

项目公示信息（自然科学奖）

一、项目名称：高比能生物质基电极材料的可控构筑及其超电容性能研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

该项目研究以“高比能生物质基电极材料的可控构筑及其超电容性能研究”为核心主题，以绿色、可持续的生物质基材料（木材、纤维素、农林废弃物）及其衍生品（纸基）为基础，设计、构筑了一系列不同的生物质基储能新产品，开展了一系列特色性的工作：设计了木材和纸基材料同类玻璃高分子结合用于超级电容器储能领域，开发了一种集电极材料和隔膜于一体的兼具高功率和高能量密度的一体化纸基超级电容器，建立了非碳化法构筑生物质基高比能超级电容器储能材料的新方法，发展了多功能生物质基储能材料，提高了生物质资源的利用效率，拓宽了生物质材料的研究领域和应用范围。5篇代表性论文发表在国际著名材料、化学、能源类期刊，篇均SCI他引100次，3篇论文先后入选ESI高被引、热点论文。研究成果受到了包括中国科学院院士彭慧胜教授、加拿大工程院院士倪永浩教授、中国科学院大连化物所国家杰青吴忠帅研究员等在内的国内外学术同行高度认可和广泛关注，被高分子领域高影响力的新媒体高分子

科学前沿等选作亮点进行了专题报道。该项目研究具有系统性和独创性，为不同生物质基储能体系的设计和精准合成提供了有效策略和参考，为开发新型多组分生物质基高比能存储材料奠定了基础，拓宽了生物质基材料的研究领域和应用范围，对设计构筑不同组份和特定结构的高效生物质基电化学存储材料并推进其在超级电容器领域大规模应用具有重要的理论研究价值和现实意义。

提名材料齐全、规范，经完成单位公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省科学技术二等奖。

三、项目简介

能源与环境问题是当今社会备受关注的热点，尤其近年来随着柔性可穿戴电子设备的兴起和国家“双碳”政策的提出，人们对储能材料的选择和开发的要求也越来越高：1) 绿色可持续；2) 优良的电化学存储性能；3) 机械性能优异，能够适应不同的工作环境。生物质基材料作为一种绿色可持续的天然材料，具有孔隙丰富、价格低廉、环境友好等优点，在电化学储能器件中具有良好的应用前景。推进储量丰富和绿色环保的生物质基材料资源化利用，是实现“双碳”的有效技术途径，也是我国节能减排和环境保护的重要任务，符合当前环保节能和低碳经济的需求。

基于国家自然科学基金面上项目、国家重点实验室项目、

陕西省自然科学基金等项目的支持，研究组围绕“高比能生物质基超级电容器的设计构筑与储能特性研究”为核心主题，以绿色、可持续的生物质基材料（木材、纤维素、农林废弃物）及其衍生品（纸基）基础，设计、构筑了一系列不同的生物质基储能新产品，开展了一系列具有创新性、特色性的工作：**创新性地设计了木材和纸基材料同类玻璃高分子结合用于超级电容器储能领域，获得了“一箭多雕”的效果：**利用类玻璃高分子兼具传统热塑性和热固性聚合物的双重特性，赋予了木材和纸基复合材料高强度、可塑形、自修复和形状记忆等特性，同时由于类玻璃高分子的引入，所构筑的木材和纸基超级电容器储能器件的循环寿命也得到了极大地改善。该工作对于生物质基多功能储能材料的开发和应用有着重要的启示作用和参考价值；**开发了一种集电极材料和隔膜于一体的兼具高功率和高能量密度的一体化纸基超级电容器。**这种一体化的纸基超级电容器能够极大地减小电解液离子的传输阻力，为离子的存储和传输提供更高效的空间和通道，而且这种一体化储能器件具有更加明显的质量优势。所构筑的一体化超级电容器储能产品预期的功率和能量密度都**远高于目前的商用超级电容器和动力电池**，表明其能够满足目前的商用水平，而且在整体性能上还有了很大地提升，有助于推动我国造纸和新能源领域的快速发展，抢占技术制高点。**建立了非碳化法构筑生物质基高比能超级电容器储能**

材料的新方法。区别于通过碳化改善生物质基材料导电性的通用方法，非碳化的方法不仅能够最大程度地避免生物质基材料自身丰富的多孔结构免受高温的破坏，而且能够减缓高温碳化所带来的机械强度下降。发展了多功能生物质基储能材料，提高了生物质资源的利用效率，拓宽了生物质材料的研究领域和应用范围，受到了国内外学术同行的高度认可和广泛关注。主要理论与技术创新包括以下三部分：

(1) 揭示了生物质基多级孔结构差异对电解质的传输、存储行为影响的动力学机制

研究了天然木材、纸基材料的微观孔结构分布和大小及电活性材料、类玻璃高分子在木材、纸基中的空间分布情况，通过改变电极材料的组成，优化不同组份的工艺配比，调控生物质复合材料的微观结构，基于多孔介质扩散理论中 Bruggeman 方程，探明生物质基多级孔结构差异对电解质传输、存储行为的影响规律，揭示了生物质基多级孔结构差异对电解质的传输、存储行为影响的动力学机制。该动力学机制的阐明为后续高比能生物质基储能材料孔结构的设计、优化提供了有效地借鉴和指导。

(2) 构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性

通过设计构筑具有不同类玻璃高分子加入量的生物质基复合电极材料并对其相关物理化学特性（包括自愈合温度、

自愈合速率、机械强度、粘弹性、拓扑网络结构转变温度、交联密度和化学键合）和电化学性能（电导率、比电容、倍率性能、循环寿命、自放电性能、功率和能量密度等）进行测试、计算并结合 COMSOL 有限元仿真模拟对存储器件的物理化学特性和电化学储能过程，从实验和理论模拟的角度来分析，建立生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。该研究成果为设计兼具优异理化特性和良好储能特性的生物质基储能器件提供了借鉴和指导。

(3) 阐明了超级电容器功率和能量密度连续可调的机制与实现途径

创造性地发展了真空抽吸法和电化学聚合法来调控电活性材料的负载量及其在生物质基微孔道中的分布情况，并深入研究了功率和能量密度连续可调式高比能的电极材料体系、配方融合技术，从而实现了超级电容器功率和能量密度的连续可调，阐明了超级电容器功率和能量密度连续可调的机制，获得了高能量和高功率密度的致密能源器件的创新工艺技术。这对超级电容器应用范围的进一步拓宽具有重要的研究价值和现实意义。

项目在高效多层次有序可控的生物质基纳米复合电极材料的设计构筑，生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性研究及超级电容器功率和能量密度连续可调工程技术问题的解决等关键科学问题和理论认识上取

得了一系列突破，获得了一系列不同的生物质基复合结构的电极材料构筑新工艺，取得了国际先进水平的研究成果，得到了国内外同行的认可。5 篇代表性论文篇均 SCI 他引 100 次，3 篇论文先后入选 ESI 高被引、热点论文。研究成果受到了包括中国科学院院士彭慧胜教授、加拿大工程院院士倪永浩教授、哈佛大学 Xingcai Zhang 研究员、法国国家科学研究院 Philippe Poulin 教授、中国科学院大连化物所国家杰青吴忠帅研究员等在内的国内外学术同行高度认可和广泛关注，被高分子领域高影响力的新媒体高分子科学前沿等选作亮点进行了专题报道。此外，依托于该项目所制备的一系列生物质基超级电容器储能材料和其它功能材料，自 2020 年 1 月开始先后应用于惠州市妥谱新材料有限公司、西安博瑞得科技有限公司，截止到 2022 年 12 月，先后为两家公司分别新增销售额 8000 和 1000 余万元。此外，项目第一完成人博士毕业于西北工业大学材料学院，师从凝固技术国家重点实验室李铁虎教授和凯斯西储大学戴黎明教授（联合培养）进行储能材料的研究，系统开展了电极材料从设计、制备、表征、电化学性能测试到性能优化等方面的研究工作 10 余年，先后主持国家自然科学基金面上项目（2 项）、陕西省重点研发计划、企业项目等 10 余项。先后获得陕西省高等学校科学技术研究优秀成果二等奖和一等奖（均为第一完成人）。第二完成人为陕西科技大学二级教授，轻工技术与工

程学科学术带头人，主持并完成十二五国家支撑计划项目子课题以及多项国家自然科学基金项目；第三、四、五完成人均主持多项国家级、省部级项目，与第一完成人长期保持着良好的合作关系。

四、客观评价

代表性论文 1 “碳化木材-还原氧化石墨烯@PVA 柔性导电材料的构筑及其在超级电容器、传感和湿度发电领域的应用研究”的第三方评价：该工作于 2021 年在国际著名期刊 *Chemical Engineering Journal* (2021, 418, 129518) 发表后，很快受到了广泛关注，荣获“陕西省高等学校科学技术研究优秀成果奖”一等奖，入选 ESI 高被引论文，目前已被 SCI 引用 102 次。其中包括加拿大工程院院士/国际木材科学院院士，美国缅因大学化学工程系 Ober Chair 教授，加拿大新布伦瑞克（UNB）大学化学工程系教授，林莫利克（Limerick）制浆造纸中心主任 Yonghao Ni 在 (*Biomacromolecules*, 2022, 23, 766-778) 中正面引用了我们的工作作为论据，肯定了我们的工作所制备的材料具有良好的导电性和优异的机械性能。哈佛大学 Xingcai Zhang 研究员 (*Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1), 35)、美国缅因大学 Yingchao Yang 教授在 (*Small*, 2022, 18(50), 2200272) 中引用了我们的工作作为一个正面论据，肯定了我们工作的优点，不需要添加额外的粘结剂。香港理工大学

徐宾刚教授在 (*Advanced Functional Materials*, 2023, DOI: 10.1002/adfm.202301420) 中引用了我们工作中的图片作为典型论据并对我们的工作给予了肯定和较高评价。此项工作受到了来自多国科学家的引用和正面评价。

代表性论文 2 “ 碳化法国梧桐絮构筑碳微米管@氮掺杂石墨烯/导电 PANI (MnO₂) 多层级复合材料作为双功能材料用于储能和催化领域的研究” 的第三方评价：该工作于 2020 年在电化学领域内的知名期刊 *Journal of power sources* (2020, 447, 227387) 发表后，很快受到了广泛关注，荣获“陕西省高等学校科学技术研究优秀成果奖”二等奖，入选 ESI 高被引论文，目前已被 SCI 引用 92 次。法国国家科学研究院 Philippe Poulin 教授在(*Nano Today*, 2020, 33, 100881) 中对于我们的工作给予了积极的评价，认为我们的工作是一个很有挑战性的重要工作。**加拿大工程院院士 Yonghao Ni 教授**在 (*Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9, 14233-14264) 中引用我们的工作作为一个代表性例子并给出积极评价。国际电化学能源科学院副主席，**Electrochemical Energy Reviews** 期刊执行主编李喜飞教授在 (*Nano Energy*, 2022, 91, 106630) 中对我们的工作给予了充分的肯定，认为我们所构筑的生物基复合材料具有高电荷储存动力学和电导率。

代表性论文 3 “类玻璃高分子-纸基复合材料的设计、构筑及其电化学性能研究”的第三方评价：该研究工作于 2020 年发表在国际著名期刊 *Chemical Engineering Journal* (2020, 396: 125318) 上，荣获“陕西省高等学校科学技术研究优秀成果奖”一等奖，被收录为 ESI 高被引和热点论文，目前已被 SCI 引用 97 次。中国科学院大连化物所国家杰青吴忠帅研究员在 (*ACS Energy Letters*, 2022, 7, 267-281) 中引用我们的工作作为论据并肯定了我们所制备材料的形状记忆特性。复旦大学校长助理、科学技术研究院院长、中国科学院院士彭慧胜教授在 (*Progress in Polymer Science*, 2023, 101714, DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2023.101714) 中肯定了我们的工作，认为我们所制备的材料具有高的结构孔隙率和固有的超弹性，增强了复合材料的机械和电化学稳定性。此外，加拿大工程院院士 Yonghao Ni 教授对我们上述一序列的工作也给予了极高地评价：“目前高性能的储能产品严重依赖进口，中国在这些尖端领域的研发和生产依然存在难以攻破的技术难关。该项目开发了一种集电极材料和隔膜于一体的兼具高功率和高能量密度的梯度孔纸基超级电容器并推进其产业化，有望打破国外垄断，实现尖端技术的自主化，维护国家在能源领域的安全。区别于目前需要额外加入隔膜的储能产品，这种一体化的梯度孔纸基超级电容器能够极大地减小

电解液离子的传输阻力，为离子的存储和传输提供更高效的空间和通道，而且这种一体化储能器件具有更加明显的质量优势。这种独特的设计理念为兼具高功率和高能量密度的超级电容器的开发提供了理论和现实的可行性。结合我国在特种纸行业优势以及新能源领域的布局，这种一体化的梯度孔纸基超级电容器具有大规模量产和使用的可能性，而且一旦成功量产和应用后，对我国新能源产业的布局和经济社会的发展具有重要的战略和现实意义。”

代表性论文 4 “类玻璃高分子-多孔木材基复合材料的设计、构筑及其电化学性能研究”的第三方评价：该研究成果发表在化学能源领域内的知名期刊 *Journal of Materials Chemistry A* (2020, 8(21): 10898-10908)，荣获“陕西省高等学校科学技术研究优秀成果奖”一等奖，目前已被 SCI 引用 114 次。电子科技大学先进电能源技术研究中心主任吴孟强教授在 (*Energy Storage Materials*, 2023, 549-556) 中引用并参考了我们超级电容器的组装工艺。中国林科院林化所国家自然科学基金优青项目获得者刘承果研究员在 (*Green Chemistry*, 2021, 23, 5875) 中引用我们的工作作为一个典型的动态键交联反应的支撑例子。此外，我们的工作也受到了**高分子领域高影响力的新媒体高分子科学前沿**的跟踪报道，给予了我们工作及高地评价：“论文的设计

思路新颖，极大地拓宽了生物质基材料的应用范围，也为不同学科的交叉融合发展提供了新的探索性尝试”。

代表性论文 5 “非碳化多孔木材@导电聚苯胺复合材料的制备及其电化学性能研究”的第三方评价：该工作于 2020 年在电化学领域内的知名期刊 *Journal of power sources* (2020, 471, 228448) 发表后，很快受到了广泛关注，荣获“陕西省高等学校科学技术研究优秀成果奖”一等奖，目前已被 SCI 引用 110 次。华中科技大学国家级突出贡献专家霍开富教授在 (*Advanced Functional Materials*, 2022, 32, 2204426) 中直接引用了我们的工作作为一个代表性的例子报道并对我们的工作进行了翔实、积极的评价。美国阿克伦大学高分子科学与高分子工程学院 Xiong Gong 教授在 (*Nano Energy*, 2020, 78, 105397) 中引用并肯定了我们工作中对赝电容材料聚苯胺的选择。

此外，上述这些代表性的工作所制备的一序列不同的生物质基储能材料也受到了广东省、江西省、陕西省等相关企业的高度重视和密切关注，而且已经在广东省惠州市国家级高科技创新型企业妥谱新材料有限公司和陕西省西安博瑞得科技有限公司得到了推广引用，并取得了良好的经济效益：3 年累计为相关企业新增产值达 9000 余万元。

五、代表性论文专著目录（限 8 条）（不超过 8 篇，其中代表作论文不超过 5 篇）

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（某年某月某日）	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	Carbonized wood cell chamber-reduced graphene oxide@PVA flexible conductive material for supercapacitor, strain sensing and moisture-electric generation applications	Chemical Engineering Journal	Xiong, Chuanyin; Li, Bingbing; Duan, Chao; Dai, Lei; Nie, Shuangxi; Qin, Chengrong; Xu, Yongjian; Ni, Yonghao	2021 年 418 卷 129518 页	2021 年 3 月 1 日	Xiong, Chuanyin ; Dai, Lei	Xiong, Chuanyin	熊传银; 李冰冰; 段超; 戴磊; 聂双喜; 覃程荣; 徐永建	98	SCI	是

2	Fabrication of eco-friendly carbon microtubes @ nitrogen-doped reduced graphene oxide hybrid as an excellent carbonaceous scaffold to load MnO ₂ nanowall (PANI nanorod) as bifunctional material for high-performance supercapacitor and oxygen reduction reaction catalyst	Journal of power sources	Xiong, Chuanyin; Yang, Qi; Dang, Weihua; Li, Mengrui; Li, Bingbing; Su, Jie; Liu, Yue; Zhao, Wei; Duan, Chao; Dai, Lei; Xu, Yongjian; Ni, Yonghao	2020 年 447 卷 227387 页	2020 年 1 月 31 日	Xiong, Chuanyin	Xiong, Chuanyin	熊传银; 杨祺; 党伟华; 李萌瑞; 李冰冰; 苏杰; 刘跃; 赵伟; 段超; 戴磊; 徐永建	89	SCI	是
---	---	--------------------------	---	-----------------------	-----------------	-----------------	-----------------	---	----	-----	---

3	A smart paper@polyaniline nanofibers incorporated vitrimer bifunctional device with reshaping, shape-memory and self-healing properties applied in high-performance supercapacitors and sensors	Chemical Engineering Journal	Xiong, Chuanyin; Li, Mengrui; Zhao, Wei; Duan, Chao; Dai, Lei; Shen, Mengxia; Xu, Yongjian; Ni, Yonghao	2020 年 396 卷 125318 页	2020 年 9 月 15 日	Xiong, Chuanyin	Xiong, Chuanyin	熊传银; 李萌瑞; 赵伟; 段超; 戴磊; 沈梦霞; 徐永建	94	SCI	是
---	---	------------------------------	---	--------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	--------------------------------	----	-----	---

4	A smart porous wood-supported flower-like NiS/Ni conjunction with vitrimer co-effect as a multifunctional material with reshaping, shape-memory, and self-healing properties for applications in high-performance supercapacitors, catalysts, and sensors	Journal of Materials Chemistry A	Xiong, Chuanyin; Li, Bingbing; Liu, Heguang; Zhao, Wei; Duan, Chao; Wu, Haiwei; Ni, Yonghao	2020 年 8 卷 10898-10908 页	2020 年 9 月 15 日	Xiong, Chuanyin	Xiong, Chuanyin	熊传银; 李冰冰; 刘和光; 赵伟; 段超; 吴海伟	111	SCI	是
---	---	----------------------------------	---	--------------------------------	--------------------	--------------------	--------------------	----------------------------	-----	-----	---

[illegible]

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
熊传银	1	无	教授	陕西科技大学	陕西科技大学	第一完成人熊传银是本项目研究的组织者和发起者，负责了整个项目研究方案、研究目标以及研究内容的制订与组织实施，为代表性论文 1、2、3、4 和 5 的第一兼具通讯作者。对应的科学发现点如下：1. 揭示生物质基多级孔结构差异对电解质的传输、存储行为影响的动力学机制。2. 构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。3. 阐明了超级电容器功率和能量密度连续可调的机制与实现途径。
徐永建	2	人事处副处长	教授	陕西科技大学	陕西科技大学	第二完成人徐永建是陕西科技大学二级教授，轻工技术与工程学科学术带头人，中国造纸学会纳米纤维素及材料专业委员会委员，负责了整个项目前期基础研究工作的指导，为代表性论文 1、2 和 3 的主要合作者。对应的科学发现点如下：1. 揭示生物质基多级孔结构差异对电解质的传输、存储行为影响的动力学机制。2. 构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。
段超	3	无	教授	陕西科技大学	陕西科技大学	负责本项目生物质基部分材料的微观结构调控和测试表征。是代表性论文 1、2、3、4 的主要合作者。对应的科学发现点如下：1. 揭示生物质基多级孔结构差异对电解质的传输、存储行为影响的动力学机制。2. 构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。

刘和光	4	材料物理与化学系副主任	副教授	西安理工大学	西安理工大学	与第一完成人熊传银共同参与指导和规划完成了本项目研究的相关内容，为代表性论文 4 的主要完成者。对应的科学发现点如下：构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。
沈梦霞	5	无	副教授	陕西科技大学	陕西科技大学	负责本项目生物质基部分材料的电化学性能测试。是代表性论文 3 的主要合作者。对应的科学发现点如下：构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。

七、主要完成单位情况

陕西科技大学：全面组织该项目的实施工作，创造了学科平台优势，营造了良好的科研环境，提供了必要的实验场地和科研条件，配备了优秀的科研人才，并且对项目经费的使用进行监督和管理，为项目的顺利开展和按期完成实施提供了有力保证。

西安理工大学（第二参与单位）：作为重要的合作参与单位，为本项目前期的基础研究提供了必要的实验场地和科研条件，在项目的实施过程中，西安理工大学积极参与本项目关键技术的探讨和制订，并且对本项目的实施过程进行动态监控，确保项目高质量的完成。

八、完成人合作关系说明

第一完成人熊传银是本项目研究的组织者和发起者，负责了整个项目研究方案、研究目标以及研究内容的制订与组织实施，为代表性论文 1、2、3、4 和 5 的第一兼具通讯作

者，与第二完成人徐永建、第三完成人段超、第四完成人刘和光和第五完成人沈梦霞共同合作完成了代表性论文 1、2、3、4 和 5 的相关研究工作。对应的科学发现点如下：1.揭示生物质基多级孔结构差异对电解质的传输、存储行为影响的动力学机制。2.构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。3.阐明了超级电容器功率和能量密度连续可调的机制与实现途径。研究成果分别获得 2022、2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖（1/5）、一等奖（1/6）。

第二完成人徐永建是陕西科技大学二级教授，轻工技术与工程学科学术带头人，中国造纸学会纳米纤维素及材料专业委员会委员，负责了整个项目前期基础研究工作的指导，与第一完成人熊传银共同合作完成了代表性论文 1、2 和 3 的主要研究工作。对应的科学发现点如下：1.揭示生物质基多级孔结构差异对电解质的传输、存储行为影响的动力学机制。2.构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。研究成果获得 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖（2/6）。第三完成人段超陕西科技大学教授，轻工技术与工程学院造纸系副主任，负责了整个项目前期基础研究规划，与第一完成人熊传银共同合作完成了代表性论文 1、2、3、4 的主要研究工作。对应的科学发现点如下：1.揭示生物质基多级孔结构差异对电解质的传

输、存储行为影响的动力学机制。2.构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。研究成果分别获得 2022、2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖（2/5）、一等奖（3/6）。第四完成人刘和光与第一完成人熊传银共同合作完成了代表性论文 4 的主要研究工作。对应的科学发现点如下：构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。研究成果获得 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖（4/6）。第五完成人沈梦霞与第一完成人熊传银共同合作完成了代表性论文 3 的主要研究工作。对应的科学发现点如下：构建了生物质基储能器件的理化特性和电化学性能间的协同相关性。研究成果分别获得 2022、2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖（4/5）、一等奖（5/6）。