

碱水热法制备 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 光催化剂及其光催化性能研究

徐竞帆*, 周绿山, 沈琪, 熊信洁, 刘丹, 李颖, 张玉, 唐佳文
(四川文理学院化学化工学院, 四川达州 635000)

摘要:通过碱水热反应合成了 Ti_3C_2 , 并以其为载体制备了不同负载量的 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 光催化剂。利用 FT-IR、XRD、SEM、XPS 等对光催化剂进行表征。结果表明, 在 240°C 水热条件下, 碱刻蚀法制备的 Ti_3C_2 为刻蚀程度较低的片层结构, 同时材料中有微量的 TiO_2 存在, 同时 Ag_3PO_4 以立方相的形式负载到 Ti_3C_2 载体表面。随着 Ag_3PO_4 负载量的增加, $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 的光催化活性逐渐增大, 在催化剂质量为 0.01 g、反应时间为 60 min 时, $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ -85% 对亚甲基蓝的降解率达到 95%。 Ti_3C_2 与 Ag_3PO_4 异质结的存在使其具有较强的电荷分离能力和优异的光催化性能。

关键词:碱水热法; $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$; 光催化

中图分类号: TQ034

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)07-0156-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.07.028

Preparation of $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ photocatalyst via alkali hydrothermal method and evaluation of its photocatalytic performance

XU Jing-fan*, ZHOU Lv-shan, SHEN Qi, XIONG Xin-jie, LIU Dan, Li Ying,
ZHANG Yu, TANG Jia-wen

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Sichuan University of Arts and Sciences, Dazhou 63500, China)

Abstract: Ti_3C_2 is synthesized through alkaline hydrothermal reaction, and used as support to prepare $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ photocatalysts with different loading amount. The photocatalysts are characterized by means of FT-IR, XRD, SEM and XPS. It is indicated that Ti_3C_2 prepared through alkali etching method at 240°C hydrothermal condition presents a layer structure with low etching degree. In addition, there are trace TiO_2 in Ti_3C_2 material, and Ag_3PO_4 has been supported on the surface of Ti_3C_2 support. The photocatalytic activity of $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ increases with the higher Ag_3PO_4 loading amount. The degradation rate of methylene blue by $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ -85% can reach 95% when the usage of the catalyst is 0.01 g and the reaction performs 60 min. The presence of heterojunction between Ti_3C_2 and Ag_3PO_4 makes the catalyst have strong charge separation ability and excellent photocatalytic performance.

Key words: alkaline hydrothermal method; $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$; photocatalysis

随着越来越多的光催化剂被发现, 光催化技术在废水处理、光催化产氢和 CO_2 还原等方面得到更广泛地应用^[1-4]。由于大多数光催化剂量子效率低、光响应范围窄并且存在光腐蚀现象, 严重制约了光催化剂的工业化应用, 这也是当前光催化领域面临的主要问题。

磷酸银 (Ag_3PO_4) 是一种理想的光催化材料, 具有低毒性、高光催化活性和高量子产率等优点, 在小于 520 nm 的太阳光照射下, Ag_3PO_4 表现出出色的光解水制氧和降解污染物的能力, 其量子效率高达 90%^[5-7]。但 Ag_3PO_4 在水中的微溶性和光腐蚀现象造成了催化剂的损失, 降低了光吸收效率, 严重影

响其光催化活性和稳定性, 目前解决光腐蚀问题最常见的方法是半导体与其他材料 (金属氧化物、金属硝酸盐等) 复合, 从而提高复合半导体的电子传输性能, 以防止电子与 Ag^+ 结合^[8-9]。此外, 在半导体表面沉积 Ag_3PO_4 纳米颗粒可以有效地防止 Ag_3PO_4 因化学吸附而溶解于水溶液^[10]。Li 等^[11]通过原位沉淀法在二氧化钛表面沉淀 Ag_3PO_4 分子, 使其形成异质结构, 可以加快光生电子和光生空穴的分离, 其在降解罗丹明 B 废水时, 光催化性能较纯磷酸银有明显提升。Zhu 等^[12]制备了 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}$ 复合材料, 由于复合半导体良好的电子传递能力, 较纯的 Ag_3PO_4 表现出更强的光催化

收稿日期: 2024-01-24; 修回日期: 2024-05-08

基金项目: 四川省科技厅项目 (2022YFG0277); 绿色催化四川省高校重点实验室项目 (LZJ2202); 四川省大学生创新创业训练项目 (S202310644044)

作者简介: 徐竞帆 (1995-), 男, 硕士, 助教, 研究方向为纳米复合材料, 通讯联系人, 353594270@qq.com。

性能和稳定性,其对盐酸四环素的降解率可达到 88.48%,并且在使用 4 次后,光催化活性没有明显下降,有效地抑制了 Ag_3PO_4 光腐蚀现象。

Ti_3C_2 是一种潜力巨大的光催化助剂,二维 Ti_3C_2 修饰后的半导体(如 CdS 、 Bi_2WO_6 、 TiO_2 等)对水体污染物的处理能力有明显提高^[13-15]。一方面, Ti_3C_2 独特的二维片层结构使其具有较大的比表面和吸附能力,可以作为一种良好的载体材料。Mashtalir 等^[16]将 Ti_3C_2 用于亚甲基蓝的吸附脱除,其吸附容量约为 39 mg/g。Zhang 等^[17]将部分刻蚀的 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ 用于二苯并噻吩的脱除,也证明了 Ti_3C_2 对有机污染物的吸附能力;另一方面, Ti_3C_2 较强的电子传导能力也可以有效抑制光生电子空穴对的复合,提升材料的光催化性能。Cai 等^[18]在实验中制备了 $\text{Ag}_3\text{PO}_4-\text{Ti}_3\text{C}_2$ 光催化剂并研究其光催化性能,研究表明, Ti_3C_2 和 Ag_3PO_4 在 $\text{Ag}_3\text{PO}_4-\text{Ti}_3\text{C}_2$ 界面处形成的肖特基结能够抑制光生电子引起的 Ag_3PO_4 的光共振效应,因此可以促进电子的传输和分离,增加反应效率。

当前 Ti_3C_2 主要是通过 HF 刻蚀 Ti_3AlC_2 的方法进行制备,在 HF 蚀刻过程中 Ti_3C_2 更易分裂成小块,导致光催化性能下降^[19]。并且刻蚀形成的 Ti_3C_2 表面带有大量的 F 原子,抑制了 Ti_3C_2 与其他半导体材料的连接^[20-21]。基于此,笔者采用碱水热法来制备 Ti_3C_2 层状材料^[22],并研究其与 Ag_3PO_4 的相互作用。实验中对不同 Ag_3PO_4 负载量的催化剂进行了 FT-IR、XRD、SEM、XPS 表征,同时对催化剂的光催化条件进行了优化。

1 仪器与材料

FT-IR-850 红外光谱仪,天津港东科技股份有限公司生产;2700BHX 射线衍射分析仪,丹东浩元仪器有限公司生产;Phenom PROG 扫描电子显微镜,飞纳生产;NEXSAX 射线光电子能谱仪,Thermoscientific 生产;试管架、烧杯、10 mL 试管。

片状氢氧化钠、十二水磷酸氢二钠、钛碳化铝、硝酸银、亚甲基蓝。

2 实验方案

2.1 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 光催化剂的制备

2.1.1 Ti_3C_2 的制备

取 25 mL 去离子水加热至沸腾,称量 30 g NaOH 和 0.08 g Ti_3AlC_2 缓慢加入蒸馏水中,随后将溶液

转移至水热反应釜中并通入氩气除氧,在 240℃ 下水热反应 24 h。待冷却后用去离子水和乙醇将 Ti_3C_2 产品洗至中性,并于 60℃ 烘干 6 h。

2.1.2 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合催化剂的制备

将 66.7 mg 的 Ti_3C_2 样品超声分散在 30 mL 去离子水中。按照负载比例(Ag_3PO_4 质量分数分别为 80%、85%、90%、95%)称取 0.090 5、0.128 2、0.203 6、0.429 8 g 的 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 分别加入 10 mL 去离子水, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 水溶液缓慢滴入悬浮液中,适度搅拌 2 h。称取 0.326 8、0.460 2、0.730 8、1.542 9 g 的 AgNO_3 分别加入 10 mL 去离子水, AgNO_3 水溶液缓慢加入到相应的混合悬浮液中,适当搅拌 5 h。将溶液抽滤并用去离子水和乙醇反复洗涤至溶液呈中性,60℃ 真空干燥 6 h。

2.2 光催化性能的测试

2.2.1 光催化剂降解亚甲基蓝溶液反应

取一定量的 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 光催化剂加入到 10 mL 质量浓度为 20 mg/L 的亚甲基蓝溶液中,放入大小合适的转子,置于光学反应仪中,用 65 W 的节能灯(YPZ-220/4U)光照反应 1 h,取出离心,得上层清液在波长为 665 nm 处测试吸光值。

2.2.2 光催化性能的测定

将紫外-分光光度计的波长调到 665 nm,先将去离子水滴入比色皿中作为空白对照,然后用胶头滴管移取离心好的清液于比色皿中,置于紫外-分光光度计(北京普析通用仪器有限公司生产,2004c)中测定吸光度。并计算废水降解率:

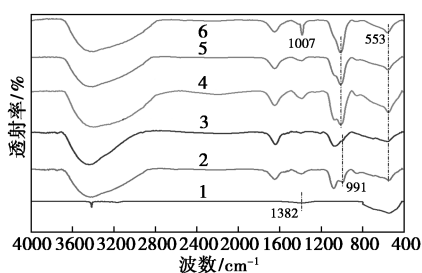
$$\omega = (A_0 - A_i) / A_0 \quad (1)$$

式中: ω 为光催化降解率,%; A_0 为初始废水溶液吸光度; A_i 为清液吸光度。

3 结果与讨论

3.1 催化剂的红外表征及分析

Ag_3PO_4 、 Ti_3C_2 及 4 种不同负载量的 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 的红外光谱图如图 1 所示。从图 1 中可以看出,1 382 cm^{-1} 处是 NaOH 刻蚀后 Ti_3C_2 边缘引起的无序带,表明 Ti_3AlC_2 的部分刻蚀成功。纯 Ag_3PO_4 中波数 1 007 cm^{-1} 和 553 cm^{-1} 处的峰是 P—O 键的拉伸振动和弯曲振动的特征峰,证明 Ag_3PO_4 制备成功。同时,负载量为 80% 和 85% 的催化剂上 P—O 的键的波峰由 1 007 cm^{-1} 红移至 991 cm^{-1} 。这是因为 Ti_3C_2 与 Ag_3PO_4 的相互作用改变了 P—O 键的键能,进一步表明 Ti_3C_2 与 Ag_3PO_4 的成功复合。

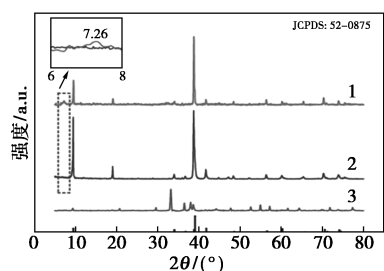


1—Ti₃C₂/Ti₃AlC₂; 2—Ti₃C₂/Ti₃AlC₂-Ag₃PO₄-80%;
3—Ti₃C₂/Ti₃AlC₂-Ag₃PO₄-85%; 4—Ti₃C₂/Ti₃AlC₂-Ag₃PO₄-
90%; 5—Ti₃C₂/Ti₃AlC₂-Ag₃PO₄-95%; 6—Ag₃PO₄

图 1 催化剂的红外光谱图

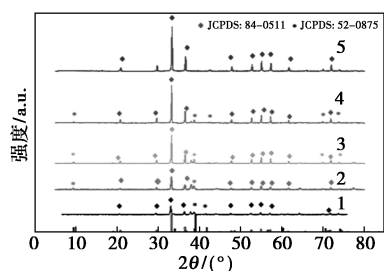
3.2 催化剂的 XRD 表征及分析

Ti₃AlC₂、Ti₃C₂、不同负载量的 Ti₃C₂-Ag₃PO₄ 的 XRD 谱图如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出,纯 Ti₃AlC₂ 在 2θ 为 9.52、19.16、33.71、39.04、41.82° 处分别为六方相 Ti₃AlC₂ (PDF 52-0875) 的 (002)、(004)、(100)、(104)、(105) 晶面衍射峰。经刻蚀后, Ti₃C₂ 对应 2θ 为 9.52° 的峰急剧减小, 并且 Ti₃C 在 2θ=7.32° 出现了 1 个峰, 归属于 Ti₃C₂ 层状结构的 (002) 特征峰, 表明经过碱式刻蚀后, Na⁺ 嵌入 Ti₃AlC₂ 层状结构中; 从图 3(b)中可以看出, Ti₃C₂-Ag₃PO₄ 在 2θ 分别为 20.84、29.64、33.23、36.51、47.71、54.91、57.17、61.53、71.75° 处均出现归属于立方相 Ag₃PO₄ (PDF 06-0511) 的 (110)、(200)、



1—Ti₃C₂; 2—Ti₃AlC₂; 3—Ti₃C₂-Ag₃PO₄-85%

(a) Ti₃AlC₂、Ti₃C₂、Ti₃C₂-Ag₃PO₄-85%



1—Ti₃C₂/Ag₃PO₄-80%; 2—Ti₃C₂/Ag₃PO₄-85%;

3—Ti₃C₂/Ag₃PO₄-90%; 4—Ti₃C₂/Ag₃PO₄-95%; 5—Ag₃PO₄

(b) 不同负载量的 Ti₃C₂-Ag₃PO₄

图 2 催化剂的 XRD 光谱图

(210)、(211)、(310)、(320)、(321)、(400)、(421) 的特征衍射峰, 并且随着负载量的增加, Ag₃PO₄ 的峰强逐渐增加, 晶相含量逐渐增多, 结合 FT-IR 表征分析, 证明通过碱式刻蚀成功制得 Ti₃C₂ 层状结构, 并且 Ag₃PO₄ 成功负载到 Ti₃C₂ 材料表面。

3.3 形貌分析

Ti₃C₂、Ag₃PO₄、Ti₃C₂-Ag₃PO₄ 材料的 SEM 图如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出, 刻蚀后的 Ti₃C₂ 出现明显的层状结构, 但由于采用碱式刻蚀且刻蚀温度较低, 使得对 Ti₃AlC₂ 刻蚀不完全, 其刻蚀结果不是类似于传统 HF 刻蚀的“手风琴”结构, 而是层间距更小、内部路径更为弯曲复杂的片层结构。从图 3(b)~图 3(e)中可以看出, 当 Ag₃PO₄ 负载量为 80% 和 85% 时, 生成的 Ag₃PO₄ 颗粒尺寸较小, 并且可以较为均匀地负载到 Ti₃C₂ 表面及层间结构中; 而当负载量为 90% 与 95% 时, Ag₃PO₄ 负载量过大, 生成大量不规则颗粒状的 Ag₃PO₄, 并且几乎填满了整个 Ti₃C₂ 结构。表明在低负载量时, Ti₃C₂ 的空间位阻效应可以抑制 Ag₃PO₄ 颗粒生长, 使其更均匀地负载到载体表面。

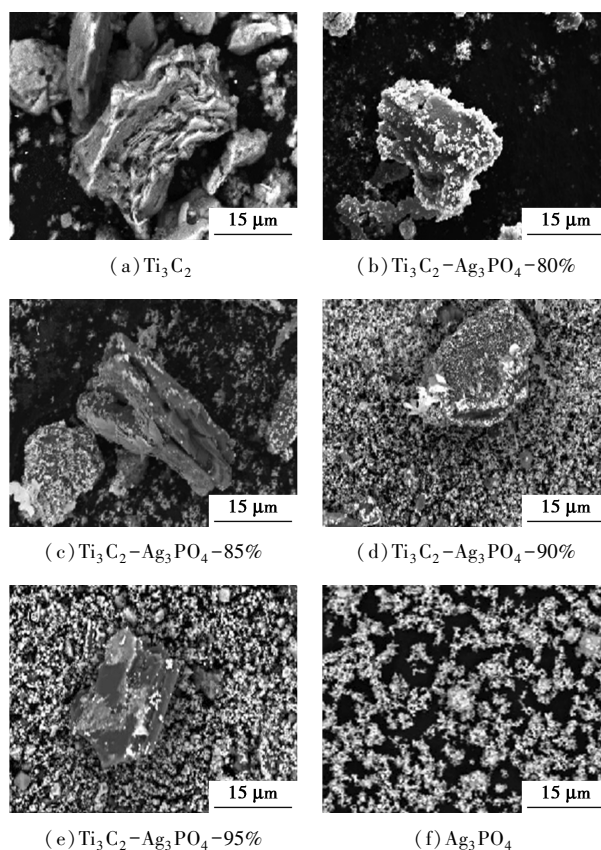


图 3 催化剂材料的 SEM 表征图

3.4 催化剂的 XPS 表征及分析

Ti₃C₂-Ag₃PO₄-85% 催化剂的 XPS 谱图如图 4

所示。由图4(a)中可以看出,所制得的催化剂元素主要为Ti、C、O、Ag、P,其中总谱中未发现Al元素的2s和2p峰,说明对Al的刻蚀较为完全。从图4(b)中可以看出,结合能为132.6 eV(P2p)处为 P^{5+} 的特征峰。从图4(c)中可以看出,O原子在催化剂中有3种存在形态,结合能为530.63、532.03 eV和532.78 eV的特征峰分别来源于C—Ti—O、C—Ti—OH和 $\text{H}_2\text{O}_{\text{ads}}$ 。从图4(d)中可以看出,结合能为373.93 eV($\text{Ag}^+3d_{2/3}$)和367.98 eV($\text{Ag}^+3d_{2/5}$)的特征峰为 Ag^+ 的特征峰,而结合能为373.43 eV($\text{Ag}^03d_{2/3}$)和367.63 eV($\text{Ag}^03d_{2/5}$)的特征峰为 Ag^0 的特征峰,表明 Ag_3PO_4 在制备过程中有部分被还原为Ag单质。从图4(e)可知,Ti元素在材料中存在3种价态,结合能位于464.38($\text{Ti}^{2+}2p_{1/2}$)、454.13 eV($\text{Ti}^{2+}2p_{3/2}$)和455.83 eV($\text{Ti}^{3+}2p_{3/2}$)的特征峰来自于C—Ti—O和C—Ti—OH。而结合能为464.18 eV($\text{Ti}^{4+}2p_{1/2}$)和458.53 eV($\text{Ti}^{4+}2p_{3/2}$)为 Ti^{4+} 的特征峰表明材料中含有微量的 TiO_2 ,并且表面官能团主要以—O和—OH的形式存在,这与文献[22]中的报道一致。

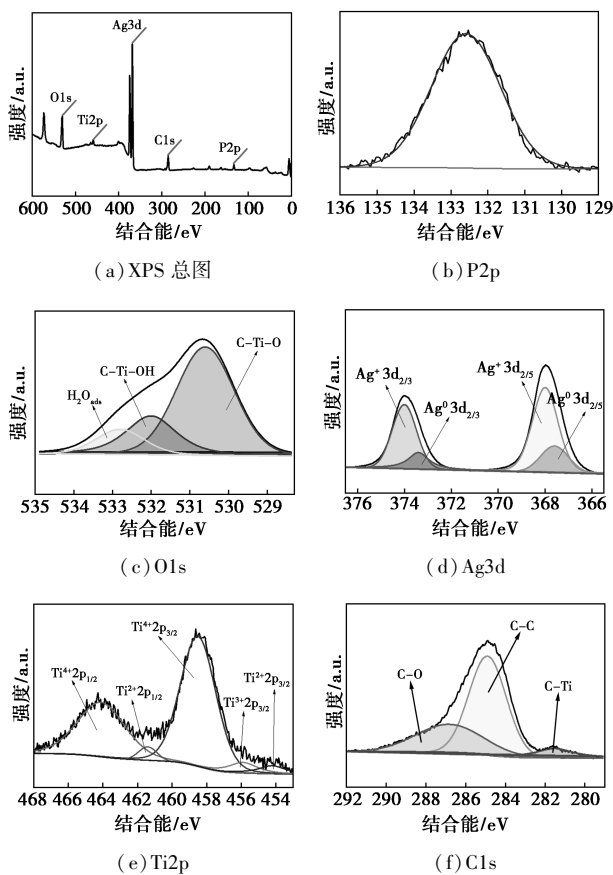
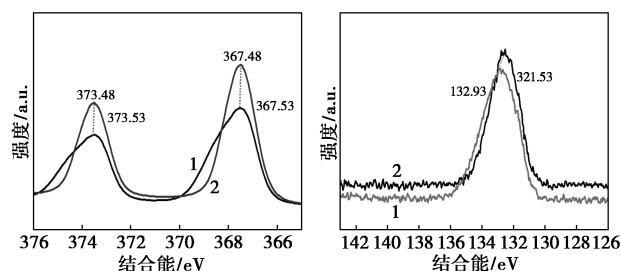


图4 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4-85\%$ 催化剂的 XPS 总图及分峰谱

由图4(f)可知,C原子在催化剂中有3种存在形态,结合能为286.83、284.93 eV和281.53 eV的特征峰分别来源于C—O、C—C和C—Ti。为了进一步判断 Ti_3C_2 和 Ag_3PO_4 的相互作用,对复合前后的Ag和P的电子状态进行了研究,结果如图5所示。复合后Ag 3d和P2p的峰型有较大变化,并且主峰的结合能略微增加,表明 Ti_3C_2 与 Ag_3PO_4 形成异质结,电子由 Ti_3C_2 表面传递到 Ag_3PO_4 ,有利于光生电子-空穴对的分离和光催化性能的提升。



(a) 复合前后 Ag3d 谱图

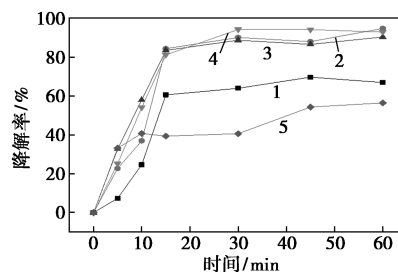
(b) 复合前后 P2p 谱图

1— Ag_3PO_4 ; 2— $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$

图5 Ti_3C_2 与 Ag_3PO_4 复合前后 XPS 图谱

3.5 光催化性能分析

不同催化剂的光降解率如图6所示。



1— $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4-80\%$; 2— $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4-85\%$;

3— $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4-90\%$; 4— $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4-95\%$; 5— Ti_3C_2

图6 不同催化剂对亚甲基蓝的降解率

由图6可知,碱法制得的 Ti_3C_2 对亚甲基蓝在60 min时具有56%的降解率,结合XPS表征分析可知,碱水热法制得的 Ti_3C_2 中含有部分的 TiO_2 ,根据文献[23]中的报道, Ti_3C_2 的存在有助于降低 TiO_2 的禁带宽度,使其对可见光也有一定吸收。当 Ag_3PO_4 负载量为80%时,催化剂相比于纯的 Ti_3C_2 有较大提升,说明 Ti_3C_2 与 Ag_3PO_4 的复合显著提升了材料的光催化性能,这是由于 Ti_3C_2 与 Ag_3PO_4 形成了异质结,有效抑制了光生电子-空穴对的分离,提升了其光催化活性;当 Ag_3PO_4 负载量在85%以上时,体系内的催化活性中心增加,使得60 min时

催化剂对亚甲基蓝的降解率均可以达到 90% 以上。考虑到 Ag_3PO_4 本身昂贵的价格,因此选择 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4-85\%$ 为最优的催化剂。

最佳催化剂不同加入质量的降解率如图 7 所示。

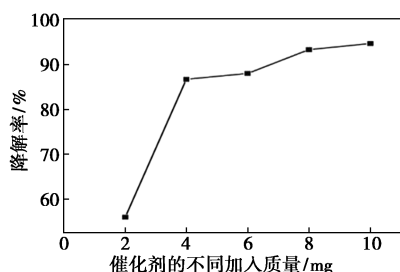


图 7 不同催化剂加入质量对亚甲基蓝的降解率

由图 7 可知,随着催化剂加入质量的增大,催化剂的降解率呈逐渐增大的趋势。当催化剂加入质量为 0.01 g 时,其对亚甲基蓝的最高降解率可以达到 95%,基本实现对染料污染物的脱除。因此选择 0.01 g 为最优的催化剂加入质量。

最佳催化剂回收性能测试结果如表 1 所示。

表 1 最佳催化剂回收性能测试

回收次数	1	2	3	4
降解率/%	93	86	66	64

由表 1 可知,随着回收次数的增多,对亚甲基蓝的降解率逐渐减少,这是由于回收过程中 Ag_3PO_4 产生了一定的光腐蚀现象。但回收 3 次后降解率基本稳定在 65% 左右,说明制备得到的催化剂性能较为稳定。

4 结论

(1) 通过碱水热法制备了 Ti_3C_2 层状结构。XRD 和 SEM 表征结果表明,在水热温度为 240℃ 下,碱水热法制备的 Ti_3C_2 为刻蚀程度较低的片层结构,其内部路径弯曲复杂。XPS 和光催化活性测试表明,碱水热法制备的 Ti_3C_2 被部分氧化,使得材料中含有微量的 TiO_2 。

(2) 以 Ti_3C_2 为载体,制备了不同 Ag_3PO_4 负载量的 $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 光催化剂。结果表明: Ag_3PO_4 以立方相的形式负载在催化剂表面, TiO_2 和 Ag_3PO_4 之间形成了异质结,可更有效地促进电子-空穴对的分离,提高光催化活性。光催化性能测试表明,在催化剂加入质量为 0.01 g、反应时间为 60 min 的最

优条件下, $\text{Ti}_3\text{C}_2-\text{Ag}_3\text{PO}_4-85\%$ 光催化剂在可见光下对亚甲基蓝的降解率可以达到 95%。

参考文献

- [1] Shanaah H H, Alzaimoor E F H, Rashdan S, *et al.* Photocatalytic degradation and adsorptive removal of emerging organic pesticides using metal oxide and their composites: Recent trends and future perspectives [J]. *Sustainability*, 2023, 15(9): 43-48.
- [2] Racovita A D. Titanium dioxide: Structure, impact, and Toxicity [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 20-24.
- [3] Jafari T, Moharreri E, Amin A S, *et al.* Photocatalytic water splitting: the untamed dream; A review of recent advances [J]. *Molecules*, 2016, 21(7): 29-32.
- [4] Loh J Y Y, Kherani N P, Ozin G A. Persistent CO_2 photocatalysis for solar fuels in the dark [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(6): 466-473.
- [5] Yi Z, Ye J, Kikugawa N, *et al.* An orthophosphate semiconductor with photooxidation properties under visible-light irradiation [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(7): 559-564.
- [6] Li X P, Xu P, Chen M, *et al.* Application of silver phosphate-based photocatalysts: Barriers and solutions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 366: 339-357.
- [7] 杜春艳, 宋佳豪, 谭诗杨, 等. 基于 II 型和 Z 型 Ag_3PO_4 基异质结光催化材料的研究进展 [J]. *功能材料*, 2021, 52(2): 2109-2117.
- [8] Yang X F, Cui H Y, Li Y, *et al.* Fabrication of Ag_3PO_4 -graphene composites with highly efficient and stable visible light photocatalytic performance [J]. *ACS Catalysis*, 2013, 3(3): 363-369.
- [9] Shi E, Xu Z L, Wang W J, *et al.* Ag_3S -doped core-shell nanostructures of $\text{Fe}_3\text{O}_4@-\text{Ag}_3\text{PO}_4$ ultrathin film: Major role of hole in rapid degradation of pollutants under visible light irradiation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 366: 123-132.
- [10] Abdo S M, El-Hout S I, Rashed M N, *et al.* Modified silver phosphate nanocomposite as an effective visible-light-driven photocatalyst in the reduction of aqueous Cr(VI) [J]. *Materials Research Bulletin*, 2024, 169: 12-13.
- [11] Li J Q, Guo Z Y, Liu Z X, *et al.* $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{TiO}_2$ heterostructures with enhanced photocatalytic activity [J]. *Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science*, 2015, 212(2): 459-466.
- [12] Zhu P F, Hu M, Duan M, *et al.* High visible light response Z-scheme $\text{Ag}_3\text{PO}_4/g-\text{C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}$ composite photocatalyst for efficient degradation of tetracycline hydrochloride: Preparation, properties and mechanism [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 840: 12-18.
- [13] Huang T Y, Yang Z, Yang S Y, *et al.* Construction of 2D/2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CdS heterojunction with photothermal effect for efficient photocatalytic hydrogen production [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 171: 1-9.

(下转第 168 页)

参考文献

- [1] Liu Pei, Pei Xiaomei, Li Chaowang, *et al.* pH-switchable wormlike micelles with high viscoelasticity formed by pseudo-oligomeric surfactants[J]. *J Mol Liq*, 2021, 334: 116499.
- [2] Zapf A, Beck R, Platz G, *et al.* Calcium surfactants: A review[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2003, 100: 349–380.
- [3] Zhao Y, Cheung P, Shen A Q. Microfluidic flows of wormlike micellar solutions[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2014, 211: 34–46.
- [4] Theato P, Sumerlin, Brent S, *et al.* Stimuli responsive materials[J]. *Chem Soc Rev*, 2013, 42: 7055–7056.
- [5] Shibaev A V, Kuklin A I, Torocheshnikov V N, *et al.* Double dynamic hydrogels formed by wormlike surfactant micelles and cross-linked polymer[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2022, 611: 46–60.
- [6] Cecile A D, Wormlike micelles: Where do we stand? Recent developments, linear rheology and scattering techniques[J]. *Soft Matter*, 2007, 3(8): 956–970.
- [7] Gao Jinhao, Zhang Guanghua, Wang Lei, *et al.* Rheological properties of an ultra-high salt hydrophobic associated polymer as a fracturing fluid system[J]. *RSC Adv*, 2019, 9(27): 15246–15256.
- [8] Cadix A, Wilson J, Carouhy T, *et al.* A new class of associative polymer for hydraulic fracturing applications[C]. *Soc Pet Eng*, 2015.
- [9] Richtering W, Rheology and shear induced structures in surfactant solutions[J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2001, 6: 446–450.
- [10] Paula M, Michael G. Gels obtained by colloidal self-assembly of amphiphilic molecules[J]. *Gels*, 2017, 3(3): 30.
- [11] Gradziński M. Polymer-surfactant interaction for controlling the rheological properties of aqueous surfactant solutions[J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2022, 63: 101662.
- [12] Kortemeier U, Venzmer J, Howe A. Thickening agents for surfactant systems[J]. *SOFW J*, 2010, 136: 30–36.
- [13] Henrique C H, Mansano G S, Thiago C, *et al.* Synthesis and characterization of a hydrophobic association hydrogel for drug delivery[J]. *J Mol Liq*, 2023, 372: 120709.
- [14] Chen Haibo, He Xingli, Yang Xiaolong, *et al.* Preparation and investigations of PEG-AT-PEG organic nano-polymer photothermal material[J]. *Mat Research Exp*, 2022, 9(9): 095101.
- [15] Li Yunyun, Wang Yadong, Jin Jin, *et al.* Enhanced removal of trace pesticides and alleviation of membrane fouling using hydrophobic-modified inorganic-organic hybrid flocculants in the flocculation-sedimentation-ultrafiltration process for surface water treatment[J]. *Water Re*, 2023, 229: 119447.
- [16] Ma Jiangya, Wu Genyu, Zhang Rui, *et al.* Emulsified oil removal from steel rolling oily wastewater by using magnetic chitosan-based flocculants; Flocculation performance, mechanism, and the effect of hydrophobic monomer ratio[J]. *Sep Pur Tec*, 2023, 304(5): 122329.
- [17] Cai Shuwei, Wang Yan, He Xianru. Molecular interaction of poly (acrylamide-co-2-acrylamido-dodecyl sulfonate) with dual responsiveness and application in oily emulsion wastewater[J]. *J App Pol Sci*, 2021, 139(4): 51528.
- [18] Liu Lang, Gou Shaohua, Ma Yongtao, *et al.* A thermal thickening system based on the self-assembly of a zwitterionic hydrophobic association polymer and surfactant[J]. *Aus J Che*, 2021, 74(4): 238–244.
- [19] Jiao Guoying, Zhu Shijie, Ye Zhongbin, *et al.* The effect of shear on the properties of an associated polymer solution for oil displacement[J]. *Pol*, 2023, 15(3): 616.
- [20] Feng Dan, Zhang Yongmin, Chen Quansheng, *et al.* Synthesis and surface activities of amidobetaine surfactants with ultra-long unsaturated hydrophobic chains[J]. *J Sur Det*, 2012, 15: 657–661.
- [21] 徐宝财, 张桂菊, 赵莉. 表面活性剂化学与工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [22] 泽田秀雄. 聚合反应热力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985. ■
- (上接第 160 页)
- [14] Bai Y X, Xu S S, Chen J, *et al.* $\text{Ti}_3\text{C}_2@ \text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ Ternary Heterogeneous photocatalyst for promoted photocatalytic degradation activities[J]. *Coatings*, 2023, 13(3): 16–17.
- [15] 朱源, 盛绍顶, 潘育松, 等. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-OH}/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ 复合光催化剂的制备及光催化性能研究[J]. *功能材料*, 2022, 53(4): 04224–04229.
- [16] Mashtalir O, Cook K M, Mochalin V N, *et al.* Dye adsorption and decomposition on two-dimensional titanium carbide in aqueous media[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 35(2): 14334–14338.
- [17] Zhang Q X, He J, Fu X L, *et al.* Fluorine-free strategy for hydroxylated Ti_3C_2 catalysts with enhanced aerobic oxidative desulfurization and mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 0–11.
- [18] Cai T, Wang L L, Liu Y T, *et al.* $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2$ MXene interface materials as a Schottky catalyst with enhanced photocatalytic activities and anti-photocorrosion performance[J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2018, 239: 545–554.
- [19] Wang B, Wang M Y, Liu F Y, *et al.* Ti_3C_2 : An ideal Co-catalyst[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2020, 59(5): 1914–1918.
- [20] 黄璐君. 基于无氟 MXene 的储能特性及器件研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [21] 王一博. 基于无氟 MXene 的复合催化剂制备及其电催化产氢性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [22] Li T F, Yao L L, Liu Q L, *et al.* Fluorine-free synthesis of high-purity $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ($\text{T} = \text{OH}, \text{O}$) via alkali treatment[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2018, 57(21): 6115–6119.
- [23] Xu Y J, Wang S, Yang J, *et al.* In-situ grown nanocrystal TiO_2 on 2D Ti_3C_2 nanosheets for artificial photosynthesis of chemical fuels[J]. *Nano Energy*, 2018, 51: 442–450. ■