

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

高性能柔性储能器件的设计与制造研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该项目在解决当前柔性储能器件存在的容量低、循环寿命短和柔韧性差等关键科学难题，取得了一系列重要突破。该研究团队通过提出材料改性与结构设计相结合的策略，优化电极反应动力学、改善离子传输机制并提高力学稳定性，同时借助高效印刷技术实现精细结构的可控制造，成功开发出兼具高容量、长循环寿命和优异柔韧性的柔性储能器件。该项目研究成果选题准确，研究起点高，理论上创新，在包括 Nat. Common., Adv. Mater., Adv. Funct. Mater. 等国际顶级期刊上发表 SCI 论文 5 篇，引用率高，受到国内外学术界的好评和认可，对相关研究有引领和示范作用，有重要的学术价值和理论意义。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。

提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

近年来，随着国家深入实施创新驱动发展战略，大力培育新产业、新业态、新模式，以可穿戴手表、可折叠手机等为代表的柔性电子产品迅速崛起，展现出巨大的市场潜力。据市场调研报告预测，全球柔性电子产品的市场价值将在 2028 年达到 3010 亿美元，标志着这一领域已成为未来科技发展的重要方向。然而，柔性电子产品的快速发展对与之相匹配的储能器件提出了更高的要求，同时也对开发新型柔性储能器件带来了新的挑战。当前，商业化的碱金属电池（以锂离子电池为代表）在驱动可穿戴电子器件时，由于其有限的能量密度和严重的安全隐患，限制了其在柔性电子领域的广泛应用。其次，传统的刚性储能器件由于机械性能的局限性，在受到弯曲、拉伸等机械变形时容易发生断裂或失效，严重制约了其应用场景的拓展。因此，开发新型高性能的柔性储能器件已成为当前研究的重点。

开发高容量、长循环寿命和高柔韧性的柔性电化学储能器件是未来柔性储能设备的发展方向。其面临的主要问题有：（1）**电极反应动力学差，副反应严重**。电极材料与电解液中离子相互作用力较弱，相变能垒较高，导致储能器件容量较低；在高电流密度或长时间循环条件下，副反应（如析氢、析氧等）较为严重，严重损害电极的稳定性和寿命。（2）**离子传输机制受限，易产生应力集中**。传统电极结构为平面结构，对离子分布和电场分布影响较小，导致质量传输和电荷转移速率较慢；在应力/应变状态下，造成应力集中，破坏电极结构，易发生短路风险。（3）**电极制备复杂，难以实现理想三维结构与界面**。传统电极制造工艺（如

涂布、辊压)难以高效、精准地构建具有复杂三维结构、均匀材料分布及理想界面接触的电极;在应力/变形状态下,电极/电解质界面易发生开裂,导致器件失效。

该项目在国家自然科学基金项目支持下,围绕柔性电化学储能器件容量低、循环寿命短和柔韧性差的核心瓶颈,通过材料改性、结构设计,借助多种印刷制备技术,开发了一系列高电化学性能的新型电极材料和结构,并制备多种高性能柔性电化学储能器件,探究了不同条件下力-电耦合状态对柔性储能器件性能的影响规律,攻克了电极相变能垒高、副反应严重、离子分布不均、界面稳定性差及三维结构可控制造困难等难题。该项目与多家材料、能源科技公司合作完成性能验证,并与西安市临潼区人民政府、陕西空天动力研究院达成成果转化和产业孵化协议,共同筹建公司,注册资本 1000 万元,拟实现具有全链条自主知识产权的柔性储能器件的生产,助力柔性储能器件的更新换代。该项目的发现点主要有:

发现点一、通过杂原子掺杂优化材料电子结构特性,提高电极表面相变反应动力学,实现电极容量和稳定性提升。

针对柔性锌离子电池中正极容量低和负极锌稳定性差的共性难题,该项目提出了杂原子掺杂垂直石墨烯的协同优化策略。通过氮原子掺杂实现电荷重新分布,显著提升材料导电性并降低锰基正极相变反应能垒;同时,高电负性的氨基团增强电极对锌离子的吸附能力,促进 Zn/Zn^{2+} 相变动力学。基于该材料设计,构建的锰基锌离子电池表现出超过 300 mAh g^{-1} 的高容量和超过 300 次循环的使用寿命。相关成果发表在 *Advanced Functional Materials* 上。

发现点二:优化电极结构设计,调控电极表面离子分布和力场分布,实现电极稳定性提升。

针对柔性电极循环寿命短和柔韧性差的问题,通过电极微结构设计(如阵列结构与梯度结构)调控离子分布和应力分布,从而提升界面稳定性与抗形变能力。构建了导电梯度-亲锌梯度协同的阵列电极,可精准调控离子通量与电场分布,实现“自下而上”的限域沉积。对称电池在 $10\text{ mA cm}^{-2}/10\text{ mAh cm}^{-2}$ 的高电流密度与高容量下,实现了超过 200 h 的循环寿命;基于多孔泡沫镍基底制备了导电-亲锌-孔隙三重梯度结构,显著强化离子的定向传输动力学和应力分布,使对称电池循环稳定性超过 400 h,制备的柔性电池在不同弯曲角度下仍能保持稳定容量。相关成果发表在 *Nature Communications* 和 *Advanced Materials* 上。

发现点三:发展印刷技术驱动宏-微结构精准制造,协同提升储能器件离子分布均匀性与机械强度。

针对电极结构精度不足且制备复杂的挑战,创新性地引入多种印刷技术(如压印与 3D 打印等),实现电极跨尺度结构的可控构筑。通过简便的压印工艺制备出具有规则微通道的阵列电极,有效优化了锌离子浓度分布,诱导离子优先向通道区域扩散,实现电池电化学性能的显著提升;利用 3D 打印技术精准构建多尺度 3D 石墨泡沫,结合 Gyroid 超材料结构设计,制备出轻质、连续多孔且耐压

的电极材料，表现出超高容量（ 7.35 F cm^{-2} ， 260 F g^{-1} ），基于 3D 电极组装的超级电容器在承受 15000 倍自身重量的负载下仍能保持稳定容量而无明显衰减。相关成果发表在 *Advanced Functional Materials* 和 *Research* 上。

该项目发表高水平论文 60 余篇，获授权发明专利 10 余项，在柔性储能器件领域做出原创性国际引领贡献，5 篇代表作均为中科院一区，包括 *Nature Communications*、*Advanced Materials* 等，SCI 他引 739 次，其中 2 篇论文连续多次入选“ESI 高被引论文”和“ESI 热点论文”。该项目研发的高性能柔性储能器件在电极材料、结构和制备技术方面提出了创新性解决方案，显著提升了我国在柔性电子与柔性储能领域的自主研发能力，相关成果受到《中国科学报》的专门报道，并获得了包括美国德克萨斯大学奥斯汀分校 Guihua Yu 院士、新加坡南洋理工大学 Fan Hong Jin 教授等国内外知名学者的高度评价。该项目支撑第一完成人官操教授，获“国家级青年人才”项目，入选英国皇家化学会会士，2019-2024 连续 6 年入选科睿唯安高被引科学家。

四、客观评价

该项目立足于国内外柔性电化学储能器件研究现状，针对其容量低、循环寿命短及机械柔性差等难题，提出通过材料改性与结构设计等策略，优化电极反应动力学、离子传输机制以及力学稳定性，从而显著提升储能器件的电化学性能和机械柔韧性。基于高效印刷技术制备高性能柔性储能器件，并结合理论模拟、力学建模及力-电耦合测试，开发出兼具优异电化学性能与机械柔性的超级电容器和电池。项目研究成果受到国内外研究者的广泛关注和大量引用评述。此外，国内媒体（如《中国科学报》等）、微信公众号（包括“材料科学与工程”、“研之成理”、“能源学人”等）等进行了广泛的论文推送。

代表论文 1（*Advanced Functional Materials*，IF=19.0），连续多次入选“ESI 高被引论文”和“ESI 热点论文”，他引次数 284 次。其中，Zhongfan Liu 教授于 2022 年发表在“*ACS Nano*”的文章对该论文进行了大篇幅评述。文章指出“独特的电极制备方法可以缓解体积膨胀、增强离子扩散并促进电解质渗透，对电极设计和电化学提升机制的研究具有指导意义”。Zhongfan Liu 教授，现任北京大学化学学院博雅讲席教授，中国科学院院士。Husam N. Alshareef 教授，于 2023 年发表在“*InfoMat*”的文章对该论文进行了引用和大篇幅的评述。文章指出“研究中制备的纽扣电池和柔性软包电池为未来储能设备的发展提供了希望的方向”。Husam N. Alshareef 教授现为沙特阿卜杜拉国王科技大学教授、科睿唯安高被引科学家。

代表论文 2（*Nature Communications*，IF=15.7），连续多次入选“ESI 高被引论文”和“ESI 热点论文”，他引次数 244 次。其中，Soo-Jin Park 教授于 2024 年在“*Nano-Micro Letters*”上发表的文章评价该工作的结构设计“显著优于无梯度结构的传统器件”，并称赞该“结构成分优化策略为高电流密度高容量无枝晶锌电池开发提供了充满前景的途径”。Soo-Jin Park 教授现为韩国仁荷大学教授、科睿唯安高被引科学家。Dongliang Chao 教授、Dongyuan Zhao 教授

于 2024 年发表在“Journal of the American Chemical Society”的文章对该论文进行了大篇幅评述，文章认为“该研究是“超越锂离子”的储能技术之一，其本质安全性、低成本和环保性受到广泛关注”。Dongyuan Zhao 教授，现任复旦大学化学与材料学院院长，中国科学院院士。

代表论文 3 (Advanced Materials, IF=26.8)，他引次数 123 次，多次被国际顶级期刊，包括“Nature Communications”、“Advance materials”等引用评述。其中，Shixue Dou 教授于 2024 年发表在“Advanced Functional Materials”的文章对该论文进行了大篇幅的图文引用，并评价该工作“独特的三维网络内存在电导率梯度，促进了锌自下而上的沉积。伴随孔隙率和亲锌性梯度的构建，实现了协同效应，制备的锌负极表现出高循环可逆性”。Shixue Dou 教授现任上海理工大学能源材料科学学院院长，澳大利亚技术科学与工程院院士。Guihua Yu 于 2024 年发表在“Chemical Society Reviews”的文章对该论文进行了大篇幅的图文引用，并评价该工作“提供了一种更为精巧的策略”，并指出该工作的设计“优化了电极电荷传输动力学，促进了所需的自下而上的沉积行为”。Guihua Yu 教授现为美国德克萨斯大学奥斯汀分校教授、欧洲科学与艺术学院院士、科睿唯安高被引科学家。

代表论文 4 (Advanced Functional Materials, IF=19.0)，他引次数 61 次。其中，Hong Jin Fan 教授于 2023 年发表在“ACS Energy Letter”的文章对该论文进行了引用和评述。文章认为，“该研究有效推动长循环寿命锌负极的发展”。Hong Jin Fan 教授现为新加坡南洋理工大学教授、科睿唯安高被引科学家、Materials Today Energy 主编。上海交通大学 Guo Gao 副研究员于 2023 年发表在“Coordination Chemistry Reviews”的文章对该论文进行了引用和评述。文章指出“阵列结构可以优化电极表面光滑度，避免不均匀表面导致的锌离子分布不均，减少由于锌突起引发的高曲率表面和局部电流密度增加”，并且指出“该电极结构设计对锌离子电池性能优化提出了新的途径”，该引文入选 ESI 高被引论文。

代表论文 5 (Research, IF=10.7)，他引次数 27 次，研究成果被《中国科学报》采访报道。《中国科学报》指出，“该成果不仅为制备优秀机械强度和电化学性能的电极材料提供了一种新方法，也为先进能源存储设备的规模化应用提供了一条新路径”，更是被认为“是一种革新电极材料”。《中国科学报》是由中国科学院、中国工程院、国家自然科学基金委员会和中国科学技术协会共同主办的报纸，是中国科技界最具影响力的媒体之一。该报纸入选了第三届全国“百强报刊”，并在以两院院士为代表的中国高端科学家群体中享有较高声誉。黄富强教授于 2023 年在“Materials Science and Engineering: R: Reports”上发表的文章大篇幅图文介绍该成果，评价开发的同源材料兼具“高杨氏模量和低密度”，并称赞“超电容的面积、体积和质量能量密度均处于先进水平”。黄富强教授为国家杰出青年基金获得者，科睿唯安高被引科学家。

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）

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	通讯作者	第一作者	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	Regulating Dendrite-Free Zinc Deposition by 3D Zincophilic Nitrogen-Doped Vertical Graphene for High-Performance Flexible Zn-Ion Batteries	Advanced Functional Materials	Qinghe Cao, Heng Gao, Yong Gao, Jie Yang, Chun Li, Jie Pu, Junjie Du, Jiayu Yang, Dongming Cai, Zhenghui Pan, Cao Guan, Wei Huang	2021 年 31 卷 2103922 页	2021 年 06 月 26 日	Zhenghui Pan, Cao Guan	Qinghe Cao	曹庆贺, 高恒, 高勇, 杨洁, 李春, 蒲洁, 杜俊杰, 杨佳宇, 蔡东明, 潘争辉, 官操, 黄维	284	Web of Science 核心合集	是
2	Gradient Design of Imprinted Anode for Stable Zn-Ion Batteries	Nature Communications	Qinghe Cao, Yong Gao, Jie Pu, Xin Zhao, Yuxuan Wang, Jipeng Chen, Cao Guan	2023 年 14 卷 641 页	2023 年 02 月 06 日	Cao Guan	Qinghe Cao, Yong Gao, Jie Pu	曹庆贺, 高勇, 蒲洁, 赵欣, 王宇轩, 陈继鹏, 官操	244	Web of Science 核心合集	是

3	Stable Zn Anodes with Triple Gradients	Advanced Materials	Yong Gao, Qinghe Cao, Jie Pu, Xin Zhao, Gangwen Fu, Jipeng Chen, Yuxuan Wang, Cao Guan	2022 年 35 卷 2207573 页	2022 年 12 月 18 日	Cao Guan	Yong Gao, Qinghe Cao	高勇, 曹庆贺, 蒲洁, 赵欣, 付港文, 陈继鹏, 王宇轩, 官操	123	Web of Science 核心合集	是
4	Stable Imprinted Zincophilic Zn Anodes with High Capacity	Advanced Functional Materials	Qinghe Cao, Zhenghui Pan, Yong Gao, Jie Pu, Gangwen Fu, Guanghua Cheng, Cao Guan	2022 年 32 卷 2205771 页	2022 年 10 月 10 日	Cao Guan	Qinghe Cao, Zhenghui Pan	曹庆贺, 潘争辉, 高勇, 蒲洁, 付港文, 程光华, 官操	61	Web of Science 核心合集	是
5	Structure-Enhanced Mechanically Robust Graphite Foam with Ultrahigh MnO ₂ Loading for Supercapacitors	Research	Qinghe Cao, Junjie Du, Xiaowan Tang, Xi Xu, Longsheng Huang, Dongming Cai, Xu Long, Xuewen Wang, Jun Ding, Cao Guan, Wei Huang	2020 年 2020 卷 1-10 页	2020 年 11 月 10 日	Cao Guan, Wei Huang	Qinghe Cao, Junjie Du	曹庆贺, 杜俊杰, 唐晓琬, 徐茜, 黄龙胜, 蔡东明, 龙旭, 王学文, 官操, 黄维	27	Web of Science 核心合集	是
6											

7											
8											
合 计									739	Web of Scie nce 核心 合集	是

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

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
官操	1	院长	教授	西北工业大学	西北工业大学	负责项目总体设计及技术路线的实施与协调。提出“材料-结构-制造”三位一体协同攻关框架，发明了杂原子掺杂与材料改性集成策略，提出材料-结构协同优化技术路线，开发了力-电耦合影响规律的综合评价体系，牵头构建产学研转化平台，推动技术验证与产业化落地。代表性论文 1、2、3、4、5 的主要完成人。
曹庆贺	2	无	无	西北工业大学	西北工业大学	负责材料-结构协同优化及性能调控。发明了杂原子掺杂与电极微结构协同优化方法；开发了多孔结构增强离子分布均匀性的方案；提出印刷制备中材料-结构集成适配策略。代表性论文 1、2、4、5 的主要完成人。
蒲洁	3	无	无	西北工业大学	西北工业大学	负责电极材料改性及结构适配研究。发明了杂原子掺杂优化电子结构特性的具体方法；设计离子-应力双场调控的微通道电极结构；开发了力-电耦合

						状态测试与评估系统。代表性论文 1、2、4 的主要完成人。
杨佳宇	4	无	无	西北工业大学	西北工业大学	负责印刷制备技术开发及宏-微结构制造。开发了三维结构可控制造方法，提出结合多种印刷技术提升离子分布均匀性与机械强度的方案。代表性论文 5 的主要完成人。
高勇	5	无	无	西北工业大学	西北工业大学	负责电极结构与优化研究。开发了增强界面稳定性的三维梯度设计；提出力场分布优化模型。代表性论文 2、3 的主要完成人。
	6					

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	工作单位为研究提供了必要的资源，包括实验室设备、研究经费、技术支持等。这些资源的提供为研究的开展提供了基础条件。参与了研究团队的组建并提供了必要的培训和支持，以确保研究团队的稳定运作。组织和支持学术交流活动，如学术会议、研讨会等，为研究人员提供了展示成果、交流经验的机会。致力于维护一个良好的科研环境，包括提供适宜的实验室条件、协调内外部合作关系等，以促进研究的顺利进行。总的来说，工作单位的贡献是多层次、多方面的，旨在为研究提供全面的支持和保障，确保研究能够在科学、技术和社会等方面取得有意义的成果。
	2	
	3	

八、完成人合作关系说明

完成人之间开展了稳定而持续的合作研究，目前，第一完成人官操与第二完成人曹庆贺已合作发表 30 篇高水平论文，包括 Nat Commun.、Adv. Mater.、Research 等，其中 2 篇论文分别入选 ESI 高被引论文和热点论文。第一完成人官操与第三完成人蒲洁已合作发表 20 篇高水平论文，包括 Adv. Mater.、Adv. Funct. Mater.、SmartMat 等，其中封面论文 1 篇。第一完成人官操与第四完成人杨佳宇已合作发表 13 篇高水平论文，包括 Adv. Energy Mater.、Matter、J. Mater. Chem. A 等。第一完成人官操与第五完成人高勇已合作发表 28 篇高水平论文，包括 Adv. Mater.、Angew. Chem.、Energy Environ. Sci. 等。

完成人合作研究成果包括：调控材料电子结构特性，提高电极表面相变动力学（Adv. Funct. Mater. 2021）；优化电极结构设计，增强电极离子传输和机械稳定性（Nat. Commun. 2023； Adv. Mater. 2022）；发展印刷技术驱动宏-微结构精准制造，协同提升储能器件力-电性能（Adv. Funct. Mater. 2022； Research 2020）。