

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	离子导电聚合物离子传输机制与电化学性能调控
主要完成人	丁书江；高国新；孔祥鹏；石磊；陈晶；孙宗杰
主要完成单位	西安交通大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	教育厅	提名等级	<input checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>我单位认真审阅了该项目推荐书及附件材料，相关材料真实有效，填写栏目符合陕西省自然科学奖的填写要求。该项目在实施期间，取得了一系列创新性成果，在高水平期刊上发表了多篇高质量论文，取得多项授权发明专利。</p> <p>该项目面向国家能源革命和储能技术战略对于高安全、高比能、长寿命储能器件的迫切需求，围绕成本低廉、柔性、便于加工的聚合物固态锂金属电池体系，针对核心材料离子导电聚合物离子解离、传输与转化相互制约相互影响的关键科学问题，开展了创新性和系统性的研究工作，获得了一系列原创性成果，为高性能聚合物固态锂金属电池关键材料的开发提供了新的理论和新方法。主要成果包括以下三方面：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 提出了聚合物分子链嵌段梯度极性匹配原则，发展了软硬“相锁定”策略，构建了高电导性多功能聚合物材料，实现了锂离子的解离与传输协同增强； 2. 发展了离子导电聚合物中非活性载流子抑制与转化策略，打破了阴阳离子无法同时作为活性载流子的传统观念，实现了双离子的快速输运与非活性离子的高效转化； 3. 阐明了离子导电聚合物/电子导体界面锂离子优先沉积-转化机制，提出了多组分强韧纤维膜定向疏导离子流抑制锂枝晶的新思路，发展了电池关键组件“三位一体”集成化策略，制备了高韧性和高电导性兼具的锂金属电池功能间层材料。 <p>提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖</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。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

二、提名意见（适用于专家提名）

姓 名			
专家类型	<input type="checkbox"/> 国家最高科学技术奖获得者 <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 <input type="checkbox"/> 中国工程院院士 <input type="checkbox"/> 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） <input type="checkbox"/> 省最高科学技术奖获奖人（或 xxxx 年省科学技术最高成就奖、xxxx 年基础研究重大贡献奖获奖人） <input type="checkbox"/> Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
责任专家	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否		
提名意见：			
<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。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

三、项目简介

(限 2 页)

全固态金属锂电池因自身高安全性、高比能、长寿命等优点，成为替代传统液态锂离子电池的下一代高能量密度储能体系。基于上述优势，我国在《“十四五”可再生能源发展规划》中将固态电池技术的发展列为优先研发对象，提出要加快固态电池领域新技术的研发，助力新能源汽车领域高速发展，为早日实现“双碳”目标添砖加瓦。在常见的固态电解质中，离子导电聚合物固态电解质因其质轻、柔性、易加工、安全可靠等特性，在实现高比能、长寿命和高安全性的全固态锂电池实际应用中具有巨大潜力。然而，针对核心材料离子导电聚合物离子解离、传输与转化相互制约相互影响的关键科学问题，项目组自 2011 年开始，在国家基金委自然科学基金、陕西省自然科学基金等资助下，围绕“聚合物链段和阴阳离子相互作用与调控机制”科学问题，提出聚合物近程、远程、聚集态的多级结构精准设计思路，采用链段极性匹配、电活性离子扩展和有序界面促进离子有序转化策略，实现离子强解离，多传输和齐转化，解决了离子导电聚合物在合成与应用方面的关键“卡脖子”难题，取得了系列创新及特色研究成果。

1) 在单一链段固有极性离子导电聚合物中，其离子解离与传输往往难以兼得，内在作用机制一直未被揭示，因此需要厘清聚合物聚集态结构与离子解离-传输性能之间的构效关系，解析并设计聚合物链段的极性梯度匹配机制，为制备离子电导率高的聚合物提供理论基础与设计原则。申请人提出了聚合物分子链嵌段梯度极性匹配原则，制备了高电导性多功能聚合物材料，实现了锂离子的解离与传输协同增强。合理的“硬”相分布可提高材料的力学性能，但“硬”相的聚合物链段运动困难并阻碍离子传输。申请人提出了可逆桥连的软硬“相锁定”策略，通过锁定软相中具有松弛配位结构的聚醚主链，制备了高离子导电聚合物材料，实现锂离子快速传输。

2) 离子导电聚合物中可产生法拉第电流的活性载流子与固态电池的储能效率密切相关，该载流子活性和聚合物本征强度难以兼顾是固态电池中的主要瓶颈，其核心科学问题为活性载流子迁移机制不明确且难以调控，因此通过调控载流子迁移能力解析其电活性机制并改善阴阳离子活性是提高储能效率的必由之路。申请人发展了离子导电聚合物中非活性载流子抑制与转化策略，打破了阴阳离子无法同时作为活性载流子的传统观念，实现了双离子快速输运与非活性离子的高效转化，构建了双离子导电聚

合物电解质材料。

3) 发展高韧性的离子导电聚合物/电子导体功能间层材料以实现稳定高效的电池充放电循环, 对于提升高比能锂金属电池能量密度和长程续航能力至关重要。然而, 如何解决该功能间层材料在各类柔性力变状态下长时间循环所导致的锂枝晶不可控生长和电池容量下降等棘手问题。并且截止目前如何实现离子导电聚合物/电子导体界面的离子优先沉积-转化机制尚不明晰, 定向高效诱导离子流均质化成核策略难以实现。申请人阐明了离子导电聚合物/电子导体界面锂离子优先沉积-转化机制, 提出了多组分强韧纤维膜定向疏导离子流抑制锂枝晶的新思路, 发展了电池关键组件“三位一体”集成化策略, 构建了高韧性和高电导性兼具的锂金属电池功能间层材料。

项目成果成功服务国家战略: 1) 提出聚合物近程、远程和聚集态多级结构设计思路, 聚合物固态电池产品能量密度突破 500 Wh/kg (商用产品能量密度~300 Wh/kg), 通过安全测试与中试验证。2) 设计国内首套水下高安全锂电池增程系统 (平台工作时间延长 1 倍), 自主研发 PDYX 用锂储备电池 (储备时间延长 50%), 显著提高 WQ 装备快激活和长储备特性。3) 研发具有自主知识产权的西北地区首套全自动带电拆解退役锂电池回收装备, 产能达 2 万吨/年, 比传统设备效率提高 50% 以上。

项目成果得到包括中国科学院等多位院士的正面评价。项目第一完成人丁书江教授入选教育部高层次人才奖励计划 (2025 年), 教育部新世纪优秀人才 (2013 年)、陕西省科技创新领军人才 (2023 年)、陕西省科技创新团队 (2022 年, 负责人)、陕西省杰出青年基金 (2020 年), 获陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖 (2024 年, 第 1)、新疆维吾尔自治区科学技术奖一等奖 (2023 年, 第 2)、陕西高等学校科学技术奖一等奖 (2017 年, 第 1)、陕西省青年科技奖 (2016 年)、“科睿唯安”全球高被引科学家 (2018 年)、“爱思唯尔”中国高被引学者 (2019-2023 年) 等。任大会主席举办全国/地区学术研讨会 3 次, 作邀请报告 30 余次。任 *Energy Storage and Saving* 副主编、*Chinese Chemical Letters* 编委、陕西省化学会副理事长、储能材料与器件教育部工程研究中心主任、西安交通大学第十三届学术委员会委员等学术组织与社会兼职。指导 2 人获得陕西省优秀博士论文, 1 人入选陕西省科协高校青年托举人才计划。授权专利 34 件, 转化 3 件, 转化金额 227 万元。

四、客观评价

【限 2 页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，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 5 篇代表性论文被来自 60 个国家/地区、200 余家研究机构、千余名学者在 *Nature*, *Chem. Rev.*, *J. Am. Chem. Soc.*, *Adv. Mater.* 等广泛引用和高度评价，产生了重要学术影响。项目成果得到包括中国科学院、美国国家科学院、欧洲科学院等多位院士等多位院士的正面评价。以下为代表性的国内外知名学者对本项目的第三方评价摘录：

创新点 1：聚合物分子链嵌段梯度极性匹配原则和可逆桥连的软硬“相锁定”策略构建高弹性和高导电性兼具的多功能柔性传感材料。

1. 中国科学院外籍院士王中林教授在 *Adv. Mater.* 和 *Adv. Funct. Mater.* 期刊中肯定到：制备的无溶剂聚合物电解质在空气中稳定，表现出无衰减的导电性和机械性能，并被成功地应用于纳米摩擦发电机中。（代表性引文 1）

2. 美国橡树岭国家实验室，AAAS Fellow 等 Alexei P. Sokolov 教授在 *Chem. Rev.* 期刊中评价到：相比于早期只有二硫键的自愈合材料，二硫键与多重氢键杂化策略展现出多重优势，比如强韧的力学性能以及优异的室温自愈合性能。（代表性引文 2）

3. 清华大学王朝教授近期发表在 *J. Am. Chem. Soc.* 上的工作中评价到：通过离子偶极相互作用交联超分子聚合物网络中，使得我们的聚合物材料在保持其动态性能的同时还能表现出优异的机械性能。（代表性引文 3）

4. 香港城市大学 Walid A. Daoud 教授在 *Nano Energy* 期刊上将此成果评价为“首次报道”，并肯定了申请人研发的疏水性离子凝胶具有耐湿，耐温，恶劣条件下长时间稳定性。（附件 1-1）

创新点 2：发展无机填料表面极性基团和激活非活性载流子构建高强度和高导电性兼具的双离子全固态电解质材料

1. 欧洲科学院院士、国际电化学会会士、英国皇家化学学会会士、悉尼科技大学王国秀教授在 *Chem. Soc. Rev.* 期刊中评价到：通过亚纳米孔/通道的尺寸效应或静电效应实现调节的离子转运，促进选择性和快速的离子转运具有亚纳米孔/通道的材料由于

其独特的物理化学性质而在能量转换和电池存储应用中提供了机会。(代表性引文 4)

2. 华中科技大学薛志刚教授在 *Adv. Mater.* 和 *Macromolecules* 期刊中肯定到: 阴离子的迁移速率比锂离子快, 当单个锂离子作为活性离子时, 迁移速率的差异导致非活性阴离子的积累和活性锂离子的缺乏, 从而产生浓差极化; 当二茂铁作为活性位点时, 阴离子也作为电荷平衡离子参与电化学反应, 显著减少阴离子的积累。(附件 1-2)

创新点 3: 多组分定向疏导离子流与“三位一体”集成化策略构建了高韧性和高导电性兼具的锂金属电池功能间层材料

1. 加州大学洛杉矶分校化学工程系李煜章教授在 *Nature* 期刊中评价到: “SEI 膜与锂枝晶生长是耦合过程, 其高电流密度下更易于趋向分枝或网状型沉积”。(代表性引文 5)

2. 香港科技大学中国科学院赵天寿院士在 *Adv. Energy Mater.* 期刊中评价到: 通过引入无机氧化物填料可以用来增强复合聚合物电解质中的离子传输, 这在全固态锂离子电池中表现出优异的电化学性能。(附件 1-3)

3. 北卡罗来纳州立大学威尔逊纺织学院副院长, 张向武教授在 *Energy Storage Mater.* 期刊中评价到: 利用棉花制备了一种柔性纤维素氧化石墨烯气凝胶。柔性纤维素的大比表面积 ($657.85 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) 和高孔隙率 (96%) 提供了大量的 $\text{Li}_2\text{S}_2/\text{Li}_2\text{S}$ 成核位点, 大大提高了电解质吸附能力。由于氧化石墨烯的含氧官能团与纤维素分子链上的羟基之间存在氢键作用, 氧化石墨烯紧紧地附着在纤维素纤维上, 从而提高了阴极的机械强度。棉花材料在反复折叠和拉伸过程中表现出优异的可逆柔性。即使在折叠和压缩 500 次之后, 材料仍然保持完好无损, 并能恢复到原始状态。即使在气凝胶被反复挤压和释放后, 电流信号仍在循环, 并保持原来的振幅。(附件 1-4)

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	Highly Stretchable and Transparent Ionic Conducting Elastomers	Nature Communications	Lei Shi, Tianxiang Zhu, Guoxin Gao, Xinyu Zhang, Wei Wei, Wenfeng Liu, Shujiang Ding	2018 年 9 卷 2630(1-7)	2018 年 7 月 6 日	丁书江	石磊	石磊, 丁书江	260	Web of Science, ESI, SCI	是
2	Phase-Locked Constructing Dynamic Supramolecular Ionic Conductive Elastomers with Superior Toughness, Autonomous Self-Healing and Recyclability	Nature Communications	Jing Chen, Yiyang Gao, Lei Shi, Wei Yu, Zongjie Sun, Yifan Zhou, Shuang Liu, Heng Mao, Dongyang Zhang, Tongqing Lu, Quan Chen, Demei Yu, Shujiang Ding	2022 年 13 卷 4868(1-12)	2022 年 8 月 18 日	丁书江	陈晶	陈晶, 丁书江	162	Web of Science, ESI, SCI	是
3	Expanding the Active Charge Carriers of Polymer Electrolytes in Lithium-Based Batteries Using an Anion-Hosting Cathode	Nature Communications	Zongjie Sun, Kai Xi, Jing Chen, Amor Abdelkader, MengYang Li, Yuanyuan Qin, Yue Lin, Qiu Jiang, YaQiong Su, R. Vasant Kumar, Shujiang Ding	2022 年 13 卷: 3209(1-11)	2022 年 6 月 9 日	丁书江	孙宗杰	孙宗杰, 丁书江	26	Web of Science, ESI, SCI	是

4	Current-Density Regulating Lithium Metal Directional Deposition for Long Cycle-Life Li Metal Batteries	Angewandte Chemie International Edition	Heng Mao, Wei Yu, Zhuanyun Cai, Guixian Liu, Limin Liu, Rui Wen, Yaqiong Su, Huari Kou, Kai Xi, Benqiang Li, Hongyang Zhao, Xinyu Da, Hu Wu, Wei Yan, Shujiang Ding	2021年6月6日 卷13 6-193	2021年6月6日	丁书江	毛恒	毛恒, 丁书江	40	We b of Sci enc e, ESI , SCI	是
5	Multiple Dynamic Bonds-Driven Integrated Cathode/Polymer Electrolyte for Stable All-Solid-State Lithium Metal Batteries	Angewandte Chemie International Edition	Jing Chen, Xuettian Deng, Yiyang Gao, Yuanjun Zhao, Xiangpeng Kong, Qiang Rong, Junqiao Xiong, Demei Yu, Shujiang Ding	2023年6月20日 卷55 (1-11)	2023年7月11日	丁书江	陈晶	陈晶, 丁书江	60	We b of Sci enc e, ESI , SCI	是
6											
7											
8											
合 计											
补充说明（视情填写）：											

六、主要完成人情况表

姓 名	丁书江	排 名	第一
行政职务	化学学院院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 解析并打破了离子导电聚合物锂离子解离、传输、转化关系机制，建立了分子链嵌段梯度极性匹配原则，发展了可逆软硬“相锁定”和抑制非活性载流子传输的策略，提出了阴阳离子协同有效载流子和定向疏导离子流的新思路。是所有代表作作者，对全部重要科学发现做出了创造性贡献。			

姓 名	高国新	排 名	第二
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 提出了阴阳离子协同有效载流子和定向疏导离子流的新思路，构建了强解离、多传输、齐转化兼具的离子导电聚合物材料。对本项目重要科学发现中所列的第一项科学发现做出了创造性贡献，是第一代表作论文的作者。			

姓 名	孔祥鹏	排 名	第三
行政职务	执行副总裁		
技术职称	高级工程师		
工作单位	湖南德赛电池有限公司		
完成单位	西安交通大学		

对本项目主要学术贡献： 提出了多组分强韧聚合物膜定向疏导离子流抑制锂枝晶，构筑了高稳定聚合物电解质全固态锂电池。对本项目重要科学发现中所列的第三项科学发现做出了创造性贡献，是第五篇代表性论文的作者。
--

姓 名	石磊	排 名	第四
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 解析了离子导电聚合物分子链嵌段梯度极性匹配原则，对本项目重要科学发现中所列第一重要科学发现做出了创造性贡献，是第一、第二篇代表性论文的作者。			

姓 名	陈晶	排 名	第五
行政职务	无		
技术职称	研究员		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 提出了动态化学键实现固态电池电极电解质界面分子级融合的新思路，构筑了集成式正极/超薄聚合物电解质全固态锂电池。对本项目重要科学发现中所列的第一、第三项科学发现做出了创造性贡献，是第二、第五篇代表性论文的作者。			

姓 名	孙宗杰	排 名	第六
行政职务	无		
技术职称	无		
工作单位	西安交通大学		

完成单位	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>设计了可与阴离子进行可逆电化学反应的阴离子受体正极材料，实现了聚合物固态电解质中阴离子由非活性向电活性的转变，构筑了具有高载流能力与长循环稳定性的固态电池。对本项目重要科学发现中所列的第二项科学发现做出了创造性贡献，是第二、第三代表作论文的作者。</p>	

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安交通大学为本项目的唯一完成单位，为本项目的完成提供了场地、水电、计算设备等硬件条件。同时，学校在软件方面也为项目提供了重要支持，图书馆的书籍和电子数据库是进行科学研究的重要资源，特别是在文献检索方面为项目的开展提供了非常好的条件；学校的科研管理部门、财务部门为项目的日常管理和服务提供了重要帮助。</p>	

单位名称	
<p>对本项目主要学术贡献：</p>	

完成人合作关系说明

第一完成人与第二完成人属于同一研究团队，在锂离子流多孔通道疏导抑制枝晶的相关工作进行合作，共同发表高水平论文 15 篇，代表性论文专著 1。

第一完成人与第三完成人属于同一研究团队，在多组分强韧聚合物膜定向疏导离子流抑制锂枝晶的相关工作进行合作，共同发表高水平论文 4 篇，代表性论文专著 5。

第一完成人与第四完成人属于同一研究团队，提出聚合物分子链嵌段梯度极性匹配策略，实现了锂离子的解离与传输协同增强的相关工作进行合作，共同发表高水平论文 5 篇，代表性论文专著 1，2。

第一完成人与第五完成人属于同一研究团队，发展了软硬“相锁定”策略，实现了锂离子的解离与传输协同增强的相关工作进行合作，共同发表高水平论文 6 篇，代表性论文专著 2，5。

第一完成人与第六完成人属于同一研究团队，在双离子的快速输运与非活性离子的高效转化的相关工作进行合作，共同发表高水平论文 5 篇，代表性论文专著 2，3。

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	论文著作	丁书江/第一完成人；高国新/第二完成人；石磊/第四完成人	2016-2023	Highly stretchable and transparent ionic conducting elastomers	代表性论文一
2	论文著作	丁书江/第一完成人；石磊/第四完成人；陈晶/第五完成人；孙宗杰/第六完成人	2018-2023	Phase-Locked Constructing Dynamic Supramolecular Ionic Conductive Elastomers with Superior Toughness, Autonomous Self-Healing and Recyclability	代表性论文二
3	论文著作	丁书江/第一完成人；陈晶/第五完成人；孙宗杰/第六完成人	2017-2023	Expanding the active charge carriers of polymer electrolytes in lithium-based batteries using an anion-hosting cathode	代表性论文三
4	论文著作	丁书江/第一完成人；孔祥鹏/第三完成人；陈晶/第五完成人	2018-2023	Multiple Dynamic Bonds-Driven Integrated Cathode/Polymer Electrolyte for Stable All-Solid-State Lithium Metal Batteries	代表性论文五
(不限条目)					