

陕西省自然科学奖公示

一、 项目名称：

氢能多相协同电催化材料基础理论研究

二、 提名者及提名意见：

中共陕西省委军民融合发展委员办公室

荷/质传输受限和线性标度关系制约导致反应动力学缓慢以及高活性位点易失活导致高活性与长寿命难以兼容是氢能电催化领域面临的两大共性科学难题。该项目组提出了多相协同电催化学术思想，突破了传统电催化材料性能提升瓶颈，取得了以下原创科学发现：1) 提出了“多相协同强化荷/质输运”新概念，阐明了多相电催化材料电极反应过程中界面电荷转移与物质传输的耦合动力学机制；2) 提出了“多相多位点协同催化”新思路，阐明了不同相结构对反应物的选择性活化规律；3) 提出了“强耦合团簇-团簇”多相协同电催化材料设计新准则，发现了多相多位点协同催化中的原子互扩散效应，揭示了高比例、高强度化学键桥连的强耦合团簇界面作用机制，解决了长期困扰氢能电催化材料高活性与长寿命难以兼容的国际共性科学难题。被评述为：“颠覆了复杂反应催化剂的设计理念”。

该项目发表 SCI 论文 140 余篇。5 篇代表性论文被包括 55 位国内外院士和 70 位期刊主编/副主编在内的同行学者他引 2722 次。项目成员被 Nat. Rev. Chem. (1 篇), Chem. Soc. Rev. (2 篇), Adv. Mater. (3 篇)等特邀撰文；部分成果开辟了氢能电催化领域新的研究方向，为研发新型氢能电催化材料奠定了重要的理论基础。

成果材料属实、齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。

三、 项目简介：

该项目属化学、材料科学与能源科学交叉研究领域。

我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》、《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》、《能源技术革命创新行动计划》和《新型能源体系建设

“十五五”规划》中明确指出要大力发展氢能，建立新型能源体系，保障国家能源战略安全。氢能电催化材料是实现氢电高效转换、推动氢能规模化应用的关键核心基础材料。然而，当前氢能电催化研究领域面临两大共性科学难题：一是催化反应受荷/质传输行为以及线性标度关系严格制约，导致电极反应动力学缓慢；二是高活性催化位点易发生重构与失活，导致催化材料的高活性与长寿命难以兼容；这两大瓶颈严重阻碍了氢能的高效低成本规模化应用。

该项目围绕上述基础科学难题，在国家自然科学基金重大研究计划培育项目和面上项目支持下，提出了“多相协同强化荷/质输运”新概念和“多相多位点协同催化”新思路，建立了“强耦合团簇-团簇”多相协同电催化材料设计新准则，解决了长期困扰氢能电催化材料高活性与长寿命难以兼容的国际共性科学难题，为材料性能突破提供全新理论支撑。

主要原创性科学发现如下：

(1) 提出了“多相协同强化荷/质输运”新概念，阐明了多相电催化材料电极反应过程中界面电荷转移与物质传输的耦合动力学机制。通过原位构筑跨尺度分级多相结构，实现了电荷传输与反应物扩散协同提升，打破了传统单相电催化材料性能提升瓶颈，为高性能电催化材料设计提供理论指导。中国工程院外籍院士、新加坡国立大学 Seeram Ramakrishna 教授指出多相协同强化荷/质输运：“...had three **distinct** advantages...displayed **excellent** activity (.....具有三大显著优势，并展现出优异的电催化活性)”。昆士兰大学 Yusuke Yamauchi 教授评价该成果是该研究领域的**代表性**工作 (**representative work**)。

(2) 提出了“多相多位点协同催化”新思路，阐明了不同相结构对反应物的选择性活化规律。通过相转变精准构筑多相异质催化体系，突破了线性标度关系对传统电催化材料体系的制约，大幅提升了电催化材料催化活性，引领了电催化材料发展新方向。加拿大皇家科学院和工程院双院院士、中国科学院大连化学物理研究所陈忠伟研究员评价该成果：“the catalyst exhibits **excellent** HER performance (该催化剂展示了杰出的HER性能)”。中国科学院院士、上海硅酸盐研究所施剑林研究员高度评价该成果：“...exhibiting **unprecedented** HER performances of noble metal-free electrocatalysts (.....实现了非贵金属催化剂**前所未有的性能突破**)”。

(3) 提出了“强耦合团簇-团簇”多相协同电催化材料设计新准则，发现了多相多位点协同催化中的“原子互扩散效应”，揭示了高比例、高强度化学键桥连的强耦合团簇界面作用机制，协同提升了本征活性与界面稳定性，解决了长期困扰氢能电催化材料高活性与长寿命难以兼容的国际共性科学难题，为材料

性能突破提供全新理论支撑。澳大利亚技术科学与工程院院士、澳大利亚勋章获得者 Shi-Xue Dou 教授评价该成果：“...has **revolutionized** complex catalysis...providing **innovative**...”（**颠覆了**复杂反应催化剂的设计理念）。新加坡国立大学Chen Wei教授详细介绍了“强耦合团簇-团簇”学术思想，称其为电催化领域里程碑式**代表性**（**representative**）突破。该成果得到来自美国、英国、法国、德国、日本等24个国家和地区的60多个机构的跟踪研究。

基于上述学术思想，研发的多相多位点协同催化材料，首次将 10 mA cm^{-2} 下的氢还原过电位降至 10 mV ，大幅降低反应能耗；研发的Ru-CrO_x强耦合“团簇-团簇”氢能电催化材料，首次将碱性氢燃料电池功率密度提升至 $16.1\text{ W mg}_{\text{Ru}}^{-1}$ ，并在高功率下持续工作100小时无衰减，均为当时该领域的最高水平。

该项目发表SCI论文140余篇。5篇代表性论文发表于Nat. Catal.、Adv. Mater. (2篇)、Chem. Soc. Rev.及Nano-Micro Lett.，被来自中国、美国、英国、德国、法国等60余个国家/地区、1500多家研究机构，包括55位国内外院士和70位期刊主编/副主编在内的同行学者在Nat. Energy, Chem. Rev.等300种该学科最具影响力的期刊中他引2722次。项目成员被Nat. Rev. Chem. (1篇), Chem. Soc. Rev. (2篇), Adv. Mater. (3篇), Energy Environ. Sci. (3篇), Prog. Mater Sci. (1篇)等特邀撰文，连续3年组织相关领域国际研讨会，大会特邀报告40余次。成果完成人潘洪革是中国可再生能源学会氢能专业委员会副主任委员、全国百篇优秀博士论文获得者、全国模范教师、国务院特殊津贴获得者、陕西省高校黄大年式教师团队负责人，担任国际重要学术期刊J. Alloys Compd.主编。成果完成人吴仁兵教授担任国际重要学术期刊Mater. Sci. Eng. R: Rep.副主编。成果完成人孙文平教授担任国际重要学术期刊Electrochem. Commun.和Mater. Sci. Eng. B主编。成果完成人高明霞教授担任国际重要学术期刊Mater. Today Catal.执行主编。

四、 客观评价：

该项目发表SCI论文140余篇，包括1篇Nat. Catal.，5篇Nat. Comm.，10篇Adv. Mater.，5篇Energy Environ. Sci.，8篇Angew. Chem. Int. Ed.，3篇Chin. J. Catal.等。5篇代表论文Nat. Catal.，Adv. Mater. (2篇)，Chem. Soc. Rev.，Nano-Micro Lett.被他引2722次，其中4篇他引超过500次，单篇最高他引904次，他引论文包括Nat. Energy, Chem. Rev.，Nat. Comm.，Energy Environ. Sci.，Adv. Mater.等该学科最有影响期刊；引用者包括55位美国、欧洲、中国等科学院/工程院院士、70位该学科具有重要影响期刊的主编/副主编。

基于该项目组在相关领域的长期工作积累，项目成员被Nat. Rev. Chem. (1

篇), Chem. Soc. Rev. (2篇), Energy Environ. Sci. (3篇), Adv. Mater. (3篇), Prog. Mater Sci. (1篇)等特邀撰文。

1. 针对科学发现 1 的代表性评价: **distinct; effectively; new**。

中国工程院外籍院士、新加坡国立大学Seeram Ramakrishna教授在代表性引文1 [Adv. Mater. 2022, 34, 2107072]中图文并茂地详细介绍了代表性论文1并称赞多相协同强化荷/质运输: “...had three **distinct** advantages...displayed **excellent** activity (.....具有**三大显著优势**....., 并展现出优异的电催化活性)”。昆士兰大学Yusuke Yamauchi教授在代表性引文2 [Adv. Mater. 2019, 31, 1903415]中称赞代表性论文1为该研究领域的**代表性**工作 (**representative work**), 并评价: “...**effectively** prevent...self-aggregation and meanwhile ensure a uniform distribution of Co species (.....有效抑制了自团聚并实现了Co物种均匀分散)”。欧洲科学院院士、法国波尔多第一大学Didier Astruc教授在代表性引文3 [Chem. Rev. 2020, 120, 1438-1511]中原图引用并大篇幅评价了代表性论文1提出的“多相协同强化荷/质运输”新概念的普适性。中国地质大学夏帆教授在[Nano Energy 2019, 58, 244–276]中评价代表性论文1: “...**endowed...with more exposed active site and enhanced mass transfer diffusion kinetics**...exhibited outstanding electrochemical activity... (.....**有效增加了催化位点并改善了传质动力学**.....表现出优异的电化学活性)”。温州大学黄少铭教授在[Chem. Commun. 2020, 56, 10809]中大篇幅介绍并称赞代表性论文1为实现原位构筑跨尺度分级多相结构: “...developed a **new and effective** method (开发了一种**新颖有效**的策略)”。黑龙江大学教授付宏刚在[Nano Res. 2024, 17, 2234–2269]中评价代表性论文1: “...catalytic activity...**which...comparable to...precious metal platinum-based catalysts** (.....催化活性媲美贵金属铂基催化剂)”。

2. 针对科学发现 2 的代表性评价: **unprecedented; excellent; very**。

加拿大皇家科学院和工程院双院院士、中国科学院大连化学物理研究所陈忠伟研究员在代表性引文4[Adv. Mater. 2026, 38, e20491]中重点大篇幅正面介绍代表性论文2并评价该成果: “the catalyst exhibits **excellent** HER performance... (该催化剂展示了杰出的HER性能.....)”。中国科学院院士、上海硅酸盐研究所施剑林研究员在代表性引文5 [Energy Environ. Sci. 2023, 16, 1334-1363]中高度评价代表性论文2: “...exhibiting **unprecedented** HER performances of noble metal-free electrocatalysts (.....实现了非贵金属催化剂**前所未有的性能突破**)”。澳大利亚科学院、澳大利亚技术科学与工程院双院院士、悉尼科技大学Guoxiu Wang教授

在[Small Sci. 2023, 3, 2300036]中大篇幅正面介绍代表性论文2构筑的相转变诱导多相协同催化材料：“...shows a spurious-thorn shape and strong hydrophilicity, ensuring the efficiency of mass transfer (.....具有独特的伪刺结构和强亲水性，确保了高效的传质过程)”。香港城市大学Hsien-Yi Hsu教授在[J. Mater. Chem. A 2024, 12, 11771–11820]中介绍代表性论文2并评价：“...suggesting its **very high activity** (.....表明其具有**极高的活性**)”。波兰科学院物理化学研究所Juan Carlos Colmenares 教授在 [Nanoscale 2024, 16, 18213–18250] 中评价代表性论文3：“...demonstrating **excellent activity and stability**(.....具有优异的活性和稳定性)”。

3. 针对科学发现 3 的代表性评价：**revolutionized ; representative ; significantly**。

澳大利亚技术科学与工程院士、澳大利亚勋章获得者Shi-Xue Dou教授在代表性引文6 [Adv. Energy Mater. 2026, 16, e06548]中高度称赞代表性论文4提出的“强耦合团簇-团簇”学术思想，称其：“...**has revolutionized complex catalysis...providing innovative solutions** (.....**颠覆了**复杂反应催化剂的设计理念)”。新加坡国立大学Chen Wei教授在代表性引文7 [Acc. Mater. Res. 2025, 6, 648–660]中重点大篇幅图文并茂地详细介绍了代表性论文4，将“强耦合团簇-团簇”学术思想称为电催化领域里程碑式**代表性 (representative)**突破，并称赞：“**a strongly coupled...catalyst...induces a unique interpenetration effect...significantly accelerating the rate-determining step...** (强耦合界面诱导了显著的原子互扩散效应，大幅加快了速率控制步骤)”。中国科学技术大学陈乾旺教授在代表性引文8 [Adv. Mater. 2026, 38, e22811]中跟踪研究了代表性论文4并给出高度评价：“...enable **high-performance alkaline HOR**” (.....实现了高性能的碱性HOR)。海南大学邓意达教授在[Coord. Chem. Rev. 2026, 547, 217155]中高度评价代表性论文4，称“强耦合团簇-团簇”学术思想：“...**play a critical role in modulating catalytic behavior** (.....对于调控催化性能来说**至关重要**)”。北京化工大学庄仲滨教授在[Nano Res. 10.26599/NR.2026.94908551]中称赞代表性论文4开发的强耦合团簇多相界面催化剂有效解决了不同催化位点无法同时深度调变的难题，并评价：“...providing a **new paradigm** for designing efficient non-platinum electrocatalysts (.....为设计高效的非铂电催化剂提供了**新范例**)”。

五、 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	发表时间	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 数据库	知识产权是否 归国内所有
1	Ultrafine Co Nanoparticles Encapsulated in Carbon-Nanotubes-Grafted Graphene Sheets as Advanced Electrocatalysts for the Hydrogen Evolution Reaction	Advanced Materials	Ziliang Chen, Renbing Wu, Yang Liu, Yuan Ha, Yanhui Guo, Dalin Sun, Miao Liu, Fang Fang	2018 年 30 卷 30 期 1802011 页	2018 年 07 月 26 日	Renbing Wu, Dalin Sun, Fang Fang	Ziliang Chen	陈子亮, 吴仁兵, 刘洋, 哈媛, 郭艳辉, 孙大林, 刘淼, 方方	904	SCI, 知网 CNKI	是
2	Sequential Phase Conversion-Induced Phosphides Heteronanorod Arrays for Superior Hydrogen Evolution Performance to Pt in Wide pH Media	Advanced Materials	Hongyuan Yang, Peifang Guo, Ruirui Wang, Ziliang Chen, Hongbin Xu, Hongge Pan, Dalin Sun, Fang Fang, Renbing Wu	2022 年 34 卷 20 期 2107548 页	2022 年 04 月 23 日	Ziliang Chen, Fang Fang, Renbing Wu	Hongyuan Yang	杨泓远, 郭佩芳, 王瑞瑞, 陈子亮, 徐鸿彬, 潘洪革, 孙大林, 方方, 吴仁兵	527	SCI, 知网 CNKI	是
3	Inner Co Synergizing Outer	Nano-Micro Letters	Jian Chen, Yuan Ha, Ruirui Wang,	2022 年 14 卷 1 期 186	2022 年 09 月 24	Bin Shang, Renbing Wu,	Jian Chen	陈建, 哈媛,	179	SCI, 知网 CNKI	是

六、 主要完成人情况：

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
潘洪革	1	院长	教授	西安工业大学	西安工业大学	项目总负责人，主导提出并建立了“强耦合团簇-团簇”多相协同电催化材料设计新准则，共同提出了“多相协同强化荷/质输运”新概念和“多相多位点协同催化”新思路。对科学发现 1、2、3 均做出核心贡献，是代表性论文 3、4、5 的通讯作者和代表性论文 2 的共同作者。
吴仁兵	2	无	教授	复旦大学	复旦大学	参与项目研究工作的学术指导、数据分析和论文撰写、修改，对主要科学发现点 1 和 2 做出了重要贡献，是“多相协同强化荷/质输运”新概念和“多相多位点协同催化”新思路研究工作的主要完成人，代表性论文 1、2、3 的通讯作者。
孙文平	3	无	教授	浙江大学	浙江大学	参与项目研究工作的学术指导、数据分析和论文撰写、修改，对主要科学发现点 3 做出了重要贡献，是“强耦合团簇-团簇”多相协同电催化材料设计新准则研究工作的主要完成人，代表性论文 4 的通讯作者和代表性论文 5 的共同作者。
高明霞	4	无	教授	浙江大学	浙江大学	参与研究工作的学术指导、数据分析和论文撰写、修改，对主要科学发现点 3 做出了重要贡献，代表性论文 4 的共同作者。
杨亚雄	5	副院长	副教授	西安工业大学	西安工业大学	参与项目研究工作的学术指导、数据分析和论文撰写、修改，对主要科学发现点 3 做出了重要贡献，代表性论文 5 的第一作者。

七、 主要完成单位情况：

西安工业大学 本成果的第一完成单位，全面负责项目的总体设计、组织实施和条件保障，在以下方面做出突出贡献：提出并确立了“强耦合团簇-团簇”多相协同电催化材料设计新准则，共同提出了“多相协同强化荷/质输运”和“多相多位点协同催化”学术思想；主导“强耦合团簇-团簇”新型电催化材料的研发，大幅提高了界面多位点密度和结构稳定性，解决了长期困扰氢能电催化材料高活性与长寿命难以兼容的国际共性科学难题；依托新能源科学与技术研究院，潘洪革教授团队提供了先进的新能源材料制备平台和表征设备，保障了材料合成与结构分析的顺利进行；培养了多名博士、硕士研究生，形成了一支高水平的研究团队。西安工业大学在项目的理论创新、材料突破和人才培养方面发挥了核心作用。

复旦大学 本成果的第二完成单位，主要负责“多相协同强化荷/质输运”新概念和“多相多位点协同催化”新思想的论证，创制出多相异质结构电催化材料体系，大幅度提升催化材料的活性位点种类及数量，成功突破线性标度关系对传统单相电催化材料体系的制约。利用球差校正高角环形暗场扫描透射电镜、电子能量损失谱和同步辐射 X 射线吸收精细结构等高端表征手段，系统解析了异质界面的原子结构、电子态和配位环境；通过密度泛函理论计算，揭示了异质界面对反应中间体吸附能的调控机制，为实验现象提供了理论解释。复旦大学为项目提供了世界一流的材料表征平台和计算资源，在材料创制、结构解析和理论计算方面做出了不可替代的贡献。

浙江大学 本成果的第三完成单位，主要负责“强耦合团簇-团簇”学术思想论证、器件组装与电化学性能评价工作。具体贡献包括：发现了多相多位点协同催化中的“原子互扩散效应”，揭示了高比例、高强度化学键桥连的强耦合团簇界面作用机制，提出了“强耦合团簇-团簇”多相协同电催化材料设计新准则；建立了完整的电化学测试体系，完成了催化剂的性能评估；组装并测试了阴离子交换膜燃料电池和电解槽单电池，验证了催化剂在实际器件中的性能；浙江大学提供了电化学测试设备和高通量计算服务器等关键设施。浙江大学在学术思想建立、器件转化和机理深化方面做出了突出贡献，使项目成果具备了明确的实用化前景。

八、 完成人合作关系说明：

本人作为项目第一完成人，现就本项目主要完成人潘洪革（排名 1）、吴仁兵（排名 2）、孙文平（排名 3）、高明霞（排名 4）、杨亚雄（排名 5）之间的合作关系说明如下：

项目第一完成人潘洪革教授的工作单位及完成单位均为西安工业大学。第二完成人吴仁兵现为复旦大学教授，项目执行期间与潘洪革教授保持紧密的科研合作关系。第三完成人孙文平现为浙江大学教授，于 2020 年加入潘洪革教授研究团队，自此共同开展研究工作。第四完成人高明霞现为浙江大学教授，与孙文平教授同属潘洪革教授研究团队，一直保持着高效紧密的合作关系。第五完成人杨亚雄现为西安工业大学副教授，于 2017 年以研究生身份加入潘洪革教授课题组，博士毕业后以讲师身份加入潘洪革教授团队，逐步成长为骨干成员。

项目执行期间，五位完成人依托西安工业大学、复旦大学和浙江大学三家单位，共同合作开展研究工作，包括共同承担科研项目、指导研究生、合作发表论文等，共同对本项目成果做出了实质性贡献。潘洪革教授（第 1 完成人）、吴仁兵教授（第 2 完成人）共同完成代表性论文 2、3；潘洪革教授（第 1 完成人）、孙文平教授（第 3 完成人）、高明霞教授（第 4 完成人）共同完成代表性论文 4；潘洪革教授（第 1 完成人）、孙文平教授（第 3 完成人）、杨亚雄副教授（第 5 完成人）共同完成代表性论文 5。