

2019 年高等学校科学研究优秀成果奖（科学技术）推荐项目公示

奖种：自然科学奖

推荐单位：清华大学

项目名称	微纳超结构碳的设计、构建和储能研究
主要完成单位：清华大学，中山大学，天津大学，中国科学院金属研究所	
主要完成人：康飞宇，吴丁财，杨全红，李峰，吕瑞涛，成会明，黄正宏，徐成俊，符若文，董留兵，梁庆华，周光敏，王建淦，徐飞，刘畅，方若翩	
<p>项目简介：</p> <p>碳材料是一类可实现能量转换和存储的关键功能材料，在锂电池、超级电容器和燃料电池等能源器件发挥着不可替代的重要作用，因此设计高性能碳材料显著提升能量转换和存储性能具有重大的科学意义与应用价值。然而，当前碳材料大多存在结构无序、富含缺陷、功能单一等问题，已经成为高性能能源器件发展的瓶颈，也难以满足基于新原理的能源器件设计要求。为解决上述重大科学难题，该团队在 973 计划和基金委重点项目等资助下，在国际上率先提出“微纳超结构碳材料”的新思路，引领了碳材料研究的新方向。主要科学发现包括通过结构纳米化、复合化、有序化设计和功能导向组装，实现了碳材料跨越“纳-微-宏”的多层次孔道、多尺度网络、多组分界面的可调可控，构建了系列多功能精确耦合的微纳超结构碳材料，提出高效率、高容量、高通量碳电极材料和功能组分的解决方案，大幅提升了现有能量转换与存储器件的性能。具体如下：</p> <p>(1)发现了微孔、中孔和大孔的精确构筑新方法及其多层次组装新策略，揭示了孔形貌、孔尺寸、传输通道以及层次孔协同组装等因素在电化学充放电过程中的作用机制，构建了超高硫面载量和利用率的多尺度高导电碳网络，</p>	

大幅提升了超级电容器和锂硫电池等能源器件的能量密度、功率密度和循环稳定性。

(2) 提出了利用碳/非碳与柔性纤维基体原位复合实现超级电容器高柔性化的普适方法，开创了高透气性“打孔”柔性电极的新方向，突破了活性物质在反复弯折中易脱落、脆性碳网络柔性差和不透气的难题，从而在国际上率先构建了具有高能量密度、高柔性和高透气性的柔性超级电容器。

(3) 建立了碳/碳和碳/非碳的多组分界面原位构筑方法，提出了表面掺杂锚定金属催化剂来高效形成碳/非碳耦合界面的新策略，实现了高通量的电子输运和电荷分离，解决了电催化应用中碳与催化剂间电子转移阻抗大、利用率低的关键难题，并进一步通过缺陷设计显著改善了催化性能。

项目 8 篇代表性论文分别发表在 *Nature Commun.*、*Adv. Mater.*、*Adv. Funct. Mater.*、*Carbon* 等碳材料和能源领域国际著名刊物上，6 篇为 ESI 高被引论文，被相关领域国际权威学者和同行在 *Nature Energy*、*Chem. Rev.*、*Chem. Soc. Rev.*、*Nature Commun.*、*Adv. Mater.* 等期刊正面评价、他引 1574 次。项目主要完成人在国际碳材料会议、国际电化学会议等重要国际学术会议做大会报告和主题报告 30 余次；项目第一完成人进入 ESI 全球材料科学、工程学领域前 1% 科学家行列，并连续举办六届国际石墨烯高峰论坛、两届储能材料国际研讨会以及十六届中日韩碳材料会议；4 位项目完成人分获国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金资助；包括第一完成人在内的 5 位项目完成人入选科睿唯安高被引科学家。该项目相关理论研究成果有力地指导了先进碳材料与能源器件的快速转化与产业化，产生了显著的经济和社会效益。

代表性论文专著目录

- [1] Fei Xu, Zhiwei Tang, Siqi Huang, Luyi Chen, Yeru Liang, Weicong Mai, Hui Zhong, Ruowen Fu, Dingcai Wu*. Facile Synthesis of Ultrahigh-Surface-Area Hollow Carbon Nanospheres for Enhanced Adsorption and Energy Storage. *Nature Communications*. 2015, 6: 7221.
- [2] Guangmin Zhou, Li-Chang Yin, Da-Wei Wang, Lu Li, Songfeng Pei, Ian Ross Gentle, Feng Li*, Hui-Ming Cheng*. Fibrous Hybrid of Graphene and Sulfur Nanocrystals for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries. *ACS Nano*. 2013, 7 6: 5367-5375.
- [3] Ruopian Fang, Shiyong Zhao, Pengxiang Hou, Shaogang Wang, Hui-Ming Cheng, Chang Liu*, Feng Li*. 3D Interconnected Electrode Materials with Ultrahigh Areal Sulfur Loading for Li-S Batteries. *Advanced Materials*. 2016, 28: 3374-3382.
- [4] Jiangan Wang, Ying Yang, Zhenghong Huang, Feiyu Kang*. A High-Performance Asymmetric Supercapacitor Based on Carbon and Carbon-MnO₂ Nanofiber Electrodes. *Carbon*. 2013, 61: 190-199.
- [5] Liubing Dong, Chengjun Xu*, Yang Li, Changle Wu, Baozheng Jiang, Qian Yang, Enlou Zhou, Feiyu Kang*, Quan-Hong Yang. Simultaneous Production of High-Performance Flexible Textile Electrodes and Fiber Electrodes for Wearable Energy Storage. *Advanced Materials*. 2016, 28: 1675-1681.
- [6] Liubing Dong, Chengjun Xu*, Yang Li, Zhengze Pan, Gemeng Liang, Enlou Zhou, Feiyu Kang*, Quan-Hong Yang. Breathable and Wearable Energy

Storage Based on Highly Flexible Paper Electrodes. *Advanced Materials*. 2016,28:9313-9319.

[7] Ruitao Lv, Tongxiang Cui, Mun-Suk Jun, Qiang Zhang, Anyuan Cao*, Dangsheng Su, Zhengjun Zhang, Seong-Ho Yoon, Jin Miyawaki, Isao Mochida, Feiyu Kang*. Open-Ended, N-Doped Carbon Nanotube-Graphene Hybrid Nanostructures as High-Performance Catalyst Support. *Advanced Functional Materials*. 2011, 21(5): 999-1006.

[8] Qinghua Liang, Zhi Li, Zhenghong Huang*, Feiyu Kang, Quanhong Yang*. Holey Graphitic Carbon Nitride Nanosheets with Carbon Vacancies for Highly Improved Photocatalytic Hydrogen Production. *Advanced Functional Materials*. 2015, 25(44): 6885-6892.

主要完成人情况：（包括：姓名、排名、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目技术创造性贡献、曾获科技奖励情况）

康飞宇，排名 1，教授，清华大学，清华大学

对本项目技术创造性贡献:提出了微纳超结构碳的主要学术思想，建立了微纳超结构碳的模型，组织和领导了研究团队完成了本项目，系统提出了柔性超级电容器、三维碳网络及碳/非碳耦合界面的构筑方法。对第二和第三发现点作出了主要贡献，是代表性论文 4、5、6、7 的通讯作者及代表性论文 8 的合作作者。

曾获科技奖励情况: 1. 2017 年国家技术发明奖二等奖，第 1 完成人；2. 2009 年广东省科学技术奖（科技进步类）二等奖，第 2 单位第 1 完成人；3. 2006 年中国建筑材料工业协会技术发明奖一等奖，第 1 完成人；4. 1993 年国家技术发明奖三等奖，第 3 完成人。

吴丁财，排名 2，教授，中山大学，中山大学

对本项目技术创造性贡献:提出一种反应性模板诱导自组装实现均孔化的新思路，发现简单调控共轭聚合物的碳化历程可有效构建超高孔隙率多孔碳结构的新原理，并证实孔结构的均孔化和富孔化可显著改善电化学储能特性，对第一发现点作出了主要贡献，是代表性论文 1 的通讯作者。

曾获科技奖励情况:1. 2014 年国家“万人计划”青年拔尖人才；2. 2014 年国家优秀青年科学基金获得者；3. 2017 年广东省科技创新领军人才。

杨全红，排名 3，教授，天津大学，天津大学

对本项目技术创造性贡献:提出了引入碳缺陷调控提高催化剂活性的策略，将碳掺杂杂化界面的暴露显著增强了催化剂的光谱响应特性和电子-空穴

分离效率，对第二和第三发现点做出了主要贡献，是代表性论文 5、6 的合作作者及代表性论文 8 的通讯作者。

曾获科技奖励情况：1. 2017 年国家技术发明二等奖，第 2 完成人；2. 2013 年天津市自然科学一等奖，第 1 完成人；3. 2012 年天津市科技进步一等奖，第 2 完成人；4. 2015 年国家杰出青年科学基金获得者；5. 2015 年创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”。

李峰，排名 4，研究员，中国科学院金属研究所，中国科学院金属研究所

对本项目技术创造性贡献：提出了三维结构碳载体的设计思路，制备了具有强的硫/碳复合界面和三维石墨烯网络的电极结构，实现了锂硫电池中硫活性物质的高面密度负载。对第一发现点做出了主要贡献，是代表性论文 2、3 的通讯作者。

曾获科技奖励情况：1. 2018 年辽宁省自然科学一等奖，第 1 完成人；2. 2006 年国家自然科学二等奖，第 2 完成人；3. 2003 年辽宁省自然科学一等奖，第 3 完成人；4. 2015 年国家杰出青年科学基金获得者；5. 2017 年创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”

吕瑞涛，排名 5，研究员，清华大学，清华大学

对本项目技术创造性贡献：发展了水蒸气辅助化学气相沉积法一步生长石墨烯/碳纳米管杂化结构，构筑出共生碳/碳杂化界面，制备出具有高催化活性碳/PtRu 催化剂。对第三发现点做出了主要贡献，是代表性论文 7 的第一作者。

曾获科技奖励情况：1. 2017 年国家优秀青年科学基金获得者；2. 2017 年英国碳素学会 Brian Kelly Award；3. 2016 年北京市科技新星；4. 2014 年清

华大学学术新人奖。

成会明，排名 6，研究员，中国科学院金属研究所，中国科学院金属研究所

对本项目技术创造性贡献：研究了碳-硫之间强的相互作用及三维结构的石墨烯网络的组装方法，发展了高性能的锂硫电池正极结构。对第一发现点做出了重要贡献，是代表性论文 2 的通讯作者及代表性论文 3 的合作作者。

曾获科技奖励情况：1. 2018 年辽宁省自然科学一等奖，第 2 完成人；2. 2017 年国家自然科学奖二等奖，第 2 完成人；3. 2006 年国家自然科学奖二等奖，第 1 完成人；4. 2010 年何梁何利科学与技术进步奖。

黄正宏，排名 7，教授，清华大学，清华大学

对本项目技术创造性贡献：研究了碳与 MnO_2 的复合方法以及引入碳缺陷调控提高掺杂碳杂化界面的方法，提高了氮化碳的光谱响应特性。对第二和第三发现点做出了重要贡献，是代表性论文 4 的合作作者及代表性论文 8 的通讯作者。

曾获科技奖励情况：1. 2013 年天津市自然科学奖一等奖，第 4 完成人；2. 2017 年国家技术发明奖二等奖，第 4 完成人。

徐成俊，排名 8，教授，清华大学，清华大学

对本项目技术创造性贡献：提出了以碳纤维和无尘纸作为基体构建柔性电极的方法，对电极结构和透气性进行了优化，对第二发现点做出了重要贡献，是代表性论文 5、6 的通讯作者。

符若文，排名 9，教授，中山大学，中山大学

对本项目技术创造性贡献：利用反应性模板诱导自组装法制备了一类新型有序碳材料，制备了一类超高比表面积的氮掺杂层次孔碳材料。对第一发

现点做出了贡献，是代表性论文 1 的共同作者。

曾获科技奖励情况：1996 年教育部跨世纪优秀人才

董留兵，排名 10，其他，悉尼科技大学，清华大学

对本项目技术创造性贡献：攻读博士学位期间参与了本项目研究工作，优化了纳米碳纤维复合碳纳米管和 MnO₂ 构建高容量柔性电极的方法，发展了电极“打孔”方法，解决了柔性电极透气性差的问题。对第二发现点做出了贡献，是代表性论文 5、6 的第一作者。

梁庆华，排名 11，其他，南洋理工大学，清华大学

对本项目技术创造性贡献：攻读博士期间参与了本项目研究工作，发展出氨气刻蚀工艺在表面产生碳缺陷的方法，在纳米层次上调控 C-N 杂化界面的暴露。对第三发现点做出了贡献，是代表性论文 8 的第一作者。

周光敏，排名 12，助理研究员，中国科学院金属研究所，中国科学院金属研究所

对本项目技术创造性贡献：攻读博士期间参与了本项目研究工作，研究了碳-硫之间强的相互作用和三维结构的石墨烯网络集流体及其应用方法，制备出了高性能的锂硫电池正极结构。对第一发现点做出了贡献，是代表性论文 2 的第一作者。

曾获科技奖励情况：2018 年辽宁省自然科学一等奖，第 4 完成人

王建淦，排名 13，副教授，西北工业大学，清华大学

对本项目技术创造性贡献：攻读博士期间参与了本项目研究工作，研究了基于层次结构纳米碳纤维的水系非对称电容器，拓宽了单体器件的工作电压，大大提高了超级电容器的能量密度和功率功率。对第二发现点做出了贡

献，是代表性论文 4 的第一作者。

徐飞，排名 14，副教授，中山大学，中山大学

对本项目技术创造性贡献：攻读博士期间参与了本项目研究工作，研究了碳化条件调控共轭结构的碳化历程，制备了具有发达层次孔结构和超高比表面积的中空碳纳米球。对第一发现点做出了贡献，是代表性论文 1 的第一作者。

刘畅，排名 15，研究员，中国科学院金属研究所，中国科学院金属研究所

对本项目技术创造性贡献：研究了三维层次化结构电极设计和高硫负载电极的制备方法。对第一发现点做出了贡献，是代表性论文 3 的共同通讯作者。

曾获科技奖励情况：1. 2003 年辽宁省自然科学一等奖，第 2 完成人；2. 2006 年国家自然科学二等奖，第 3 完成人。

方若翮，排名 16，其他，新南威尔士大学，中国科学院金属研究所

对本项目技术创造性贡献：攻读博士期间参与了本项目的研究工作。制备了高硫负载的三维层次化结构电极，并优化了硫的负载量和电化学性能。对第一发现点做出了贡献，是代表性论文 3 的第一作者。