

TiO₂/MoS₂ 复合材料的制备 及其在光催化和储能电池中的应用研究进展

张 敬 孙学凤 高婷婷 周国伟*

(山东省高校轻工精细化学品重点实验室, 齐鲁工业大学化学与制药工程学院, 济南 250353)

摘 要 TiO₂ 与 MoS₂ 具有良好的物理和化学性质, 但它们在很多领域的应用仍受到自身缺陷的限制。而 TiO₂ 与 MoS₂ 复合后形成的异质结可有效克服两种材料的缺陷、有效提高复合材料的光电属性, 进一步提高复合材料作为光催化剂和电极材料的应用性能。综述了包覆型和负载型 TiO₂/MoS₂ 复合材料的制备及其在光催化和储能电池方面的最新研究进展, 并对复合材料的应用进行了展望。

关键词 TiO₂, MoS₂, 异质结构, 光催化, 储能电池

Research progress on preparation of TiO₂/MoS₂ composite and its application in photocatalysis and energy storage battery

Zhang Jing Sun Xuefeng Gao Tingting Zhou Guowei

(Key Laboratory of Fine Chemicals in Universities of Shandong, School of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Qilu University of Technology, Jinan 250353)

Abstract TiO₂ and MoS₂ have good physical and chemical properties, but their application in many areas are still subject to their own limitation. The hetero junction formed between TiO₂ and MoS₂ composites can effectively overcome the defect of two materials, improve the photoelectric properties of the composites, and further improve the performance of composite material as photocatalyst and electrode material. The preparation of coated and supported TiO₂/MoS₂ composite and the latest research progress of TiO₂/MoS₂ composite in photocatalysis and energy storage battery were reviewed. The application prospect was also discussed.

Key words TiO₂, MoS₂, hetero junction, photocatalysis, energy storage battery

TiO₂ 由于优异的循环稳定性和光化学活性, 在水中的不溶性以及生物相容性, 使其在催化、传感、能量存储和太阳能转换等领域得到广泛应用^[1-6]。但是 TiO₂ 带隙能 (3.2 eV) 较宽, 对可见光利用率低, 同时还存在光生电子-空穴对易复合、量子效率低等问题, 从而限制了其在某些方面的应用^[7]。二维层状材料具有显著的电学、光学和机械性能, 一直是研究的热点^[8]。MoS₂ 为六方晶系二维层状过渡金属硫化物, 单层 MoS₂ 可以看作钼原子层夹在两层硫原子层中间形成的类“三明治”结构, Mo-S 层之间以强共价键相互连接。而 S 层之间是靠沿 z 轴的范德华力相互作用以形成块体材料^[9]。由于 MoS₂ 比表面积大、吸附能力强使其在摩擦、催化

和光电器件^[11]等领域有广泛的应用。

MoS₂ 与 TiO₂ 复合能够促进光生电子-空穴对的有效分离, 增强 TiO₂ 的量子效率。同时 MoS₂ 与 TiO₂ 之间的协同作用, 使 TiO₂/MoS₂ 复合材料比其单一材料表现出更加优异的性能^[12]。随着 MoS₂ 的层数减至单层, 可由间接能带间隙 (1.3 eV) 转为直接能带间隙 (1.8 eV)^[13], 所以少层或单层 MoS₂ 与 TiO₂ 复合后在光催化中表现出优异的性能^[14]。目前制备复合材料主要有水热法^[15]、机械化学法^[16]、化学气相沉积法^[17] 和共还原沉淀^[18] 等方法, 其中水热法简单、易操作、可控性好, 在制备 TiO₂/MoS₂ 复合材料中最为常用。

笔者综述了包覆型 TiO₂/MoS₂ 复合材料和负

基金项目:国家自然科学基金(51372124、51572134 和 51503108); 山东省自然科学基金(BS2015CL018)

作者简介:张敬(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为纳米材料的制备及应用。

联系人:周国伟, 教授, 主要研究方向为纳米材料的可控制备及应用。

载型 $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ 复合材料的制备方法、及其在光催化和储能电池应用中的最新研究进展。

1 $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ 复合材料的制备

层状 MoS_2 可以均匀包覆在 TiO_2 表面,形成包覆型复合材料。同时, TiO_2 可以负载在 MoS_2 表面或 MoS_2 负载在 TiO_2 表面形成负载型复合材料。由于两种材料间的协同作用,可显著提高复合材料的性能。

1.1 包覆型 $\text{TiO}_2/\text{MoS}_2$ 复合材料

过渡金属硫化物和表面光滑的 TiO_2 亲和力差,所以在光滑的 TiO_2 表面沉积过渡金属硫化物是很大的挑战。而 Chen 等^[19]以钛酸四丁酯(TBT)为钛源,在 HF 作用下经水热法制备了表面光滑的氟化 TiO_2 纳米片(F- TiO_2),分别以钼酸钠和硫脲为钼源和硫源,葡萄糖为粘合剂通过水热法制备少层(<4 层) MoS_2 包覆 F- TiO_2 的核-壳纳米复合材料(3D FL- $\text{MoS}_2 @ \text{TiO}_2$)。在反应过程中 TiO_2 纳米片表面的 F^- 可以捕获葡萄糖分子以提供 MoS_2 成核位点,并且可以抑制层状 MoS_2 的堆叠,制备少层 MoS_2 包覆的 $\text{TiO}_2 @ \text{MoS}_2$ 核-壳纳米复合材料。Liu 等^[20]以 TBT 为钛源,尿素为氮源,利用水热法制备出直径约为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 表面光滑的氮掺杂 TiO_2 微球(N- TiO_2)。随后以 MoO_3 为钼源、硫氰化钾为硫源,经水热法制得花状 $\text{TiO}_2 @ \text{MoS}_2$,并在 Ar_2 气氛下煅烧将 N- TiO_2 还原为 N- TiO_{2-x} 得到 N- $\text{TiO}_{2-x} @ \text{MoS}_2$ 核-壳异质结构复合材料。

不同壳层厚度的 $\text{TiO}_2 @ \text{MoS}_2$ 复合材料可以通过控制 MoS_2 层数实现,Dai 等^[21]提出一种无定型层诱导异质生长机制,使 MoS_2 在 TiO_2 无定型层外延生长形成 MoS_2 壳。首先通过水热法制备由无定型层包覆的锐钛矿 TiO_2 纳米晶体,然后以钼酸铵为钼源、硫代乙酰胺(TAA)为硫源,经过水热 MoS_2 逐渐形成层状结构包覆于 TiO_2 材料表面,形成洋葱状 $\text{TiO}_2 @ \text{MoS}_2$ 异质结构复合材料。通过调控钼源和硫源的配比可以实现核-壳 $\text{TiO}_2 @ \text{MoS}_2$ 纳米洋葱异质结构的可控合成。

Xu 等^[22]用三氟化硼乙醚络合物与二乙烯基苯制备出聚合物纳米管(PNT),并用 98% H_2SO_4 磺化,以磺化的 PNT 为模板、TBT 为钛源通过溶胶-凝胶法在 PNT 上包覆 TiO_2 得到同轴电缆型 $\text{PNT} @ \text{TiO}_2$ 纳米复合材料。经煅烧除去模板,得到高度结晶的多孔 TiO_2 纳米管。最后将纳米管分散在葡萄糖溶液中,加入钼酸钠和硫脲,经溶剂热反应后由

超薄多孔 MoS_2 纳米片组成的 MoS_2 纳米团簇均匀包覆在 TiO_2 纳米管上,得到 $\text{TiO}_2 @ \text{MoS}_2$ 复合材料。与 MoS_2 薄片相比,集成的智能结构能够增强锂存储能力。Li 等^[23]以商用 TiO_2 (P25)为钛前驱体,在 NaOH 溶液中经水热反应、 540°C 下煅烧得到具有粗糙表面的超细 TiO_2 纳米带。然后将 TiO_2 纳米带分散到葡萄糖溶液中,以钼酸钠为钼源、硫脲为硫源,经水热得到 MoS_2 均匀垂直生长在 TiO_2 纳米带上的复合材料。在制备过程中 TiO_2 纳米带的表面粗糙度以及葡萄糖可以确保 MoS_2 纳米片的均匀分布。Mao 等^[24]以 P25 为钛前驱体,在 NaOH 溶液中经 180°C 水热得到 $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ 粉末,再经过盐酸酸化、硫酸表面腐蚀得到表面粗糙的锐钛矿 TiO_2 纳米带。将钼酸钠和硫脲加入到分散有 TiO_2 纳米带的蒸馏水中,经过 220°C 水热反应 24h 获得有少层 MoS_2 纳米片涂层的 $\text{TiO}_2 @ \text{MoS}_2$ 复合材料。

1.2 负载型 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ 复合材料

1.2.1 MoS_2 负载在 TiO_2 材料

He 等^[17]通过两种方法制备了 MoS_2 平行负载在 TiO_2 纳米纤维表面和沿边缘生长在 TiO_2 纳米纤维表面的复合材料。其中方法一利用钼酸铵和聚乙烯吡咯烷酮在酸性条件下水热反应制备 MoO_2 纳米粒子,将一定质量的 MoO_2 和 TiO_2 纳米纤维分散在去离子水中并在 60°C 下搅拌 12h 制得 $\text{MoO}_2/\text{TiO}_2$ 复合材料。然后将硫粉置于样品上游在 400°C 下煅烧 1h,形成少层 MoS_2 沿边缘生长在 TiO_2 纳米纤维表面的 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ (E) 异质结复合材料。方法二在剧烈搅拌下,将钼酸铵和 TAA 加入到 TiO_2 纳米纤维的水溶液中,经水热得到少层 MoS_2 平行负载在 TiO_2 表面上的 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ (B) 复合材料。由于 MoS_2 基面的垂直电阻是平行电阻的 2200 倍, $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ (E) 复合材料中 TiO_2 直接结合到 MoS_2 的边缘,在催化过程中光激发电子沿着少层 MoS_2 的每个基面扩散,而不是在 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ (B) 结构中逐层穿过,这种电子传输途径的变化增加了电子到达活性位点的效率,因此 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ (E) 结构具有更高的光催化活性。Yuan 等^[15]以 TBT 为钛源,加入 HF 通过水热法制备暴露 {001} 晶面的 TiO_2 纳米片。然后以钼酸钠为钼源、TAA 为硫源,制备了 TiO_2 纳米片上负载 MoS_2 纳米片的复合材料,并通过调节加入钼源和硫源的量,制备了一系列 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ 光催化剂。

1.2.2 TiO_2 负载在 MoS_2 材料

Liu 等^[16]将 TiO_2 和 MoS_2 球磨 5h,混合物干

燥后与硼氢化钠混合并球磨 0.5h,最后在 Ar 气氛中煅烧,通过机械化学法与原位固态化学还原法得到三维介孔黑色 TiO₂ (MBT) 与 MoS₂ 夹层状纳米片 (MBT/MoS₂/MBT)。扫描电镜 (SEM) 测试显示 TiO₂ 均匀负载在 MoS₂ 纳米片表面,并且在 MoS₂ 和 MBT 间的界面处形成异质结可促进光生电荷的转移,有效提高了 TiO₂ 的催化活性。Zhang 等^[25] 先将 TiCl₄ 分散在 C₂H₅OH 中,再将分散的钛源加入到甘油水溶液中,经超声处理形成 TiO₂ 溶胶,然后加入块状 MoS₂ 经水热反应制备出 TiO₂/MoS₂ 复合光催化剂。SEM 结果显示,尺寸约为 20~30nm 的 TiO₂ 纳米颗粒涂覆在块状 MoS₂ 表面。TiO₂/MoS₂ 杂化结构,不仅改变了 MoS₂ 导带的能级,而且促进颗粒间电子转移进而提高光催化活性。

2 TiO₂/MoS₂ 复合材料在光催化和储能电池中的应用

2.1 在光催化中的应用

近年来,由于全球能源危机以及对环境保护的需求,利用光催化分解水制氢、光催化降解等应用引起广泛关注。贵金属作为助催化剂能够显著增强半导体材料的光催化性能,但是贵金属的高成本限制了其在现实生活中的应用^[26]。在 TiO₂/MoS₂ 复合材料中,MoS₂ 作为助催化剂可以显著增强 TiO₂ 的光催化性能。

2.1.1 光催化制氢

H₂ 由于具有清洁、安全、高效、可储存和可运输等优点成为一种理想的绿色能源^[27],所以利用光解水制氢越来越受到人们的关注^[28]。Zhu 等^[29] 将 P25 和 MoS₂ 经球磨法制备出 TiO₂/MoS₂ 复合光催化剂。并且通过调控 MoS₂ 的量可制备不同比例的 TiO₂/MoS₂ 复合光催化剂,与纯 TiO₂ 相比,TiO₂/MoS₂ 复合光催化剂中 MoS₂ 和 TiO₂ 界面之间的相互作用能够有效增强光生电子的分离和转移效率,降低表面电阻。当 MoS₂ 负载量为 4.0% 时,TiO₂/MoS₂ 复合材料光催化制 H₂ 最大速率达到 150.7 μmol/h,比纯 TiO₂ 高 48.6 倍。当 MoS₂ 负载量超过 4.0% 时,过量的黑色 MoS₂ 将吸收更多的光并抑制 TiO₂ 对光子的有效吸收,TiO₂/MoS₂ 的光催化制 H₂ 活性随着 MoS₂ 负载量的增加而逐渐降低。Zhang 等^[30] 通过浸渍法在立方相 TiO₂ 晶体 (TMC) 表面修饰了化学剥离的 MoS₂,制备了 TMC/MoS₂ 异质结复合材料,并用于光催化制氢,具有协同作用的异质结构能够提高光催化活性,在

相同的条件下,最佳比例的 TMC/MoS₂ 复合材料光催化制 H₂ 生成速率 [0.55 mmol/(h·g)] 是 P25/MoS₂ [0.14 mmol/(h·g)] 的 4 倍。

2.1.2 光催化降解

MoS₂ 与 TiO₂ 复合能够促进 TiO₂ 在光催化过程中光生电子-空穴对的有效分离,增强 TiO₂ 的光催化降解活性。Li 等^[7] 以 TBT 和四硫钼酸铵经水热法得到少层 TiO₂/MoS₂ 异质结复合材料,并将其用于光催化降解甲基橙 (MO),催化活性均高于 P25、TiO₂ 纳米带和 MoS₂ 纳米片。在 15min 内,P25 的降解率约为 91.0%,TiO₂ 纳米带降解率为 92.4%,而具有异质结构的 TiO₂/MoS₂ 纳米带,由于两种材料间的协同作用 MO 可以在 15min 内完全降解。Hu 等^[31] 用锐钛矿纳米 TiO₂、钼酸钠和硫化钠合成纳米 TiO₂/MoS₂ 复合材料,并将其用来降解 MO。Zhang 等^[32] 通过简单的超声-水热合成法制备了具有可见光活性的 TiO₂/MoS₂ @沸石纳米异质结复合材料,与 P25 相比复合材料的异质结能够促进光生电子-空穴对的分离,提高了 MO 的降解速率。

2.2 在储能电池中的应用

将 TiO₂/MoS₂ 复合材料用于储能电池,MoS₂ 能够增加电极材料和电解质之间的接触面积,使复合材料具有更好的循环稳定性和更高的倍率性能。

2.2.1 锂离子电池

LIBs 作为当前最常用的储能元件在手机和笔记本电脑等便携电子设备中应用广泛^[6]。TiO₂ 可以作为良好的电池材料,与 MoS₂ 复合后可以增强材料的储锂性能。Zhuang 等^[33] 利用简便的等体积浸渍法制备了 TiO₂/MoS₂ 纳米纤维框架复合材料,将其作为 LIBs 的负极材料具有较高的比电容和较好的循环稳定性。当电流密度为 40C 时,TiO₂/MoS₂ 复合材料容量为 120mAh/g,在 1000 次循环后容量保持率为 75.2%。Zhu 等^[34] 通过水热法制备了 TiO₂/MoS₂ 复合材料,并将其用于 LIBs 的阳极显示出优异的循环稳定性和倍率性能,当电流密度为 100mA/g 时,100 次循环之后 TiO₂/MoS₂ 复合材料的容量为 604mAh/g。Zhou 等^[35] 通过水热法将 MoS₂ 纳米片彼此互连并通过 TiO₂ 键合界面粘附在 Ti 基板上,制备了无需粘合剂的电极材料。MoS₂ 纳米片垂直生长在 Ti 基板表面为 Li⁺ 插层提供了更多的位点,该材料具有较好的循环稳定性,当电流密度为 1000mA/g 时,这种复合材料经 600 次循环后放电容量为 1189mAh/g。

2.2.2 钠离子电池

钠离子电池由于其较低的材料成本,较丰富的钠资源以及它们的固态电化学与锂离子电池系统的类似性引起了广泛关注。Ryu 等^[36]以钼酸铵为钼源、硫磺为硫源通过静电纺丝技术制备了由 MoS₂ 纳米片组成的 MoS₂ 纳米纤维 (MoS₂-NFs),以四(二甲氨基)钛为钛源,将 TiO₂ 沉积在 MoS₂-NFs 上,并将复合材料作为钠离子电池阳极材料。由于 TiO₂ 层的保护作用降低了 MoS₂-NFs 电极中硫元素的溶解,提高了 MoS₂-NFs 电极的循环性能。复合材料在第二次循环提供了 840mAh/g 的放电容量,循环 30 次后,其放电容量保持率为 64%。Liao 等^[37]利用两步水热法制备直接生长在集电器上的 TiO₂-B/MoS₂ 纳米线阵列并用于钠离子电池,均匀分布在 TiO₂-B 纳米线表面的少层 MoS₂ 改善了 TiO₂-B 的电化学性能,使材料具有更高的容量和倍率性能。其初始充电容量为 232mAh/g,100 次循环后,这种复合材料的充电容量保持在 191mAh/g。

3 结语

TiO₂/MoS₂ 复合材料间的协同作用使其在光催化和储能电池的应用中显示出了良好的性能。在复合材料的制备过程中,其形貌和结构受溶剂、添加剂、反应条件和制备方法等因素的影响而不同,不同形貌或配比的复合材料在光催化和储能电池的应用中有不同的性能。因此,通过合理的选择反应条件制备具有适当形貌和配比的 TiO₂/MoS₂ 复合材料以充分发挥其优异性能是十分有必要的。随着 TiO₂/MoS₂ 复合材料制备方法的不断完善,协同机理的不断深入研究,TiO₂/MoS₂ 复合材料的制备方法将会更加多样化,其应用除在光催化、储能电池等领域的深化外,还可望用于传感、药物控释和污水处理等。

参考文献

- [1] Morais A, Longo C, Araujo J R, et al. Nanocrystalline anatase TiO₂ reduced graphene oxide composite films as photoanodes for photoelectrochemical water splitting studies the role of the reduced graphene oxide[J]. Phys Chem Chem Phys, 2015, 18(4): 2608-2616.
- [2] Seifvand N, Kowsari E. Novel TiO₂/graphene oxide functionalized with cobalt complex for significant degradation of NO_x and CO[J]. RSC Adv, 2015, 5(114): 93706-93716.
- [3] Hu W Y, Zhou W, Zhang K F, et al. Facile strategy for controllable synthesis of stable mesoporous black TiO₂ hollow spheres with efficient solar-driven photocatalytic hydrogen evolution[J]. J Mater Chem A, 2016, 4(19): 7495-7502.
- [4] Ren H, Yu R B, Wang J Y, et al. Multishelled TiO₂ hollow microspheres as anodes with superior reversible capacity for lithium ion batteries[J]. Nano Lett, 2014, 14(11): 6679-6684.
- [5] Song C, Wang L F, Gao F, et al. Two-dimensional hollow TiO₂ nanoplates with enhanced photocatalytic activity[J]. Chem Eur J, 2016, 22(18): 6368-6373.
- [6] Zhang Y, Yang Y C, Hou H S, et al. Enhanced sodium storage behaviors of carbon coated anatase TiO₂ hollow spheres[J]. J Mater Chem A, 2015, 3(37): 18944-18952.
- [7] Li H D, Wang Y N, Chen G H, et al. Few-layered MoS₂ nanosheets wrapped ultrafine TiO₂ nanobelts with enhanced photocatalytic property[J]. Nanoscale, 2016, 8(11): 6101-6109.
- [8] Rai A, Valsaraj A, Movva H C, et al. Air stable doping and intrinsic mobility enhancement in monolayer molybdenum disulfide by amorphous titanium suboxide encapsulation[J]. Nano Lett, 2015, 15(7): 4329-4336.
- [9] Zhang G, Liu H J, Qu J H, et al. Two-dimensional layered MoS₂: rational design, properties and electrochemical applications[J]. Energ Environ Sci, 2016, 9(4): 1190-1209.
- [10] Yu X Y, Feng Y, Jeon Y, et al. Formation of Ni-Co-MoS₂ nanoboxes with enhanced electrocatalytic activity for hydrogen evolution[J]. Adv Mater, 2016, 28(40): 9006-9011.
- [11] Wang X D, Wang P, Wang J L, et al. Ultrasensitive and broadband MoS₂ photodetector driven by ferroelectrics[J]. Adv Mater, 2015, 27(42): 6575-6581.
- [12] Sankapal B R, Salunkhe D B, Majumder S, et al. Solution processed CdS quantum dots on TiO₂: light induced electrochemical properties[J]. RSC Adv, 2016, 6: 83175-83184.
- [13] Shen M, Yan Z P, Yang L, et al. MoS₂ nanosheet/TiO₂ nanowire hybrid nanostructures for enhanced visible-light photocatalytic activities[J]. Chem Commun, 2014, 50(97): 15447-15449.
- [14] Hai X, Chang K, Pang H, et al. Engineering the edges of MoS₂ (WS₂) crystals for direct exfoliation into monolayers in polar micromolecular solvents[J]. J Am Chem Soc, 2016, 138(45): 14962-14969.
- [15] Yuan Y J, Ye Z J, Lu H W, et al. Constructing anatase TiO₂ nanosheets with exposed (001) facets/layered MoS₂ two-dimensional nanojunction for enhanced solar hydrogen generation[J]. ACS Catal, 2016, 6(2): 532-541.
- [16] Liu X F, Xing Z P, Zhang H, et al. Fabrication of 3D mesoporous black TiO₂/MoS₂/TiO₂ nanosheets for visible-light-driven photocatalysis[J]. ChemSusChem, 2016, 9(10): 1118-1124.
- [17] He H Y, Lin J H, Fu W, et al. MoS₂/TiO₂ edge-on heterostructure for efficient photocatalytic hydrogen evolution[J]. Adv Energy Mater, 2016, 6(14): 1066464.
- [18] Haandel L V, Geus J W, Weber T. Direct synthesis of TiO₂-supported MoS₂ reductive coprecipitation[J]. Chemcatchem,

- 2016,8(7):1367-1372.
- [19] Chen B,Zhao N Q,Guo L C, et al.Facile synthesis of 3D few-layer MoS₂ coated TiO₂ nanosheet core-shell nanostructures for stable and high-performance lithium-ion batteries[J]. Nanoscale,2015,7(30):12895-12905.
- [20] Liu X F,Xing Z P,Zhang Y, et al.Fabrication of 3D flower-like black N-TiO_{2-x}@ MoS₂ for unprecedented-high visible-light-driven photocatalytic performance[J].Appl Catal B-Environ,2017,201:119-127.
- [21] Dai R,Zhang A Q,Pan Z C, et al.Epitaxial growth of lattice-mismatched core-shell TiO₂@ MoS₂ for enhanced lithium-ion storage[J].Small,2016,12(20):2792-2799.
- [22] Xu X,Fan Z Y,Ding S J, et al.Fabrication of MoS₂ nanosheet @ TiO₂ nanotube hybrid nanostructures for lithium storage [J].Nanoscale,2014,6(10):5245-5250.
- [23] Li X D,Li W,Li M C, et al.Glucose-assisted synthesis of the hierarchical TiO₂ nanowire@ MoS₂ nanosheet nanocomposite and its synergistic lithium storage performance[J].J Mater Chem A,2015,3(6):2762-2769.
- [24] Mao M L,Mei L,Di Guo, et al.High electrochemical performance based on the TiO₂ nanobelt@ few-layered MoS₂ structure for lithium-ion batteries[J]. Nanoscale, 2014, 6 (21) : 12350-12353.
- [25] Zhang W P,Xiao X Y,Zheng L L, et al.Fabrication of TiO₂/ MoS₂ composite photocatalyst and its photocatalytic mechanism for degradation of methyl orange under visible light[J]. Can J Chem Eng,2015,93(9):1594-1602.
- [26] Yang X X,Huang H Y,Jin B, et al.Facile synthesis of MoS₂/ B-TiO₂ nanosheets with exposed {001} facets and enhanced visible-light-driven photocatalytic H₂ production activity[J]. RSC Adv,2016,6(108):107075-107080.
- [27] Qin N,Xiong J H,Liang R W, et al.Highly efficient photocatalytic H₂ evolution over MoS₂/CdS-TiO₂ nanofibers prepared by an electrospinning mediated photodeposition method[J]. Appl Catal B-Environ,2017,202:374-380.
- [28] Zhao Y W,Zhang L Q,Wei W, et al.Effect of annealing temperature and element composition of titanium dioxide/graphene/hemin catalysts for oxygen reduction reaction[J].RSC Adv,2015,5(101):82879-82886.
- [29] Zhu Y Y,Ling Q,Liu Y F, et al.Photocatalytic H₂ evolution on MoS₂-TiO₂ catalysts synthesized via mechanochemistry [J].Phys Chem Chem Phys,2015,17(2):933-940.
- [30] Zhang P,Tachikawa T,Fujitsuka M, et al.Efficient charge separation on 3D architectures of TiO₂ mesocrystals packed with chemically exfoliated MoS₂ shell in synergetic hydrogen evolution[J].Chem Commun,2015,51(33):7187-7190.
- [31] Hu K H,Hu X G,Xu Y F, et al.Synthesis of nano-MoS₂/ TiO₂ composite and its catalytic degradation effect on methyl orange[J].J Mater Sci,2010,45(10):2640-2648.
- [32] Zhang W P,Xiao X Y,Zheng L L, et al.Fabrication of TiO₂/ MoS₂@ zeolite photocatalyst and its photocatalytic activity for degradation of methyl orange under visible light[J].Appl Surf Sci,2015,358:468-478.
- [33] Zhuang W,Li L C,Zhu J H, et al.Facile synthesis of mesoporous MoS₂-TiO₂ nanofibers for ultrastable lithium ion battery anodes[J].Chemelectrochem,2015,2(3):374-381.
- [34] Zhu X Q,Yang C,Xiao F, et al.Synthesis of nano-TiO₂-decorated MoS₂ nanosheets for lithium ion batteries[J].New J Chem,2014,39(1):683-688.
- [35] Zhou Y,Liu Y,Zhao W X, et al.Growth of vertically aligned MoS₂ nanosheets on Ti substrate through self-supported bonding interface for high-performance lithium-ion batteries: a general approach[J].J Mater Chem A,2016,4(16):5932-5941.
- [36] Ryu W H,Jung J W,Park K, et al.Vine-like MoS₂ anode materials self-assembled from 1-D nanofibers for high capacity sodium rechargeable batteries [J]. Nanoscale, 2014, 6 (19) : 10975-10981.
- [37] Liao J Y,Luna B D,Manthiram A.TiO₂-B nanowire arrays coated with layered MoS₂ nanosheets for lithium and sodium storage[J].J Mater Chem A,2015,4(3):801-806.

收稿日期:2017-02-03

(上接第 42 页)

- [28] Kevin J.Beltis,Paul M.Drennan,Michael J.Jakubowski, et al. Strippable coatings for forensic collection of trace chemicals from surfaces[J].Analytical Chemistry Anal,2012,84:10514-10517.
- [29] Michael J.Jakubowski,Kevin J.Beltis,Paul M.Drennan, et al. Forensic collection of trace chemicals from diverse surfaces with strippable coatings[J].The Royal Society of Chemistry, 2013,138:6398-6403.
- [30] 夏成宝,杨苹.飞机原位防腐处理涂料的研制及应用[J].表面技术,2002,31(04):55-56.
- [31] 李志广,黄红军,张敏等.一种可剥性气相防锈涂料的研制 [J].材料保护,2006,02:42-44.
- [32] 李志广,黄红军,张敏等.可剥性气相防锈涂料在海洋环境中的防锈实验研究[J].装备环境工程,2006,3(02):47-49.
- [33] 孙凤璨,沈彬.新型 UV 固化可剥性金属涂料的合成及性能研究[J].化工时刊,2010,24(10):12-16.
- [34] Li Yan,Chen Xiaoyan,Li Qianqian, et al.Layer-by-layer strip-pable Ag multilayer films fabricated by modular assembly[J]. Langmuir,2014,30:548-553.

收稿日期:2017-03-03

修稿日期:2018-02-26