



超级电容产业周报

2026年3月 第 2 期

- 山东印发2026新能源消纳方案，推动超级电容等新型储能技术示范应用
- 总投资6亿元！辽宁朝阳首个构网型混合储能电站开建，采用超电+飞轮等多技术协同
- 江海股份：超电产能扩产，适配 AI 数据中心
- 富华德新能源科技取得超级电容器专利，提供一种超级电容器
- 中天超容取得超级电容结构专利，将第二电容模组压紧于顶盖上
- 普兰纳米创始人陈永胜院士受邀出席第九届储能前沿技术大会，分享干法电极技术应用新进展
- 今朝时代李卫东：储能技术快速迭代超级电容发展前景广阔
- 四川大学《IECR》：“金针菇”状混合碳泡沫，用于可压缩超级电容器

【政策资讯】

山东印发2026新能源消纳方案，推动超级电容等新型储能技术示范应用

落实省委、省人民政府部署要求，促进新能源在大规模开发的同时实现高水平消纳，制定本行动方案。

一、主要目标

聚焦源、网、荷、储协同发力，多措并举促进新能源消纳，实现绿电既要“增长快”又要“用的好”。2026年，新型储能装机达到1400万千瓦，抽水蓄能在运在建装机达到1000万千瓦左右，完成全省存量煤电机组灵活性改造300万千瓦以上，加快培育源网荷储、绿电直连等新模式新业态，积极拓展虚拟电厂、农村微电网等应用场景，保持全省新能源利用率高于全国平均水平。

二、重点任务

（一）加强规划政策协同。

1.强化规划引领。坚持系统思维，科学制定“十五五”新型能源体系发展规划及可再生能源、电力等专项规划，合理确定新能源发展目标、规划布局，实现新能源发展与电网工程、调节资源、负荷增长相协调。修编海上风电、鲁北风光储输一体化基地等规划方案，优化项目布局 and 开发结构，合理安排建设节奏，实现接续开发、稳定消纳。

2.统筹政策保障。研究出台促进光伏发电高质量发展、加强抽水蓄能项目管理等政策文件，优化完善源网荷储一体化等实施细则，引导行业健康持续发展。积极探索核电参与调峰的机制和具体方式。充分发挥政策性引导作用，推动传统产业、新兴产业与新能源协同布局，拓宽新能源与产业耦合发展新空间。

3.深化课题研究。依托行业智库、咨询平台，全面加强新型电力系统基础理论、关键技术和工程应用研究，围绕山东近中远期风光新能源消纳能力提升、能源转型支撑制造业提档升级、孤立电网企业转型、自备电厂及地方电厂常态化调峰等重点课题，形成一批高质量研究成果，为规划编制、政策制定提供理论支撑。

(二) 加快调节能力建设。

4.提升火电机组调节能力。加快存量煤电机组灵活性改造，完成改造规模300万千瓦以上，力争实现直调公用机组“应改尽改”。积极争取国家煤电政策支持，有序推进亚临界机组关停整合和改造升级，新上机组全部参照新一代煤电标准建设。推动已纳规火电项目加快建设，全年建成大型煤电机组200万千瓦以上、燃机100万千瓦左右。支持煤电企业因地制宜利用关停机组腾出的土地、设备等建设调相机，为电网提供电压支撑和转动惯量。

5.鼓励火电新技术推广。鼓励煤电机组通过电锅炉、熔盐储热等热电解耦技术增加灵活调节能力。对于在计量出口内建设的电供热储能设施，支持按照系统调峰设施进行管理，其发电深度调峰贡献根据现货市场分时价格信号获得合理经济收益，其用电参照厂用电管理但统计上不计入厂用电。进一步优化配建热电解耦设施机组的运行管理，合理提高煤电机组消纳水平。研究煤电机组与新型储能项目联合运行，优化运行方式，提升调节能力。

6.加快抽水蓄能建设。建成投产潍坊抽水蓄能首台机组30万千瓦，开工建设蒙阴垛庄120万千瓦、沂源石桥180万千瓦等项目，提速五莲街头等项目前期工作，在运在建抽水蓄能达到1000万千瓦左右。稳妥推进抽水蓄能容量电价机制改革，稳定项目投资预期，更好发挥抽水蓄能调节作用。

7.提速新型储能发展。建成中能建泰安35万千瓦压缩空气储能、吉电潍坊35万千瓦电化学储能等重点项目。积极推动超级电容、飞轮、熔盐、液流电池、钠离子电池等新技术示范应用和商业化发展，加快沾化魏桥50万千瓦熔盐储能等项目建设。支持推动分布式储能、“数据中心+储能”、移动式储能等创新场景发展。全省新型储能装机达到1400万千瓦左右。

（三）强化电网支撑能力。

8.推动坚强主网架建设。加快烟威、中核CX等特高压工程和高地、渤海等500千伏输电工程建设，确保2026年如期建成，满足烟威、鲁北地区清洁能源送出需求。开工鲁苏互济用电直流联网工程，提升省间互济能力。持续优化220千伏市域主网架结构，合理调整220千伏供电分区，提升供电保障能力和灵活适应性。

9.提高配电网就地平衡能力。持续推进城乡配电网改造升级，提升供电保障和系统承载能力，满足分布式新能源、新型储能接入和电动汽车充电需求。鼓励在配网侧建设分布式储能等调节资源，增强配电网自平衡能力。加大农村电网改造力度，年内新增线路10000公里、变（配）电容量650万千伏安。

10.增强新能源涉网安全性能。深化有源配电网运行风险管控，建立健全风险识别、监视控制体系。提升新能源场站功率预测精度，开展快速频率响应、耐压、耐频等涉网性能改造，提高新能源主动支撑能力。稳妥推进低压分布式光伏直采直控，增量低压分布式光伏具备秒级直接采集与控制能力，提升存量10千伏分布式光伏直采直控改造比例。

11.提升电网服务与调控水平。持续深化拓展新能源并网运行服务专项行动，简化并网办理流程。完善基于人工智能大模型的智慧化调度系统，提高电力系统模拟仿真和稳定运行控制能力。修订电力调度控制管理规程，优化调度生产组织模式，提升电网实时调控和安全稳定水平。强化源网荷储协同互动机制，提升新能源消纳与应急保供能力。

12.积极拓展省外消纳空间。加强与外电入鲁送端省份沟通，结合省内供需水平优化送电曲线。统筹考虑顶峰保供、用电成本、绿电消纳等方面影响，优化新能源参与省间市场政策，推动扩大外送规模，力争年内售出5.5亿千瓦时。

（四）提振绿电消费需求。

13.推动重点用能企业消费绿电。落实国家可再生能源消费最低比重目标要求，分解明确重点用能行业绿色电力消费比例，支持通过绿电、绿证交易等方式，提升绿电消费比例。持续推动魏桥、信发等电解铝负荷接入公用电网，鼓励自备机组“少发多购”，提升新能源消纳能力。依托省级绿证交易服务中心，强化对绿证交易、绿电消费比例的监测与评估，为

市场主体提供高效撮合等一站式服务。

14.提升需求侧响应能力。深入挖掘用户侧可调节资源，按照电压等级、响应速度、响应类型分层分级设置，健全需求侧灵活调节资源库，确保需求侧响应能力达到最大负荷的5%。适时优化工商业和居民用电峰谷时段划分，通过电力市场价格信号，引导电力用户积极参与电力系统调节。

15.加快充换电示范站建设。充分发挥电动汽车储能资源对电网的调峰作用，积极推广济南起步区车网互动充换电示范站模式，扩大双向充放电(V2G)项目规模，丰富应用场景，推动车、桩、站、网融合发展，全年改造新建各类充换电示范站80座。

(五) 推进业态模式创新。

16.赋能城乡低碳发展。在城市以交通枢纽、商业综合体等公共设施为支点，引入区块链、AI、云计算等先进技术，打造综合智慧能源系统，提升能源利用效率和城市治理水平。在乡村深入推进农村能源革命，结合“整县分布式光伏开发”“千乡万村驭风行动”以及生物质、地热能非电利用，试点建设“村能村用”的村镇微能网，降低农村综合用能成本，助力乡村振兴。

17.支持就近消纳新业态。支持新建分布式光伏项目与配建新型储能“光储一体”实施项目备案。积极推广源网荷储一体化模式，探索发展“新能源+新型储能”“新能源+生物质”“新能源+分布式燃机”，加快滨州滨化、潍坊海化等项目建设，力争年内累计建成项目20个左右。加快单一用户绿电直连模式落地应用，提速东营时代项目建设，支持战略性新兴产业、出口外向型企业开展绿电直连，打造一批典型项目。加快推动烟台万华等10个绿电产业园、丁字湾新型能源创新区等20个零碳园区建设，实现新能源与产业融合发展。

18.加快虚拟电厂建设。印发促进虚拟电厂高质量发展方案和虚拟电厂建设运营管理办法，持续创新应用场景，打造一批城市级、园区级、社区级虚拟电厂。进一步完善交易执行、市场结算、考核评估等市场规则，规范虚拟电厂参与电力市场的运行评估、交易模式等，实现40家虚拟电厂常态化参与电力市场，调节能力达到150万千瓦。

19.推动电力算力协同。在烟威、鲁北等核电和风光资源富集地区，协同推动清洁能源

与算力设施规划建设，优先支持绿电占比超过80%的新建算力基础设施。支持济南起步区、青岛鳌山湾等算力设施较为密集的区域接入绿电专变、建设分布式新能源，推动算力基础设施用能绿色化。

(六) 完善电力市场机制。

20.完善新能源价格机制。深化新能源上网电价市场化改革，科学确定机制电量规模，引导企业从建设成本出发理性报价，通过市场化手段促进风电、光伏健康有序发展。贯彻落实新能源就近消纳价格机制，完善省级配套政策，推动绿电直连、源网荷储一体化等项目加快发展。

21.优化电力市场交易机制。完善分布式新能源、储能、虚拟电厂等新型主体参与电力市场交易方式，推动各类调节资源“一体多用、分时复用”。健全完善发电侧可靠容量补偿和运行成本补偿机制，支持调节性电源有序投建。探索建立备用辅助服务市场交易品种，推动调频辅助服务、现货电能量市场联合出清。直接参与电力批发市场的用户，在负电价时段（以日内实时电价为准）月用网电量占其全部用网电量60%（含）以上的，免于中长期偏差缺额收益回收。

22.健全新型储能市场机制。研究优化电力现货市场电能量申报及出清价格下限，逐步拉大充放电价差。积极推动独立储能参与日内、实时电能量市场，分时报价参与调频辅助服务市场，完善储能参与调频辅助服务市场和电能量市场的衔接机制。逐步扩大储能调频规模比例，优化调频步长、缩短指令周期，充分发挥新型储能快速调节能力。鼓励新型储能与集中式、分布式新能源联合参与电力市场交易。

三、保障措施

省发展改革委、省能源局、山东能源监管办统筹协调推进新能源消纳工作，有关单位认真落实各项政策举措，加强政策宣传解读，形成齐抓共管、协力推进的工作格局。严格落实属地责任、行业监管责任、企业主体责任，坚守安全发展底线，确保项目建设依法依规、运营管理稳定高效。

上述政策重点促进2026年全省新能源高水平消纳，自印发之日起施行，只适用2026

年建成的项目，后续年度视情况另行制定或延用。

超级电容器是一种广泛应用于轨道交通能量回收、电网调频、智能电表等领域的高效储能装置，具有功率密度高、充放电速度快、循环寿命长等优势，是现代能源存储与管理系统中的关键器件。此前，行业内长期缺乏统一的测试规范和指标体系，制约了材料研发、工艺优化与质量控制。

此次发布的三项国家标准是依托山西煤化所多年科研积累和实践经验，联合三十余家单位，广泛吸纳行业专家意见，经过多轮技术研讨与实验验证，从而形成的科学、系统的技术规范体系。

其中，GB/T 47029-2026是针对超级电容器电极片物理性能的综合测试方法标准，系统规定了**电极片**的外观、毛刺、厚度、面密度、压实密度、反弹性能等十项关键物理特性的测试方法，可满足研发、生产、质检等多场景需求。

来源：http://nyj.shandong.gov.cn/art/2026/4/1/art_59960_10311613.html

【行业动态】

总投资6亿元！辽宁朝阳首个构网型混合储能电站开建，采用超电+飞轮等多技术协同

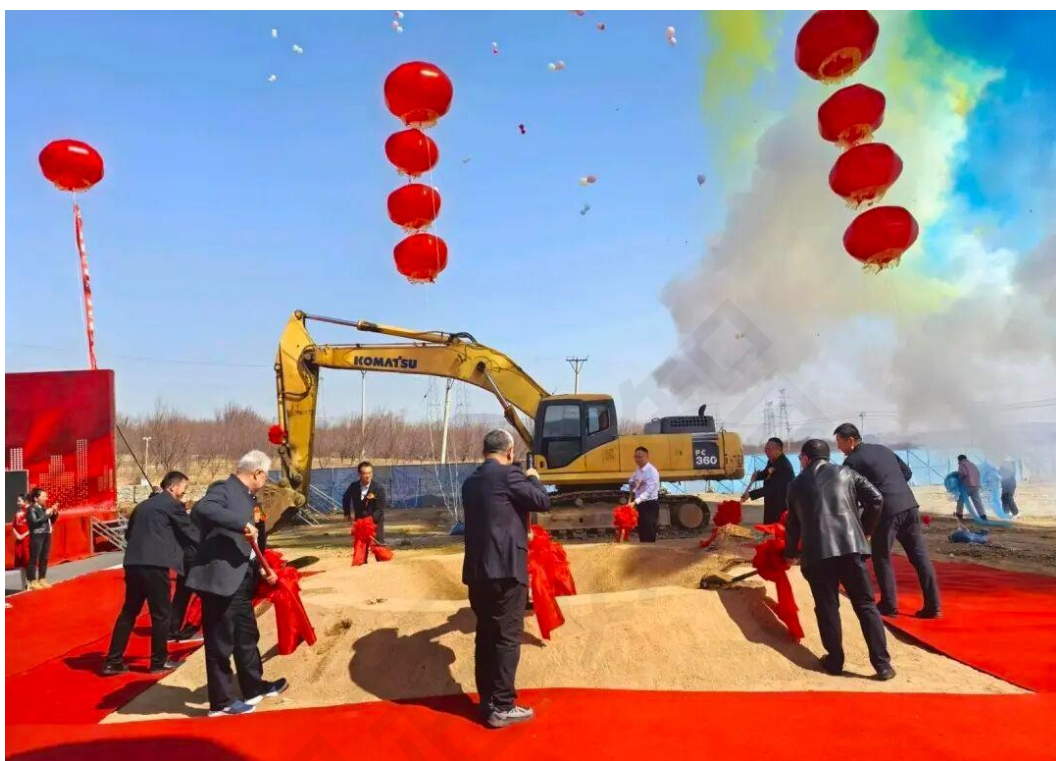
夯土奠基，储能启航。3月28日，朝阳市经济技术开发区西北片区，双塔区200MW新型混合调频储能电站项目举行开工仪式。这个总投资6亿元的项目，是双塔区首个大型储能电站，不仅填补了区域大型储能设施空白，更为朝阳新能源产业转型升级按下加速键。



该项目创新采用超级电容、磷酸铁锂、钛酸锂、飞轮四种储能设备协同运行模式，为朝阳地区首例构网型混合储能电站。项目总占地235亩，分两期建设，每期100MW，同步新建1座220KV升压站。“超级电容与飞轮储能具备毫秒级响应速度，能第一时间应对电网波动；磷酸铁锂、钛酸锂储能拥有大容量优势，可满足电网长时间调峰需求。四类技术互补融合，大幅提升储能系统的稳定性与实用性。”项目相关负责人介绍。



项目投资方辽宁源一储能科技有限公司成立于2025年3月，注册于双塔区。企业背靠行业龙头南通江海电容器股份有限公司，该公司系浙江省交通投资集团控股的A股上市公司（股票代码：002484），连续34届入选“中国电子元件百强企业”榜单，是国内铝电解电容器行业领军企业。源一储能核心技术团队来自华北电力大学，在飞轮、超级电容等新型储能技术领域拥有丰富实践经验。



目前，项目场地平整已完工，施工队伍已进场。随着奠基培土完成，项目全面进入土建施工阶段。总承包单位负责人表示，将严格遵循工程建设标准，严把质量关、安全线，高效推进建设进度。监理单位负责人承诺，实施全过程质量安全监管，保障项目稳步推进。



一期工程计划于2026年底前建成投运。项目建成后，将形成200MW储能规模，具备快速调频调压能力，有效破解朝阳地区新能源消纳难题。双塔区相关负责人表示，将全力做好项目服务保障，推动项目早日投产达效。辽宁源一储能科技有限公司表示，将持续深耕新型储能领域，助力国家“双碳”目标稳步实现。

信息来源：

https://www.toutiao.com/article/7622966940230877705/?&source=m_redirect

【行业动态】

江海股份：超电产能扩产，适配 AI 数据中心

26日，江海股份AI、智能汽车、新能源、储能专用电容器项目开工仪式在通州区平潮镇举行。该项目计划总投资50亿元，其中一期工程占地面积135亩，计划投资10亿元，将建成20万平方米的现代化智能厂房。项目达产后，预计年产1.5亿只专用电容器，年新增应税销售30亿元。

江海股份是全球电子元器件领域的领军企业，深耕电力电子领域，实现铝电解、薄膜、超级电容三大核心产品全覆盖，获评国家制造业单项冠军，牵头建设全省唯一的电容器标准创新基地。

“这个项目是我们锚定‘十五五’战略目标，抢抓市场机遇，推动科研成果产业化的关键举措，更是响应通州新型工业化战略，助力区域产业升级的责任担当。”南通江海电容器股份有限公司董事长陈卫东表示，未来企业将继续加大研发投入，深化产学研协同创新，攻克核心材料与关键工艺难题，全力打造全球领先的电容器制造基地。

信息来源：<https://www.nantong.gov.cn/ntsrnzf/sxcz/content/66e0bebb-0fe1-40a3-925b-db06fe34aecf.htm>

【行业动态】

富华德新能源科技取得超级电容器专利，提供一种超级电容器

国家知识产权局信息显示，富华德新能源科技（东莞）有限公司取得一项名为“超级电容器”的专利，授权公告号CN223977813U，申请日期为2025年2月。

专利摘要显示，提供一种超级电容器，其包括金属壳体、芯子、正极金属连接片以及正极金属柱；金属壳体具有金属筒体和金属盖体，金属筒体和金属盖体一体成型以形成沿轴向一端封闭而在轴向另一端敞开的收容空间，金属盖体具有沿轴向贯通的通孔；芯子位于收容空间内，芯子具有分别位于轴向的相反两端的正极端和负极端，正极端沿轴向靠近通孔，芯子沿径向与金属筒体间隔开；正极金属连接片沿轴向与芯子的正极端平面激光焊接，正极金属连接片在轴向的投影落在芯子的周面的投影范围内；正极金属柱在底部的周缘处与正极金属连接片激光焊接，正极金属柱沿轴向穿过通孔且正极金属柱的周面的一部分与金属盖体的形成通孔的壁激光焊接。

信息来源: https://news.sohu.com/a/993233261_114984

【行业动态】

中天超容取得超级电容结构专利，将第二电容模组压紧于顶盖上

国家知识产权局信息显示，中天超容科技有限公司取得一项名为“超级电容结构”的专利，授权公告号CN224067558U，申请日期为2026年2月。

专利摘要显示，本申请提供一种超级电容结构，包括底板、顶盖、安装件、第一电容模组、第二电容模组、连接结构；顶盖可拆卸地连接于所述底板，且所述顶盖与所述底板之间形成容纳腔；安装件位于所述容纳腔内；第一电容模组位于所述安装件与所述底板之间，所述第一电容模组可拆卸地连接于所述安装件；第二电容模组位于所述安装件与所述顶盖之间，所述第二电容模组可拆卸地连接于所述安装件；连接结构的两端分别可拆卸地连接于所述底板和所述顶盖，所述连接结构被配置为将所述第一电容模组压紧于所述底板上，且将所述第二电容模组压紧于所述顶盖上。

信息来源: <https://m.163.com/dy/article/KPGO61T70519QIKK.html>

【行业动态】

普兰纳米创始人陈永胜院士受邀出席第九届储能前沿技术大会，分享干法电极技术应用新进展

3月31日，第九届储能前沿技术大会在北京·首都国际会展中心正式启幕。作为储能领域极具影响力的学术品牌盛会，本次大会汇聚9位院士、50余位高校院所专家及70余位领军企业代表，共话储能前沿技术、发展趋势与产业挑战，搭建起学术研究与产业需求深度对接的

高端交流平台。



天津普兰纳米科技有限公司创始人、中国科学院院士陈永胜教授受邀出席院士论坛，并发表题为《基于干法电极的超级电容器和固态电池》的主旨演讲。他立足于行业专家视角，围绕干法电极技术前沿趋势分享了深刻洞察；同时结合企业在该领域多年的深耕积淀，为技术从实验室走向产业化提供了实践佐证。



随着新能源产业快速迭代，对电池能量密度、安全性及制造成本提出更为严苛的要求，传统湿法涂布工艺在能耗和环保方面的挑战日益凸显。在此背景下，干法电极技术凭借独特优势，既能有效降低制造成本与生产能耗，更能显著提升电极压实密度和电化学性能，成为破解行业痛点的关键突破口。

针对这一技术趋势，本次院士论坛上，陈永胜院士重点介绍了普兰纳米在干法超级电容器和干法电池两大产品线的创新应用与产业化进展。



作为国内干法电极工艺的先行者，普兰纳米已构建起从材料制备、干法极片生产到器件集成的完整技术闭环。在干法超级电容器领域，产品凭借高功率、长寿命、宽温域、安全环保等优势，性能处于国际先进水平，已在构网型SVG、新能源调频、风电变桨、势能回收等场景实现验证，在AIDC等新兴市场也表现出强有力的产品优势；在干法电池领域，依托自主知识产权的干法技术，公司已在锂电池领域取得关键技术突破，目前正加速推进产业化验证，为后续应用拓展奠定坚实基础。

此次受邀出席第九届储能前沿技术大会并分享技术成果，既是行业对普兰纳米多年技术沉淀与创新实力的高度认可，也彰显了企业在干法电极领域持续探索、开放合作的鲜明姿态。

未来，普兰纳米将继续以技术创新为核心驱动力，聚焦干法电极技术的迭代升级与应用场景拓展，深耕储能领域核心赛道，持续突破技术瓶颈，推动产学研深度融合，助力储能产业向更高效、更经济、更可持续的方向高质量发展。

信息来源：https://mp.weixin.qq.com/s/6_HQcwfcLutrMKwPASa9ug

【前沿技术】

基于具有增强离子扩散和超高稳定性的多通道碳纳米纤维的商业负载量柔性超级电容器

电动汽车和大规模储能系统的快速发展进一步加速了对先进电化学储能技术的需求。超级电容器（SC）以其快速的充放电速率、长周期寿命和卓越的安全性而闻名，被广泛认为是最有前景的储能技术之一。然而，传统的碳基SCs的实验室与工业化之间仍存在显著差距，尤其是在电极的低面积和体积电容方面，这仍是SC商业化的主要障碍。因此，在保持优异的电容性能的同时实现高质量负载，是现实应用中的紧迫瓶颈。

近日，南京林业大学张倩副教授、何水剑教授团队与南京大学唐少春教授，扬州大学杨皓奇副教授合作在《Chemical Engineering Journal》期刊上，发表了最新研究成果

“Multi-channel Carbon Nanofibers with Enhanced Ion Diffusion and Ultra-Stability for Flexible Supercapacitors at Commercial-Scale Mass Loading”。该研究引入了一种新颖策略，将电纺与相分离、配位化学及原位模板相结合，合成具有“类藕杆”仿生结构——交叉联通多通道结构的碳纳米纤维（CNF），这些纤维具有增强的电子导电性和高效的离子扩散特性。独特的交叉连接多通道结构最大化了电极与电解质的界面，而梯度孔隙工程有效缓解了碳电极中常见的动力学限制。该设计使离子扩散系数提升了三个数量级，显著提升了速率能力并优化了活性位点的利用率。

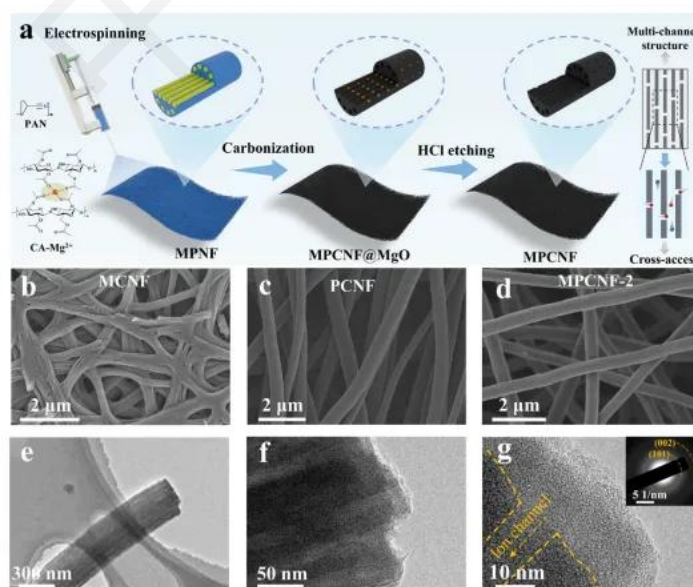


图1： (a) MPCNF-x合成路径的示意图。 (b) MCNF、 (c) PCNF和 (d) MPCNF-2的SEM

图像。(e-f) MPCNF-2的TEM图。(g) MPCNF-2的SAED图像。

CNF的制备过程如图1a所示。聚丙烯腈 (PAN)、醋酸纤维素 (CA) 和醋酸镁 ($\text{Mg}(\text{Ac})_2$) 被分散在N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) 中作为电纺溶液。CA的侧链富含极性醋酸酯基团 ($-\text{COOCH}_3$)，这些基团会诱导偶极矩，而PAN含有极性腈基团 ($-\text{C}\equiv\text{N}$)，促进聚合物间的偶极-偶极相互作用，从而触发两聚合物之间的相分离。碳化前，PAN和CA混合纳米纤维称为MNF，而PAN、CA和 $\text{Mg}(\text{Ac})_2$ 三元复合衍生碳纳米纤维则称为MPNF-x (x代表CA剂量)。

CNF的制备过程如图1a所示。聚丙烯腈 (PAN)、醋酸纤维素 (CA) 和醋酸镁 ($\text{Mg}(\text{Ac})_2$) 被分散在N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) 中作为电纺溶液。CA的侧链富含极性醋酸酯基团 ($-\text{COOCH}_3$)，这些基团会诱导偶极矩，而PAN含有极性腈基团 ($-\text{C}\equiv\text{N}$)，促进聚合物间的偶极-偶极相互作用，从而触发两聚合物之间的相分离。碳化前，PAN和CA混合纳米纤维称为MNF，而PAN、CA和 $\text{Mg}(\text{Ac})_2$ 三元复合衍生碳纳米纤维则称为MPNF-x (x代表CA剂量)。

研究团队利用TG-MS分析 Mg^{2+} 配位对复合纤维热分解行为的影响。结果(图2a)显示在低于220°C时 H_2O ($m/z = 18$) 的峰值，表明该阶段主要涉及样品脱水。在220至550°C之间，CA会发生分解释放产物如 CH_4 ($m/z = 16$)、 CO ($m/z = 28$) 和 CO_2 ($m/z = 44$) 等。这些小分子由 $-\text{COCH}_3$ 等基团的断裂产生，这些在该阶段均表现出峰值信号。然而，MNF的信号强度低于CPCNF信号，表明配位相互作用显著抑制了CA的热分解。此外，在此阶段，CPCNF-5中PAN上的腈基 ($-\text{C}\equiv\text{N}$) 发生分解和重组，释放如HCN ($m/z = 27$) 和 C_2H_4 ($m/z = 28$) 等气体。在550°C以上的温度下，残留样品持续分解，分子链断裂。在670°C以后，CA分子链的断裂导致MNF中 $m/z = 28$ 和44的信号增加，而MPNF-2在此阶段未观察到显著的分解反应。该分析表明， Mg^{2+} 配位有效限制了CA的热分解和熔化，促进了多通道结构的定向排列。

采用X射线衍射 (XRD) 来表征材料的晶体结构和相组成。如图2b所示，所有样品在约23°和44°处表现出特征性的宽峰，分别对应 (002) 和 (101) 平面，表明碳结构为非晶

形。进一步利用拉曼光谱来量化碳样品的晶格无序（图2c）。所有碳样品的ID/IG值均大于1，证实晶体结构存在长程无序。MCNF的ID/IG值（1.71）低于PCNF（1.79）、MPCNF-1（1.91）、MPCNF-2（1.85）和MPCNF-3（1.83），表明Mg²⁺的嵌入会在碳基体中诱导更多晶格缺陷。这种高度的结构无序通过促进离子与碳壁的相互作用来增强电容。

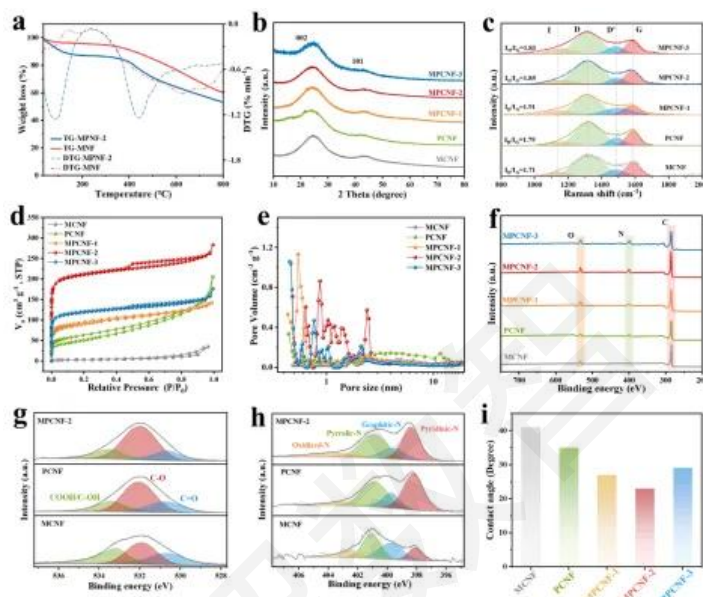


图2：(a) MPNF-2的TG-MS曲线。(b) XRD图谱。(c) CNF的拉曼光谱。(d) CNF的N₂吸附/脱附等温线。(e) 孔径分布曲线。(f) CNFs的XPS光谱。高分辨率 (g) O1s XPS光谱，(h) MCNF、PCNF和MPCNF-2的N 1s XPS光谱。(i) CNF的动态接触角测试。

N₂吸附/脱附测试揭示了样品的孔隙结构特征和比表面积（SSA）（图2d）。根据吸脱附曲线类型说明，聚合物复合纳米纤维通常难以通过直接热解形成多孔结构，而配位产生的纳米MgO模板原位锚定则显著增强了碳产物的SSA。此外，MPCNF-2平均孔径（1.07 nm）有助于电解质离子的快速吸附，同时减小双电层厚度，从而提升电极速率性能，同时保证高电容释放。

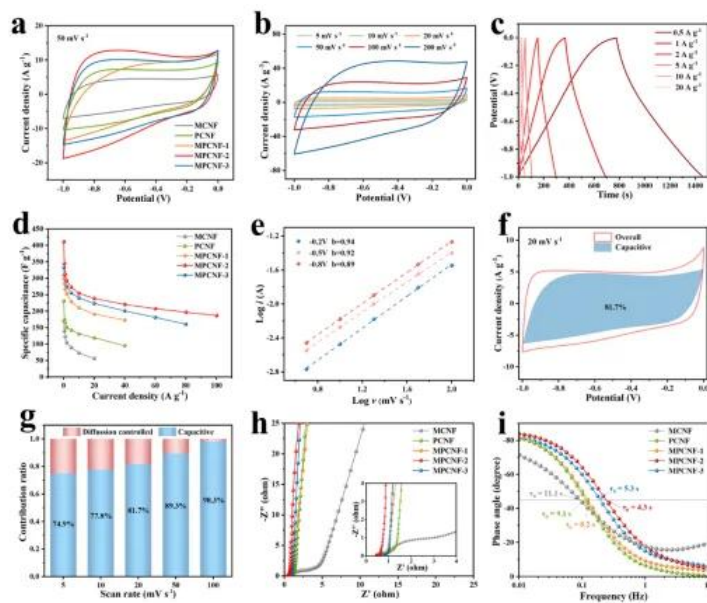


图3：三电极系统的电化学性质评估。(a) 基于CNF的SC在50 mV s⁻¹扫描速率下的CV曲线。(b) 基于MPCNF-2的SC在不同扫描速率下的CV曲线。(c) 基于MPCNF-2的GCD曲线为0.5-20 A g⁻¹ (d) 倍率性能。(e) log i与log v之间的线性关系。(f) MPCNF-2在不同扫描速率下的扩散控制和表面电容控制电容。(g) 不同扫描速率下，扩散电容与表面电容贡献的比例。(h) 奈奎斯特图。(i) 相角与频率关系图。

所得的MPCNF-2在0.2 A g⁻¹的电流密度下，提供了高达411 F g⁻¹的卓越比容，优于MCNF (171 F g⁻¹)、PCNF (231 F g⁻¹)、MPCNF-1 (303 F g⁻¹) 和MPCNF-3 (332 F g⁻¹)。值得注意的是，即使在100 A g⁻¹的高电流密度下，MPCNF-2的电容仍保持在187 F g⁻¹的高水平，凸显了其作为超高速电极的巨大潜力。对于大多数碳基电极，电流密度增加会导致比电容迅速下降，因为电解质离子无法在更高电流密度下完全进入孔隙位，从而减少双电层电容的贡献。

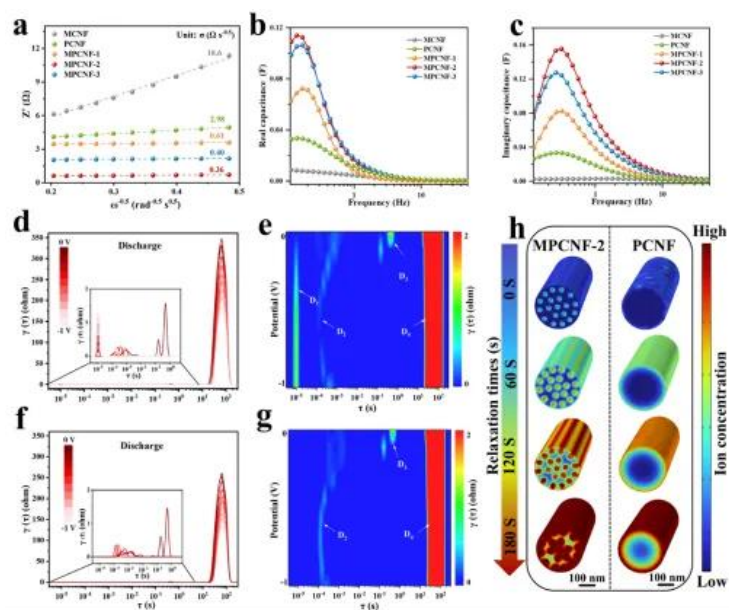


图4： (a) Z' 与 $\omega^{-0.5}$ 之间的关系。 (b) 实电容 和 (c) 虚电容值与频率关系图。 (d-e) 基于PCNF和 (f-g) MPCNF-2的SCs放电过程DRT图。 (h) PCNF和MPCNF-2有限元模拟下的 K^+ 浓度分布。

为进一步阐明MPCNF-2在电容存储中的优势，进行了COMSOL模拟，整合离子扩散系数、形态和碳材料尺寸等因素，可视化CNF结构单元内离子的传输过程（图4h）。结果表明，PCNF的固体结构受限于有限的离子交换界面和低离子扩散系数。在180秒的放松时间内，电荷储存空间相对较低，只有近表面被有效利用。相比之下，在同一弛豫时间内，电解质与电极之间的多重界面，加上高扩散系数，促进了 K^+ 的全局扩散。这一现象与DRT分析结果一致，表明空间结构和孔隙度的双重优化可以显著增强碳的离子扩散动力学。

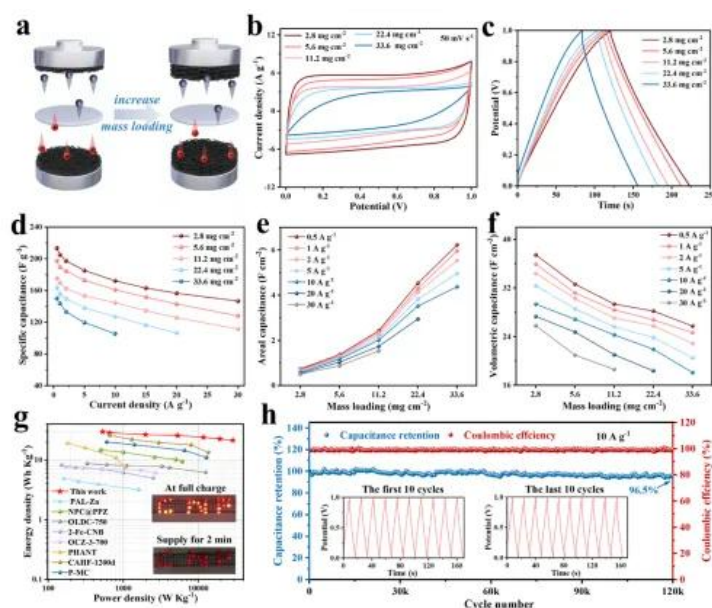


图5：(a) 对称SC的示意图。(b) MPCNF-2在50 mV s⁻¹下不同质量载荷下的CV曲线。(c) MPCNF-2在1 A g⁻¹下不同质量载荷下的GCD曲线。(d) 倍率性能曲线。(e) 基于MPCNF-2的SC的面积电容和(f) 体积电容。(g) 能量密度与功率密度比较的 Ragone 图。(h) MPCNF-2在10 A g⁻¹下的长周期性能。

制备的开放空心多通道纳米结构的三维自支撑CNF网络，有望提升电解质穿透性和电荷转移，带来高质量载荷性能。MPCNF-2在质量负载2.8 mg cm⁻²时，峰值比电容为213.6 F g⁻¹，且当电流密度增加到10和30 A g⁻¹时，电容仍保持在0.5 A g⁻¹测量值的80.7%和68.5%。这种导电网络具有优异的厚电极适应性，有助于碳基电极在如此高质量负载下的高效利用，展现出显著的实际应用潜力。在商业级电极质量负载（11.2 mg cm⁻²）下，基于MPCNF-2的SC在功率密度528.8 W kg⁻¹下，能提供29.7 Wh kg⁻¹的能量密度，即使在超高功率输出28.7 kW kg⁻¹下也能保持稳定的能量输出。

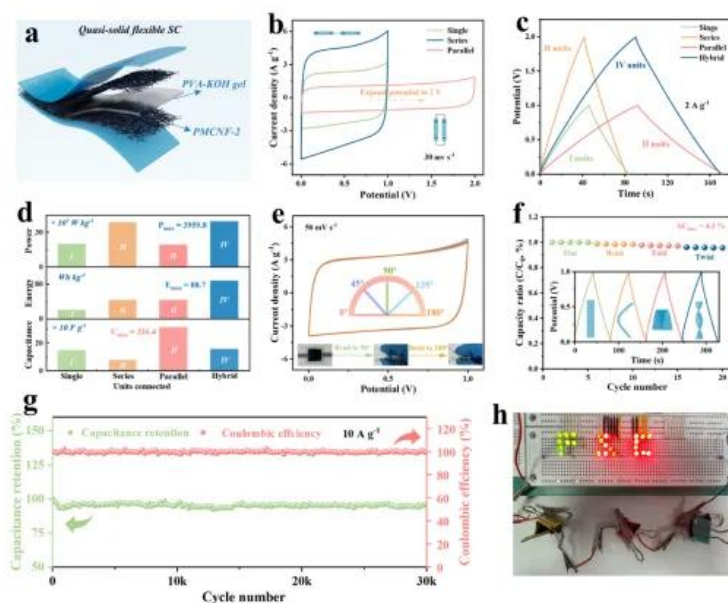


图6：(a) 柔性全固态SC的结构图。(b, c) 单个SC和两个单元串联并联的CV曲线及GCD曲线，以及 (d) 超级电容器在不同组合下的电容、能量密度和功率密度，电流为2 A g⁻¹。(e) 柔性SC在不同弯曲角度下的CV曲线。(f) 柔性SC在不同机械变形下的电容保持比。插图展示了电流密度为2 A g⁻¹时对应的GCD曲线，并附有各种机械变形的示意图。(g) 长周期测试，频率为10 A g⁻¹。(h) 为LED灯供电的柔性SCs的图片。

为了进一步提升MPCNF-2电极的实用性，用PVA/KOH凝胶电解质组装SC进行评估。结合MPCNF-2电极本身的柔韧性，组装后的器件展现出优异的机械顺应性和电化学稳定性，同时适应多种机械变形模式。如图6e所示，柔性对称SC的CV曲线在0°-180°的弯曲角范围内基本保持不变，对应的GCD曲线在变形下几乎重叠，显示了该器件卓越的机械稳定性。本研究通过静电纺丝、相分离、配位化学和原位模板的结合，获得具有梯度多孔结构的多通道CNF。通过凝胶电解质的耦合，使柔性固态超级电容器受益，实现了更高的机械柔韧性和更高的电容，展现了巨大的实用潜力。



Multi-channel carbon nanofibers with enhanced ion diffusion and ultra-stability for flexible supercapacitors at commercial-scale mass loading

Guangjie Yang ^{a, b, 1}, Yulong Yang ^{a, 1}, Jian Song ^a, Zhenye Yin ^a, Qian Zhang ^a, Zhenlu Liu ^a, Haoqi Yang ^c, Min Ru ^a, Shaochun Tang ^b, Shuijian He ^a

Show more

+ Add to Mendeley Share Cite

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.175039>

Get rights and content

信息来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/me92mpVFkeciBHVtZgLNQ>

【行业资讯】

湖南科技大学：受棉花糖启发的多孔碳材料，用于超级电容器

1.成果简介

由于纳米多孔碳电极固有的复杂性及其表征难度，制定明确的设计策略以提升超级电容器性能仍是一项挑战。本文，湖南科技大学欧阳田副教授（校聘）、南京理工大学马宏飞副教授等在《Langmuir》期刊发表名为“Cotton Candy-Inspired Porous Activated Carbon via Molten Salt-Shielded Synthesis in Air and Its Application in Supercapacitors”的论文，研究受蔗糖制备棉花糖的启发，我们制备了一种由自组装纳米颗粒组成的独特多孔碳材料。

碳前驱体通过使用棉花糖机离心蔗糖溶液制备而成。随后，采用低熔点共晶盐混合物（ ZnCl_2 / KCl ）作为保护层，在空气氛围下通过低温碳化直接合成了源自棉花糖的活性炭

(CAC)。所得CAC不仅具有 $1976\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ 的大比表面积，还含有7.89原子%的高氧含量，分别能提供充足的活性位点并引入赝电容。此外，碳的无序程度与电容呈正相关，拉曼光谱分析表明，碳无序程度越高，电容表现越强。所设计的CAC电极在 1 A g^{-1} 的电流密度下展现出 338 F g^{-1} 的高比电容，并在20,000次循环后仍保持良好的循环稳定性（94.4%的容量保持率）。此外，CAC//CAC对称超级电容器能量密度达 20.3 Wh kg^{-1} ，循环稳定性良好，在20 000次循环（ 2 A g^{-1} ）后仍保留94.6%的初始电容。我们的研究成果为通过调控碳电极的无序度来开发高能量密度超级电容器提供了新途径。

2. 图文导读

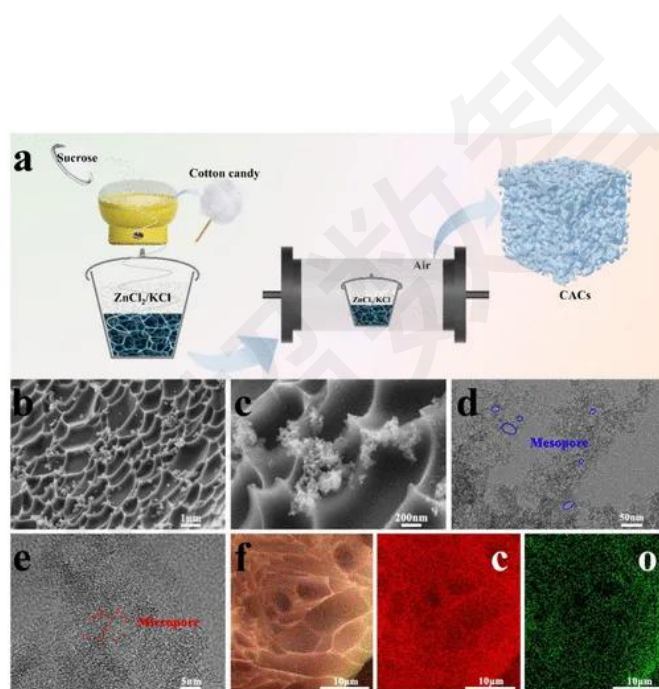


图1. (a) Schematic illustration of the formation of CACs. (b and c) SEM images of CAC-600-2. (d) TEM and (e) HRTEM images of CAC-600-2. (f) EDS elemental mapping of C and O for CAC-600-2.

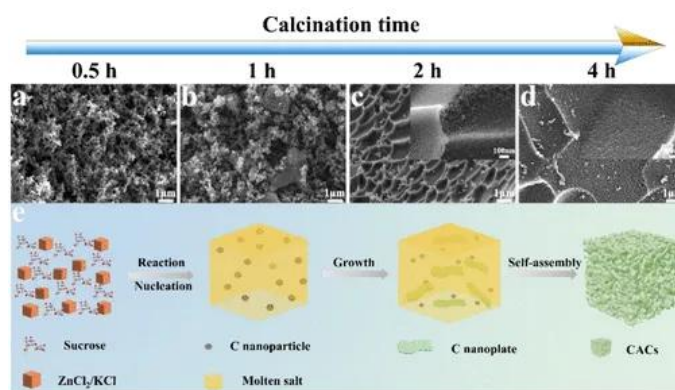


图2. SEM images of (a) CAC-600-0.5, (b) CAC-600-1, (c) CAC-600-2, and (d) CAC-600-4. (e) Schematic diagram of the formation process.

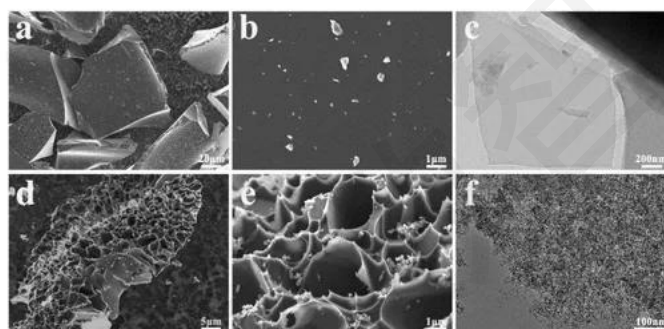


图3. SEM and TEM images of (a–c) S-600-2 and (d–f) SAC-600-2.

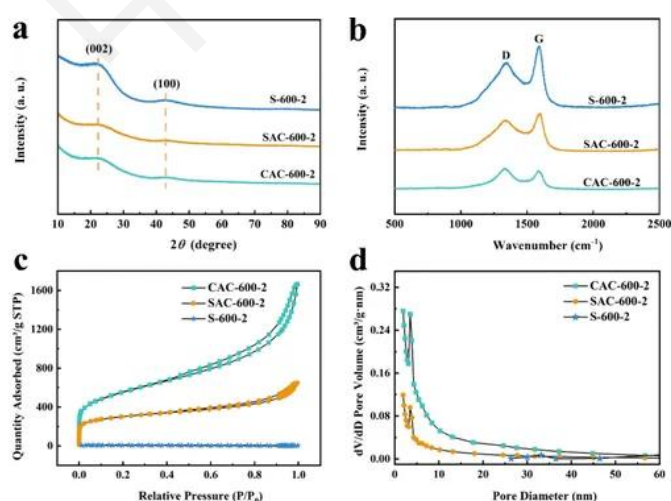


图4. (a) XRD patterns, (b) Raman spectra, (c) N₂ adsorption–desorption isotherms, and (d) pore distributions of S-600-2, SAC-600-2, and CAC-600-2.

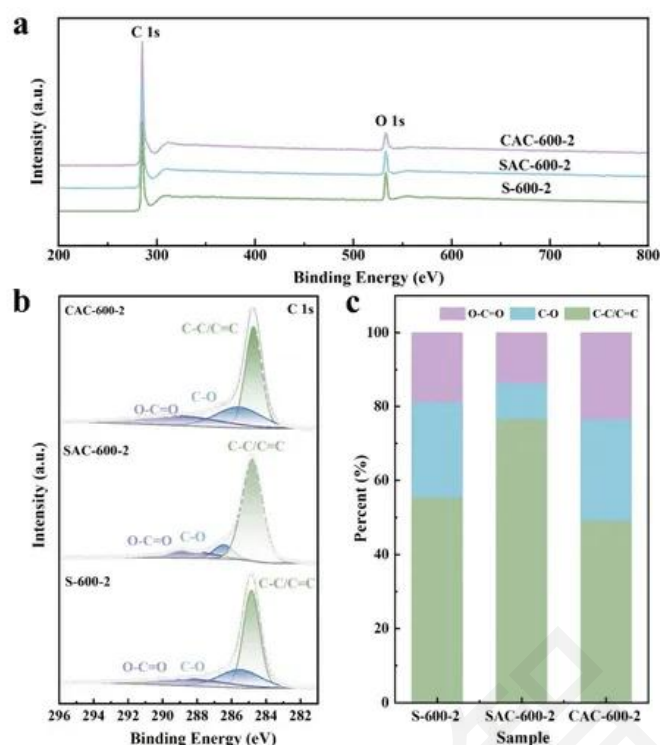


图5. (a) XPS survey spectra, (b) high-resolution XPS spectra of C 1s, and (c) contributions of components in C 1s spectra (%) of S-600-2, SAC-600-2, and CAC-600-2.

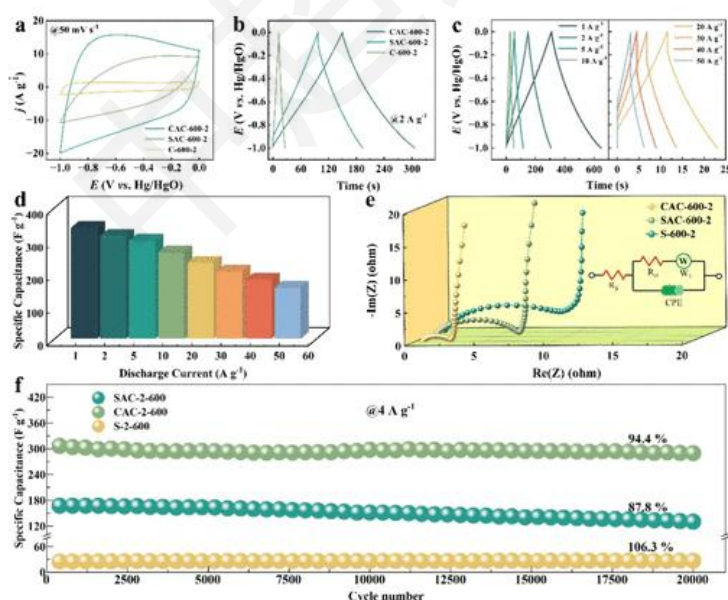


图6. Electrochemical performance of as-prepared carbon materials in a three-electrode system: (a) CV curves at 50 mV s⁻¹, (b) GCD curves at 2 A g⁻¹, (c) GCD curves of the CAC-600-2 electrode at various current densities, (d) specific capacitance of CAC-600-2 vs current density, (e) EIS of S-600-2, SAC-600-2, and CAC-600-2, and (f) cycling stability of the S-600-

2, SAC-600-2, and CAC-600-2 electrodes after 20 000 cycles.

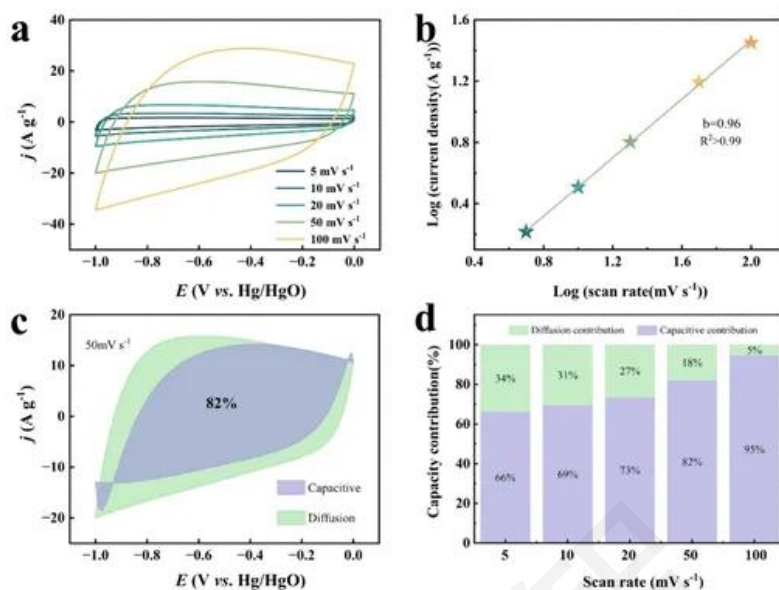


图7. (a) CV curves of CAC-600-2 at various scan rates. (b) Determination of b values. (c) Capacitive and diffusion-controlled contributions at 50 mV s⁻¹. (d) Capacitance contributions at various scan rates.

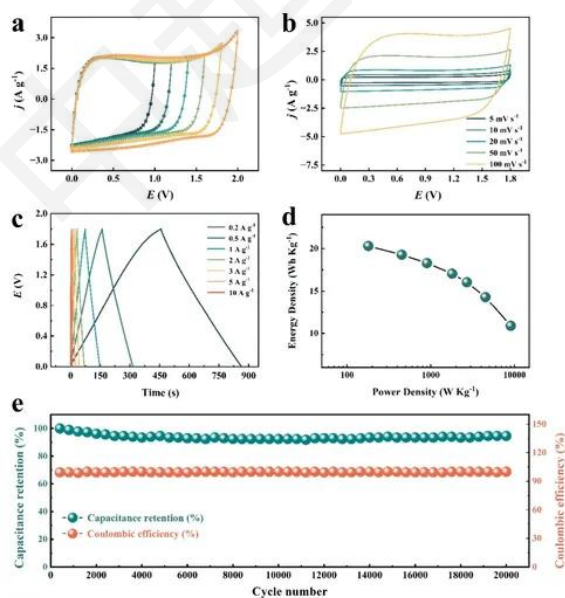


图8. Electrochemical characterization of the CAC-600-2//CAC-600-2 symmetric supercapacitor in a two-electrode system: (a) CV curves at incremental voltage windows, (b) CV curves at different scan rates, (c) GCD curves at different current densities, (d) Ragone

plots, and (e) cycling stability at 2 A g⁻¹ for 20 000 cycles.

3.小结

本研究提出了一种利用熔盐屏蔽法在空气中从棉花糖合成活性炭的策略。优化的CAC-600-2电极展现出优异的电容性能, 在1A g⁻¹和50A g⁻¹下分别达到338和155F g⁻¹, 并具有良好的电化学稳定性, 经20,000次循环后仍保持94.4%的电容。此外, CAC-600-2//CAC-600-2对称超级电容器实现了20.3 W h kg⁻¹的卓越能量密度, 并具有出色的循环稳定性。这些结果表明, 熔盐屏蔽合成法能够同时调控物理多孔结构和化学环境, 证实了这些理化参数对提升电容性能至关重要。更具体而言, 更大的比表面积、更高的氧官能团含量以及更显著的无序性均对电容性能产生积极影响。因此, 这一简单且低成本的工艺在制备适用于电双层电容器应用的环保型高性能电极方面具有广阔前景。

文献: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c06657>

Langmuir > ASAP > Article

Subscribed

Cite Share Jump to Expand

ARTICLE | March 19, 2016

Cotton Candy-Inspired Porous Activated Carbon via Molten Salt-Shielded Synthesis in Air and Its Application in Supercapacitors

Xueling Jiang, Jiahuan Zhao, Jingqi Song, Hongfei Ma*, and Tian Ouyang*

信息来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/LrhgGJ8EER6u61GyVUc>