

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	化学储能材料结构调控、新体系开发及性能优化
主要完成人	刘宗怀；雷志斌；李琪；何学侠；孙颀；贾聪颖
主要完成单位	陕西师范大学

二、提名意见（适用于提名单位）

提 名 者	陕西省教育厅
<p>提名意见（不超过 600 字）：</p> <p>利用不同电性无机纳米片层组装策略构筑化学储能材料，对于精准构筑高能量密度化学储能电极材料、深入理解化学储能材料储能机制及实现化学储能器件柔性与性能优化平衡具有重要意义。针对该研究领域长期面临的不同电性无机层状材料剥离机制基础理论匮乏、纳米层组装高能量密度电极材料可控性差及组装电极材料柔性与性能优化平衡困难等关键问题，本项目阐明了不同电性无机层状材料液相剥离机制，开发了光辅助化学储能新体系，提出了纳米层组装性能与柔性优化平衡化学储能材料新策略，实现了高能量密度化学储能器件电极材料结构调控、新体系开发及组装器件性能显著提升。本研究在无机层状材料剥离理论、化学储能材料新体系开发及柔性与性能优化平衡方面成果突出，共发表学术论文 43 篇，5 篇代表作论文他引 411 次，出版由国家科学技术出版基金全额资助学术专著 1 部。这些研究充实了无机化学和材料化学学科基础，对推动无机化学、材料化学和新能源科学与技术等多学科交叉融合做出了重要贡献。</p> <p>我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，成果材料齐全、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，特提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。</p>	
<p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，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。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。</p>	

三、项目简介

化学储能材料与器件关联基础研究和技术应用，对大力开发和高效利用清洁能源和实现国家“双碳”战略目标至关重要，而高能量密度化学储能材料结构调控、新体系开发及其组装器件性能提升研究是实现规模化储能的关键所在。同时，随着柔性化、轻量化及小型化电子器件快速发展，轻量而柔性新型电化学储能系统开发显得尤为迫切和需要。

本项目是无机化学、材料化学和新能源科学与技术多学科交叉领域储能材料与器件应用基础研究。完成人在3个国家自然科学基金项目主要支持下，主要围绕不同电性无机层状化合物剥离机制、纳米片层组装构筑高能量密度化学储能活性材料及储能器件性能与柔性优化平衡，以清洁能源高效利用对相匹配所需高能量密度、高安全性、长循环寿命及高倍率性能电化学储能材料制备、电化学体系开发及环境适应性高性能储能器件重大需求为牵引，以无机纳米层组装研究方法为主要手段，以纳米层组装构建活性材料储能新体系为突破口，开展纳米级水平高能量密度储能材料设计、储能电化学新体系开发及环境适应性高性能储能器件研究工作。通过提升储能电极本征活性材料电荷存储能力、开发活性材料新体系和优化平衡储能器件柔性与储能性能等策略，达到解决化学储能材料与器件比能量密度低及柔性与性能优化平衡困难等瓶颈问题，以实现高能量密度化学储能器件材料结构调控、新体系开发及组装器件性能显著提升，研究对我国“双碳”战略实现和规模化清洁能源高效利用具有重要意义。主要的科学发现如下：

(1) 阐明了无机层状材料剥离机制、开发了系列无机层状材料剥离方法学，建立了利用无机纳米层组装高效储能柔性电极材料新技术。通过对层状二氧化锰短距离膨润和剥离行为规律性系统研究，从分子水平理论分析了短距离膨润和剥离原因，阐明了二维层状材料膨润及剥离本质，解决了无机层状材料剥离机制不清楚等关键问题。利用层状二氧化锰膨润及剥离原理，系统性研究了不同电性层状氧化石墨、层状 MoS_2 、层状黑磷、层状硅氧烯和缺镁少层硼烯剥离过程，为高比电容、高导电性、优异柔性储能电极材料提供了新基础材料体系和活性组装单元，实现了无机层状纳米片制备技术进步。

(2) 开发了大尺寸少层硅氧烯纳米片及单元素硼光辅助锂-空气电池双功能催化剂新体系，阐明了硅氧烯双功能光电极促进 Li-O_2 电池放电产物 Li_2O_2 形成/分解机制和缺电子单元素硼酸包覆硼光电极降低 Li-CO_2 电池过电位和提升往返效率机制，为解决锂-空气电池充/放电过程过电位大、电能转换效率低和可逆性差等瓶颈问题提供

了新途径。这种低成本、高效率大尺寸少层硅氧烯纳米片及单元素硼光辅助锂-空气电池双功能催化新体系将为太阳能与电能高效转换和存储提供巨大机遇，也为组装器件反应动力学改善和稳定性提升提供新方法。

(3) 开发了纳米片层组装制备纤维超级电容器用纤维电极材料新技术，为功率型柔性超级电容器能量密度低和器件柔性与性能优化平衡困难等瓶颈问题解决提供了新策略。在不同凝固液中采用湿法纺丝方法，利用不同纳米片层组装了系列高电容性能和柔性优化平衡纤维电极材料，发现纳米片层在分散介质中具有液晶相特征使其能够纤维化的决定因素，孔洞化策略是提升纤维电极倍率性能的有效途径，柔性增韧铸型剂是实现制备纤维电容性能和柔性优化平衡的有效手段，宽温高性能准固态电解质是组装宽温准固态柔性纤维器件的关键策略。

该申报项目在二维层状材料剥离本质和原理、储能电极本征活性材料电荷存储能力、活性材料新体系开发和器件柔性与储能性能优化平衡等方面做出了原创性国际引领贡献，研究成果获得 2025 年《陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖》，发表 SCI 论文 43 篇，获得国家发明专利 7 件。5 篇代表性论文包括 1 篇 *Angew. Chem. Int. Ed.*、1 篇 *ACS Nano*、1 篇 *Adv. Funct. Mater.*等，被 SCI 他引 411 次，谷歌学术引用 559 次，单篇 SCI 论文最高他引 224 次。研究成果受到包括成会明院士、陈军院士、彭慧胜院士、Jayan Thomas、Jonathan Coleman 等国内外著名学者的高度评价，在如 *Chem. Soc. Rev.*、*Adv. Mater.*、*Nat. Commun.*、*Angew. Chem. Int. Ed.*、*eScience* 等 60 多种 SCI 期刊上发表的研究论文正面评价或他引 1494 次。同时，完成人在二维层状材料剥离、纳米层组装电极材料方面的研究成果支撑出版了由国家科学技术学术著作出版基金全额资助出版学术专著 1 部，该专著荣获 2022 年度中国石油和化学工业联合会优秀出版物一等奖。完成人进行国际和国内学术会议邀请报告 10 人次，18 名毕业研究生先后获得国家留学基金及接受国经费资助赴国外攻读博士学位，现已全部学成回国服务于南京大学、西北工业大学和中国科学院纳米能源与系统研究所等高校和科研院所。另外，研究成果也有力支撑研究团队获得了 2018-2019 学年研究生优秀导学团队和优秀研究生指导老师，2020 年陕西省“储能材料与器件三秦学者创新团队”及陕西省“三秦学者”，陕西省“光电功能材料实验教学示范中心”及推动剂电源含能超级电容器电化学稳定性及燃烧性能及器件应用拓展研究工作。

四、客观评价

研究成果发表后，得到了国内外学术界高度关注，43 篇论文全部被 SCI 收录引用，取得中国发明专利 7 件，出版由科学出版基金全额资助学术专著 1 部。论文被包括成会明院士、陈军院士、彭慧胜院士、Jayan Thomas、Jonathan Coleman 等国内外著名学者在如 *Chem. Soc. Rev.*、*Angew. Chem. In. Ed.*、*Adv. Mater.*、*eScience*、*Nat. Commun.* 等 60 多种 SCI 期刊发表的研究论文正面评价或他引 1494 次。5 篇代表性论文累计他引 411 次，单篇最高引用次数为 224 次。

(1) 在无机层状材料剥离新体系、剥离方法学及剥离机制和纳米层组装高效储能柔性电极材料研究方面，研究团队的系统性工作得到了国内外学者高度肯定。依据研究团队 25 年来在无机层状材料制备、剥离机制及纳米层组装应用方面的研究工作经验，出版了代表性专著《二维无机材料剥离、纳米层组装及其功能化》。该书具有内容系统性强、原理性强、指导性强和参考价值高等特点，获得了 2020 年度国家科学技术学术著作出版基金全额资助出版，并于 2022 年获得中国石油和化学工业联合会优秀出版物一等奖（**专著出版基金及获奖证明**）。美国佐治亚理工学院 Lin 教授在综述性文章中指出：“刘研究团队利用溶剂热随后超声剥离制备黑磷纳米片工作特色显著，通过控制溶剂热处理时间及超声功率可以实现高质量黑磷纳米片层和厚度的有效控制（*Chem. Soc. Rev.*, 2021, 50, 13346-13371, **代表性引文 1**）”。中山大学牛富军教授在综述文章中图文并茂介绍大尺寸硅氧烯纳米片层剥离制备及其应用方面工作，指出“刘团队应用拓扑剥离技术制备了 Kautsky 结构的少层大尺寸硅氧烯纳米片，由于该大尺寸硅氧烯纳米片层对于 O₂ 电极有丰富的活性位点，因而作为 Li-O₂ 电池双功能光催化剂，在光照条件下产生的光激发电子和空穴能够同时加速充放电过程产物 Li₂O₂ 的形成和分解动力学，研究为大尺寸硅氧烯纳米片层制备方法学及其在光辅助 Li-O₂ 电池中应用开辟了新途径”（*Adv. Energy. Mater.*, 2025, 15, 2500250, **代表性引文 2**）。意大利微电子与微系统全国委员会主任 Molle 指出：“刘团队开发了乙腈介质中 I₂ 氧化制备 Mg_{0.22}B₂ 纳米片层新方法（*Chem. Soc. Rev.*, 2025, 54, 1845-1869）”。

(2) 完成人开发的大尺寸少层硅氧烯纳米片及单元素硼光辅助锂-空气电池双功能催化新体系，引起了国内外学术界同行的高度关注和评价，认为开发的新体系为锂-空气电池过电位降低和电能转换效率提升提供了新途径。南开大学陈军院士指出“该纳米片层材料作为 Li-O₂ 电池双功能光催化剂具有宽的光吸收，使得组装器件展现出 3.51 V 的高放电电势和 1.90 V 的充电电势，且在高电流密度下也仍然保持了好的

充放电行为,表明合理的设计半导体正极有利于光能转换和存储,光激发 ORR 和 OER 可以降低 Li-O₂ 电池大的过电压”(*Chem. Soc. Rev.*, 2022, 51, 1846-1860, 代表性引文 3)。复旦大学彭慧胜院士指出:“刘团队开发的新型超大 ($\approx 63\ \mu\text{m}$) 和少层 (≈ 3 层) 硅氧烯纳米片材料具有优异光捕获和抑制载流子复合性能,在光辅助 Li-O₂ 电池中实现了 3.51 V 放电电压和 1.90 V 充电电压,相当于高达 185% 的往返效率。该电池还表现出非常高的倍率性能(在 1mA cm^2 下效率为 129%)和出色的耐用性(100 次循环后效率保持率为 92%)(*Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202213026, 代表性引文 4)”。北京大学郭少军教授指出“硅氧烯纳米片是一种具有极高能量效率的高效光催化剂,在光照下具有丰富位点的硅氧烯纳米片有助于 Li₂O₂ 的形成和氧化,使得硅氧烯纳米片氧电催化剂具有 3.51 V 高放电电压、185% 高能量效率和优异的速率性能,研究为设计用于光转换和存储系统高效催化剂提供了新策略(*eScience*. 2023, 3, 100123, 代表性引文 5) ”。

(3) 国内外学者高度评价完成人提出的纳米片层组装制备宽温准固态纤维超级电容器用纤维电极材料新技术及组装器件柔性与性能优化平衡新策略。复旦大学彭慧胜院士指出:“蒙脱石片/PVA 有机水凝胶电解质在宽温度范围内构建的柔性纤维超级电容器适用温度范围广,利用各种聚合物作为粘合剂可以实现制备电极材料强的结合力、高的机械稳定性、大体积变化下好的颗粒间内聚力及宽电势窗口下的电化学稳定性。芳纶纳米纤维 (ANF) 用于增强电极机械性能,5% ANF 作为功能添加剂制备的电极材料展示了 104 MPa 的高机械强度,且组装器件在不同弯曲条件下保持了稳定的电化学性能(*Prog. Polym. Sci.*, 2023, 143, 101714, 代表性引文 6) ”。大连理工大学宋金会教授在综述文章中指出:“刘研究团队开发了高体积容量、优异倍率性能和宽温纤维超级电容器,器件优异性能的主要原因是 DMSO 增强的蒙脱石/聚乙烯醇水凝胶电解质具有出色的热稳定性、优异的离子电导率、大比电容和低温性能工作能力(*J. Sci.-Adv. Mater. Dev.*, 2021, 6, 338-350, 代表性引文 7) ”。美国中佛罗里达大学 Thomas 教授指出:“刘团队利用原位聚合方法合成了 TMD/CPs 杂化材料,这种方法可以更好地分散二维过渡金属纳米片层而同时抑制其重新堆叠,氧化苯胺单体聚合聚苯胺纳米线在三维管状 MoS₂ 表面内外生长,制备的混合电极在电流密度为 $0.5\ \text{A g}^{-2}$ 时展示出 $552\ \text{F g}^{-1}$ 的法拉第高比电容(*ACS Energy Lett.*, 2018, 3, 482-495, 代表性引文 8) ”

五、代表性论文专著目录

(不超过 8 条。其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部，应公开发表 2 年以上，即 2023 年 8 月 1 日前)

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	知识产权是否归国内所有
1	二维无机材料剥离、纳米层组装及其功能化	专著 1	刘宗怀 何学侠 李 琪	2021 年 7 月, 第 1-386 页	2021 年 7 月		刘宗怀	刘宗怀 何学侠 李 琪		Web of Science	是
2	Bifunctional photoassisted Li-O ₂ battery with ultrahigh rate-cycling performance based on siloxene size regulation	ACS Nano	Jia Congying, Zhang Feng, Zhang Nan, Li Qi*, He Xuexia, Sun Jie, Jiang Ruibin, Lei Zhibin, Liu Zong-Huai*	2023 年 17 卷, 1713-1722 页	2023 年 1 月 9 日	Liu Zong-Huai Li Qi	Jia Congying	贾聪颖 张 峰 张 楠 李 琪 何学侠 孙 颀 江瑞斌 雷志斌 刘宗怀	23	Web of Science	是

3	Ultra-large sized siloxene nanosheets as bifunctional photocatalyst for Li-O ₂ battery with superior round-trip efficiency and extra-long durability	Angewandte Chemie International Edition	Jia Congying, Zhang Feng, She Liaona, Li Qi*, He Xuexia, Sun Jie, Lei Zhibin, Liu Zong-Huai	2021 年 60 卷, 11257-11261 页	2021 年 4 月 9 日	Liu Zong-Huai Li Qi	Jia Congying	贾聪颖 张 峰 折辽娜 李 琪 何学侠 孙 颀 雷志斌 刘宗怀	66	Web of Science	是
4	Size-controlled boron-based bifunctional photocathodes for high-efficiency photo-assisted Li-O ₂ batteries	Advanced Science	Li Ling, Ma Fuquan, Jia Congying, Li Qi*, He Xuexia, Sun Jie, Jiang Ruibin, Lei Zhibin, Liu Zong-Huai*	2023 年 10 卷, 2301682	2023 年 5 月 17 日	Liu Zong-Huai Li Qi	Li Ling	李 玲 马福泉 贾聪颖 李 琪 何学侠 孙 颀 江瑞斌 雷志斌 刘宗怀	10	Web of Science	是

5	Full- temperature all-solid-state $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /aramid fiber supercapacitor with optimal balance of capacitive performance and flexibility	Advanced Functional Materials	Liu Qi, Zhao Anran, He Xuexia*, Li Qi, Sun Jie, Lei Zhibin, Liu Zong-Huai*	2021 年 31 卷, 2010944	2021 年 3 月 24 日	Liu Zong- Huai He Xue xia	Liu Qi	刘 奇 赵安然 何学侠 李 琪 孙 颢 雷志斌 刘宗怀	88	Web of Science	是
6	Three-dimensional tubular MoS_2 /PANI hybrid electrode for high rate performance supercapacitor	ACS Applied Materials & Interfaces	Ren Lijun, Zhang Gaini, Yan Zhe, Kang Liping, Xu Hua, Shi Feng, Lei Zhibin, Liu Zong-Huai	2015 年 7 卷, 28294-2830 2	2015 年 12 月 8 日	Liu Zong- Huai	Ren Lijun	任丽君 张改妮 闫 哲 康丽萍 徐 华 石 峰 雷志斌 刘宗怀	224	Web of Science	是
合 计									411		
补充说明（视情填写）:											

六、主要完成人情况表

姓 名	刘宗怀	排 名	1
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>全面主持项目工作，提出创新思想和研究方案，指导研究生完成项目工作，整理和分析相关实验数据，完成学术论文发表，是专著第一作者和所有代表性论文的通信作者。</p>			

姓 名	雷志斌	排 名	2
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主要负责电极材料制备及电化学性质表征，参与所有代表性论文的讨论、立意和研究工作。</p>			

姓 名	李 琪	排 名	3
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主要负责光辅助锂-空气电池催化体系研究，是代表性论文 1-3 的共同通信作者。</p>			

姓 名	何学侠	排 名	4
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主要负责无机纳米层组装过程规律性及其组装材料电容性能研究，是代表性论文 4 的通信作者。</p>			

姓 名	孙 颀	排 名	5
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	陕西师范大学	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主要进行储能材料结构表征和阻抗性质分析，参加了代表论文 1-4 工作讨论及论文修改。</p>			

姓 名	贾聪颖	排 名	6
行政职务	无	技术职称	校聘教授
工作单位	西安文理学院	完成单位	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>是代表性论文 1 和 2 第一作者，主要完成实验工作、数据处理及论文书写。</p>			

七、主要完成单位情况表

单位名称	陕西师范大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西师范大学是本成果的唯一主体完成单位，对本成果的科学发现作出重要学术贡献（代表性专著 1 和论文 1-5）。</p> <p>针对科学发现一：通过系列层状无机材料制备、剥离行为及规律性研究，阐明了无机层状材料剥离机制、开发了系列无机层状材料剥离方法学，建立了利用无机纳米层自上而下组装高效储能柔性电极材料新技术，开发了利用纳米层剥离/组装技术制备高性能储能材料新方法；</p> <p>针对科学发现二：开发了大尺寸少层硅氧烯纳米片及单元素硼光辅助锂-空气电池双功能催化新体系，为锂-空气电池过电位降低和电能转换效率提升提供了新途径。这种低成本、高效率大尺寸硅氧烯纳米片及单元素硼光辅助锂-空气光电池双功能光催化新体系，将为太阳能与电能高效转换和存储提供巨大机遇；</p> <p>针对科学发现三：开发了纳米片层组装制备宽温准固态纤维超级电容器用纤维电极材料新技术，为器件比能量密度提升和柔性与电容优化平衡提供了新策略，研究为柔性电子器件高效柔性供能单元设计、制备及性能优化提供了新思路。</p>	

八、完成人合作关系说明

项目第一完成人与雷志斌、李琪、何学侠、孙颀 4 位完成人均隶属于陕西师范大学材料学院储能材料与器件研究团队，项目第六完成人贾聪颖是项目第一完成人的博士研究生并取得博士学位。

本项目主要完成人经长期合作形成团队，协同完成本项目的理论基础及应用研究探索。第一完成人刘宗怀全面负责项目组织与实施，协调组织团队成员的合作，与合作者共同完成代表性专著 1 及代表性论文 1-5；第二完成人雷志斌与第一完成人有 14 年合作研究经历，建立了密切的合作研究渠道，为代表性论文 1-5 的完成做出了重要贡献；第三完成人李琪主要推动光辅助锂-空气电池双功能催化材料工作，是代表性论文 1-3 的共同通信作者，参与了代表性专著和代表性论文 4 的研究工作；第四完成人何学侠主要推动纤维电极材料设计、制备及器件组装工作，是代表性论文 4 的共同通信作者，参与了代表性专著和代表性论文 1-4 研究工作；第五完成人孙颀主要推动制备材料结构表征及阻抗分析工作，为代表性论文 1-4 完成做出了重要贡献；第六完成人贾聪颖主要负责推动硅氧烯纳米片层制备及其双功能光辅助锂- O_2 电池研究工作，是代表性论文 1 和 2 的第一作者。

完成人基于合作完成的科研成果，共同获得了 2025 年“陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖”。

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	合作时间	合作成果	证明材料
1	专著合著	刘宗怀（1），李琪（3），何学侠（4）	2020.01-2021.07	二维无机材料剥离、纳米层组装及其功能化	代表性专著 1（国家科学技术学术著作出版基金资助证明及优秀图书一等奖证明）
2	论文合著	刘宗怀（1），雷志斌（2），李琪（3），何学侠（4），孙颀（5），贾聪颖（6）	2021.01-2023.02	ACS Nano, 2023, 17, 1713-1722	代表性论文 1
3	论文合著	刘宗怀（1），雷志斌（2），李琪（3），何学侠（4），孙颀（5），贾聪颖（6）	2020.05-2022.02	Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60, 11257-11261	代表性论文 2
4	论文合著	刘宗怀（1），雷志斌（2），李琪（3），何学侠（4），孙颀（5），贾聪颖（6）	2022.05-2023.06	Advanced Science, 2023, 10, 2301682	代表性论文 3
5	论文合著	刘宗怀（1），雷志斌（2），李琪（3），何学侠（4），孙颀（5）	2020.03-2021.04	Advanced Functional Materials, 2021, 31, 2010944	代表性论文 4
6	论文合著	刘宗怀（1），雷志斌（2）	2015.01-2016.04	ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7, 28294-28302	代表性论文 5