

光催化材料的设计与性能调控

王育华, 赵 飞

(1. 光转换材料与技术国家地方联合工程实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学材料与能源学院, 兰州 730000)

摘 要: 针对光催化剂存在的光吸收效率不足、载流子易复合等关键问题, 总结了本实验室从光吸收、载流子分离、表面反应、全天候光催化 4 个方面对光催化材料进行改性或开发新型光催化材料, 探索了光催化材料在有机污染物降解、光催化产氢、产氧、尾气处理等方面的应用, 基于能带理论对光催化活性的提升机理进行了解释, 并对未来光催化材料的发展方向进行了展望。

关键词: 光催化材料; 光吸收; 载流子分离; 表面反应; 全天候光催化
中图分类号: O643.32+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0454-5648(2023)09-2349-13
网络出版时间: 2023-06-26



Design and Performance Modulation of Photocatalytic Materials

WANG Yuhua, ZHAO Fei

(National and Local Joint Engineering Laboratory of Optical Conversion Materials and Technology, School of Materials and Energy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this paper, the modification of photocatalytic materials or the development of novel photocatalytic materials from four aspects of light absorption, carrier separation, surface reaction and all-weather photocatalysis in this laboratory was summarized, and the applications of photocatalytic materials in organic pollutant degradation, photocatalytic hydrogen and oxygen production and tail gas treatment were discussed. The mechanism of photocatalytic activity enhancement was analyzed based on the energy band theory. In addition, the future development direction of photocatalytic materials was also prospected.

Keywords: photocatalytic materials; light absorption; carrier separation; surface reaction; all-weather photocatalysis

随着现代社会的不断发展, 人类所面临的环境与能源问题日益突出^[1]: 一方面, 工业化高速发展导致的环境污染逐渐恶化, 空气、水体中的污染物含量越来越高; 另一方面, “碳达峰、碳中和”国家战略目标下对于可替代化石燃料的清洁能源的需求日趋迫切。这些问题对当代科学技术的发展提出了前所未有的挑战。中国太阳能资源丰富, 年平均日照时间超过 2 000 h 的地区占总国土面积的 2/3, 利用取之不尽的太阳能来解决亟待解决的环境和能源问题的方法受到了越来越多的关注。1972 年, 文献[2]报道了 TiO₂ 电极能够实现光催化

分解水产生氢气和氧气后, 立刻引起了众多学者的广泛关注, 并在污染降解、光催化杀菌除臭、二氧化碳还原、固氮等方面的展现出美好的应用前景。然而, 由于光吸收效率低、载流子分离效率低、表面反应速率低等原因, 迄今为止光催化材料的总体效率依然较低, 这严重限制了光催化技术的应用。

1 光催化反应的基本原理

图 1 为光催化反应的 3 个主要过程示意图。由图 1 可见, 当入射光子的能量大于或等于光催化材

收稿日期: 2023-05-05。 修订日期: 2023-06-08。

基金项目: 国家自然科学基金(51372105、51672115、21501080)资助。

第一作者: 王育华(1965—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-05-05. Revised date: 2023-06-08.

First author: WANG Yuhua (1965—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wyh@lzu.edu.cn

料禁带宽度的能量,光催化材料能够直接吸收光子的能量,并将电子从价带激发至导带,产生具有氧化还原能力的光生电子-空穴对^[3]。光生电子或空穴分离并向光催化材料的表面转移,最终转移到材料表面的光生电子和空穴能够参与氧化或还原反应,驱动催化剂表面的有机污染物或部分无机污染物深度矿化净化,也能够还原水或二氧化碳产生氢气、甲烷等清洁能源^[4]。光生电子受到光生空穴 Coulombic 力的作用,两者之间具有很大的复合趋势,容易在光催化材料内部或表面复合湮灭,并以热能或光能的形式向外放出能量。复合湮灭所消耗的光生电子-空穴对越多,就导致真正转移到表面参与氧化还原反应的载流子越少,最终光催化反应效率就越低^[5]。

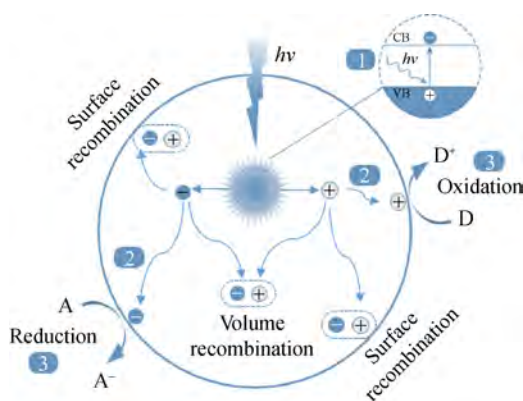


图1 光催化反应的3个主要过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the three main processes of photocatalytic reaction

电子或空穴从激发产生到参与表面还原氧化反应这一完整的光催化反应过程可以简单的分成3个步骤:光吸收、载流子分离与传输、表面反应^[6]。每一个步骤的效率高低都决定了最终光催化反应总效率的高低。首先,对于光吸收过程,由于半导体光催化材料(如 TiO_2)的本征带隙往往较大,材料只能吸收利用紫外光,因此导致其对太阳光的吸收利用率不足^[7]。此外,材料颗粒尺寸、形貌对入射光的捕集效率影响较大,如表面光滑的颗粒比含有较多介孔的颗粒对入射光的反射更强烈,导致光捕集效率较低,这也对光吸收过程存在一定的影响。而对于载流子分离和传输过程,由于光生电子-空穴对在向材料表面迁移过程中极易发生复合,导致实际参与光催化反应的载流子数量降低,进而导致光催化反应效率低下^[8]。对于表面反应过程,往往认为表面反应过程是3个关键步

骤中最慢,可以认为表面反应是整个光催化反应过程中的决速步骤,因此加速表面反应速率非常关键。同时,反应物的活化能、吸脱附过程、活性位点等问题都会影响表面反应速率^[9]。另外,在自然条件下,昼夜交替导致光催化材料无法持续获得太阳光照射,这一问题也导致在时间维度上光催化材料的平均效率较低。

2 新型光催化材料的开发

针对目前光催化材料中存在的光吸收效率低、载流子易复合等问题,本课题组提出针对光吸收、载流子分离、表面反应3个主要过程,对光催化材料进行改性提高或研制新型光催化材料。

2.1 光吸收过程

1) 掺杂

离子掺杂能够在材料的能带间隙中形成杂质能级,电子能够从杂质能级直接跃迁到导带,或者从价带直接跃迁至杂质能级,从而有效降低激发产生光生电子所需的能量。如将 Fe^{3+} 引入 $\text{CaSn}(\text{OH})_6/\text{SnO}_2(\text{FCSH})$ 复合光催化剂中时,得到的 FCSH 样品带隙明显降低,且对可见光的吸收能力有明显的提升(图 2a)。通过对样品的瞬时光电流密度进行表征,可以发现掺杂之后的样品对可见光响应能力提升明显(图 2b)。对有机污染物 MB 的降解实验可以发现,在可见光照射下 FCSH 样品对有机污染物具有较强的降解活性(图 2c),这表明 Fe^{3+} 的引入成功使原本只对紫外光存在响应能力的材料获得了可见光催化活性^[10]。此外,将 Mo 和 C 元素同时引入 TiO_2 纳米颗粒中,也能够使 TiO_2 的吸收边红移至可见光区(图 2d 和图 2e),这是由于 C 元素和 Mo 元素分别能够在价带和导带附近形成杂质能级,降低电子跃迁所需的光子能量。基于此,在模拟太阳光下掺杂后的样品对 MO 的降解活性明显提高(图 2f)^[11]。同样的,将 B 和 N 元素引入 TiO_2 纳米管中,也能够造成 TiO_2 纳米管的吸收边红移(图 2g),由于增强了对光的吸收效率,因此在紫外-可见光下对 MO 的降解效率明显提高(图 2h 和图 2i)^[12]。

2) 空位

当材料中含有氧空位时,会在能带间隙中形成空位能级,在光照条件下电子能够直接从空位能级跃迁至价带,从而降低材料激发所需的光子能量。如在 SnO_2 中引入氧空位,能够将吸收边红移至可见光区间(图 3a),使带隙从 3.81 eV 降低至 2.53 eV,从而使原本仅对紫外光有响应能力的

SnO_2 在可见光下具有很强的光催化降解能力(图 3b 和图 3c)^[13]。此外, 对氧空位 SnO_2 进一步的研究发现, 引入氧空位后, 样品对红外光的吸收也明

显增强, 通过对 MO 的光催化降解实验可以发现, 在红外光照下材料也表现出较强的光催化降解活性(图 3d~图 3f)^[14]。

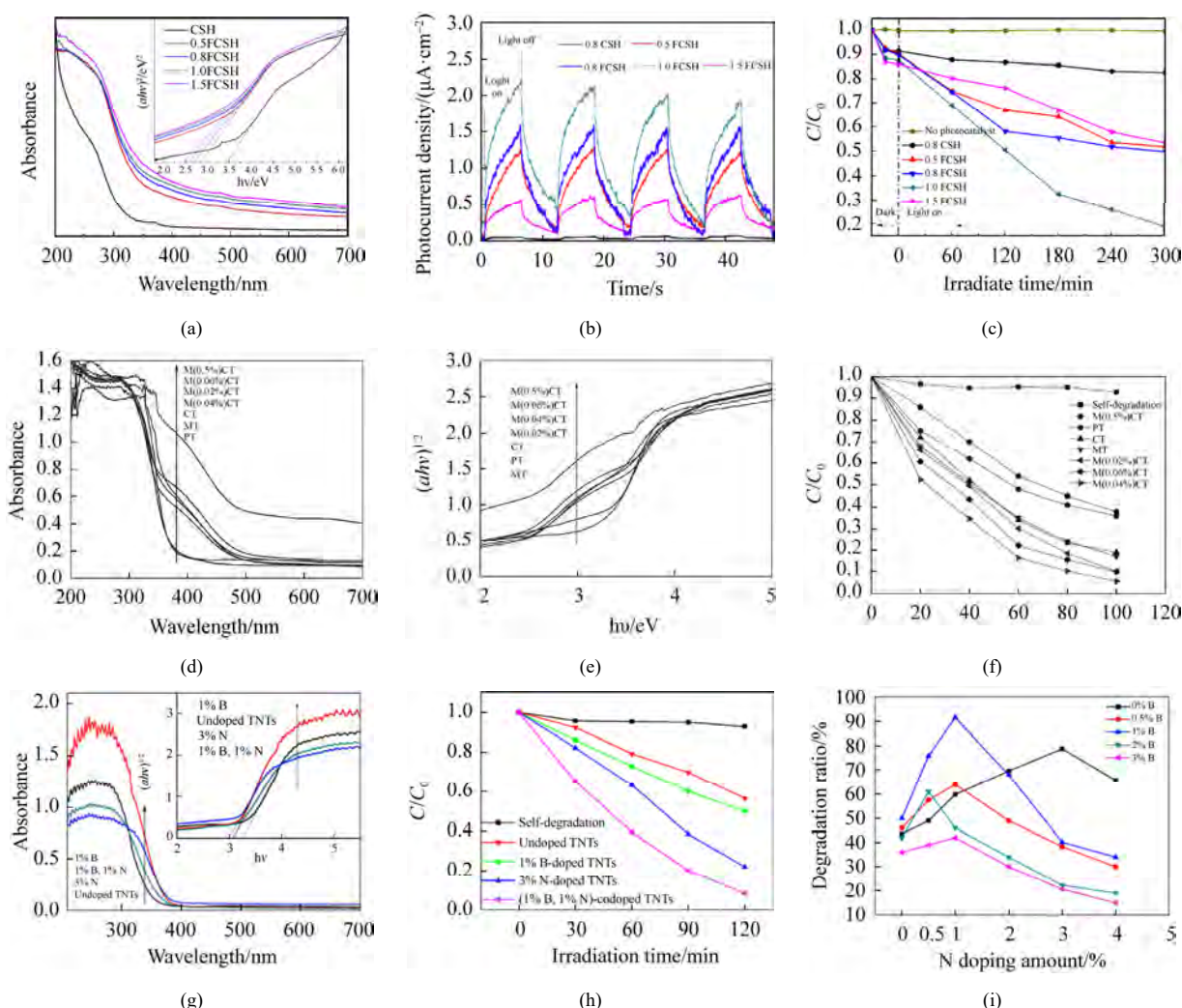


图 2 (a)不同 Fe^{3+} 浓度的掺杂 $\text{CaSn}(\text{OH})_6/\text{SnO}_2$ (FCSH)样品的紫外-可见吸收光谱, 插图为能带间隙(E_g); (b)在可见光照条件下, FCSH 样品的瞬态光电流密度图; (c)在可见光照射下, 不同 FCSH 样品对亚甲基蓝(MB)溶液降解浓度随光照时间的变化^[10]; (d)掺杂 TiO_2 的 UV-Vis 吸收光谱和(e)能带间隙(E_g)图; (f)在模拟太阳照射下, 纯、单掺杂和共掺杂纳米 TiO_2 对甲基橙溶液(MO)的光催化降解率^[11]; (g)样品的紫外-可见吸收光谱, 插图是样品的能带间隙图; (h)不同掺杂样品对 MO 溶液的光催化降解随光照时间的变化; (i)B 和 N 元素掺杂量对 MO 光催化降解效率的影响(照射时间: 120 min)^[12]

Fig. 2 (a) UV-Vis absorption spectra of doped $\text{CaSn}(\text{OH})_6/\text{SnO}_2$ (FCSH) samples with different Fe^{3+} ion concentrations, inset with energy band gap (E_g); (b) Plots of transient photocurrent density of FCSH samples under visible light irradiation conditions; (c) Degradation concentration of methylene blue (MB) solution by different FCSH samples under visible light irradiation with irradiation time under visible light irradiation^[10]; (d) UV-Vis absorption spectra and (e) Energy band gap (E_g) of doped TiO_2 ; (f) Photocatalytic degradation rates of pure, mono- and co-doped nano- TiO_2 against methylene orange solution (MO) under simulated solar irradiation^[11]; (g) UV-Vis absorption spectra of the samples, inset is the energy band gap map of the samples. (h) Variation of photocatalytic degradation of MO solution by different doped samples with irradiation time; (i) Effect of B and N elemental doping on the photocatalytic degradation efficiency of MO (Irradiation time: 120 min)^[12]

3) 形貌控制

除了上述控制合成条件暴露晶体高活性晶面的方式, 利用模板法合成具有空心结构的光催化剂

也是提高材料光催化效率的有效手段。在光催化反应中, 空心纳米结构与实心结构相比具有明显的优势, 包括通过入射光的多次散射增强光吸收; 超薄

壳层缩短载流子的传输距离,从而降低电荷复合概率,同时增加比表面积,进而提供更多的反应活性位点^[15]。这些不仅进一步提高光催化材料的光捕集能力,而且加速表面反应过程。而且因为外壳的内外表面可以装载不同类型的助催化剂,因此,其最显著的优点在于反应位点在空间上可以分离。在自然界中,许多生物组织,如绿叶中的叶绿体、类囊体,都是中空结构,由于被膜结构使光合作用和细胞呼吸在空间上分离,因此内部的光合作用得以高效进行^[16]。以 SiO_2 作为模板,通过简单的液相法合成具有空心球结构的 CdS 光催化剂,相比于传统极易团聚的颗粒状 CdS ,空心球状 CdS 光催化

剂具有比表面积高、光吸收效率高等优点,在此基础上合成了 $\text{PdS}/\text{CdS}/\text{MoS}_2(\text{PCM})$ 复合光催化剂,其中 PdS 在 CdS 壳层的内侧,而 MoS_2 在 CdS 壳层的外侧(图 4a 和图 4b)。 PdS 具有比 CdS 更正的费米能级电位,而 MoS_2 的费米能级电位要负于 CdS 。当三者接触之后,便形成了由 MoS_2 到 CdS 和由 CdS 到 PdS 方向的双内建电场。 CdS 中产生的光生电子在双内建电场的作用下能够转移向 MoS_2 ,而光生空穴则转移向 PdS ,由此形成载流子空间分离效果(图 4c)^[17]。最终,PCM 在可见光下的产氢速率达到了 $7.9 \text{ mmol}/(\text{g}\cdot\text{h})$,是 CdS 纳米颗粒的 115 倍。

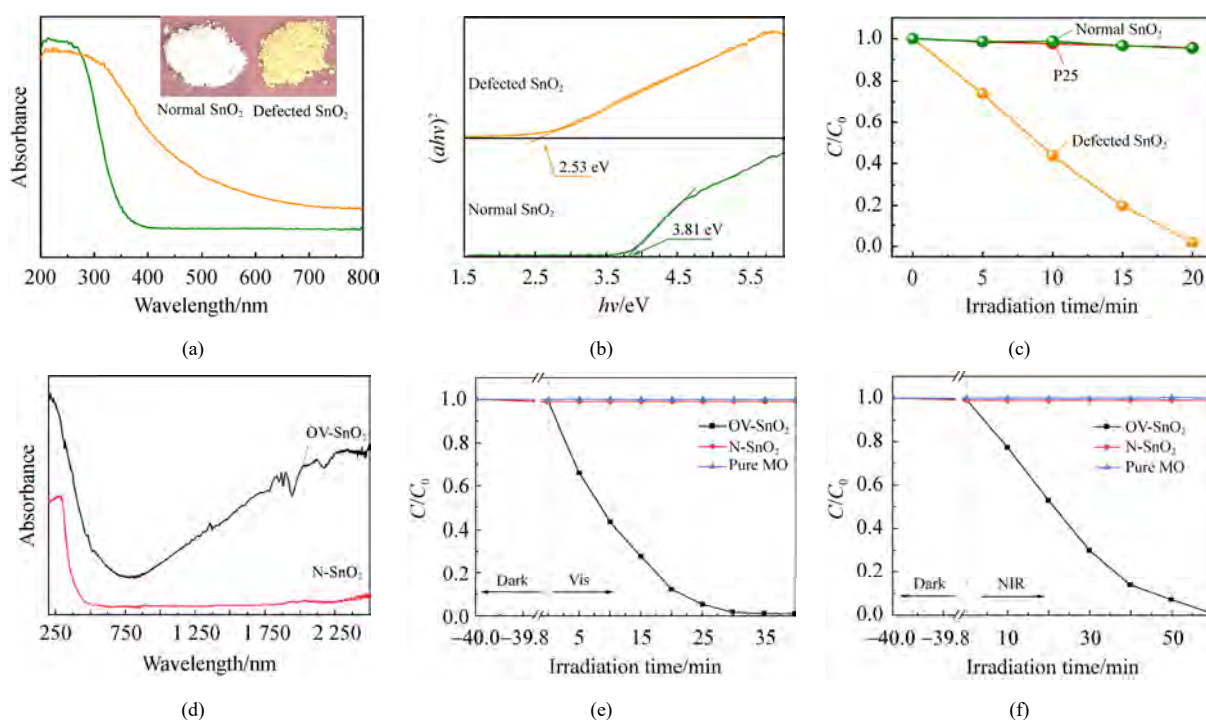


图 3 (a)氧空位 SnO_2 的 UV-Vis 吸收光谱和(b)能带间隙图; (c)可见光下对 MO 的光催化降解^[13]; (d)氧空位 SnO_2 的 UV-Vis-NIR 吸收光谱; (e)可见光和(f)红外光下对 MO 的光催化降解^[14]

Fig. 3 (a) UV-Vis absorption spectrum and (b) energy band gap of oxygen vacancy SnO_2 ; (c) photocatalytic degradation of MO in visible light^[13]; (d) UV-Vis-NIR absorption spectrum of oxygen vacancy SnO_2 ; (e) photocatalytic degradation of MO in visible and (f) infrared light^[14]

将空位缺陷、异质结构筑与形貌控制相结合,能够增强光捕集能力的同时利用缺陷能级增强对可见光的吸收,进而优化载流子的分离效率,比如以 ZnO 作为模板合成了 $\text{Ag}_2\text{S}@\text{CdS}/\text{ZnS}(\text{ACZ})$ 复合光催化剂。其中, ZnS 、 CdS 和 Ag_2S 在壳层中由内向外依次排列(图 4d),且 ZnS 在制备过程中引入了 Zn 空位,能够在可见光下具有一定的光催化产氢性能。形成空心结构之后,由于材料的比表面积显著提高,同时内部空腔以及壳层介孔对入射光的

多次反射作用,样品对入射光的吸收能力显著提高(图 4e)。由于 Ag_2S 、 CdS 及 ZnS 的 Fermi 能级电位依次增加,因此,当三者接触后会形成 2 个由壳层外侧指向内侧的内建电场。在内建电场的作用下,光生电子会向壳层的外侧移动,而光生空穴则留在内侧,形成载流子空间分离的效果(图 4f)^[18]。由此,ACZ 在可见光下的产氢速率达到 $3.76 \text{ mmol}/(\text{g}\cdot\text{h})$,是含有 Zn 空位 ZnS 的 136.6 倍。此外,通过双助催化剂空间分离的负载方式,能够引导载流子向壳

层 2 侧不同的空间进行转移。利用模板法, 在 SiO_2 模板上依次沉积 MnO_x 、 CdS 和 CuS , 能够得到 $\text{MnO}_x/\text{CdS}/\text{CuS}(\text{MCC})$ 光催化剂。利用 CuS 与 CdS 之间存在的界面电荷传输作用, CdS 产生的光生电子能够直接跃迁至 CuS , 并参与 H^+ 的还原。而 CdS 价带中的光生空穴则转移到 MnO_x 并进一步参与氧化反应(图 4g~图 4j)^[19]。最终 MCC 在可见光下的产氢速率达到了 $2.4 \text{ mmol}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 比 CdS 空心球高了 18 倍。

综上所述, 在光催化剂中掺杂杂质离子或者

引入氧空位等缺陷都能够在带隙中间引入缺陷能级, 从而有效降低光催化剂对高能光子的依赖。但杂质离子的掺杂浓度过高同样会形成载流子的复合中心, 同时, 氧空位的浓度在制备过程中不易控制, 这两点也成为缺陷工程改性方法的瓶颈; 而改变材料的形貌能够利用对入射光的多次反射提高光捕集效率, 同样能够达到提高光吸收效率的目的。在特殊形貌的基础上构筑异质结, 能够增大复合界面的作用范围, 进一步增强载流子分离效果。

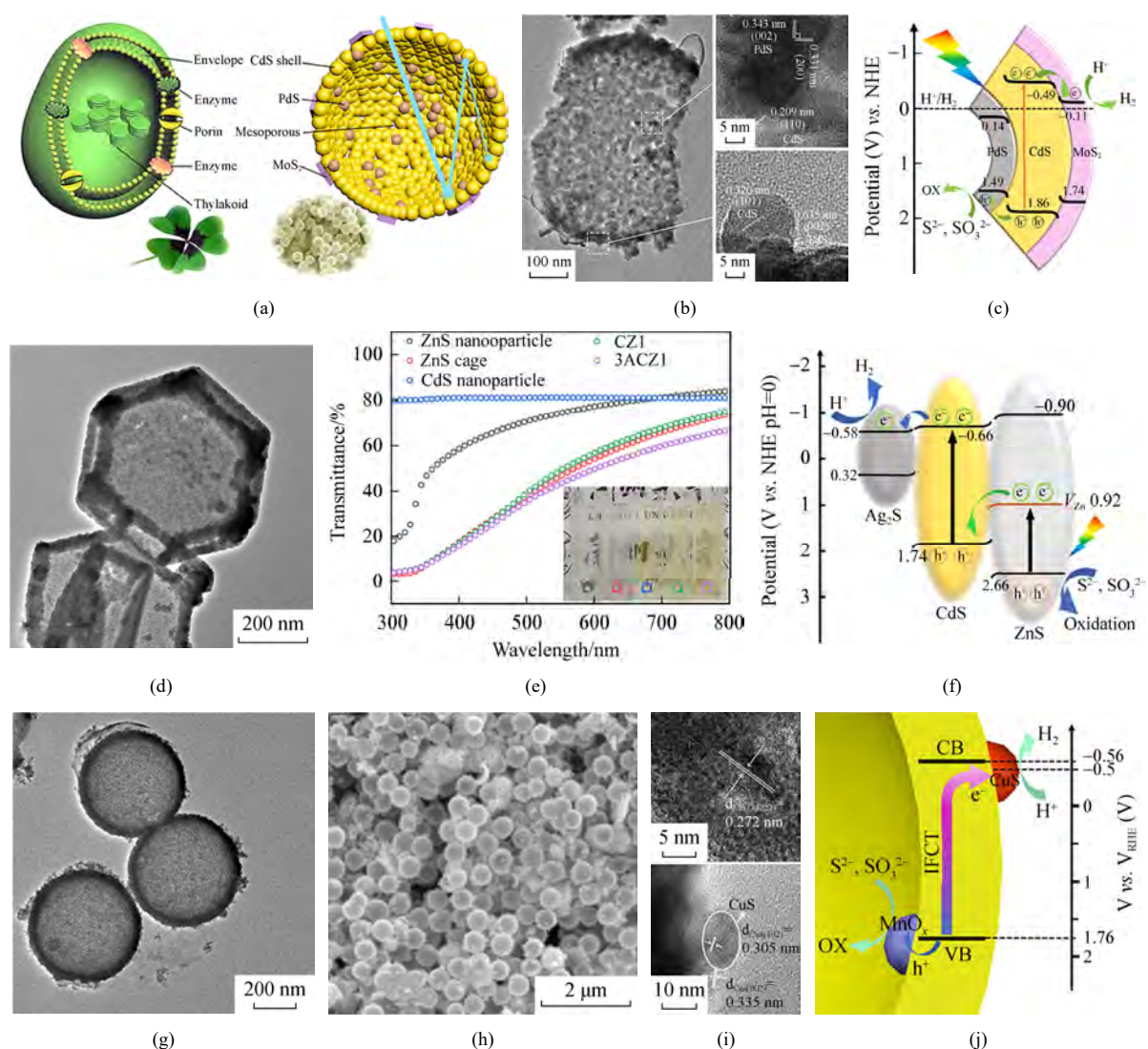


图 4 (a)叶绿体结构和 PdS@CdS@MoS_2 (PCM) 的结构(插图为样品的 SEM 照片); (b)破损 PCM 颗粒的 TEM 及其高分辨 TEM(HRTEM)照片; (c) PCM 样品中的电荷迁移示意图^[17]; (d) $\text{Ag}_2\text{S@CdS/ZnS}$ (ACZ) 的 TEM 照片; (e)各样品悬浊液不同波长下的透射率(0.05 g/L); (f) ACZ 中电荷传输示意图^[18]; (g) $\text{MnO}_x/\text{CdS}/\text{CuS}$ (MCC)样品的 TEM、(h) SEM 照片、(i) HRTEM 照片; (j) MCC 样品中的电荷传输示意图^[19]

Fig. 4 (a) Chloroplast structure and structure of PdS@CdS@MoS_2 (PCM) (inset shows SEM images of the samples); (b) TEM image of broken PCM particles and their high-resolution TEM (HRTEM) images; (c) Schematic representation of charge migration in PCM samples^[17]; (d) TEM image of $\text{Ag}_2\text{S@CdS/ZnS}$ (ACZ); (e) Transmittance of each sample suspension at different wavelengths (0.05 g/L); (f) Schematic diagram of charge transport in ACZ^[18]; (g) TEM, (h) SEM, (i) HRTEM images of $\text{MnO}_x/\text{CdS}/\text{CuS}$ (MCC) samples; (j) Schematic representation of charge transport in MCC samples^[19]

2.2 载流子分离过程

对于带隙较窄的可见光催化剂, 由于本身能够吸收利用较大比例的太阳光, 所以光吸收不是其最主要的制约因素, 而光生载流子容易复合是导致其光催化效率较低的重要原因, 因此往往更加关注于其内部的载流子分离。在不同半导体催化剂之间构筑复合界面, 能够利用能带电位之间的差异驱动光生电子和空穴向不同方向转移, 从而提升材料的载流子分离能力。构筑合理的内建电场也可以增加载

流子的分离能力, 在内建电场的驱动下, 光生电子和光生空穴会在 Coulombic 力的作用下向相反的方向移动, 进而降低载流子的复合几率。

通过水热法一步合成 $\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ 和 CdS 复合光催化剂, 形成了 $\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ 和 CdS 复合界面, 并在此基础上进一步沉积 Ag_2S , 形成了 $\text{Ag}_2\text{S}/\text{CdS}/\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ (ACC) 复合光催化剂(图 5a)。由于 $\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ 的费米能级电位比 CdS 的 Fermi 能级电位更负, 两者接触之后会在界面处形成由

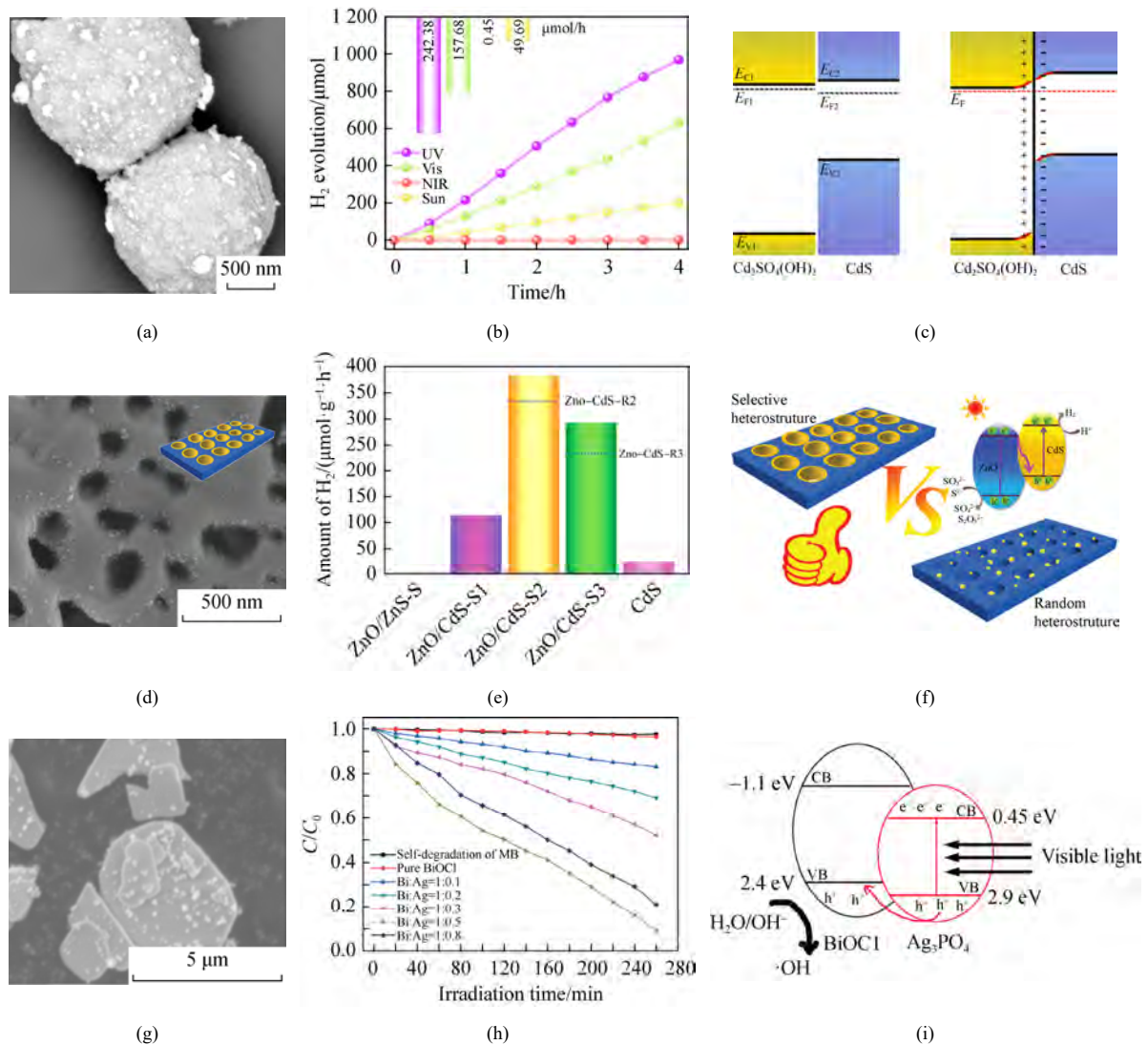


图 5 (a) $\text{Ag}_2\text{S}/\text{CdS}/\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ (7ACC) 的 SEM 照片; (b) 7ACC 在不同波段光照下的光催化产氢对比; (c) $\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ 和 CdS 接触前后能带电位^[20]; (d) ZnO 选择性沉积 CdS (ZnO/CdS-S) 的 SEM 照片; (e) ZnO/CdS-S 与 ZnO 随机沉积 CdS (ZnO/CdS-R) 光催化产氢对比; (f) ZnO/CdS-S 中 S 型电荷传输通路示意图^[21]; (g) $\text{BiOCl}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合光催化剂的 SEM 照片以及 (h) 在可见光下对 MB 的光催化降解; (i) $\text{BiOCl}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 在可见光下的电荷传输机理图^[22]

Fig. 5 (a) SEM images of $\text{Ag}_2\text{S}/\text{CdS}/\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ (7ACC); (b) Comparison of photocatalytic hydrogen production from 7ACC under different wavelengths of light; (c) Energy band potential before and after contact between $\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ and CdS^[20]; (d) SEM image of ZnO selectively deposited CdS (ZnO/CdS-S); (e) Comparison of photocatalytic hydrogen production from ZnO/CdS-S and ZnO randomly deposited CdS (ZnO/CdS-R); (f) Schematic diagram of S-type charge transport pathway in ZnO/CdS-S^[21]; (g) SEM image of $\text{BiOCl}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ composite photocatalyst and (h) Photocatalytic degradation of MB under visible light; (i) Charge transport mechanism diagram of $\text{BiOCl}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ under visible light^[22]

$\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ 朝向 CdS 方向的内建电场。在内建电场的作用下, CdS 产生的光生电子更容易向 $\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ 移动, 而 $\text{Cd}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$ 产生的光生空穴则向 CdS 移动, 从而增强了载流子的分离效果(图 5b 和图 5c)^[20]。最终 7ACC 样品在可见光下的产氢速率比纯 CdS 高了 14.7 倍。

S 型异质结主要由功函数较小、Fermi 能级较高的还原型光催化剂和功函数较大、Fermi 能

级较低的半导体光催化剂通过交错方式构筑, 利用 2 种半导体间的内建电场, 能带弯曲和静电相互作用等 3 个因素, 驱动光生电子空穴对的分离, 因此, 构筑 S 型能够有效实现光生电子-空穴对的分离。

由于光催化材料不同活性晶面间的能带电位存在微小的差别, 光生电子-空穴对在电势差的影响下往往会产生分离的现象。借助不同活性晶面之

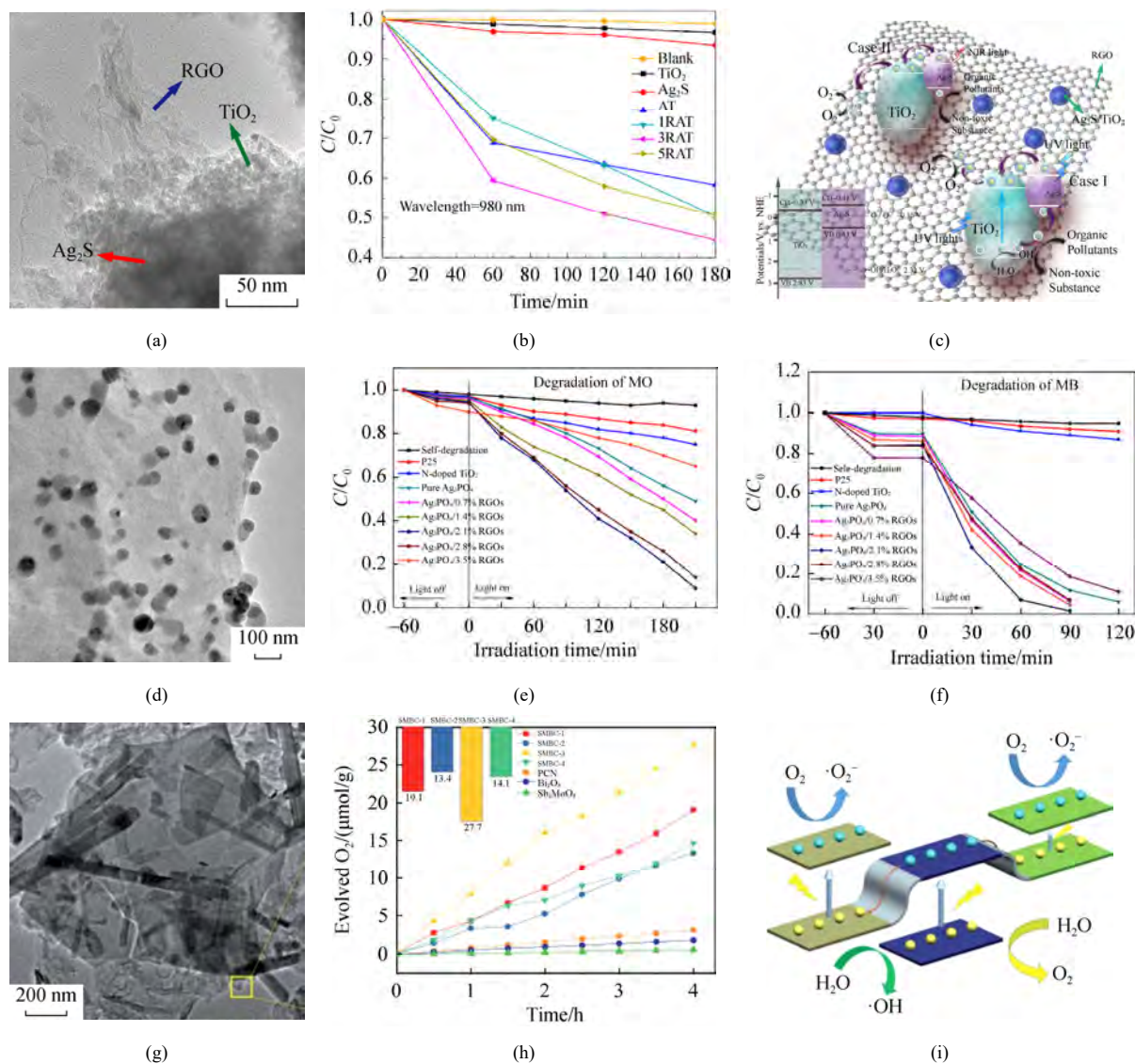


图 6 (a) RGO/ Ag_2S / TiO_2 (3RAT)三元复合光催化剂的 TEM 照片; (b) 3RAT 在红外光下对 MO 的光催化降解; (c)紫外光和近红外光照射下 3RAT 异质结降解机理图^[23]; (d) Ag_3PO_4 /2.1% (质量分数) RGOs 复合光催化剂的 TEM 照片; 复合样品对 (e) MO 和(f) MB 的光催化剂降解^[24] (g) PCN/ Sb_2MoO_6 / Bi_2O_3 (SMBC-3)复合光催化剂的 TEM 照片; (h) SMBC 复合样品光催化产氧对比; (i) SMBC-3 复合光催化剂中 S 型电荷传输通路^[25]

Fig. 6 (a) TEM image of the RGO/ Ag_2S / TiO_2 (3RAT) ternary composite photocatalyst; (b) Photocatalytic degradation of MO by 3RAT under IR light; (c) Degradation mechanism of 3RAT heterojunction under UV and NIR light irradiation^[23]; (d) TEM images of Ag_3PO_4 /2.1% RGOs composite photocatalyst; photocatalytic degradation of (e) MO and (f) MB by composite samples^[24]; (g) TEM images of PCN/ Sb_2MoO_6 / Bi_2O_3 (SMBC-3) composite photocatalyst; (h) Comparison of photocatalytic oxygen production of SMBC composite samples; (i) S-type charge transport pathway in SMBC-3 composite photocatalyst^[25]

间的电荷分离现象,选择性构筑异质结能够进一步增强光催化性能。多孔 ZnO 纳米片的光腐蚀集中在孔的边缘,因此,孔的边缘是光生载流子的集中区域。通过离子交换的方法选择性的在孔的边缘沉积 ZnS,并进一步通过离子交换构筑 CdS/ZnO 异质结。由于 CdS 集中在孔的边缘,CdS 与 ZnO 之间形成 S 型异质结后电荷分离能够进一步增强(图 5d)。相比随机负载 CdS 的样品,选择性沉积样品的光催化产氢效果明显提高(图 5e 和图 5f)^[21]。

除了能够促进光生载流子分离的优点,将窄带隙半导体与宽带隙半导体复合,能够利用窄带隙半导体对可见光甚至红外光的吸收能力,提高材料的光利用效率。如通过简单的化学沉积过程合成 BiOCl/Ag₃PO₄ 复合光催化剂(图 5g),其中 BiOCl 与 Ag₃PO₄ 的能带电位之间呈交错排列,能够形成 II 型异质结。在紫外光照条件下,BiOCl 导带中的光生电子转移向 Ag₃PO₄ 的导带,而 Ag₃PO₄ 价带中的光生空穴则迁移向 BiOCl,从而促进光生载流子的分离效率。而在可见光照射时,Ag₃PO₄ 产生的光生空穴能够迁移向 BiOCl,从而促进了 Ag₃PO₄ 中载流子的分离,并使其具有较高的可见光催化活性(图 5h 和图 5i)^[22]。

RGO 作为一种二维材料,由于具有极高的比表面积,能够为光催化反应提供丰富的活性位点,因此将光催化材料与二维材料相复合,能够有效提高光催化性能。在还原氧化石墨烯(RGO)表面通过水热法沉积 TiO₂ 纳米颗粒,进一步通过化学沉积构筑 Ag₂S 与 TiO₂ 之间的复合界面,由于 Ag₂S 导带电位比 TiO₂ 的导带电位更负,因此 Ag₂S 导带中的光生电子能够转移到 TiO₂ 中上,并通过 RGO 作用于有机污染物,对其进行有效的矿化降解(图 6a)。同时,在红外光照下,由于 Ag₂S 具有较窄的能带间隙,材料依然具有一定的光催化降解污染物的能力(图 6b 和图 6c)^[23]。同样通过简单的化学沉积方法能够在 RGO 表面负载 Ag₃PO₄ 纳米颗粒(图 6d),由于 RGO 能够为光生电子的传输和表面污染物的氧化反应提供丰富的活性位点,复合之后样品具有极佳的光催化降解活性(图 6e 和图 6f)^[24]。

g-C₃N₄ 同样是一种具有极高比表面积的二维光催化材料,通过在其表面复合半导体光催化剂形成复合界面,能够有效增强两者的电荷分离效率。通过溶剂热法在 g-C₃N₄ 的表面复合 Bi₂O₃/Sb₂MoO₆,形成 g-C₃N₄/Bi₂O₃/Sb₂MoO₆ 三元复合光催化剂(图 6g)。其中,g-C₃N₄ 的价带与 Bi₂O₃ 的导带之间

能够形成 S 型电荷通路,而 Bi₂O₃ 与 Sb₂MoO₆ 之间也能够形成 S 型电荷通路。因此,在该体系中,保留了 Bi₂O₃ 价带上具有强氧化能力的光生空穴,同时也保留了 Sb₂MoO₆ 与 g-C₃N₄ 导带中强还原能力的光生电子,因此表现出一定的光催化产氧和较强的光催化降解污染物的能力(图 6h 和图 6i)^[25]。

此外,由于 g-C₃N₄ 与 Ti_{0.7}Sn_{0.3}O₂ 的能带之间交错排列,将两者复合之后会在复合界面处形成由 g-C₃N₄ 指向 Ti_{0.7}Sn_{0.3}O₂ 的内建电场(图 7a 和图 7b)。在光照条件下,g-C₃N₄ 产生的光生空穴会与 Ti_{0.7}Sn_{0.3}O₂ 产生的光生电子相结合,形成 S 型电荷传输通路,从而保留 g-C₃N₄ 导带中强还原能力的光生电子和 Ti_{0.7}Sn_{0.3}O₂ 中强氧化能力的光生空穴。最终,复合之后样品对 RhB 的降解能力显著增强(图 7c)^[26]。In₂S₃ 与 g-C₃N₄ 都是二维纳米片结构,而且两者的能带之间同样是交错排列的(图 7d)。两者复合之后同样形成了 S 型电荷传输路径,并有效的提高了光催化产氢性能,达到 307 μmol/(g·h)(图 7e 和图 7f)。进一步向该体系中引入还原氧化石墨烯(RGO)能够增强该体系的电荷传输能力,借助 RGO 对光生电子的传导能力,增强光催化产氢性能,达到了 512.72 μmol/(g·h)(图 7g~图 7i)^[27]。

利用晶体特殊的形貌构筑复合界面,能够增强晶体不同晶面间的电荷分离。例如,由于截角八面体形貌 BiVO₄ 晶体的(110)晶面和(040)晶面间能带电位存在差别,在可见光照射下,BiVO₄ 晶体中激发产生的光生电子会向(040)晶面转移,而光生空穴则向(110)晶面移动。在表面活性剂的辅助下能够使 Ag₂O 选择性的沉积在 BiVO₄ 晶体的(040)晶面(图 6g)。在近红外光照射时,具有较窄带隙的 Ag₂O 能够被激发产生光生电子并向 BiVO₄ 的(040)晶面转移,能够有效降解有机污染物和光催化产氧。而在可见光或者紫外光照射时,BiVO₄ 和 Ag₂O 产生的光生电子均向(040)晶面转移,从而进一步提升 BiVO₄ 分解污染物的能力和产氧性能(图 6h)^[28]。

综上所述,构筑复合界面能够利用电势差或者内建电场,从而有效的分离光生电子和空穴。需要注意的是,复合界面的作用范围非常有限。因此,催化剂颗粒的尺寸越大,复合界面的作用范围相对就越小。所以,构筑复合界面这种改性方法需要针对催化剂颗粒进行一定程度的形貌控制。

2.3 表面反应

由于表面反应与光催化材料表面的活性位点之间存在很大关系,而高活性晶面往往包含更多地

活性位点。通过控制合成条件,能够对材料的形貌产生一定的影响,从而暴露出某些特定的高活性晶面。如通过液相法能够直接获得分枝状的 Ag_3PO_4 晶体(图 8a),而经过 24 h 的 Oswald 熟化过程后,能够得到四足状的 Ag_3PO_4 晶体(图 8b)。而利用

超声合成过程,能够得到纳米棒状的 Ag_3PO_4 晶体(图 8c),延长超声时间,则会得到三棱柱状的 Ag_3PO_4 晶体(图 8d)。这些不同形貌的 Ag_3PO_4 晶体由于暴露出不同的活性晶面,所具有的光催化活性存在很大差别(图 8e)^[29]。

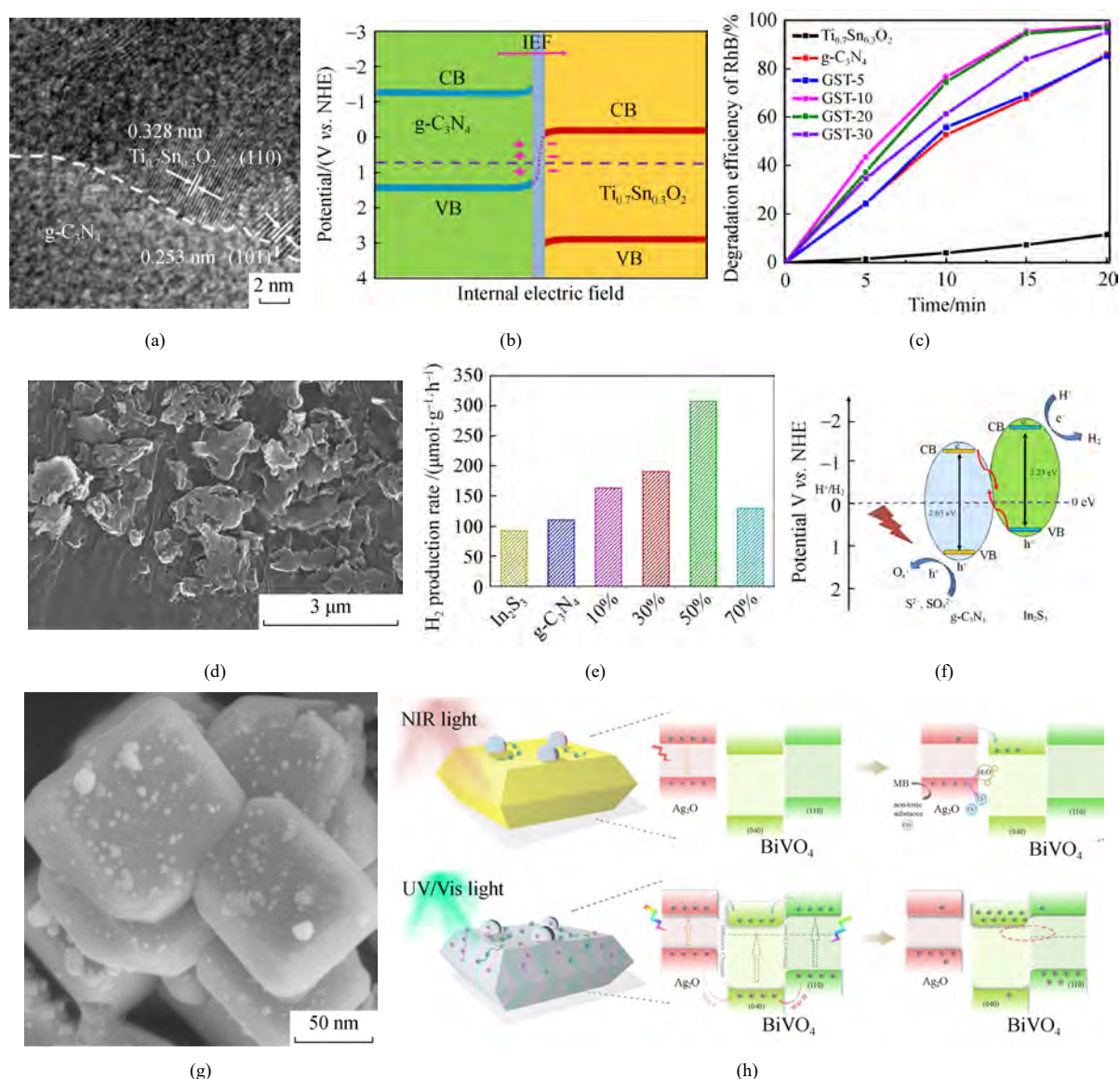


图 7 (a) $\text{Ti}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{O}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的 TEM 照片; (b) $\text{Ti}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{O}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 样品的能带结构; (c) 在可见光照射下各样品对 RhB 的光催化降解效率^[26]; (d) 50% (质量分数) $\text{In}_2\text{S}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 样品的 SEM 照片; (e) 不同复合比例样品的光催化产氢速率; (f) $\text{In}_2\text{S}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 复合材料的光催化反应机理示意图^[27]; (g) $\text{Ag}_2\text{O}/\text{BiVO}_4$ (040) 复合光催化剂的 SEM 照片; (h) $\text{Ag}_2\text{O}/\text{BiVO}_4$ (040) 复合材料在近红外光和紫外/可见光照射下载流子传输过程示意图^[28]

Fig. 7 (a) TEM image of $\text{Ti}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{O}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$; (b) Energy band structure of $\text{Ti}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{O}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$; (c) photocatalytic degradation efficiency of each sample for RhB under visible light irradiation^[26]; (d) SEM image of 50% $\text{In}_2\text{S}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$; (e) Different composite ratios samples for photocatalytic hydrogen production rate; (f) Schematic diagram of the photocatalytic reaction mechanism of $\text{In}_2\text{S}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ ^[27]; (g) SEM image of $\text{Ag}_2\text{O}/\text{BiVO}_4$ (040) photocatalyst; (h) Schematic diagram of the carrier transport process of $\text{Ag}_2\text{O}/\text{BiVO}_4$ (040) composite under NIR and UV/visible light irradiation^[28]

通过负载助催化剂能够降低反应所需的活化能,进而提升表面反应速率。如图 8f 将 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 与 rGO 复合,能够利用 rGO 优异的导电性能传输光生

电子。在此基础上进一步沉积 Au 纳米颗粒, Au 与 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 之间形成 Schottky 势垒,提高光生载流子的分离并加速光催化产氢性能。在 rGO 和 Au 纳米颗

粒的辅助下, 5% Au/CNNS/rGO 的光催化产氢速率相比单纯的 g-C₃N₄ 提高了 9.6 倍, 对 MB 的降解能力提高了 6 倍(图 8g 和图 8h)^[30]。

2.4 全天候光催化

光催化材料仅能够在光照条件下表现出光催化性能, 在无外界光源的条件下光催化材料对污染物不会有任何的降解能力, 对外界光源的需求无疑限制了光催化材料的应用场景。长余辉材料是一种清洁无污染的材料, 它能够在外界激发源(一般为紫外光以及可见光)的辐照下吸收能量并储存起来, 当撤去激发源后, 仍能够持续发光数小时乃至数天。将长余辉材料对光能的存储能力与光催化材料结合起来, 能够实现在无外界光源时依然能够保持一定时间的降解污染物的能力, 从而能够在间歇照明等特殊条件下实现全天候的光催化降解污染物能

力(图 8a)。

通过研究数种长余辉材料的发射光谱, 发现 CaAl₂O₄:(Eu, Nd) 的发射峰波长最短, 位于 440 nm 处(图 8b)^[31]。由于 TiO₂ 的带隙较大, 440 nm 波长的光源对其无法有效激发。为此, 利用离子掺杂的方式对 TiO₂ 进行改性。引入 N 元素后, TiO_{2-x}N_y 对可见光的吸收明显提高, 能够有效利用 CaAl₂O₄:(Eu, Nd) 的余辉进行激发。通过 TEM 照片能够看到 CaAl₂O₄:(Eu, Nd) 颗粒周围分布有许多的 TiO_{2-x}N_y 纳米颗粒, 因此能够有效的吸收 CaAl₂O₄:(Eu, Nd) 发射的余辉(图 8c)。通过复合之后样品对 NO_x 的去除实验表明, 在开始光照之后, 样品对 NO_x 的去除率很快提高, 且维持在较高水平。而当关闭光源之后, 对 NO_x 的去除率没有随着光源的关闭发生很快的降低, 而是缓慢降低至初始降解率。

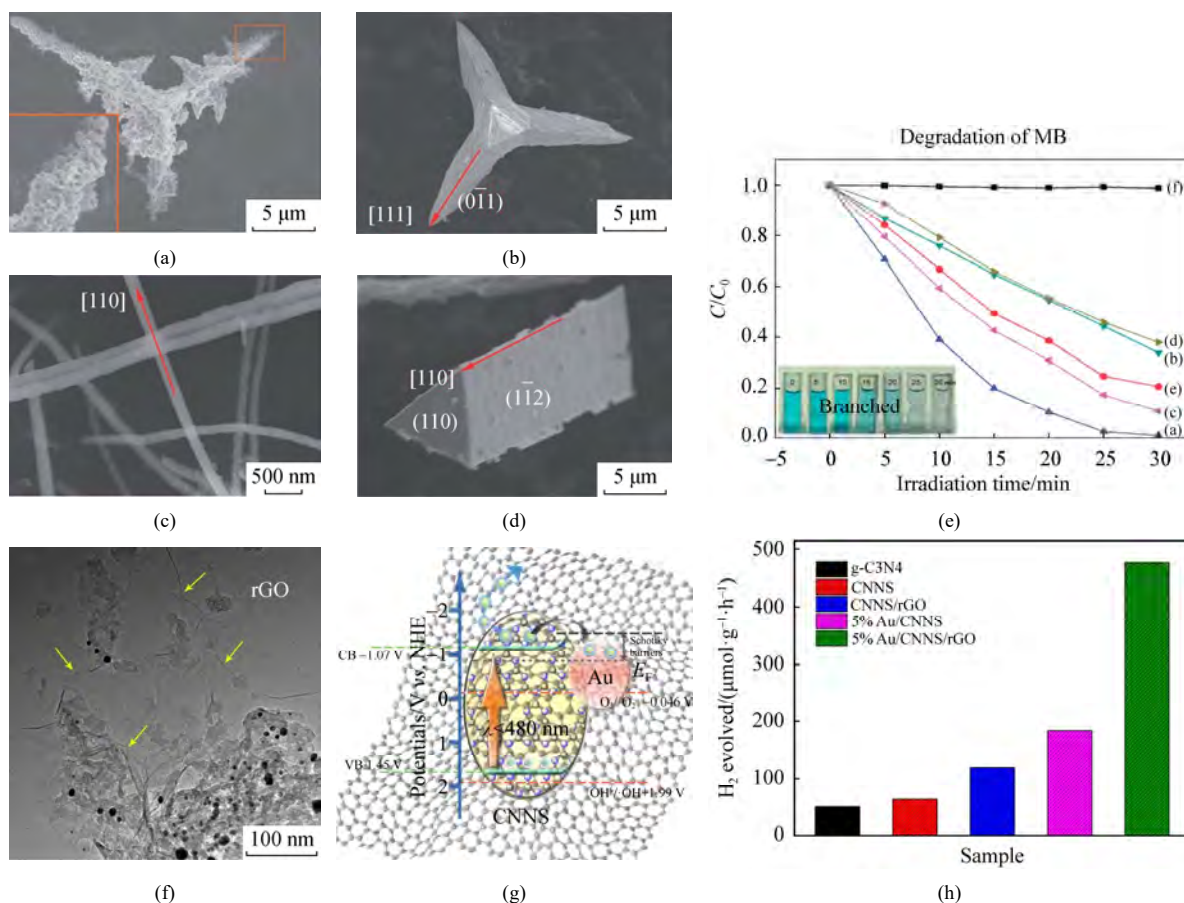


图 8 (a~d) 分枝状、四足状、纳米棒状和三角棱柱状 Ag₃PO₄ 晶体的 SEM 照片; (e) a 分枝型、b 四足型、c 纳米棒型、d 三角棱镜型、e 不规则球形 Ag₃PO₄ 存在和无光催化剂 f 时, MB 溶液浓度随光照时间的变化^[29]; (f) 5% Au/CNNS/rGO 的 TEM 照片; (g) 在光(λ < 480 nm)照明下, 5% Au/CNNS/rGO 的光催化机理; (h) 各样品在可见光下的析氢速率的光催化活性^[30]

Fig. 8 (a~d) SEM images of branched, tetrapod, nanorod and triangular prismatic Ag₃PO₄ crystals; (e) Variation of MB solution concentration with light time in the presence and absence of photocatalyst f for a branched, b tetrapod, c nanorod, d triangular prismatic, e irregular spherical Ag₃PO₄^[29]; (f) TEM image of 5% Au/CNNS/rGO; (g) Photocatalytic mechanism of 5% Au/CNNS/rGO under light (λ < 480 nm) illumination; (h) Photocatalytic activity of each sample in visible light for hydrogen precipitation rate^[30]

这表明与长余辉材料复合之后, 样品确实在余辉激发下持续对 NO_x 进行降解(图 8d)^[32]。此外, 利用(Ta, N)共掺杂 $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 作为光催化剂, 与 $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})$ 进行复合, 同样能够有效利用 $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})$ 的余辉进行激发, 且随着激发光源波长的降低降解效率明显提高(图 8e)。通过对乙醛的光催化降解实验能够发现在黑暗中 $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})/(\text{Ta}, \text{N})$ -codoped $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 表现出对乙醛极佳

的降解性能(图 8f)^[33]。此外, Cr-doped SrTiO_3 与 $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})$ 复合后, 也能够表现出对 NO_x 良好的降解能力(图 8g)^[34]。

总之, 光催化技术的拓展研究展现了在更多场景下的应用潜力, 拓宽了光催化技术在不同领域应用的可能性, 极大地丰富了光催化技术的发展思路, 也为光催化技术在未来更好的服务人类社会奠定了基础。

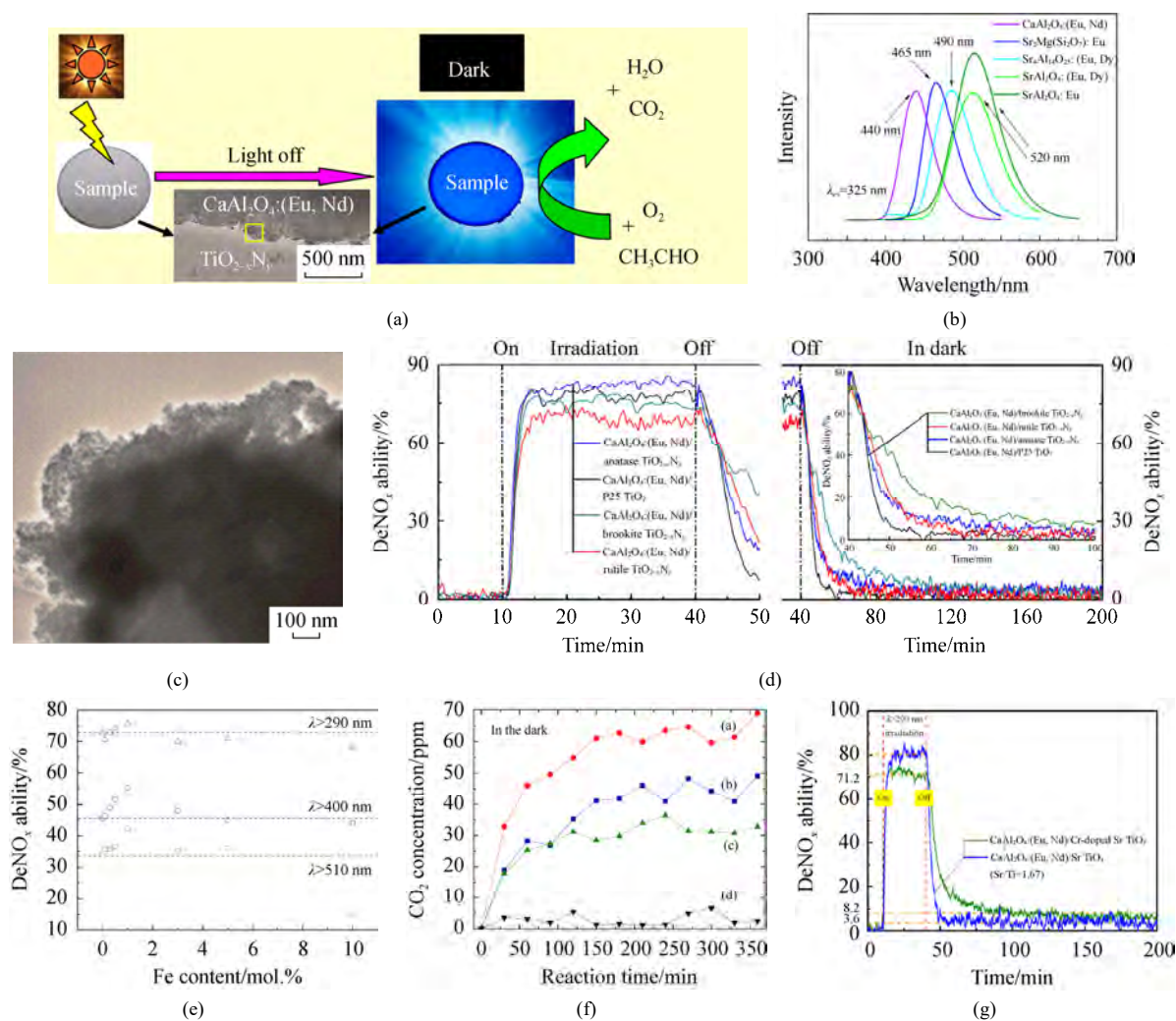


图 9 (a)无光照时光催化降解示意图; (b)用于与 TiO_2-xN_y 结合制备全天候光催化剂的长余辉荧光粉的发射光谱^[31]; (c) $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})/\text{brookite TiO}_2-x\text{N}_y$ 复合材料边缘区的 TEM 照片; (d)以 40% 的 TiO_2-xN_y 和 P25 组成的复合材料在 69.7 W/m^2 的太阳照射和无光照时 DeNO_x 性能对比, 插图为在黑暗中 40 至 100 min 的结果^[32]; (e)不同 Fe 含量(Ta, N)共掺杂 $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 氧化分解 NO 的光催化活性对比; (f)黑暗中催化分解乙醛产生的二氧化碳浓度^[33]; (g) $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})/\text{Cr}$ 掺杂的 SrTiO_3 和 $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})/\text{Cr}$ 掺杂非化学计量比 SrTiO_3 复合材料的 DeNO_x 性能对比, 均在波长大于 290 nm 的紫外光照射下照射 30 min 后关灯^[34]

Fig. 9 (a) Schematic diagram of catalytic degradation in the absence of light; (b) emission spectra of long afterglow phosphors used to prepare all-weather photocatalysts in combination with TiO_2-xN_y ^[31]; (c) TEM image of the edge region of $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})/\text{brookite TiO}_2-x\text{N}_y$ composite; (d) comparison of DeNO_x performance of the composite composed with 40% TiO_2-xN_y and P25 at 69.7 W/m^2 of solar irradiation and no light, inset shows the results from 40 to 100 min in the dark^[32]; (e) Comparison of the photocatalytic activity of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ co-doped with different Fe content (Ta, N) for the oxidative decomposition of NO; (f) CO_2 concentration from the catalytic decomposition of acetaldehyde in the dark^[33]; (g) Comparison of DeNO_x performance of $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})/\text{Cr}$ doped SrTiO_3 and $\text{CaAl}_2\text{O}_4:(\text{Eu}, \text{Nd})/\text{Cr}$ doped nonstoichiometric SrTiO_3 composites, both irradiated with UV light at wavelengths greater than 290 nm for 30 min before turning off the light^[34]

3 结论与展望

本文总结了课题组近 10 年来在光催化材料领域的研究成果,从缺陷工程、构筑复合界面、形貌控制以及全天候光催化 4 个方面进行了系统总结。经过十几年的不断探究以及在表征方法和理论计算等方面的快速发展,对光催化材料的机理研究更加深入,探索方法更加系统合理,对于材料内部载流子分离和传输等理论研究更加透彻,也拓展了光催化材料在其他领域应用的可能性。未来光催化技术的发展离不开新型光催化材料的探索、新型表征手段的开发和在交叉学科领域的不断完善:

1) 对于多组分的光催化剂,具有不同带隙和电子结构的半导体组合会导致不同类型的异质结和电荷转移路线。电荷转移机制对于设计光催化体系、实现活性位点的空间分离至关重要,并与催化性能密切相关。因此,了解不同材料的基本特性,不断发现新的催化材料,可以离实现最佳光催化体系的商业化更近一步。

2) 目前缺乏直接和精确的表征技术来分析实际的活性位点和确定反应中间体的信息,这可能是发展光催化技术的最大障碍之一。利用原位表征方法可以帮助确定光反应过程中的氧化还原活性位点及其局部配位。此外,借助于先进的表征方法,可以进一步讨论分离的氧化还原活性位点与其他效应(如内部电场、光热效应和选择性沉积)之间的协同效应机制。

3) 全天候光催化剂具有应用前景,特别是在室内空气污染物的去除方面具有极大的潜力。然而目前缺乏具有短波长发射、拥有高亮度和较长余辉时间的长余辉材料,需要未来新型长余辉材料的不断发展和完善,以及长余辉材料与光催化材料之间耦合机制的不断探索。

参考文献:

- [1] SHINDELL D, SMITH C J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels[J]. *Nature*, 2019, 573(7774): 408–411.
- [2] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. *Nature*, 1972, 238(5358): 37–38.
- [3] BAI S, JIANG J, ZHANG Q, et al. Steering charge kinetics in photocatalysis: intersection of materials syntheses, characterization techniques and theoretical simulations[J]. *Chem Soc Rev*, 2015, 44(10): 2893–2939.
- [4] LI X R, CHEN Y, TAO Y, et al. Challenges of photocatalysis and their coping strategies[J]. *Chem Catal*, 2022, 2(6): 1315–1345.
- [5] LOW J, YU J G, JARONIEC M, et al. Heterojunction photocatalysts[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(20): 1601694.
- [6] TACHIBANA Y, VAYSSIERES L, DURRANT J R. Artificial photosynthesis for solar water-splitting[J]. *Nat Photonics*, 2012, 6(8): 511–518.
- [7] BAI S, ZHANG N, GAO C, et al. Defect engineering in photocatalytic materials[J]. *Nano Energy*, 2018, 53: 296–336.
- [8] ZHANG P, WANG T, GONG J L. Current mechanistic understanding of surface reactions over water-splitting photocatalysts[J]. *Chem*, 2018, 4(2): 223–245.
- [9] RAN J R, ZHANG J, YU J G, et al. Earth-abundant cocatalysts for semiconductor-based photocatalytic water splitting[J]. *Chem Soc Rev*, 2014, 43(22): 7787–7812.
- [10] LIU T Y, MA X L, YANG L F, et al. Highly enhanced photocatalytic activity of $\text{CaSn}(\text{OH})_6$ through tuning $\text{CaSn}(\text{OH})_6/\text{SnO}_2$ heterostructural interaction and optimizing Fe^{3+} doping concentration[J]. *Appl Catal B Environ*, 2017, 217: 256–264.
- [11] DONG P Y, LIU B, WANG Y H, et al. Enhanced photocatalytic activity of (Mo, C)-codoped anatase TiO_2 nanoparticles for degradation of methyl orange under simulated solar irradiation[J]. *J Mater Res*, 2010, 25(12): 2392–2400.
- [12] DONG P Y, WANG Y H, LIU B, et al. Photocatalytic activity of (B, N)-codoped titanate nanotubes[J]. *J Am Ceram Soc*, 2012, 95(1): 82–84.
- [13] YANG Y J, WANG Y H, YIN S. Oxygen vacancies confined in SnO_2 nanoparticles for desirable electronic structure and enhanced visible light photocatalytic activity[J]. *Appl Surf Sci*, 2017, 420: 399–406.
- [14] YANG L F, YANG Y J, LIU T Y, et al. Oxygen vacancies confined in SnO_2 nanoparticles for glorious photocatalytic activities from the UV, visible to near-infrared region[J]. *New J Chem*, 2018, 42(18): 15253–15262.
- [15] XIAO M, WANG Z L, LYU M Q, et al. Hollow nanostructures for photocatalysis: advantages and challenges[J]. *Adv Mater*, 2019, 31(38): e1801369.
- [16] XIA M Y, ZHAO X L, ZHANG Y G, et al. Rational catalyst design for spatial separation of charge carriers in a multi-component photocatalyst for effective hydrogen evolution[J]. *J Mater Chem A*, 2022, 10(48): 25380–25405.
- [17] ZHAO F, ZHANG N, LI H, et al. Photocatalyst with chloroplast-like structure for enhancing hydrogen evolution reaction[J]. *Energy Environ Mater*, 2022, 5(4): 1229–1237.
- [18] ZHAO F, LAW Y L, ZHANG N, et al. Constructing spatially separated cage-like Z-scheme heterojunction photocatalyst for enhancing photocatalytic H_2 evolution[J]. *Small*, 2023, 19(23): e2208266.
- [19] ZHAO F, LI H, LIU T Y, et al. Spatially separated CdS hollow spheres with interfacial charge transfer and cocatalyst for enhancing photocatalytic hydrogen evolution[J]. *Mol Catal*, 2019, 474: 110418.

- [20] ZHANG X C, LIU T Y, ZHAO F, et al. In-situ-formed Cd and Ag₂S decorated CdS photocatalyst with boosted charge carrier spatial separation for enhancing UV-vis-NIR photocatalytic hydrogen evolution[J]. *Appl Catal B Environ*, 2021, 298: 120620.
- [21] MA X L, ZHAO F, QIANG Q P, et al. Fabrication of selective interface of ZnO/CdS heterostructures for more efficient photocatalytic hydrogen evolution[J]. *Dalton Trans*, 2018, 47(35): 12162–12171.
- [22] CAO B C, DONG P Y, CAO S, et al. BiOCl/Ag₃PO₄ composites with highly enhanced ultraviolet and visible light photocatalytic performances[J]. *J Am Ceram Soc*, 2013, 96(2): 544–548.
- [23] LIU T Y, LIU B, YANG L F, et al. RGO/Ag₂S/TiO₂ ternary heterojunctions with highly enhanced UV-NIR photocatalytic activity and stability[J]. *Appl Catal B Environ*, 2017, 204: 593–601.
- [24] DONG P Y, WANG Y H, CAO B C, et al. Ag₃PO₄/reduced graphite oxide sheets nanocomposites with highly enhanced visible light photocatalytic activity and stability[J]. *Appl Catal B Environ*, 2013, 132–133: 45–53.
- [25] ZHANG N, LIU T Y, ZHAO F, et al. The band engineering of 2D-hybridized PCN-Sb₂MoO₆-Bi₂O₃ nanomaterials with dual Z-scheme heterojunction for enhanced photocatalytic water splitting without sacrificial agents[J]. *Sustainable Energy Fuels*, 2021, 5(8): 2325–2334.
- [26] GUO B R, LIU B, WANG C L, et al. S-scheme Ti_{0.7}Sn_{0.3}O₂/g-C₃N₄ heterojunction composite for enhanced photocatalytic pollutants degradation[J]. *J Environ Chem Eng*, 2022, 10(2): 107118.
- [27] GUO B R, LIU B, ZHANG X Q, et al. In₂S₃ nanosheets growing on sheet-like g-C₃N₄ as high-performance photocatalyst for H₂ evolution under visible light[J]. *Int J Energy Res*, 2022, 46(7): 9138–9149.
- [28] LIU T Y, ZHANG X Q, ZHAO F, et al. Targeting inside charge carriers transfer of photocatalyst: selective deposition of Ag₂O on BiVO₄ with enhanced UV-vis-NIR photocatalytic oxidation activity[J]. *Appl Catal B Environ*, 2019, 251: 220–228.
- [29] DONG P Y, WANG Y H, LI H H, et al. Shape-controllable synthesis and morphology-dependent photocatalytic properties of Ag₃PO₄ crystals[J]. *J Mater Chem A*, 2013, 1(15): 4651–4656.
- [30] LI H, ZHAO F, LIU T Y, et al. Design of novel structured Au/g-C₃N₄ nanosheet/reduced graphene oxide nanocomposites for enhanced visible light photocatalytic activities[J]. *Sustainable Energy Fuels*, 2020, 4(8): 4086–4095.
- [31] LI H H, YIN S, WANG Y H, et al. Persistent fluorescence-assisted TiO_{2-x}N_y-based photocatalyst for gaseous acetaldehyde degradation[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(14): 7741–7745.
- [32] LI H H, YIN S, WANG Y H, et al. Effect of phase structures of TiO_{2-x}N_y on the photocatalytic activity of CaAl₂O₄: (Eu, Nd)-coupled TiO_{2-x}N_y[J]. *J Catal*, 2012, 286: 273–278.
- [33] LI H H, YIN S, WANG Y H, et al. Efficient persistent photocatalytic decomposition of nitrogen monoxide over a fluorescence-assisted CaAl₂O₄: (Eu, Nd)/(Ta, N)-codoped TiO₂/Fe₂O₃[J]. *Appl Catal B Environ*, 2013, 132–133: 487–492.
- [34] LI H H, YIN S, WANG Y H, et al. Roles of Cr³⁺ doping and oxygen vacancies in SrTiO₃ photocatalysts with high visible light activity for NO removal[J]. *J Catal*, 2013, 297: 65–69.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



王育华, 现任兰州大学物理科学与技术学院教授、博士生导师、兰州大学兰州大学光转换材料与技术国家地方联合工程实验室主任, 光功能与光转换材料学科创新引智基地负责人(“111计划”培育项目), 2009 年获得国家杰出青年科学基金, 2016 年获得教育部自然科学二等奖。在 *Angew. Chem. Int. Ed.*, *Adv. Funct. Mater* 等国内外相关领域核心刊物上发表论文 300 多篇。主要从事真空紫外发光材料; 多色长余辉发光材料; 白光照明用 LED 荧光材料; 可见光响应光催化材料; 低维发光材料的制备及表征与极端条件下新材料的合成及表征等方面的研究。