

Preparation and Study on Composite Photocatalysts of rGO/TiO₂ Function Materials

Gaimei Li, Shudan Li*, Xiuhua Wang, Kun Gao*

School of Chemistry and Materials Science, Shanxi Normal University, Linfen Shanxi
Email: lishudan0451@163.com, gaokun0451@163.com

Received: Dec. 4th, 2017; accepted: Dec. 21st, 2017; published: Dec. 29th, 2017

Abstract

In this paper, rGO/TiO₂ composites with different amount of graphene were controllably synthesized by alkaline one-step hydrothermal method (the content of graphene is 0%, 1%, 5%, 10% and 15%). By XRD, SEM, Raman, Nitrogen adsorption-desorption and photocatalytic degradation of methylene blue solution (MB), we explored the effect of graphene and its contents on optimizing TiO₂ structure, morphology and photocatalytic activity. The results indicated that: (1) GO was reduced to thin-flake graphene in the strong alkaline hydrothermal reaction. Besides, the doping of graphene did not change the crystalline phase structure of TiO₂, but resulted in the decrease of particle size and increase of surface area when it comes to composites. Secondly, it also reduced the diffusion and transfer impedance of electrons. (2) Appropriate amount of graphene not only enhanced the effective contact between pollutants and photocatalysts, but also can be used as electron acceptor to promote the separation of electron-hole of TiO₂, thus improving the photocatalytic activity of TiO₂. (3) But excessive graphene would be able to covered partial active-sites of TiO₂ and participated in the formation of agglomeration products, which was not conducive to the improvement of TiO₂ photocatalytic activity. Therefore, rGO/TiO₂ with 5% graphene revealed the best photocatalytic performance, and its photocatalytic activity to MB solution increased to 86.3%. This provides a reliable way for the ecological development of Carbon materials modified TiO₂ photocatalyst.

Keywords

Anatase TiO₂, Graphene, rGO/TiO₂ Composites, Photocatalytic Activity

功能材料rGO/TiO₂复合光催化剂的合成与研究

栗改梅, 李姝丹*, 王秀花, 高 昆*

*通讯作者。

山西师范大学化学与材料科学学院, 山西 临汾
Email: lishudan0451@163.com, gaokun0451@163.com

收稿日期: 2017年12月4日; 录用日期: 2017年12月21日; 发布日期: 2017年12月29日

摘要

本文设计采用碱性一步水热法低温下控制合成了不同石墨烯含量的rGO/TiO₂复合材料(石墨烯质量分数为0%, 1%, 5%, 10%, 15%)。通过XRD, SEM, Raman, Nitrogen adsorption-desorption等表征手段和光催化降解亚甲基蓝溶液(MB)测试, 研究了石墨烯及其含量对TiO₂结构、形貌以及光催化活性的影响。结果表明: (1)强碱水热反应中GO被还原为薄片状石墨烯, 用于修饰TiO₂不改变其晶相结构; 适量的石墨烯掺杂使复合物的粒径减小, 比表面积增大, 电子扩散、迁移阻抗减小。(2)适量的石墨烯不仅可增强污染物与光催化剂的有效接触, 还可作为电子受体促进TiO₂电子-空穴的分离, 使TiO₂的光催化活性提高。(3)但过量的石墨烯不光会覆盖TiO₂的部分活性位点, 还易于参与形成团聚产物, 不利于TiO₂光催化活性的提高。因此, 当石墨烯含量为5%时, rGO/TiO₂对MB的光催化活性提高到86.3%, 光催化性能最佳。这为碳材料改性TiO₂光催化剂的绿色开发提供了一种可靠途径。

关键词

锐钛矿TiO₂, 石墨烯, rGO/TiO₂复合材料, 光催化性能

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

如今, 环境和能源危机已逐渐成为全社会的焦点。为解决这一问题, 研究者致力于发掘高效、清洁的新型材料来取代传统的能源物质。其中, TiO₂是一种储量丰富、开采方便、环境友好的半导体材料, 它含有低廉、稳定、性能优越等特点[1], 极大地激发了人们的研究兴趣。目前, 有关TiO₂光催化降解有机污染物的研究颇多, 但其性能仍普遍受一些因素的束缚。如带隙宽、太阳光利用率低、光生电子空穴复合率高等[2]。因而, 寻求简洁高效的方法来改性TiO₂具有深远的研究意义。常见的离子掺杂、贵金属沉积、表面敏化及半导体耦合等[3] [4], 均可用于改善TiO₂的光催化性能。除此之外, TiO₂的形貌、pH值、比表面积、结晶度等因素也会影响光催化活性[5] [6]。

有研究发现, 新型含碳导电物具有稳定性好、对可见光吸收强、易复合等优点, 用于修饰TiO₂可改善其光催化活性。尤其是零带隙石墨烯, 它作为比表面积大、导电性强的典型含碳导电物, 可有效增强TiO₂的光催化效率[7]。最新研究表明-OH极易与TiO₂的h⁺反应生成氧化性OH·, 使TiO₂氧化降解有机污染物的能力加强, 电子空穴对的分离加快[8]。而强碱性环境不仅易于提供较多的-OH从而产生强氧化性OH·, 还有利于GO的快速还原。因此, 本文设计用碱性一步水热法制备不同含量石墨烯修饰的rGO/TiO₂复合材料。通过XRD、SEM、Raman和氮气吸附脱附等表征技术以及光催化降解MB溶液的测试, 探究了石墨烯及其含量对TiO₂结构、形貌与光催化活性的影响。

2. 实验

2.1. 主要试剂、仪器

2.1.1. 主要试剂

钛酸丁酯(TBT), 乙二醇(EG), 无水乙醇, KOH, 天津市 Kermel 试剂公司; 冰醋酸, 西陇化工股份有限公司; NaOH, 天津市光复科技发展有限公司; GO, 江苏省金坛市薛埠镇夏霄工业园; 二次去离子水。

2.1.2. 主要仪器

85-2 磁力搅拌器, PHS-3C 精密酸度计, KQ-250B 超声波清洗器, GXZ-9030MBE 数显鼓风干燥箱, DZF-6020 真空干燥箱, GYZ-125 荧光高压汞灯, 80-2 高速离心机, YP-2 压片机, AUY120 电子分析天平。

2.2. 石墨烯修饰 TiO₂ 复合材料的制备

2.2.1. TiO₂ 的制备

首先, 取适量 EG 与 20 mL 去离子水配制混合溶剂, 向其中缓慢加入 1 mL 的 TBT 和 2 mL 冰乙酸并持续搅拌 1 h。其次, 用适量 NaOH(5 mol/L)调节溶液 pH = 9, 继续搅拌 8 h, 得到 TiO₂ 前驱体溶液。最后, 将前驱体溶液转移到 100 mL 高压水热反应釜中, 加热到 180°C 水热反应 12 h。待反应釜自然冷却至室温, 将沉淀经离心、抽滤、蒸馏水和无水乙醇依次洗涤至少 3 次、80°C 真空干燥 12 h, 制得 TiO₂ 纳米颗粒。

2.2.2. 不同含量石墨烯修饰 TiO₂ 的制备

如上述 2.2.1 中配制 TiO₂ 前驱体溶液, 并加入不同含量 GO, 室温下超声处理 2 h, 使溶液混合均匀。相同条件下, 180°C 水热制备不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 纳米材料, 并标记为 wt% rGO/TiO₂ 样品。

2.3. 样品的表征

采用日本 Rigaku 公司的 Ultima IV 型 X-射线衍射仪测定样品的晶体结构, 扫速 10°/min, 扫描范围为 5°~80°。使用日本 JEOL 公司的 JSM-7500F 扫描电子显微镜测试晶体的形貌及表面分部情况。用英国 INVIA Raman Microscope 拉曼光谱仪测定物质结构与缺陷, 扫描范围为 100~2000 cm⁻¹。使用英国 OXFORD INCA PentaFET × 3 型 X-射线能谱仪分析低含量元素。使用美国 Edinburgh 公司的 ASP2020 吸附仪测定材料比表面。采用美国 Varian 公司的 Carry 5000 型紫外分光光度仪测定样品吸光度, 进而分析其光催化活性。使用上海辰华公司的 CHI604D 电化学分析仪进行 EIS 测试。

2.4. 交流阻抗测试

首先按 80:15:5(质量比)称取样品、乙炔黑、聚偏氟乙烯(PVDF), 混合后充分研磨。然后将混合浆料与适量 NMP 于称量瓶中搅拌均匀, 并涂于 1 cm² 的待用泡沫镍上。最后 60°C 真空干燥 12 h, 10 MPa 压片处理 30 s, 保持每个工作电极上活性物质的质量约 1.6 mg。实验使用三电极体系进行测试, 以 6 mol/L 的 KOH 溶液为电解液, Pt 片为对电极, Hg/HgO 为参比电极。测试之前, 将电极于电解液中浸泡 10 h。交流阻抗在开路电位下进行测试, 具体参数设置如下: 频率范围 100 kHz ~ 0.01 Hz, 交流扰动 5 mV, 静置时间 2 s。

2.5. 光催化测试

本文所有的样品均进行光催化降解亚甲基蓝(MB, 10 mg/L)实验。首先, 将 0.05 g 不同催化剂试样分

别加入到盛有 50 mL 亚甲基蓝溶液的不同烧杯中, 暗处搅拌 20 min, 使降解物在催化剂表面达吸附-脱附平衡。设置光照距离为 15 cm, 在 125 W 荧光高压汞灯下充分降解混合溶液 2 h。定时取 5 mL 混合溶液(每 30 min 一次)进行离心分离(转速为 3000 r/min), 并在 664 nm 测定上层清液的吸光度。

3. 结果与讨论

3.1. X-射线衍射(XRD)分析

图 1 为 GO 和 0%、1%、5%、10%、15% 石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 XRD 图。依图可看出, GO 在 10.3° 显示了氧化石墨(001)晶面的特征峰, 纯 TiO₂ 于 25.24°、37.83°、48.08°、53.92° 和 55.09° 依次表现出 Anatase TiO₂ 的(101)、(004)、(200)、(105)以及(211)晶面, 与 PFF 卡片 21-1272 完全吻合。对比 rGO/TiO₂ 的衍射峰发现, 不同石墨烯含量的复合物中 10.3° 处 GO(001)晶面的特征峰消失, 而且 rGO/TiO₂ 的衍射峰与 TiO₂ 相似, 仍属于纯 Anatase 结构。与纯 TiO₂ 相比, rGO/TiO₂ 样品的衍射峰强度相对减小。这表明在强碱水热环境中 GO 被还原为石墨烯, 且石墨烯掺杂并不改变 TiO₂ 的晶相结构, 与文献报道相符[9] [10]。但是, 较多含量的石墨烯却可轻微覆盖 TiO₂ 的部分生长位点, 使其生长不完全而导致衍射峰强度降低[11]。因此, 在 rGO/TiO₂ 样品中, 石墨烯含量为 5% 时复合物 5% rGO/TiO₂ 的衍射峰尖锐、强度大, 其结晶度较好。

3.2. 能谱(EDS)分析

图 2 为 0%, 5% 石墨烯含量的 rGO-TiO₂ 样品的 EDS 图。通常为了增加测试效果, 在测试前对样品进行 60s 喷 Pt 操作, 会出现 Pt 元素信号。对比 a 和 b 可知, Anatase TiO₂ 较纯, 只含有 Ti 与 O 两种元素, 而 5% rGO-TiO₂ 样品另外含有 C 元素。这表明石墨烯与二氧化钛复合成功。

3.3. 扫描电子显微镜(SEM)分析

图 3 为 GO 与 0%、1%、5%、10%、15% 石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 SEM 图。图中 GO 呈透明

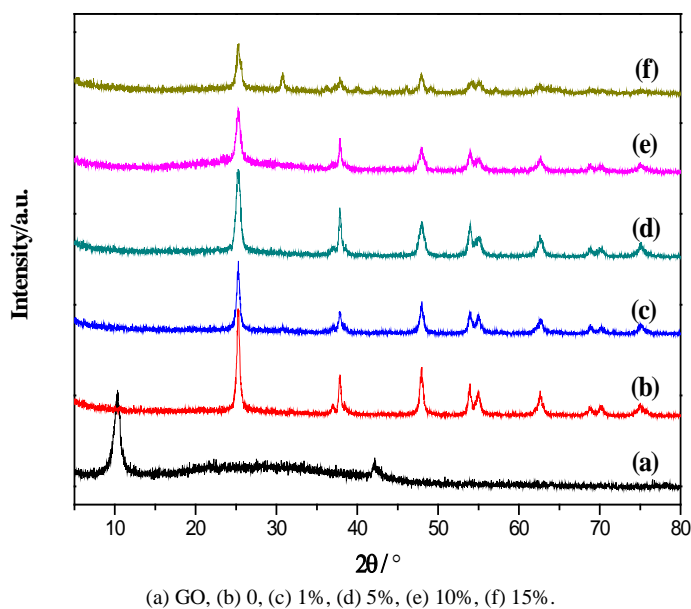


Figure 1. XRD images of GO and rGO/TiO₂ samples with different contents of graphene

图 1. GO 和不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 XRD 图

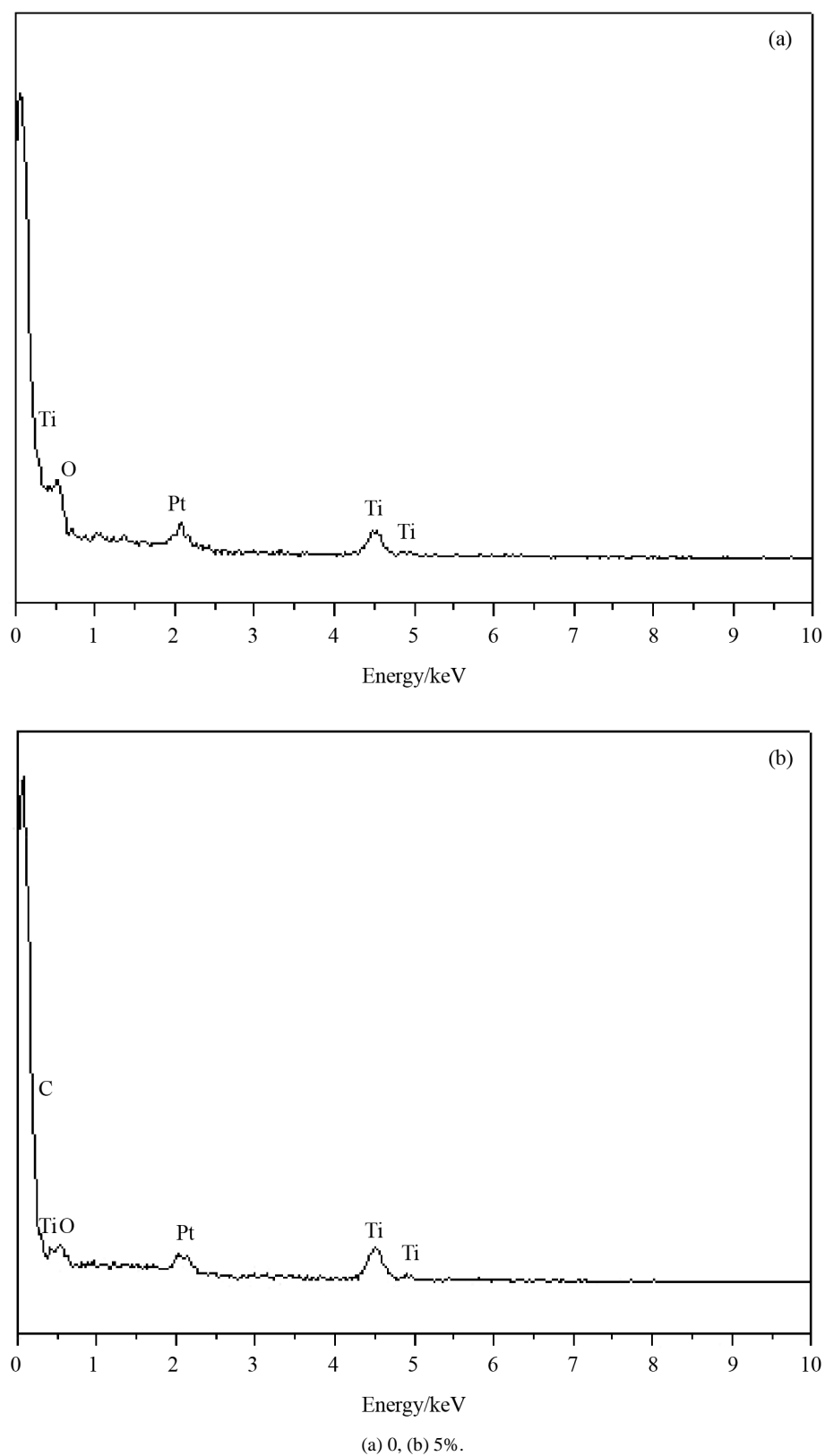


Figure 2. EDS spectra of rGO/TiO₂ samples with different contents of graphene
图 2. 不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 EDS 谱

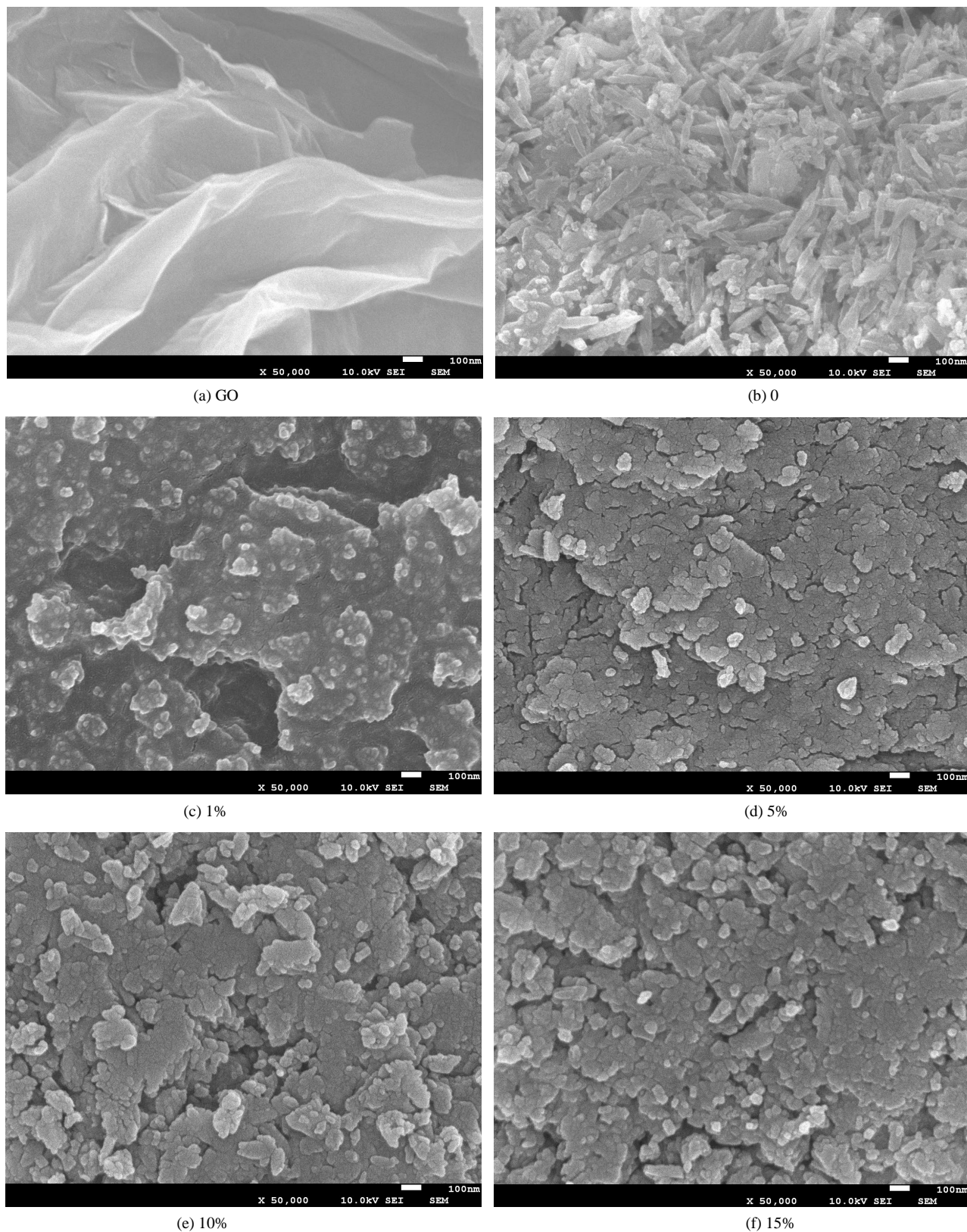


Figure 3. SEM patterns of GO and rGO/TiO₂ samples with different contents of graphene
图 3. GO 和不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 SEM 图

褶皱状, TiO_2 为均匀分散的棒状结构。在不同石墨烯含量的 rGO/TiO_2 复合物中, GO 的褶皱状消失且快速脱氧还原成薄片状石墨烯(rGO), 而 TiO_2 由棒状转变为纳米小颗粒。这表明 GO 被还原后部分的缺陷结构得以恢复, 用于修饰 TiO_2 使复合物的粒径减小。其次, 样品 1% rGO/TiO_2 的薄片状结构不明显, 随着石墨烯掺杂含量的增加, TiO_2 粒子明显负载于薄片状 rGO 表面。其中石墨烯含量为 5% 时, TiO_2 颗粒于片状 rGO 表面呈均匀分布。而石墨烯掺杂含量过多时, 10% rGO/TiO_2 样品与 15% rGO/TiO_2 样品的 TiO_2 粒子在 rGO 表面表现出部分重叠、聚集现象。

3.4. 拉曼光谱(Raman)分析

图 4 为 GO 与 0%, 5% 石墨烯含量的 rGO/TiO_2 样品的 Raman 光谱图。由图发现, GO 的 D、G 峰依次位于 1325 cm^{-1} 和 1600 cm^{-1} , 其衡量缺陷密度的强度比 I_D/I_G 为 1.13。 TiO_2 样品于 151 cm^{-1} 的 O-Ti-O 振动峰以及 197 、 637 cm^{-1} 的拉曼峰均属于 Anatase TiO_2 的 E_g 振动模。而 396 cm^{-1} 显示了 Anatase TiO_2 的 B_{1g} 拉曼峰, 516 cm^{-1} 为 A_{1g} 与 B_{1g} 的重合振动模。由此说明 TiO_2 样品为纯锐钛矿相, 与 3.1 中 XRD 结果一致。其次, 与 TiO_2 相比, 5% 石墨烯含量的 rGO/TiO_2 不仅持有 Anatase TiO_2 的 $A_{1g} + 2B_{1g} + 3E_g$ 拉曼峰, 还表现出石墨烯的 D、G 特征峰, 这进一步证实了石墨烯与 TiO_2 的复合, 且石墨烯掺杂不改变 TiO_2 晶型结构。但 5% rGO/TiO_2 样品的 I_D/I_G 值减小到 1.06, 这主要归因于碱性水热环境中, GO 表面部分 -OH、-COOH 的还原使碳材料的缺陷程度减小。再者, 5% rGO/TiO_2 样品于 396 、 516 、 637 cm^{-1} 的拉曼峰强度稍有降低, 这是由 TiO_2 粒子与石墨烯的少量重叠造成的[12]。

3.5. 氮气吸附脱附分析

图 5 为 0%, 5% 石墨烯含量的 rGO/TiO_2 样品的氮气吸附 - 脱附图。参照 IUPAC 分类标准, 从图可以看出纯 TiO_2 与 5% 石墨烯含量的 rGO/TiO_2 样品的等温线相似, 均属于 IV 型且有 H2 型滞后环。这与无机氧化物介孔材料的等温线一致, 表明样品中存在介孔结构[13]。但与 TiO_2 相比, 5% rGO/TiO_2 复合物的

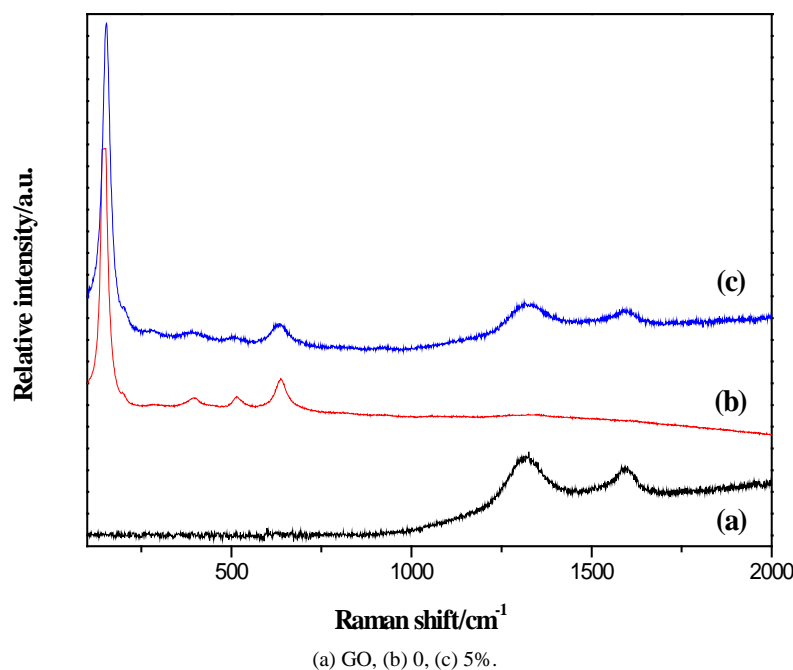


Figure 4. Raman spectra of rGO/TiO_2 samples with different contents of graphene

图 4. GO 和不同石墨烯含量的 rGO/TiO_2 样品的 Raman 谱

比表面积从 $53.48 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 增大到 $71.06 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。这是因为石墨烯本身的比表面积较大，即使少量掺杂也可使复合物的比表面增大。

3.6. 交流阻抗(EIS)分析

图 6 为 0, 5% 石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 EIS 谱。在 EIS 谱中，半圆代表电极/电解质界面的电

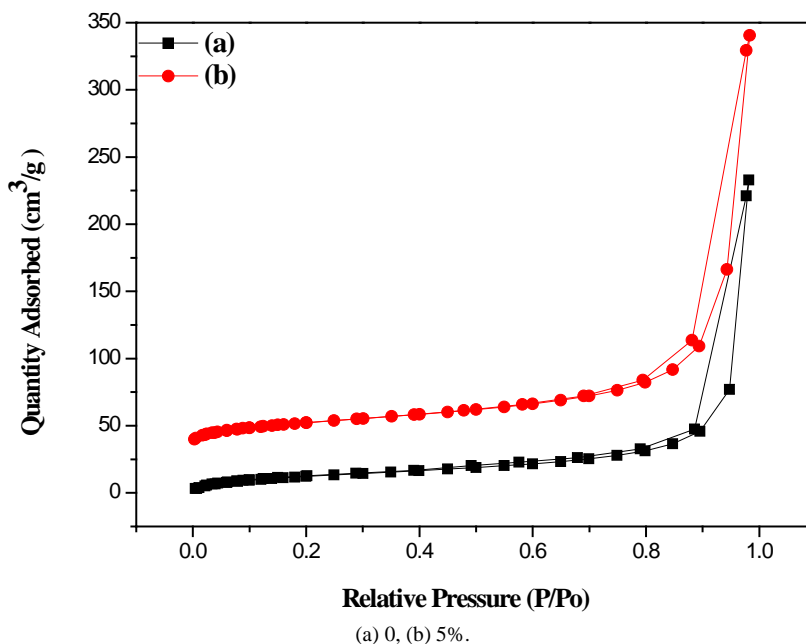


Figure 5. Nitrogen adsorption-desorption isotherms of rGO/TiO₂ samples with different contents of graphene

图 5. 不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 N₂ 吸附脱附曲线

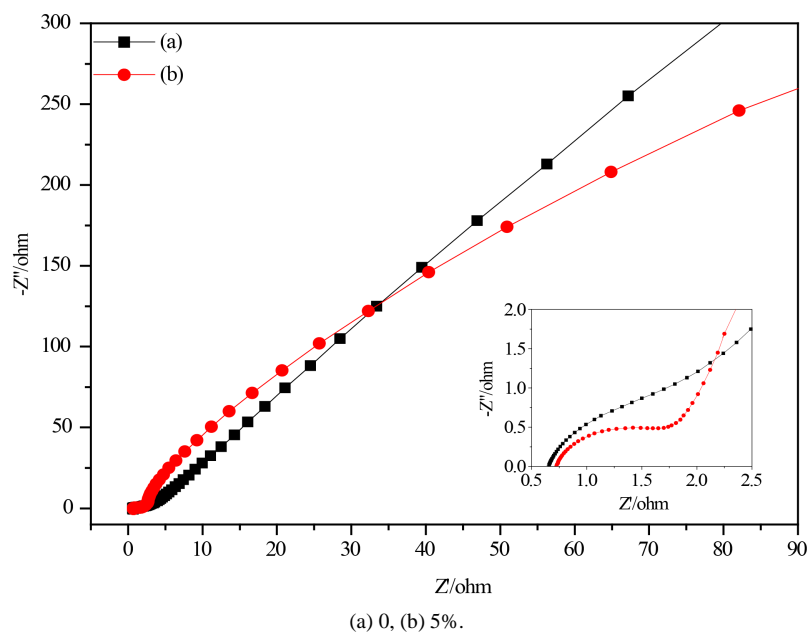


Figure 6. EIS Nyquist plots of rGO/TiO₂ samples with different contents of graphene

图 6. 不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的 EIS 谱

荷转移阻抗,斜线代表离子扩散阻抗。半圆直径越小,电子迁移率越高;而直线越倾斜,离子的扩散程度越大[14]。由图可知,样品的 EIS 谱均包括高频区的半圆和低频区的斜线组成。而且受材料自身电容的影响,谱线与 Z'轴有较小的截距。与 TiO₂相比,5% rGO/TiO₂的半圆直径减小,直线斜率增大。这表明导电性较高、比表面积较大的石墨烯与 TiO₂复合会加快电子的扩散、迁移速率,使5% rGO/TiO₂的复合阻抗减小。

3.7. 光催化性能分析

图7为0%、1%、5%、10%、15%石墨烯含量的 rGO/TiO₂样品对 MB 的光催化降解图。对比图中数据可以发现,不同石墨烯掺杂量的 rGO/TiO₂样品对 MB 的光催化活性均大于纯 TiO₂,且随石墨烯复合含量的增加,样品的光催化效率先增加而后减小。这是因为光催化过程中:(1)零带隙石墨烯持有较高的电子迁移率,它作为电子受体与 TiO₂发生耦合,可加快电子的迁移进而促进 TiO₂光生电子-空穴对的分离,使 TiO₂的光催化活性提高[15][16]。(2)薄片状石墨烯修饰 TiO₂形成了比表面积增大,粒径减小的复合物。这使污染物与光催化剂更充分的接触,进一步改善了 TiO₂的光催化活性[17]。(3)过量的石墨烯不光会覆盖 TiO₂的部分活性位点,还易于生成颗粒分布不均的团聚产物,不利于增强 TiO₂的光催化活性。因此,适量的石墨烯掺杂可最大程度地改善 TiO₂的光催化活性。即石墨烯含量为5%时,结晶度较好、分散均匀的5% rGO/TiO₂复合物的光催化活性提高到86.3%,光催化性能最佳。

4. 结论

本文采用碱性一步水热法在180℃低温控制合成了不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂复合物,并通过XRD、SEM、Raman、Nitrogen adsorption-desorption 等技术和光催化降解亚甲基蓝溶液(MB)测试,分析了石墨

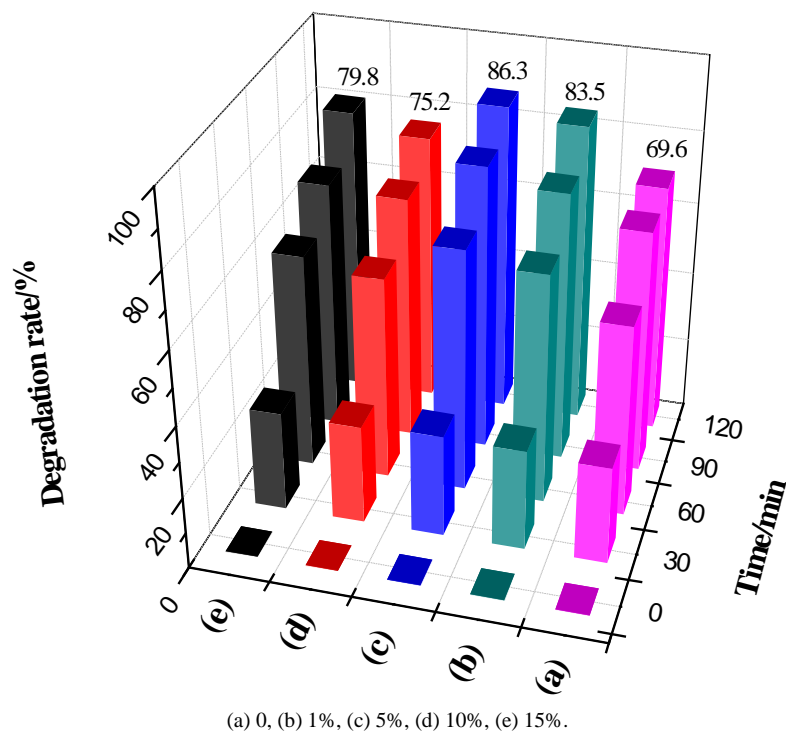


Figure 7. Photocatalytic degradation images of rGO/TiO₂ catalysts with different contents of graphene

图7. 不同石墨烯含量的 rGO/TiO₂ 样品的光催化降解图

烯及其含量对 TiO₂ 结构、形貌和光催化性能的影响。实验表明, 适量的石墨烯掺杂不仅可增强污染物与光催化剂的有效接触, 还可作为电子受体促进 TiO₂ 电子-空穴的分离, 使 TiO₂ 的光催化活性提高。其中石墨烯含量为 5% 的 rGO/TiO₂ 持有结晶度好、粒径减小、比表面积增大、电荷迁移加快等优点, 它对 MB 的光催化活性提高到 86.3%, 光催化性能最佳。这开拓了碳材料改性 TiO₂ 研究的新思路, 并为绿色光催化剂的开发提供了一种可靠方法。

基金项目

山西省“青年三晋学者”支持计划资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Xu, Q., Yu, J., Zhang, J., *et al.* (2015) Cubic Anatase TiO₂ Nanocrystals with Enhanced Photocatalytic CO₂ Reduction Activity. *Chemical Communications*, **51**, 7950-7953. <https://doi.org/10.1039/C5CC01087J>
- [2] Zhang, M., Cheng, J., Xuan, X., *et al.* (2016) CO₂ Synergistic Reduction in a Photoanode-Driven Photoelectrochemical Cell with a Pt-Modified TiO₂ Nanotube Photoanode and a Pt Reduced Graphene Oxide Electrocathode. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **4**, 6344-6354. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00909>
- [3] He, H., Sun, D., Zhang, Q., *et al.* (2017) Iron-Doped Cauliflower-Like Rutile TiO₂ with Superior Sodium Storage Properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 6093-6103. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15516>
- [4] An, Y., Zhang, Z., Fei, H., *et al.* (2017) Ultrafine TiO₂ Confined in Porous-Nitrogen-Doped Carbon from Metal-Organic Frameworks for High-Performance Lithium Sulfur Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 12400-12407. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b16699>
- [5] Wang, F., Ho, J.H., Jiang, Y., *et al.* (2015) Tuning Phase Composition of TiO₂ by Sn⁴⁺ Doping for Efficient Photocatalytic Hydrogen Generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 23941-23948. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06287>
- [6] Chang, M., Song, Y., Sheng, Y., *et al.* (2017) Photoluminescence and Photocatalysis Properties of Dual-Functional Eu³⁺ Doped Anatase Nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry C*, **121**, 2369-2379. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b11013>
- [7] Lu, W.C., Tseng, L.C. and Chang, K.S. (2017) Fabrication of TiO₂-Reduced Graphene Oxide Nanorod Composition Spreads Using Combinatorial Hydrothermal Synthesis and Their Photocatalytic and Photoelectrochemical Applications. *ACS Combinatorial Science*, **19**, 585-593. <https://doi.org/10.1021/acscombsci.7b00077>
- [8] Zhang, S., Xu, J., Hu, J., *et al.* (2017) Interfacial Growth of TiO₂-rGO Composite by Pickering Emulsion for Photocatalytic Degradation. *Langmuir*, **33**, 5015-5024. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b00719>
- [9] Fan X, Peng W, Li, Y., *et al.* (2008) Deoxygenation of Exfoliated Graphite Oxide under Alkaline Conditions: A Green Route to Grapheme Preparation. *Advanced Materials*, **20**, 4490-4493. <https://doi.org/10.1002/adma.200801306>
- [10] Cong, Y., Long, M., Cui, Z., *et al.* (2013) Anchoring a Uniform TiO₂ Layer on Graphene Oxide Sheets as an Efficient Visible Light Photocatalyst. *Applied Surface Science*, **282**, 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.143>
- [11] Long, M., Qin, Y., Chen, C., *et al.* (2013) Origin of Visible Light Photoactivity of Reduced Graphene Oxide/TiO₂ by *In Situ* Hydrothermal Growth of Undergrown TiO₂ with Graphene Oxide. *The Journal of Physical Chemistry C*, **117**, 16734-16741. <https://doi.org/10.1021/jp4058109>
- [12] Xu, Y., Mo, Y., Tian, J., *et al.* (2016) The Synergistic Effect of Graphitic N and Pyrrolic N for the Enhanced Photocatalytic Performance of Nitrogen-Doped Graphene/TiO₂ Nanocomposites. *Applied Catalysis B: Environmental*, **181**, 810-817. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.08.049>
- [13] Qin, G., Zhang, H. and Wang, C. (2014) Ultrasmall TiO₂ Nanoparticles Embedded in Nitrogen Doped Porous Graphene for High Rate and Long Life Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **272**, 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.105>
- [14] Wu, L., Leng, X., Liu, Y., *et al.* (2017) A Strategy for Synthesis of Nanosheets Consisting of Alternating Spinel Li₄Ti₅O₁₂ and Rutile TiO₂ Lamellas for High-Rate Anodes of Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 4649-4657. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15021>
- [15] Liang, Y.Y., Wang, H.L., Chen, Z., Dai, H.J., *et al.* (2010) TiO₂ Nanocrystals Grown on Graphene as Advanced Photocatalytic Hybrid Materials. *Nano Research*, **3**, 701-705. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12274-010-0033-5>
<https://doi.org/10.1007/s12274-010-0033-5>
- [16] Cheng, L., Zhang, S., Wang, Y., *et al.* (2016) Ternary P25-Graphene-Fe₃O₄ Nanocomposite as a Magnetically Recycl-

able Hybrid for Photodegradation of Dyes. *Materials Research Bulletin*, **73**, 77-83.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.06.047>

- [17] Krbal, M., Sopha, H., Podzemna, V., *et al.* (2017) TiO₂ Nanotube/Chalcogenide-Based Photoelectrochemical Cell: Nanotube Diameter Dependence Study. *The Journal of Physical Chemistry C*, **121**, 6065-6071.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b11283>

Hans 汉斯

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org