

一、项目名称

二氧化钛纳米带表面异质结构的界面调控与宽光谱效应

二、申报奖种

国家自然科学奖

三、提名单位

山东省

四、提名意见

我单位认真严格地审阅了该项目提名书及全部附件材料，确认该项目符合山东省科学技术奖励规定的提名条件，全部材料真实有效，完成人、完成单位排序无异议，提名书相关栏目均符合填写要求。

该项目揭示了水热合成钛酸盐纳米结构的热力学和动力学调控机制，实现了超长二氧化钛纳米带的制备，发现了二氧化钛纳米带之间的桥氧形成与连接机理，制备了柔性 TiO_2 纳米带自支撑膜材料，设计并构建了过滤式连续光催化专利装置，为 TiO_2 光催化技术在污水处理方面的应用开辟了道路；发现 TiO_2 纳米带表面容易构建表面异质结构，在保持二氧化钛基质材料光催化性能的条件下，实现界面能带结构与载流子输运性能调控，从而抑制光生载流子复合，为高效光催化剂的设计奠定了理论基础；首次发现了本征窄带隙半导体的近红外光催化性能，并发现缺陷能级调控半导体的近红外光催化响应的机制，提出了 TiO_2 纳米带表面异质结构实现高效的宽光谱光催化响应材料的设计原理，实现了高效全太阳光谱光催化剂。本研究的 8 篇代表作他引达到 2351 次，项目组应邀在 *Chem. Soc. Rev.*, *Adv. Mater.*, *Adv. Energy Mater.* 等化学、材料和催化相关的顶尖期刊发表综述文章，显示了项目在该领域的重要学术地位，研究成果与嘉兴瑞奕环保科技有限公司进行合作转化，产生了可观的经济和社会效益。

提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

五、项目简介

由于常见的纳米光催化材料具有化效率低、活性光谱波段窄及高活性纳米颗粒尺寸太小导致回收利用困难等缺点，使得光催化污水降解技术效率低、成本高、无法真正利用太阳光，阻碍了光催化污水处理技术的工业应用。解决上述应用难题，面临的关键科学问题是：1. 抑制光催化过程中载流子复合，实现光生载流子的快速分离，是提高自由基产率、提升光催化降解效率的关键；2. 调控光催化材料界面能级结构，理解不同能级结构的半导体材料的界面耦合

机制，是拓宽光响应波段范围，实现利用太阳光进行光催化污水处理的关键科学问题；3. 理解二氧化钛纳米材料合成过程中晶核形成和晶面调控机制，是制备高活性、易回收二氧化钛光催化材料的关键科学问题。针对上述关键科学问题的研究，项目的主要科学发现包括：

（1）揭示了水热合成钛酸盐纳米结构的热力学和动力学调控机制，实现了超长二氧化钛纳米带的制备，发现了二氧化钛纳米带之间的桥氧形成与连接机理，制备了柔性自支撑 TiO₂ 纳米带光催化膜材料。设计并构建了过滤式连续光催化专利装置，为 TiO₂ 光催化技术在污水处理方面的应用奠定了理论基础并提供了可行路径。

（2）发现 TiO₂ 纳米带表面容易实现表面异质结构的构建，并发现利用异质结构界面上半导体能带匹配、肖特基效应和 p-n 结内建电场效应，实现界面能带结构与载流子输运性能调控，从而抑制光生载流子复合，为高效光催化剂的设计奠定了理论基础。

（3）首次发现了本征窄带隙半导体纳米材料（如 WS₂ 纳米片）的近红外光催化性能，突破了本征窄禁带半导体单相纳米材料的红外光吸收以晶格振动热转化过程为主的传统认识，为寻找和设计红外光催化材料提供了新的思路；发现缺陷能级调控半导体纳米材料（如 Bi₂WO₆）的近红外光催化响应的机制；基于宽带隙的 TiO₂ 纳米带表面组装窄带隙或者具有缺陷能级的半导体异质结构，可以将宽带隙的 TiO₂ 纳米带的光催化活性波段从紫外光拓展到可见光和近红外光，实现高效全太阳光谱光催化剂。

该研究有关红外光催化与全太阳光谱光催化的研究，在国际上处于领跑地位，获得了广泛的关注。该项目选取的 8 篇代表作他引达到 2351 次（SCI-E 数据库），应邀在 Chem. Soc. Rev., Adv. Mater., Adv. Energy Mater. 等行业最重要学术期刊发表了系列专题综述，一篇相关文章被评为 2013 年中国百篇最具影响力国际学术论文；项目组 3 人次获得科睿唯安“全球高被引科学家”，1 人在项目执行期间获得国家杰出青年科学基金的资助，显示了项目在该领域的重要引领地位，项目获得二氧化钛纳米带及其异质结构材料的相关发明专利授权 5 项，发明内容获得了良好的工业化污水深度处理效果，作为核心技术之一获批 2017 年度嘉兴市装备制造业重点领域首台（套）产品。以上研究成果为基础，获得了国家自然科学基金重点项目和重点研发专项政府间科技合作项目的后续支持。

六、代表性论文专著目录

代表性论文（专著）目录									
序号	论文（专著）名称/刊名/作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年 月 日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内作者	他引总 次数	检索数 据库	论文署名单 位是否包含 国外单位
1	Nanostructured sheets of Ti-O nanobelts for gas	2008, 18, 1131 - 1137	2008-4-11	刘宏, 王中林	王彦敏	王彦敏, 堵	164		

	sensing and antibacterial applications, Advanced Functional Materials, Yanming Wang, Guojun Du, Hong Liu, Duo Liu, Shubin Qin, Na Wang, Chenguo Hu, Xutang Tao, Jun Jiao, Jiyang Wang, Zhonglin Wang					国君, 刘宏, 刘铎, 秦淑斌, 王娜, 胡陈果, 陶绪堂, 王继扬		SCI-E	是
2	Nanoheterostructures on TiO ₂ nanobelts achieved by acid hydrothermal method with enhanced photocatalytic and gas sensitive performance, Journal of Material Chemistry, Weijia Zhou, Guojun Du, Peiguang Hu, Guohong Li, Dongzhou Wang, HongLiu, Jiyang Wang, Robert I. Boughton, Duo Liu, Huaidong Jiang	2011, 21, 7937	2011.04	刘宏, 王继扬	周伟家, 堵国君	周伟家, 堵国君, 胡培广, 李国红, 王东周, 刘宏, 王继扬, 刘铎, 江怀东	87	SCI-E	是
3	Ag ₂ O/TiO ₂ Nanobelts Heterostructure with Enhanced Ultraviolet and Visible Photocatalytic Activity, ACS Applied Materials & Interfaces, Weijia Zhou, Hong liu, Jiyang Wang, Duo Liu, Guojun Du, Jingjie Cui	2010, 2, 2385-2392	2010.08	刘宏	周伟家	周伟家, 刘宏, 王继扬, 刘铎, 堵国君, 崔静洁	317	SCI-E	否
4	Synthesis of Few-Layer MoS ₂ Nanosheet-Coated TiO ₂ Nanobelt Heterostructures for Enhanced Photocatalytic Activities, Small, Weijia Zhou, Zongyou Yin, Yaping Du, Xiao Huang, Zhiyuan Zeng, Zhanxi Fan, Hong Liu, Jiyang Wang, Hua Zhang	2013, 9, 140 - 147	2013.01	刘宏, 张华	周伟家, 殷宗友	周伟家, 刘宏, 王继扬	682	SCI-E	是
5	Enhanced Photocatalytic Performances of CeO ₂ /TiO ₂ Nanobelt Heterostructures, Small, Jian Tian, Yuanhua Sang, Zhenhuan Zhao, Weijia Zhou, Dongzhou Wang, Xueliang Kang, Hong Liu, Jiyang Wang, Shaowei Chen, Huaqiang Cai, Hui Huang	2013, 9, 3864 - 3872	2013.11	刘宏, 陈少伟	田健	田健, 桑元华, 赵振环, 周伟家, 王东周, 康学良, 刘宏, 王继扬, 蔡华强, 黄辉	133	SCI-E	是
6	From UV to Near-Infrared, WS ₂ Nanosheet: A Novel	2015, 27, 363 - 369	2015-01	刘宏	桑元华	桑元华, 赵振环,	242		

	Photocatalyst for Full Solar Light Spectrum Photodegradation, Advanced Materials, Yuanhua Sang, Zhenhuan Zhao, Mingwen Zhao, Pin Hao, Yanhua Leng, Hong Liu					赵明文, 郝品, 冷艳华, 刘宏		SCI-E	否
7	A Bi ₂ WO ₆ -Based Hybrid Photocatalyst with Broad Spectrum Photocatalytic Properties under UV, Visible, and Near-Infrared Irradiation, Advanced Materials, Jian Tian, Yuanhua Sang, Guangwei Yu, Huaidong Jiang, Xiaoning Mu, Hong Liu	2013, 25, 5075 - 5080	2013-09	刘宏	田健	田健, 桑元华, 于光伟, 江怀东, 牟晓宁, 刘宏	335	SCI-E	否
8	Recent progress in design, synthesis, and applications of one-dimensional TiO ₂ nanostructured surface heterostructures: a review, Chemical Society Reviews, Jian Tian, Zhenhuan Zhao, Anil Kumar, Robert I. Boughton, Hong Liu	2014, 43, 6920	2014-10	刘宏	田健, 赵振环	田健, 赵振环, 刘宏	391	SCI-E	是

七、主要完成人（完成单位）

刘宏（山东大学）、桑元华（山东大学）、周伟家（山东大学）、田健（山东大学）、王继扬（山东大学）