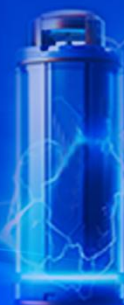




2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

会议 手册

2026年10月23日-25日
江苏·南京



目 录

会议概括.....	01
参会须知.....	02
日程简表.....	03
会议日程.....	04

学术墙报题目:

分子水态调控实现-50~80℃全气候水系锌电储能（聊城大学 李楠）

Optimizing Lithium - Ion Storage in Single - Crystalline Cu₂Nb₃4O₈7 Anode via Aliovalent In₃+Doping: Enhanced Diffusion Kinetics and Cycling Stability Toward Lithium - Ion Capacitors（济南大学 江浩）

Machine Learning and Theoretical Computation Synergy Advancing Halide Electrolytes Toward All-Solid-State Lithium Batteries: Recent Advances, Challenges, and Perspectives（济南大学 叶家辉）

$\pi-\pi$ Stacking-Enabled Stable Carbonyl Small-Molecule Cathodes for High-Performance Aqueous Proton Batteries（南通大学 秦玮）

全氟丁基磺酰氟构筑氟化界面层抑制锌枝晶和副反应的研究（南京航空航天大学 曲会鑫）

Ba、N 双掺杂二氧化锰正极的制备与储锌性能（南京航空航天大学 吴玲）

相变-炭化耦合制备黑液木质素自支撑泡沫炭电极（齐鲁工业大学 李晓阳）

CoNi-MOF/聚苯胺复合材料及电化学性能研究（山东科技大学 王舒豪）

磺基琥珀酸掺杂 Ce-UiO-66/聚吡咯复合材料制备及电化学性能研究（山东科技大学 周传盛）

基于 rGO 基纳米材料构建 S 型 TiO₂/In₂S₃ 异质结用于光生电荷分离调控（山东科技大学 高艳旎）

NiCo-MOF/聚吡咯复合柔性电极材料的制备及电化学性能（山东科技大学 王乐飞）

N 掺杂碳纳米管/多孔碳复合柔性电极的构筑及电化学性能（山东科技大学 张雨）

分级排列 rGO/MXene 泡沫的构筑及能量转换与利用（山东科技大学 王娜）

石墨烯基异质结构界面调控及光热能量转换（山东科技大学 武玉璐）

会议概括

为促进学术交流与合作，推动储能产业技术与学科专业发展进步，在前十届会议成功召开的基础上，由中国化工学会储能工程专业委员会、《储能科学与技术》编辑部主办的“2026 第十一届超级电容器及相关化学电源关键材料学术会议”将定于 2026 年 10 月 23-25 日在“南京金奥国际酒店”召开。

本次会议由南京航空航天大学材料科学与技术学院承办，由燕山大学环境与化学工程学院、云南大学新型储能研究所、湖南工业大学材料与先进制造学院、中国矿业大学江苏省高效储能技术与装备重点实验室、西南交通大学材料科学与工程学院、厦门大学能源学院、浙江师范大学先进催化材料教育部重点实验室、天津科技大学化工与材料学院、济南大学材料科学与工程学院、浙江大学材料科学与工程学院、郑州大学材料科学与工程学院、长沙学院材料与环境工程学院、西北工业大学化学与化工学院、浙江农林大学化学与材料工程学院、山东科技大学材料科学与工程学院、兰州理工大学材料科学与工程学院、吉林师范大学化学学院、江苏大学汽车工程研究院、河海大学新能源学院、国家能源用户侧储能创新研发中心（筹）、教育部首批虚拟教研室建设试点储能科学与工程专业虚拟教研室、锂电材料及应用江西省重点实验室、南京航空航天大学分析测试中心等协办。

本届会议将进一步搭建高等院校、科研院所、公司企业、投融资机构、政府相关部门之间互动与合作的平台。专家学者共聚一堂，分享创新的科研成果，研讨国内外动态与前沿，明确产业发展趋势，开展产学研合作，促进超级电容器及相关化学电源关键材料的研究和新能源产业的发展，服务于国家“双碳”战略。诚邀各相关领域的专家学者、科研人员、企业管理者、工程技术人员以及研究生踊跃参加本届学术会议！

参 会 须 知

- 1、本会议指南旨在为参会代表们提供会议的相关信息，仅供会议期间参考使用。未尽事宜及日程变化、临时活动，请随时留意各会场发布的通知或会议微信群；
- 2、各会场做演讲报告的参会嘉宾请在上、下午的会议召开前半小时将演讲报告 PPT 拷贝到各会场的计算机中；
- 3、在会场中，请将手机等通讯设备调至静音，请勿大声喧哗，禁止吸烟；
- 4、会议期间，参会代表们凭会务组发放的餐券用餐，餐券只能在大会指定的时间和地点使用，餐券遗失不补；
- 5、参会期间，请注意个人的人身及财产安全，离开酒店房间时请将贵重物品寄存；
- 6、会议期间，若有问题请及时与组委会工作人员取得联系。

日 程 简 表

日期	议程	地点
10 月 24 日上午	大会开幕式	2 楼金奥厅
	大会报告	
10 月 24 日下午	第一会场（双电层电容器/赝电容器 A 分会场）	2 楼金奥 A 厅
10 月 24 日下午	第二分会场（金属/非金属离子电容器分会场）	2 楼金奥 BC 厅
10 月 24 日下午	第三分会场（锂/钠/钾离子电池 A 分会场）	2 楼金奥 D 厅
10 月 24 日下午	第四分会场（锂/钠/钾离子电池 B 分会场）	2 楼玄武厅
10 月 24 日下午	第五分会场（水系电池分会场）	2 楼银杏厅
10 月 24 日下午	第六分会场（储能安全技术&固态电池&氢能与燃料电池）	2 楼莫愁厅
10 月 24 日下午	第七分会场（双电层电容器/赝电容器 B 分会场）	2 楼秦淮厅
10 月 25 日上午	大会报告	2 楼金奥厅
10 月 25 日下午	第一分会场（双电层电容器/赝电容器 A 分会场）	2 楼银杏厅
10 月 25 日下午	第二分会场（金属/非金属离子电容器分会场）	2 楼秦淮厅
10 月 25 日下午	第三分会场（锂/钠/钾离子电池 A 分会场）	2 楼莫愁厅
10 月 25 日下午	第四分会场（锂/钠/钾离子电池 B 分会场）	2 楼玄武厅
10 月 25 日下午	第五分会场（水系电池分会场）	2 楼珍珠厅
10 月 25 日下午	第八分会场（电化学储能研究生论坛）	2 楼金牛厅

会议日程

时间：2026 年 10 月 23 日（星期五） 09:00-22:30 南京金奥国际酒店

时间	事项	地点
09:00-22:30	报到与注册：签到及领取会议资料	南京金奥国际酒店 37 楼 (建邺区江东中路 333 号)
18:30-20:30	自助晚餐	60 楼 ADD 厅

大会开幕式（全体大会报告）

时间：2026 年 10 月 24 日（星期六） 08:00-08:20 （2 楼金奥厅）

时间	开幕式议程
开幕式主持人：张校刚&申来法	
08:00-08:05	南京航空航天大学 领导 致辞
08:05-08:10	中国化工学会储能工程专业委员会 郝向丽 致辞
08:10-08:20	全体嘉宾合影（地点：现场）

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

全体大会报告			
时间：2026 年 10 月 24 日（星期六） 08:20-12:20 （2 楼金奥厅）			
时间	题目	姓名	机构
大会报告主持人：崔光磊&曲良体			
08:20-08:40 大会报告	能源存储和转换中前沿热点电化学技术研发进展	张久俊	福州大学
08:40-09:00 大会报告	锌离子电池中的水管理	杨全红	天津大学
09:00-09:20 大会报告	高性能锂离子电容器：材料设计、制备及应用	马衍伟	中国科学院电工研究所
09:20-09:40 大会报告	微型超级电容器关键材料与器件	吴忠帅	中国科学院大连化学物理研究所
09:40-10:00 大会报告	滤波用双电层超级电容器：碳基电极结构设计及优化	孟国文	中国科学院合肥物质科学研究院
大会报告主持人：马衍伟&阮殿波			
10:00-10:20 大会报告	高性能金属离子电池的界面化学与电解质设计	郭再萍	香港城市大学
10:20-10:40 大会报告	钠离子电池电极材料的进展及挑战	夏永姚	复旦大学
10:40-11:00 大会报告	超级电容器电极材料的力场调控	高发明	天津科技大学
11:00-11:20 大会报告	双离子电池石墨正极的阴离子插层化学与界面调控	崔光磊	中国科学院青岛生物能源与过程研究所
11:20-11:40 大会报告	离子动态调控实现高频高容与绿色能源	曲良体	清华大学
11:40-12:00 大会报告	锂 / 钠金属负极研究	董全峰	厦门大学
12:00-12:20 大会报告	高功率储能材料及器件开发与应用	阮殿波	宁波大学
12:20-13:30	自助午餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

全体大会报告			
2026 年 10 月 25 日（星期日） 08:20-12:00 （2 楼金奥厅）			
时间	题目	姓名	机构
大会报告主持人：冯 光&施思齐			
08:20-08:40 大会报告	固态电池及其材料设计	温兆银	中国科学院上海硅酸盐研究所
08:40-09:00 大会报告	多孔材料基固态锂金属电池	徐吉静	吉林大学
09:00-09:20 大会报告	磷酸锰铁锂研发及产业化进展	郑俊超	中南大学
09:20-09:40 大会报告	低值废旧锂电材料的升级再造与增值循环	吴兴隆	东北师范大学
09:40-10:00 大会报告	阴离子选择性锚定的粘性聚合物电解质	沈炎宾	中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所
大会报告主持人：温兆银&徐吉静			
10:00-10:20 大会报告	开发高比能长循环的金属锂二次电池	周豪慎	南京大学
10:20-10:40 大会报告	纳米多孔超级电容器的多尺度模拟	冯 光	华中科技大学
10:40-11:00 大会报告	AI for Materials: 从基础研究到工程落地的若干思考	施思齐	上海大学
11:00-11:20 大会报告	非层状二维钼基化合物的盐辅助绿色制备及其电容性能	霍开富	华中科技大学
11:20-11:40 大会报告	锌基凝胶电池	姚亚刚	南京大学
12:00-13:30	自助午餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第一分会场（双电层电容器/赝电容器 A 分会场）

时间：2026 年 10 月 24 日（星期六） 13:30-17:45 （2 楼金奥 A 厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：黄海涛&卜永锋			
13:30-13:45 主旨报告	多功能复合结构超级电容器的构筑	黄海涛	香港理工大学
13:45-14:00 主旨报告	低内阻高电压超级电容器关键技术及其产业化	杨维清	西南交通大学
14:00-14:15 主旨报告	碳基超容高温、高压下“浮充稳定性”研究	卜永锋	江苏大学
14:15-14:30 主旨报告	超级电容器纳米限域电化学界面的先进表征与储能机制研究	葛康康	浙江大学
14:30-14:45 主旨报告	基于离子路易斯酸强度的 BSCF 氧空位调控及赝电容性能	刘 语	中国科学院工程热物理研究所
14:45-15:00 邀请报告	双锁协同策略构筑全气候水凝胶电解质及柔性超级电容器	罗勇锋	中南林业科技大学
15:00-15:15 邀请报告	超级电容器高能量密度提升思路	闫 健	合肥工业大学
15:15-15:30	茶歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：孔令斌&赵 健			
15:30-15:45 主旨报告	结构水植入与氧空位构筑：水系质子赝电容的缺陷化学调控机理研究	孔令斌	兰州理工大学
15:45-16:00 主旨报告	新型碳纳米带基超级电容器器件	王欢文	中国地质大学（武汉）
16:00-16:15 邀请报告	高倍率电容炭与耐高压电解液：超级电容器关键材料研发	郎俊伟	中国科学院兰州化学物理研究所
16:15-16:30 邀请报告	煤气化细渣分质产物硅/炭组分的储能利用	熊善新	西安科技大学

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

16:30-16:45 邀请报告	高性能超级电容器电极材料的构筑策略	赵 健	青岛科技大学
16:45-17:00 邀请报告	MXenes 限域结构调控与质子储能增强机制	田亚朋	郑州大学
17:00-17:15 邀请报告	超高功率碳基超级电容器关键材料设计与储能机制研究	张海涛	西南交通大学
17:15-17:30 邀请报告	面向固态柔性储能与传感器件的多维复合电极的构筑	黄 晖	四川农业大学
17:30-17:45 邀请报告	生物质基复合材料的设计及其在超级电容器领域的应用	熊传银	陕西科技大学
18:30-21:00	欢迎晚宴（地点：2 楼金奥厅）		

会场联系人：原长洲；Tel: 18254139051

**2026第十一届超级电容器及
相关化学电源关键材料学术会议**

第一分会场（双电层电容器/赝电容器 A 分会场）

2026 年 10 月 25 日（星期日） 13:30-15:30 （2 楼银杏厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：何孝军&陈 日			
13:30-13:45 主旨报告	煤沥青基碳材料的合成、结构及其性能研究	何孝军	安徽工业大学
13:45-14:00 主旨报告	铌基超级电容器研究和应用进展	张 川	中信金属股份有限公司
14:00-14:15 主旨报告	电火花加工金属氧化物基超级电容器及其电化学性能研究	陈 日	广东技术师范大学
14:15-14:30 邀请报告	木材胞腔限域空间定向孔结构调控及其储能性能研究	欧阳杰	邵阳学院
14:30-14:45 邀请报告	高负载量木基碳电极的设计合成及其电容性能研究	闫 冰	山西工程技术学院
14:45-15:00 邀请报告	赝电容电极材料及高安全储能体系研究	赵振云	浙江理工大学
15:00-15:15 邀请报告	高负载量兼高倍率性能镍钴锰氢氧化物电极材料的设计及制备	高明远	昆明理工大学
15:15-15:30 邀请报告	软硬异质结构多孔碳构建高载量锌离子混合超级电容器	杨晓敏	吉林大学
18:00-19:30	自助晚餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

会场联系人：原长洲；Tel：18254139051

**2026第十一届超级电容器及
相关化学电源关键材料学术会议**

第二分会场（金属/非金属离子电容器分会场）

2026 年 10 月 24 日（星期六） 13:30-17:30 （2 楼金奥 BC 厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：庞 欢&夏开胜			
13:30-13:45 主旨报告	高功率储能器件研制	刘江涛	贵州梅岭电源有限公司
13:45-14:00 主旨报告	纳米 MOF 设计合成及其功能化应用	庞 欢	扬州大学
14:00-14:15 主旨报告	锌离子混合电容器锰基正极材料的设计 及其储能机制研究	朱裔荣	湖南工业大学
14:15-14:30 主旨报告	亚纳米碳孔道的构筑与储能研究	夏开胜	中国地质大学（武汉）
14:30-14:45 主旨报告	高性能锂离子电容器负极材料的研究	张 熊	中国科学院电工研究所
14:45-15:00 主旨报告	基于超级电容的混合储能技术在电力系统的应用实践	刘佳璐	深圳市今朝时代股份有限公司
15:00-15:15 主旨报告	3D 打印储能材料与微纳器件	田晓聪	武汉理工大学
15:15-15:30	茶 歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：郑俊生&闫 俊			
15:30-15:45 主旨报告	生物质储能碳材料热化学转化技术:现状、挑战与发展趋势	郑志锋	厦门大学
15:45-16:00 主旨报告	电荷注入协同正负极界面耦合的高性能锂离子电容器性能优化策略	郑俊生	同济大学
16:00-16:15 主旨报告	MXene-Based Composites for Energy Storage Applications	闫 俊	北京化工大学
16:15-16:30 主旨报告	钠离子电容器关键材料与储能机制	邹国强	中南大学

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

16:30-16:45 主旨报告	干法电极在锂离子混合型电容器中的应用	孙现众	中国科学院电工研究所
16:45-17:00 主旨报告	纤维素衍生碳纳米纤维微观结构调控及电容性能研究	何水剑	南京林业大学
17:00-17:15 主旨报告	高比能钠离子电容产品开发	夏恒恒	上海奥威科技开发有限公司
17:15-17:30 邀请报告	基于体相与界面协同调控的宽温域柔性钠离子纤维储能器件研究	马福泉	西安工程大学
17:30-17:45 邀请报告	水系铵离子电容器及结构设计	陈 强	浙江工业大学
18:30-21:00	欢迎晚宴（地点：2 楼金奥厅）		

会场联系人：张圣亮；Tel：15866818601

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第二分会场（金属/非金属离子电容器分会场）

2026 年 10 月 25 日（星期日） 13:30-15:30 （2 楼秦淮厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：李永涛&孙金凤			
13:30-13:45 主旨报告	金属氢化物介导储能	李永涛	安徽工业大学
13:45-14:00 邀请报告	金属离子电容器电极材料结构设计和性能优化	孙金凤	济南大学
14:00-14:15 邀请报告	水系锌离子电容器锌负极界面功能化及性能研究	佟 浩	南京航空航天大学
14:15-14:30 邀请报告	金属有机骨架纳米配位调制电化学电容及构效关系	石乃恩	福建师范大学
14:30-14:45 邀请报告	Structural Design of 1T-MoS ₂ -Based Composites and Their Application in Electrochemical Energy Storage	朱文均	景德镇陶瓷大学
14:45-15:00 邀请报告	容量-动力学协同的双碳钠离子电容器	颜俊伟	中国地质大学（武汉）
15:00-15:15 邀请报告	沥青基分级多孔碳的精准构筑与超级电容器应用	张伟杰	重庆理工大学
15:15-15:30 邀请报告	双极性共价有机框架的可控构筑及其电化学性能研究	罗德荣	南京航空航天大学
18:00-19:30	自助晚餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

会场联系人：张圣亮； Tel: 15866818601

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第三分会场（锂/钠/钾离子电池 A 分会场）			
2026 年 10 月 24 日（星期六） 13:30-17:45 （2 楼金奥 D 厅）			
时间	题目	姓名	机构
主持人：夏 晖&崔鑫炜			
13:30-13:45 主旨报告	锰基正极材料设计用于锂/钠离子电池	夏 晖	南京理工大学
13:45-14:00 主旨报告	高能量密度动力电池关键材料与界面研究	崔鑫炜	郑州大学
14:00-14:15 主旨报告	低温快充锂离子电池磷基负极材料	金洪昌	中国科学技术大学
14:15-14:30 主旨报告	Synthesis, characterization, and application of wrinkled, in-plane porous few-layered V4C3 MXene enriched with oxygen functional groups	蔺 帅	内蒙古师范大学
14:30-14:45 主旨报告	功能化三维碳基集流体及其钾金属沉积行为	刘卯成	兰州理工大学
14:45-15:00 主旨报告	钾离子电池电解液关键材料及其电化学性能研究	聂 平	吉林师范大学
15:00-15:15 邀请报告	钙钛矿在锂硫电池中的应用研究	侯文烁	济南大学
15:15-15:30	茶 歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：程亚军&侯红帅			
15:30-15:45 主旨报告	锂电池浆料添加剂技术研究进展	程亚军	河海大学
15:45-16:00 主旨报告	碳点电化学储能应用	侯红帅	中南大学
16:00-16:15 主旨报告	钠离子电池关键材料与应用研究	吕建国	浙江大学

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

16:15-16:30 主旨报告	生物质基硬碳微观结构调控及其储钠性能	姜春海	厦门理工学院
16:30-16:45 主旨报告	高储钠性能钒基磷酸盐正极材料的掺杂改性及性能调控	孙志鹏	广东工业大学
16:45-17:00 邀请报告	环氧树脂基硬碳超微孔的可控构筑	段军飞	长沙理工大学
17:00-17:15 邀请报告	电池界面及溶剂化结构调控	成 方	昆明理工大学
17:15-17:30 邀请报告	基于第一性原理的锂离子电池碳负极材料结构设计与性能预测	胡华敏	长沙理工大学
17:30-17:45 邀请报告	多尺度催化中心设计及高效多硫化锂转化机制研究	肖 虹	济南大学
18:30-21:00	欢迎晚宴（地点：2 楼金奥厅）		

会场联系人：陈铎； Tel: 17808056608

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第三分会场（锂/钠/钾离子电池 A 分会场）

2026 年 10 月 25 日（星期日） 13:30-15:30 （2 楼莫愁厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：韩鑫鹏&魏传亮			
13:30-13:45 主旨报告	Info+: Information is Everything in Everywhere	晏超贻	电子科技大学
13:45-14:00 主旨报告	基于磷基界面化学及溶剂化壳层衍生界面重构的新能源存储	韩鑫鹏	广西大学
14:00-14:15 主旨报告	高功率电池关键材料创制	董武杰	上海交通大学
14:15-14:30 邀请报告	结构化设计的 MXene 材料制备及其电化学储能特性研究	杨兵军	中国科学院兰州化学物理研究所
14:30-14:45 邀请报告	锂硫电池的电极优化研究	魏传亮	合肥工业大学
14:45-15:00 邀请报告	锌金属负极人工固态电解质界面的微调	张天宇	浙江农林大学
15:00-15:15 邀请报告	过渡金属化合物纳米材料的结构调控与储锂性能研究	王旭旭	吉林师范大学
15:15-15:30 邀请报告	光辅助水系金属-空气电池	高明泽	内蒙古大学
18:00-19:30	自助晚餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

会场联系人：陈铎；Tel: 17808056608

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第四分会场（锂/钠/钾离子电池 B 分会场）

2026 年 10 月 24 日（星期六） 13:30-18:00（2 楼玄武厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：蒋江民&徐桂银			
13:30-13:45 主旨报告	极性可调有机二次电池	王恒国	东北师范大学
13:45-14:00 主旨报告	高安全电池隔膜	徐桂银	东华大学
14:00-14:15 主旨报告	锂离子电池高效化学预锂化技术	蒋江民	中国矿业大学
14:15-14:30 邀请报告	作者出版伦理(Publication Ethics for Authors)	郝蕊	曼迪匹艾（MDPI）
14:30-14:45 邀请报告	MXenes 基材料高效气固相合成及其电化学性能	刘洋	济南大学
14:45-15:00 邀请报告	金属酞菁配合物的结构设计及催化机制研究	李旭婷	济南大学
15:00-15:15 邀请报告	基于溶剂化工程与界面化学的高性能电池电解液设计	王春丽	中国科学院长春应用化学研究所
15:15-15:30	茶歇（地点：2楼廊厅）		
主持人：宰建陶&潘军青			
15:30-15:45 主旨报告	固废碳资源回收及其电荷储存和传输性能强化	潘军青	北京化工大学
15:45-16:00 主旨报告	储能电池全生命周期智能管理技术	陆海彦	吉林大学
16:00-16:15 主旨报告	硫基液流电池高效电极材料	宰建陶	上海交通大学

**2026第十一届超级电容器及
相关化学电源关键材料学术会议**

16:15-16:30 主旨报告	纳米材料界面工程在储能电池中的应用	董士花	山东科技大学
16:30-16:45 邀请报告	硅基负极高效预锂化研究	贺文杰	河南理工大学
16:45-17:00 邀请报告	钠离子电池硬碳负极材料及其界面	刘美琦	内蒙古大学
17:00-17:15 邀请报告	面向大尺寸碱金属离子存储的负极材料 设计与性能调控	王玉玉	山东科技大学
18:30-21:00	欢迎晚宴（地点：2 楼金奥厅）		

会场联系人：许真铭；Tel：17621621836

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第四分会场（锂/钠/钾离子电池 B 分会场）			
2026 年 10 月 25 日（星期日） 13:30-15:45 （2 楼玄武厅）			
时间	题目	姓名	机构
主持人：吴天景&郑艺伟			
13:30-13:45 主旨报告	锂离子电池硅负极预锂化的微观机制与过程控制	郑洪河	苏州大学
13:45-14:00 主旨报告	碳八环稠合噻吩结构的电化学储钠行为研究	吴天景	湘潭大学
14:00-14:15 主旨报告	MXene 基碱金属离子电池负极材料	孙 璇	山东省职业卫生与职业病防治研究院
14:15-14:30 主旨报告	如何回复审稿人意见(How to Respond to Peer Reviewers' Comments)	郝 蕊	曼迪匹艾（MDPI）
14:30-14:45 主 旨 报 告	锰基层状氧化物的结构设计及储锂性能研究	马扬洲	安徽工业大学
14:45-15:00 邀请报告	钠离子电池层状氧化物正极材料	李 勇	南昌大学
15:00-15:15 邀请报告	低温锂电池电解液设计与界面动力学调控	郑艺伟	济南大学
15:15-15:30 邀请报告	离域电子结构调控锂金属电池内部/界面离子传输动力学	陈 鹏	南京航空航天大学
18:00-19:30	自助晚餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

会场联系人：许真铭；Tel: 17621621836

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第五分会场（水系电池分会场）

2026 年 10 月 24 日（星期六） 13:30-17:45 （2 楼银杏厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：曹灏宏&胡 勇			
13:30-13:45 主旨报告	无机储能化学——高性能水系锌金属电 池关键材料设计及优化	熊胜林	山东大学
13:45-14:00 主旨报告	锌基水系电池二维材料设计与制备	曹灏宏	浙江工业大学
14:00-14:15 主旨报告	水系锌电池电极结构设计与界面微环境 调控	胡 勇	浙江农林大学
14:15-14:30 主旨报告	锌离子溶剂化环境与界面传输路径的多 尺度调控	韩丹丹	吉林化工大学
14:30-14:45 主旨报告	水系非金属离子电池的构筑及储能机制 研究	董升阳	南京信息工程大学
14:45-15:00 主旨报告	低温水系 LiTFSI 电解液研究	高 筠	华北理工大学
15:00-15:15 主旨报告	锌离子电池界面化学调控	黄 俊	贵州大学
15:15-15:30	茶 歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：雷志斌&姜 珩			
15:30-15:45 主旨报告	PEDOT 电极构筑及水系电池应用探索	雷志斌	陕西师范大学
15:45-16:00 主旨报告	水系锰金属电池电解液理性设计	姜 珩	吉林大学
16:00-16:15 主旨报告	水系锌离子电容器材料设计与开发	朱 凯	哈尔滨工程大学
16:15-16:30 邀请报告	水系储能电极与电解液协同调控——从 储能机理到高性能器件	张亚雄	兰州大学

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

16:30-16:45 邀请报告	锌离子电池阳极及电解质设计优化策略研究	赵景新	湘潭大学
16:45-17:00 邀请报告	面向实用化的锌负极稳定策略及软包电池验证	马志鹏	燕山大学
17:00-17:15 邀请报告	高性能水系储能电极材料的结构设计与构筑	田 真	中北大学
17:15-17:30 邀请报告	界面化学协同调控锌离子电池可逆性研究	王宏飞	浙江师范大学
17:30-17:45 邀请报告	水系锌离子电池锌负极界面设计	张 誉	中国海洋大学
18:30-21:00	欢迎晚宴（地点：2 楼金奥厅）		

会场联系人：董升阳；Tel: 15105160293

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第五分会场（水系电池分会场）

2026 年 10 月 25 日（星期日） 13:30-16:10 （2 楼珍珠厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：刘 宝&肖振宇			
13:30-13:45 主旨报告	高熵电解液的设计及电极/电解液界面 储能机制研究	刘 宝	江苏大学
13:45-14:00 主旨报告	可控刻蚀策略构筑 MOFs 衍生能源存储 转化材料	肖振宇	青岛科技大学
14:00-14:15 邀请报告	水系锌电池锌负极界面调控与优化	董琰峰	东北大学
14:15-14:30 邀请报告	改性钒基材料在水系锌离子电池正极中的 应用	刘月鑫	浙江农林大学
14:30-14:45 邀请报告	水系锌基电池中的界面调控研究	徐 杰	安徽工业大学
14:45-15:00 邀请报告	锌卤素电池电解液及电极材料设计	韩明明	浙江师范大学
15:00-15:10	茶 歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：张霏霏&宾 端			
15:10-15:25 主旨报告	高能量密度水系液流电池的研究与开发	张霏霏	吉林大学
15:25-15:40 主旨报告	功能聚合物涂层防护金属锌负极的界面 设计调控	宾 端	南通大学
15:40-15:55 邀请报告	水系锌离子电池界面稳定性调控研究	景明俊	湘潭大学
15:55-16:10 邀请报告	MOFs 基材料的水系电化学储能	贾德东	安徽工业大学
18:00-19:30	自助晚餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

会场联系人：董升阳；Tel: 15105160293

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第六分会场（储能安全技术&固态电池&氢能与燃料电池）

2026 年 10 月 24 日（星期六） 13:30-17:50 （2 楼莫愁厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：刘金平&隋艳伟			
13:30-13:45 主旨报告	一体化固态电池：从薄膜到体相	刘金平	武汉理工大学
13:45-14:00 主旨报告	PEO 基聚合物固态电解质改性策略研究	方 珊	南昌大学
14:00-14:15 主旨报告	基于超微孔 MOF 的二次电池电解液调控策略	常 智	中南大学
14:15-14:30 主旨报告	基于金属有机框架的固态电池电解质制备关键技术研究	隋艳伟	中国矿业大学
14:30-14:45 邀请报告	硫化物基全固态锂电池负极材料研究	李学磊	内蒙古工业大学
14:45-15:00 邀请报告	固态钠金属电池电解质设计及负极界面调控研究	石 欢	济南大学
15:00-15:15 邀请报告	层状硅酸盐矿物复合固态电解质的离子传输与界面调控	杨燕飞	中国科学院兰州化学物理研究所
15:15-15:30	茶 歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：王 蕾&向宇轩			
15:30-15:45 主旨报告	能源小分子电催化反应机制	王 蕾	黑龙江大学
15:45-16:00 主旨报告	锂金属电池中异质固体电解质界面的探究	向宇轩	西湖大学
16:00-16:15 主旨报告	电化学储能站火灾早期报警和高效灭火系统	王 伟	应急管理部上海消防研究所
16:15-16:30 邀请报告	储能站安全防控：从被动防护、主动预警到本征安全	肖 鹏	国网江苏省电力有限公司电力科学研究院

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

16:30-16:45 邀请报告	大电流碱性析氢的多尺度界面调控	包淑娟	西南大学
16:45-17:00 邀请报告	碱性电解水制氢隔膜材料的设计与制备	陈思帆	浙江大学衢州研究院
17:00-17:15 邀请报告	海水制氢阳极耐氯腐蚀界面调控与微环境工程研究	于 强	崂山国家实验室
17:15-17:25 口头报告	高熵合金纳米线中的局部配位有序性可增强 PEM 燃料电池中的氧还原催化性能	罗元艳	广西大学
17:25-17:35 口头报告	全固态硫化物电池硅基负极界面适配调控及 性能演变机制研究	姜思羽	南京航空航天大学
18:30-21:00	欢迎晚宴（地点：2 楼金奥厅）		

会场联系人：朱艳萍；Tel：18914730362

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

第七分会场（双电层电容器/赝电容器 B 分会场）

2026 年 10 月 24 日（星期六） 13:30-17:45 （2 楼秦淮厅）

时间	题目	姓名	机构
主持人：韩方明&王儒涛			
13:30-13:45 主旨报告	滤波超级电容器电极材料设计	韩方明	中国科学院合肥物质科学研究院
13:45-14:00 主旨报告	无序岩盐氧化物材料结构调控与逾渗赝电容储能机理研究	王儒涛	山东大学
14:00-14:15 主旨报告	晶态框架材料赝电容	张盼盼	华中科技大学
14:15-14:30 主旨报告	双电层界面结构调控对超级电容器高电压稳定性影响研究	苏方远	中国科学院山西煤炭化学研究所
14:30-14:45 邀请报告	超级电容器水系电解液设计	李 磊	西安交通大学
14:45-15:00 邀请报告	多维度关键技术协同构建纺织基储能-收集-传感自供电微系统	何 稳	安徽大学
15:00-15:15 邀请报告	锌离子混合电容器电极材料电子-界面多级结构精准设计与构效关系	黄海舰	合肥工业大学
15:15-15:30	茶 歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：魏湫龙&杨晨辉			
15:30-15:45 主旨报告	高倍率赝电容储钠机理与器件	魏湫龙	厦门大学
15:45-16:00 主旨报告	原子缺陷诱导的 MAX/MXene 电子重构及其储能增强机制	杨晨辉	西北工业大学
16:00-16:15 邀请报告	盐冰电解质基锌离子混合电容器	孙英伦	山东第一医科大学
16:15-16:30 邀请报告	贯通微孔炭结构的构筑及动力学增强机制	张 苏	中国石油大学（华东）

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

16:30-16:45 邀请报告	二维 MXene 层间限域水调控与中性质子 赝电容激活机制研究	徐帅凯	广西大学
16:45-17:00 邀请报告	柔性二维过渡金属硫化物的结构调控及 储荷机制研究	刘书德	东华大学
17:15-17:15 邀请报告	镍钴基过渡金属化合物电极材料设计制 备及超电性能研究	徐智慧	内蒙古工业大学
17:15-17:25 口头报告	激光诱导石墨烯电极的结构调控及应用	韦会鸽	天津科技大学
17:25-17:35 口头报告	多场耦合与非平衡碳化调控硬碳结构演 化及储钠行为	宋紫晴	南京航空航天大学
17:35-17:45 口头报告	导电聚合物基超级电容器电极材料的多 元构筑及储能机制	杨海敏	山东科技大学
18:30-21:00	欢迎晚宴（地点：2 楼金奥厅）		

会场联系人：丁兵；Tel: 18155689313

**2026第十一届超级电容器及
相关化学电源关键材料学术会议**

第八分会场（电化学储能研究生论坛）

2026 年 10 月 25 日（星期日） 13:30-16:50 （2 楼金牛厅）

时间	题目	姓名	单位
主持人：罗德荣			
13:30-13:40 口头报告	碱金属负极成核行为调控及其高倍率性能研究	李红艳	兰州理工大学
13:40-13:50 口头报告	激光刻蚀绝缘化与润湿性反转协同驱动 MXene 沉积用于高性能多孔 PLA 基平面微型超级电容器	马仲涛	天津科技大学
13:50-14:00 口头报告	β -Ni(OH)2 的可控构筑与电化学二极管整流机制研究	徐 瑶	兰州理工大学
14:00-14:10 口头报告	两性离子水凝胶电解质通过协同调控热力学与动力学特性实现锌金属电池的稳定性	李 娜	新疆大学
14:10-14:20 口头报告	水系电池关键材料的设计制备与电化学性能研究	房 栾	吉林师范大学
14:20-14:30 口头报告	双碳层协同稳定硅基负极的结构设计及其电化学性能研究	李 喆	兰州理工大学
14:30-14:40 口头报告	MXene 的可控制备与界面功能调控及其在锂硫电池中的应用	张梦杰	济南大学
14:40-14:50 口头报告	锂离子电容器过放电机理研究	张 晶	齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院
14:50-15:00 口头报告	高氧化态元素对超高镍层状正极材料的改性及机理研究	康立强	南昌大学
15:00-15:10	茶 歇（地点：2 楼廊厅）		
主持人：陈 鹏			
15:10-15:20 口头报告	石墨烯基高负载量电极的构筑及其电容行为研究	杨添铄	天津科技大学

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

15:20-15:30 口头报告	硬碳的微结构优化在钠离子储能器件中的应用	贾民裕	济南大学
15:30-15:40 口头报告	三维碳管网格的晶化工程：面向负载耐受型交流线路滤波电容器	李 佩	中国科学院合肥物质科学研究院
15:40-15:50 口头报告	碳包覆硫/氧化物电极的稳定性与自放电性能研究	周 强	中国矿业大学
15:50-16:00 口头报告	碳纤维增强夹层结构电池拉伸载荷下的力-电性能	朱星蓉	南京航空航天大学
16:00-16:10 口头报告	TiO ₂ 嵌入式多孔 Ti ₃ C ₂ T _x 薄膜的低迂曲度离子传输与超快超级电容器	蒋素侠	中国科学院合肥物质科学研究院
16:10-16:20 口头报告	树皮状碳包覆的氧化钒在碳纤维上原位生长实现高性能结构储能	徐 昕	南京航空航天大学
16:20-16:30 口头报告	短波红外电致变色共价有机框架超级电容器用于非侵入式储能水平可视化	钱蕴知	东南大学
16:30-16:40 口头报告	高性能锂离子电容器 Co ₃ O ₄ 负极结构调控	张 乾	齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院
16:40-16:50 口头报告	煤基硬碳材料的可控制备及高值化储钠研究	程封翠	中国矿业大学
18:00-19:30	自助餐（地点：60 楼 ADD 厅）		

会场联系人：罗德荣；Tel: 15927324290

备注：所有会场 PPT 比例统一为 16 : 9；

大会最终日程以会议当天各会场门口摆放的易拉宝为准！

2026第十一届超级电容器及 相关化学电源关键材料学术会议

学术墙报

2026 年 10 月 23-25 日 13:30-16:50 (金奥厅序厅)

序号	题目	姓名	单位
主持人：罗德荣			
01	分子水态调控实现-50~80℃全气候水系锌电储能	李楠	聊城大学
02	Optimizing Lithium - Ion Storage in Single - Crystalline Cu ₂ Nb ₃ AsO ₈ Anode via Aliovalent In ₃ +Doping: Enhanced Diffusion Kinetics and Cycling Stability Toward Lithium - Ion Capacitors	江浩	济南大学
03	Machine Learning and Theoretical Computation Synergy Advancing Halide Electrolytes Toward All-Solid-State Lithium Batteries: Recent Advances, Challenges, and Perspectives	叶家辉	济南大学
04	π - π Stacking-Enabled Stable Carbonyl Small-Molecule Cathodes for High-Performance Aqueous Proton Batteries	秦玮	南通大学
05	全氟丁基磺酰氟构筑氟化界面层抑制锌枝晶和副反应的研究	曲会鑫	南京航空航天大学
06	Ba、N 双掺杂二氧化锰正极的制备与储锌性能	吴玲	南京航空航天大学
07	相变-炭化耦合制备黑液木质素自支撑泡沫炭电极	李晓阳	齐鲁工业大学
08	CoNi-MOF/聚苯胺复合材料及电化学性能研究	王舒豪	山东科技大学
09	磺基琥珀酸掺杂 Ce-Uio-66/聚吡咯复合材料制备及电化学性能研究	周传盛	山东科技大学
10	基于 rGO 基纳米材料构建 S 型 TiO ₂ /In ₂ S ₃ 异质结用于光生电荷分离调控	高艳旎	山东科技大学
11	NiCo-MOF/聚吡咯复合柔性电极材料的制备及电化学性能	王乐飞	山东科技大学

2026第十一届超级电容器及
相关化学电源关键材料学术会议

12	N 掺杂碳纳米管/多孔碳复合柔性电极的构筑及电 化学性能	张 雨	山东科技大学
13	分级排列 rGO/MXene 泡沫的构筑及能量转换与 利用	王 娜	山东科技大学
14	石墨烯基异质结构界面调控及光热能量转换	武玉璐	山东科技大学

会务指南

1 会议期间餐饮安排:

10月23日自助晚餐就餐地点: “酒店60楼ADD厅”;

10月24日自助午餐就餐地点: “酒店60楼ADD厅”;

10月24日“南京航空航天大学欢迎晚宴”就餐地点: “酒店2楼金奥厅”;

10月25日自助午餐就餐地点: “酒店60楼ADD厅”;

10月25日自助晚餐就餐地点: “酒店60楼ADD厅”;

2 大会全体嘉宾合影地点、茶歇、学术墙报、企业展台、嘉宾交流区域:

大会全体嘉宾合影地点: 酒店2楼金奥厅;

茶歇休息区域: 酒店2楼廊厅;

学术墙报展示区域: 酒店2楼廊厅;

企业展台区域: 酒店2楼廊厅;

嘉宾交流区域: 酒店2楼廊厅;

说明: 茶歇期间各参会代表可自行参观企业展台、墙报展示及相互交流;

有学术墙报(海报)展示的参会代表请将墙报(海报)打印后自行带到会场墙报展示区域摆放。

3、参会期间若有问题请与组委会工作人员取得联系或及时关注会议微信群发布的会议信息等;

会务联系人:

徐朝斌 18726921720 (微信同号)

张校刚 13451823573 (微信同号)

郑永坚 18859279980 (微信同号)

CoSe₂ 纳米棒分级纳米结构的设计合成及其电化学性能研究

楚怡丹, 张有娟, 杜卫民*

安阳师范学院化学化工学院, 河南安阳, 455000

*Email: dwmchem@163.com

采用水热合成法在泡沫镍基底上实现了CoSe₂纳米棒分级纳米结构的原位构筑。结构表征表明, 所得材料呈现出一维@一维(1D@1D)的核壳状分级纳米结构: 中心CoSe₂一维核心直径约1 μm , 长度约5 μm ; 外围CoSe₂纳米棒直径为50-150 nm, 长度约500 nm。此类薰衣草状分级纳米结构致密生长于泡沫镍金属基底上, 形成了贯穿始终的电子传输网络, 并能有效缓冲材料在充放电循环过程中的体积膨胀/收缩, 为材料优异的电化学稳定性提供了坚实的结构支撑。因此, CoSe₂的1D@1D纳米棒分级纳米结构在2 A g⁻¹的电流密度下展现出高达1796 F g⁻¹的质量比容量, 且经过6000次充放电循环后, 表现出优异循环稳定性。

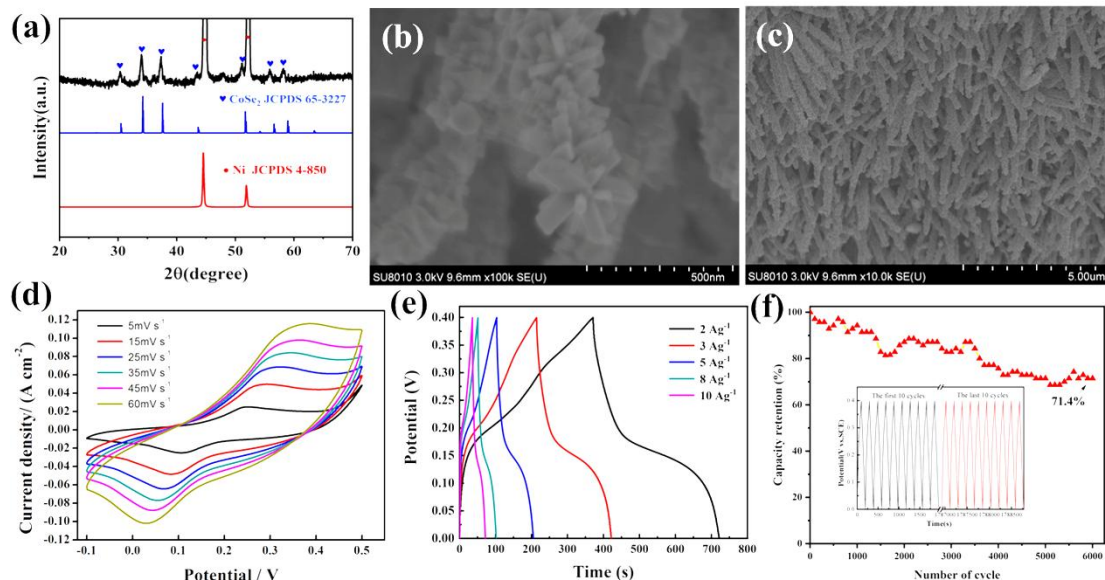


图 1 (a) XRD图谱, (b, c)扫描电镜图像; (c)不同扫描速率下的循环伏安曲线, (d)不同电流密度下的恒电流充放电曲线, (e) CoSe₂棒状分层纳米结构的循环性能测试(插图显示了前10次和后10次循环的充放电曲线)。

关键词: CoSe₂; 纳米棒; 分级结构; 电化学储能

参考文献:

- [1] J. Kang, A. Hirata, L. Kang, X. Zhang, Y. Hou, L. Chen, Fujita, K. Akagi, M. Chen, Angewandte Chemie International Edition, 2013, **52**(6): 1664-1667.
- [2] Y. Xu, X. Huang, Z. Lin, X. Zhong, Y. Huang, X. Duan, Nano Research, 2013, **6**: 65-76.
- [3] H. L. Wang, H. S. Casalongue, Y. Y. Liang, H. J. Dai, Journal of the American Chemical Society, 2010, **132**(21): 7472-7477.

活化生物炭应用于超级电容器的研究进展：孔隙结构与表面化学

缪皓晨¹，焦仁宝^{1*}，崔波^{2,*}

佳木斯大学机械工程学院，黑龙江 佳木斯 154007

通信作者 焦仁宝（1980—）男，副教授，jiaorenbao@163.com

摘要：生物炭是以生物质为原料经碳化工艺制得的碳材料，凭借来源丰富、成本低廉及环境友好等优势，成为超级电容器电极的理想材料。然而未改性/未活化生物炭因孔隙堵塞、表面官能团单一导致比表面积低、导电性较差，难以满足高性能储能需求。活化改性因此成为提升其电化学性能的核心手段。本文系统梳理物理活化、化学活化及复合改性等策略对孔径分布、碳骨架形貌及表面化学调控，基于近五年文献报道的电化学性能数据对比分析。

制备与活化层面，以 KOH 为代表的化学活化凭借钾蒸气刻蚀、钾离子层间嵌入及含氧官能团引入的协同作用，造孔能力最为突出，相应体系比电容多集中于 236~360 F·g⁻¹ 区间，普适性良好；而单一 NaOH 活化的石榴皮比表面积仅 21.25 m²·g⁻¹、比电容 265.2 F·g⁻¹，表明单一碱活化剂造孔能力有限，需借助杂原子掺杂补偿。物理活化工艺清洁，但温度高、能耗大、炭产率低，椰壳经 CO₂ 活化后比表面积由 34.98 m²·g⁻¹ 提升至 1261.45 m²·g⁻¹，比电容提升约 120 倍。

值得注意的是，比表面积并非比电容的唯一决定因素。榛子壳活化后比表面积达 3374 m²·g⁻¹ 而比电容仅 290 F·g⁻¹，花生壳比表面积仅 277.21 m²·g⁻¹，比电容却达 273 F·g⁻¹。二者性能接近而比表面积相差逾十倍，表明过高的比表面积若主要由微孔贡献，受限于离子传输与传质阻力，并不能线性转化为电容贡献；相反，具备微、介、大孔分级贯通结构的材料（椰壳活化碳，1261.5 m²·g⁻¹，345 F·g⁻¹）兼具更优的电容与倍率性能。因此，孔径分布的合理性较比表面积的绝对值更为关键。

然而，现有报道的性能数据普遍缺乏可比性。文献在性能评价上存在系统性差异：比电容的测试电流密度并不统一，涵盖 0.1、0.5 及 1 A·g⁻¹ 三类基准，而比电容具有强烈的倍率依赖性，不同电流密度下的数值无法直接比较；电解液体系差异同样显著，包括 KOH、H₂SO₄ 及 ZnSO₄ 等碱性、酸性与中性体系，将直接改变双电层结构与离子传输行为；指标量纲不统一，循环寿命考核跨度极大，从 3000 次至 100000 次不等，致使最终电容保持率失去横向参照意义。上述差异表明该领域尚未建立统一的材料表征与器件评价规范，这是性能数据难以横向对比的重要原因，建立涵盖孔结构表征、电解液体系、电流密度基准与循环考核条件的标准化测试协议，应成为下一阶段的基础性工作。

综上，当前研究仍多停留于实验室阶段，面临制备工艺敏感性强、批次稳定性差与规模化适配性不足等瓶颈。未来或可通过数值模拟优化反应器内热解、碳化的传热传质和电化学模块的反应耦合，结合材料学大模型或人工智能模拟其在工业领域的放大应用，以压缩研发周期，推动生物炭基电极从实验室走向工业化。

关键词：生物质；生物炭；超级电容器；活化改性；电化学

作者简介：

缪皓晨，男，1999.12，四川省成都市，汉，硕士研究生在读，研究方向：生物质基超级电容器碳材料。

通讯作者^{1*}：

焦仁宝（1980-）男，黑龙江省绥化，汉，博士研究生，副教授，研究方向：储能材料。

通讯作者^{2*}：

崔波（1994-）男，黑龙江省绥化，汉，博士研究生，副教授，研究方向：储能材料。

基金项目：黑龙江省教育厅基本科研业务费科研项目（2023-KYYWF-0567）

黑龙江省教育厅基本科研业务费项目（2023-KYYWF-0570）



全球能源体系面临清洁转型与稳定供给的双重战略挑战。国际能源机构(IEA)《世界能源展望》指出^[1],在既定政策情景下煤炭、石油与天然气需求预计于2020s~2030s年代先后达峰,化石资源主导的能源与化工模式同时面临资源约束与碳排放约束。表明以化石资源为主导的能源消费与化工发展模式,不仅面临资源枯竭的硬约束,其温室气体过量排放更成为可持续发展的核心瓶颈。太阳能、风能是能源转型的核心方向,但其固有的间歇性与出力波动性严重制约规模化消纳^[2]。

为破解传统储能设备在短时大功率补偿与动态响应能力上的局限,标准石油公司(Sohio)率先提出高比表面积碳材料的双层电容器专利。日本 NEC 公司获得该技术授权,并于1979年实现全球首次商业化应用,推出“超级电容器”产品,由此开启其规模化产业进程^[3,4]。该技术的性能与上述需求高度契合:功率密度达 $1000\sim 10000\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$,循环寿命超10万次且极不易衰减,且双电层物理储能机制使其具备优良过压容忍性与毫秒级大电流充放电能力,能为可再生能源的规模化消纳提供关键技术路径^[4]。

电极材料作为决定超级电容器综合性能的核心要素,直接制约其成本竞争力与环境可持续性。主流的石油基、煤基活性炭虽电化学性能稳定,但存在成本偏高、依赖不可再生资源、环境负荷大等问题,与低碳可持续目标相悖。因此开发兼具低成本、高倍率性能及生物质兼容性的新型电极材料,已成为突破超级电容器技术的核心命题。

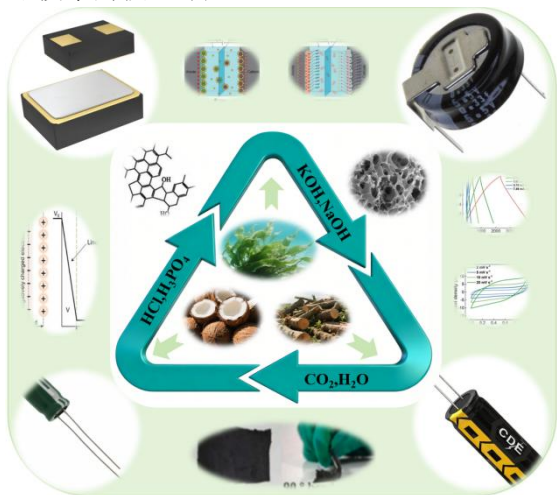


图1 生物炭电极材料的制备路径、结构特征与应用

Fig. 1 Preparation routes, structural characteristics and applications of biochar-based electrode materials

基于可再生能源规模化消纳对高性能储能器件的迫切需求,本文围绕制备超级电容器电极的生物炭性能机制展开系统论述,并重点阐述以下三大要素:(1)生物炭的制备路径;(2)碳材料的活化改性;(3)碳材料微结构及其电化学性能构效。综述按制备流程逻辑,首先概述生物炭的制备优势与方法以明确其基础特性;其次探讨碳材料的孔隙结构与储能机制,搭建碳材料微观结构与储能性能之间的内在联系;最后

重点关注不同活化方式改性生物炭的性能表现及其近期研究方向,此环节直接关联生物炭的实际储能应用效果,旨在为该领域的后续研究提供参考(图1)。

1 生物炭的制备

近年来,生物质衍生的碳材料凭借其资源丰度、成本效益及环境友好特性,在电化学储能与催化领域引发广泛关注。与其他碳材料相比,生物质经炭化、活化修饰制得的多孔碳材料具备孔隙度可调控、表面功能丰富的优势,为超级电容器电极设计提供了新思路。本节将系统解析生物炭的制备优势与技术路径。

1.1 材料优势与挑战

超级电容器储能电极材料的研究热点集中于金属氧化物、碳基纳米材料、导电聚合物及过渡金属氮化物和碳化物等,该类材料现占据商用超级电容器市场近80%的份额^[5]。但此类材料尤其是碳基纳米材料(碳纳米管、富勒烯、石墨烯等)的制备面临严重挑战:其原料多以沥青等化石燃料基有机前驱体、间苯二酚与苯酚等有机分子,需通过石墨电弧放电、化学气相沉积等^[6]复杂高耗能的工艺实现,不仅制备成本居高不下(均价约 $93.4\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$),碳排放强度高(每千克碳材料预排碳 8.34kg)^[7]。这种高度依赖化石燃料衍生物的制备路径不仅对生态环境产生不利影响,还因缺乏良好的成本效益而难以规模化工业生产,因此亟须开发更环保、经济的制备工艺来推动传统碳基电极材料的优化升级。

针对传统碳基电极材料的制备工艺复杂、应用性能受限等挑战,生物质材料的规模化开发与利用为高性能碳基电极材料的研发提供了全新解决方案。生物质即源于各类生物体的天然有机物质,涵盖植物、动物及其衍生物与残余物等品类,作为碳基电极材料前驱体,相较化石基原料具备多重核心优势:其一,工艺简便,无需复杂精炼,仅热解等简易绿色工艺即可直接转化原料为碳基材料;其二,原料来源广泛、制备成本低廉,易实现规模化收集;其三,本征结构与性能优势显著,天然多孔结构、丰富的表面官能团与良好的导电特性,是碳基电极材料的理想前驱体^[8]。更关键的是,其制备应用可实现生物质资源化转化,契合我国“双碳”愿景。以木质生物质为例,其燃烧排碳与生长吸碳接近,可实现碳中和;但若将其应用于制造电容电极等长期产品,过程会转为碳负排放。因植物生长吸碳,碳被转化为电容器内炭质材料时,会以固态形式储存而非通过燃烧释放到大气中,达到碳吸收到碳封存的生态闭环^[9]。

尽管优势明显,生物炭基电极材料仍面临碳骨架坍塌、电极粘结成型困难以及官能团调控难度大等挑战^[10]。生物质基碳材料复杂结构易导致孔径分布不均、表面性质差异及结构缺陷,影响其在超级电容器中的性能表现和可重复性;原料差异、制备工艺及合成方法的选择,均会造成材料性能的波动,限制其产业化应用。因此需通过对制备工艺的精细优化、原料预处理的标准化及全流程的严格质量控制,保障生物炭基电极材

料的性能稳定性，推动其从实验室走向实际。

1.2 制备途径

生物炭的制备依托碳化、活化两大核心工艺体系，包含热解碳化、水热碳化、物理活化、化学活化等成熟技术路线，不同方法的工艺特性、产物结构及应用适配性差异显著（表1）。其中热解法因工艺可控性强、产物孔结构易调控，成为生物质炭化制备中应用最广泛的技术手段。热解法以限氧、高温为核心条件，辅以惰性气体持续吹扫，通过生物质的热化学分解反应制备生物炭，反应温度分为120~300℃低温、300~800℃中温以及800~1300℃高温三大区间^[11]。

表1 碳化/活化方法制备生物炭的优势与挑战

Table. 1 The advantages and challenges of preparing biochar through carbonization/activation methods

碳化方式	核心优势	当前挑战	参考
热解碳化	●可控孔隙结构 ●高碳产率 ●强亲水性 ●温和工艺条件	●处理时间长 ●高能耗 ●多副产物 ●低碳产率	[12]
水热碳化	●多功能性	●耗时 ●孔隙有限	[13]
物理活化	●高孔隙度 ●孔隙分布可控 ●环保	●耗时 ●活化时间长 ●表面功能化有限	[14]
化学活化	●高孔隙度 ●表面多功能性 ●比表面积增加 ●活化速度快	●扩展性有限 ●成本较高 ●潜在化学残留 ●反应条件苛刻	[15]

不同温度区间的热解工艺，其适配场景与产物特性截然不同：低温区间内200~300℃的热解过程也常被称作烘焙，侧重提升产物热值，主要用于生物质燃料制备；300~800℃中温是生物炭热解活化的主流温度

范围，制备的生物炭孔结构发育适中、表面官能团丰富，广泛应用于污染物吸附及电化学储能领域；800~1300℃高温则多耦合气化工艺，主产物为氢气、甲烷等可燃气体。对于同种生物质原料，可通过协同调控生物炭制备流程中的热解温度与活化剂实现对材料的比表面积、孔隙率等关键结构指标的调控^[16-18]（图2）。

生物质热解反应机制具有显著的温度/速度依赖性。250~500℃初级热解阶段是生物质热解的核心过程，主要生成无定形碳。此阶段挥发性成分脱除，木质纤维素发生脱水、脱氢和芳构化反应，通过羧基脱羧酮化、醚键断裂氧化重排及木质素芳构化的内部氧化还原，生成酮羰基、醌基等C=O官能团，对应热解过程主要质量损失阶段。当热解温度升至500℃以上时，无定形碳发生非热解性分解反应，质量损失幅度显著降低；脂肪族C=O部分脱除，而与芳香环共轭的稳定C=O成为核心含氧官能团，石墨化进程虽限制部分缺陷位点，但不影响C=O的留存^[19-20]。此外，依据热解速率差异可分为快速与慢速两类，其产物导向性明显：快速热解更易提取油脂、焦油等液态产物，慢速热解以炭质产物生成为导向，更适配生物炭制备^[21]。

除热解碳化外，水热碳化、物理活化与化学活化也是生物炭制备与改性的重要方法：水热碳化以水为反应介质，在中低温、高压条件下实现炭化；物理活化通过水蒸气、CO₂等氧化性气体在高温下对炭材料进行刻蚀造孔；化学活化分为一步法与两步法，利用KOH、H₃PO₄等化学试剂使生物质发生催化脱水、氧化刻蚀反应调控孔结构^[12-15,22]。

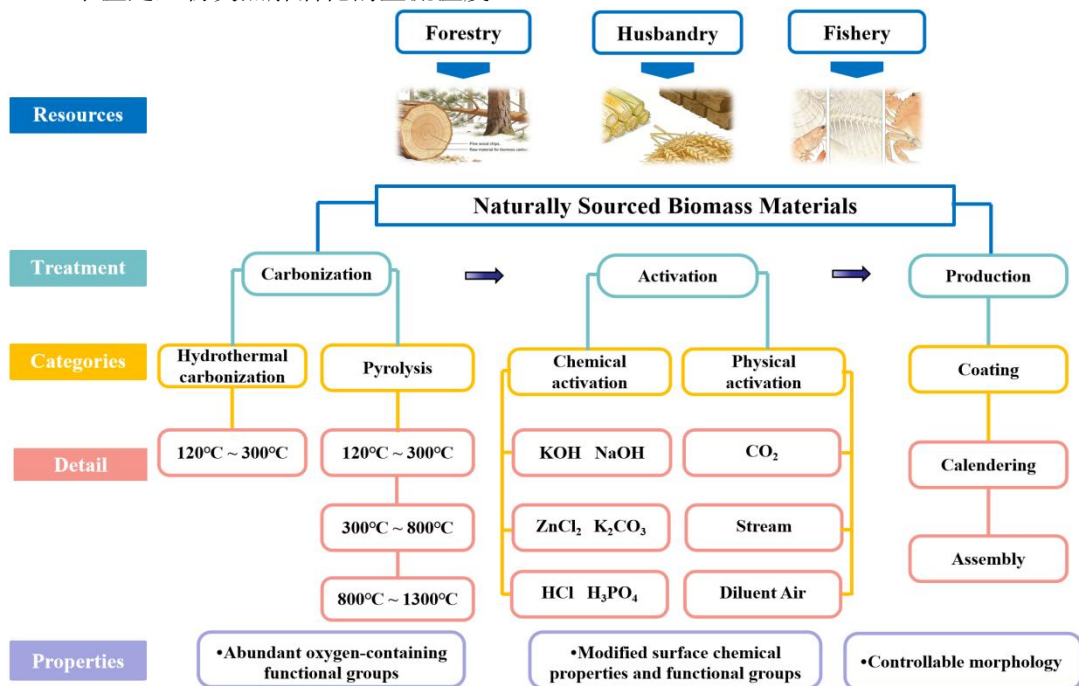


图2 生物质制备生物炭储能材料的技术途径

Fig. 2 The technical approaches for preparing biochar energy storage materials from biomass

2 孔隙结构与储能机制

2.1 碳骨架孔隙结构与维度特征

生物炭的储能通常与生物炭材料天然生物组织的多尺度结构密切相关，由特定比例微孔（<2nm）、介孔（2~50nm）和大孔（>50nm）集成的互穿多孔网络

是其储能结构的基础。从维度分类看，承载各孔隙材料的维度结构特征与储能优势差异明显(表 2/图 3)。

零维碳材料结构常呈“点状”。以碳纳米球、碳点等通过聚集或堆叠形成大量空隙，这些空隙提供了充足的电荷存储空间，显著增加材料的比表面积，使得材料在吸附、储能和催化应用中具有显著优势^[23]。

一维结构可视作零维碳球纳米尺度下的“点线”扩展。而这些材料如碳纤维、碳纳米管等，相比于零维材料，由于碳纤维具有良好的线性几何形态，可以形成良好的导电通路以及离子迁移路径，从而提高其导电性并且增加其机械柔韧性和结构稳定性^[24]。

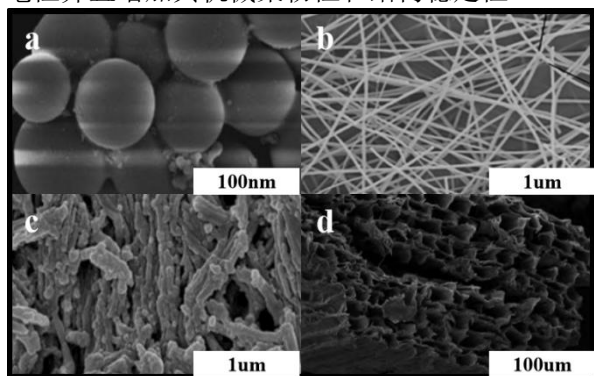


图3 零维~三维的生物炭微观结构及孔隙形貌^[23~26]

Fig.3 Microscopic structure and pore morphology diagrams of zero-dimensional to three-dimensional biochar

二维结构具有片状形态特征，在一维长度扩展基础上进行横向尺寸延伸。这类材料如石墨烯及类石墨烯纳米片，呈多孔片状结构，因而离子吸附表面积巨大，可为赝电容反应提供活性边缘。薄层结构低离子扩散阻力、高电荷存储能力的特性，也使其成为高能量密度和快速充放电应用的理想选择^[25]。

三维材料结构表现为相互连接的分层多孔网络，可视作二维材料的片层叠加，包括碳泡沫、气凝胶及多孔碳。紧密连接的多片层孔隙网络带来连续的离子传输通道，能显著提升离子扩散速度和电荷转移效率，从而提升其电化学性能^[26]。

表 2 不同维度生物炭材料的结构与核心优势^[27]

Table. 2 The structures and core advantages of biochar materials from different dimensions

材料维度	核心优势
零维(碳球、纳米颗粒)	●比表面积高，电荷分布均匀，活性位点丰富 ●球形形貌缩短离子扩散距离，快充性能优异
一维(碳纤维、碳纳米管)	●高长径比，提供电子传输通道，导电性优 ●机械柔韧性强，适配柔性器件
二维(碳纳米片、类石墨烯)	●片层结构暴露大量活性边缘，高赝电容性能 ●纳米级厚度，离子扩散阻力极小
三维(多孔网、气凝胶、碳团)	●分级孔结构(大、介、微)，兼顾传输存储 ●互联结构提供通路，兼顾导电性与稳定性

2.2 储能机制与性能测试

基于生物炭材料的超级电容器，可按电荷存储机制分为双电层电容(EDLC)、赝电容和混合型三类(图 4A)。其中，双电层电容是物理储能行为，表现为外电场作用下电极中的相反电荷离子在电极表面形成分

为紧密层(Helmholtz)以及扩散层(Gouy-Chapman)的亥姆霍兹双电层，利用静电作用吸脱附实现电荷存储。赝电容的能量存储/释放机制则依赖电极材料表面的类法拉第反应。区别于电池，该氧化还原反应仅发生在边界区域，因而可通过在界面中引入金属氧化物或导电聚合物掺杂增强赝电容性能。混合型超级电容器为不对称结构，结合 EDLC 双电层机理单电极与赝电容、电池型氧化还原、脱嵌机理的单电极，兼具高功率密度与能量密度^[28]。

超级电容器电化学性能的测试方法包含循环伏安法(CV)、恒电流充放电法(GCD)、电化学阻抗谱(EIS)、循环稳定性测试以及倍率性能测试，与锂离子电池测试体系近似。Molahalli 等人^[29]制备的芒果核生物炭基超级电容器为例(图 4B)：三电极体系下，CV 曲线的形状、积分面积判断电极的双电层电容行为与电荷存储能力；GCD 曲线以放电时间计算电极的比电容，其曲线线性与对称性可证明材料的双电层电容特性，规则三角形状可证明材料具备良好的电容可逆性；EIS 通过 Nyquist 图、Bode 图分析电极的串联电阻、电荷转移电阻、Warburg 阻抗等参数，判定双电层电容具体电化

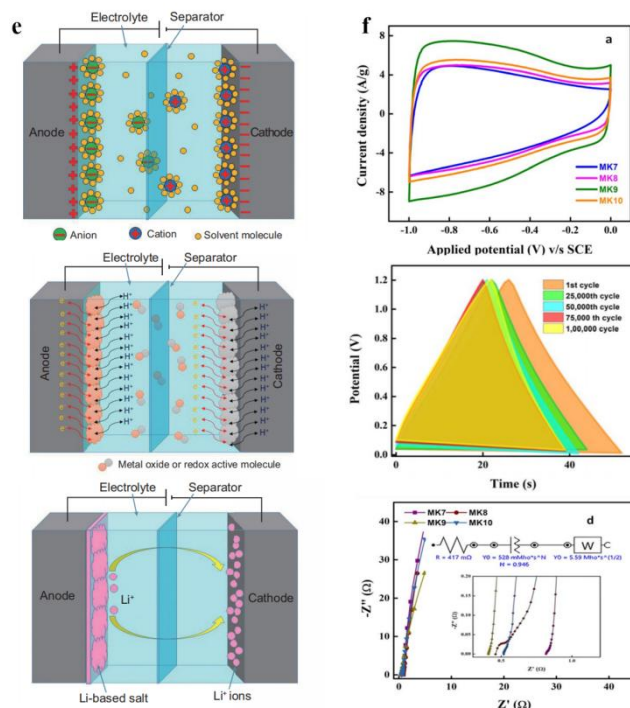


图 4 超级电容器的电荷存储机制及电化学性能测试方法^[28~29]

Fig. 4 The charge storage mechanism of supercapacitors and the testing methods for their electrochemical properties

3 活化改性方法

碳化所得的初级生物炭存在材料孔隙不足、孔道易被焦油、焦炭与灰分堵塞等问题，致使比表面积偏低、表面化学惰性强，难以满足超级电容器对高比表面积、丰富活性位点的应用要求。因此，需通过活化、模板法、杂原子掺杂或缺陷工程等手段改性处理，疏通刻蚀孔道、优化孔结构与表面特性。其中活化是提升生物炭电化学性能的核心手段，目的在于增大比表

面积、优化孔容与孔径分布并实现表面功能化，进而提升材料的电化学性能。本节将主要探讨化学活化与物理活化两种主流活化方法及近期案例。

3.1 物理活化

物理活化又称“干法活化”，常为两步法工艺：先在惰性气体（ N_2/Ar ）氛围下 $300\sim 900^\circ C$ 碳化前驱体，去除挥发分并形成生物炭前驱体；再在 $800\sim 1200^\circ C$ 下通入氧化性气体（ CO_2 /水蒸气）进行活化，通过气体对炭材料的氧化刻蚀作用拓展原有孔隙，生成新孔，最终获得多孔活性炭。工艺依托依赖气体与碳的非催化反应，工艺清洁、无二次污染，但活化温度高、耗时久、能耗高且炭产率低^[30]。

例如，Alves 等人^[31]在 $600^\circ C$ 下利用 CO_2 进行物理活化，将废弃椰壳制备为生物炭。碳材料最终比表面积为 $1261.45 m^2 \cdot g^{-1}$ ，而其活化前比表面积仅为 $34.98 m^2 \cdot g^{-1}$ ，增长约 36 倍。活化后孔容分布中微孔占比也由活化前的 58.1% 上升至 67.04%，进而使得 $5 mV \cdot s^{-1}$ 测试下的比电容参数由未活化时的 $2.52 F \cdot g^{-1}$ 增长至活化后的 $302.12 F \cdot g^{-1}$ ，增长近 120 倍(图 5)。此外，现有技术可利用锅炉排放的高温废气作为物理活化气体制备高比表面积多孔碳，实现余热回收、废气利用的目的。碳源甘蔗渣衍生的多孔碳表现为 $366.32 m^2 \cdot g^{-1}$ 的比表面积、 $0.105 cm^3 \cdot g^{-1}$ 的总孔容与 $2.51 nm$ 的平均孔径且其孔隙多为介孔；但废弃气体的使用也易导致碳材料的污染^[32]。

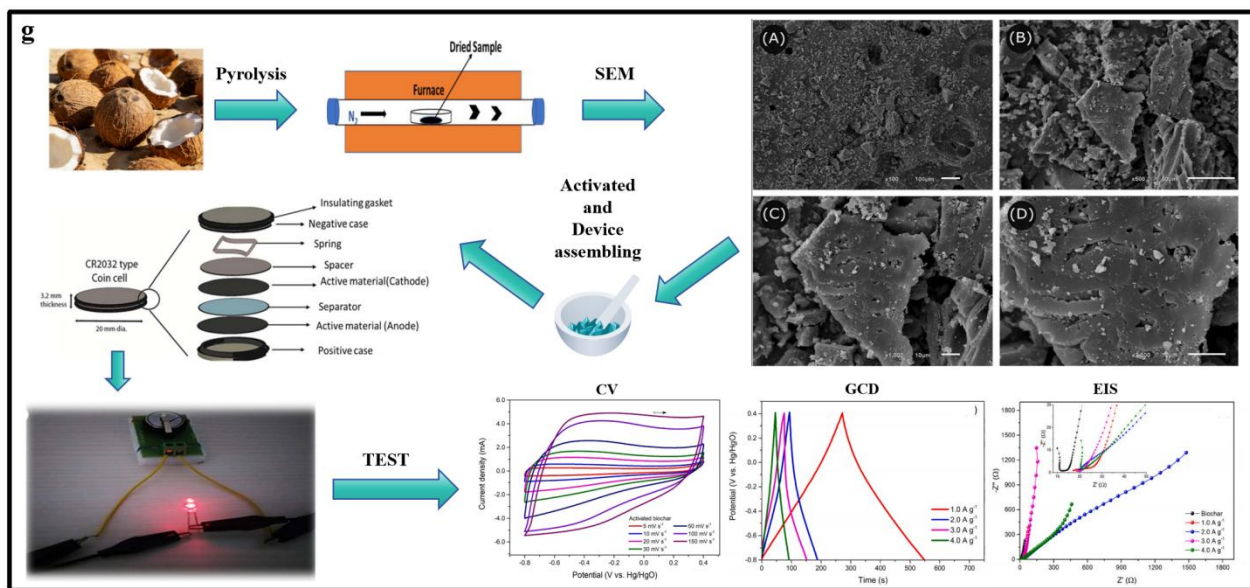


图 5 椰壳基活化生物炭的制备及超级电容器组装与性能测试流程^[31]

Fig. 5 Preparation of coconut shell-based activated biochar and the assembly and performance testing process of supercapacitors

3.2 化学活化

相较于物理活化对气氛要求严苛、能耗高的局限，化学活化因操作便捷性成为更常见的研究选择。该法亦称“湿法活化”，通过将碳前驱体与化学活化剂（如 KOH 、 $NaOH$ ）混合，利用一步法（同步碳化与活化）或两步法（先碳化后活化）实现孔隙调控。活化剂通过催化脱水、氧化刻蚀及模板导向等作用重构孔隙结构(图 6(a))，同步引入杂原子或构建表面官能团，且不同活化剂可诱导差异化多孔结构(图 6(b))^[33]。

例如，I.Alouiz 等人^[34]利用 $0.1 mol \cdot L^{-1}$ $NaOH$ 处理橄榄渣(图 6c)，活化后 D 样呈现更丰富的多孔及片状结构，表面粗糙程度更高、孔隙更丰富，显著区别于未活化的 A/B/C 试样的致密颗粒团聚态，其突出孔隙连通性印证了刻蚀与造孔效应；XRD 图谱中(002)尖锐化表明结晶度提升，Raman 光谱 ID/IG 比值降低则揭示类石墨化程度增高及缺陷减少，凸显活化与高温碳化的协同增效机制。Li 等人^[35]以榛子壳为原料经 KOH 活化制备 N 掺杂分级多孔碳：SEM 图像显示活化后形成微、介、大孔分级贯通结构（表面粗糙、孔隙密集），而原始生物炭仅存稀疏微孔且呈致密团聚态（表面光滑、无连续孔道）；XRD 图谱显示活化前后均呈现无定形碳的宽化(002)峰，但活化后样品因 KOH 刻蚀造

孔与 N 掺杂引入更多缺陷致使峰形更宽，佐证化学活化对无序结构的定向调控。

活化剂浓度同样决定生物炭孔结构与性能。例如， KOH 活化处理可在碳骨架表面构建— $COOH$ 、— OH 、 $C=O$ 等含氧官能团，此类官能团通过可逆氧化还原反应赋予材料赝电容贡献。其中低浓度 KOH 仅轻微刻蚀碳骨架表面，形成孔隙以微孔为主；高浓度 KOH 则因在热活化中氧化还原生成的 K_2CO_3 引起的 K 蒸汽刻蚀、K 离子嵌入石墨烯层间以破坏堆叠片层，最终形成微/介孔交叉错层分布界面^[36]。

同物理活化相比，化学活化温度低、耗时短、炭产率高、比表面积与孔隙结构可控性强，但 KOH 、 H_2SO_4 等腐蚀性化学活化剂会对环境、炉具及制造设备造成损害，且存在潜在化学残留。针对这类化学活化剂的弊端，环保型活化剂成为研究热点，如选用海藻酸钠、柠檬酸钠等天然活化剂，以摆脱对腐蚀性化学试剂的依赖。其中海藻酸钠富含羟基、羧基等含氧官能团，兼具凝胶化、易成型、碳骨架可调控的特性，与生物炭掺杂后可降低材料电荷转移电阻，大孔、介孔为主的孔隙与多微孔的生物炭互补构建分级结构，提升离子传输效率；但天然活化剂缺乏强刻蚀造孔能力，

难以单独制备高比表面积的生物炭，需复合改性提升^[3]
7，这也是当前碳材料绿色活化方式的研究热点。

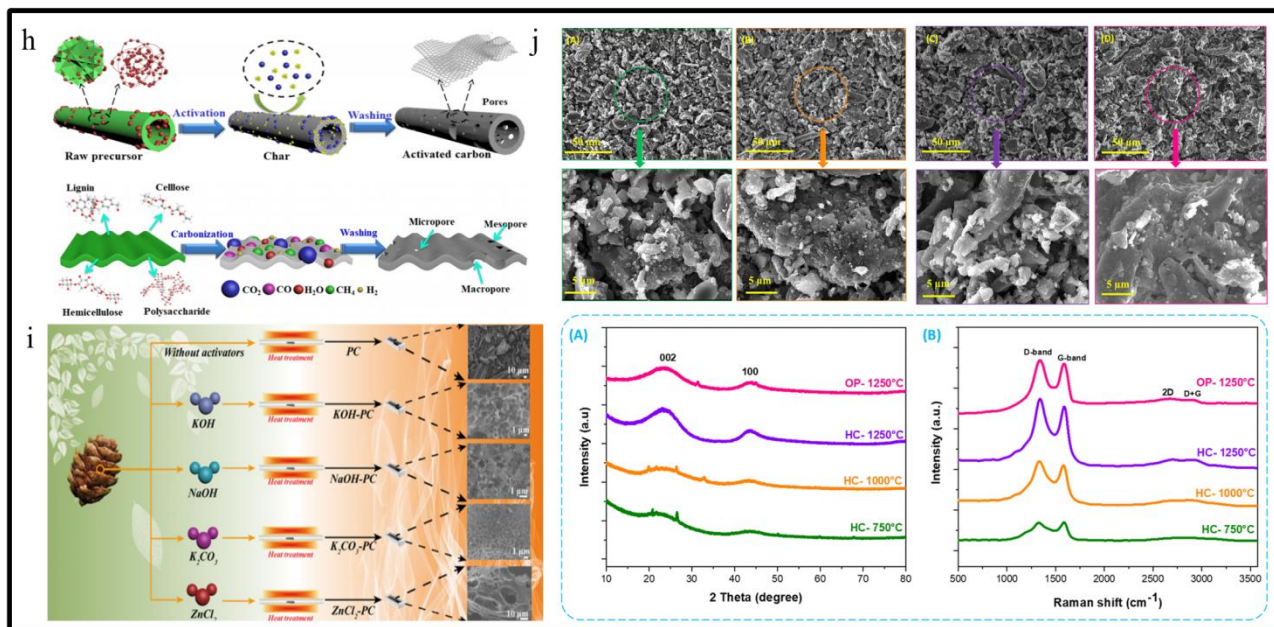


图 6 生物质炭的碳化/活化流程及其在不同活化剂下的结构表征^[33~37]

Fig. 6 The carbonization/activation process of biochar and its structural characterization under different activators

4 不同碳源的高性能活化生物炭在超级电容器中的应用

4.1 木质纤维素源

木质纤维素源生物质因天然高碳含量、独特碳骨架及孔隙结构结合，而成为制备储能碳材料的理想来源；其电化学性能的差异化表现，主要源于碳化工艺多样性（热解温升、时长调控）及原料天然骨架差异和元素掺杂所诱导的孔容分布。纤维素、木质素含量差异结合碳化/活化工艺调控，可形成独特孔隙，部分孔隙还能促进有机化合物与高碳骨架的协同作用。尤为关键的是，这种依赖原料与工艺整合形成的独特孔道构型及孔容分布，最终决定植物生物炭在电化学应用中的性能梯度^[38]。

典型案例：山竹壳^[39]、枣核^[40]、玫瑰^[41]、花生壳^[42]、甘蔗渣^[43]、椰壳^[31]、香蕉叶^[44]、榛子壳^[35]、柚子皮^[45]、石榴皮^[46]、菠萝茎^[47]以及芒果核^[29]等表明：高性能植物源生物炭多源自高比例纤维组分，其天然三

维结构可显著增强电解质可及性与离子扩散效率，从而提升超级电容器性能。如 Soman 等人^[42]利用 3:1 的 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HNO}_3$ 溶液对花生壳进行活化，制备碳材料呈碳纳米球结构，并在 $0.5\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 的电流密度下具备 $273\text{F}\cdot\text{g}^{-1}$ 的比电容。Saka 等人^[46]以石榴皮废弃物为原料，通过 NaOH 活化、氨气气氛与 ZnO 掺杂制备了多掺杂多孔碳复合材料，样品颗粒呈致密球形，平均粒径约 25nm，孔隙多呈介孔结构；在 1 M H_2SO_4 电解液中， $0.1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下比电容达 $265.2\text{F}\cdot\text{g}^{-1}$ ，较单 N 掺杂（ $207.4\text{F}\cdot\text{g}^{-1}$ ）提升约 28%，并在 $0.6\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下经过 5 000 次充放电循环后保持 86% 的电容，最大能量密度和功率密度分别达到 $7.29\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3600\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

此外，木质纤维素源生物炭基础性能差异同时受其原生材料的组分影响。木质素含量高的椰壳、芒果核热解时易形成更稳定的芳香族羰基（共轭 $\text{C}=\text{O}$ ），纤维素含量高的花生壳则脂肪族羰基占比略高。因此，木质纤维素源生物质的组分差异与活化、掺杂调控协同决定其孔结构与表面官能团特性。

表 3 不同植物源活化生物炭的制备工艺及超级电容器电化学性能

Table. 3 Preparation processes of activated biochar from different plant sources and electrochemical performance of supercapacitors

来源	碳化	结构/比表面积 ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	活化剂/气体	电解液	能量密度 ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$)	功率密度 ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	比电容/($\text{F}\cdot\text{g}^{-1}$)①	电容保持率 /%②(次)	参考
山竹壳	水热	多孔碳(251.1)	KOH	KOH	27	200	331($0.5\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$)	84.6(10000)	[39]
枣核	热解	多孔碳(1496)	$\text{K}_2\text{CO}_3/\text{H}_3\text{BO}_3$	KOH	12.85	129.71	411($0.5\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$)	97.31(5000)	[40]
玫瑰	热解	碳片(1374.82)	K_2CO_3	KOH	69.8	224.8	320.8($1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$)	89(5000)	[41]
花生壳	热解	碳球(277.21)	$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$	KOH	23.17	325	273($1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$)	97.4(7500)	[42]
甘蔗渣	热解	碳片(—)	NaOH/HCl	KOH	—	—	226.71($1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$)	65.5(5000)	[43]
椰壳	热解	多孔碳(1261.5)	CO_2	KOH	64~75	864	345($1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$)	86.0(10000)	[31]

香蕉叶	热解	多孔碳(1260)	KOH	KOH	——	——	360(1 A·g ⁻¹)	96(5000)	[44]
榛子壳	热解	多孔碳(3374)	KOH	KOH	11.4	300.4	290(1 A·g ⁻¹)	95.8(3000)	[35]
柚子皮	热解	多孔碳(1277.14)	KOH	KOH	——	——	236.08(1 A·g ⁻¹)	87.58(3000)	[45]
石榴皮	热解	碳片(21.25)	NaOH	H ₂ SO ₄	7.29	3600	265.2(0.1 A·g ⁻¹)	86(5000)	[46]
菠萝茎	热解	多孔碳(945)	KOH	KOH	35.45	1060	255(1 A·g ⁻¹)	——	[47]
芒果核	热解	碳球(1348.5)	无活化	KOH	12.32	5137.86	205.8(0.5 A·g ⁻¹)	79.3(10000)	[29]

注：①括号内为比电容测试的电流密度，②括号内电容保持率对应的循环次数。表格内“——”表示原文未报道。

4.2 动物源

动物源生物炭材料的案例常见于羽毛、毛发、牙齿、骨头、甲壳、肉块及排泄物等动物废弃物。其碳化、活化后不仅形成丰富的微孔结构，更因结合粪便、骨头等材料自带氮、磷等元素自掺杂，或是外源金属杂原子的掺杂，为材料赋予额外的赝电容性能。

近期案例中，蟋蟀^[48]、螳螂虾壳^[49]、猪毛^[50]、羊驼粪^[51]、牛粪^[52]、蚕蛹^[54]等经活化改性后均表现出良好电化学性能。Wei 等人^[49]通过复合氢氧化钠(NaOH/KOH)对废弃的螳螂虾壳进行活化处理，利用虾壳本征钙盐作为天然造孔模板，在 5 A·g⁻¹ 的电流密度下经过 10000 次充放电循环，电容保持率 96.7%，在 0.5 A·g⁻¹ 的电流密度下拥有 108.5 mAh·g⁻¹ 的比电容，19.6 W·

kg⁻¹ 的功率密度，97.4 Wh·kg⁻¹ 能量密度。此外，动物生物质也可与废弃植物进行共掺杂热解以制备高性能材料，Ma 等人^[55]使用鹅毛与等质量的 25mg·g⁻¹ 铜污染松木屑进行了共掺杂水热碳化以制备三维多孔碳，材料比表面积为 2501.08m²·g⁻¹，比电容达 587.14 F·g⁻¹，能量密度为 42.16 Wh·kg⁻¹。在 1 A·g⁻¹ 的电流密度下经历 10000 次循环后，电容保持率仍达 91.39%，污染的铜经热解后反而为碳材料带来额外的赝电容贡献。

综上，动物源生物质通过天然模板造孔（如虾壳钙盐）与原位/外源金属离子掺杂（如粪便氮磷、杂质铜）的双重机制，精准调控孔结构并引入赝电容，同步提升电极材料的比电容、循环稳定性等电化学性能，实现生物质基碳材料高性能化发展。

表 4 不同动物源活化生物炭的制备工艺及超级电容器电化学性能

Table. 4 Preparation processes of activated biochar from different animal sources and electrochemical performance of supercapacitors

来源	碳化	结构/比表面积 (m ² ·g ⁻¹)	活化剂/气体	电解液	能量密度 (Wh·kg ⁻¹)	功率密度 (W·kg ⁻¹)	比电容/(F·g ⁻¹)①	电容保持率 /%②(次)	参考
蟋蟀	热解	多孔碳(3311)	KOH	KOH	22.4	102.4	273.5(1 A·g ⁻¹)	89.65(5000)	[48]
虾壳	热解	碳片(2465.9)	NaOH/KOH	ZnSO ₄	97.4	19.6	108.5(0.5 A·g ⁻¹)	79.82(50000)	[49]
猪毛	热解	多孔碳(1002)	KOH	H ₂ SO ₄	——	——	110(1 A·g ⁻¹)	——	[50]
羊驼粪	热解	多孔碳(801)	HNO ₃	H ₂ SO ₄	1.9	42.6	20.1(0.1 A·g ⁻¹)	98.9(13000)	[51]
牛粪	热解	多孔碳(2651.7)	KOH	KOH	22.9	502	165(0.5 A·g ⁻¹)	95.3(5000)	[52]
桉树叶/ 鸡蛋壳	热解	多孔碳(971.07)	KHCO ₃	KOH	7.35	62.5	310(0.5 A·g ⁻¹)	97.38(10000)	[53]
蚕蛹	水热	多孔碳(2476)	K ₂ CO ₃	H ₂ SO ₄	65	260	412(0.1 A·g ⁻¹)	80(10000)	[54]
鹅羽/ 松木	水热	多孔碳(2501.08)	KOH	KOH	42.16	398.17	587.14(1 A·g ⁻¹)	91.39(10000)	[55]

注：①括号内为比电容测试的电流密度，②括号内电容保持率对应的循环次数。表格内“——”表示原文未报道。

5 结论与展望

本文系统综述了超级电容器电极用生物炭的制备、活化改性及构效关系。系统解析主流生物炭结构（三维网络、多孔碳层/纳米碳球）碳化、活化流程；梳理了生物炭超级电容器的最新研究案例。在此，对该领域的发展与现存问题作如下展望：

(1)活化技术开发：化学活化为当前的主流活化技术，KOH 因其化学蚀刻（K₂O、K₂CO₃ 与 C 反应）、物理气化（H₂O、CO₂ 与 C 反应）及金属 K 蒸发（扩张碳晶格）的三重协同造孔机制而成为最高效的活化剂；同时，KOH 因电导率高、离子迁移快，是最常用的水系电解液之一。此外，探索以海藻酸钠为代表的环保活化剂或为未来的方向。

(2)结构-性能关联：众多生物炭中，三维多孔炭具备的高比表面积显著提升离子扩散与电荷存储，能量密度更优；而纳米片/球结构因短程离子路径及低内

阻，更利于实现高功率输出。未来研究或可针对储能需求定向设计碳材料维度及孔隙结构开展。

(3)原料差异影响：植物源生物炭因高纤维素含量及有序碳骨架，普遍优于动物源；但几丁质类动物废弃物（如虾壳、蟋蟀）因刚性甲壳素纳米纤维增强导电性，经活化后提升比电容，展现独特开发潜力。

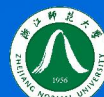
值得指出的是，性能评价体系的不统一是当前该领域尤其突出问题。汇总表 3 与表 4 可见，不同文献报道的电化学性能数据之间存在系统性口径差异：比电容的测试电流密度并不统一，不同电流密度下的数值不具备直接可比性；电解液体系差异显著，包括 KOH、H₂SO₄ 及 ZnSO₄ 等碱性、酸性与中性体系，离子尺寸与电导率差异使不同文献间的性能数据难以横向对比，缺乏可靠依据，进一步延缓了向产业化应用的推进。因此，建立涵盖孔结构表征、电解液体系、电流密度基准与循环考核条件的标准化测试协议，应成为该领域下一阶段的重要基础性工作。

此外，现有研究多局限于实验室探索，尚未突破关键性能瓶颈并实现工业化量产。其中制备工艺敏感性尤为突出热解比表面积变异、稳定性差进一步阻碍产业转化。针对上述问题，需通过多学科交叉构建研发体系。例如利用 CFD 数值仿真模拟热解反应器内流场分布与传热传质行为，优化工艺参数以提升制备稳定性；结合材料学大模型定量解析材料表面化学的构效关系，减少无效实验试错，从而压缩研发周期与成本，为解决生物炭材料可扩展性弱、加工变异性高等难题提供支撑。

参考文献

- [1] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2025[R]. Paris: International Energy Agency, 2025.
- [2] PETRONE G, SPAGNUOLO G, TEODORESCU R, et al. Reliability issues in photovoltaic power processing systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (7):2569-2580.
- [3] YUAN K, LIN Y, LI X, et al. High-safety anode materials for advanced lithium-ion batteries[J]. Energy & Environment Materials, 2024, 7:12759.
- [4] WINTER M, BRODD R J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?[J]. Chemical Reviews, 2004, 104 (10):4245-4270.
- [5] ARUCHAMY K, RAMASUNDARAM S, VIJAY N, et al. Recent developments in the synthesis of heteroatom-doped and hierarchically porous carbon supercapacitor electrodes from sustainable sources[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 123.
- [6] FARAJI S, ANI F N. The development supercapacitor from activated carbon by electroless plating—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42:823-834.
- [7] SHAHEEN J, FSEHA Y H, SIZIRICI B. Performance, life cycle assessment, and economic comparison between date palm waste biochar and activated carbon derived from woody biomass[J]. Heliyon, 2022, 8 (12):e12388.
- [8] PRIYA D S, KENNEDY L J, ANAND G T. Emerging trends in biomass-derived porous carbon materials for energy storage application: A critical review[J]. Materials Today Sustainability, 2023, 21:100320.
- [9] NGIDI N P D, KOEKEMOER A F, NDLELA S S. Recent advancement in the electrochemical performance of electrochemical capacitors based on biomass-derived porous carbon: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 89.
- [10] 李芮莹,周颖,周红军,等.生物质衍生纳米碳基材料: 电化学场景下的机遇与挑战[J]. 化工进展,2025,44 (S1):288-306.
- [11] AL-RUMAIHI A, SHAHBAZ M, MCKAY G, et al. A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167.
- [12] CAO J, YU Y, WU H. Primary release and transformation of inorganic and organic sodium during fast pyrolysis of sodium-loaded lignin[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39 (3):3439-3446.
- [13] RIZWAN M, LEGHARI A, KUMAR A, et al. Controlled hydrothermal carbonization of wood-derived lignin-rich lignocellulose: Redefining pyrolytic pathways to tailored biochar and hydrogen-enriched syngas[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2025, 192.
- [14] PEREIRA L, CALERO M, BLÁZQUEZ G, et al. On the physical activation of biomass and urban waste chars for water treatment and CO₂ adsorption[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 313.
- [15] TSARPALI M, KUHN J N, PHILIPPIDIS G P. Activated carbon production from algal biochar: Chemical activation and feasibility analysis[J]. Fuel Communications, 2024, 19.
- [16] 刘陈,段罡,范志鹏,等.生物质炭的制备及其应用进展[J]. 云南化工,2026,53 (1):16-19.
- [17] AMBHATLA N, PANICKER T F, MISHRA R K, et al. Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties[J]. Results in Engineering, 2025, 25.
- [18] ZHANG Y, HE M, WANG L N, et al. Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality[J]. Biochar, 2022, 4 (1).
- [19] ABIOYE K J, FALUA K J, REZAEI M, et al. Global insights into biomass pyrolysis mechanisms: A scientometric and mechanistic approach[J]. Results in Engineering, 2025, 28.
- [20] ZHANG C, WANG F. Catalytic lignin depolymerization to aromatic chemicals[J]. Acc Chem Res, 2020, 53 (2):470-484.
- [21] SANGARE D, MOSCOSA-SANTILLAN M, BOSTYN S, et al. Multi-step kinetic mechanism coupled with CFD modeling of slow pyrolysis of biomass at different heating rates[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479:147791.
- [22] LOZANO E J, MARTÍN-LARA M Á, BLÁZQUEZ G, et al. Enhancing biomass properties for biofuels: A comparative analysis of pyrolysis and hydrothermal carbonization technologies[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2026, 193.
- [23] LI J, LI R, LI T, et al. Advancements in the utilization of nanocarbon sphere composites in supercapacitor[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, 8 (1).
- [24] 张梦源,游小龙,刘丽君,等.基于生物质的高度有序的管状碳材料及其在锂硫电池中的应用[J]. 无机化学学报,2019,35 (8):1493-1499.
- [25] ZHANG H, SONG Y, LIU Y N, et al. Fabrication of nitrogen and phosphorus-codoped porous carbon for high volumetric performance supercapacitors[J]. Electrochimica Acta, 2022, 431:141131.
- [26] 王玉珏,武晓,庞会霞,等.松木废屑在生物炭中的应用及制备研究[J]. 广州化工,2025,53 (10):71-73.
- [27] YAN Y, SUN W, WEI Y, et al. Review of biomass-derived carbon nanomaterials-From 0D to 3D-For supercapacitor applications[J]. Nanomaterials (Basel), 2025, 15 (4).
- [28] CHEN X F, PAUL R, DAI L M. Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage[J]. National Science Review, 2017, 4 (3):453-489.
- [29] MOLAHALLI V, BHAT V S, SHARMA A, et al. Turning mango kernel waste into high-energy porous carbon: a sustainable electrode material for high-performance supercapacitors with exceptional stability[J]. RSC Adv, 2025, 15 (18):14183-14193.
- [30] LI Y, SHEN H, ZHU Y, et al. Hierarchical pore engineering of lignocellulose-based carbon materials for electric double-layer capacitors[J]. Nano Research, 2025, 18 (10).

- [31] ALVES R D O, COSTA T B, PAQUINI L D, et al. Synthesis of CO₂-activated biochar by pyrolysis of coconut (*Cocos nucifera* L.) waste biomass and evaluation of its electrochemical properties for supercapacitor applications[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2026, 207.
- [32] CHOMCHUEN W, SIMASATITKUL L, MENS W, et al. Sustainable conversion of bagasse into porous carbon using industrial excess heat and steam: Syrup decolorization and techno-economic analysis[J]. *Results in Engineering*, 2025, 25.
- [33] GAO Y, YUE Q, GAO B, et al. Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 746:141094.
- [34] ALOUIZA I, AQIL M, CHARI A, et al. Influence of phosphorus activation and carbonization temperature on the electrochemical performance of hard carbon made from olive pomace as an anode for sodium-ion batteries[J]. *RSC Advances*, 2025, 15 (32):19546-19560.
- [35] LI H M, MA Y F, WANG Y, et al. Nitrogen enriched high specific surface area biomass porous carbon: A promising electrode material for supercapacitors[J]. *Renewable Energy*, 2024, 224.
- [36] PADILLA-MARTÍNEZ E D, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ C E, RÍOS-GONZÁLEZ J A, et al. Effect of KOH impregnation conditions on the porosity and capacitance of coconut fiber – derived activated carbons[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2026, 208.
- [37] HU Z Y, GAO S Y, ZHAO J K, et al. Porous carbon derived from sodium alginate-encapsulated ZIF-8 for high-performance supercapacitor[J]. *Resources Chemicals and Materials*, 2025, 4 (2).
- [38] 付安昊,胡军平,黄春来,万利佳.孔设计与掺杂协同调控生物衍生碳超级电容器研究进展[J/OL]. *精细化工*,2026:1-18.
- [39] ZHANG X, YANG Y Q, JIA P F, et al. From biomass to energy storage materials: Mangosteen shells derived carbon doped Co₃O₄ as supercapacitor electrode materials[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 644.
- [40] LIU X, LIU Z W, CHEN H J, et al. Synergistic activation-doping strategy for constructing N/O/B/S Co-doped hierarchical porous carbon from wild jujube pit towards high-performance supercapacitors[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2026, 205.
- [41] WU Q Q, ZHONG Y T, CHEN R M, et al. Cu-Ag-C@Ni₃S₄ with core shell structure and rose derived carbon electrode materials: An environmentally friendly supercapacitor with high energy and power density[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222.
- [42] SOMAN G, MOLAHALLI V, SAYEED K, et al. Acid functionalized Arachis hypogaea skin based carbon nanosphere as efficacious material for enhanced energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 111.
- [43] GAUTAM K, BHATT M, VERMA A, et al. Biomass-derived carbon electrodes from sugarcane bagasse for supercapacitor applications[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025, 15(18):25189-25203.
- [44] BALASUBRAMANIAN D, VARADHARAJAN H, VENUGOPAL I P. Biomass-derived porous carbon from banana leaves for efficient supercapacitor applications – An experimental analysis[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2025, 201.
- [45] YANG Q, GUO J, ZHANG S, et al. Utilizing waste pomelo peel to develop activated-doped porous biomass carbon as electrode materials: Study of activation mechanism, evaluation of electrochemical properties and assembly of symmetric supercapacitors[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 209.
- [46] SAKA C, LEVENT A. Fabrication of nitrogen and ZnO doped on carbon particles obtained from waste biomass and their use as supercapacitor electrodes for energy storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 90:1070-1083.
- [47] AWITDRUS A, AGUSTINO A, SELASIH D, et al. Pineapple stem-derived porous carbon for symmetrical supercapacitor: evaluation of the effect of activating agent on physicochemical and capacitive characteristics[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2025, 100(8):1598-1608.
- [48] LEMIEUX J, ASLAM I, LEMMENS V, et al. Insect-powered electrochemical capacitors: The potential of cricket biomass[J]. *Carbon Trends*, 2024, 14.
- [49] WEI X, QIU B P, XU L, et al. High performance hierarchical porous carbon derived from waste shrimp shell for supercapacitor electrodes[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62.
- [50] LOBATO-PERALTA D R, OKOLIE J A, ORUGBA H O, et al. Evaluating the impact of pre-carbonization on activated carbon production from animal-origin precursors for supercapacitor electrode applications[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2025, 193.
- [51] ALARCÓN-ARROYO M I, CONEO-RODRÍGUEZ R, ARIAS-PINEDO O M, et al. High-performance supercapacitor electrodes based on alpaca manure-derived porous carbons[J]. *Electrochimica Acta*, 2026, 546.
- [52] REDDY N P, NAIK R J, MACHERLA N, et al. Biowaste-derived hierarchical activated porous carbon with heteroatom-doping (N/S) for efficient symmetrical supercapacitors: A cow urine approach[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 115.
- [53] ZHANG Y J, MA X Q, YU Z S, et al. Eggshell as a biotemplate for the synthesis of layered porous carbon by co-pyrolysis with eucalyptus leaves[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2024, 178.
- [54] YOUNGJAN S, RAJRUIJITHONG C, SATTAYARUT V, et al. Versatile porous activated carbon from silkworm pupae waste for electrochemical energy storage systems[J]. *Materials Research Bulletin*, 2025, 186.
- [55] MA T, WANG J, HAN X, et al. Co-Hydrothermal Carbonization of Goose Feather and Pine Sawdust: A Promising Strategy for Disposal of Sports Waste and the Robust Improvement of the Supercapacitor Characteristics of Pyrolytic Nanoporous Carbon[J]. *Molecules*, 2024, 30(1).



HANYAN 韩研股份

