



超级电容产业周报

2026年7月 第 1 期

- 42.5MW/130.083MWh! 山西锂电+超级电容复合型储能项目进入并网调试阶段
- 方大炭素活性炭技术取得突破 跻身行业第一梯队
- 全球首台! 5MW级全碳型锂离子超级电容 (LIC) 功率舱型式试验成功
- 绿宝石科技闪耀IAEIS 2026峰会
- 强强联合, 共拓AI新赛道! 大潮炭能与烯晶碳能达成全方位战略合作
- 中国-伊拉克油气能源“一带一路”联合实验室主任、西南石油大学党委书记张烈辉一行莅临奥威科技调研考察
- 拉伸聚苯胺基压电超级电容
- 吃进工业固废, 吐出绿色电力! 一体化结构超级电容器, 助力建筑低碳转型

【行业动态】

42.5MW/130.083MWh!

山西锂电+超级电容复合型储能项目进入并网调试阶段

中国储能网讯：盛夏的襄垣，青山绿水间热浪涌动，比天气更炽热的，是42.5MW锂离子电池与超级电容混合储能项目正在进行的最后冲刺。26台储能电池舱、7台PCS升压逆变一体舱已全部安装就位。

锂离子电池大容量存储，长时间稳定输出，超级电容毫秒级响应，精准快速调频。6月20日，记者走进项目建设现场，只见工程车辆正有序装卸建材，挖掘机、装载机往来穿梭。目前，项目土建工程已完成，正在进行最后的扫尾工作，储能设备、避雷针设备也已安装完成，目前在调配超容设备。项目设备安装负责人冯彦山说：

“两个多月前就陆续进入了设施的初步调试阶段，现在每天都是紧盯目标，加紧推进二次设备安装，在保障施工安全和工程质量的前提下，全力冲刺并网调试目标节点。”

据了解，**总投资2.06亿元的襄垣42.5MW锂离子电池与超级电容混合储能项目，是我省第一批“源网荷储”一体化示范项目，也是全省首批“新能源+储能试点示范项目”**。由**山西中盛智慧电力有限公司与山西智先新能源有限公司合作建设**。其中，锂离子电池装机规模为32.5MW/130MWh，标准的“四小时”配置，**超级电容装机规模为10MW/0.083MWh**，意味着可以在**几十秒内完成“电力急刹车或急加速”**。

“它不是一个孤立项目，而是‘源网荷储’一体化‘储’的关键环，‘发电—电网—用电—储能’的系统中，少了储能这只‘千斤顶’，跑不稳；装上它，能跑得更快更稳。”冯彦山告诉记者，新能源下半场，比拼的不是装机量，而是谁能把不稳定变成稳定、把波动变成现金流。**即将调试的襄垣42.5MW混合储能站，用锂电+超容组合拳实现“水库+高性能刹车”效果，既赚峰谷价差又能秒级稳频。**

信息来源：<https://www.escn.com.cn/news/show-2259631.html>

方大炭素活性炭技术取得突破 跻身行业第一梯队

中国甘肃网6月27日讯（西北角·中国甘肃网记者 王树铭）高性能超级电容活性炭技术壁垒高、战略价值突出，目前正处于国产化加速突破的关键阶段。作为方大炭素在新能源储能

材料领域的核心布局，其**控股子公司成都炭材在超级电容器用活性炭领域目前取得重要进展，已掌握成熟生产技术，自主研发的高性能超级电容活性炭产品核心性能指标达到了行业先进水平，已跻身高性能超级电容活性炭研发领域第一梯队。**

超级电容器作为新型储能器件，具有功率密度高、充放电速度快、循环寿命长、工作温度范围宽等显著优势，在新能源储能、轨道交通、工业节能、国防军工、航空航天及大功率UPS等领域应用日益广泛，市场需求持续快速增长。活性炭作为超级电容器的核心电极材料，其性能直接决定储能器件的容量与寿命。长期以来，高性能超级电容活性炭市场主要被日本、美国等国际企业垄断，国内高端产品高度依赖进口，成为制约产业链自主可控的关键环节。

针对这一“卡脖子”难题，成都炭材自主研发的超级电容活性炭产品交出了一份亮眼的性能答卷。据企业技术负责人介绍，**该产品比表面积达2200平方米/克以上，振实密度大于0.30克/立方厘米，微孔占比超90%，相比普通活性炭材料比表面积提升20%至50%，有效提升了超级电容器的能量密度。在有机系电解液中电容量最高可达200法拉/克，水系场景下可达300法拉/克，灰分含量极低，各项核心参数均处于行业先进水平。**

同时，**产品具备低灰分、低电阻率特性，适配快速充放电需求，可支撑100万次以上循环寿命，长期使用容量衰减率极低；材料化学惰性强，在宽温域及不同湿度环境下性能稳定，能够适应车载、电网、户外特种设备等复杂工况。**

经检测验证，成都炭材产品主要性能指标已与国际头部企业产品相当，有望加速推动高端超级电容活性炭的国产化进程。当前，超级电容活性炭下游应用场景不断拓展，覆盖新能源汽车能量回收、轨道交通制动能量回收、智能电网调频调峰、工业节能起重机械能量回收、国防军工高功率脉冲电源及消费电子可穿戴设备等多个领域，市场需求呈现多元化增长态势。成都炭材已具备规模化生产能力，未来进口替代市场空间广阔。

此次技术突破是方大炭素在新能源储能材料领域的重要战略布局成果，进一步丰富了企业高端炭材料产品矩阵，提升了公司在炭素新材料领域的核心竞争力和行业话语权。

方大炭素相关负责人表示，公司将持续深耕新能源储能材料领域，加速创新成果产业化落地，为我国新能源产业链安全自主可控贡献力量。

信息来源：

https://www.toutiao.com/article/7656610750378639935/?&source=m_redirect

【行业动态】

全球首台！5MW级全碳型锂离子超级电容（LIC） 功率舱型式试验成功



△5MW级全碳型超级电容功率舱。

当前新型电力系统建设加速推进，储能成为电网调频领域核心刚需装备。而市场均为混合型超级电容（HUC）、双电层电容（EDLC）方案，尚无5MW全碳型锂离子超级电容（LIC）整舱完成全套CNAS型式试验，公司本次成果实现赛道“零”的突破。

全碳型锂离子超级电容相较混合型超级电容，具备循环寿命更长、安全性更高、低温衰减更小、无锂枝晶燃烧风险等核心优势，是分钟级高频调频的优选路线，本次型式试验一次性通关，证明公司已打通“全碳单体研发生产—PACK模组集成—整舱协同控制—系统安全保护”全链条自主可控技术体系。



△国内首条全碳型锂离子电容器中试线。

整舱能量核心采用**公司自产4500F大容量全碳型锂离子超级电容单体**，簇级动态压差仅64毫伏，瞬时功率响应速度 $\leq 10\text{ms}$ 。在同等5MW功率、125kWh能量配置下，整舱体积仅为同等参数竞品体积的70%，土地占用面积仅为同等竞品的60%，单套设备运输、土建、基础施工成本降低超40%。设备在海拔5000米极限工况下无需降额，持续稳定输出5MW额定功率，是国内少数可覆盖青藏高原全域风光储能项目的兆瓦级超级电容装备。

此次5MW级全碳型锂离子超级电容功率舱顺利通过CNAS型式试验，研发团队历时24个月攻克材料配方、均衡算法、系统集成、极端环境适配四大类百余项技术难题，累计获得锂离子超级电容相关发明专利42项，**推动国产全碳型锂离子超级电容储能技术进步，助力国家“双碳”目标落地，夯实我国在全球功率型储能领域的技术领先地位。**



△公司技术研发团队。

本次通过型式试验的5MW全碳型锂离子超级电容功率舱，将在**青海东岳独立储能项目中落地应用**。为储能电站带来毫秒级快速响应，实现百万次超长循环，全生命周期无需更换电芯，同时适配高原极寒环境，无需额外配套温控、增压设备，大幅降低场站配套投资，提升电站调频收益。

信息来源：https://mp.weixin.qq.com/s/UmP39hWk_VVFnW-prPuMuA

【行业动态】

绿宝石科技闪耀IAEIS 2026峰会

精进电容科技、赋能电子未来

2026年6月27日，由深圳市汽车电子行业协会主办的“IAEIS 2026第十五届国际汽车电子产业峰会”在深圳盛大举行。本届峰会以“AI智驾引领、芯链协同升级、共筑汽车电子新质产业生态”为主题，汇聚了全国汽车电子行业的领军企业与专家学者。绿宝石科技携最新汽车电子电容解决方案重磅亮相，与行业同仁共探智能出行新趋势。

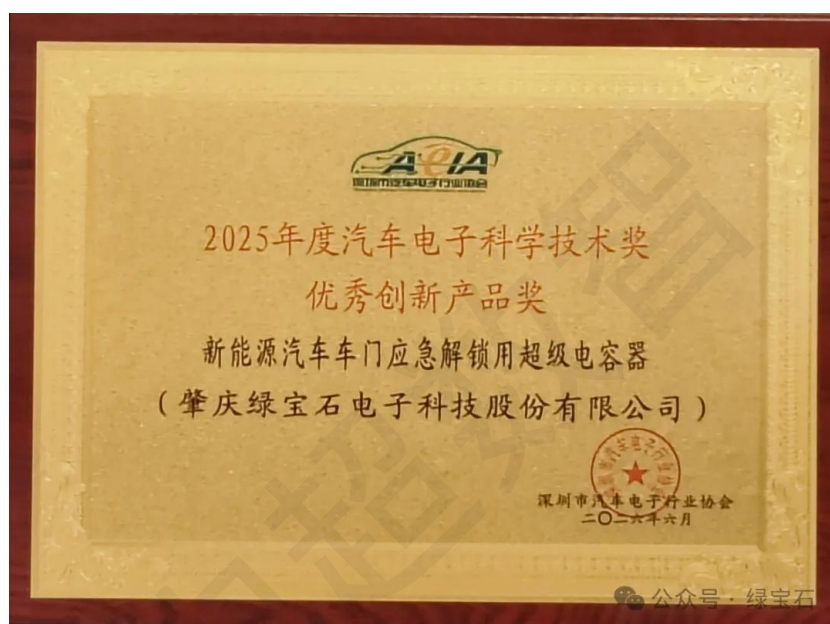
要闻 五大核心产品矩阵，全面布局新能源赛道

展会现场，绿宝石科技集中展示了公司在汽车电子领域的五大核心产品：**铝电解电容、导电高分子固态电容、固液混合电容、超级电容及叠层固态电容**。展台中心特别呈现了针对**EV、HEV、PHEV等新能源汽车的全场景应用方案**，凭借卓越的产品性能与可靠的技术指标，吸引了大量行业专家、整车厂代表及供应链伙伴驻足交流，现场洽谈氛围热烈。





斩获“优秀创新产品奖”，以核心元器件重塑安全防线



随着汽车电动化与智能化进程加速，车门应急解锁系统的安全性及可靠性已成为行业关注焦点。针对极端碰撞后传统电源易失效的行业痛点，以高性能超级电容器作为应急电源，集成信号、电源、控制驱动三重独立备份系统。该产品通过安全专线接收碰撞信号，具备瞬时高功率输出、-40℃至85℃宽温域稳定工作、循环寿命超100万次等优异特性，在车辆断电或事故发生的瞬间，为车门应急解锁提供持续可靠的供电，切实保障驾乘人员的安全快速撤离。

协同创新，共筑汽车电子新生态



此次参展与获奖，不仅是行业对绿宝石技术创新实力的认可，更是公司深耕汽车电子领域的重要里程碑。未来，绿宝石科技将继续秉持“精进电容科技、赋能电子未来”的理念，以更优质的电容解决方案赋能汽车产业链，与行业伙伴携手共创智能、安全、绿色的出行未来。

信息来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/56MEwKRde3-PDLQ-UQ1RMw?scene=1>

【行业动态】

强强联合，共拓AI新赛道！ 大潮炭能与烯晶碳能达成全方位战略合作



7月1日，烯晶碳能电子科技无锡有限公司与河南省大潮炭能科技有限公司战略合作签约仪式，在无锡烯晶碳能厂区圆满举行，双方企业领导共同出席鉴签。

烯晶碳能是思源电气股份有限公司控股子公司，2010年成立，无锡市海归领军人才企业。公司长期专注于电化学、储能器件活性粉体材料、干法电极、超级电容器、储能电池的研发与规模化制造，拥有活性材料、干法电极、元器件及整体应用解决方案全价值链技术能力。其超级电容器、混合超级电容器产品性能优异、可靠性高，在数据中心、轨道交通、电网储能、AI应用等领域具备显著竞争优势。

大潮炭能始创于1999年，是国家高新技术企业，专精特新企业。历经二十余年深耕，公司在高端功能性炭材料领域建成从技术研发到规模化量产的完整产业链，掌握化学法、物理法双核心活化工艺，拥有百余项专利，荣获多项国家、省部级及行业权威奖项。超级电容炭、硬碳、硅碳专用多孔炭等核心产品率先实现国产替代，第四代全自动智能化生产线已正式投产，产能与品质位居行业前列。



双方充分发挥各自产业链核心优势，围绕超级电容专用活性炭达成全方位战略合作，共建上下游一体化产业。

未来，双方将以此次签约为起点，持续深化技术、产能、资源的全方位协同，重点布局AI算力基础设施、新型储能系统、新能源汽车等高增长领域，聚力打造先进炭材料—超级电容器产业合作标杆，为新能源产业高质量发展提供有力支撑。

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/EJ1FjcdT7DZwIMY8KhyR0A>

【行业动态】

中国-伊拉克油气能源“一带一路”联合实验室主任、西南石油大学党委书记张烈辉一行莅临奥威科技调研考察

近日，中国-伊拉克油气能源“一带一路”联合实验室主任、西南石油大学党委书记张烈辉带队到访上海奥威科技发展有限公司开展调研考察，校企双方围绕产学研基地建设、人才联合培养、油气储能科研攻关等重点工作开展座谈交流，携手深耕“一带一路”油气能源领域创新合作。



实地走访展厅，共探储能技术产业优势

在公司党总支部书记、董事长肖光辉的陪同下，张烈辉书记一行实地参观企业展厅，详细了解奥威科技在超级电容器领域核心技术、产业化应用、能源储能项目落地等发展成果，直观感受企业技术研发与产业落地一体化优势。

座谈深度交流，敲定合作发展共识

会上，双方回顾了自合作框架协议签署以来各项工作进展情况，并就加快推进“一带一路”联合实验室奥威科技产学研合作基地建设、建立硕（博）研究生联培机制、油气能源领域超级电容储能科研项目合作、共建共享“一带一路”国家资源等内容深入交换了意见并达成共识。

助力“一带一路”能源高质量发展

双方一致认为，凭借西南石油大学在油气能源领域的科研实力和行业影响力，叠加奥威科技在超级电容器行业的品牌及技术优势，**合力打造中国-伊拉克油气能源“一带一路”联合实验室奥威科技产学研合作基地，对于深化校企产学研深度融合、共享“一带一路”沿线国家资源和发展机遇，对于落实中国“一带一路”伟大倡议，**

不仅意义重大而且影响深远。



参与本次调研座谈人员

西南石油大学：党委常委、副校长王杨，党政办主任覃吉春，石油与天然气工程学院单位党委书记赵玉龙，新能源与材料学院院长武元鹏；

上海奥威科技：董事长肖光辉，总经理安仲勋，副总经理吴明霞，党总支委员、工会主席潘洁。

文末结语

未来，校企双方将持续落实本次座谈共识，深化技术、人才、海外资源全方位协同创新，以超级电容储能技术赋能丝路油气产业，共创能源产业发展新机遇！

供稿：党政办公室/董事会办公室

信息来源：https://m.sohu.com/a/1035724074_114984

【前沿技术】

拉伸聚苯胺基压电超级电容

一、现状

可穿戴设备的痛点从来不是“能不能做”，而是“电从哪来”。锂电池能量密度再高，也逃不过物理极限——体积就那么大，容量就那么多。更麻烦的是，充电这个动作本身，在医疗植入、野外监测、大规模IoT部署场景下，简直是噩梦。

所以业界一直在寻找两个出路：

要么让电池变得不需要充电（能量收集），要么让电池和发电机合二为一（自供电系

统)。

今天聊的这篇刚发表在 Chemical Engineering Journal 上的工作 (DOI: 10.1016/j.cej.2026.140262)，就是第二条路的一个漂亮答案——压电超级电容。

二、核心概念：什么是压电超级电容？

先别被这个名字唬住。拆开来看，就是两个成熟技术的"联姻"：

压电效应 + 超级电容 = 压电超级电容 (Piezo-supercapacitor)

2.1 压电效应：材料的"发电体操"

某些材料（比如聚偏二氟乙烯PVDF、钛酸钡BaTiO₃）有个神奇特性：你弯它、压它、捏它，它内部就会产生电位差。这不是魔术，是晶体结构不对称导致的电荷分离。

想象一下，材料内部有一堆"小电偶"，平时乱七八糟排着呢，你一施加机械力，它们就整齐划一地转向，于是表面出现正负电荷——这就是压电势 (piezoelectric potential)。

2.2 超级电容：离子的"快速停车场"

超级电容不靠化学反应储能，而是靠双电层 (electric double layer) ——电解质离子在电极表面排排站，形成电荷分离。优点是充放电快、循环寿命长；缺点是能量密度不如电池。

2.3 压电超容：把"发电机"和"停车场"焊在一起

传统思路是：压电材料发电 → 整流电路 → 充电芯片 → 超级电容存储。这个链条太长，损耗太大。

压电超容的聪明之处在于：让压电材料本身成为超级电容的一部分。机械变形产生的压电势，直接驱动离子迁移到电极表面，完成"自充电"——不需要外部电路，不需要整流桥，弯一下就存电。

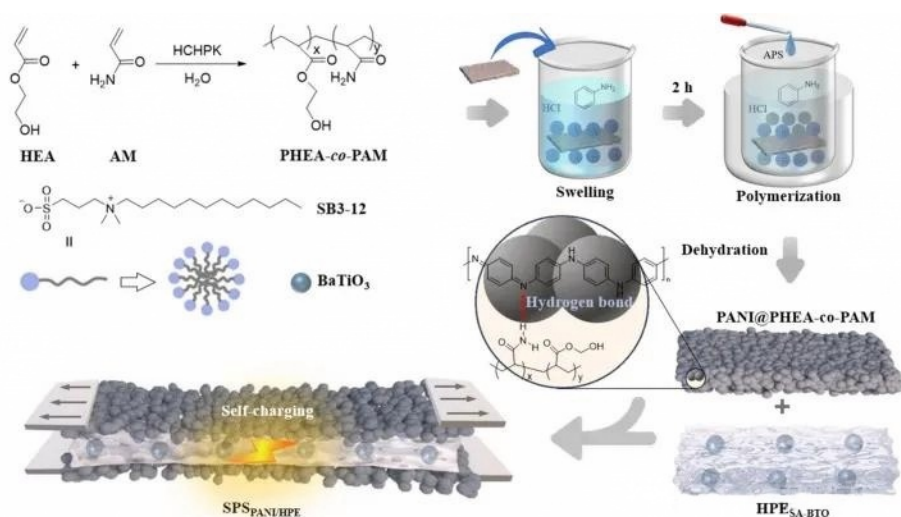


图1：PANI基压电超容的制备流程与自充电机制示意

三、这篇工作的硬核拆解

3.1 材料体系：可拉伸聚苯胺（PANI）基电极

这篇工作的核心创新在电极材料。

聚苯胺（PANI）是导电聚合物里的"老熟人"了，理论比容量高达~2000 F/g，成本低、合成简单，但有个致命伤——脆。传统PANI薄膜弯几下就裂，根本没法做可穿戴。

作者团队的做法是：把PANI做成可拉伸复合结构。具体策略是引入柔性基底（如PHEA-co-PAM共聚物网络），通过氢键和物理交联，让PANI在保持高导电性的同时，获得类似"橡皮泥"的机械性能。

实验数据显示，这种PANI基电极在拉伸应变下能产生显著压电势，且自充电效率可达30.7%——这在压电超容领域是相当高的数字。

3.2 工作机制：三步走

第一步：弯曲产生压电势。当人体关节弯曲（比如膝关节、肘关节），附着在皮肤或衣物上的压电超容发生形变。PANI基电极内部的压电活性区域产生内建电场。

第二步：离子迁移。压电势驱动电解质中的离子（如 H^+ 、 SO_4^{2-} ）向相反电极迁移。阳离子被吸向负电极，阴离子被吸向正电极。

第三步：双电层存储。迁移的离子在电极/电解液界面形成双电层，电荷被"锁"在电极表面。机械能就这样一步步变成了静电能。

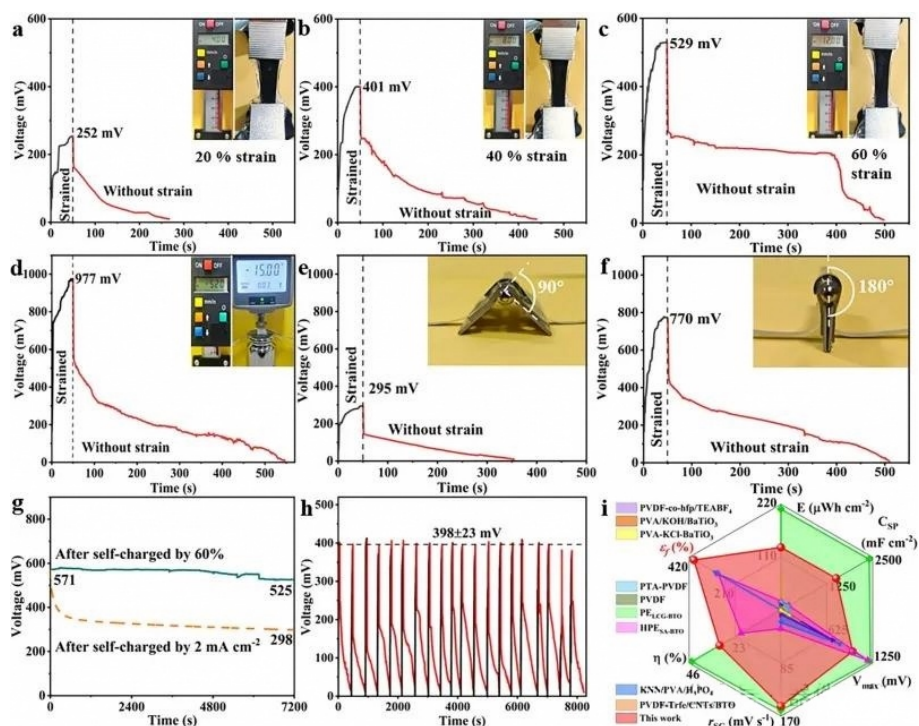


图2：不同拉伸应变下的自充电电压输出曲线

3.3 关键数据：从人体弯曲到实际电压

根据论文披露的数据，这套系统在人体弯曲应变下表现如下：

应变条件	自充电电压	应用场景
20% 拉伸	~252 mV	轻微手指活动
40% 拉伸	~401 mV	手腕翻转
60% 拉伸	~529 mV	正常步行膝关节弯曲
80% 拉伸	~977 mV	大幅度肢体运动
100% 拉伸	~770 mV	极限运动状态

注意一个有趣的现象：80%应变时电压达到峰值977 mV，超过100%后反而下降。这很好理解——过度拉伸导致材料内部微裂纹增加，压电畴的协同响应减弱。这也给实际应用提了个醒：设计工作点要避开过度形变区。

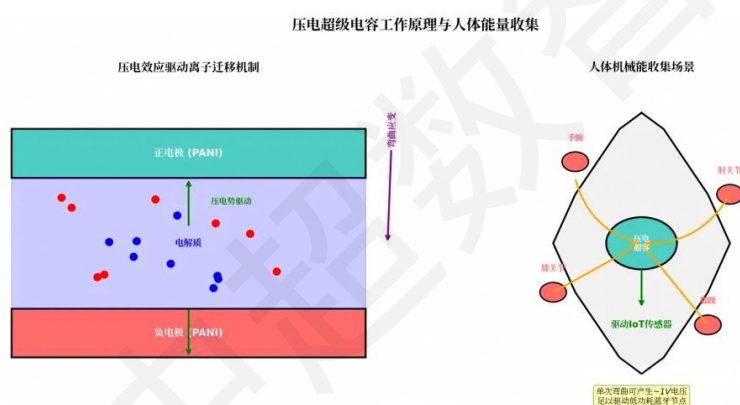
四、技术对比：为什么PANI基比PVDF基更香？

压电超容不是新概念。2015年就有团队用PVDF薄膜做压电隔膜，配合碳布电极实现自

充电。但PVDF体系有几个硬伤：

对比维度	PVDF基压电超容	PANI基压电超容（本工作）
压电系数	中等 ($d_{33} \sim 30 \text{ pC/N}$)	高（复合后增强）
电极导电性	需额外碳材料	本征导电
可拉伸性	有限 ($<50\%$)	高 ($>100\%$)
能量存储机制	纯双电层	双电层+赝电容
成本	较高	低（PANI便宜）
工艺复杂度	需极化处理	原位聚合即可

PANI基方案的最大优势是一体化：它既是压电活性材料，又是超级电容电极，还是导电网络。这种"三合一"设计大幅简化了器件结构，降低了界面损耗。



五、应用场景：无电池IoT的曙光

5.1 可穿戴健康监测

想象一个贴在膝盖上的柔性传感器，每天走路时自动充电，实时监测关节活动度、步态分析，数据通过蓝牙低功耗（BLE）传到手机。不需要换电池，不需要充电线，你的每一步都是它的能量来源。

5.2 物联网节点

在工业监测、农业传感、环境监控等场景，部署成千上万个传感器节点，换电池的成本

和人力极其高昂。压电超容配合低功耗MCU，可以实现"部署即遗忘"——只要有机械振动（风吹、水流、车辆经过），就能持续工作。

5.3 植入式医疗

心脏起搏器、神经刺激器等植入设备，目前依赖电池或经皮无线充电。压电超容可以从心跳、呼吸、肌肉收缩中获取能量，实现真正的终身免维护。

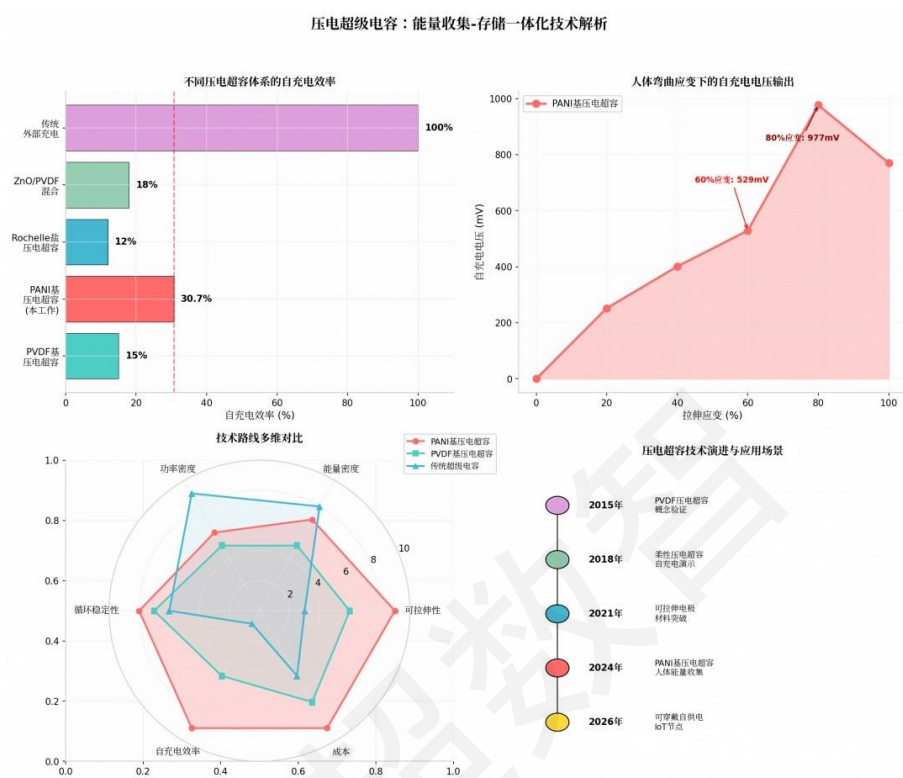


图3：压电超级电容工作原理与人体能量收集场景

六、冷静思考

作为工程师，看论文不能只看亮点，也得看坑在哪。

6.1 能量密度仍是短板

压电超容的自充电电压虽然能达到近1V，但总能量存储量还是有限。单次弯曲产生的电荷，可能只够发送几个数据包。要驱动复杂系统，还需要配合能量管理电路和间歇式工作策略。

6.2 循环稳定性待验证

PANI在反复掺杂/脱掺杂过程中会发生体积膨胀，长期机械-电化学耦合应力下，电极结构会不会退化？论文中提到了循环测试，但真实人体环境（汗液、温度变化、反复弯折）的耐久性数据还不够充分。

6.3 标准化和封装

从实验室到产品，还差一个可靠封装。可穿戴设备要防水、透气、亲肤，压电超容的电解质体系（通常是水凝胶）在这些要求面前还有很长的路要走。

推荐阅读

压电超容入门：Song et al., A rectification-free piezo-supercapacitor with PVDF separator, J. Mater. Chem. A, 2015. (经典之作，理解基础原理)

可拉伸超容进展：Chu et al., A novel stretchable supercapacitor electrode with high linear capacitance, Chem. Eng. J., 2018. (PANI可拉伸化的早期探索)

自供电系统综述：Gilshteyn et al., Flexible self-powered piezo-supercapacitor system for wearable electronics, Nanotechnology, 2018. (系统级视角)

人体能量收集：Wang et al., Recent progress of wearable piezoelectric nanogenerators, ACS Appl. Electron. Mater., 2026. (最新综述，涵盖PANI基体系)

七、小结

这篇CEJ的工作，技术上不是“从0到1”的突破，而是“从1到10”的扎实推进。它把压电超容从“实验室演示”往“可穿戴实用”推了一大步。

材料科学的魅力，不在于发明什么玄乎其玄的新东西，而在于把已知的东西，用新的方式组合，解决真实的问题。

聚苯胺发现于1980年代，压电效应发现于1880年代，超级电容的概念在1957年就有了。但这三样东西凑在一起，在2026年变成了一块能贴在你膝盖上、弯一弯就发电的柔性器件——这就是工程创新的本质。

— 本文仅供大家学习和参考，难免有不对的地方欢迎指正 —

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/RbzgE6TAdwHAh7ueLtn9gQ>

【前沿技术】

吃进工业固废，吐出绿色电力！ 一体化结构超级电容器，助力建筑低碳转型



Efficient building energy storage via solid-waste electrolyte and
Interface-engineered structural supercapacitors

Jie Yao^{a,b}, Wenjing Sun^{a,b,*}, Xin Dou^c, Danni Zhang^c, Xiating Feng^{a,b}, Tao Hong^d,
Shuqiong Luo^a

1. 题目

《基于固废电解质与界面调控型结构超级电容器的高效建筑储能研究》

2. 关键词

仿生、3D 打印、土基材料、生物聚合物

3. 出版年份

2026年

4. 来源：

《Chemical Engineering Journal》

期刊等级：JCR 1区，中科院一区TOP期刊

影响因子：13.2

5. 第一作者

Jie Yao (State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment,
Northeastern University, Shenyang, 110819, China)

6. 通讯作者

Wenjing Sun (State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment,
Northeastern University, Shenyang, 110819, China)

思维导图



一、主要内容解读

全球建筑能耗约占最终能源消耗的 40%，其中住宅建筑能耗占建筑部门总能耗的四分之三，推动建筑从能源消费者向储能单元乃至能源供应者转型，已成为绿色低碳建筑发展的核心方向。结构超级电容器（SSCs）因与建筑材料天然兼容、循环寿命极长且机械性能优异，成为建筑集成储能领域的研究热点。当前水泥基结构储能研究主要围绕电极改性与电解质优化两条主线展开：电极方面，通过负载还原氧化石墨烯（rGO）/ 金属氧化物复合材料可实现高面电容，但存在活性物质利用率低、水热 / 电沉积工艺耗时耗能、难以规模化生产的问题；电解质方面，通过聚合物掺杂、发泡、冰模板法等手段可提升离子电导率，但工艺复杂度高，且电极与电解质的材料兼容性长期被忽视。现有研究多基于 1cm³ 级小尺寸器件开展表征，未系统探讨尺寸效应对器件性能的影响，同时生物炭改性碱激发电解质与活性炭（AC）电极的协同界面优势也未得到充分挖掘，制约了结构超级电容器在建筑领域的大规模应用。

1.研究目的

本研究旨在制备一种基于稻壳炭（RHC）固废电解质与 AC 电极的集成式结构超级电容器，系统探究电极面积（1、4、9、16cm²）对器件电化学性能的尺寸效应，并与传统隔膜型超级电容器（SCs）进行对比分析。通过一体化浇筑工艺实现电极 - 电解质界面的结构优化，验证集成式结构的界面性能优势，明确大尺寸结构超级电容器高容量输出与实用性能之间的最优平衡关系，提出一种具有标准化潜力的制备方法，为结构超级电容器在建筑储能领域的规模化应用提供实验依据与方法论支持。

2.研究方法

(1) 材料体系构建：电解质采用钢渣 (SS, 55wt%) 与粒化高炉矿渣 (GGBS, 45wt%) 作为胶凝基材，以 0.5wt% NaOH 和 1.5wt% 硅酸钠为碱激发剂，掺入 20wt% 稻壳炭 (RHC) 优化孔隙结构与离子传导性能；电极由 AC、导电炭黑与聚偏氟乙烯 (PVDF) 按 8:1:1 质量比混合制备，通过辊压法负载于镍泡沫集流体，活性层总面负载为 $15\text{mg}/\text{cm}^2$ ，厚度 $250\mu\text{m}$ ；传统超级电容器采用 $200\mu\text{m}$ 厚玻璃纤维隔膜与 2M KOH 电解液组装。

(2) 器件制备工艺：传统超级电容器采用 “AC 电极 - 隔膜 - AC 电极” 的三明治结构组装；结构超级电容器采用一体化浇筑工艺：将 AC 电极平行固定于模具内侧，浇筑新鲜电解质浆料，经手动压实后在标准养护室养护 28 天，得到厚度 5mm、抗压强度 7.88MPa 的集成式器件，制备了电极面积分别为 1、4、9、 16cm^2 的系列样品。

(3) 性能表征与测试：电化学性能采用 CS310X 多通道电化学工作站测试：三电极体系表征 AC 电极性能，两电极体系测试超级电容器与结构超级电容器的循环伏安 (CV, 5-80mV/s)、恒电流充放电 (GCD) 与电化学阻抗谱 (EIS, 0.1Hz - 10^5Hz)；微观结构通过 X 射线衍射 (XRD)、拉曼光谱、扫描电子显微镜 (SEM) / 背散射电子成像与 X 射线光电子能谱 (XPS) 表征；开展了器件串联供电测试与界面对比实验 (将 SSCs-4 拆解后重新组装为 SSCs-4*, 对比界面性能差异)。

3. 核心结论

(1) 尺寸效应对结构超级电容器性能具有显著影响。电极面积为 4cm^2 的 SSCs-4 器件综合性能最优，在 $3\text{mA}/\text{cm}^2$ 电流密度下实现 $410\text{mF}/\text{cm}^2$ 的面电容，达到同尺寸传统超级电容器 (SC-4) 的 79.5%；在 $2.5\text{mW}/\text{cm}^2$ 功率密度下能量密度为 $50.33\mu\text{Wh}/\text{cm}^2$ ，同时具备优异的倍率性能与循环稳定性 (3000 次循环后电容保持率 98.7%)。当电极面积增大至 16cm^2 时，SSCs-16 的面电容仅为同尺寸传统超级电容器的 58.9%，电解质面积增加导致离子传输限制加剧，电化学性能显著恶化。

(2) 一体化浇筑工艺与生物炭改性电解质协同优化了界面性能。集成式结构在电极 - 电解质界面形成了紧密连续的接触，有效缓解了固态组装固有的界面问题。与重新组装的 SSCs-4* 相比，SSCs-4 的界面电荷转移电阻从 7.14Ω 降至 2.5Ω ，界面离子传输阻力显著降低。微观表征显示，RHC 与 AC 因材料相似性在界面形成连续的离子传输通道，碱金属离子在界面区域均匀分布，无传输中断现象。

(3) 结构超级电容器具备良好的实用储能潜力。3 个串联的 SSCs-16 器件可成功点亮白色 LED 并持续供电 29 分钟，5 个串联的 SSCs-16 器件可驱动 80cm 长的绿色 LED 灯带，验证了其在建筑集成储能领域的应用可行性。此外，传统 SC-4 器件在 $15\text{mA}/\text{cm}^2$ 电流密度

下循环 5000 次后仍保持 500mF/cm² 以上的面电容，展现出更优的长循环稳定性。

4.研究瓶颈

(1) 内部电阻过高制约功率性能。结构超级电容器的内部电阻是同尺寸传统超级电容器的 8.7-23 倍，且随器件面积增大呈线性增长趋势。SSCs-4 的最高功率密度仅为 2.5mW/cm²，远低于 SC-4 的 7.5mW/cm²，难以满足高功率建筑储能场景的需求。

(2) 工作电压窗口受限导致能量密度偏低。本研究采用纯双电层电容机制的 AC 电极，工作电压窗口仅为 1V，尽管面电容表现优异，但能量密度仍低于采用赝电容电极与宽电压窗口电解质的体系。

(3) 尺寸效应限制大尺寸器件应用。当电极面积超过 9cm² 时，结构超级电容器的电化学性能急剧衰减，离子传输路径延长与电解质均匀性下降是主要原因，当前材料体系难以满足建筑储能对平方米级大尺寸器件的需求。

(4) 电解质微观结构仍需优化。虽然 RHC 改性提升了电解质离子电导率，但 5mm 的电解质厚度仍显著增加了离子传输阻力，RHC 的最优掺量、粒径分布与孔隙结构调控机制尚未完全明确，需进一步系统研究。

二、文章核心图表

图1 (a)~(f)原材料扫描电镜图；(g)稻壳炭、钢渣与粒化高炉矿渣的粒径分布；(h)钢渣、粒化高炉矿渣的X射线衍射图谱；(i)活性炭与导电炭黑的拉曼光谱。

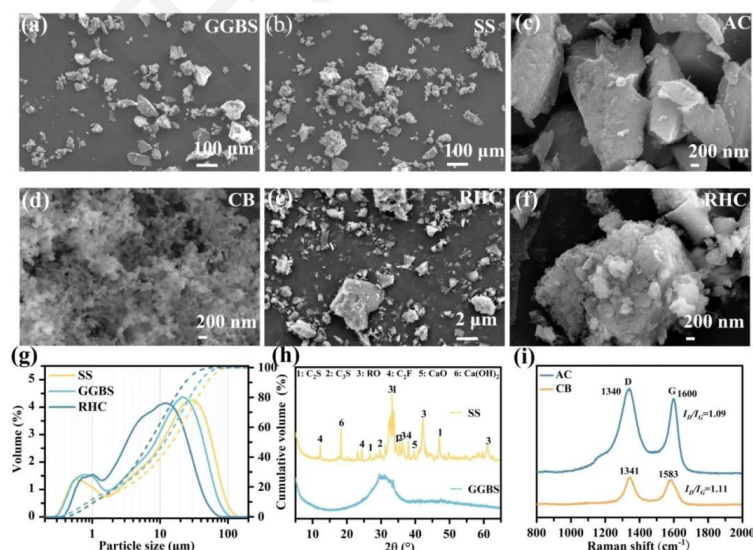


图2 (不同尺寸活性炭电极的电化学性能。(a)扫描速率5 mV/s下的循环伏安曲线；(b)S-4样品在不同

扫速下的循环伏安曲线；(c)峰值电流对数与扫速对数的关系及线性拟合曲线；(d)电化学阻抗谱；(e)电流密度0.2 A/g (3 mA/cm²) 条件下的恒流充放电曲线；(f)S-4样品在不同电流密度下的恒流充放电曲线。

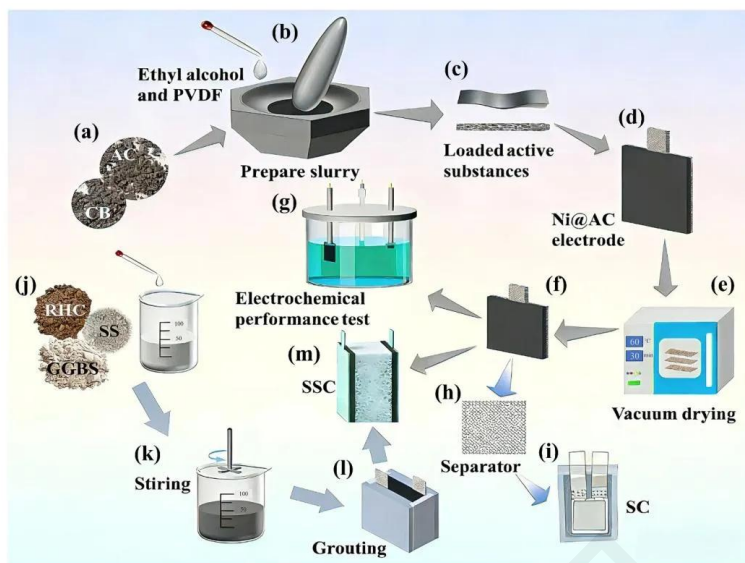


图3 不同尺寸活性炭电极的电化学性能。(a)扫描速率5 mV/s下的循环伏安曲线；(b)S-4样品在不同扫速下的循环伏安曲线；(c)峰值电流对数与扫速对数的关系及线性拟合曲线；(d)电化学阻抗谱；(e)电流密度0.2 A/g (3 mA/cm²) 条件下的恒流充放电曲线；(f)S-4样品在不同电流密度下的恒流充放电曲线。

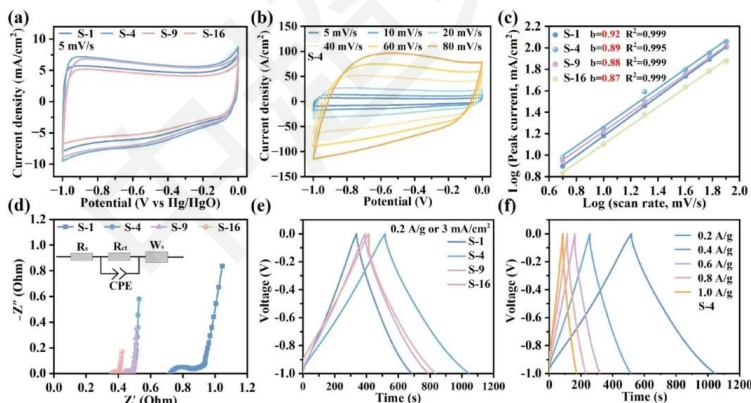


图4 不同尺寸常规超级电容器的电化学性能。(a)扫速5 mV/s下的循环伏安曲线；(b)SCs-4在不同扫速下的循环伏安曲线；(c)峰值电流对数与扫速对数的关联及线性拟合曲线；(d)不同尺寸器件的恒流充放电曲线；(e)器件在不同电流密度下的恒流充放电曲线；(f)3~15 mA/cm²电流密度下的倍率性能；(g)不同尺寸器件的能量密度与功率密度；(h)不同尺寸器件的电化学阻抗谱；(i)15 mA/cm²条件下SCs-4样品的长效循环性能。

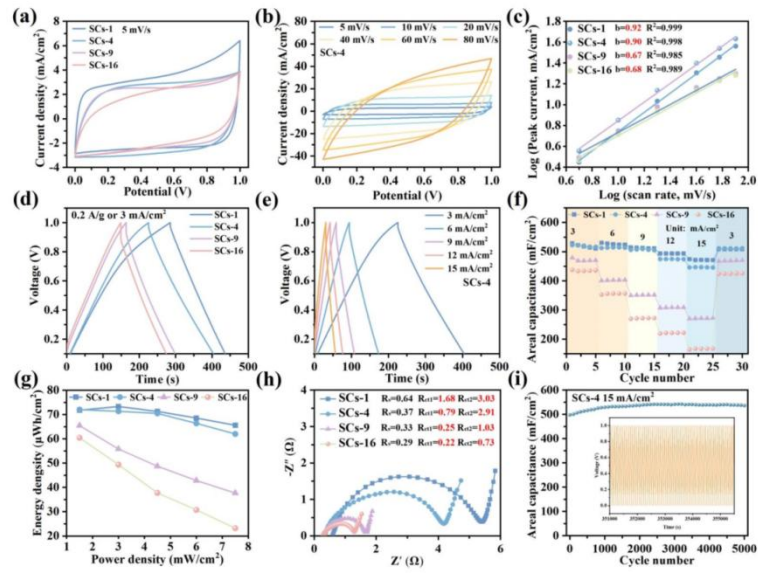


图5 不同尺寸结构超级电容器 (SSCs) 的电化学性能。(a)扫描速率5 mV/s下的循环伏安曲线；(b)SSCs-4在不同扫速下的循环伏安曲线；(c)峰值电流对数与扫描速率对数的关系；(d)不同尺寸SSCs的恒流充放电曲线；(e)SSCs在不同电流密度下的恒流充放电曲线；(f)1 ~ 5 mA/cm²电流密度下的倍率性能；(g)不同尺寸SSCs的电化学阻抗谱；(h)不同尺寸SSCs的离子电导率；(i)不同尺寸SSCs的能量密度与功率密度。

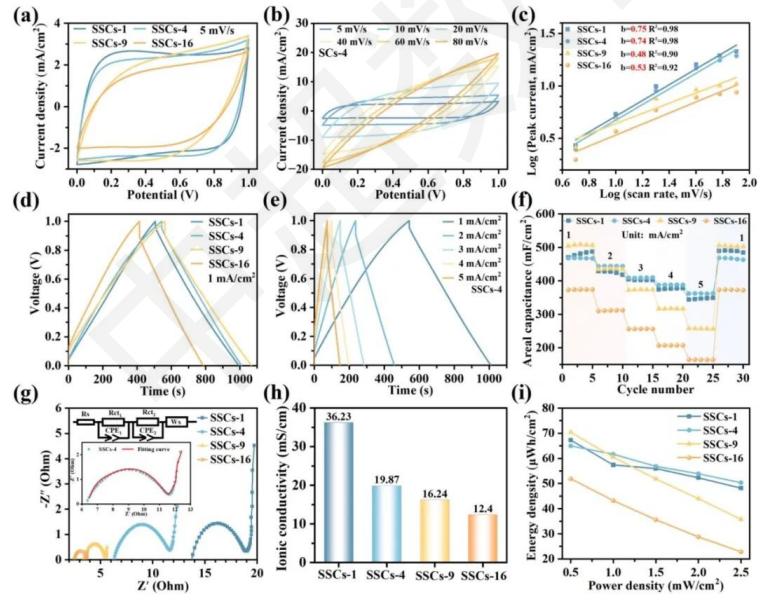


图6 结构超级电容器 (SSCs) 供电性能测试。(a)5 mV/s 扫速下1~3只串联SSCs-16的循环伏安曲线；(b)3 mA/cm²电流密度下1~3支串联SSCs-16的恒流充放电曲线；(c)1~3只串联SSCs-16的电化学阻抗谱；(d)5 mA/cm²电流密度下3000次充放电循环稳定性；(e)SSCs-16串联接线原理图；(f)~(h)三只串联SSCs-16点亮白光LED的实物实拍图；(i)器件点亮5V灯带实拍。

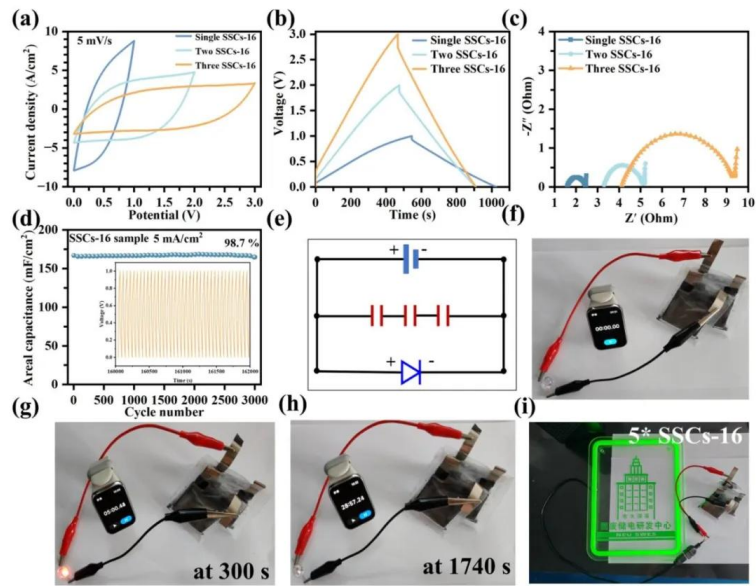


图7 左侧为电极界面结构设计示意图；(a) 5 mV/s扫速下的循环伏安曲线；(b) 3 mA/cm²电流密度下的恒流充放电曲线；(c) 奈奎斯特图谱；(d) 波特图谱。

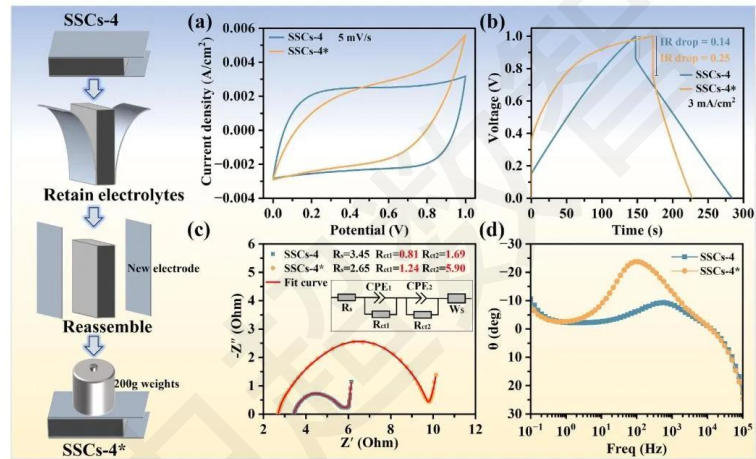


图8 SSCs-1样品的界面微观形貌与元素分布

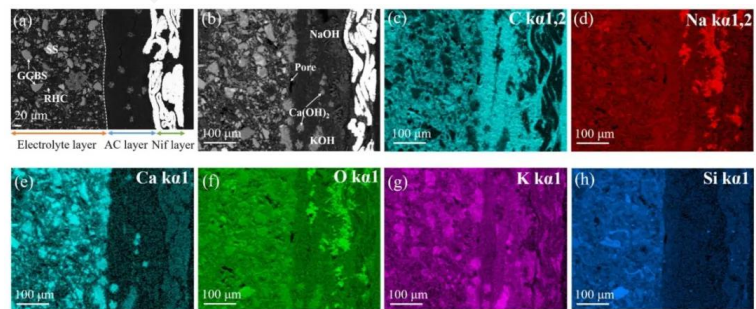


图9 (a)结构超级电容器微观机理示意图；(b)电解液离子在活性炭电极表面吸附原理图；(c)碱激发体系中离子向活性炭层扩散过程图；(d)活性炭电极薄膜XPS全谱图；(e)~(i)碳1s、氧1s、钾2p、钙2p、钠1s的高分辨谱图。

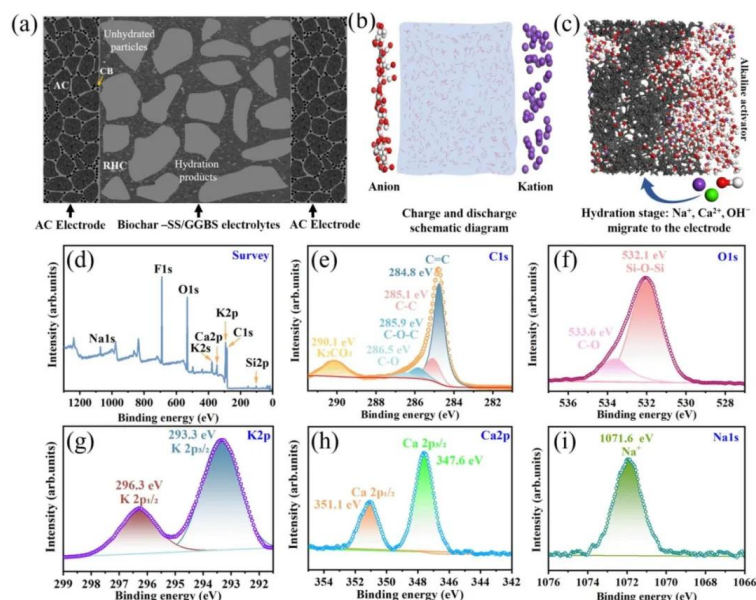
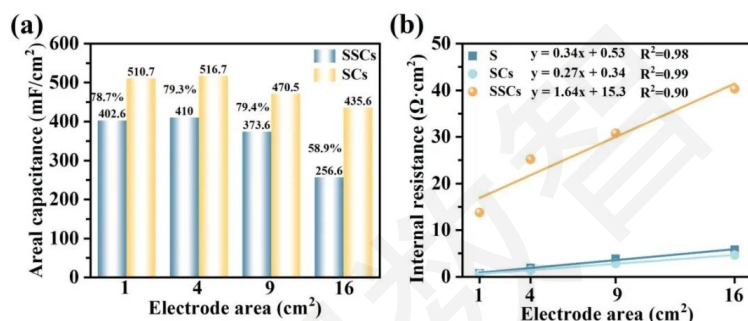


图10 结构超级电容器(SSCs)与常规超级电容器(SCs)性能对比



三、结论

该文献针对建筑低碳转型对集成储能技术的需求，制备了稻壳炭改性碱激发钢渣-矿渣固废电解质与活性炭电极复合的集成式结构超级电容器，系统探究了1~16cm²电极面积的尺寸效应，明确4cm²为当前材料体系的最优器件尺寸，其在3mA/cm²电流密度下实现410mF/cm²的面电容（达同尺寸传统超级电容器的79.5%），2.5mW/cm²功率密度下能量密度为50.33μWh/cm²，且3000次循环后电容保持率达98.7%；通过一体化浇筑工艺构建了无缝电极-电解质界面，使界面电荷转移电阻从重新组装器件的7.14Ω降至2.5Ω，有效缓解了固态储能的界面接触问题，3个串联的16cm²器件可点亮白色LED并持续供电29分钟，验证了其在建筑集成储能领域的应用潜力；同时指出结构超级电容器内部电阻为同尺寸传统器件的8.7~23倍且随尺寸增大线性增长、工作电压窗口受限等瓶颈，未来将系统研究稻壳炭的最优掺量以降低内部电阻，为大规模高容量结构超级电容器的制备提供理论基础，推动其在建筑储能领域的高效规模化应用。

文献链接: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.177627>

信息来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/wwwZtRuRtldj4Aov4g4m8Q>