



超级电容产业周报

2026年7月 第4期

- 67个！《山东省新能源领域场景建设实施方案》印发
- 雷迅独立混合储能项目加速建设
- 东风越野车取得汽车超级电容总成便捷装配工具专利，能够实现快速精确定位
- 强链补链！火炬电子战略收购重庆中科超容
- 国产超容赋能海洋油气节能装备 | 国内首台1000kW超容储能钻井绞车逆功率回收系统获CCS认证交付
- 思源电气增资4亿元！用于扩建超级电容产能！
- 红外光10分钟愈合：双交联水凝胶超级电容器实现900%愈合后拉伸
- 香港城市大学张文军等：低浓度水系-非质子电解液助力锌离子混合超级电容器，具有高工作电压和长寿命

【政策资讯】

67个！《山东省新能源领域场景建设实施方案》印发

7月20日，山东省能源局关于印发《山东省新能源领域场景建设实施方案》的通知，《方案》提到，加快中深层、浅层地热能规模化开发，扩大在居民供暖（制冷）、公共建筑、种植业、工业等领域的应用，因地制宜建设综合能源站。推广“地热+光伏+储能”多能互补模式，实现冷热联供、零碳运营。探索地热发电技术验证，为地热能产业化发展储备技术路径。

多元储能技术应用。推动新能源与抽水蓄能融合发展，探索“源网荷蓄”“风光核蓄”一体化开发模式。加快超级电容、飞轮、熔盐、液流电池等新技术应用，拓展数据中心+储能、云储能、移动式储能等创新场景。推进盐穴多类型储能协同耦合场景实验室建设。

以风电、光伏、储能、氢能为核心能源载体，推动钢铁、石化、建材、有色等高耗能行业实施绿电替代、电能替代、绿氢替代，依托工业绿色微电网、绿电直供与零碳园区建设，持续优化工业用能结构，大幅降低化石能源消耗与碳排放。

利用高速公路骨干路网闲置空间，布局分布式光伏、储能、充换电、加氢设施，打造“光储充换氢”一体化绿色交通用能场景。推进港口风光储配套设施建设，完善岸电系统，加快作业机械、船舶和集疏运车辆清洁化替代，打造零碳港口。加快高铁站、机场等交通枢纽场站清洁能源开发利用，推动绿色低碳替代，实现新能源就地消纳水平和用能自给保障能力显著提升，推进交通基础设施网与能源网融合发展。加快布局新能源车辆双向充放电设施，扩大车网互动应用范围，构建绿色智慧出行体系。

新能源低碳示范工业园区。围绕“绿电自给、储能调峰、有序充电、车网互动”核心场景，提升工业园区用能安全清洁水平，降低综合用能成本。充分利用园区屋顶、车棚、闲置土地等空间，因地制宜建设分布式光伏、分散式风电等可再生能源发电设施，统筹布局电化学储能与蓄冷蓄热设施，建设充换电设施网络，积极推广V2G双向充放电技术，实施建筑节能智慧化改造和能碳管理平台建设，打造清洁低碳、安全高效的工业园区用能新范式。

信息来源：<https://news.bjx.com.cn/html/20260720/1505016.shtml>

【行业动态】

雷迅独立混合储能项目加速建设

连日来，位于孟县路家村镇的雷迅独立混合储能项目施工现场机器轰鸣，施工人员抢抓工期加紧作业，保障区域新能源消纳的新型储能设施加速成型。目前项目土建施工进度超四成，各分项工程有序压茬推进。

该项目 **占地25亩，总投资约2.4亿元，采用磷酸铁锂搭配超级电容混合储能技术，配套建设220千伏升压站、储能预制舱、主控综合楼及送出线路，兼具短时快速调频、长时储能供电双重优势**。现已完成投资0.52亿元，场地清表、土方平整、临建设施全部完工，储能舱基础换填工序验收合格，现阶段重点开展电缆沟浇筑前期筹备。

为高效推进项目建设，项目建立领导包联、专班驻场服务机制，工作人员常态化下沉一线，及时协调解决施工过程中的各类难题。施工单位细化施工台账、倒排工期节点，严把工程质量与安全生产关口，统筹推进管线铺设、设备进场、储能装置安装等各项工序，全力保障项目按期投运。**据了解，项目投产后年发电量可达1.6亿千瓦时，可有效承担电网削峰填谷、新能源消纳、应急电力保供等任务。**

信息来源：<https://www.163.com/dy/article/L10PKTV40519QIKK.html>

【行业动态】

东风越野车取得汽车超级电容总成便捷装配工具专利， 能实现快速精确定位

国家知识产权局信息显示，**东风越野车有限公司取得一项名为“一种汽车超级电容总成便捷装配工具”的专利**，授权公告号CN224527121U，申请日期为2025年7月。

专利摘要显示，本实用新型公开了一种汽车超级电容总成便捷装配工具，其包括第一限位组件和第二限位组件，所述第一限位组件包括一第一主体和一从该第一主体伸出的第一定位销；所述第二限位组件包括一第二主体和一从该第二主体伸出的第二定位销；所述第二主体上设有沿其长度方向延伸的滑动导向槽，所述滑动导向槽的截面形状与所述第一主体的截面形状相对应，所述第

一主体可滑动地容纳于所述滑动导向槽内，所述第一定位销与所述第二定位销之间的距离通过滑动所述第一主体调节。**本实用新型具有结构简单、操作便捷、通用性强且能实现快速精确定位优点。**

信息来源：<https://finance.jrj.com.cn/2026/07/22095157867518.shtml>

【行业动态】

强链补链！火炬电子战略收购重庆中科超容

近期，火炬电子（603678）战略收购重庆中科超容科技有限公司，标志着公司在超级电容领域完成“内生自研+外延补强”的战略布局，**实现从核心材料到系统解决方案的全产业链贯通，以全场景一站式储能方案赋能产业升级，助力国家新能源与战略新兴产业高质量发展。**

在“双碳”目标与智能化浪潮的双重驱动下，超级电容作为高功率储能核心器件，正迎来AI算力革命、新型电力系统建设等多领域需求爆发，其核心技术与供应链的自主可控程度，直接关系到国家能源安全与高端装备产业链的稳定发展。

强强联合 构建“成熟产业平台 + 前沿技术高地”

中科超容：国内高端超级电容技术标杆，由中科院刘双翼研究员领衔核心技术团队，拥有从“材料-单体-模组”的全链条研发能力；在**碳基电极材料、有机电解质方面拥有国际领先的技术体系**，成功**研发并量产全球首款3.2V EDLC电容器**，能量密度和综合性能获得大幅提高，核心材料实现高质量自主可控。

火炬电子：深耕超级电容多年，凭借自研自产经验，已建成成熟自动化产线与全流程质控体系，**产业化交付能力扎实，产品稳定覆盖轨道交通、电力能源、电网调频等主流工业场景。**

三大合作优势 充分释放协同效应

技术研发双向赋能：中科超容掌握的高电压、高能量密度核心技术，将反向拉升火炬电子现有产品的性能上限；火炬电子拥有成熟的量产工艺积累，可高效推动中科超容前沿材料技术从实验室验证走向规模化商用。

产品矩阵全域覆盖：火炬电子通用型产品体系与中科超容高性能技术路线

形成精准互补，既可为工业级、民用级客户提供高性价比的成熟可靠方案，也可满足高端装备、前沿科技领域的极致性能需求，实现从低压到高压、从通用单体到定制化系统的全谱系产品布局。

市场渠道共振破圈：中科超容的前沿技术储备，将助力火炬电子切入可控核聚变、AI算力基础设施等高价值新兴赛道，实现客户群体与应用场景的双向拓展；火炬电子多年沉淀的渠道与资源，可快速为中科超容的高端产品打开成熟应用场景。

以此次收购为战略支点，火炬电子将充分发挥资金与渠道优势，赋能中科超容加速产能扩张与市场渗透，**围绕AI算力基础设施、汽车电子、可控核聚变、智能电网等高增长应用场景重点发力，打造覆盖“材料-单体-模组-系统”的完整产业链条，提供从标准化通用型号到高端定制化方案的全场景一站式超级电容解决方案**，携手行业伙伴共筑超级电容产业新高地，让储能更高效，让中国智造更有底气！

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

【行业动态】

国产超容赋能海洋油气节能装备 | 国内首台

1000kW超容储能钻井绞车逆功率回收系统获CCS认证交付

近日，**搭载陕西合创时代自研高性能超级电容储能核心的国内首台1000kW超容储能钻井绞车逆功率回收系统，顺利通过中国船级社（CCS）全套型式检验，正式交付海上钻井平台投入应用。**凭借合创时代自主可控的国产超容核心技术，我国海上钻井大功率势能回收、平台电网治理赛道一举打破海外长期技术垄断，实现海洋油气节能储能装备全链条国产化关键性突破。

整套设备搭载合创时代自研10C高倍率超级电容，储能循环寿命超10万次，可高效回收绞车下放再生势能、稳定海上平台电网；专项定制船用一体化储能模块，防水防尘、耐盐雾、抗冲击、宽温运行，完全适配海洋严苛工况，满足CCS船载设备标准。



依托前身合容电气多年电力装备技术积累，合创时代深耕大功率超导模组、储能管理系统研发，**产品广泛应用于火电、轨交、港口、油气能量回收领域。本次项目全流程多级验证中**，合创时代深度协同整机研发团队完成仿真、样机调试与防腐耐久测试，CCS全程核验后设备一次性通过全部船用合规检测。



相较于进口产品，**合创国产超导响应更快、寿命更长、海工适配性更强**，大幅降低平台采购与运维成本，为海上钻井节能改造提供优质国产替代方案。

业内表示，超导势能回收是油气行业低碳转型关键路线。**本次项目打通“油气整机 + 国产超导核心” 创新产业链**，填补国内大功率船载超导装备空白。未来，宝石机械西安宝美、中石油海工钻井分公司将联合合创时代迭代系列化储能产品，推动国产超导技术覆盖海工修井机、陆地钻机、港口起重等多场景，以自主超导核心助力油气行业节能降碳与装备国产化。

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/Kpmmf4mVX2sc5l3XvNOnrA>

【行业动态】

思源电气增资4亿元！用于扩建超级电容产能！

北极星储能网讯：2026年7月20日，思源电气发布公告披露，**计划使用自有资金向全资**

子公司江苏思源新能源科技有限公司增资，增资规模不低于4亿元，这笔增资款项将全部用于扩建超级电容及配套相关产品产能。

据公告信息，江苏思源新能源科技有限公司当前注册资本2亿元，由思源电气全资控股，经营范围覆盖新兴能源技术研发、电池及零配件产销、新能源设备制造进出口等多项业务。**此次增资资金将专项用于搭建超级电容相关产品生产装配、周转存储厂房，同步配套建设生产与检验设施，全面扩充超级电容板块生产配套硬件。**

对于本次加码超级电容业务，思源电气表示，公司超级电容业务在**新型电力系统应用场景中，静止型同步调相机（SSC）和储能调频等**应用逐步得到了客户的认可，逐步从试点转为批量应用；在**数据中心应用场景中，超级电容作为主要技术方案正在进入批量应用阶段。**超级电容业务的创新能力和市场表现，已逐步成为公司总体战略布局中的重要拼图之一。所以，公司对基于超级电容的成套产品和系统解决方案的发展前景保持坚定信心。

对于本次增资对公司的影响，思源电气表示，**本次投资将有利于进一步扩大公司超级电容业务的生产能力和交付能力，开辟新市场，扩大市场份额，**增强企业核心竞争力与可持续发展能力。

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/Qk2THtgqzXsJ9Dg-uycjYw>

【前沿技术】

红外光10分钟愈合：双交联水凝胶超级电容器实现900%愈合后拉伸



ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08320-z>

OPEN

Ultrastretchable and superior healable supercapacitors based on a double cross-linked hydrogel electrolyte

Huili Li¹, Tian Lv¹, Huanhuan Sun¹, Guiju Qian¹, Ning Li¹, Yao Yao¹ & Tao Chen¹

01研究背景

可拉伸和可愈合的储能器件是可穿戴电子的迫切需求，但现有聚乙烯醇基凝胶电解质既不 intrinsically 可拉伸也不可愈合，导致超级电容器在拉伸性（通常<400%）和愈合稳定性（<10次循环）方面表现有限。如何开发兼具超高拉伸性、优异愈合能力和高离子电导率

的凝胶电解质是该领域的核心挑战。

02文章概述

本文以Laponite和氧化石墨烯为双交联剂的聚(AMPS-co-DMAAm)纳米复合水凝胶，具有1173%的拉伸性、34 kPa的拉伸强度和优异的离子电导率。通过预拉伸-释放工艺构建皱褶CNT电极，超级电容器在1000%应变下保持稳定性能；在红外光或加热处理下可反复愈合（>20次循环），愈合后仍保持900%拉伸性，论文题目为“Ultrastretchable and superior healable supercapacitors based on a double cross-linked hydrogel electrolyte”。

03主要内容

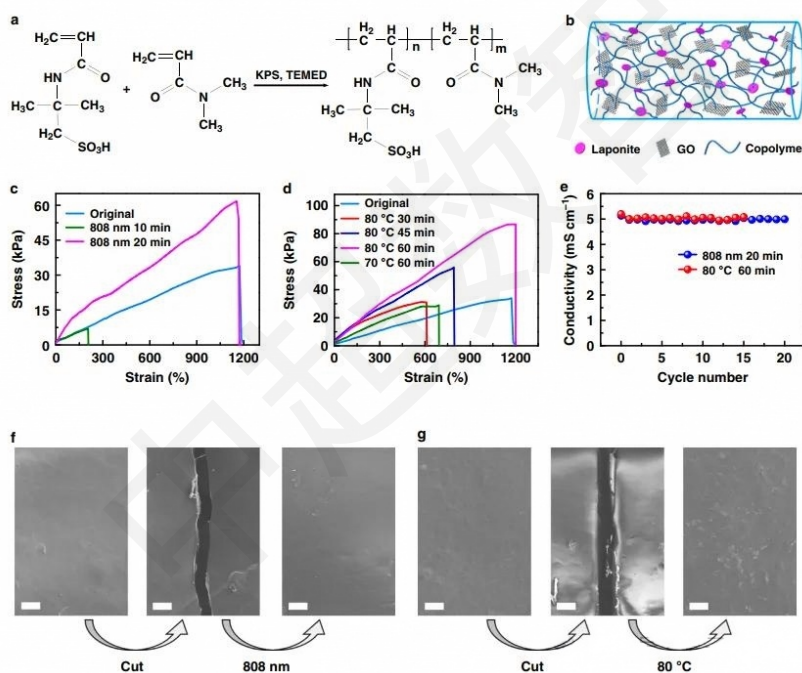


图1. 双交联水凝胶合成与性能：Laponite和GO作为协同交联剂形成三维网络；红外光20分钟或80°C加热60分钟可愈合，电导率愈合效率>98%，超15次循环稳定

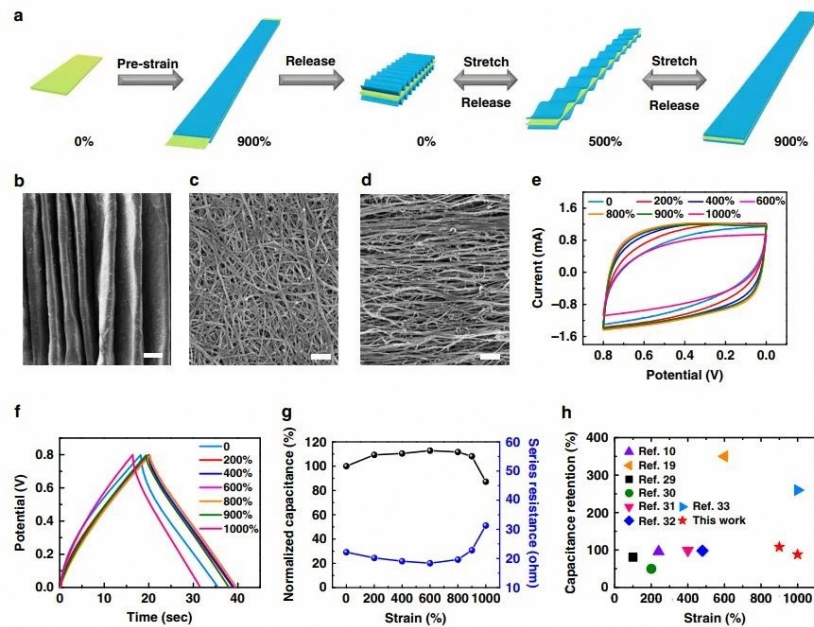


图2. 拉伸超级电容器：预拉伸-释放工艺形成皱褶CNT电极；1000%拉伸下电容保持87%，300%应变循环2000次后保持率>98%，性能优于多数已报道器件

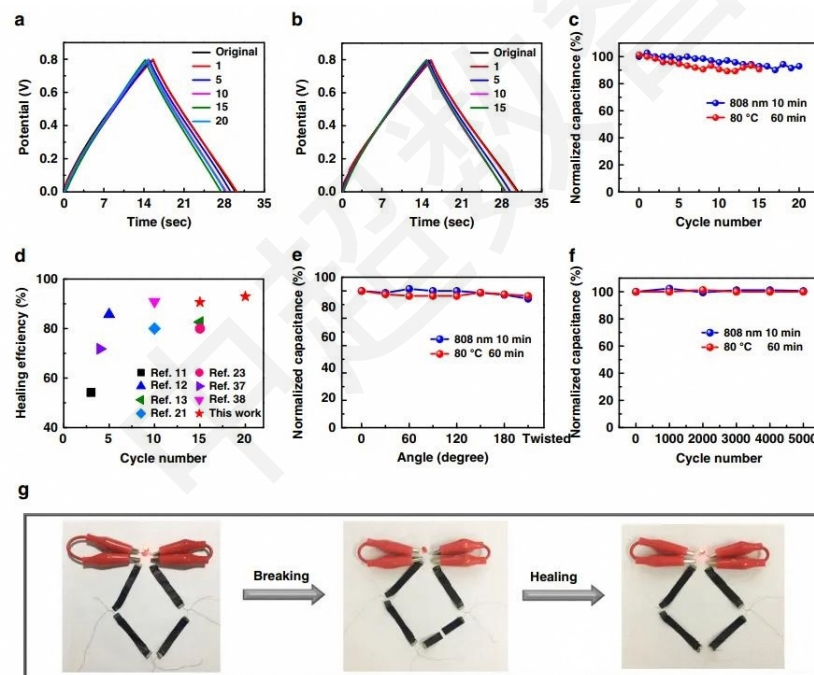


Fig. 3 | $\text{TiO}_2/\text{H-Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ 薄膜的微观结构与离子传输性能.

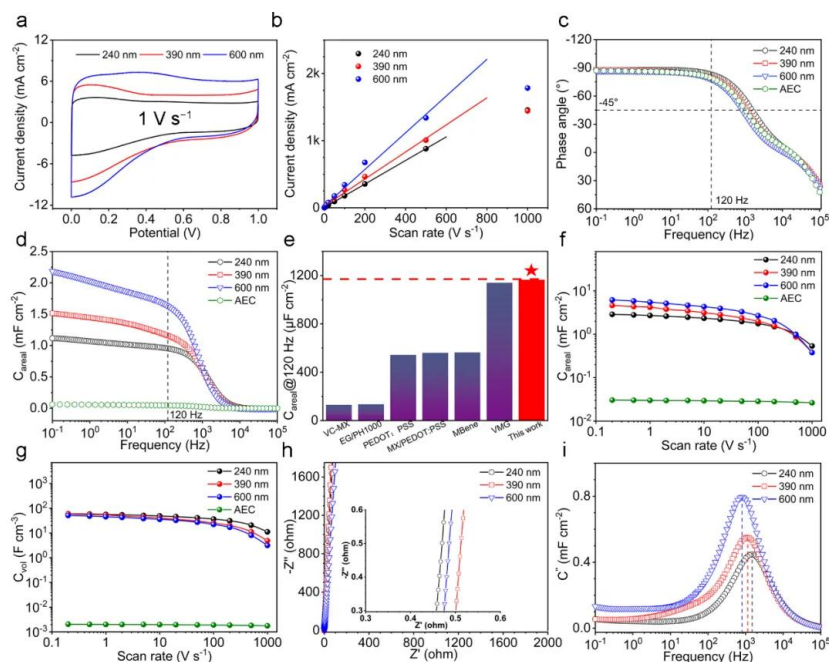


图3. 愈合性能：红外光10分钟或加热60分钟愈合，20次循环后电容恢复>90%；愈合后器件弯曲5000次性能稳定；串联四器件可在愈合后点亮LED

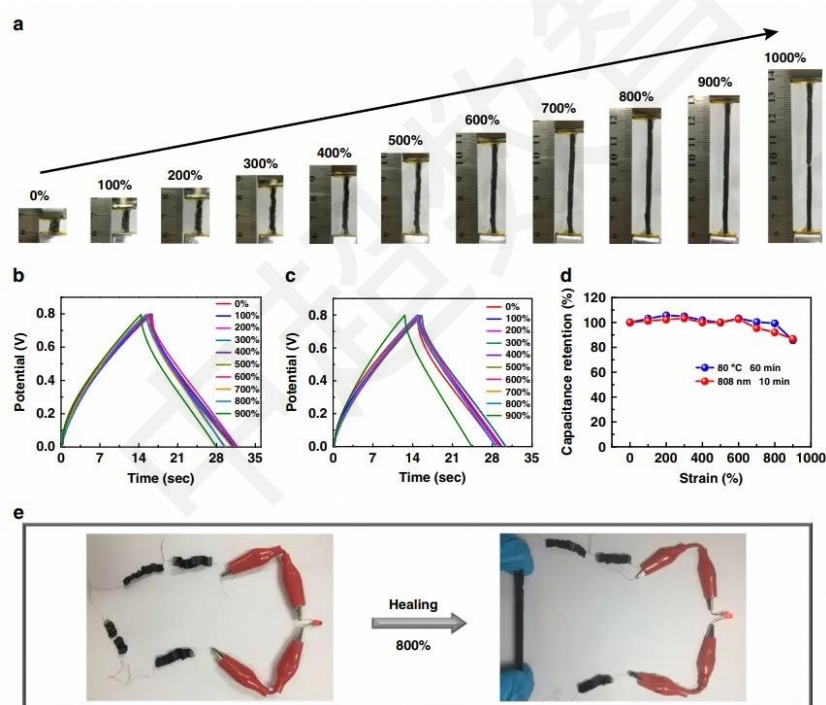


图4. 愈合后拉伸性能：愈合后超级电容器可拉伸至900%，电容仅衰减15%；在100-300%应变下循环2000次性能稳定；串联器件中一个愈合后拉伸800%仍可点亮LED

04研究结论

本研究开发的Laponite和GO双交联聚(AMPS-co-DMAAm)纳米复合水凝胶电解质集成了高拉伸性（1173%）、优异愈合能力（>20次循环，效率>98%）和高离子电导率（6.2-

30.0 mS/cm) 于一体。结合皱褶CNT电极结构, 超级电容器在1000%拉伸下电容保持87%, 300%应变下循环2000次性能衰减<2%。红外光10分钟或加热60分钟即可愈合, 20次愈合循环后电容恢复>90%; 更重要的是, 愈合后器件仍可拉伸至900%, 仅衰减15%。该工作首次实现了可愈合超级电容器在愈合后机械拉伸性能的几乎完全恢复。

05研究启示

该工作揭示了双交联网络设计使水凝胶兼具高拉伸性和高效愈合能力的核心原则——Laponite和GO的多功能基团(COOH 、 -OH 、 Mg^{2+})与聚合物链的 -CONH 基团在断裂界面形成可逆氢键交联, 加热或红外光加速链扩散和交联反应; GO的光热效应实现快速红外愈合。皱褶CNT电极在拉伸时展开保持导电网络完整, 愈合时皱褶结构增加接触面积。该水凝胶电解质策略可推广至其他柔性储能器件, 为可穿戴电子提供兼具机械鲁棒性和功能可靠性的材料方案。

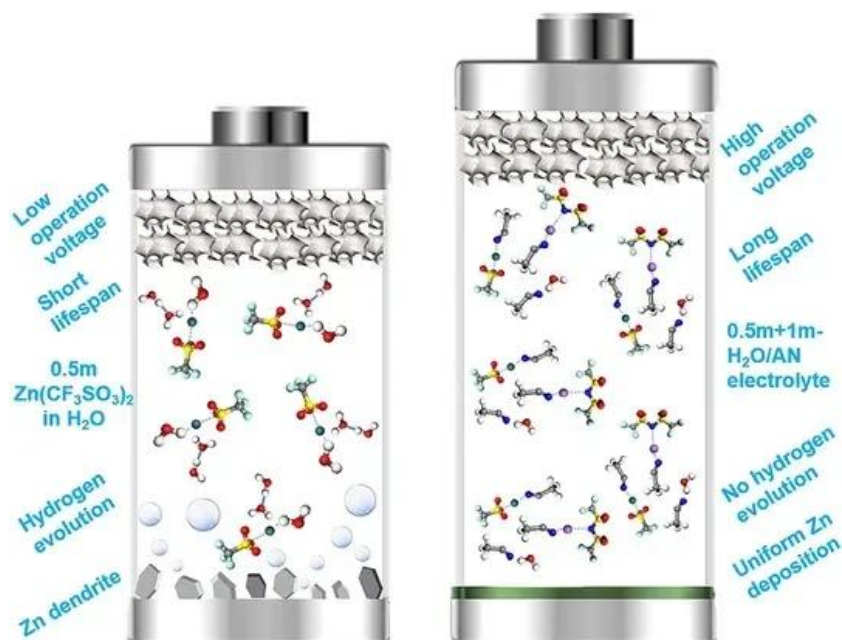
信息来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/PZfui2PIMkIPbCZWn9BC8A>

【前沿技术】

香港城市大学张文军等：低浓度水系-非质子电解液助力 锌离子混合超级电容器具有高工作电压和长寿命

研究背景

超级电容器具有高输出功率和长寿命等优点, 弥补了传统电容器与可充电电池之间的差距, 在各种商业应用中得到了广泛的应用。在混合超级电容器中, 金属锌由于其高比容量、低氧化还原电位、低成本以及丰富的储量成为一种有吸引力的负极材料。然而, 水系电解液窄的电化学窗口会导致严重的副反应(比如析氢和电偶腐蚀), 进而缩短循环寿命。电解液工程是提高水系超级电容器能量密度和循环寿命的有效策略。比如, 通过溶解高浓度的盐制备“盐包水”电解液, 可以有效拓宽电化学窗口。而很多电解液添加剂也可以通过在锌负极表面形成吸附层或者改变电解液的溶剂化结构来抑制锌负极的腐蚀和析氢。然而, 这些策略不可避免地增加了电解液的密度和粘度, 从而降低了其能量密度和倍率性能。因此, 需要设计更合理的电解液体系实现这些特性间的平衡。



Dilute Aqueous - Aprotic Electrolyte Towards Robust Zn - Ion Hybrid Supercapacitor with High Operation Voltage and Long Lifespan

Shuilin Wu, Yibing Yang, Mingzi Sun, Tian Zhang, Shaozhuan Huang, Daohong Zhang, Bolong Huang,* Pengfei Wang & Wenjun Zhang*

Nano-Micro Letters (2024)16: 161

<https://doi.org/10.1007/s40820-024-01372-x>

本文亮点

1. 一种新的低盐浓度水/非质子电解液($0.5 \text{ mol Zn}(\text{CF}_3 \text{ SO}_3)_2 + 1 \text{ mol LiTFSI}$)表现出扩展的电化学窗口，既可以稳定Zn金属负极，又可以提高Zn离子混合超级电容器的工作电压。
2. 由乙腈和LiTFSI诱导的电解质的配位壳不仅可以抑制Zn的腐蚀和析氢反应，还可以促进阴极稳定性和离子迁移。
3. 基于开发的电解质的Zn离子混合超级电容器可以在宽的温度范围内以及在0-2.2 V的电压范围内稳定运行，具有超过120,000次的超长循环寿命。

内容简介

水系电解液的电化学窗口较窄，导致锌金属负极发生严重的副反应，缩短了其使用寿命，也制约了锌离子混合超级电容器的工作电压和能量密度。使用“盐包水”电解液可以有效

地扩大其电化学窗口，但同时也会导致高成本、低离子电导率以及窄的温度范围，损害了锌离子混合超级电容器的电化学性能。因此，迫切需要设计一种新的电解液来平衡这些特性，从而实现高性能的锌离子混合超级电容器。香港城市大学张文军与香港理工大学黄勃龙等人开发了一种用于锌离子混合超级电容器的稀的水/乙腈电解液($0.5 \text{ mol Zn}(\text{CF}_3 \text{ SO}_3)_2 + 1 \text{ mol LiTFSI-H}_2\text{O/AN}$)，同时具有宽的电化学窗口、良好的离子电导率和宽的温度相容性。该电解液中，乙腈和TFSI⁻阴离子调控了水合壳层和氢键，使用该电解液的锌离子混合超级电容器具有高达2.2 V的高工作电压和超过120,000次的长循环寿命。

图文导读

Zn负极在 $0.5 \text{ m Zn}(\text{CF}_3 \text{ SO}_3)_2 + 1 \text{ m LiTFSI H}_2\text{O/AN}$ 电解液中的电化学性能

图1a所示为Zn负极在不同电解液中的Tafel曲线。其中，较高的峰值电位有利于抑制析氢过程，因此在 $\text{H}_2\text{O/AN}$ 电解液中锌沉积/溶解过程的电位较高，表明析氢副反应被有效抑制。图1b所示为原电池中Zn负极随时间变化的腐蚀电流曲线， $\text{H}_2\text{O/AN}$ 电解液中电流密度的波动明显降低，意味着电偶腐蚀的降低。图1c显示在 10 mA cm^{-2} 的电流密度下，在 $0.5 \text{ m} + 1 \text{ m H}_2\text{O/AN}$ 电解液中仍保持97.3%的高的库伦效率，而在 $0.5 \text{ m} + 1 \text{ m H}_2\text{O}$ 电解液中库伦效率则迅速下降。图1d的对称电池的循环曲线显示，随着电流密度的增加，使用 $0.5 \text{ m} + 1 \text{ m H}_2\text{O/AN}$ 电解液的Zn-Zn对称电池的电压迟滞略有增加。此外，图1e和1f分别通过Zn-Cu和Zn-Zn电池验证了Zn负极在 $0.5 \text{ m} + 1 \text{ m H}_2\text{O/AN}$ 电解液中的长循环性能。其中，Zn-Cu电池在3000次循环中保持97.3%的高库伦效率。此外，Zn-Zn对称电池也展现出了超过1000次的稳定循环，而是用 $0.5 \text{ m} + 1 \text{ m H}_2\text{O}$ 电解液时则迅速发生短路。

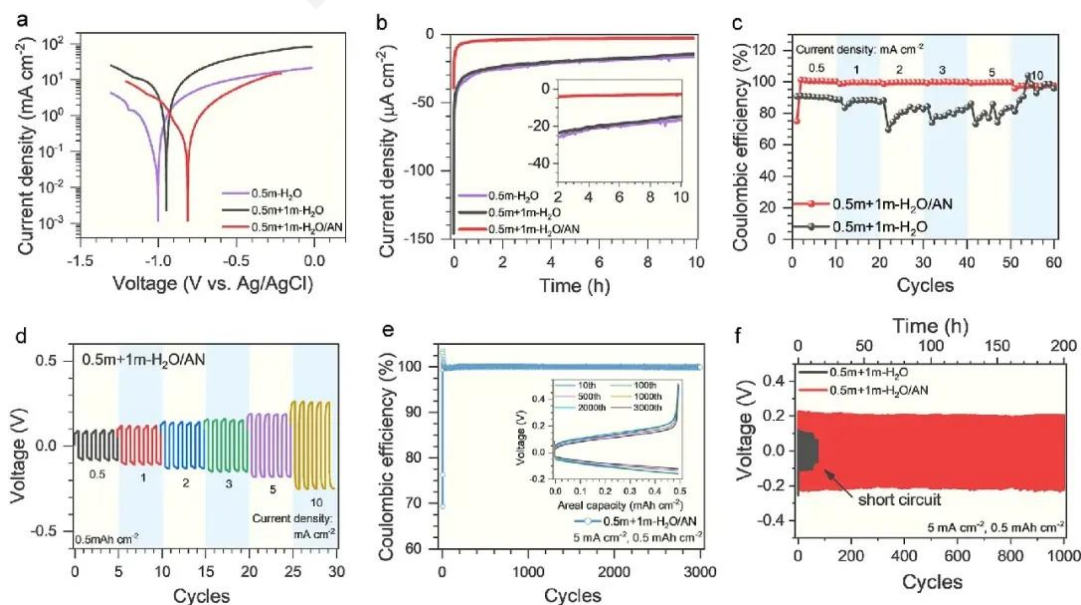


图1. 锌金属负极在0.5 m $\text{Zn}(\text{CF}_3 \text{SO}_3)_2$ + 1 m LiTFSI $\text{H}_2 \text{O}/\text{AN}$ 电解液中的稳定性：在0.5 m + 1 m- $\text{H}_2 \text{O}/\text{AN}$ 电解液和参考的水系电解液中(a)Zn沉积/剥离的Tafel曲线；(b)Zn-Ti原电池电流密度随时间的变化曲线；(c)不同电流密度下Zn-Cu电池的库伦效率；(d)不同电流密度下Zn-Zn对称电池的电压曲线；(e)Zn-Cu电池在0.5 m + 1 m- $\text{H}_2 \text{O}/\text{AN}$ 电解液中的库伦效率；(f)不同电解液中Zn-Zn对称电池的循环稳定性。

锌离子混合超级电容器在0.5 m $\text{Zn}(\text{CF}_3 \text{SO}_3)_2$ + 1 m LiTFSI $\text{H}_2 \text{O}/\text{AN}$ 电解液中的电化学性能

使用多孔石墨烯(aMEGO)和锌箔分别作为正极和负极，组装了锌离子混合超级电容器。图2a所示的恒流充放电曲线显示在2.2 V以下时，Zn-aMEGO混合超级电容器的充放电曲线保持了线性和对称性，而在2.2 V以上时，充放电曲线出现平台期。图2b利用CV曲线评估了Zn-aMEGO混合超级电容器的倍率性能，扫描速率从5 mV s^{-1} 增加到100 mV s^{-1} 时，CV曲线保持了准矩形的规则形状。图2c同样证实在电流密度从0.5增加到20 A g^{-1} 时，电容保持率仍高达64%。图2d，2e结果显示，使用0.5 m + 1 m $\text{H}_2 \text{O}/\text{AN}$ 电解液的Zn-aMEGO混合超级电容器可以在0-2.2 V的高工作电压范围内可以以88%的保持率稳定循环超过120000次。

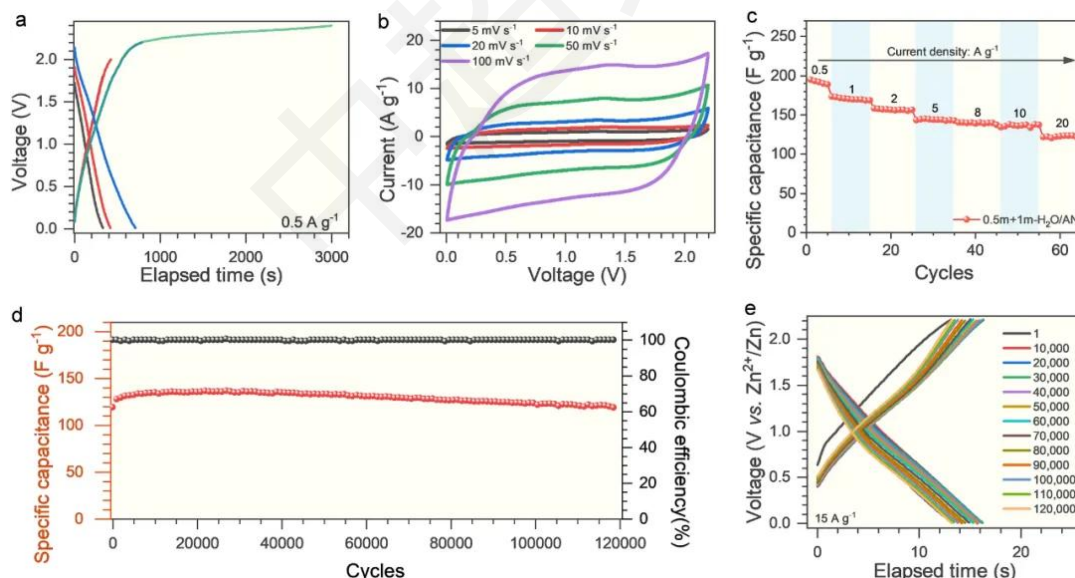


图2. Zn-aMEGO混合超级电容器在0.5 m + 1 m- $\text{H}_2 \text{O}/\text{AN}$ 电解液中的电化学性能：(a)恒流充放电曲线；(b)不同扫描速率下的循环伏安曲线；(c)倍率性能；(d)15 A g^{-1} 电流密度下的循环稳定性；(e)不同循环圈数的恒流充放电曲线

进一步研究了H₂ O/AN电解液的低温性能，评估其在恶劣条件下的实用性。图3a所示在-30℃下，Zn-Cu电池随着电流密度增加，观察到了高的库伦效率和轻微增加的电压迟滞。同样，图3b也证实在低温下，Zn-Zn对称电池在增大电流密度时也出现略微增加但稳定的电压迟滞。图3c显示，基于0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解液的Zn-Cu电池在-30℃下具有高的库伦效率(99.4%)和良好的循环稳定性(500次循环)。这些结果表明，即使在恶劣的温度条件下，在0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解液中也保持了高可逆性和快速的Zn沉积/剥离。图3d显示使用0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解液的Zn-aMEGO超级电容器在宽的温度范围内保持了良好的电化学性能，CV曲线畸变很小。相比之下，使用0.5 m + 1 m H₂ O电解液时，CV曲线在低温时变得扭曲，并且积分面积极具减小(图3e)。图3f显示，使用0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解液的Zn-aMEGO超级电容器在-30℃下可以稳定循环超过2000次。

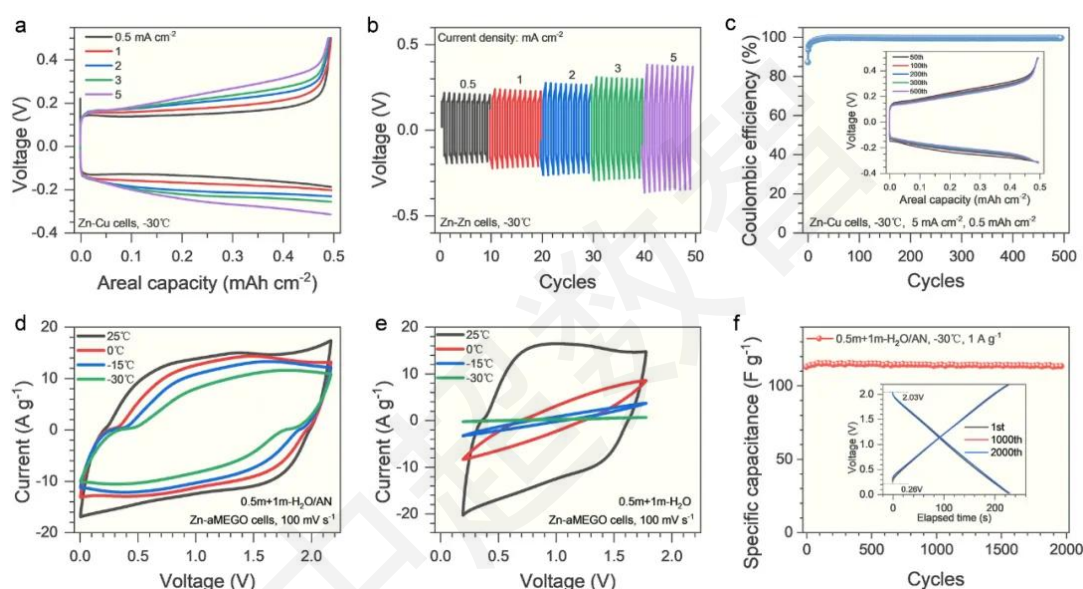


图3. 在0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液中的低温电化学性能: (a)Zn-Cu电池在不同电流密度下的充放电曲线; (b)Zn-Zn电池在不同电流密度下的电压曲线; (c)Zn-Cu电池在5 A g⁻¹电流密度下的库伦效率; (d)0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液和(e)0.5 m + 1 m-H₂ O电解液中Zn-aMEGO混合超级电容器在不同温度下的循环伏安曲线; (f)Zn-aMEGO超级电容器在0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液中的电容保持率。

Zn(CF₃ SO₃)₂ + LiTFSI H₂ O/AN电解液的溶剂化结构

通过分子动力学(MD)模拟，对不同浓度的H₂ O/AN电解液进行了密度泛函理论(DFT)计算。图4a所示，0.5 m + 1 m H₂ O电解液中费米能级附近的成键轨道和反键轨道分别在Zn(CF₃ SO₃)₂和TFSI⁻附近。Zn(CF₃ SO₃)₂与水分子之间较弱的轨道耦合表明，原有的溶剂化结构不稳定，可能导致副反应，降低整体性能。图4b的0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解

液中引入AN，AN的s和p轨道对成键和反键轨道都有很强的贡献，增强了轨道耦合。然而，当LiTFSI的浓度增加到3 m时，成键轨道和反键轨道主要由LiTFSI主导，水和AN的贡献减弱，增加了电子转移的能垒(图4c)。随着LiTFSI浓度进一步增加到5 m，水分子在成键轨道中的贡献变得更强，这增加了HER的可能性(图4d)。同时，轨道耦合进一步减弱，导致电子转移阻碍增加，这与过量LiTFSI引起的实验表征阻抗增大是一致的。图4e的PDOS揭示了0.5 m + 1 m H₂ O电解液的电子结构，H₂ O的s和p轨道与LiTFSI和Zn(CF₃ SO₃)₂ 均有明显的重叠，支持了溶剂化结构的形成，但3 eV的带隙限制了整体的导电性。图4f所示为0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液中，AN的相互作用导致Zn-3d轨道发生轻微的下移。并且H₂ O与LiTFSI和Zn(CF₃ SO₃)₂ 的相互作用明显减弱，说明AN的加入改变了溶剂化结构。随着LiTFSI浓度的增加，观察到Zn-3d轨道的显著下移，表明水分子与Zn²⁺和乙腈分子之间的相互作用进一步受到抑制，同时能隙也随之增大，导致了高的电子转移势垒(图4g, 4h)。图4i的RDFs证实，0.5 m + 1 m H₂ O电解液中的成键贡献主要来自于水分子中的H-O键。而在图4j的0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解液的RDFs中，水分子的峰几乎消失。图4k所示为不同电解液中离子与溶剂分子的相互作用能，0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解液中相互作用能降低，相互作用更强。图4l的均方位移图表明，0.5 m + 1 m H₂ O/AN电解液中具有最高的扩散。与水系电解液相比，H₂ O/AN电解液中的离子相互作用更强，离子和分子的迁移率更高，不仅提高了电解质的导电性，而且提高了超级电容器的工作电压。

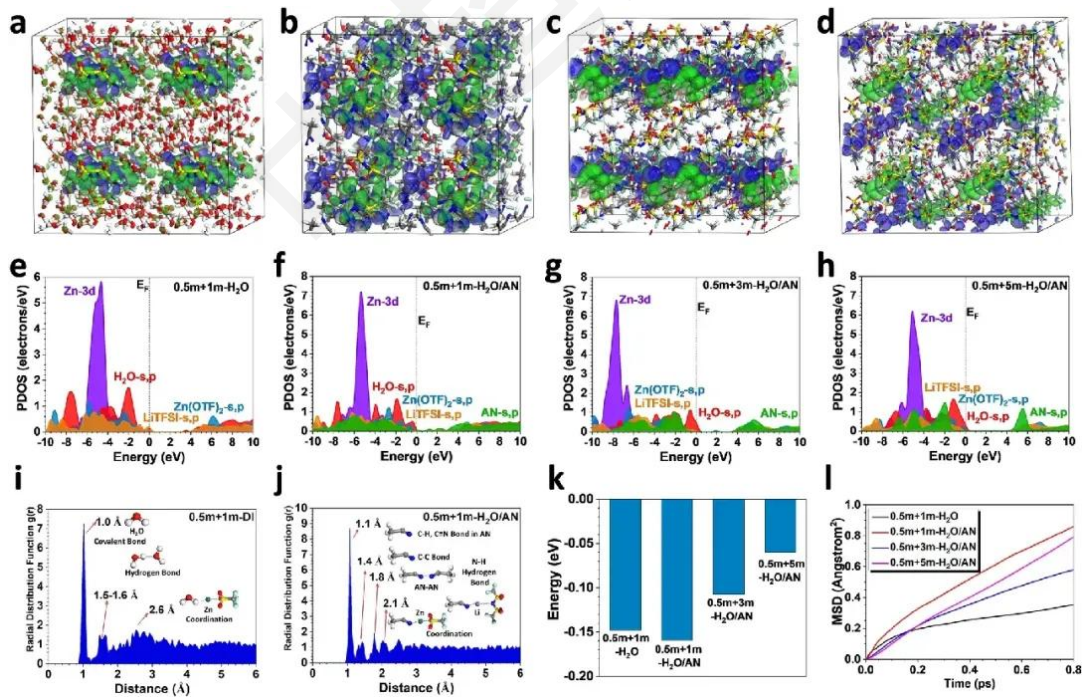


图4.(a)0.5 m + 1 m-H₂ O电解液, (b)0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液, (c)0.5 m + 3 m-H₂ O/AN电解液和(d)0.5 m + 5 m-H₂ O/AN电解液的反键轨道和成键轨道的三位轮廓图，其中蓝色等值面代表成键轨

道，绿色等值面代表反键轨道；(e)0.5 m + 1 m-H₂ O电解液，(f)0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液，(g)0.5 m + 3 m-H₂ O/AN电解液和(h)0.5 m + 5 m-H₂ O/AN电解液的PDOS图；(i)0.5 m + 1 m-H₂ O电解液和(j)0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液的径向分布函数图；(k)作用能比较图；(l)不同电解液在298K下的均方位移图。

总结

本文设计了一种新型的稀的水/乙腈电解液，用于锌离子混合超级电容器，具有优异的电化学性能。理论计算证实，乙腈分子与Zn阳离子具有较强的相互作用，调控了电解液的溶剂化结构，有利于扩大其在低盐浓度下的电化学窗口。乙腈形成的配位壳层不仅抑制Zn腐蚀和HER，而且提高了整体电化学性能。在稀的0.5 m + 1 m-H₂ O/AN电解液中，Zn沉积/剥离的平均库仑效率达到97.3%，并且锌离子混合超级电容器具有超长寿命(> 120,000次循环)。此外，得益于水-非质子电解液的低盐浓度，锌离子混合超级电容器即使在-30°C的恶劣条件下也能稳定运行，拓展了其应用场景。本研究为通过调控溶剂化结构来开发新型电解质，实现高能量密度、长寿命的锌离子混合超级电容器提供了新的途径。

作者简介

黄勃龙

本文通讯作者

香港理工大学 副教授

主要研究领域：纳米材料、能源材料、固体功能材料和稀土材料的电子态性质，以及在能源材料纳米表界面、多尺度下的能源转换应用等。

个人简介：2007年毕业于北京大学物理系，同年前往剑桥大学从事材料理论研究，并于2012年获得博士学位。2012-2015年于北京大学跟随严纯华院士开展博士后研究，后赴香港城市大学和香港理工大学继续博士后的相关研究，并于2015年入职香港理工大学，目前担任应用生物及化学科技学系副教授与碳战略催化研究中心主任。目前共发表SCI论文300余篇，H-index为80，文章引用次数超过22000次，包括Nature, Science, Energy Environ. Sci., J. Am. Chem. Soc., Chem. Soc. Rev., Nat. Commun., Adv. Mater., Adv. Energy Mater., Angew. Chem. Int. Ed.等国内外顶级杂志，并多次被选为封面推荐文章。入选2022-2023年科睿唯安高被引学者，2022-2023年斯坦福大学评选的全球Top2%高被引学者，此外，还担任《Battery Energy》、《Frontiers in Chemistry》副主编，《JACS Au》、《Nano Research》、《电化学》、《中国稀土学报》、《稀有金属》、《稀土》的青年编

辑或编委。

Email: bhuang@polyu.edu.hk

张文军

本文通讯作者

香港城市大学 讲席教授

主要研究领域：薄膜技术、纳米材料和器件。

个人简介：香港城市大学材料科学与工程系讲席教授、金刚石和先进薄膜中心主任。重点研究金刚石材料、薄膜材料、表面和界面分析以及离子与材料交互作用。迄今为止已在国际期刊上发表400余篇论文，并多次在国际会议上作邀请报告。曾获得日本应用物理学会最佳论文奖，德国洪堡基金会Friedrich Wilhelm Bessel研究奖，城大杰出研究奖，校长奖等。兼任德国锡根大学访问教授，中科院理化所客座教授、兰州大学萃英讲席客座教授等。

Email: apwjzh@cityu.edu.hk

撰稿：《纳微快报(英文)》编辑部

编辑：《纳微快报(英文)》编辑部

信息来源：<https://mp.weixin.qq.com/s/FHFmlhkh-Cy3QFpsUxEQlg>