

先进光催化剂设计与制备

余家国¹, 李鑫², 王伟俊³, 张留洋¹

¹ 武汉理工大学, 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070

² 华南农业大学林学与风景园林学院, 农业部能源植物资源与利用重点实验室, 广州 510642

³ School of Energy and Chemical Engineering, Xiamen University Malaysia, Selangor Darul Ehsan 43900, Malaysia.

Design and Fabrication of Advanced Photocatalysts

Jiaguo Yu¹, Xin Li², Wee-Jun Ong³, Liuyang Zhang¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China.

² Key Laboratory of Energy Plants Resource and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China.

³ School of Energy and Chemical Engineering, Xiamen University Malaysia, Selangor Darul Ehsan 43900, Malaysia.

Emails: yujiaguo93@whut.edu.cn, jiaguoyu@yahoo.com (J.Y.); Xinliscau@yahoo.com (X.L.); weejun.ong@xmu.edu.my, ongweejun@gmail.com (W.J.O.); zly2017@whut.edu.cn (L.Z.)

Published online: December 21, 2020.

光催化材料和技术在能源^{1,2}、环境、健康^{3,4}、生态建筑材料等领域具有广阔的应用前景, 先进光催化剂的设计与制备是光催化领域的研究热点⁵。当前, 光催化材料面临的挑战是低的光催化效率和慢的光生电子和空穴复合。传统II型异质结光生载流子的还原氧化能力被极大削弱, 热力学上并不利于光催化反应的进行。动力学上由于光生电子和空穴, 空穴与空穴之间的排斥作用, 电子和空穴的空间分离也很难实现。为克服II型异质结的缺陷, 2019年, 一个新的梯形(S-scheme)异质结概念被提出, 梯形异质结由氧化型和还原型光催化剂组成, 一方面该异质结可以消除系统中相对无用的光生载流子, 另一方面可以保留相对有用的光生载流子, 使系统具有强的氧化还原能力和高的光催化性能⁶。本专刊邀请了从事光催化研究的学者团队, 介绍他们近年来的研究进展和总结。

本专刊共发表文章13篇, 其中综述5篇, 研究论文8篇。从研究材料看, 4篇与TiO₂有关, 4篇与C₃N₄有关。从光催化机理看, 5篇联系到梯形(Step-scheme, S-scheme)异质结光催化材料制备与机理研究。

专刊从应用领域划分为三方面:

(1) 分解水产氢

靳治良和其研究团队⁷制备了曙红敏化NiS₂和MoSe₂梯形异质结复合材料, 得益于增强的光吸收和异质结的建立, 该复合材料的析氢速率高达7 mmol·h⁻¹·g⁻¹, 比纯NiS₂和MoSe₂提升了2.05和2.44倍。王国宏和其同事⁸通过微波辅助法将二维ZnIn₂S₄纳米片生长在TiO₂纳米纤维上。通过调节前驱体的摩尔比, 得到了优化的梯形异质结光催化剂, 其性能比单一材料提升了数倍。余火根和其同事⁹通过富含羧基官能团的石墨烯修饰TiO₂, 且用各种先进表征技术证实了复合光催化剂的成功合成。由于亲核性羧基富集氢离子的能力, 该复合光催化剂展现了较高的产氢活性。徐全龙和其合作者¹⁰设计了具有反蛋白石结构的g-C₃N₄, 并探究了光利用率和光生电荷分离的影响因素。与体相相比, 其3D多孔结构拥有超高比表面积, 表现出更高的光催化产氢速率。李鑫和其研究团队¹¹合成了一维Mn_{0.2}Cd_{0.8}S纳米棒和二维Ti₃C₂ MXene纳米片的肖特基异质结, 并探讨了二者之间的协同作用对光催化产氢的影响。实验结果证实了异质结能够有效分离光生电荷, 而纳米片则显著改善析氢动力学。

(2) 二氧化碳还原

朱必成和其同事¹²通过密度泛函理论研究了二维/二维BP/g-C₃N₄的能带位置、界面电子相互作用

用以及二氧化碳还原过程, 通过对比研究发现异质结有效降低了二氧化碳还原反应的势垒, 且实现光生载流子的高效分离。周雪梅¹³总结了贵金属单原子修饰二氧化钛催化剂的制备方法及其控制条件, 并讨论了电镜和谱学分析等表征手段, 最后针对这些催化剂的作用机理和应用范围做出了讨论。彭天右领导的团队¹⁴介绍了Z型异质结的发展历史和调控手段, 阐述了该体系的反应途径, 并提出了该体系的挑战和发展方向。针对g-C₃N₄在光催化反应中的瓶颈问题, 李云峰等¹⁵综述了各种改性方法在光催化产氢和二氧化碳还原方面的潜在应用。刘升卫团队¹⁶概括了表面氟化TiO₂多孔空心微球的制备方法和微观结构参数的调控, 介绍了多孔空心结构的优势。王伟俊和其合作者¹⁷展望了结构易调控的钙钛矿氧化物光催化剂在水分解、二氧化碳还原转化、固氮等方面的发展前景。

(3) 污染物降解

许第发团队¹⁸设计了柔性BiOI/PAN复合纤维, 该纤维独特的分级结构改善了光吸收。此外, 他们还通过一系列表征手段证实了梯形异质结的电子转移方式。该柔性复合纤维不仅在氧化苯酚中展现了优异的性能, 而且易于回收再利用。除了之前探讨的无机半导体光催化剂, 李喜宝带领其团队¹⁹利用g-C₃N₄和PDI-Ala之间的 π - π 相互作用和N-C键紧密结合自组装了全有机梯形光催化剂。并对其结构和性能进行了系统的分析。实验结果表明该催化剂在匹配的能带和紧密的界面的帮助下, 产生了多种活性物种, 并在可见光下实现了四环素和硝基苯酚的有效降解。

在先进光催化材料的漫漫探索之路上, 我们希望该专刊能够为先进光催化剂的设计构筑提供指导, 也为其性能突破提供新的认识。

References

- (1) Deng, H.; Fei, X.; Yang, Y.; Fan, J.; Yu, J.; Cheng, B.; Zhang, L. *Chem. Eng. J.* **2020**, 127377. doi: 10.1016/j.cej.2020.127377
- (2) Xu, F.; Meng, K.; Cheng, B.; Wang, S.; Xu, J.; Yu, J. *Nat. Commun.* **2020**, 11 (1), 4613. doi: 10.1038/s41467-020-18350-7
- (3) Xia, P.; Cao, S.; Zhu, B.; Liu, M.; Shi, M.; Yu, J.; Zhang, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59 (13), 5218. doi: 10.1002/anie.201916012
- (4) Wang, R.; Shi, M.; Xu, F.; Qiu, Y.; Zhang, P.; Shen, K.; Zhao, Q.; Yu, J.; Zhang, Y. *Nat. Commun.* **2020**, 11 (1), 4465. doi: 10.1038/s41467-020-18267-1
- (5) Xia, Y.; Zhang, L.; Hu, B.; Yu, J.; Al-Ghamdi, A. A.; Wageh, S. *Chem. Eng. J.* **2020**, 127732. doi: 10.1016/j.cej.2020.127732
- (6) Xu, Q.; Zhang, L.; Cheng, B.; Fan, J.; Yu, J. *Chem* **2020**, 6 (7), 1543. doi: 10.1016/j.chempr.2020.06.010
- (7) Liu, Y.; Hao, X.; Hu, H.; Jin, Z. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2008030. [刘阳, 郝旭强, 胡海强, 靳治良. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2008030.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008030
- (8) Mei, Z.; Wang, G.; Yan, S.; Wang, J. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2009097. [梅子慧, 王国宏, 严素定, 王娟. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2009097.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009097
- (9) Wang, P.; Li, H.; Cao, Y.; Yu, H. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2008047. [王苹, 李海涛, 曹艳洁, 余火根. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2008047.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008047
- (10) Chen, Y.; Li, L.; Xu, Q.; Dören, T.; Fan, J.; Ma, D. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2009080. [陈一文, 李铃铃, 徐全龙, Dören, T., 范佳杰, 马德琨. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2009080.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009080
- (11) Jiang, Z.; Chen, Q.; Zheng, Q.; Shen, R.; Zhang, P.; Li, X. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2010059. [姜志民, 陈晴, 郑巧清, 沈荣晨, 张鹏, 李鑫. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2010059.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202010059
- (12) Fei, X.; Tan, H.; Cheng, B.; Zhu, B.; Zhang, L. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2010027. [费新刚, 谭海燕, 程蓓, 朱必成, 张留洋. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2010027.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202010027
- (13) Zhou, X. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2008064. [周雪梅. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2008064.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202008064
- (14) Liu, D.; Chen, S.; Li, R.; Peng, T. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2010017. [刘东, 陈圣韬, 李仁杰, 彭天右. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2010017.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202010017
- (15) Li, Y.; Zhang, M.; Zhou, L.; Yang, S.; Wu, Z.; Ma, Y. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2009030. [李云锋, 张敏, 周亮, 杨思佳, 武占省, 马玉花. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2009030.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009030
- (16) Li, J.; Wu, X.; Liu, S. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2009038. [李嘉碧, 吴熙, 刘升卫. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2009038.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202009038
- (17) Wang, Z.; Hong, J.; Ng, S.-F.; Liu, W.; Huang, J.; Chen, P.; Ong, W.-J. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2011033. [王则鉴, 洪佳佳, Sue-Faye Ng, 刘雯, 黄俊杰, 陈鹏飞, 王伟俊. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2011033] doi: 10.3866/PKU.WHXB202011033
- (18) He, R.; Chen, R.; Luo, J.; Zhang, S.; Xu, D. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2011022. [赫荣安, 陈容, 罗金花, 张世英, 许第发. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2011022.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202011022
- (19) Li, X.; Liu, J.; Huang, J.; He, C.; Feng, Z.; Chen, Z.; Wan, L.; Deng, F. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, 37 (6), 2010030. [李喜宝, 刘积有, 黄军同, 何朝政, 冯志军, 陈智, 万里鹰, 邓芳. 物理化学学报, **2021**, 37 (6), 2010030.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202010030