

**项目名称：**面向高功率储能应用的高性能电极材料的结构与性能调控

**主要完成人（完成单位）：**

黄富强（中国科学院上海硅酸盐研究所）

林天全（中国科学院上海硅酸盐研究所）

毕 辉（中国科学院上海硅酸盐研究所）

唐宇峰（中国科学院上海硅酸盐研究所）

赵 伟（中国科学院上海硅酸盐研究所）

**提 名 者：**中国科学院

**提名意见：**

国际激烈竞争的大功率储能装备急需超高效能电源。该项目针对现有超级电容器与锂电池无法兼顾“高能量+高功率”的世界性储能难题，通过贯穿储能新理念-新材料-器件结构的系列创新，提出了融合“体相储能+表层储能”电化学储能的新机制，发明了性能优异的系列关键材料和制备方法，成功研制了融合高功率密度-高能量密度两种优异特性的新型“双高”快响应储能器件。经第三方机构检测，“双高”器件的能量密度最高达 178 瓦时/千克、功率密度最高达 103 千瓦/千克，超过国际高功率型器件的最高水平。

八篇代表论文发表在《科学》、《先进材料》等期刊，被诺贝尔奖获得者 JB Goodenough 和储能专家 Patrice Simon 等的高度评价，被《自然·能源》等专文评述 5 次。氮掺杂少层介孔碳被称为“超级电容器能量密度的飞跃”、“一个突破性发现”，三维石墨烯管超级材料被称为“材料之王”、被评为“2015 材料新发现、新发明”和“2015 年石墨烯行业十大影响力事件”。

项目获得国家重点研发计划、科技部创新团队等资助。获授权专利 52 项（PCT 国际、美欧日各 1 项），部分成果向上市公司佛塑科技集团转让（专利许可费 1 千万元），开发出 4 分钟快速充放、超长寿命的高功率锂电商业电芯，优于国际同类器件。

提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

## 项目简介：

该项目属于新材料领域，无机非金属材料学科。针对以高功率新型军事装备为代表的军民高技术新装备急需的兼具高功率与高能量电源需求，重点突破大容量储存与电荷极速脱嵌一体化储能新材料的科学难点，提出协同优化多种互为制约物理量的材料创新设计思想，发展了超越现有材料性能极限的储能新材料多尺度结构调控制备新方法，研制成功新型“双高”储能器件。

### 一、氮掺杂介孔少层碳的超高比电容设计与制备

设计出融合高质子膜电容与高电子迁移率的氮掺杂少层碳新结构；提出了“硅原子固定电化学活性氮”制备新思路，解决了碳材料高导电性和高活性氮共存的科学难题；制备出氮掺杂浓度高达 8.5% 的高导电介孔少层碳，比电容高达 855 F/g，突破了石墨烯双电层储能理论极限 550 F/g；成果发表于《科学》，被称为“一个飞跃”和“突破性发现”。

### 二、缺陷结构氧化物的电荷极速脱嵌设计与制备

取得了钛/铌氧化物微观结构调控与性能新突破；巧妙采用“热解还原+元素掺杂”制备出多孔微晶结构的高载流子导电氮掺杂黑色氧化钛，比电容 690 F/g，黑色氧化钛电极专利已获美国、欧洲授权，改变了氧化钛无法用于超级电容器的传统认知；发明原子尺度微溶蚀法制备出孔径 < 1nm 钛铌氧化物纳孔单晶，独特的储锂倍率高达 200C，远优文献报道。

### 三、高导电弹性三维多孔碳的集流体设计与制备

设计高导电通道环绕活性基元密堆且满足电荷极速充放的集流新结构；制备出共价键合的类金刚石结构超轻三维石墨烯管，力学和电学性能均高出同类材料 1-2 个数量级，应用于动力电芯实现 4 分钟充电；被称为“轻如气球强如金属”超级材料、评为“2015 年材料界重要发明”和“2015 石墨烯行业十大影响力事件”。

### 四、“双高”快响应储能器件的创新设计与制备

运用超高比电容极速放电和高导电高力学性能的关键新材料，实现了电容-电池两种优异特性融合的贯穿储能新理念-新材料-器件结构的系列创新；“双高”器件性能取得突破；第三方检测能量密度最高 178 Wh/kg，功率密度最高 103 kW/kg，优于国际同类器件。

八篇代表论文发表在 *Science*、*Advanced Materials* 等期刊，篇均影响因子 22.786，他引均超百次、总他引 2200 余次、单篇最高 1000 余次，ESI 高被引论文 7 篇。被 *Nature Energy* 等专文评述 5 次，获国际储能权威 JB Goodenough、Patrice Simon 等认可。发明专利授权 52 项，含国际、美国、欧洲各 1 项。项目获国家重点研发计划、科技部重点领域创新团队等资助，上市公司佛塑集团支付 1 千万专利许可费购买项目部分成果，设立“石墨烯动力电池科学技术创新研究中心”进行战略合作研发并资助上硅所建成石墨烯动力锂电池中试线，研发出 4 分钟充满的石墨烯磷酸铁锂电池、5C 倍率循环寿命超 4000 次。

## 代表性论文专著目录:

1. Tianquan Lin, I-Wei Chen, Fengxin Liu, Chongyin Yang, Hui Bi, Fangfang Xu, Fuqiang Huang. Nitrogen-doped mesoporous carbon of extraordinary capacitance for electrochemical energy storage. *Science* 2015, 350, 1508.
2. Mi Zhou, Tianquan Lin, Fuqiang Huang, Yajuan Zhong, Zhou Wang, Yufeng Tang, Hui Bi, Dongyun Wan, Jianhua Lin. Highly conductive porous graphene/ceramic composites for heat transfer and thermal energy storage. *Advanced Functional Materials* 2013, 23, 2263.
3. Tianquan Lin, Chongyin Yang, Zhou Wang, Hao Yin, Xujie Lü, Fuqiang Huang, Jianhua Lin, Xiaoming Xie, Mianheng Jiang. Effective nonmetal incorporation in black titania with enhanced solar energy utilization. *Energy & Environmental Science* 2014, 7, 967.
4. Jiangtian Li, Wei Zhao, Fuqiang Huang, Ayyakkannu Manivannan, Nianqiang Wu. Single-crystalline Ni(OH)<sub>2</sub> and NiO nanoplatelet arrays as supercapacitor electrodes. *Nanoscale* 2011, 3, 5103.
5. Hui Bi, I-Wei Chen, Tianquan Lin, Fuqiang Huang. A new tubular graphene form of a tetrahedrally connected cellular structure. *Advanced Materials* 2015, 27, 5943.
6. Tianquan Lin, Yufeng Tang, Yaoming Wang, Hui Bi, Zhanqiang Liu, Fuqiang Huang, Xiaoming Xie, Mianheng Jiang. Scotch-tape-like exfoliation of graphite assisted with elemental sulfur and graphene-sulfur composites for high-performance lithium-sulfur batteries. *Energy & Environmental Science* 2013, 6, 1283.
7. Jian Zhi, Wei Zhao, Xiangye Liu, Angran Chen, Zhanqiang Liu, Fuqiang Huang. Highly conductive ordered mesoporous carbon based electrodes decorated by 3D graphene and 1D silver nanowire for flexible supercapacitor. *Advanced Functional Materials* 2014, 24, 2013.
8. Yufeng Tang, Fuqiang Huang, Wei Zhao, Zhanqiang Liu, Dongyun Wan. Synthesis of graphene-supported Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> nanosheets for high rate battery application. *Journal of Materials Chemistry* 2012, 22, 11257.