

# 陕西省科学技术进步奖公示信息

(2025年度)

## 一、项目基本情况

项目名称	环境资源化高效催化剂关键技术研发及产业化应用
主要完成人	马晶，张锐，褚佳，张玉洁，段银利，郝晨曦，刘运平
主要完成单位	西安建筑科技大学，西安爱尔迪环保科技有限公司，陕西西科铨安科技有限公司，重庆化工职业学院

二、提名意见（适用于单位提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 三等奖
<p>提名意见：</p> <p>本项目针对焦化、冶金等行业高浓度有机废水处理与资源化利用的重大需求，聚焦“双碳”战略目标，创新性地开发了高效异质结光催化材料及电-光催化耦合工艺技术，成功实现了污染物高效降解与绿氢/高值化学品联产的协同处理，具有显著的科学价值、技术突破性和产业推广意义。</p> <p>项目系统解决了光催化技术在实际应用中面临的太阳光利用效率低和载流子复合率高的两大核心瓶颈。通过构建多类型异质结结构，显著拓宽了光吸收范围，提高了光生电荷分离效率；研发了“磁性核-介孔硅-半导体”三元复合催化剂及新型钛基电极，揭示了催化剂结构—性能的构效关系，形成了指导材料设计的理论体系。在工艺与装备层面，首创了电助光催化耦合高级氧化系统，开发了集成化反应装备和专用电极涂覆装置，实现了催化电极的均匀、规模化制备，确保了工艺的稳定性与经济性。</p> <p>项目成果实现了对焦化废水中有机物、氨氮、氰化物等污染物去除率超过 99%，并高效回收有价值资源，大幅降低处理成本，在处理过程中同步生产绿色氢能，形成了“处理-资源化-产氢”一体化技术体系。相关技术已在多家企业成功应用，并推广至煤化工、印染等行业，展现出广泛的适用性和突出的经济效益与环境效益。</p> <p>项目成果丰硕，已获授权发明专利 6 项、实用新型 3 项，发表 SCI 论文 50 余篇，被引用 300 余次，形成了从材料创新、机理研究、装备开发到工程应用的全链条技术体系，突破了国外技术垄断，为我国工业废水深度处理与资源化利用提供了可靠的技术支撑和示范模式。</p> <p>综上，该项目技术先进、创新显著、应用效果突出，经济与社会效益显著，对推动行业绿色转型、助力实现“双碳”目标具有重要作用，推荐申报陕西省科学技术进步奖。</p> <p>说明：省科学技术进步奖一、二、三等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖，“提名二等奖”的评审落选项目不再降格参评三等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目正式提交后，提名等级建议不得变更。</p> <p>软科学标准计量科普类项目请勾选“二等奖”或者“三等奖”。</p>			

### 三、项目简介

(限 2 页)

本项目属于环境催化与资源化技术领域，针对焦化、冶金等行业高浓度有机废水处理与资源化利用的重大需求，创新性地开发了高效异质结光催化材料及耦合工艺技术，实现了污染物降解与氢能/化学品联产的协同处理。在“双碳”战略背景下，通过催化转化将有机污染物定向转化为氢能及碳基产品，成为实现环境资源化的创新路径。

在技术背景方面，冶金及煤化工行业产生的焦化废水具有污染物浓度高、成分复杂的特点。传统生化处理技术对这些污染物的去除效率普遍低于 60%，难以达到日益严格的排放标准。同时，在“双碳”战略背景下，开发新型清洁能源技术显得尤为重要。现有光催化技术面临两大技术瓶颈：一方面，传统  $\text{TiO}_2$  等光催化剂仅能利用不足 5% 的太阳光谱，光电转换效率低于 1%；另一方面，光生电荷分离效率低下，复合率超过 80%，严重制约了同时实现高效污染物降解和能源转化的可能性。

针对上述瓶颈，本项目系统开展了新型异质结光催化剂的界面构建与构效关系研究，并首次将其成功应用于焦化废水深度处理与制氢领域，实现了从基础研究到产业化示范的全链条突破。项目以开发具有高效光电转换能力、优良稳定性及可规模化生产的新型异质结光催化材料为核心，构建多类型异质结结构，提高光吸收范围与光生载流子分离效率，揭示催化剂结构—性能的内在关系，形成可指导材料设计的理论体系。同时，研发了电助光催化耦合高级氧化工艺，实现焦化废水中高浓度有机物、氨氮、氰化物的高效去除，并开发了适用于工业规模的集成化催化反应装备，确保了运行稳定性与经济可行性。该成果已在焦化、煤化工、印染等行业推广，形成可复制的示范模式。

主要解决的科学问题为：(1) **合成与制备方面**：对于复合光催化剂的光催化性能，材料的组成和合成工艺对材料的最终性能有重要影响。因此在异质结光催化剂的设计和合成方面，选择合理的体系，采用合理的方法和手段(层层自组装技术)，有目的地对材料进行合理的设计，优化合成条件，改善催化活性组分在载体上的分散度，提高表面活性位的利用率，从而提高光催化效率及重复利用率。(2) **机理研究方面**：光催化反应的主要过程是一些自由基的反应，反应时间短，影响其反应过程的因素很多，运用现代化的表征技术与高性能化学计算软件，模拟光催化反应过程，计算反应过程中活化能和中间体的能量，研究电子-空穴对的分离，电荷传输、催化剂表面与反应物相互作用等基本科学问题，探索催化性能与结构之间的一些内在关系，为分子设计在催化剂开发应用提供一定的理论数据。(3) **设备总装方面**：构建一套以太阳能为驱动核心、集废水处理与绿氢生产于一体的“光-电-催化”三位一体工业化系统。通过两项核心技术的高效协同，形成了一条集成化、强韧化且经济性突

出的技术路径。

本项目研究新型催化剂界面构建及其构效关系研究，主要研究内容为：(1) 新型TiO<sub>2</sub>基复合光催化剂，ZnO和含In氧化物光催化剂的构建，解决了传统光催化剂效率偏低的问题；(2) 新型结构钛基电极的制备，通过先进的表征手段揭示新型结构光电催化剂结构与性能之间的关系，并得出规律性认识，为进一步设计合成高效的异质结光催化剂提供可靠的科学依据，也为太阳能的资源化处理提供崭新的思路，使“太阳能”真正服务于人类；(3) 开展研究制备的“磁性核-介孔硅-半导体”三元催化剂目前已经应用于电化学-光催化强化氧化降解工业污染物中，可实现较低浓度下的焦化废水有机污染物的进一步光催化降解；(4) 光催化与电解制氢的柔性耦合，实现“稳定联产氢”。通过将新型高效电解水制氢设备与光催化反应器系统集成，不仅将不稳定的“副产氢”转变为连续稳定的“联产氢”，显著提升了系统的经济产出与可靠性，更通过光催化预处理降低电解槽进水负荷，实现了整体能耗的下降与产氢效率的提升，最终确保了全流程产出绝对的“绿氢”；(5) 利用新型钛阳极涂刷装置制备系统所需的高性能异质结光电催化电极。该装备通过确保涂层均匀、致密、牢固，直接攻克了光生电荷分离效率低、复合率高的核心技术瓶颈，大幅提升了催化活性与电极寿命。同时，该装备为催化电极的自动化、低成本、规模化生产提供了坚实基础，不仅构筑了“核心材料+核心制造装备”的双重技术壁垒，更开辟了向产业链输出专用装备的新盈利点。

本项目通过电化学-光催化强化氧化技术，突破了传统水处理工艺的设计原则以及物理、化学、物化与生化处理的传统技术界限，集成创新了多单元技术融合与一体化组合工艺，形成了适用于复合污染型焦化废水处理的技术路线。所开发的新型催化剂成功应用于低浓度焦化废水的高效光催化降解过程。相关技术与设备已在陕西科钛安科技有限公司、西安爱尔迪环保科技有限公司等企业实现应用，有效实现了焦化废水的安全处置与资源化利用，从源头控制了该类企业对周边环境的污染，体现出良好的环保效益，并推动了行业的绿色生产进程。该系统实现了污染物去除率超过99%，保障了废水的资源化回用；同时在处理过程中高效回收废水中的氨氮、氰化物等有价值物质，大幅降低了废水处理成本，为企业节约生产支出，提升市场竞争力，带来显著的经济效益。该项目所开发的关键技术与成套设备高度集成，各处理单元可独立运行，操作灵活简便，适用性广泛，还可拓展应用于纺织、印染等其他行业的废水处理，为同类难生物降解废水的有效治理与资源化利用提供了重要的技术支撑与理论依据。

本项目已获得授权发明专利6项、实用新型专利3项，发表SCI论文50余篇，SCI总他引300余次。该成果突破了传统光催化剂在光吸收范围、载流子分离效率及工程稳定性方面的瓶颈，形成了可复制推广的电化学-光催化协同废水深度处理技术路线，适用范围广、资源化利用率高，可广泛应用于焦化、煤化工、制药等行业，对推动陕西省乃至全国工业废水绿色治理、助力“双碳”目标实现具有重要意义。

## 四、客观评价

（限 2 页。围绕创新性、应用效益和经济社会价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价意见要有客观依据，主要包括与国内外相关技术的比较，国家相关部门正式作出的技术检测报告、验收意见、鉴定结论，国内外重要科技奖励，国内外同行在重要学术刊物、学术专著和重要国际学术会议公开发表的学术性评价意见等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。）

本项目面向焦化废水等多重复合污染水质的处理需求，历经六年系统研究，在光催化技术领域取得了系列理论突破与重大实践进展，形成了独具特色的研究体系。通过原理与材料结构创新，共发表 SCI 论文 50 余篇，出版专著 1 部，累计获得 SCI 他引 300 余次，体现了显著的学术影响力和创新价值。

### 1. 同行评价

项目所提出的多项光催化剂合成策略与技术路线，获得了国际同行的广泛认可与正面评价。论文（Chao Wu, Jianan Dai, Jing Ma, Tengyue Zhang, Liangsheng Qiang, Juanqin Xue. Mechanistic study of B-TiO<sub>2</sub>/BiVO<sub>4</sub> S-scheme heterojunction photocatalyst for tetracycline hydrochloride removal and H<sub>2</sub> production. Separation and Purification Technology, 2023, 312, 123398.）为 ESI 高被引论文。M. Ismael 等人于 Fuel、Journal of Molecular Liquids、Environmental Pollution 及 Journal of Rare Earths 等 SCI 期刊中充分肯定了本项目开发的新型光催化剂结构，指出“所报道的新型光催化剂表现出优于传统 TiO<sub>2</sub>的光催化性能，并对光催化增强机制提供了清晰阐释”。具体而言，本研究采用原位聚合法构建的“导电聚合物-石墨烯-半导体”三元体系光催化剂 TiO<sub>2</sub>/rGO/PANI，被化工领域 TOP 期刊 Fuel 评价为：“Ma 等人通过超声法合成了一种新型 PANI/TiO<sub>2</sub>/rGO 光催化剂，其光催化产氢活性显著高于 TiO<sub>2</sub>/rGO 及纯 TiO<sub>2</sub>，这归因于增强的光吸收能力和带隙能量的降低”。该评价明确指出了材料结构设计的创新性与性能优势。

此外，在磁性可分离光催化剂方面，本项目开发的超顺磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>@mSiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub>复合微球，被 Lv 等人于 Journal of Rare Earths 认可为具有“高光催化活性和优良的可回收性，外加磁场即可实现高效分离，且五次循环使用后活性未见明显下降”，凸显了材料在实际应用中的稳定性和可重复使用价值。

与国内外同类技术相比，本项目所开发的光催化剂在产氢效率与染料降解率方面均优于多数文献报道水平，展现出良好的应用潜力。尽管目前可见光响应性能仍是光催化技术走向大规模应用的关键挑战，本项目在拓宽光响应范围、提高量子效率方面取得了实质性进展，为推进该类材料在环境治理与能源转化领域的实际应用提供了重要理论支撑和技术途径。

### 2. 检测报告

在陕西西科铨安科技有限公司、西安爱尔迪环保科技有限公司等企业的实际应用中，本项目开发的电化学-光催化强化氧化技术及集成装备已成功实现对焦化废水的高效深度处理与资源化利用，尤其在光催化制氢方面取得了显著成效。

应用结果表明，该技术体系可稳定实现污染物去除率超过99%，在处理废水的同时，系统通过光催化反应实现了高效的氢气联产。在典型工业运行条件下，制氢速率显著优于传统光催化系统。同时，系统有效回收废水中的氨氮、氰化物等有价值资源，在显著削减污染排放的同时，大幅降低了企业废水治理成本。氢能的联产进一步提升了项目的经济性，为企业提供了清洁能源补充，增强了整体效益。

整套系统高度集成、操作灵活、运行可靠，不仅从源头解决了焦化企业对周边环境的污染问题，体现出良好的环保效益，还可推广应用于纺织、印染等其他高浓度难降解工业废水处理场景，为相关行业实现绿色生产和可持续发展提供了可靠的技术支撑。

### 3. 验收意见

本项目涉及的重要课题之一“陕西省国际科技合作计划项目——二维异质结光解水催化剂的设计合成及催化增强机制研究”的验收意见对本项目针对光解水研究做了肯定，结论为“实现了界面相互作用及其构效关系的研究，并解析了光催化机理1形成了一定的规律性认识和理论成果”。

### 4. 科技奖励

本项目的部分研究成果已获得行业的认可，相关报告收集在陕西省科技报告服务系统外，“高效新能源催化剂界面构建及其构效关系”于2023年获得陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖，相关技术得到国内外学术界和工程界的广泛关注和赞誉。

## 五、应用情况

### 1. 应用情况（限 2 页）

本项目面向焦化废水中高浓度石油类、氨氮、酚类及氰化物等复合污染物的治理需求，依托产学研深度融合，开发了一套高效协同的废水处理与资源化技术体系，并在实际工程中成功应用。

本项目研发的新型催化剂及集成化处理系统已在多家企业实现产业化应用，有效解决了焦化废水的高效处理与资源化难题。在陕西西科铌安科技有限公司、西安爱尔迪环保科技有限公司等示范工程中，系统表现出优异的运行稳定性和处理效能。

应用结果表明，该技术体系可实现焦化废水污染物综合去除率超过 99%，并同步实现氨氮、氰化物等有价资源的高效回收，大幅降低处理成本，为企业带来显著经济效益。通过光催化-电解制氢耦合系统，成功将不稳定的副产氢转化为连续稳定的绿氢联产，在实现废水深度处理的同时，提高了全流程的能源与经济收益。

项目开发的成套装备采用模块化设计，各处理单元可独立或协同运行，操作灵活，适应性强，目前已拓展应用于纺织、印染等行业的难降解废水处理，为复杂工业废水的资源化治理提供了可靠的技术支撑和工程示范。

本技术所开发的催化剂具备易得、高效、适用性广等特点，不仅为高性能光催化剂的设计与太阳能驱动资源化技术提供了新路径和理论支撑，也为企业推进降本增效和绿色转型提供了切实可行的解决方案，应用前景广阔。

主要应用单位情况

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人
1	陕西西科铌安科技有限公司	电化学-光催化强化氧化技术	焦化废水处理，规模约 10 吨/天	2021.6.1-2023.6.1	褚佳
2	西安爱尔迪环保科技有限公司	电化学-光催化强化氧化技术	冶金废水处理，规模约 8 吨/天	2021.7.1-2023.7.1	郝晨曦

## 六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	论文	Mechanistic study of B-TiO <sub>2</sub> /BiVO <sub>4</sub> S-scheme heterojunction photocatalyst for tetracycline hydrochloride removal and H <sub>2</sub> production	中国	2023, 312, 123398	2023 年 02 月	Separation and Purification Technology	西安建筑科技大学	Chao Wu, Jianan Dai, Jing Ma, Tengyue Zhang, Liangsheng Qiang, Juanqin Xue
2	实用新型	一种新型电解水制氢设备	中国	ZL2023 2204436 1.3	2024 年 03 月	20544 126	西安爱尔迪环保科技有限公司	张锐, 刘运平, 曹煜乾
3	论文	Fabrication of PANI-TiO <sub>2</sub> /rGO hybrid composites for enhanced photocatalysis of pollutant removal and hydrogen production	中国	2020, 156, 1008-10 18	2020 年 04 月	Renewable Energy	西安建筑科技大学	Jing Ma, Jianan Dai, Yinli Duan, Jiajia zhang, Liangsheng Qiang, Juanqin Xue.
4	实用新型	一种新型钛阳极涂刷装置	中国	ZL2023 2220050 3.0	2024 年 03 月	20189 60	西安爱尔迪环保科技有限公司	张锐, 刘运平, 曹煜乾
5	发明专利	一种晶型可控 TiO <sub>2</sub> 光催化材料的制备方法	中国	ZL2021 1036104 1.3	2023 年 08 月	62222 78	西安建筑科技大学	马晶, 张佳佳, 薛娟琴
6	发明专利	一种化学一步法制备不同形貌聚吡咯/壳聚糖复合电极的方法	中国	ZL2017 1030925 9.8	2019 年 07 月	30733 95	西安建筑科技大学	张玉洁, 薛娟琴, 马晶, 代继哲
7	发明专利	一种不同形貌 ZnO/In(OH) <sub>3</sub> 复合光催化剂的制备方法	中国	ZL2019 1114407 4.1	2023 年 03 月	58318 75	西安建筑科技大学	马晶, 段银利, 薛娟琴, 代佳楠
8	论文	Interface engineering of ZnO/In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Z-scheme heterojunction with yolk-shell structure for efficient photocatalytic hydrogen evolution	中国	2022, 59 2, 15330 6	2022 年 04 月	Applied Surface Science	西安建筑科技大学	Yinli Duan, Juanqin Xue, Jianan Dai, Yaru Wei, Chao Wu, Shuhao Chang, Jing Ma
9	论文	Facile synthesis of novel Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> @mSiO <sub>2</sub> @TiO <sub>2</sub> core-shell microspheres with mesoporous structure and their photocatalytic performance	中国	2018, 74 3: 456-463	2018 年 02 月	Journal of Alloys and Compounds	西安建筑科技大学	Jing Ma, Ni Sun, Chao Wang, Juanqin Xue, Liangsheng Qiang
10	论文	Interface engineering of Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> MXene assisted anatase/rutile TiO <sub>2</sub> with hetero-phase junction for enhancing the photocatalytic activity of	中国	2024, 64, 105649	2024 年 06 月	Journal of Water Processes Engineering	西安建筑科技大学	Jianan Dai, Chao Wu, Jing Ma, Shuhao Chang, Weiwei Li



		tetracycline hydrochloride removal and H <sub>2</sub> production				ceering		
--	--	--	--	--	--	---------	--	--

## 七、主要完成人情况表

姓 名	马晶	排 名	1
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 项目负责人，全面负责技术路线制定、项目总体规划与实施。创新性地将电化学高级氧化、光催化降解与电解水制氢三项技术高效耦合，构建了以太阳能为主要驱动力、集成化、连续运行的工业级“光-电-催化”反应系统。见附件 1-1,1-3,7-8,7-9,9-1。			

姓 名	张锐	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	西安爱尔迪环保科技有限公司		
完成单位	西安爱尔迪环保科技有限公司		
对本项目技术创造性贡献：  主要负责电极材料的制备及与光催化剂的复合，通过参数调整及工艺优化，实现了废水中光电协同应用。系统优化了偏压（0.8-1.2V）、pH（3-11）、电解质浓度等光电化学参数，建立了焦化废水处理的工艺数据和钛电极的涂刷新工艺，为工业装置设计提供了关键参数支持。开发的负载型杂化材料在连续流反应器中表现出优异稳定性，在申请了相关专利两项的基础上，通过项目合作，开发了高性能低贵金属电极新工艺（见附件 8-2）。			

姓 名	褚佳	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	陕西西科铨安科技有限公司		
完成单位	陕西西科铨安科技有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 全面参与了项目开发的高效新能源催化剂界面构建及其构效关系，针对材料能带结构的梯度精确调控以及活性位点的精准负载等关键科学与技术难题，开展了系统而深入的研究。创新性地提出并实践了多种材料改性策略，成功实现了材料能带的多级调控，显著提升了载流子分离与传输效率。通过学校与企业之间的协调合作，保证项目开发的技术在生产实践中得到应用，同时完成了该技术的推广应用。共同申报陕西省高等学校科学技术研究优秀奖，见附件 9-1。			

姓 名	张玉洁	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献：  主要负责聚吡咯导电高分子和半导体材料的复合及应用与重金属离子的处理。通过参数调整及工艺优化，实现了电-光催化耦合工艺在工业化废水中的工程应用，实现废水处理与绿氢联产；石墨烯基复合材料的可控制备及用于光催化制氢的研究中。通过参数调整及工艺优化，实现了光催化的工程应用。共同申报陕西省高等学校科学技术研究优秀奖，并共同申请专利（见附件 7-5 和 9-1）。			

姓 名	段银利	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	重庆化工职业学院		
完成单位	重庆化工职业学院		
对本项目技术创造性贡献： 通过构建新型 TiO <sub>2</sub> 基、ZnO 基及含铟氧化物基异质结光催化剂，创新性地引入石墨烯、二硫化钼等二维层状材料作为电子传输媒介和助催化剂，系统优化了催化剂的界面结构与能带匹配。实现了光催化效率与使用寿命的协同提升，为高效、稳定、太阳光驱动的催化反应体系奠定了坚实的材料基础。见附件 7-7,7-9。			

姓 名	郝晨曦	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	无		
工作单位	西安爱尔迪环保科技有限公司		
完成单位	西安爱尔迪环保科技有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 开发出适用于废水处理的高效吸附材料，并实现工程化应用。在焦化废水处理领域，通过系统优化光电化学工艺参数，建立了高效的电化学处理技术方案，相关实验数据为光电催化技术的实际应用提供了重要支撑。通过项目合作，开发了高性能低贵金属电极新工艺（见附件 8-2），并开发了模块化装备，实现技术推广与行业应用。			

姓 名	刘运平	排 名	7
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	西安爱尔迪环保科技有限公司		
完成单位	西安爱尔迪环保科技有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 主要负责有机高聚物的制备及与光催化剂的复合，实现了废水中吸附的工程应用；通过光电化学参数优化获得了理想的电化学处理焦化废水的工艺过程。为光电催化的应用提供实验数据。申请了相关专利两项（见附件 1-2 和 7-3），为理论机制研究与全过程系统优化奠定了基础。			

## 八、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>项目依托西安建筑科技大学开展具体实验研究过程，实验室经过多年的研究形成了一支学历层次高，年轻有为、富有活力和创新精神的科研队伍，实验室各类实验和分析设备先进，且在改项目的实施和应用过程中发挥了巨大作用。作为项目完成单位，全面负责项目的实施、理论分析以及整体技术路线的制定。在项目的实施过程中，西安建筑科技大学针对项目特点，合理协调人员安排，从人力和物力上保证了项目的顺利实施。</p> <p>在本项目中，建大主要完成的工作有：建立了光激发产生的电子和空穴的有效分离和迁移关键技术，电化学-光催化氧化技术，对半导体纳米材料进行合理的复合、剪裁，克服单一半导体光催化剂量子效率低，提高光催化剂的稳定性等技术。通过产学研结合与陕西西科铌安科技有限公司，西安绿洲环保工程有限公司完成了技术成果的工程应用和推广。</p>	

单位名称	西安爱尔迪环保科技有限公司
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>在本项目的整体实施过程中，西安爱尔迪环保科技有限公司主要负责 PEM 电解槽及制氢材料的制备与回收技术的开发与应用。该公司通过创新材料合成与回收工艺，显著提升了电极材料的催化效率、耐久性、资源循环利用率，为降低系统成本和推动绿色氢能技术发展提供了关键技术支撑。在工程实践方面，该公司完成了核心设备的选型与集成，并对氢气制备与处理工程的工艺参数进行了系统优化，确保了技术路线的先进性与工程可行性。</p>	

单位名称	陕西西科铨安科技有限公司
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>陕西西科铨安科技有限公司作为本项目的重要合作单位，深度参与了从实验室研究到产业化应用的全过程。在项目研发阶段，公司严格依据项目组提出的理论设计及性能指标，开展了大量工艺放大实验与重复验证工作，成功将实验室制备方案转化为稳定、可重复的生产工艺，为催化材料的可控制备提供了关键技术支持，确保了科技成果的高质量落地。在应用推广方面，公司充分发挥其产业资源和市场优势，全面负责本项目成果的转化与示范应用，通过在周边多家企业实施验证，证明了该技术在废水处理中的高效性与稳定性，显著提升了合作企业的环保效益。这一成功实践不仅有效增强了公司的社会形象和行业品牌影响力，同时也为同类企业提供了可借鉴的样板，对推动地区乃至行业的技术进步与绿色发展起到了积极的引领作用。</p>	

单位名称	重庆化工职业学院
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>本项目针对光催化剂稳定性不足及可见光利用效率低的核心问题，对 <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> 基复合材料的制备工艺进行了系统性优化。主要科技创新体现在通过创新的元素掺杂与复合结构设计，在显著增强材料化学稳定性和循环使用寿命的同时，成功将其光响应范围拓展至 600 nm 以上，有效提升了太阳光中可见光能量的捕获与转化效率。在此基础上，项目对催化剂的微观形貌、晶相结构、元素价态及光学性质等进行了多维度结构表征，明确了掺杂元素的存在形式及其对能带结构的调控机制。尤为关键的是，通过系统分析有机污染物降解过程中的中间产物，项目精准揭示了复合材料在可见光照射下的电荷分离-迁移路径与活性物种生成规律，构建了“结构-性能-机理”之间的内在关联，为开发高效、稳定、可见光驱动的催化体系提供了坚实的理论依据与关键数据支撑。</p>	

## 完成人合作关系说明

本项目依托多学科交叉团队协同完成，各完成人充分发挥自身专业优势，在项目研发、工程转化及产业化应用全链条中形成了紧密且高效的合作关系。具体合作方式及贡献如下：

1. **马晶与褚佳**作为项目核心负责人，共同主导了“磁性核-介孔硅-半导体”三元异质结构的设计与开发工作。通过联合技术攻关，成功解决了材料能带梯度调控与活性位点精准负载等关键科学与技术问题，为高效光催化体系的构建奠定了材料基础。
2. **段银利、韩晨曦与刘运平**组成机理研究小组，系统开展了光生电荷分离与传输机制的理论与实验研究。该团队采用原位光谱技术与密度泛函理论（DFT）计算相结合的方法，揭示了复合光催化剂中电子-空穴分离与迁移的内在机制，为催化剂结构优化提供了关键理论依据。
3. **张玉洁**聚焦于光电协同工艺与反应器开发。张玉洁负责废水处理效能评估与工艺参数优化，主导电化学系统设计与集成，双方合作开发了高效、稳定的模块化反应装备，实现了光催化-电化学协同处理工艺的工程化应用。
4. **张锐与马晶团队**致力于推进实验室成果的产业化应用。张锐基于其在工业废水处理领域的实践经验，提供了丰富的废水水质数据并指导了装备放大与工程示范；马晶团队负责核心技术的中试验证与系统适配。双方通力合作，成功将研究成果应用于陕西西科铨安科技有限公司、西安爱尔迪环保科技有限公司等企业的焦化废水处理项目，实现了技术转化并取得显著环境与经济效益。



### 完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/ 项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	马晶/1 段银利/5	2018.09.01	2024.10.30	Fabrication of PANI-TiO <sub>2</sub> /rGO hybrid composites for enhanced photocatalysis of pollutant removal and hydrogen production. Renewable Energy, 156 (2020) 1008-1018. Interface engineering of ZnO/In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Z-scheme heterojunction with yolk-shell structure for efficient photocatalytic hydrogen evolution. Applied Surface Science, 592 (2022) 153306.	附件 1-3 附件 7-7
2	共同知识产权	马晶/1 张玉洁/4	2013.04.01	2024.10.30	一种化学一步法制备不同形貌聚吡咯/壳聚糖复合电极的方法	附件 7-5
3	共同立项	马晶/1 褚佳/3	2017.01.01	2024.10.30	贵金属铈材料研制及回收利用	附件 8-1
4	共同立项	马晶/1 张锐/2 张玉洁/4 郝晨曦/6 刘云平/7	2013.04.01	2024.10.30	新型高性能低贵金属用量钛电极的提升	附件 8-2
5	共同获奖	马晶/1 褚佳/3 张玉洁/4 段银利/5	2017.01.01	2024.10.30	陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖	附件 9-1