-13]。

近年,具有一维纳米结构的 TiO_2 光催化剂的制备及其光催化性能备受研究关注。静电纺丝技术在一维纳米结构材料制备方面具有传统方法无可比拟的优势^[14-15]。通过静电纺丝技术制备 TiO_2 纳米纤维材料主要分两步:第一步,利用聚合物模板静电纺丝,获得前驱体杂化纳米纤维膜;第二步,高温烧结杂化纳米纤维膜,去除有机聚合物组分和溶剂,得到 TiO_2 纳米纤维材料。王立艳等^[16]以钛酸四丁酯 (TBT) 为钛源、聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 为高聚物模板,先采用静电纺丝技术制备复合纳米纤维膜,再经 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧得到锐钛矿型 TiO_2 纳米纤维材料。且研究发现,紫外线照射后,制备的 TiO_2 纳米纤维材料表现出优异的光催化活性。紫外线照射 30 min 时, TiO_2 纳米纤维材料对罗丹明 B 的降解率达到 64%;紫外线照射 150 min 时, TiO_2 纳米纤维材料对罗丹明 B 的降解率接近 94%。王清清等^[17]采用静电纺丝技术及溶胶-凝胶法制备聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)/ TiO_2 、PMMA/蒙脱土/ TiO_2 复合纳米纤维膜。且经光催化降解亚甲基蓝试验发现,蒙脱土的加入提高了材料对亚甲基蓝的吸附率,还保护了纤维表面的 TiO_2 凝胶膜。吉强等^[18]以光接枝丙烯酸的废弃棉纤维素为模板、TBT 为前驱体、无水乙醇为溶剂,经磷酸二氢铵处理后,通过表面溶胶-凝胶法和火焰燃烧法,制备出具有纤维形貌的锐钛矿型

TiO_2 和炭的复合光催化材料。并发现,该材料用于降解活性艳蓝溶液时,紫外线照射 15 min 后活性艳蓝溶液的降解率达 90% 以上。Aboamera 等^[19]利用静电纺丝技术制备氧化石墨烯@ TiO_2 /纤维素复合纳米纤维,并将其应用于靛蓝胭脂红和亚甲基蓝溶液的降解,发现经 40 W 紫外线(波长 320~400 nm)照射 150~250 min 后,溶液降解率达 98% 以上。

本研究首先以 TBT 为钛源、PVP 为高聚物模板、冰醋酸为还原剂,利用溶胶-凝胶法和静电纺丝技术制备复合纳米纤维膜,再经高温煅烧得到 TiO_2 纳米纤维样品;然后,以亚甲基蓝为目标降解物、 TiO_2 纳米纤维样品为光催化剂,利用紫外线进行光催化降解试验;最后,基于亚甲基蓝的降解率评价 TiO_2 纳米纤维材料的光催化效果。研究结果以期静电纺丝技术制备一维纳米结构 TiO_2 光催化材料及其在印染废水处理等领域的应用,提供参考。

1 试验部分

1.1 试验材料

无水乙醇, PVP, 冰醋酸, TBT, 亚甲基蓝。

1.2 纺丝液的配制

取 10 mL 无水乙醇倒入烧杯中,再加入 1.3 g PVP,于室温下磁力搅拌直到 PVP 完全溶解,制得溶胶 1。再取 3 mL 无水乙醇放入另外的烧杯中,加入 3 mL 冰醋酸,再分别加入 0.317、0.662、1.038、1.494、1.903 g 的 TBT,于室温下磁力搅拌制得溶胶 2。用胶头滴管将溶胶 2 逐滴加入溶胶 1 中,于室温下磁力搅拌,直至得到具有一定黏度且呈淡黄色的纺丝液(其 TBT 质量分数依次为 8%、10%、12%、14%、16%)。

1.3 TiO_2 纳米纤维样品的制备

取 5 支规格为 10 mL 的注射器分别抽取上述纺丝液,抽取过程中确保无气泡产生。随后将注射器安装于静电纺丝设备中。在滚筒收集装置表面铺设

油纸用于收集纤维,控制喷丝头与滚筒收集装置表面的距离为 15 cm、纺丝液挤出速度为 1 mL/h、滚筒收集装置转速为 100 r/min。将喷丝头与高压发生器连接,启动控制设备,推进装置将纺丝液均匀输送至喷丝头。调节电压至 15 kV,此时纺丝液在不锈钢针头处形成稳定的泰勒锥。继续升高电压,当电场力突破表面张力临界值时,电场力将泰勒锥顶点处的溶液拉伸成射流并最终沉积于油纸表面,待溶剂挥发后即获得静电纺复合纳米纤维膜。整个静电纺过程在室温及相对湿度为 33% 的环境中进行。

最后,将所得复合纳米纤维膜置于坩埚内,放入管式炉中,空气气氛下以 3 °C/min 的速率升温至 500、600、700 和 800 °C,保温 2.0 h 后自然冷却至室温,即得 TiO₂ 纳米纤维样品。

1.4 光催化降解试验

光催化降解试验在紫外线(254 nm, 20 W)照射条件下进行,以 TiO₂ 纳米纤维为催化剂、亚甲基蓝为降解液。首先,配制 5×10⁻⁴ g/L 的亚甲基蓝水溶液,并稀释至 1×10⁻⁵ g/L 备用。取 100 mg TiO₂ 纳米纤维加入盛有 50 mL 的 1×10⁻⁵ g/L 亚甲基蓝溶液的烧杯中,放入转子后用保鲜膜封口,置于磁力搅拌器上并保持以 300 r/min 的速度搅拌。黑暗条件下反应 30 min 后对亚甲基蓝水溶液取样;随后开启紫外灯对烧杯进行 3.0 h 的照射,每 30 min 取样 1 次。每次取样后,将取出的液体在 8 000 r/min 的转速下离心 15 min(底部 TiO₂ 纳米纤维保留备用,上部溶液用于吸光度测试)。1 轮光催化降解试验结束后,对烧杯中剩余的液体进行离心分离,并将得到的 TiO₂ 纳米纤维以及每次取样后离心得到的 TiO₂ 纳米纤维一起置于乙醇水溶液(无水乙醇与水的体积比为 1:1)中,静置至溶液中无蓝色,再离心烘干,得到的 TiO₂ 纳米纤维用于下一轮光催化降解试验,共进行 3 轮。每次光催化降解试验结束后,将离心得到的 TiO₂ 纳米纤维依次用乙醇、水洗涤并烘干。

最后,根据式(1)计算亚甲基蓝溶液的降解率:

$$\eta = [(A_i - A_0)/A_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为亚甲基蓝溶液的降解率,%; A_0 和 A_i 分别为初始时刻和 t 时刻亚甲基蓝的吸光度。

1.5 表征方法与仪器

采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD,德国

布鲁克公司)测试 TiO₂ 纳米纤维样品的物相和质构特性;采用 S4800 型扫描电子显微镜(SEM,日本 Hitachi 公司)测试 TiO₂ 纳米纤维样品的微观结构;使用 X 射线衍射光电子能谱仪(XPS,美国 Thermo Fisher Scientific 公司)测试 TiO₂ 纳米纤维样品的表面特性、化学组成,并分析其价带位置;使用比表面积与孔隙度分析仪(BET,美国 Micromeritics 公司)对 TiO₂ 纳米纤维样品的比表面积和孔隙度进行分析,测试气氛为氮气;使用紫外-可见光分光光度计(DRS,德国耶拿公司)测试亚甲基蓝水溶液的紫外-可见漫反射光谱,并以去离子水为参考,监测亚甲基蓝降解液吸光度随时间的变化,并计算亚甲基蓝溶液的降解率,用于界定 TiO₂ 纳米纤维样品的光催化效果。

2 结果与分析

2.1 XRD 图谱

图 1 为经不同煅烧温度处理后 TiO₂ 纳米纤维样品的 XRD 图谱,可以看出,煅烧温度为 500 °C 时,结晶为锐钛矿相 TiO₂ 结构;煅烧温度为 600 °C 时,出现了锐钛矿相 TiO₂ 的 3 个典型特征衍射峰,2 θ 分别为 25.37°、37.88° 和 48.12°,对应晶面指数分别为(101)、(004)和(200);煅烧温度为 700 °C 时,图谱中锐钛矿相的特征衍射峰变得尖锐,峰值强度减小,相应地,金红石相的特征衍射峰强度增大,但仍小于锐钛矿相特征衍射峰的强度,说明煅烧温度为 700 °C 时,TiO₂ 纳米纤维中存在锐钛矿相和金红石相的混晶结构,其中锐钛矿相为主相;煅烧温度为

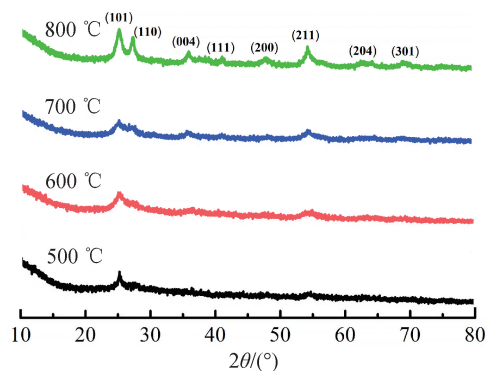


图 1 不同煅烧温度下纳米纤维膜的 XRD 衍射图
Fig. 1 XRD diffractograms of nanofiber membranes at different calcination temperatures

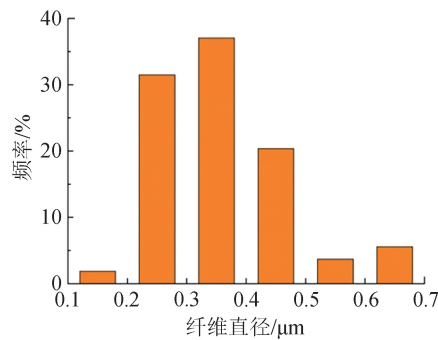
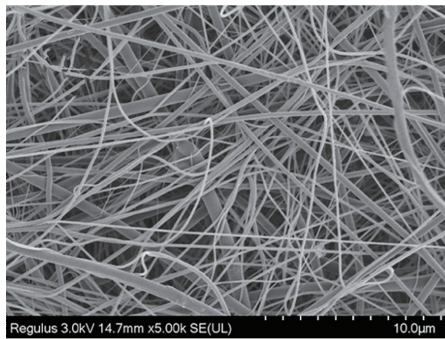
800 °C 时,图谱中 2θ 为 27.48° 处[晶面指数(110)]出现金红石相 TiO_2 的特征衍射峰,其较 700 °C 图谱中归属金红石相 TiO_2 的 2 个特征衍射峰(2θ 分别为 27.48° 和 36.13°),都愈加尖锐,峰强显著增强,表明产物已完全转变为金红石相 TiO_2 [20-21]。

由上述分析可知,随着煅烧温度的升高, TiO_2 的晶型会从锐钛矿相逐渐转向锐钛矿相和金红石相的混晶结构,到 800 °C 时会完全转化为金红石相。因此,本研究将煅烧温度控制在 600 °C,以保证样品充分煅烧且仅得到锐钛矿型的 TiO_2 纳米纤维。

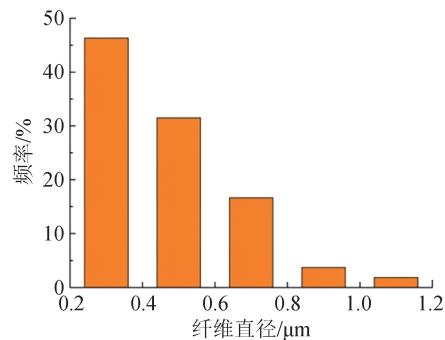
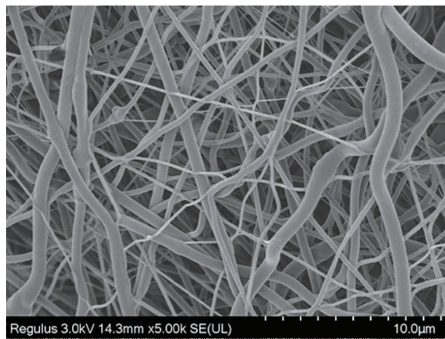
2.2 表观形貌

图 2 和图 3 为 600 °C 煅烧前后 TiO_2 纳米纤维样品的表观形貌和直径分布。由图 2 和图 3 可知,

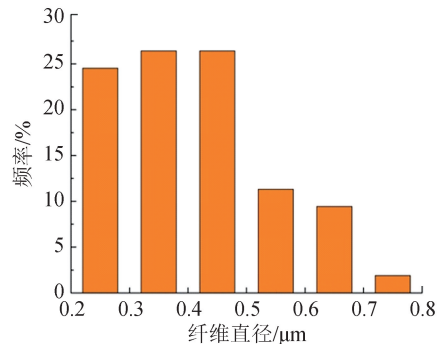
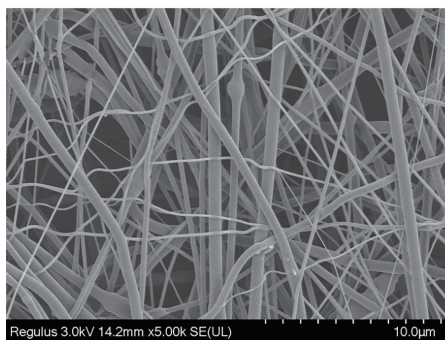
煅烧前后样品中纤维的排布、形貌和直径都有了明显的变化。未煅烧的 TiO_2 纳米纤维直径分布较宽且排布紧密,而经管式炉煅烧后的 TiO_2 纳米纤维,纤维直径分布相对均匀且变小,纤维表面产生了很多缝隙。这是煅烧过程中,复合纳米纤维中 PVP 有机成分与氧气反应生成的二氧化碳气体逃逸所产生的 [15]。与煅烧前相比,煅烧后纤维明显变得有些弯曲,且部分出现了断裂。这是因为,煅烧过程中,复合纳米纤维中 PVP 有机成分发生了分解,形成的 TiO_2 纳米粒子会发生聚集和重排。除此之外,纵向比较,随着 TBT 质量分数的增加,烧结后的纳米纤维直径逐渐变大,这主要与热处理过程中 PVP 产生了分解,以及无水乙醇及其他小分子挥发有关。



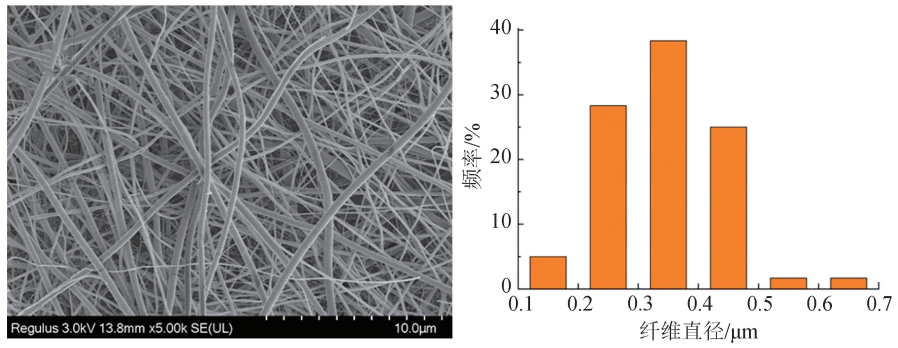
a) TBT质量分数8%



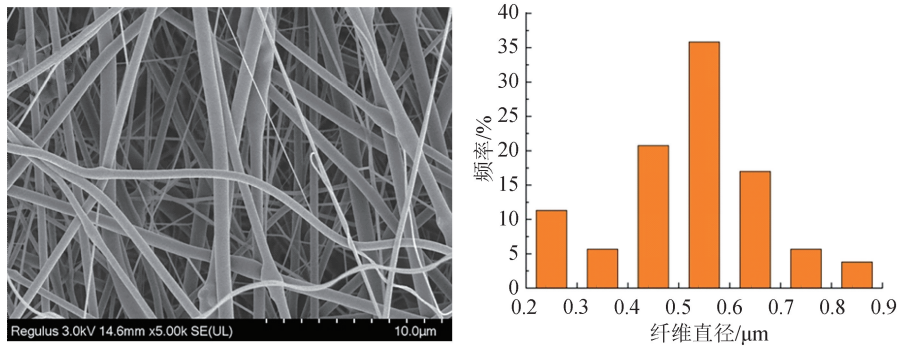
b) TBT质量分数10%



c) TBT质量分数12%



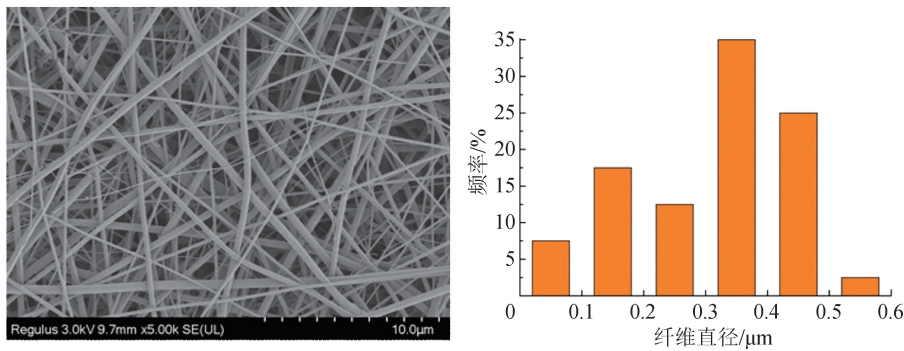
d) TBT质量分数14%



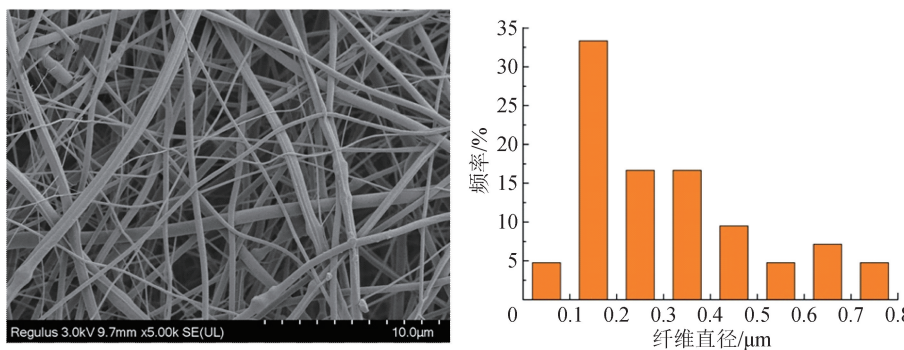
e) TBT质量分数16%

图2 煅烧前样品形貌与纤维直径分布

Fig. 2 Sample morphology and diameter distribution before calcination



a) TBT质量分数8%



b) TBT质量分数10%

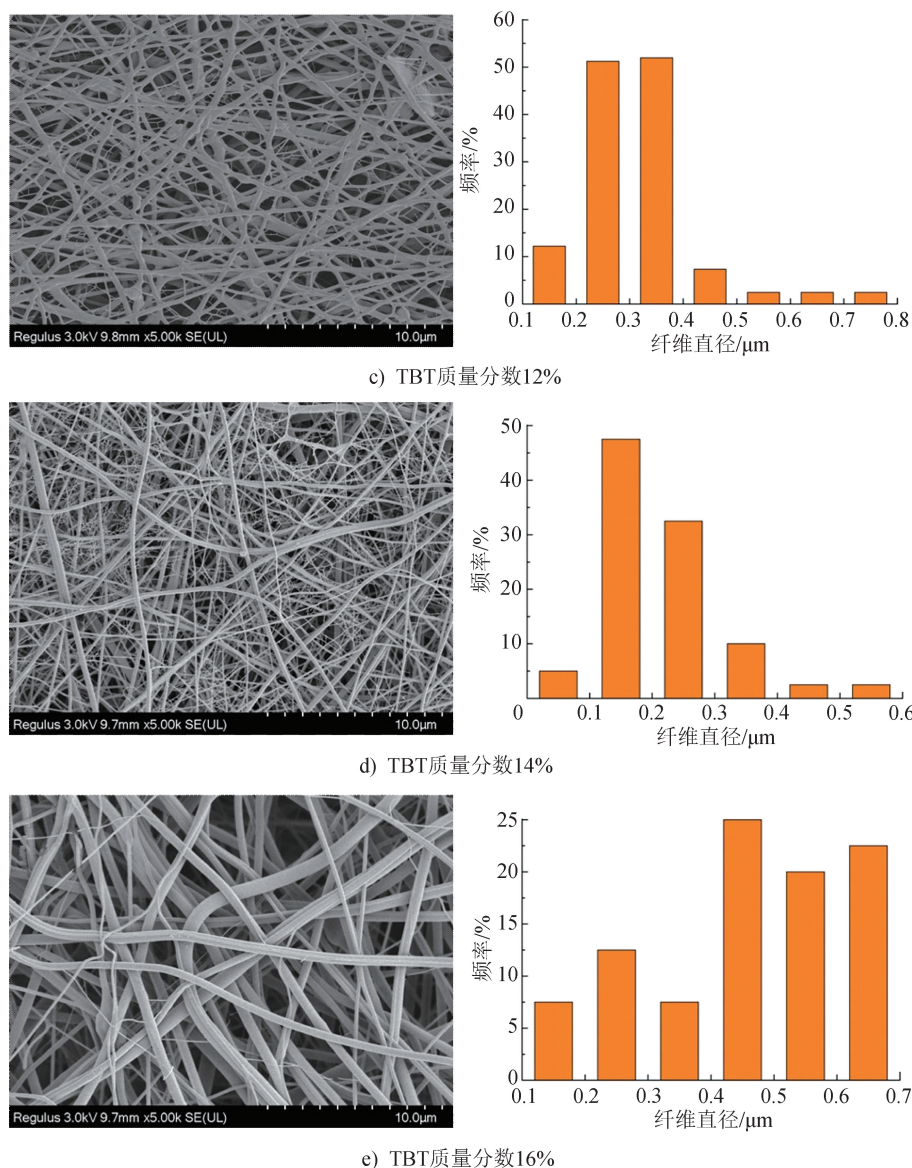


图 3 煅烧后样品形貌与纤维直径分布

Fig. 3 Sample morphology and diameter distribution after calcination

2.3 XPS 能谱

600 °C 煅烧后得到的 TiO₂ 纳米纤维样品的 XPS 全谱如图 4a) 所示:450 eV 附近出现了 Ti 元素的 2p 轨道特征峰,550 eV 附近出现了 O 元素的 1s 轨道特征峰。

图 4b)反映了 O 1s 轨道的结合能,可以看出 O 1s 谱可以拟合为 2 个峰:531.9 eV 处的电子能谱峰归属于 TiO₂ 晶格中的金属氧原子;529.8 eV 处的弱峰归属于 TiO₂ 表面的吸附态氧,具体涉及表面羟基、吸附水以及 C=O 基团,其中表面羟基是主要的存在形式。

图 4c)反映了 Ti 2p 轨道的结合能。由于存在

自旋-轨道耦合作用,Ti 2p 轨道发生了能级分裂,形成 2 个独立的自旋轨道分量,分别对应 Ti 2p_{1/2} 和 Ti 2p_{3/2} 态。图 4c)对图谱进行了分峰拟合,458.7 eV 处的特征峰归属于 Ti⁴⁺ 的 Ti 2p_{3/2} 轨道,464.5 eV 处的特征峰归属于 Ti⁴⁺ 的 Ti 2p_{1/2} 轨道。

经计算,TiO₂ 纳米纤维样品的 O 1s 轨道和 Ti 2p 轨道的结合能差值为 71.1 eV,可以得出,煅烧后产物的成分为 TiO₂,而不是含有 Ti 元素的其他化合物^[22-23]。

2.4 比表面积与孔隙度

根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)对

步的多分子层吸附。

2.5 TiO₂ 纳米纤维对亚甲基蓝溶液的光催化效率

TiO₂ 纳米纤维样品第 1 轮光催化降解亚甲基蓝溶液的光催化效率如图 7 所示。以 TiO₂ 纳米纤维样品在黑暗避光条件下吸附 0.5 h 为起始点,无光照条件下 TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝有一定的吸附作用,但并不明显。紫外线照射 0.5 h 后, TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝的降解效果明显提高;紫外线照射 3.0 h 后, TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝的光催化效率达到 90% 以上,其中 TBT 质量分数为 16% 的 TiO₂ 纳米纤维样品的光催化效果最好,光催化效率高达 99%。

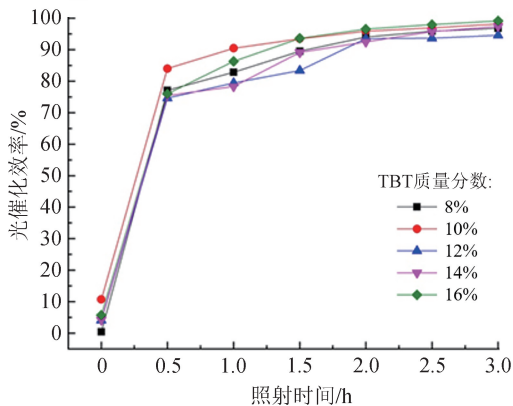


图 7 TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝的第 1 轮光催化降解作用

Fig. 7 The first round of photocatalytic degradation of methylene blue with TiO₂ nanofiber samples

TiO₂ 纳米纤维样品第 2 轮光催化降解亚甲基蓝的光催化效率如图 8 所示。同样以 TiO₂ 纳米纤维样品在黑暗避光条件下吸附 0.5 h 为起始点,此轮无光照条件下 TiO₂ 纳米纤维样品的初始吸附效率比第 1 轮高,普遍在 30% 左右。经紫外线照射 0.5 h 后, TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝的降解效果明显提高;紫外线照射 3.0 h 后, TBT 质量分数为 16% 的纺丝液制备的 TiO₂ 纳米纤维样品的光催化降解效果最好,光催化效率约为 91%,其次是 TBT 质量分数为 10% 的纺丝液制备的 TiO₂ 纳米纤维样品,光催化效率约为 88%。这可能是因为, TBT 质量分数在 10% 时,所得 TiO₂ 颗粒分布均匀且暴露在外的表面积较大,继续增加 TBT 质量分数,所得 TiO₂ 颗粒堆叠,导致暴露在外的表面积降低,直至 TBT 质量分数达到 16% 时,所得 TiO₂ 增多导致 TiO₂

纳米纤维样品具有更好的光催化效果,但此后继续增加 TBT 质量分数,纺丝溶液黏度过大,导致无法通过静电纺丝法制备复合纳米纤维材料。

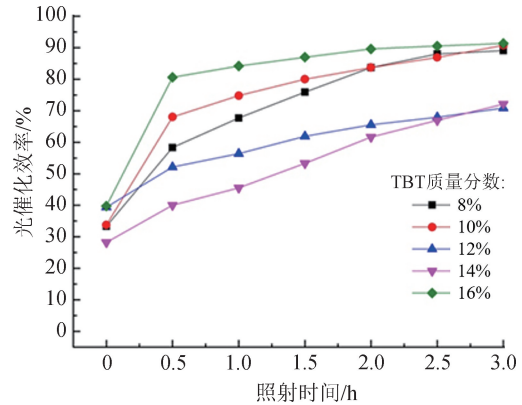


图 8 TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝的第 2 轮光催化降解作用

Fig. 8 The second round of photocatalytic degradation of methylene blue with TiO₂ nanofiber samples

TiO₂ 纳米纤维样品第 3 轮光催化降解亚甲基蓝的光催化效率如图 9 所示。同样以样品在黑暗避光条件下吸附 0.5 h 为起始点,此轮样品的初始吸附效率比第 2 轮还要高,普遍在 40% 左右。紫外线照射 0.5 h 后, TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝的降解效果也有明显提高;紫外线照射 3.0 h 后, TBT 质量分数为 16% 的纺丝液制备的 TiO₂ 纳米纤维样品的光催化效果最好,光催化效率约为 85%,其余样品的光催化效率均在 65% 左右。

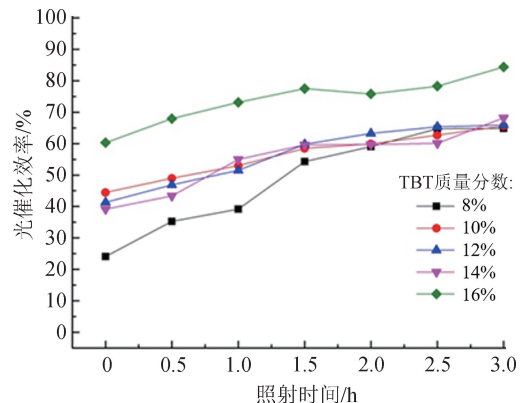


图 9 TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝的第 3 轮光催化降解作用

Fig. 9 The third round of photocatalytic degradation of methylene blue with TiO₂ nanofiber samples

为探究所得 TiO₂ 纳米纤维材料的可重复使用性,本研究使用 TiO₂ 纳米纤维样品对亚甲基蓝染料

进行了3轮光催化降解测试。图10为光催化效率(紫外线照射3.0 h)与光催化降解轮次之间的关系。总体来看,随着光催化降解轮次的增加,TiO₂纳米纤维样品的光催化效率呈下降趋势。经3轮次光催化降解试验后,TBT质量分数为16%的纺丝液制备的TiO₂纳米纤维样品的光催化效率仍高达85%,其他样品普遍在60%~70%。多轮次光催化降解过程中,亚甲基蓝溶液降解率的轻微降低可归因于离心过程中TiO₂纳米纤维样品质量的损失。上述研究结果表明,TiO₂纳米纤维材料具有良好的光催化效果,可循环使用。

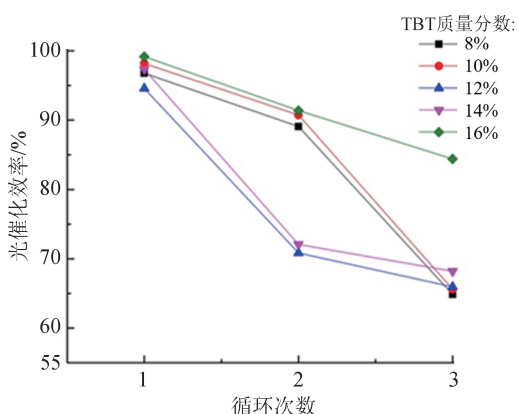


图10 3轮次光催化降解试验的光催化效率
Fig. 10 Photocatalytic efficiency of three rounds of photocatalytic degradation experiments

近年,将TiO₂材料应用于染料废水光催化降解的文献报道有很多,表1将本研究利用TBT质量分数为16%的纺丝液制备的TiO₂纳米纤维样品光催化降解亚甲基蓝的结果,与部分文献中提到的TiO₂样品进行了归纳比较。

表1 TiO₂对亚甲基蓝的光催化降解性能

Tab. 1 Photocatalytic degradation performance of TiO₂ on methylene blue

污染物	降解条件	光催化效率/%	文献
亚甲基蓝	紫外线, 20 W, 180 min	99.0	本文
亚甲基蓝	紫外线, 20 W, 120 min	97.0	[13]
亚甲基蓝	紫外线, 300 W, 60 min	99.5	[26]
亚甲基蓝	紫外线, 300 W, 80 min	89.0	[27]
亚甲基蓝	紫外线, 300 W, 75 min	91.2	[28]
亚甲基蓝	紫外线, 300 W, 15 min	89.4	[29]
亚甲基蓝	可见光, 60 min	96.7	[30]
亚甲基蓝	可见光, 60 min	57.0	[31]

3 结论

本研究以PVP和TBT为原料,利用溶胶-凝胶法和静电纺丝技术,经煅烧制得TiO₂纳米纤维样品。研究得出以下结论:

(1)将煅烧温度控制在600℃时,可保证复合纳米纤维膜得到充分煅烧,且仅得到锐钛矿型TiO₂纳米纤维材料。所得TiO₂纳米纤维样品的孔径集中分布在2~16 nm,属于介孔结构材料。

(2)所得TiO₂纳米纤维材料光催化性能良好,其在黑暗条件下的吸附效果远低于紫外线照射条件下的降解效果,第1轮紫外线照射3.0 h后TiO₂纳米纤维材料的光催化效率达到90%以上。3轮次光催化降解(紫外线照射3.0 h)后,TiO₂纳米纤维的光催化效率普遍在60%以上,其中TBT质量分数为16%的纺丝液制备的TiO₂纳米纤维样品的光催化效率高达85%。

参考文献

- [1] 刘琳, 陈宇刚. 纳米TiO₂/ACF空气净化复合材料的制备方法及其性能表征[J]. 产业用纺织品, 2019, 37(7): 6-11.
- [2] 周小桔, 胡正龙, 任一鸣, 等. Bi₂MoO₆修饰TiO₂复合纳米棒阵列光催化剂的制备及其光催化性能[J]. 纺织学报, 2022, 43(10): 97-105.
- [3] 施敏慧, 李冰蕊, 王挺, 等. 高含盐废水中TiO₂复合光催化剂光降解甲基橙机制及性能[J]. 纺织学报, 2021, 42(12): 103-110.
- [4] 吴海培, 高晓红, 方婧, 等. 二氧化钛/还原氧化石墨烯复合材料的制备及其光催化降解脱色性能[J]. 纺织学报, 2018, 39(12): 78-83.
- [5] 吴超杰. 静电纺丝方法制备无机纳米纤维及其性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- [6] KUBO W, TATSUMA T. Photocatalytic remote oxidation with various photocatalysts and enhancement of its activity[J]. Journal of Materials Chemistry, 2005, 15(30): 3104.
- [7] TOMER V, TEYE-MENSAH R, TOKASH J C, et al. Selective emitters for thermophotovoltaics: erbium-modified electrospun titania nanofibers[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, 85(4): 477-488.
- [8] 董刚, 朱忠其, 柳清菊. 镍掺杂TiO₂光催化剂的制备及光催化性能[J]. 功能材料, 2012, 43(3):

- 294-298.
- [9] ZHU P N, NAIR A S, YANG S Y, et al. Which is a superior material for scattering layer in dye-sensitized solar cells-electrospun rice grain-or nanofiber-shaped TiO₂? [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21 (33): 12210-12212.
- [10] 蒋文雯, 莫慧琳, 樊婷玥, 等. Ag₆Si₂O₇/TiO₂ 复合光催化剂的制备及其对亚甲基蓝的降解性能[J]. *纺织学报*, 2021, 42(4): 107-113.
- [11] 李红颖, 徐毅, 杨帆, 等. 三维乒乓菊状 CdS/BiOBr 催化剂的制备及其光催化降解罗丹明 B[J]. *纺织学报*, 2023, 44(9): 124-133.
- [12] 张苑苑. 柔性黑色二氧化钛纳米纤维材料的制备及室温改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- [13] 马梦楠, 杜鹃, 张家民, 等. 锐钛矿型 TiO₂ 纳米粒子的形态对其光催化性能的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(2): 15-23.
- [14] 李美杰, 陆军建. 静电纺丝法制备纳米二氧化钛纤维及其光降解有机物的性能研究[J]. *湖南人文科技学院学报*, 2015, 32(5): 140-144.
- [15] CHEN Y F, LEE C Y, YENG M Y, et al. Preparing titanium oxide with various morphologies [J]. *Materials Chemistry and Physics*. 2003, 81(1): 39-44.
- [16] 王立艳, 刘哲, 张晓佳, 等. 静电纺丝制备 TiO₂ 纳米纤维及光催化性能研究[J]. *吉林建筑大学学报*, 2019, 36(4): 37-40.
- [17] 王清清, 魏取福, 蔡以兵, 等. 复合纳米纤维膜的制备及光催化降解染料[J]. *纺织学报*, 2011, 32(9): 5-8.
- [18] 吉强, 王晓, 戚俊然, 等. 光接枝丙烯酸棉纤维素基 TiO₂/C 光催化剂的制备与光催化性[J]. *纺织学报*, 2017, 38(10): 75-80.
- [19] ABOAMERA N M, MOHAMED A, SALAMA A, et al. An effective removal of organic dyes using surface functionalized cellulose acetate/graphene oxide composite nanofibers [J]. *Cellulose*, 2018, 25(7): 4155-4166.
- [20] 李跃军, 曹铁平. 二氧化钛纳米纤维的制备及光催化性质研究[J]. *河北师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(2): 199-202.
- [21] 宋骏. 柔性 TiO₂ 基纳米纤维膜的构建及其光催化性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.
- [22] 宋健华. 二氧化钛纳米复合材料的制备及其光催化性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [23] 陈淑敏, 曹广连, 袁志勇, 等. XPS 研究共掺杂 TiO₂ 可见光光催化活性[J]. *广州化工*, 2012, 40(13): 115-117.
- [24] 胡金林, 杨其浩, 陈静, 等. 介孔二氧化钛功能纳米材料的合成与应用[J]. *化学进展*, 2013, 25(12): 2080-2092.
- [25] 黄忠宁. 介孔二氧化钛纳米材料的可控制备及改性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- [26] 陆瑶瑶, 叶俊涛, 阮承祥, 等. 二氧化钛/多孔碳纳米纤维复合材料的制备及其光催化性能[J]. *纺织学报*, 2024, 45(4): 67.
- [27] 杨纯, 李玥, 陈国峰, 等. 纳米介孔 TiO₂ 光催化剂对染料污水的去除研究[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(8): 210-214.
- [28] 钱怡帆, 周堂, 张礼颖, 等. 聚丙烯腈/醋酸纤维素/TiO₂ 复合纳米纤维膜的制备及其光催化降解性能[J]. *纺织学报*, 2020, 41(5): 8-14.
- [29] 焦阳, 许立婧, 杨林, 等. 二氧化钛介孔微球的纳米金修饰及其催化性能的影响[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(增刊1): 82-89.
- [30] SINGH K, HARISH S, ARCHANA J, et al. Investigation of Gd-doped mesoporous TiO₂ spheres for environmental remediation and energy applications [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 489: 883-892.
- [31] LV T P, ZHAO J H, CHEN M P, et al. Boosted visible-light photodegradation of methylene blue by V and co Co-doped TiO₂ [J]. *Materials*, 2018, 11(10): 1946.

(上接第 9 页)

- [14] NOURDINE A, GIBOZ J, LE BROUSTER R, et al. Tailored fluorinated oligo-polystyrene as efficient additive for the hydrophobicity/oleophobicity improvement of styrenic polymers [J]. *European Polymer Journal*, 2021, 159: 110712.
- [15] MA B M, WANG X L, HE Y, et al. Effect of poly(lactic acid) crystallization on its mechanical and heat resistance performances [J]. *Polymer*, 2021, 212: 123280.
- [16] 张剑锋. 熔喷聚乳酸空气净化材料的微观结构与驻极体性能和过滤性能相关性研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
- [17] 谢胜, 曾泳春. 电场分布对静电纺丝纤维直径的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(6): 677-682.
- [18] LIU Z, CHEN D R, NIU Q H, et al. Particle collection of electret media under different filtration pressures [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2023, 23(2): 220405.