



超级电容产业周报

2026年5月 第2期

- 中国节能首个磷酸铁锂电池与超级电容相结合的混合储能电站项目成功入库
- 海南佳正万宁200MW/350.42MWh混合储能独立调频电站项目正式开工
- 思源清能三大标志性静调项目相继成功投运
- 河北饶阳磷酸铁锂+超级电容混合储能电站拟招标
- 江浩电子申请超级电容器电芯及电容器专利,提升了电容器在频繁急加速和能量回收的重载场景下使用的安全性能
- 海外首秀启新程! 今朝时代亮相西班牙 OCP EMEA Summit 2026
- 锚定超级电容核心技术,金时科技以全产业链自主可控开辟储能价值竞争新赛道
- 西南交通大学杨维清团队JEC:告别“蛮力”氟化!二氟卡宾接枝策略温和重构多孔碳表面特性,引领下一代高功率超级电容器发展
- 北京理工大学《自然·通讯》:仿生微型超级电容器:力学激活的电化学植入物为肠道伤口愈合提供新方案

【行业动态】

中国节能首个磷酸铁锂电池与超级电容相结合的混合储能电站项目成功入库

近日，山西省能源局《关于印发2026年第一季度新型储能项目库调整清单的通知》，中节能壶关县100MW/105MWh混合储能项目成功入列山西省新型储能项目库，成为中国节能首个磷酸铁锂电池与超级电容相结合的混合储能电站项目。

中节能壶关混合储能项目位于山西省长治市壶关县黄山乡，建设规模为50MW/100MWh磷酸铁锂电池与50MW/5MWh超级电容相结合，其中磷酸铁锂电池具有优良的充放电循环性能，其年充放电次数可达500次以上；超级电容则拥有毫秒级响应特性，主要应用于电网一次调频场景。

自山西省启动新型储能项目申报工作以来，风电西中区域公司按照《新型储能规模化建设专项行动方案（2025—2027年）》以及山西省能源革命综合改革试点部署安排，全力推进壶关县新型储能项目开发，着力推动混合储能技术应用及市场化运营实现新突破，最终成功列入省级新型储能项目库。

未来，风电西中区域公司将持续巩固技术优势，扎实推进项目建设，力争将其打造为山西省混合储能示范工程，为山西省构建新型电力体系，助力能源强国建设贡献力量。

新闻介绍：

近日，山西省能源局《关于印发2026年第一季度新型储能项目库调整清单的通知》，中节能壶关县100MW/105MWh混合储能项目成功入列山西省新型储能项目库，成为中国节能首个磷酸铁锂电池与超级电容相结合的混合储能电站项目。

来源: <https://cn.solarbe.com/news/20260507/50022613.html>

【行业动态】

海南佳正万宁200MW/350.42MWh混合储能独立调频电站项目正式开工

4月30日，海南佳正万宁200MW/350.42MWh混合储能独立调频电站项目开工仪式在兴隆区举行。万宁市委常委、副市长刘超，副市长沈德安等领导嘉宾出席活动并共同挥铲为项目奠基培土。



作为万宁市重点项目，该项目由海南佳正新能源有限公司投资建设，位于兴隆区43队，用地总面积约40亩，总投资不少于5亿元，将建设一座以锂电池储能材料为主的独立储能电站，同步建设220kV储能升压站、输电线路及附属配套设施。项目总装机规模200MW/350.42MWh，依托清华大学科研团队在储能系统集成与控制领域的前沿技术，

并携手大全集团重庆泰来公司作为核心设备合作厂家，**采用其提供的高性能储能变流器与系统解决方案，确保项目技术领先性与设备可靠性。项目建成后将有效提升区域电网调峰调频能力，为海南清洁能源岛建设和新型电力系统构建注入强劲绿色动能。**

“项目采用‘电池+超级电容’技术，创新配置了25MW/60秒超级电容系统。这一技术组合使电站具备高效调频支撑电网稳定、削峰填谷保障周边用电、促进新能源消纳助力绿色转型三大核心功能，可显著提升万宁区域电网的频率稳定性，降低新能源并网波动风险，有效缓解供电压力，为周边企业和居民提供可靠电力保障。”海南佳正新能源有限公司总经理胡成洋介绍。



据介绍，储能作为新型电力系统的“稳压器”和“充电宝”，对提升电网灵活性、保障能源安全具有不可替代的作用。自项目筹备以来，万宁市相关部门在用地保障、行政审批等方面主动靠前服务，积极协调解决项目推进中的堵点难点问题，严格按程序完成项目建设工程设计方案批前公示，有力保障了项目合法合规、有序推进，为项目落地建设创造了良好的营商环境。

海南佳正新能源有限公司董事长黄前飞表示，公司将以高标准、高质量推进项目建设，力争早日建成投产，以新质生产力赋能区域高质量发展，为海南自贸港清洁能源产业

发展贡献力量。

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/73ZXeBp13HEyZHPOBFDkgA>

【行业动态】

思源清能三大标志性静调项目相继成功投运

中国储能网讯：由思源清能自主研发的静止同步调相机（SSC），凭借国内首创的“双星型 MMC+集中式超级电容分簇式管理”技术路线，为构网型设备开辟了全新的技术范式。近期，三大标志性项目相继成功投运，不仅在实践中验证了思源构网技术的前瞻性，更全方位彰显了我们在复杂、极端工况下提供高性能、高可靠解决方案的创新引领性。

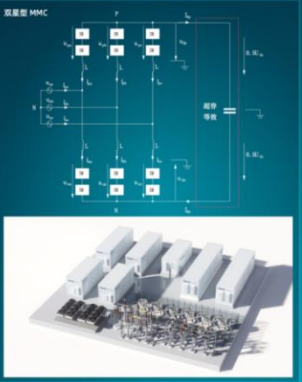
静止同步调相机 SSC 解决方案

静止同步调相机 (Static Synchronous Condenser, SSC)，基于双星型拓扑架构及高密度功率型储能元件，采用先进的构网技术，对外特性比扇分布式调相机，具备快速无功和恒量有功支撑能力，能够有效提升频率与电压稳定性。

- 双星型 MMC 拓扑。
- 交直流解耦，超级电容利用率高，占地小。
- 直流侧 0 电压启动，启动全过程可控，无冲击，启动电阻无特殊设计。
- 功率模块冗余配置，且均配置高速旁路开关，可快速在线隔离故障模块，运行稳定性与可靠性高。
- 电压、频率变化“零延时”响应，可提供秒级有功支撑。
- 设备整体损耗低，循环寿命长。

Sieyuan 思源清能

双星型 MMC



Sieyuan Qingneng Electric & Electronics Co., Ltd.

/ 10

01

华能澜沧江项目

南网区域首套，攻克高海拔高湿技术禁区

项目位于小湾水新一体化基地凤庆片区顺宁汇集站，系南方电网区域成功投运的首台套静止同步调相机（SSC），标志着**我国在提升新能源接入电网主动支撑能力方面取得重要技术突破**。面对云南凤庆片区高海拔、常年湿度超85%且多雾凝露的严峻考验，设备采用双星型拓扑与构网型控制技术，实现了从“被动适应”向“主动支撑”的质变。通过快速无功与惯量支撑，显著提升区域短路比，为远距离绿电的安全高效送出筑牢了技术底座。



02

华润电力宁夏项目

SSC+构网型储能协同创新

该项目开创性地将20Mvar SSC与构网型储能系统协同部署，针对宁夏地区新能源高渗透率、弱电网支撑不足的痛点精准发力。通过技术深度融合，有效增强了系统运行稳定性和短路比，并具备关键的黑启动支撑能力。这种“SSC+构网型储能”的联合运行新模式，**为高比例新能源电力系统的安全稳定运行提供了极具参考价值的示范样板。**



03

国家能源青海项目

4000米巅峰攻坚，淬炼高可靠性

项目位于**海拔4000米以上的雪域高原**，面对**-35℃极端低温及空气稀薄**对设备绝缘、散热带来的双重挑战，思源清能通过深度优化绝缘爬电距离与散热冗余设计，确保了SSC在极端高寒工况下的稳健运行与可靠启动。该项目的成功投运，**显著增强了青海果洛弱电网的支撑强度，以硬核技术淬炼出极端环境下的卓越可靠性。**



持续深耕技术，助力新型电力系统建设，三大标杆项目的成功实践，充分验证了思源SSC技术在

不同极端工况下的普适性与可靠性。未来，思源清能将持续深化技术创新，提供更高效、更可靠的系列化解决方案，为国家“双碳”战略的加速落地以及绿色、稳定的新型电力系统建设贡献核心力量。

信息来源：<https://www.escn.com.cn/news/show-2250095.html>

【行业动态】

河北饶阳磷酸铁锂+超级电容混合储能电站拟招标

5月6日，**河北省衡水市饶阳县饶阳建投储能科技有限公司10万千瓦独立储能试点项目招标计划公示。**

本次公示项目的建设单位为饶阳建投储能科技有限公司，项目落地于河北省衡水市饶阳县，核心建设内容为一座独立混合储能电站，具体包含**90MW/360MWh电化学储能与10MW/30s超级电容储能两大板块，装机容量明确为90MW/360MWh磷酸铁锂储能搭配10MW/30s超级电容储能。**

项目同步配套新建一座220kV升压站及其附属设施，升压站将新建1回220kV出线接至河北省沧州市肃宁县境内的220kV靖宁站220kV侧，新建送出线路暂定长度约13.3km，最终线路长度以实际建设为准，项目总占地面积约40亩。

根据公示披露的信息，该项目预计于**2026年5月发布正式招标公告**，建设单位已出具相关意见。

信息来源：https://news.sohu.com/a/1012788760_114984

【行业动态】

江浩电子申请超级电容器电芯及电容器专利，提升了电容器在频繁急加速和能量回收的重载场景下使用的安全性能

国家知识产权局信息显示，**深圳江浩电子有限公司**申请一项名为“**一种超级电容器电芯及电容器**”的专利，公开号CN122000209A，申请日期为2025年12月。

专利摘要显示，本发明公开了一种超级电容器电芯及电容器，电芯包括内层电解纸、正极铝箔、中间层电解纸以及负极铝箔；其中，所述正极铝箔包括有正极基层铝箔、以及正极纯铝层；所述负极铝箔包括有负极基层铝箔、以及负极纯铝层；所述正极纯铝层与所述负极纯铝层的延伸方向相反；所述正极基层铝箔的厚度大于所述正极纯铝层厚度，和/或所述负极基层铝箔的厚度大于所述负极纯铝层厚度。**本发明超级电容器电芯及电容器可大大提升电流的载流能力和电容器的充放电功能，进而提升了电容器在频繁急加速和能量回收的重载场景下使用的安全性能。**

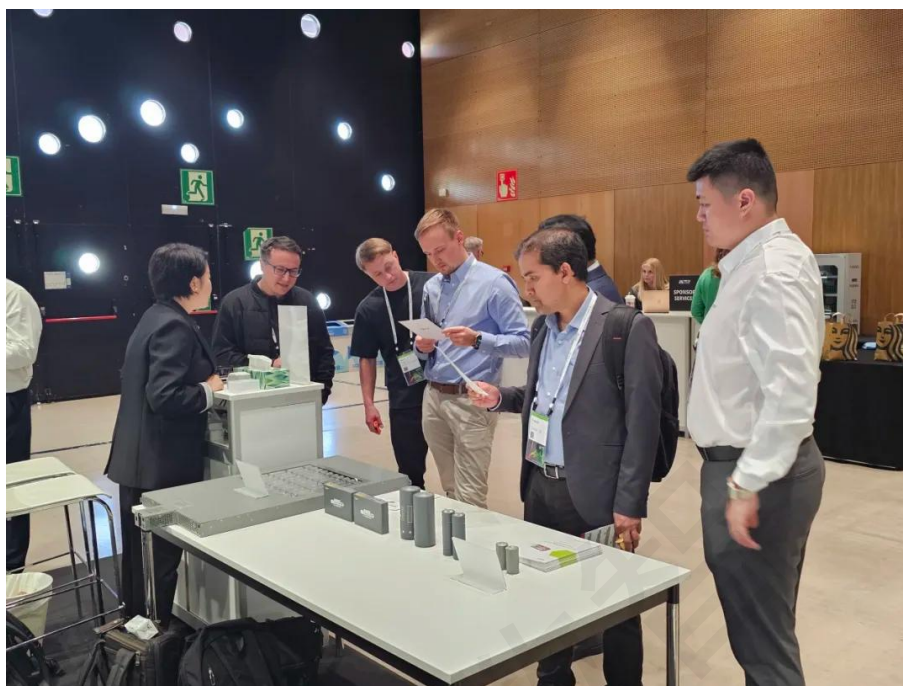
信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/1Pr14kAIDW45pfcak7GOxw>

【行业动态】

海外首秀启新程！今朝时代亮相西班牙 OCP EMEA Summit 2026

4月29-30日，**OCP EMEA Summit 2026** 在西班牙巴塞罗那国家会议中心举办，作为全球开放计算领域的顶级行业峰会，吸引了全球智算数据中心企业与专业人士齐聚参会。

今朝时代作为本次参与峰会的唯一超级电容器企业，携3.0V 300F全球领先超低内阻超级电容单体亮相A6展位，面向欧洲、中东与非洲市场，为 AI 智算中心提供优势产品与CBU解决方案。



当前AI智算中心普遍面临瞬时功率峰值冲击、电压波动不稳、电源切换延迟等难题，传统方案难以适配高算力场景的稳定运行需求。**今朝时代3.0V 300F新一代超级电容单体凭借低于0.4mΩ的超低内阻，可实现超过300W/inch³的超高功率密度，远超行业同类产品，为打造更高功率密度、更高效的CBU提供强劲支撑。**



3.0V 300F超级电容可批量集成于CBU系统，基于OCP标准19英寸1U机架尺寸，系统可实现60kW峰值功率输出与≥97%系统转换效率，高效承接算力负载突变，为AIDC智算中心提供高功率、快响应、高效率的稳定保障。



面向全球AI算力持续扩容的发展态势，今朝时代将以成熟的超级电容产品能力与技术优势，助力合作伙伴布局智算赛道，精准匹配终端场景供电保障与长效稳定运行诉求，共建适配行业发展的算力

配套生态。



在全球能源技术竞争加剧的背景下，提升储能系统自主创新与产业协作能力至关重要。本次合作汇聚三方优势，共建开放储能生态，旨在系统提升我国储能解决方案的竞争力与产业链效能。这不仅是聚焦电能质量等核心能力的技术实践，更是民营企业以“科技创新、服务至上”理念服务新型电力系统建设的重要体现。未来，三方将持续深化研发、共建平台、拓展场景，共同推进储能数字化创新与标准实践，为我国能源转型提供支撑。

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/7jWNfCz9rXRMs3z45EYuKQ>

【行业动态】

锚定超级电容核心技术，金时科技以全产业链自主可控 开辟储能价值竞争新赛道

2026年5月13日，深圳国际会展中心人潮涌动。**第十八届深圳国际电池技术交流会/展览会（CIBF2026）在此盛大启幕**，作为具有全球影响力的电池与储能行业标杆盛会，本届展会以“链动全球·赋能绿色·驱动未来”为主题，汇聚全球超3000家产业链领先企业。

在这一行业舞台上，四川金时科技股份有限公司（证券代码：002951.SZ，证券简称：金时科技）携超级电容全产业链核心成果重磅亮相，**全球首发行业标杆级液冷超级电容调频舱，同步展出全场景节能系列产品及“超级电容+锂电”复合式储能电站解决方案，以“料—材—器—用”全链条自主可控的硬核实力，向市场清晰传递了企业在新型储能领域的技术深度与战略定力。**

储能产业正经历深刻变革。随着“双碳”目标纵深推进，国家发改委、国家能源局印发的《新型储能规模化建设专项行动方案（2025—2027年）》明确提出，**2027年全国新型储能装机规模将达1.8亿千瓦以上**。行业逻辑已从政策驱动转向市场驱动、从强制配储转向市场化用储，规模扩张的野蛮增长阶段成为过去，**技术为王、价值为本的高质量发展新周期全面开启**。高比例新能源并网带来的波动性、随机性，对电网惯量支撑、调频调压能力提出严峻挑战，常规机组调频能力不足、AGC跟踪精度偏低、设备高频工况下寿命损耗严重等痛点日益凸显。在此背景下，**以超级电容器为代表的功率型储能技术，凭借毫秒级响应、百万次循环寿命、-40℃至65℃的宽温域范围、本质安全的核心特性，正从短时高频补充场景升级为破解电网调频困局的核心技术路径。**

金时科技此次全球首发的液冷超级电容器调频舱，正是瞄准这一行业刚需的精准破局之作。**该产品针对发电端火储调频与电网端独立储能一次调频两大核心场景量身打造，依托企业自研超级电容核心技术，实现了≤20ms的毫秒级极速响应，循环寿命突破百万次。**在发电侧，该调频舱可替代火电深度调频25%以上，降低火电机组机械磨损30%以上、减少调峰幅度40%，从根源上解决了传统调频方案响应滞后、深度调峰不稳、高频工况下设备寿命快速衰减、全生命周期成本偏高的行业痛点；在电网侧，该方案可有效补充电网调节能力、平抑高频频率扰动，将AGC指令跟踪精度提升至≥98%，为电力系统构建坚实的频率安全屏障。这一产品的推出，**不仅标志着金时科技在功率型储能**

系统集成领域的技术突破，更意味着国产超级电容技术在电网级应用层面已具备替代进口、引领行业的竞争力。

如果说液冷超级电容调频舱展现了金时科技在核心单品上的技术高度，那么“超级电容+锂电”复合式储能电站解决方案则体现了企业在系统层面的技术整合能力。当前储能行业长期面临单一技术路线“功率与能量不可兼得”的困局，金时科技打破这一桎梏，实现功率型超级电容与能量型锂电池的优势互补与协同控制。该方案既保留了超级电容毫秒级响应、长循环寿命的特性，又兼顾了锂电池的长时储能能力，可**提升系统整体寿命30%以上，降低全生命周期成本20%以上，完美适配源侧风光波动平抑、网侧调频调压、荷侧峰谷套利、微电网稳定支撑等全场景需求**。此外，企业同步展出的全场景节能系列产品，**以超级电容技术为底层支撑，覆盖工业高耗能产线、轨道交通、数据中心、工商业园区、港口岸电等多元场景，通过冲击负荷平抑、制动能量回收、峰谷智能调节等核心能力，实现≥30%的实测节能率，达成“节能降碳+经济增效”双重目标。**

技术优势的底层支撑，在于金时科技构建的全产业链自主可控体系。目前，企业已形成涵盖核心电极材料基础研发、模组系统集成应用、终端场景深度适配的全产业链闭环，**突破了超级电容核心材料的国产化技术壁垒，实现从原材料到终端产品的全环节自主可控**。这一布局不仅打破了国外企业在核心材料领域的技术垄断，**更使企业在技术研发、成本控制、产品品控、交付响应等维度形成全链条协同，构筑起穿越行业周期的核心竞争壁垒**。在安全技术维度，金时科技将安全作为储能的底层设计而非后置附加项，通过储能系统与消防安全技术的深度融合，实现从本质安全设计到智能预警、前置防护的全链路安全保障，**形成“储能+安全”一体化底层设计。**

面对行业同质化低价竞争的困境，金时科技始终坚守“技术为本、价值为王、安全为基”的核心理念，拒绝跟风式同质化布局，锚定超级电容细分赛道深耕，走出了一条**以全产业链自主可控为根基、以差异化技术路线为核心、以场景价值创造为目标的高质量发展路径**。未来，金时科技表示将持续加大核心材料、系统集成、智能控制等领域的研发投入，深化源网荷储全场景规模化落地，稳步推进全球化布局，重点突破东南亚、中东等政策友好型新兴市场，立志成长为全球领先的超级电容核心技术与新型储能解决方案服务商，为全球能源绿色转型持续贡献中国力量。

信息来源：

https://www.toutiao.com/article/7639386862188069412/?&source=m_redirect

【前沿技术】

西南交通大学杨维清团队JEC：告别“蛮力”氟化！二氟卡宾接枝策略温和重构多孔碳表面特性，引领下一代高功率超级电容器发展

1.引言

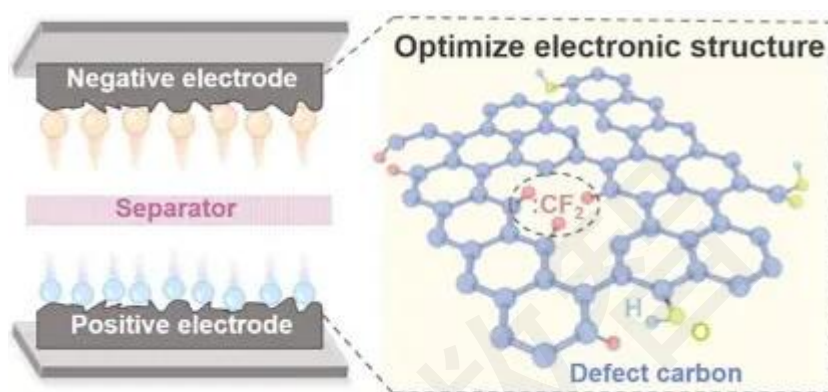
超级电容器的性能核心在于电极材料的微观结构、电子状态与组成。多孔碳因其高比表面积和良好的稳定性，被视为理想的电极材料。利用食品加工副产品——夏威夷果壳制备多孔碳，更是实现生物质高值化利用的可持续途径。然而，生物质多孔碳常面临孔道结构不佳与表面化学特性复杂两大瓶颈，导致离子传输阻力大、电子传导慢，严重制约了器件的功率密度。为此，研究者通常通过构建分级孔结构、实施石墨化处理或引入杂原子掺杂等策略，协同优化材料性能。其中，氟原子因具有最高的电负性，在掺杂后能够形成强极化的C-F键，在调控电荷分布、引入缺陷的同时，较好地保持多孔结构，是一种具有潜力的双功能改性策略。现有氟化方法如等离子体氟化或气相氟化，虽能实现氟的引入，但往往存在反应条件苛刻、选择性差或破坏碳骨架等问题。因此，开发温和、可控且可实现精准修饰的氟化新方法至关重要。

2. 成果

近期，西南交通大学杨维清教授团队提出了一种二氟卡宾接枝策略。该策略通过可控热解聚四氟乙烯，与夏威夷果壳衍生多孔碳发生定向气-固反应，选择性断裂表面C=O键，在消除氧的同时引入C-F键，从而同步优化导电网络与离子传输通道：（i）强电负性氟原子调控碳骨架电子密度分布，增强本征导电性；（ii）可控刻蚀效应将部分微孔转化为介孔，改善孔道构型，促进离子传输。采用该策略制得的F-MNSAC电极在对称型超级电容器中表现出可观的比容量（ $33.63\text{ F g}^{-1}@1\text{ A g}^{-1}$ ）和优异的倍率性能（容量保持率 $86.6\% @50\text{ A g}^{-1}$ ），并实现了 24.1 Wh kg^{-1} 高能量密度与 61.2 kW kg^{-1} 高功率密度的卓越组合。该研究为开发兼具高功率与高能量密度的超级电容器提供了新的

思路。

该论文以“Difluorocarbene Grafted on Carbon for High-Power Supercapacitors”为题发表在Journal of Energy Chemistry期刊上。西南交通大学杨维清教授、冯桂林博士为论文共同通讯作者，顾楷博士与陈珍玉硕士为论文共同第一作者。



3. 图文解读

本工作提出一种二氟卡宾 (:CF₂) 接枝策略, 通过可控热解聚四氟乙烯 (PTFE), 生成小分子氟碳化合物 (C₂F₄, C₃F₆, C₄F₈), 均裂后得到:CF₂, 并与多孔碳发生定向气-固反应。该过程包含三个阶段: (i) 过渡态形成: :CF₂与碳表面C=O基团在亲电-亲核作用下形成四元环状过渡态; (ii) 过渡态分解: 环张力等稳定性因素促使该过渡态迅速分解, 同时释放CO气体分子; (iii) 过渡态重排: 结构重排后, F元素以>C-CF₂形式整合至碳骨架中。该策略同步优化了多孔碳材料的导电网络与离子传输通道。

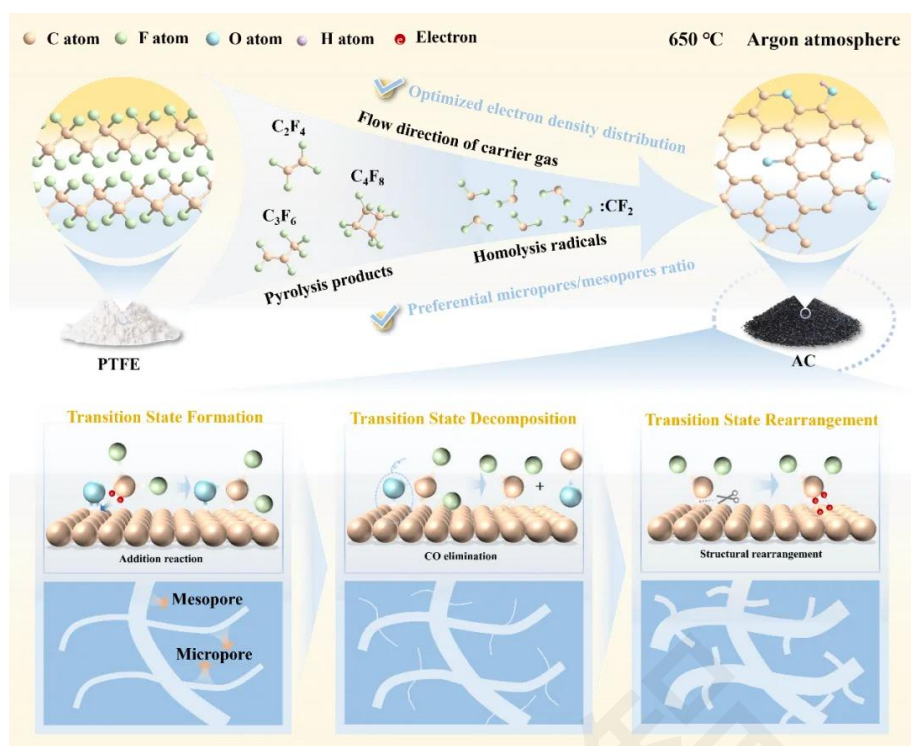


图1. 二氟卡宾接枝策略示意图。

为探究 CF_2 接枝机理，本研究对MNSAC与PTFE混合物进行了TG-MS联用分析，检测到反应过程中CO的生成。结合EDS、FT-IR及XPS等表征手段，证实F原子成功键合至碳骨架，形成以共价C-F键为主的强极性结构。XPS定量分析显示，接枝后C=O含量减少2.12%，C-F含量增加约4.30%，二者比例接近1:2，证实了 CF_2 消耗一个C=O并引入两个F原子的反应路径。

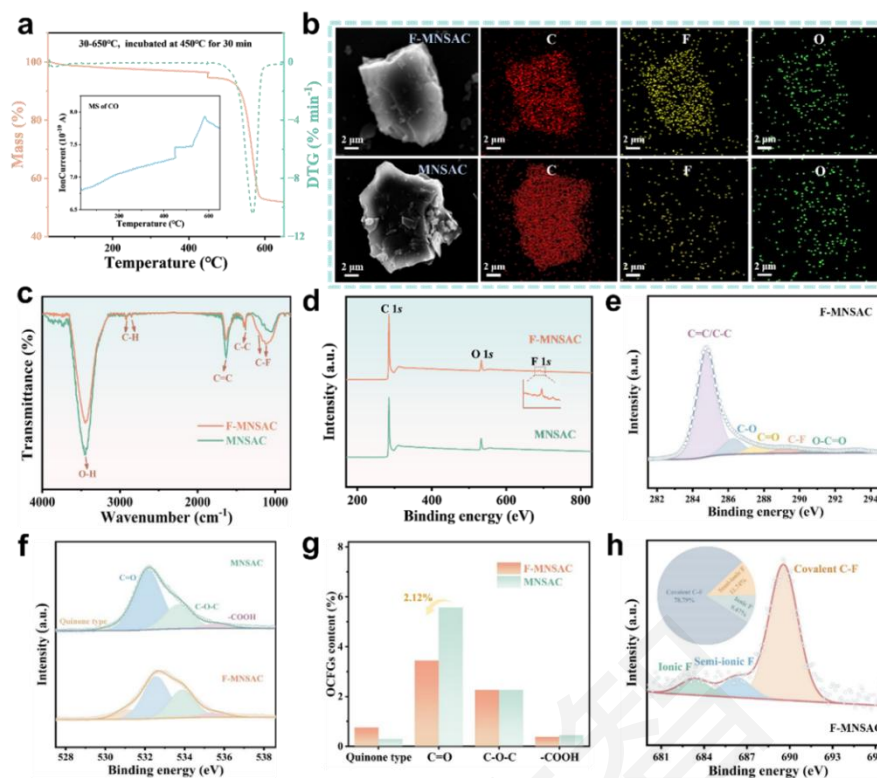


图2. (a) MNSAC与PTFE混合物的TG-MS分析；(b) EDS mapping证实F的成功引入；F-MNSAC和MNSAC的 (c) FT-IR，(d) XPS全谱，(e) 高分辨C 1s谱，(f) 高分辨O 1s谱，(g) 氧官能团定量对比分析，(h) 高分辨F 1s谱。

改性后的F-MNSAC电导率得到提升。XRD与Raman光谱分析显示，:CF₂接枝过程引入了更多结构缺陷，但未对材料的整体导电网络造成破坏。更重要的是，改性后材料的孔隙结构由微孔主导向微-介孔分级结构转变，且比表面积提高至2179.8 m² g⁻¹。这一优化源于活化阶段的造孔效应与接枝过程中CO释放引起的局部刻蚀共同作用，有助于促进离子传输，充分发挥微孔的储能潜力。

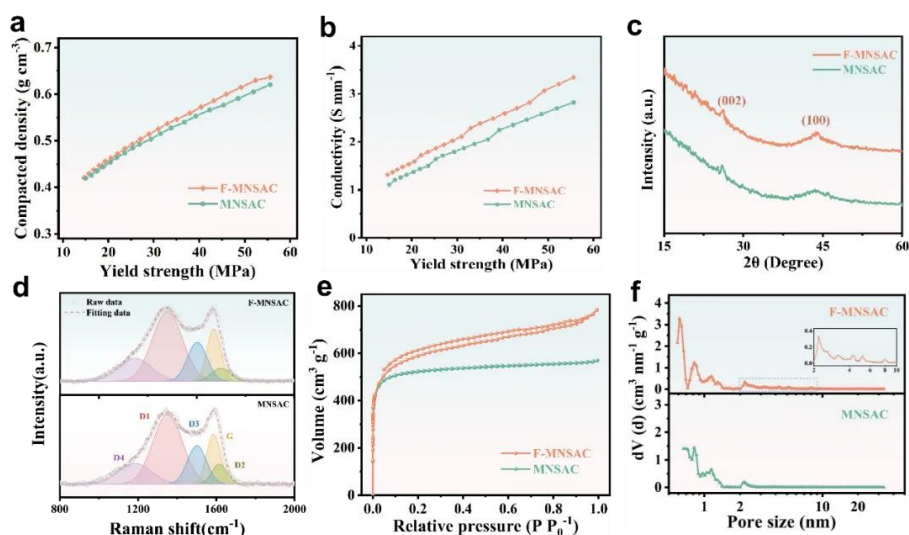


图3. F-MNSAC和MNSAC的结构及物理性质。(a) 粉末压实密度随屈服强度的变化；(b) 电导率随屈服强度的变化；(c) XRD衍射图样；(d) Raman光谱；(e) N₂吸附/脱附曲线；(f) 孔径分布曲线。

以F-MNSAC和MNSAC为电极材料，在有机电解液中构建对称型超级电容器，系统评估其电化学性能。F-MNSAC的CV曲线呈准矩形，无明显氧化还原峰，表明F掺杂后材料的储能机制仍以双电层物理吸附为主。GCD测试结果显示，F-MNSAC在 1 A g^{-1} 下的比容量为 33.63 F g^{-1} ，在 50 A g^{-1} 下容量保持率高达86.6%，显著优于MNSAC。EIS分析进一步证实其电荷转移电阻更低 (0.67Ω)、弛豫时间更短 (0.50 s)，展现出更快的电极动力学响应。该器件实现了 24.1 Wh kg^{-1} 的能量密度与 61.2 kW kg^{-1} 的功率密度的卓越组合，性能优于多数已报道的多孔碳材料。经10,000次循环后，F-MNSAC的容量衰减率仅为11%，表现出优异的循环稳定性。上述性能提升主要归因于接枝改性所带来的导电性增强与离子传输效率改善。

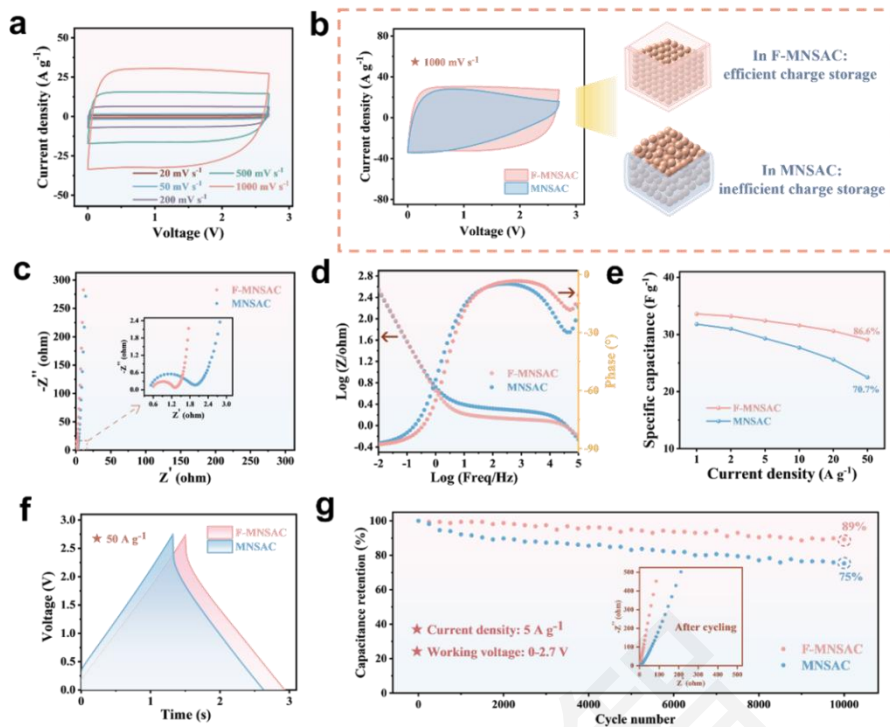


图4. 基于F-MNSAC和MNSAC电极的超级电容器电化学性能。(a) 20-1000 mV s⁻¹扫速下的CV曲线；(b) 1000 mV s⁻¹扫速下的CV曲线；(c) Nyquist图；(d) Bode图；(e) 1-50 A g⁻¹电流密度下的比电容；(f) 50 A g⁻¹电流密度下的GCD曲线；(g) 5 A g⁻¹电流密度下的循环性能。

为揭示性能提升的内在机制，研究结合理论计算与电化学原位红外光谱 (in-situ FT-IR) 进行了深入探究。DFT计算表明，F原子的引入打破了碳骨架原有的电荷分布对称性，诱导电子密度重排，使F-MNSAC对电解液离子的吸附能绝对值显著提升，增强电荷存储效率。In-situ FT-IR进一步揭示了不同电压区间内的离子迁移机制：(i) 在0–1.2 V低压区，溶剂化离子在介孔中富集形成双电层；(ii) 在~1.2 V临界电压处，离子发生去溶剂化并嵌入微孔；(iii) 在1.2–2.7 V高压区，去溶剂化过程为主导，离子持续进入微孔以实现高密度储能。上述多尺度协同效应共同保障了F-MNSAC在高倍率工况下仍能保持优异的电荷存储能力。

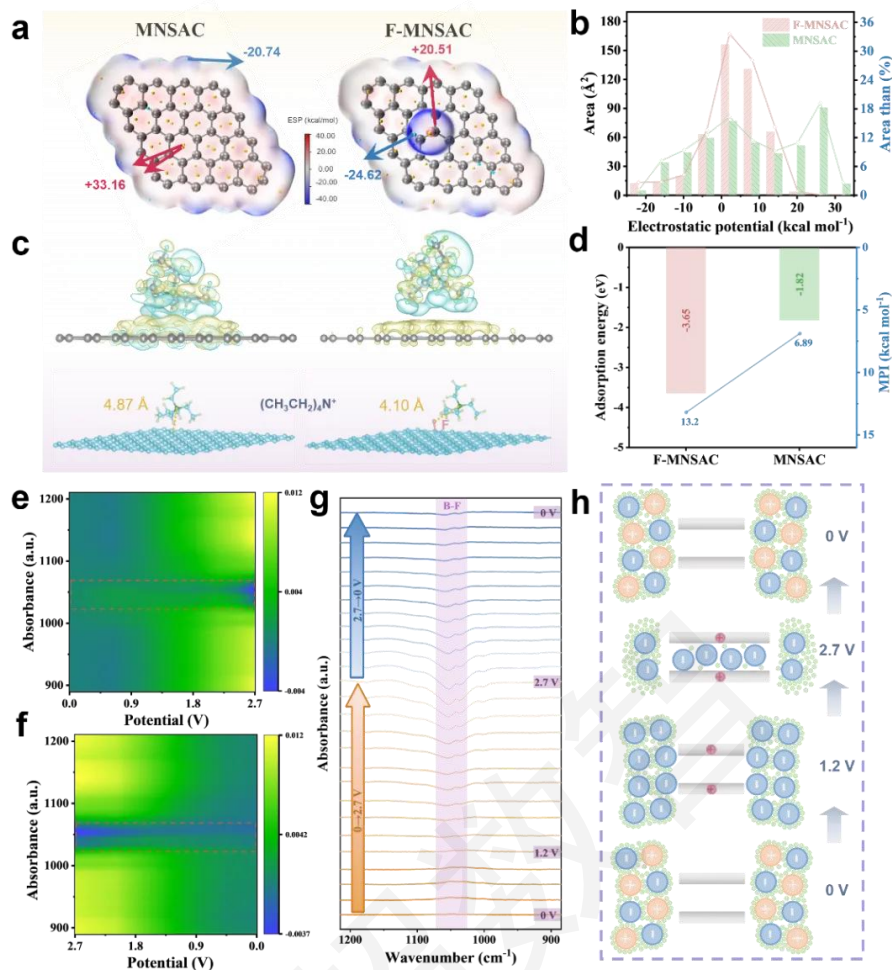


图5. 基于F-MNSAC和MNSAC材料DFT模型的 (a) 静电势图, (b) 表面静电势分布, (c) 电解质离子的吸附模型 (上) 和差分电荷密度图 (下), (d) 吸附能值。基于F-MNSAC原位FT-IR的 (e) 充电阶段等高线图, (f) 放电阶段等高线图, (g) 不同电位下的光谱图, (h) 充放电过程中离子转移机制示意图。

4. 总结

本研究创新性地提出了一种二氟卡宾 (:CF₂) 接枝策略, 用于改性夏威夷果壳衍生多孔碳。高电负性F原子的引入诱导碳骨架电子密度重排, 显著提升材料的本征电导率; 同时, 选择性取代C=O基团过程中释放的CO气体对碳骨架产生可控制蚀效应, 促进部分微孔向介孔转变, 有效优化孔道结构。得益于上述协同改性, 所制备的F-MNSAC电极在对称型超级电容器中表现出优异的电化学性

能。理论计算与In-situ FT-IR光谱进一步揭示了F原子增强离子传输动力学的微观机制。该工作为生物衍生多孔碳的表面化学与孔道结构协同设计提供了新思路。

文章信息

Difluorocarbene Grafted on Carbon for High-Power Supercapacitors

Kai Gu, Zhenyu Chen, Yuxun Yuan, Ting Yang, Yihan Wang, Lei Zhou, Lingchao Wu, Guilin Feng*, Weiqing Yang*

Journal of Energy Chemistry

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2026.03.057>

信息来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/JXf8AohZy3LpioNh2E4rig>

【前沿技术】

北京理工大学《自然·通讯》：仿生微型超级电容器：力学激活的电化学植入物为肠道伤口愈合提供新方案

在生命活动中，生物电信号不仅是细胞兴奋和物质运输的核心调控载体，还在组织修复过程中引导免疫细胞、成纤维细胞和内皮细胞等关键细胞迁移，对机体内在的伤口愈合机制具有重要作用。近

年来，随着对生物电调控再生机制理解的不断深入，能够模拟内源性电信号的植入式微电源被认为是下一代智能生物电子器件的重要发展方向。然而，生物系统具有复杂且动态的结构，给植入式器件带来了长期挑战：它们必须适应多样的形态，同时保持高能量性能并最小化安全风险。特别是在肠道内部伤口愈合（如溃疡或息肉治疗后的恢复）中，常面临愈合延迟、功能恢复不完全和再感染等并发症。尽管体外研究表明，局部微电流刺激可能通过快速电流递送加速组织再生，但这一效应在体内尚未得到验证。在肠道环境中实现有效的局部刺激，还依赖于能适应狭窄、弯曲解剖空间的植入式微能量器件，并能按需提供刺激，在功能寿命结束后自然排出或生物降解，从而避免二次手术取出。

针对狭窄生物体内（如肠道）伤口治疗的空间限制问题，**北京理工大学赵扬教授团队开发了一种高容量的植入式微型超级电容器**。该器件基于由聚乙烯醇框架收缩致密的碳纳米管电极，利用聚乙烯醇离子导电网络在水分蒸发过程中的各向同性向内收缩，导致碳纳米管弯曲变形并产生内部应变，从而激活额外的电化学反应活性表面积。与初始状态相比，电化学反应活性表面积增加了4000倍，其双电层电容比其他报道的碳基材料高出100倍。该植入器件直径仅2.5毫米，在模拟肠液中可提供超过96小时的持续电刺激，并在实验猪模型的狭窄肠道中得到验证，与未处理的伤口相比，愈合率提高了36%-50%。相关论文以“Mechanically-activated electrochemical implantable micro-supercapacitors boosting wound healing in the small intestine”为题，发表在Nature Communications上。

nature communications

[Explore content](#) [About the journal](#) [Publish with us](#)

[nature](#) > [nature communications](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Open access](#) | Published: 09 May 2026

Mechanically-activated electrochemical implantable micro-supercapacitors boosting wound healing in the small intestine

[Wenpeng Wu](#), [Rui Chen](#), [Ying Wang](#), [Bing Lu](#), [Yuhan Zhao](#), [Fei Zhao](#) & [Yang Zhao](#) 

[Nature Communications](#), Article number: (2026) | [Cite this article](#)

研究首先展示了器件的设计理念与结构演化。图1概念性地描绘了植入式器件的要求：在狭窄弯曲的肠道中加速伤口愈合，需要器件具备高能量密度、生物相容性、柔性、长期稳定性和强大供电能力，并揭示了电极材料振实密度与暴露活性面积之间的权衡关系，以及通过聚乙烯醇网络拉紧碳纳米管形成致密复合结构的示意图。

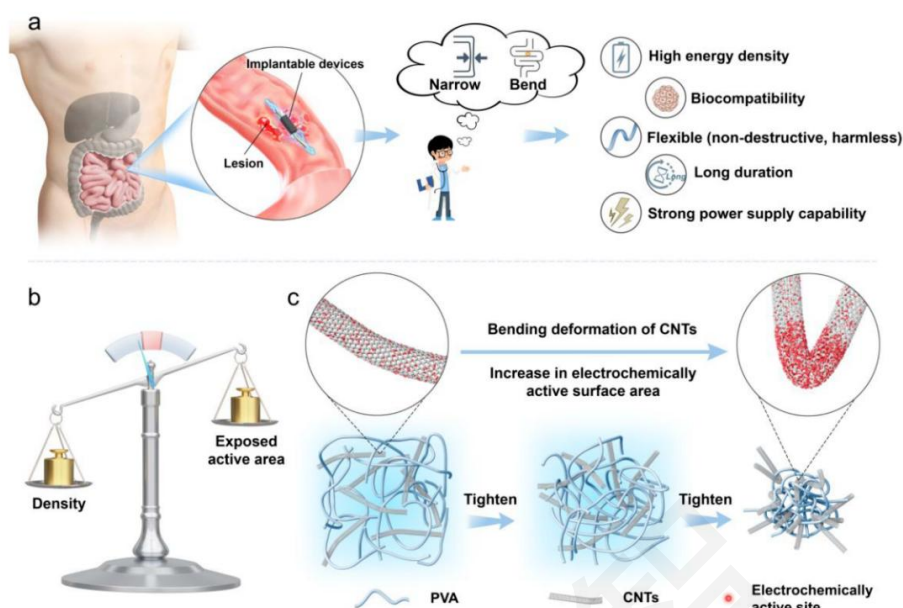


图1 植入式器件的设计概念和示意图 a，用于电刺激促进肠道伤口愈合的植入式器件的设计概念和要求。在狭窄弯曲的肠道中植入微能量存储器件，通过电刺激加速伤口愈合，要求器件具有高能量密度、生物相容性、柔性、长期稳定性和强供电能力。 b，电极材料振实密度与暴露活性面积之间权衡的示意图。 c，通过PVA网络拉紧CNT形成致密PVA/CNT复合结构的示意图。

为了观察电极材料在收缩过程中的结构变化，研究人员制备了聚乙烯醇/碳纳米管水凝胶。图2展示了收缩前后的宏观与微观形貌对比。原始水凝胶（PC0%）具有松散均匀的多孔网络（图2b），最大孔径约20微米；而收缩后（PC80%）体积减少约80%，呈现出紧密堆积的结构，表面因毛细驱动产生起皱（图2c）。截面扫描电镜图像进一步证实，聚乙烯醇在原始网络中均匀包裹在碳纳米管表面（图2d），而在收缩后则形成致密堆积（图2e）。力学测试显示，PC80%的压缩强度达到39.8 MPa，弹性模量为264.9 MPa，比PC0%提升了近60倍（图2f），纳米压痕硬度也提高了两个数量级以上（图2h），证实了收缩带来的结构增强。

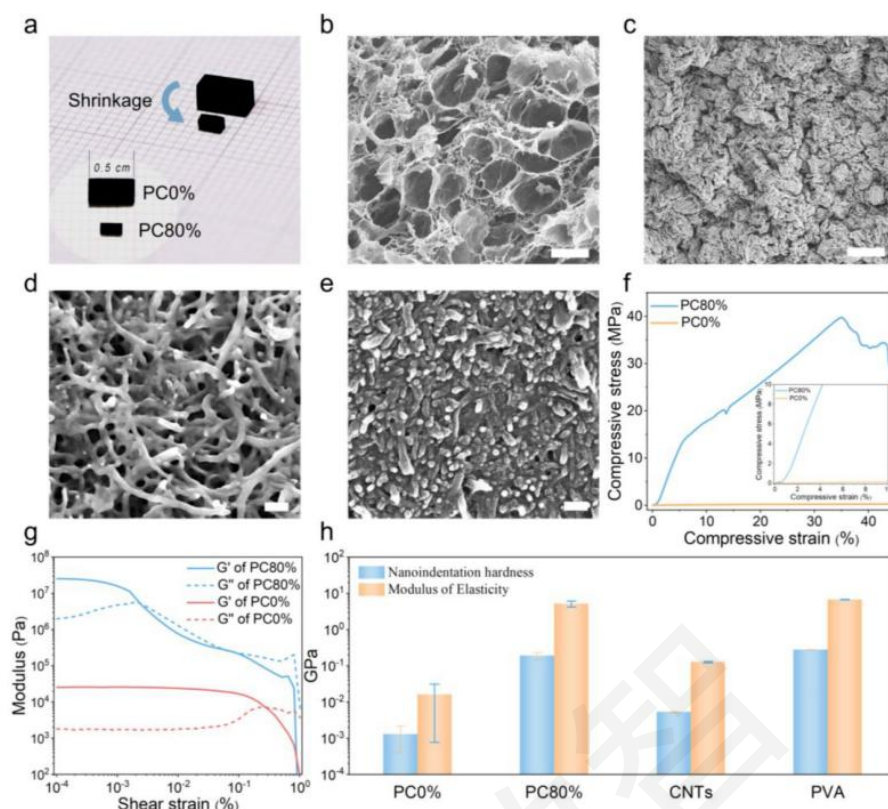


图2 PVA/CNT水凝胶的形貌和结构表征 a, 收缩前(PC0%)和收缩后(PC80%)的PVA/CNT水凝胶电子照片。b和c, PC0%和PC80%的低倍SEM俯视图。比例尺: 20 μm 。d和e, PC0%和PC80%的高倍SEM切片截面图。比例尺: 200 nm。f, PC0%和PC80%的压缩应变-压缩应力曲线。弹性模量通过对插图中弹性区域斜率进行线性拟合确定。g, PC0%和PC80%的剪切应变和模量曲线。h, PC0%、PC80%、CNT和PVA的纳米硬度和弹性模量 ($n = 3$, 误差条: 标准差)。

进一步通过原子力显微镜和光谱技术分析微观应变。图3展示了PC80%的高有序致密形貌 (图3a), 粘附力分布图 (图3b) 和DMT模量图 (图3c) 显示碳纳米管在聚乙烯醇基体中承受显著的机械应力约束。X射线衍射 (图3d) 表明, 随着收缩程度增加, 碳纳米管的(002)峰逐渐右移, 在收缩80%时总偏移 0.79° , 意味着石墨层间距显著减小。拉曼光谱 (图3e) 中G带从 1580.5 cm^{-1} 上移至 1591 cm^{-1} , 证实了C-C键被压缩。透射电镜图像 (图3g-h) 直接观察到了碳纳米管在收缩后的弯曲变形和晶格压缩, 内弯曲处的晶面间距为 0.336 nm , 外弯曲处为 0.337 nm , 均小于原始碳纳米管的 0.347 nm 。

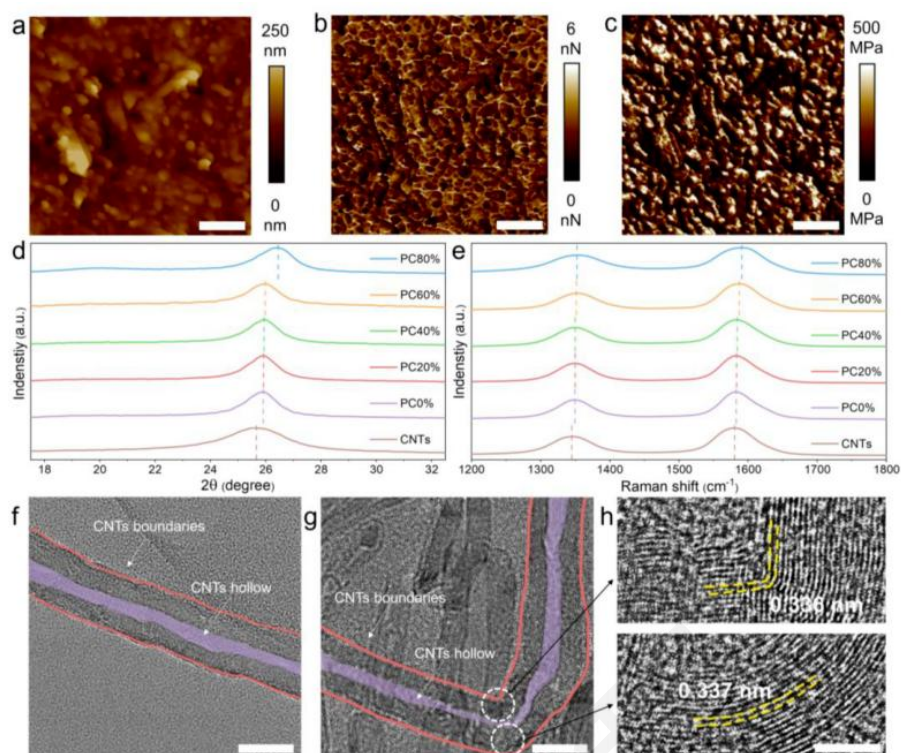


图3 PVA/CNT电极收缩过程的微观结构表征 a, PC80%的表面形貌图。b, PC80%的粘附力分布图。c, PC80%的Derjaguin-Muller-Toporov (DMT)模量分布图 (均在PeakForce QNM模式下)。d, 不同收缩程度的PVA/CNT电极的XRD谱图。e, 不同收缩程度的PVA/CNT电极的拉曼光谱 (激光波长532 nm)。f, CNT的低倍TEM图像。该测量独立重复三次, 获得了相似结果。g, PC80%的低倍TEM图像, 以及h, 对应白色虚线区域的高倍TEM图像。该测量独立重复三次, 获得了相似结果。比例尺: (a-c) 400 nm。 (f, g) 25 nm。 (h) 5 nm。

力学应变对电化学性能的增强机制在图4中得到阐明。收缩过程中电导率持续提升 (图4a), 尤其在PC60%到PC80%阶段跃升近两个数量级。氮气吸附测试显示PC80%的比表面积约为 $81.22 \text{ m}^2/\text{g}$, 几乎是PC0%的三倍 (图4b)。动力学蒸汽吸附表明PC80%的吸附能力比PC0%提高约100% (图4c), 有利于电解液离子渗透。电化学阻抗谱 (图4d) 显示PC80%具有更小的电荷转移电阻和更陡的低频线, 表明离子扩散能力显著增强。计算得到PC80%的电化学活性表面积高达 $1107 \text{ cm}^2/\text{mg}$, 比原始状态增加约4000倍 (图4f)。分子动力学模拟 (图4g-j) 表明, 无论是拉伸还是压缩应变, 都能增强石墨烯对氢原子的吸附能力, 其中压缩应变下Meta位点的吸附能提升近200%, 从理论上解释了应变增强电化学活性的机制。

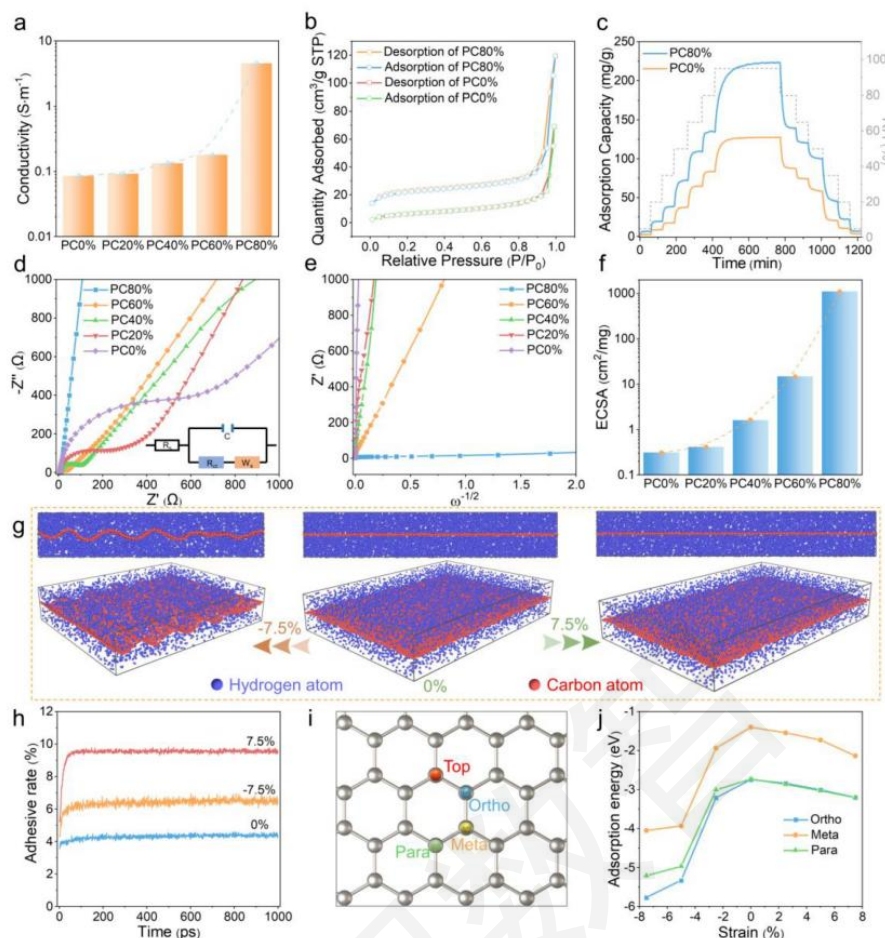


图4 应变诱导PVA/CNT电极的性能及机理分析 a, 不同收缩程度电极的电导率变化图。数据表示为三个平行实验的平均值。 b, PC0%和PC80%的氮气吸附-脱附线性等温线。 c, PC0%和PC80%的动态水蒸气吸附-脱附动力学曲线。 d, 不同收缩程度电极的Nyquist图, R_s 表示串联电阻, R_{ct} 表示电荷转移电阻, W_s 表示扩散电阻。 e, $\omega^{-1/2}$ 与阻抗实部的线性拟合, 斜率对应Warburg系数(σ)。 f, 根据不同收缩程度电极的 C_{dl} 计算得到的ECSA。数据表示为三个平行实验的平均值。 g, 单层石墨烯和氢原子体系的MD模拟模型以及(h) +7.5%拉伸应变和-7.5%压缩应变下氢原子的吸附率。 i, 石墨烯六元环上吸附位点的模型。以Top位点为初始吸附位点, 顺时针方向将第二个吸附位点定义为Ortho (蓝色)、Meta (黄色) 和Para (绿色) 位点。 j, 在不同拉伸和压缩应变下, 氢原子在各吸附位点的吸附能。

基于上述优异性能, 研究团队组装了微型超级电容器。图5展示了器件的组装与电化学性能。单个微型超级电容器面积仅约 1.8 mm^2 (图5b), 在PVA- H_2SO_4 凝胶电解质中, 体积比电容高达

56.5 F cm⁻³ (图5e), 标准化双电层电容比其他碳纳米管和石墨基微型超级电容器高出100倍 (图5f)。当体积功率密度为25 mW cm⁻³时, 能量密度达到7.8 mWh cm⁻³ (图5h)。经过10,000次循环后, 电容保持率稳定在94%, 库仑效率接近100% (图5i)。采用生物相容的LiCl电解质后, 器件仍表现出51.2 F cm⁻³的高体积比电容。

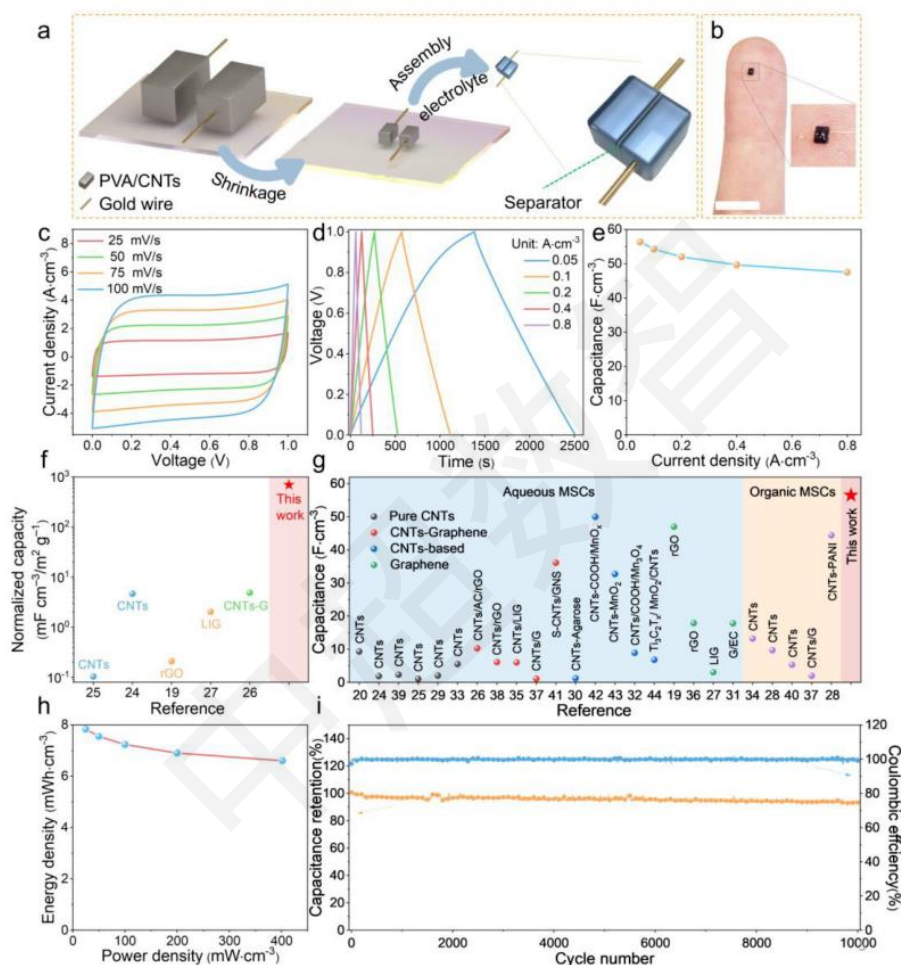


图5 MSCs结构组装示意图和电化学性能图 a, MSCs组装的示意图和(b)实际电子照片。比例尺: 1 cm。c, 在25至100 mV/s扫描速率范围内测得的CV曲线。d, MSC在不同电流密度 (0.05至0.8 A cm⁻³) 下的GCD曲线。e, 基于不同电流密度下放电时间计算MSC的比电容 (倍率性能)。f, PC80% MSC与其他已报道碳基MSC的归一化容量比较。g, PC80% MSC与其他已报道碳纳米管和石墨基MSC的体积比电容比较。h, MSC的功率密度和能量密度曲线。i, MSC在0.2 A cm⁻³电流密度下的长期循环稳定性和库仑效率。

为实现肠道内植入，研究团队设计了直径为2.5 mm的植入式器件。图6展示了其在巴马迷你猪模型中的体内伤口愈合效果。器件通过内镜放置于直肠（图6b），并在其旁制作0.5 cm的主伤口（MW）。对照实验设置了未充电的假器件和空白伤口（BW）。内镜观测显示（图6d），术后第1天三个伤口均处于活动期；第2天，主伤口进入愈合期，而假伤口和空白伤口仍停留在活动期；第3天，主伤口面积显著减小；到第4天，主伤口已完成瘢痕重塑，而对照伤口仍有活动性病变。术后第14天，主伤口完全愈合且无瘢痕，而假伤口和空白伤口仅部分愈合。三个动物模型的结果一致表明，植入式微型超级电容器的电刺激使肠道伤口愈合率提高了36%-50%。血液生化分析和组织病理学检查（图6e-f）证实器件具有良好的生物相容性，未引起炎症反应或器官损伤。

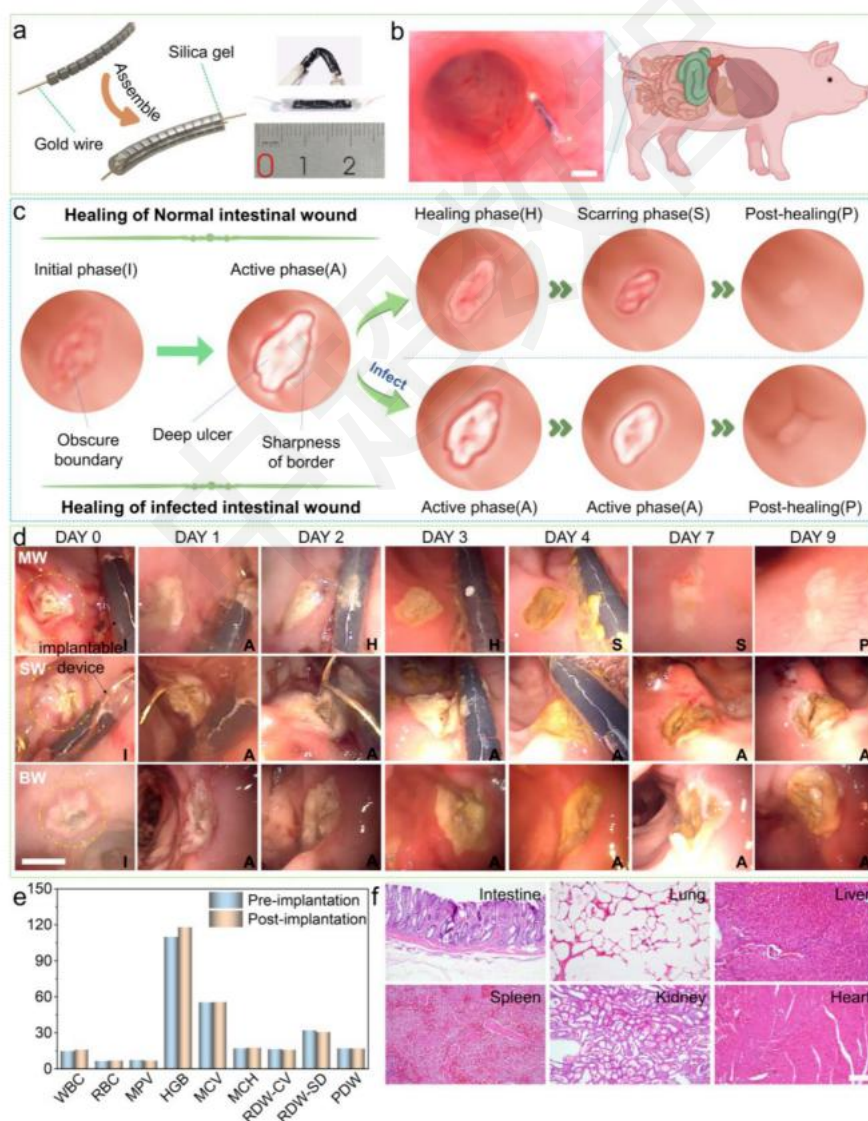


图6 MSCs用于电刺激肠道伤口愈合的生物应用 a, 胃肠道适配器件组装的示意图(插图 of 植入式器件的电子照片)。 b, 实验猪模型直肠中植入式器件的内镜图像。比例尺: 5 mm。 c, 黏膜溃疡伤口愈合过程的示意图。肠道溃疡伤口愈合阶段包括活动期、愈合期、瘢痕期和愈合后期。然而, 当发生感染时, 伤口会持续感染并因此长期停留在活动期。 d, 猪模型1中主伤口、假伤口和空白伤口在不同时间点的内镜图像。(因缝线降解, 植入式器件在第4天通过肠道蠕动排出。) 比例尺: 0.5 cm。 e, 实验猪模型植入器件前后的血液生化分析。 f, 实验后实验猪器官切片的病理检查。数据表示为三次随机采样的平均值。比例尺: 100 μm 。

总结与展望

本研究展示了一种力学激活的电化学方法, 利用聚乙烯醇网络在水分子逃逸过程中的自收缩行为在碳纳米管内产生内部应力。在应力-应变工程驱动下, 致密电极的电化学活性在不增加材料用量的情况下显著增强(电化学活性表面积比初始状态增加约4000倍), 使组装的微型超级电容器的标准化容量达到 $696 \text{ mF cm}^{-3}/(\text{m}^2 \text{ g}^{-1})$, 体积比电容达到 56.5 F cm^{-3} , 超越了目前报道的碳纳米管、石墨烯及其复合电极材料。自收缩行为带来的近80%体积缩减, 为实现直径仅2.5 mm的植入式能量器件提供了尺寸支持。该胃肠道兼容植入器件可在模拟肠液和生理盐水中持续释放微电流超过96小时, 并在实验猪模型中有效促进肠道溃疡愈合, 愈合率比未处理伤口提高36%-50%。研究提出的力学激活电化学方法不仅提高了电极材料的密度, 还激活了更多电化学活性表面积, 为高容量微型超级电容器的设计铺平了道路, 同时推动了具有高性能生物相容性的植入式电子器件的发展。

信息来源: https://mp.weixin.qq.com/s/91bnsqfvD_Oz9iu6-LmXGQ?scene=1&click_id=30