

陕西省科学技术进步奖公示信息

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	过渡金属基高效电解水催化剂设计及制备关键技术与应用
主要完成人	邹祥宇、韩婕
主要完成单位	陕西理工大学

二、提名意见（适用于单位提名）

提名者	汉中市人民政府	提名等级	☐ 一等奖 ☐ 二等奖 ☒ 三等奖
提名意见：			
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。 软科学标准计量科普类项目请勾选“二等奖”或者“三等奖”。			

三、项目简介

电解水制氢是构建“绿氢”经济、推动全球能源转型与“双碳”目标实现的核心技术，具备重大的战略价值与应用前景。然而，天然水体系的复杂性给电解水制氢技术带来了严峻挑战，尤其是在高电流密度条件下，依然存在气液传质效果不佳、副反应发生以及催化剂性能衰减等问题，仍然是国内外学者普遍关注的重大科技问题。本研究成果在1项国家自然科学基金、2项省级项目的资助下，突破了高电流密度条件下电解水制氢关键科技问题，利用本征结构与电子优化为核心策略，构筑了一系列具有成本效益的过渡金属自支撑催化剂，解决了传统电解水催化剂受限于电子/离子传输能力、耐久性、催化活性等现实瓶颈问题。通过电子与结构协同调控和优化设计，靶向调控过渡金属催化剂的重构行为以实现电解制氢体系的高效稳定运行，系统揭示了“工艺-结构-性能”的关联性；借助能带结构、态密度泛函及自由能等理论计算，探析了复合异质结构催化剂在加速电荷转移、电子结构优化作用，以及含氧阴离子对催化剂活性和耐久性提高的内在机制。该研究成果为高电流密度下大规模长效电解水制氢提供了科学依据。科学及应用价值主要为以下三个方面。

(1) 利用构建复合异质结构策略，实现金属 V 与非晶态 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 在三维导电泡沫镍 (NF) 基底上原位锚定生长，一步构筑出兼具高催化活性和稳定性的 $\text{NiVP}@ \text{NiFeV-LDH}$ 催化剂。利用 V 与 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的功函数差形成促进二者复合的异质界面内置电场，该内置电场具有强电子耦合作用，促使界面电子持续向 V 转移，维持 V 的金属态，优化了催化剂中活性位点对含氧中间体的吸附能力，降低了对 OH^- 的吸附能垒差，解决了传统催化剂在水电解过程中重构速度慢以及重构物种在大电流密度下稳定性差，有效保障大电流密度下水电解过程中催化结构的稳定性。

(2) 原位构筑双元素 P、Mo 修饰的 $\text{P-MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2@ \text{NF}$ 自支撑催化剂。双元素 P、Mo 协同对催化剂的电子结构优化程度远超 P 和单金属 Mo。在析氢反应过程中，Mo 位点的亲 H^+ 性协作促进水的解离；在析氧反应过程中，P 位点的亲 OH^- 性，双元素协同优化了催化剂析氧反应路径，进而增强了催化剂的耐久性。双掺杂对催化剂进行深度电子调制，使催化剂具有快速的界面电荷转移和表面重构能力，成功实现了过渡金属氧化物催化剂在工业电解水中析氢和析氧双功能催化活性与稳定性的同步提升，为构筑稳健制氢催化剂的设计提供了全新技术方案。

(3) 借助掺杂与硫化的精准构建策略，通过水热合成技术原位构筑出 ZrCoFe 和 Ni_3S_2 纳米片形成包覆多级有序结构的 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{ZrCoFe-LDH}@ \text{NF}$ 催化剂。该催化剂实现了 ZrCoFe 和 Ni_3S_2 在纳米尺度的高效耦合， ZrCoFe 核心提供高效的电子转移路径并降低速控步骤热力学能垒；依托 Ni_3S_2 垂直纳米片形成的微纳孔隙，提升了材料比表面积与电解质离子扩散效率和气泡脱附速率。利用 Ni_3S_2 在氧化电位下易于氧化为含氧阴离子的特点，采用阴离子间相互排斥并形成空间位阻的效应可以有效阻碍杂质进入催化剂表面，突破了掺杂策略仅是提高水电解过程中 HER 活性以规避发生副反应的电压区间进行催化剂的防失效的关键科学问题。

成果完成人聚焦区域优势资源及产业发展需求，基于工业级电流密度下长效电解水制氢基础与应用研究，积极与企业开展校-企合作，发挥技术服务作用。与知合高新科技(辽宁)有限公司、兰州世达电子工程技术有限公司、陕西汉中水投集团有限公司、陕西天美绿色产业发展有限公司、江苏宿迁绿能氢创科技有限公司等国内多家企业开展技术合作，实现无副反应、无额外能耗的水电解制氢，建立工业级稳健水电解制氢的示范基地。随着本研究成果的不断突破和成本的降低，以及市场需求的增长和政策支持的加强，本研究成果将有望在全国范围内得到更广泛的应用和推广。

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。）

本成果 6 篇代表性论文被 Web of Science 核心合集他引 92 次，单篇最高他引 46 次。代表性论文 1 迄今被 Web of Science 他引 46 次。中北大学杜晓强在《Fuel》[2026,406: 137230]在该文的文献综述与技术展望部分，作者明确引用了我们此前发表的研究成果，强调双碳目标不仅是一项宏观政策导向，更深刻驱动着基础研究向应用落地加速转化，促使工程界重新评估传统能源系统的生命周期碳足迹，从而推动氢基燃料、氨掺烧、生物质衍生合成气等新型低碳/零碳燃料体系的研发与集成验证。宁波大学翟春阳发表于《Chemical Engineering Journal》[2023,481:148429]文章中，系统探讨了新型过渡金属基电催化剂在碱性介质中析氧反应的电化学行为与反应机理。该工作在动力学分析部分明确引用了我们此前发表的相关研究，并基于我们的实验数据与理论框架，进一步深化了对 OER 起始电位判定标准的理解。文中特别指出：在相对于可逆氢电极为 1.55 VRHE 的电位处，平衡电流密度（即扣除双电层充电电流后、仅由法拉第过程贡献的稳态电流密度）出现显著跃升，其数值明显高于该电位以下区域的本底水平，且显著高于相邻更高电位区间（如 1.57–1.59 V）所观测到的增幅趋势。这一非线性增长特征被作者合理归因于 OER 的实质性启动，即水分子在催化活性位点上发生吸附、去质子化及 O–O 键耦合等基元步骤开始主导电极反应路径。电流响应曲线斜率、电荷转移电阻变化率以及表面氧化物种的演化行为均呈现出高度一致的拐点特征，进一步佐证了该电位作为 OER 热力学与动力学交叉临界点的可靠性。台州大学钟文武近期在国际权威期刊《Journal of Colloid and Interface Science》[2024,658:383]发表的研究中，系统探讨了过渡金属磷化物在电催化析氢反应中的应用潜力。该工作在材料设计与机理分析部分明确引用了我们课题组此前发表的相关研究，并高度肯定了镍基磷化物作为非贵金属 HER 催化剂的综合优势。

代表性论文 2 迄今被 Web of Science 他引 14 次。广西大学杨皓在《Journal of Catalysis》[2026,454 :116591]中系统探讨了析氢反应（HER）在电化学水分解体系中的核心地位，并明确引用本工作指出：“HER 作为水分解的阴极半反应，其动力学效率直接决定整体制氢能耗与可持续性；而本研究提出的活性位点调控策略，为理性设计低过电位、高稳定性 HER 催化剂提供了可迁移的方法论基础。”。陕西师范大学刘志宏在《Chemical Science》[2025, 16, 15684]中引用我们的文章，深入分析了 Fe-Co 双金属协同效应。其引用本研究强调：“实验观测到的 Co 2p 峰位负移及 Fe 2p 峰形展宽现象，与本工作中提出的‘电子给体模型’高度吻合；这种界面电荷重分布

不仅稳定了高价态 Co^{3+} 物种，还显著降低了氢吸附自由能，从而提升本征催化活性。”。印度中央电化学研究所 Subrata Kundu 在《Journal of Materials Chemistry A》[2025, 13, 14915]中引用我们的文章，证明当层状双氢氧化物（LDH）通过诸如掺杂金属离子、与导电材料形成异质结构等策略进一步修饰时，其催化活性可以得到增强。扬州大学冯立纲在《Journal of Energy Chemistry》[2025, 106 :340] 基于原位拉曼光谱与计时电量分析，证实镍钼协同效应对反应动力学的关键作用：Ni-Mo 界面处形成的电子富集区有效削弱了 H-OH 键断裂能垒，加速了水分子解离步骤；这一发现与本研究关于多金属位点耦合机制的论述形成有力互证，共同支撑双功能活性中‘设计策略’的可行性。陕西科技大学苏庆梅在《Journal of Colloid and Interface Science》[2025, 687:314]中指出，从资源可持续性视角出发，综述了非贵金属电催化剂的发展趋势：“相较于依赖稀缺贵金属（如 Pt、Ir、Ru）的传统体系，以 Co、Ni、Mo 等地球储量丰富、环境兼容性强的过渡金属为基础构建的纳米催化材料，正逐步成为面向规模化绿氢生产的现实选择；本研究在低成本前驱体转化路径与结构稳定性强化方面的探索，为此类材料的工程化应用提供了重要技术参考。喀什大学 Abdukader Abdukayum 在《Electrochimica Acta》[2024, 503: 144891]中则从产业化落地角度评价道：“电催化剂的长期运行稳定性与单位质量活性，是制约碱性电解槽商业化进程的两大瓶颈；本工作为高性能、长寿命非贵金属催化剂的设计提供了兼具理论深度与实践价值的解决方案。”

代表性论文 3 迄今已被 Web of Science 核心合集数据库收录文献他引 32 次。印度勒克瑙大学理学院 Abhinav Kumar 团队在《International Journal of Hydrogen Energy》（2025, 172: 151343）中引用本研究工作，通过 X 射线光电子能谱（XPS）分析证实：OER 反应后 MoS_2 中 P 2p 峰向较低结合能方向偏移，表明磷掺杂诱导电子富集，从而在催化界面形成富电子中心，有利于提升本征催化活性。此外，拉吉夫·甘地石油学院 Prerna Tripathi 等人在《Journal of Materials Chemistry A》（2025, 13: 39603）中系统引用并验证了本研究的核心结论：“磷掺杂可有效激活 MoS_2 基面惰性区域，显著增加暴露的活性位点密度。研究采用的一步水热法成功构筑自支撑 P 掺杂 $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2@\text{NF}$ 异质结构电催化剂有利于界面电荷快速转移与双组分协同催化作用。电化学测试表明，该催化剂兼具优异的析氢反应与析氧反应活性：在 1 M KOH 电解液、双电极配置下，仅需 1.42 V 电池电压即可实现 10 mA cm^{-2} 的全解水电流密度，对应总过电位低至 190 mV，充分证实其高效的整体水分解动力学性能。青岛科技大学化学与分子工程学院王磊教授团队在《Inorganic Chemistry Frontiers》（2025, 12: 5258）中引用本研究工作，指出：当非金属掺杂与异质结构构筑协同实施时，可显著促进界面电荷转移动力学，并诱导有益的电子结构重构，从而协同提升催化剂的本征活性、体相电导率及结构稳定性。”该评述进一步强调，非金属掺杂与其他理性改性策略（如异质界面工程、自支撑基底设计等）的耦合，有望成为突破电催化性能瓶颈的有效途径。

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

本项目瞄准新能源领域高效电解水制氢材料及技术需求，与知合高新科技(辽宁)有限公司开展技术攻关，突破了新型过渡金属基高效电解水催化剂异质结构设计、大规模可控制备和高效全水解性能等技术难题，实现了高催化活性过渡金属基电解水催化剂异质结构控制及性能提升、产业化应用，形成的过渡金属基高效电解水催化剂设计及制备关键技术广泛用于氢能生产及储运企业，取得了显著的经济效益和社会效益，受到了应用单位及客户的一致好评。

本项目形成了一套具有完全自主知识产权的过渡金属基电解水催化电极作为主要构成物用于高效电解水制氢的关键技术，成果在知合高新科技(辽宁)有限公司和兰州世达电子工程技术有限公司推广后，所生产的系列高效双功能电解水催化电极产品在本市设立销售点，并推广至上海、江苏、陕西、内蒙古、新疆、湖南等地，产品广泛应用于电解槽、电解水制氢系统及氢能输送设备。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用技术	应用对象及规模	应用起止时间
1	知合高新科技(辽宁)有限公司	电解水制氢催化电极制备	电解海水制氢技术及设备，近五年新增销售额 2427 万元。	2021.01-2025.12
2	兰州世达电子工程技术有限公司	电解水制氢催化电极制备	电解槽及电解水制氢系统设备，近五年新增销售额 5232 万元。	2021.01-2025.12

2. 经济效益和社会效益

2.1 经济效益

项目在知合高新科技(辽宁)有限公司和兰州世达电子工程技术有限公司 2 家企业得到了推广应用，产品在全国 30 多个省市重要工程（如陕西汉中水投集团有限公司、陕西天美绿色产业发展有限公司、江苏宿迁绿能氢创科技有限公司）得到了推广应用，取得了显著的经济效益，近五年新增利润共计 1400 余万元。

计算依据：

本年度新增销售额/新增利润=本年度公司年度总销售额/利润-本年度公司其他产品所产生的年度总销售额/利润。经核算，2 家应用企业的新增销售额和新增利润如下：

（1）成果应用于知合高新科技(辽宁)有限公司后，近四年新增销售额 2427 万元，新增利润 405 万元。

（2）成果应用于兰州世达电子工程技术有限公司后，近四年新增销售额 5232 万元，新增利润 996 万元。

具体经济效益为（单位：万元）：

自然年	知合高新科技(辽宁)有限公司		兰州世达电子工程技术有限公司	
	新增销售额	新增利润	新增销售额	新增利润
2021	407	68	686	120
2022	452	79	794	155
2023	467	81	1043	198
2024	518	83	1238	245
2025	583	94	1471	278

2.2 社会效益

项目的推广和应用取得了良好的社会效益，具体体现在：

（1）绿氢被视为最有前景的清洁能源载体，以电解水制氢为基础，提升可再生能源的利用，为经济的高质量、可持续发展提供有效保证。水电解制氢技术能够直接利用江水、河水、湖水这一丰富的自然资源进行制氢，减少对纯净水资源的依赖，优化了国家资源利用；减少对化石能源的依赖，有利于优化能源结构，保障能源供应的多元化和稳定性，提高国家的能源安全。

（2）氢能产业的发展将创造大量的就业机会，包括技术研发、设备制造、运营维护等各个环节，同时，也将激发创业活力，吸引更多的社会资本投入到氢能产业中来；本项目的研发和应用需要不断的技术创新和突破，通过加强科研投入和人才培养，可以推动我国在氢能领域的科技创新能力不断提升，为全球氢能产业的发展贡献中国智慧和力量；水电解制氢过程中不产生污染物和温室气体排放，具有显著的环境效益，这有助于推动全球能源结构的转型和可持续发展目标的实现。

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								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

七、主要完成人情况表

姓 名	邹祥宇	排 名	第 1 完成人
行政职务			
技术职称	教授		
工作单位	陕西理工大学		
完成单位	陕西理工大学		
对本项目技术创造性贡献： 项目总负责人，统筹项目规划及技术实施，设计了一系列具有成本效益的过渡金属自支撑催化剂，靶向调控过渡金属催化剂的重构行为以实现电解制氢体系的高效稳定运行，系统揭示了“工艺-结构-性能”的关联性。主持完成国家自然科学基金项目 1 项、省级项目 2 项、企业委托课题 1 项，2 篇代表性论文的主要作者，对创新点 1、2 均有贡献。			

姓 名	卫学玲	排 名	第 2 完成人
行政职务			
技术职称	高级工程师		
工作单位	陕西理工大学		
完成单位	陕西理工大学		
对本项目技术创造性贡献： 结合多种原位表征技术捕获动态重构信息，揭示真正的活性位点信息，探究催化剂活性与结构稳定性，系统构建“结构-性能”关系并揭示内在反应机理。省级项目 1 项，主持完成企业委托课题 1 项，6 篇代表性论文的主要作者，对创新点 1 有贡献。			

姓 名	韩婕	排 名	第 3 完成人
行政职务			
技术职称	讲师		
工作单位	陕西理工大学		
完成单位	陕西理工大学		
对本项目技术创造性贡献： 参与“锚定”生长自支撑催化剂设计工艺，负责样品制备、结构检测分析；参与开发小型电解水配套的电解槽和整套电解设备。1 篇代表性论文的参与者，对创新点 2 有贡献。			

八、主要完成单位情况表

单位名称	陕西理工大学
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 项目的主要依托单位，主要负责项目的总体规划和组织实施，在项目的实施过程予以全方面支持、管理和监督等工作，在人力、物力、财力等方面给予了大力支持，保障项目的顺利运行。负责项目的验收工作及成果管理工作。项目所在二级学院在人员、工作安排、研究条件、实验设备、分析检测、场地等方面给予了大力的支持，确保项目按规划顺利完成。	

单位名称	
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：	

完成人合作关系说明

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	邹祥宇 (第一)、 卫学玲 (第二)	2020.06	2025.12	Local electronic structure modulation of NiVP@NiFeV-LDH electrode for high-efficiency oxygen evolution reaction	代表性论文 1
2	论文合著	邹祥宇 (第二)、 卫学玲 (第三)	2020.06	2025.12	Synergistic effect of P doping and Mo-Ni-based heterostructure electrocatalyst for overall water splitting	代表性论文 2
3	论文合著	邹祥宇 (第二)、 卫学玲 (第三)、 韩婕(第 五)	2023.01	2024.10	Fe regulating Ni ₃ S ₂ /ZrCoFe-LDH@NF heterojunction catalysts for overall water splitting	代表性论文 3
4	论文合著	邹祥宇 (第一)、 卫学玲 (第三)	2020.06	2025.12	CoSe ₂ @NF 双功能催化剂用于 高效碱性全解水	代表性论文 4
5	论文合著	邹祥宇 (第一)、 卫学玲 (第二)	2020.06	2025.12	快速制备 Co(OH) ₂ 用于高效析 氧	代表性论文 5
6	论文合著	邹祥宇 (第三)、 卫学玲 (第五)	2020.06	2025.12	Ni ₃ S ₂ @NiCe-LDH/NF 电极的电 催化析氧行为	代表性论文 6