

文章编号:2095—0411(2015)02-0045-06

活性炭纤维负载 Ag_3PO_4 光催化剂的可见光催化性能^{*}

马建锋,黄代琴,邹 静,陈毅忠,李定龙

(常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:用湿化学沉淀法将 Ag_3PO_4 沉积在活性炭纤维(ACF)上制备复合光催化剂 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$,采用 BET 比表面积法和扫描电子显微镜分析对样品进行表征,通过在可见光下降解橙 II 检测样品的光催化活性。结果表明, $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的光催化活性比纯 Ag_3PO_4 提高了 32%,主要是 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 具有更为精细的 Ag_3PO_4 晶体束,且分布更均匀,对污染物的吸附能力增强以及 Ag_3PO_4 与 ACF 有紧密的接触界面。 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 对橙 II 的降解率随着投加量的增大而提高,最佳投加量为 1 000mg/L。随着染料初始 pH 的增大, $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 对橙 II 的降解率逐渐下降,强酸环境较有利于降解染料废水。在 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 循环使用 4 次后,其对橙 II 的降解率由 99%下降到 59%。

关键词: Ag_3PO_4 ;活性炭纤维;光催化;橙 II

中图分类号: X 131.2

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.2095—0411.2015.02.010

Visible-Light Photocatalytic Activity of Ag_3PO_4 Dispersed on Activated Carbon Fiber

MA Jian-feng, HUANG Dai-qin, ZOU Jing, CHEN Yi-zhong, LI Ding-long

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ was obtained via the deposition Ag_3PO_4 on the activated carbon fiber by the wet chemical method. The prepared samples were characterized by Brunauer-Emmett-Teller method and scanning electron microscope (SEM). The photocatalytic activity of samples was evaluated by photocatalytic degradation of Orange II aqueous solutions under visible-light irradiation. The results show that the photocatalytic properties of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ was increased by 32% compared with the pure Ag_3PO_4 , due to the much smaller size and good dispersion of Ag_3PO_4 immobilizing on ACF, and a higher adsorption capability and a closely contacted interface for $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ composites. The decolorization rate of Orange II was increased with the increase of the dosage of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$. The optimum dosage was 1 000mg/L. The degradation rate of Orange II were decreased with the increasing of solution pH, which inferred that $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ was more suitable for processing Orange II under strongly acidic conditions. After four cycling run of the photodegradation, the catalytic degradation rate of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ decreased from 99% to 59%.

Key words: Ag_3PO_4 ; activated carbon fiber; photocatalysis; Orange II

^{*} 收稿日期:2014-11-24。

基金项目:产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(BY201304-16);江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201410292020Z)。

作者简介:马建锋(1976—),男,江苏南通人,博士,副教授,主要从事水污染控制工程研究。

自从 Yi 课题组^[1]报道 Ag_3PO_4 在可见光下光催化活性远高于目前所知的其他光催化剂以后, Ag_3PO_4 作为一种新型光催化剂得到了广泛的关注。 Ag_3PO_4 可以吸收波长小于 520nm 的可见光, 带隙大概为 2.45eV, 在可见光照射下能够获得 90% 的量子产率, 这比已经报道的其他可将光光催化剂都高^[2-3], 但其在光催化过程中易发生团聚, 且分离困难。而将 Ag_3PO_4 颗粒负载到具有吸附性能的多孔材料上可解决这个问题。活性炭纤维(ACF)是由特定形态的活性炭所构成的高微孔碳材料, 因而具有一些特殊的优势: 较好的吸附性能、较大的孔容积和均匀的孔结构分布^[4-5]。相比于传统的粉末活性炭或颗粒活性炭, ACF 拥有更好的吸附能力和更高的吸附-解吸速率, 因此 ACF 被广泛用作不同用途的催化剂载体^[6-10]。而且相比于颗粒载体, 当 ACF 以毡或板条状等形状存在时, 其特殊的形状更利于操作应用。本文用湿化学沉淀法将 Ag_3PO_4 沉积在活性炭纤维上制备复合光催化剂 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$, 并以橙 II 溶液为目标污染物研究其光催化性能, 这对染料废水的脱色和无害化处理具有重要意义。

1 实验部分

1.1 材料制备

称取 4gACF, 剪成小碎片, 用适量的超纯水洗涤数次, 并用少量超纯水浸泡。然后加入 4g 的 AgNO_3 固体颗粒配成 AgNO_3 溶液, 机械搅拌 3h 后, 直接加入一定量的 $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 溶液(按照公式 $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + 3\text{AgNO}_3 \rightarrow 3\text{NaNO}_3 + \text{Ag}_3\text{PO}_4 + 12\text{H}_2\text{O}$, 保证 AgNO_3 的加入量与 $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的加入量成比例, 使得反应能够生成 Ag_3PO_4), 将混合溶液搅拌 3h, 搅拌结束后老化 24h。将老化得到的固体用蒸馏水洗涤数次, 真空干燥, 磨碎, 装瓶备用, 记作 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 。纯 Ag_3PO_4 的制备方法与上述基本相同, 只是未添加 ACF。

$\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 物理混合物的制备: 取 1g 洗净的 ACF 小碎片加入适量的超纯水, 加入 0.82g 的 Ag_3PO_4 固体颗粒, 机械搅拌 3h 后离心分离, 真空干燥, 磨碎, 装瓶备用。

1.2 催化剂的表征

采用氮气吸附仪器(型号 Autosorb-1MP, 康塔仪器有限公司, 美国)来测定 BET 比表面积

(Brunauer-Emmett-Teller 理论), 采用 BJH(Barret-Joyner-Halenda)法研究孔径分布。通过扫描电子显微镜(SEM)(型号 S-4800, 日立, 日本)来检测样品的尺寸大小和形态。

1.3 光催化活性测试

以橙 II 为目标污染物, 评估样品催化剂的可见光催化活性。在烧杯中, 将一定量的样品加入到 500mL, 70mg/L 的橙 II 溶液中。体系在避光条件下磁力搅拌 1h, 反应体系达到固液吸附平衡后开启光源(500W 的金卤灯), 每隔一段时间取出一定量的反应溶液膜过滤后取其上清液, 用紫外分光光度计在 485nm 波长处测定橙 II 溶液的吸光度。橙 II 的去除率为 C/C_0 , 其中 C_0 、 C 分别为橙 II 降解前后的浓度。

2 结果与讨论

2.1 孔径结构分析

原始 ACF、 Ag_3PO_4 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的 BET 比表面积和总的孔容积如表 1 所示, 原始 ACF 的 BET 表面积为 $987.2\text{m}^2/\text{g}$, 孔容积为 $0.520\text{cm}^3/\text{g}$, 其高的表面积和特殊的结构使得 ACF 很好的可以作为 Ag_3PO_4 分散的载体。而 Ag_3PO_4 颗粒的存在阻塞了 ACF 的微孔结构, 因此 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的表面积相比于 ACF 有所降低, 从 987.2 降低到 $874.5\text{m}^2/\text{g}$, 而孔容积则从 $0.520\text{cm}^3/\text{g}$ 降低到 $0.488\text{cm}^3/\text{g}$, 且这种影响随着 Ag_3PO_4 颗粒量的增多越来越明显。对于纯的 Ag_3PO_4 颗粒而言, 不论是比表面积还是孔容积都很低, 因此其吸附量不会很大。

表 1 原始 ACF、 Ag_3PO_4 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 催化剂的微观结构
Table 1 Microstructure of original ACF, Ag_3PO_4 and $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ catalyst

样品名称	原始 ACF	Ag_3PO_4	$\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$
$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	987.2	1.6	874.5
总孔容积/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	0.520	0.002	0.488

原始 ACF 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的氮气吸附等温线如图 1 所示。从图 1 可以看出不论是 ACF 还是 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 催化剂, 其孔容积都是在较低的相对压强($P/P_0 < 0.1$)下被氮气填满的, 而在较高的相对压力下孔容积是基本保持恒定的, 这说明了 ACF 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 催化剂都是高微孔结构的物质。相比于原始的 ACF, $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的饱和吸附体积有所下降, 这说明 ACF 上的一些孔洞被

Ag₃PO₄ 颗粒覆盖,与表 1 得出的结论相吻合。

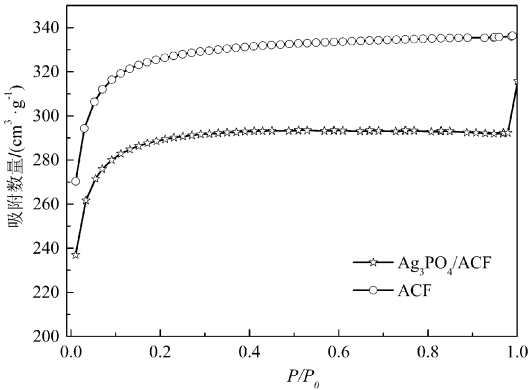


图 1 原始 ACF 和 Ag₃PO₄/ACF 的氮气吸附等温线
Fig.1 Nitrogen adsorption isotherms of original ACF and Ag₃PO₄/ACF

2.2 SEM 分析(形态分析)

图 2 的 SEM 图像分别显示了 ACF 和

Ag₃PO₄/ACF 的大小尺寸以及形态。从图 2(a)可以看出,活性炭纤维(ACF)的直径在 10~20mm,其外表面上有很多不间断的纵向沟槽。内表面则比较光滑,是由骨架结构支撑而成的孔洞形状(图 2(b)),该结构使得 ACF 具有较大的孔容积和孔径。从 Ag₃PO₄/ACF 的 SEM 图像(图 2(d))可以看出,Ag₃PO₄ 小颗粒已经基本均匀分散在 ACF 的外表面,不过 Ag₃PO₄ 颗粒有时也会形成团聚负载在 ACF 上。ACF 的内表面(图 2(c))也负载了一部分的 Ag₃PO₄ 颗粒。尽管 Ag₃PO₄ 颗粒大量的沉降在 ACF 的表面上,但是 Ag₃PO₄/ACF 体系仍然保持着与 ACF 相同的空间结构,因此光源可以穿透到光催化剂上。相比于粉末状的活性炭等,使用多孔材料作为 Ag₃PO₄ 的载体可以使进入催化剂中的光子最大化。

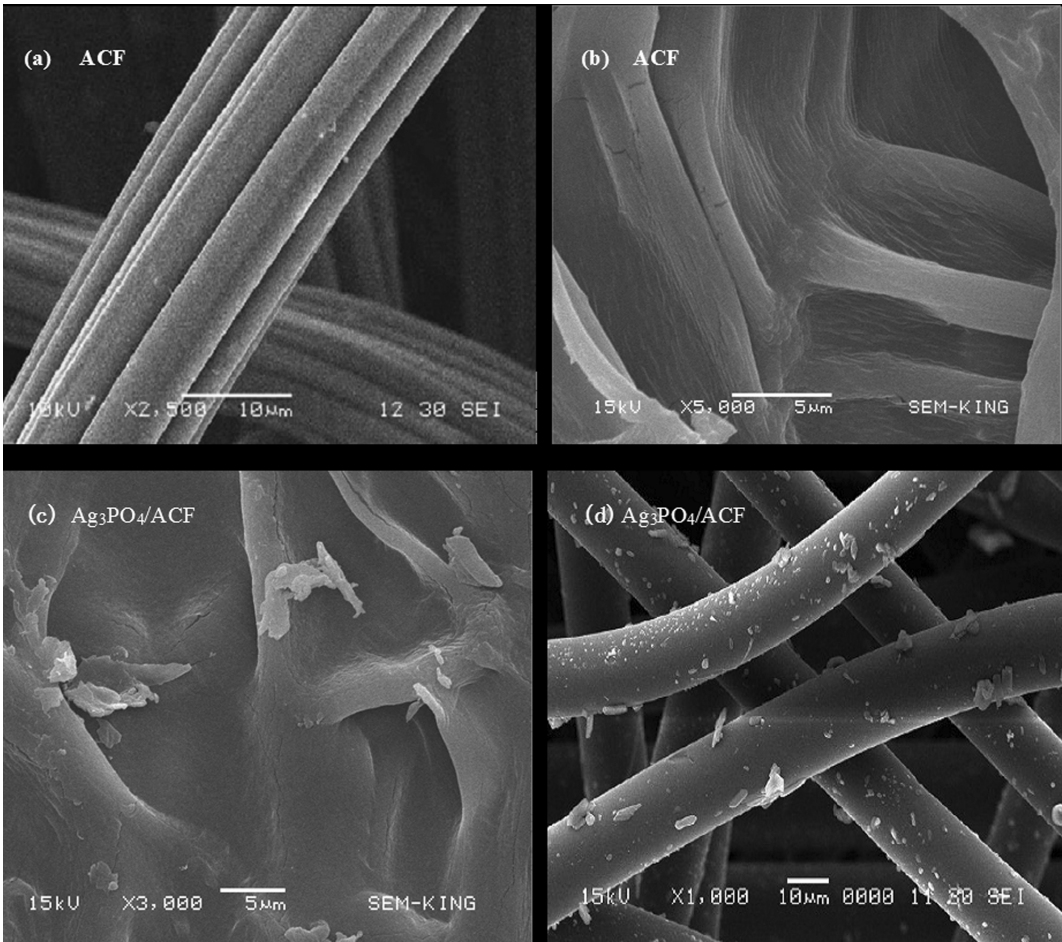


图 2 SEM 图像
Fig.2 SEM images

2.3 光催化剂的吸附性能测试

图 3 是黑暗条件下, Ag_3PO_4 、 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 物理混合物对染料橙 II 的吸附能力的实验结果。如图所示, 在黑暗条件下反应 60min 后, 纯 Ag_3PO_4 颗粒对橙 II 的吸附量几乎可以忽略不计。而 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 对橙 II 的吸附率却达到了 29%。说明 ACF 的加入大大提高了光催化剂的吸附性能。这与前面 Ag_3PO_4 和 ACF 的 BET 比表面积测试结果相一致。与 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 相比较, $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 物理混合物对染料橙 II 的吸附性能更好, 1h 后的吸附率达到了 40%。

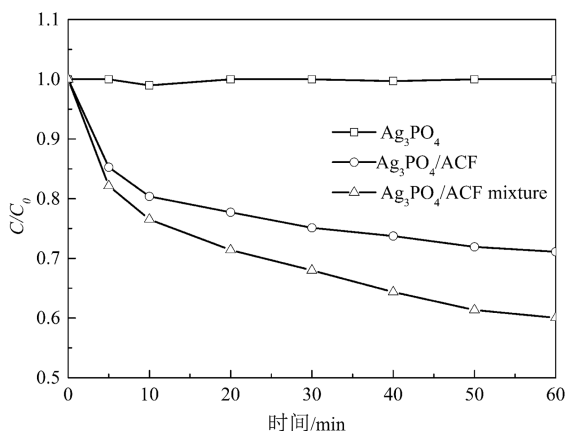


图 3 在黑暗条件下, Ag_3PO_4 、 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{AC}$ 混合物对橙 II 的吸附能力

Fig.3 The adsorption capabilities of Orange II on Ag_3PO_4 , $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ and $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ mixture in the dark

2.4 光催化剂的光催化活性测试

图 4 为 500mg ACF、 Ag_3PO_4 、 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 物理混合物在可见光下对橙 II 溶液降解情况。由图 4 可以看出, 除了 ACF, Ag_3PO_4 、 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 物理混合物在光照条件下都表现出较好的光催化性能, 暗示 Ag_3PO_4 作为光催化材料的潜能。原始的 ACF 材料对橙 II 降解效果较差, 反应 1h 后仅降解 20%。负载型 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 光催化剂表现出最佳的光催化活性, 在 30min 内其对橙 II 的降解率几乎达到 100%, 而在 60min 内纯的 Ag_3PO_4 颗粒和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 物理混合物对橙 II 的降解率分别只有 70% 和 88% 左右。虽然图 3 反映出 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 物理混合物的对橙 II 的吸附性能优于负载型 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$, 但图 4 表明其光催化活性却不如负载型 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 。由此可以看出, 负载型 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$

ACF 光催化活性提高的不仅是因为吸附能力的增强, 可能是 Ag_3PO_4 与 ACF 接触界面的差异。与 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 机械混合物松散的接触面相比, 负载型 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的接触界面更加紧密。

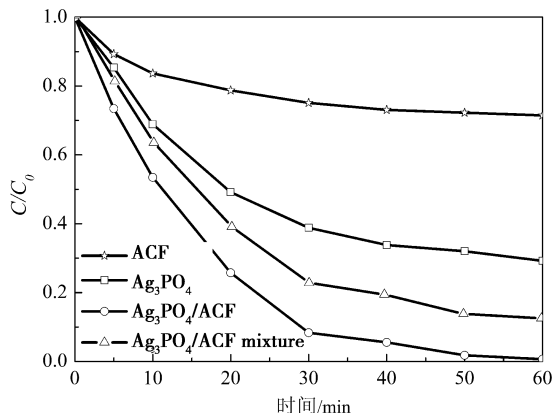


图 4 可见光照射下 ACF、 Ag_3PO_4 、 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 和 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{AC}$ 混合物对橙降解橙 II 的光催化活性

Fig.4 Photocatalytic activities of ACF, Ag_3PO_4 , $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ and $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ mixture for Orange II degradation under visible light irradiation

2.5 投加量对降解橙 II 的影响

催化剂 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的投加量分别是 200、400、600、800、1 000mg/L 和 1 200mg/L。 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的投加量对橙 II 降解的影响如图 5 所示, 从图中可看出, 随着 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 投加量的增大, 对橙 II 降解率的影响是越来越好, 但是当 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的投加量达到 1g/L 时, 染料降解速率开始变缓。催化剂投加量对于染料降解速率的影响如图 6 所示, 从图 6 可以看出, 当催化剂含量从 200mg/L 增加到 400mg/L 时, 橙 II 的脱色速率几乎呈线性增长, 说明这是一个典型的多相光催化过程^[11]; 从 400mg/L 增长到 1 000mg/L 时, 催化剂对橙 II 的降解速率趋势变缓; 当催化剂含量继续从 1 000 mg/L 增长到 1 200 mg/L 时, 催化剂对橙 II 的脱色几乎没有起到作用。综上所述, 图 5 和图 6 的结果基本吻合, 催化剂投加量的最佳值为 1 000mg/L。

2.6 初始 pH 降解橙 II 的影响

催化剂 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的投加量是 1 000mg/L, 溶液的初始 pH 分别为 2.12、6.55、9.68。不同 pH 对 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 降解橙 II 的影响如图 7 所示。催化剂 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 在各种 pH 条件对橙 II 的降解率都很高, 降解速率也很快。总体来说, 随着溶液 pH 的增大, 催化剂对橙 II 的降解率呈下降趋势。

当溶液的 pH=2.12 时,反应前 20min 催化剂对橙 II 几乎呈线性降解,20min 后对橙 II 的降解率达到 100%。溶液的 pH=6.55 时,对橙 II 的降解速率和降解率略微有所下降,反应前 25min 降解率也是呈线性下降的,第 25min 后降解速率有所下降,30min 后反应基本结束,对橙 II 的降解率达到 99%左右,溶液的 pH=9.68 时,其降解率和降解速率相比于酸性 pH 有较明显的下降。反应前 35min 催化剂始终保持着高降解速率,反应结束时对橙 II 的降解率几乎达到 100%。综上所述,催化剂 Ag₃PO₄/ACF 的催化活性是随着溶液初始 pH 的增大呈下降趋势,在所有 pH 条件下对橙 II 的降解效果都非常理想,相比于其他 pH,强酸性的环境更有利于催化剂 Ag₃PO₄/ACF 降解染料橙 II。

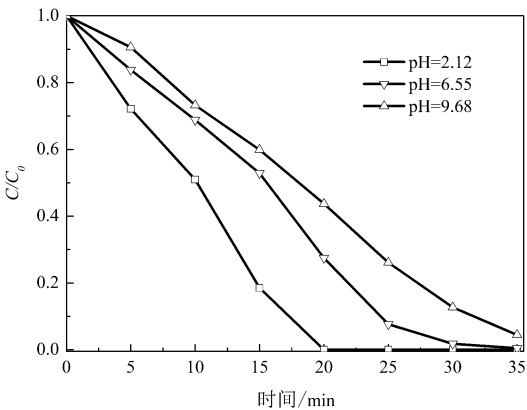


图 7 不同 pH 对 Ag₃PO₄/ACF 降解橙 II 的影响

Fig.7 Effect of pH values on the degradation of Orange II dyes by Ag₃PO₄/ACF

2.7 Ag₃PO₄/ACF 催化降解橙 II 稳定性

Ag₃PO₄/ACF 的稳定性与催化剂降解污染物时的效率密切相关。循环稳定性测试实验与第 1 次初始活性测试的实验步骤一样,只是不需要在黑暗中预先吸附,直接开灯计时,取样测定即可,实验结果见图 8。从图中可以清楚地看出,催化剂第 1 次重复使用时,60min 内对橙 II 的脱色率达到了 96%,新鲜催化剂在同样时间内对橙 II 的脱色率为 99%。催化剂第 2 次重复使用时,对橙 II 的光降解效率略微有所下降,60min 内橙 II 的降解率仅达到 82%。第 3 次循环实验时发现催化剂对于染料的脱色率有很明显的下降(约 23%),反应 60min 内的染料脱色率仅达到 59%。Ag₃PO₄/ACF 的光催化效率逐渐下降很可能是因为是在光催化过程中产生的激发电子将银还原(Ag⁺→Ag⁰)的缘故。

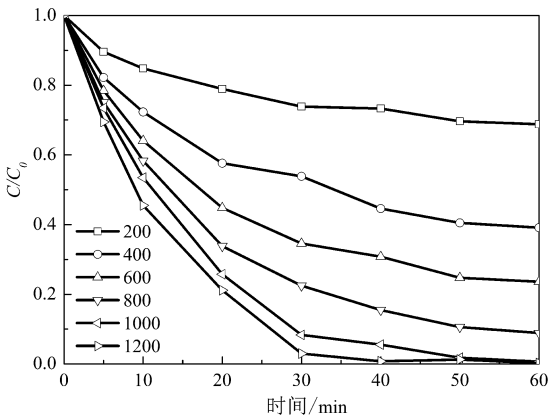


图 5 Ag₃PO₄/ACF 的投加量对橙 II 降解的影响

Fig.5 Effect of Ag₃PO₄/ACF amount on the degradation of Orange II

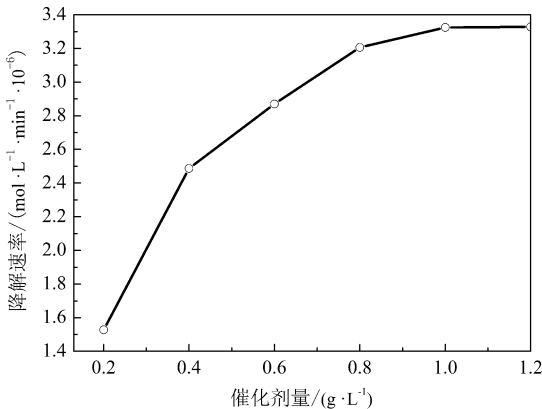


图 6 Ag₃PO₄/ACF 投加量对染料橙 II 脱色速率的影响

Fig.5 Effect of Ag₃PO₄/ACF amount on the decolorization rate of Orange II

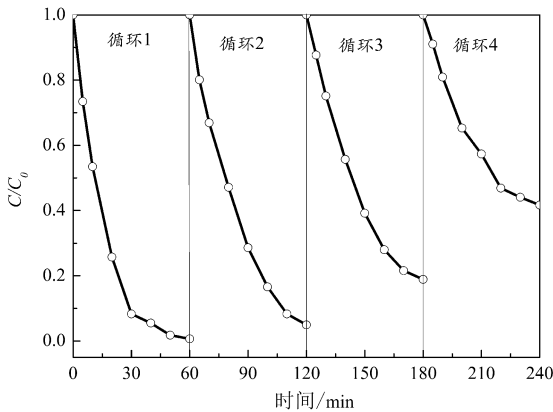


图 8 循环次数对 Ag₃PO₄/ACF 催化降解橙 II 的影响

Fig.8 Influence of recycling on the photocatalytic performance of Ag₃PO₄/ACF for the degradation of Orange II

2.8 光催化机理

在可见光照射下, Ag_3PO_4 价带上的电子被自发跃迁到导带, 从而在价带上产生带正电荷的空穴, 导带上产生带负电荷的电子, 形成电子-空穴对^[12], 光生电子和空穴扩散到 Ag_3PO_4 表面, 空穴与水反应生成具有强氧化性的 $\cdot\text{OH}$ ^[13]; 电子被表面的 O_2 捕获, 反应生成强氧化性的 $\text{O}_2\cdot^-$; $\text{O}_2\cdot^-$ 也会与表面水反应生成 $\cdot\text{OH}$ ^[14]。活性组分 $\text{O}_2\cdot^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 可以将橙 II 溶液降解脱色^[15], 空穴本身有强氧化性, 可以直接将染料降解。但是有一部分光生电子和空穴还未迁移到 Ag_3PO_4 表面就在体内复合。本实验制备的 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 复合光催化剂, 由于 ACF 生成均匀分布的纳米级 Ag_3PO_4 , 纳米尺寸使光生电子和空穴快速扩散到 Ag_3PO_4 表面, 有效抑制了光生电子和空穴在 Ag_3PO_4 体内的复合, 进而产生更多的活性组分, 使得光催化活性提高。此外, ACF 的加入使得复合光催化剂的比表面积增大, 对染料的吸附性能提高, 为吸附和催化反应提供了更多的活性位点^[16], 导致催化性能的提高。

3 结 论

用湿化学沉淀法将 Ag_3PO_4 沉积在活性炭纤维 (ACF) 上成功制备复合光催化剂 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 。相比于纯的 Ag_3PO_4 颗粒, $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 的光催化效率提高 32%, 这是因为 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 具有更为精细的 Ag_3PO_4 晶体束, 且分布更均匀, 对污染物的吸附能力更强以及 Ag_3PO_4 与 ACF 有紧密的接触界面。随着 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 投加量的增大, 其对橙 II 的降解率逐渐提升, 最佳投加量为 1 000 mg/L。随着染料初始 pH 的增大, $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 对橙 II 的降解率逐渐下降, 但是在所有 pH 环境下, $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 对橙 II 的降解率均能达到 100%。 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{ACF}$ 有一定的重复使用性, 当循环使用 4 次后, 其对橙 II 的降解率由 99% 下降到 59%。

参考文献:

[1] Yi Z G, Ye J H, Kikugawa N, et al. An orthophosphate semiconductor with photooxidation properties under visible-light irradiation[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(7): 559-564.

[2] Bi Y, Ouyang S, Umezawa N, et al. Facet Effect of Single-Crystalline Ag_3PO_4 Sub-microcrystals on Photocatalytic Properties [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(17):

6490-6492.

[3] Ma X, Lu B, Li D, et al. Origin of Photocatalytic Activation of Silver Orthophosphate from First-Principles [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(11): 4680-4687.

[4] Yao S H, Li J Y, Shi Z L. Immobilization of TiO_2 nanoparticles on activated carbon fiber and its photodegradation performance for organic pollutants [J]. *Particuology*, 2010, 8(3): 272-278.

[5] Shi J W, Zheng J T, Ji X J. $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{Activated carbon fibers}$ photocatalyst: preparation, characterization, and photocatalytic activity [J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, 27(11): 923-930.

[6] Guo T, Bai Z P, Wu C, et al. Influence of relative humidity on the photocatalytic oxidation (PCO) of toluene by TiO_2 loaded on activated carbon fibers: PCO rate and intermediates accumulation [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008, 79(2): 171-178.

[7] Huang H C, Ye D Q, Huang B C, et al. Vanadium supported on viscose-based activated carbon fibers modified by oxygen plasma for the SCR of NO [J]. *Catalysis Today*, 2008, 139(1-2): 100-108.

[8] Fu P F, Luan Y, Dai X G. Preparation of activated carbon fibers supported TiO_2 photocatalyst and evaluation of its photocatalytic reactivity [J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2004, 221: 81-88.

[9] Shi J W, Zheng J T, Wu P, et al. Immobilization of TiO_2 films on activated carbon fiber and their photocatalytic degradation properties for dye compounds with different molecular size [J]. *Catalysis Communications*, 2008, 9(9): 1846-1850.

[10] Liu J H, Yang R, Li S M. Preparation and application of efficient TiO_2/ACFs photocatalyst [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18: 979-982.

[11] Khan A, Qamar M, Muneer M. Synthesis of highly active visible-light-driven colloidal silver orthophosphate [J]. *Chemical Physics Letters*, 2012, 519-520: 54-58.

[12] Liu Y P, Fang L, Lu H D, et al. One-pot pyridine-assisted synthesis of visible-light-driven photocatalyst $\text{Ag}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2012, 115: 245-252.

[13] Katsumata H, Taniguchi M, Kaneco S, et al. Photocatalytic degradation of bisphenol A by Ag_3PO_4 under visible light [J]. *Catalysis Communications*, 2013, 34: 30-34.

[14] Zhang S N, Zhang S J, Song L M. Super-high activity of Bi^{3+} doped Ag_3PO_4 and enhanced photocatalytic mechanism [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2014, 152: 129-139.

[15] Liu J J, Fu X L, Chen S F, et al. Electronic structure and optical properties of Ag_3PO_4 photocatalyst calculated by hybrid density functional method [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 191903-1-191903-3.

[16] Ma J, Zou J, Li L, et al. Nanocomposite of attapulgite- Ag_3PO_4 for Orange II photodegradation [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014, 144: 36-40.

(责任编辑:李艳)