中国科学院A类战略性先导科技专项

变革性洁净能源关键技术与示范

Transformational Technologies
for Clean Energy and Demonstration

研究发展动态

2022年第3期（总第17期）

国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范电站

中国科学院大连化学物理研究所
中国科学院武汉文献情报中心

目录

2022 年第 3 期(总第 17 期)
2022 年 10 月 15 日出版

专项研发进展 3

百公斤级醇-烃吸附分离放大试验取得重大突破 3

低粘度 mPAO 基础油中试样品的配方适应性获军方认可 4

张家口黄帝城小镇一期平板系统及二期塔式跨季节集热供热系统正式运行 4

配电网多站融合关键技术取得新的研究进展 5

张家口黄帝城小镇生物燃气示范工程成功实现并网供气 6

全球功率最大、容量最大液流电池储能调峰电站即将投用 7

国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目顺利并网并完成系统带电调试 8

中科院工程热物理研究所压缩空气储能技术的产业化公司入选《麻省理工科技评论》50 家聪明公司 9

国内视点 11

《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》解读 .. 11

《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》解读 14

《工业领域碳达峰实施方案》要点 18

《“十四五”新型城镇化实施方案》能源要点 21

南京大学提出高能长寿命固态锂-二氧化碳电池新策略 24

武汉大学实现首例工业级电流密度纯水 CO_2 共电解制乙烯 25

温度压力解耦助力纤维素低温快速水热转化 27

国际瞭望 30

IRENA 提出可再生能源助力中国碳中和的行动建议 30

美国能源部提出碳去除技术基础科学问题优先研究方向 37

日本发布《蓄电池产业战略》 39

英国发布关键矿产战略并启动多项支持举措 42

美《通胀削减法案》拟拨款 3690 亿美元用于气候和清洁能源 .. 43

欧盟投入 54 亿欧元支持氢能技术价值链创新及首次工业部署 .. 46

精确调控单原子催化剂实现 CO_2 高效电化学还原 47

漂浮式钙钛矿-$BiVO_4$ 人造树叶助力太阳能燃料规模化生产 49

可扩展工艺实现 19.1%大面积全钙钛矿叠层光伏组件 51

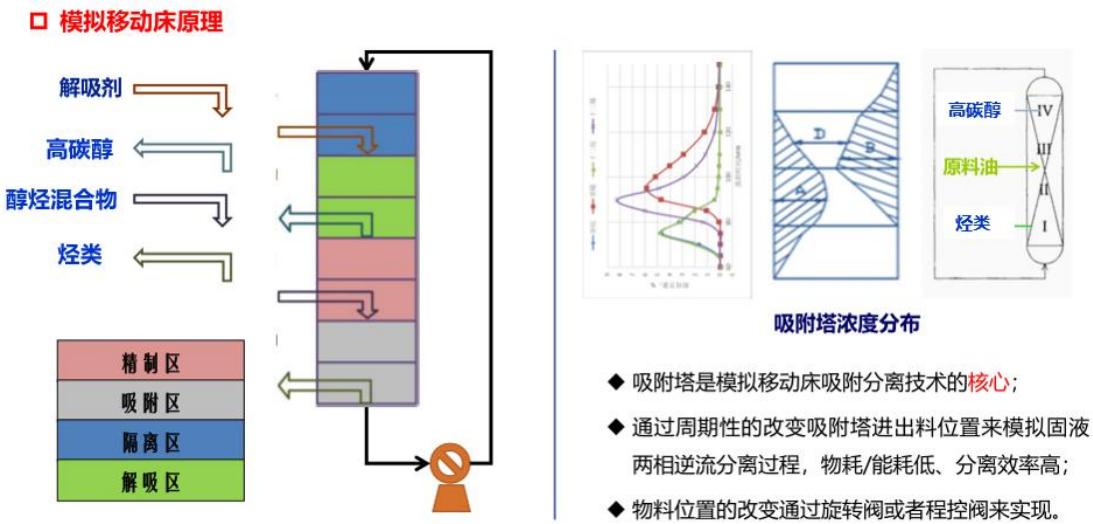
全氟聚醚基电解质实现超稳定全固态钠金属电池 53

责任编辑：迟成　卫小芳　　中科院洁净能源先导专项办公室

专项研发进展

百公斤级醇-烃吸附分离放大试验取得重大突破

2022 年 9 月 26 日，由中国科学院大连化学物理研究所、陕西延长石油（集团）公司和天津中海油化工研究设计院有限公司合作开展的百公斤级醇-烃吸附-解吸分离放大试验取得了重大突破，为 10 万吨/年合成气制高碳醇全流程工业示范提供了重要技术支撑。



百公斤级醇-烃吸附-解吸分离放大试验是在前期完成的百公斤级醇-烃萃取-反萃取分离技术的基础上的新一代分离技术。相比于全部采用原萃取-反萃取技术，萃取-反萃取分离技术与醇-烃吸附-解吸分离技术相结合的分离技术更加高效，分离塔数从原来的 30-40 个降低至 10 个左右，大幅度降低了设备投资，节约了装置占地面积，操作更为简单，分离能耗更低。据初步估算，10 万吨/年合成气制高碳醇的财务内部收益率（税前）由原来的 15%左右提高至约 20%左右。该项试验的圆满完成，为 10 万吨/年醇-烃吸附分离可研报告和工艺包的编制提供了关键工艺参数，为合成气制高碳醇工艺提供了醇-油分离关键技术支撑。

［中国科学院大连化学物理研究所 冯四全］

低粘度 mPAO 基础油中试样品通过配方适应性评价

2022 年 8 月 31 日，上海高研院李久盛团队开发的 mPAO4，6，8，10 四个粘度基础油中试产品通过军用油调制单位适应性评价。这是该团队在 2022 年 2 月煤基 α -烯烃制 mPAO 基础油生产关键技术专家评审通过后取得的又一重要进展。

基于中科院上海高等研究院及其合作单位提供的 200 公斤 mPAO 基础油中试样品，军用油调制单位分别调制了低温合成烃耐燃航空液压油，X 用地面装备液力传动油，CF-4+ 5W-40 重负荷动力传动通用润滑油，2 号坦克润滑脂Ⅱ型，4450 号航空齿轮油等军用油品。经过三个月的适应性性能评价测试，结果表明所研制的煤基 mPAO 基础油在上述油品配方中均表现出了良好的适用性，尤其在粘温性能和低温性能方面表现出色，有望实现对进口同类产品替代，保障我国军事装备的润滑油供给安全。

［中国科学院上海高等研究院 许健］

张家口黄帝城小镇一期平板系统及二期塔式跨季节集热供热系统正式运行

7 月份跨季节储热供热一期 1.26 万㎡平板+1.33 万 m³ 储热系统正式运行。8 月份跨季节储热供热二期 2225 ㎡塔式+1.03 万 m³ 储热

系统投入使用，实现达华建国酒店采暖与生活热水供应。目前，两套系统运行状况稳定，经过对 8-9 月份的运行数据分析，系统集热效率均为 50%左右。

跨季节储热供热示范工程基于“源-网-荷”协同技术，采用平板、塔式集热及大容量跨季储热技术，实现了建筑采暖供热，为我国区域太阳能及多能互补集成供热系统的产业化提供了施工及运维经验。

二期塔式系统运行中

[中国科学院电工研究所 杨军峰]

配电网多站融合关键技术取得新的研究进展

2022 年 8 月，中科院电工所柔性电力技术研发团队针对提出的新型多站融合系统完成了多项功能运行试验验证。该新型多站融合系统改变了传统柔性多状态开关的运行方式，重复利用柔性多状态开关直流侧母线，可为未来超大功率充电需求提供一种高效解决方案。同时系统运用分级供电模式，在节约多站系统建设成本的同时又满足了不同功能站的供电需求。推导分析了多站融合运行系统的小信号模型，可为系统稳定运行边界提供理论支撑。

新型多站融合系统完成了三种实际运行场景多站融合仿真和现

场运行数据验证，表明可充分满足敏感负荷的供电可靠性和系统运行稳定性的要求，能够实现系统内的潮流互济和在故障运行状态下敏感负荷的潮流转供。相关研究成果以 Coordinated Control Strategy and Physical Integration of a Multi-Station Integrated System 为题，发表在《IEEE Transactions on Industry Applications》（Early Access）上。论文链接：DOI: 10.1109/TIA.2022.3198029

黄帝城小镇多站融合运行测试现场

［中国科学院电工研究所 霍群海］

张家口黄帝城小镇生物燃气示范工程成功实现并网供气

2022 年 6 月，张家口黄帝城小镇生物燃气示范工程成功实现与天然气管网并网，为周边约 8000 户居民和达华建国酒店供应生物天然气，解决了当地因气源问题导致的用气难问题。该示范工程集成了“规模化生物燃气分布式能源系统”课题的混合原料营养复配、高负荷厌氧发酵、组合式搅拌、失稳预警、生物强化调控、生物燃气提纯等关键技术，解决了厌氧系统冬季低温启动难、大型罐体内底物均质化程度低、发酵过程中罐内易起泡和结壳等规模化工程问题，池容产

气率达到 1.5 m^3/m^3·d 以上，粗沼气 CH_4 含量在 60%以上，提纯后 CH_4 含量超过 97%，产品气指标符合《天然气》GB17820 国家标准。

“成功并网供气”标志着示范工程进入稳定运行和市场化运营阶段，符合国家《关于促进生物天然气产业化发展的指导意见》等政策导向，同时可有效推动当地有机废弃物的就近无害化处理和资源化利用，为项目的模式复制提供了指导经验，助力国家减污降碳协同增效方案的实施。

示范工程生物天然气并网供气

［中国科学院广州能源所 甄峰］

全球功率最大、容量最大液流电池储能调峰电站即将投用

9 月 29 日，由中国科学院大连化学物理研究所（以下简称“大连化物所”）李先锋研究员团队提供技术支撑、大连融科储能技术发展有限公司设计制造、大连恒流储能电站有限公司建设运营的百兆瓦级大连液流电池储能调峰电站进入并网调试最后阶段，预计 10 月中旬正式投入使用。该电站是迄今为止全球功率最大、容量最大的液流电池储能调峰电站。

大连液流电池储能调峰电站是国家能源局于2016年4月批准建设的首个国家级大型化学储能示范项目，总建设规模为200兆瓦（MW）/800兆瓦时（MWh）。本次并网的是该电站的一期工程，规模为100兆瓦（MW）/400兆瓦时（MWh），即电站的额定功率为10万度电/小时，最多可存放40万度电。该电站相当于城市的“电力银行”，在整个电力系统中起到“削峰填谷”的作用：在电网用电低谷时，利用风能、太阳能等可再生能源发电给电池充电，将电能转化为化学能储存于电池中；在电网用电高峰时，将储存于电池中的化学能转化为电能进行放电。按照中国居民日常生活每日人均用电2度左右计算，电站可供20万居民一天的用电需求，可缓解大连乃至辽宁电网调峰压力，提升可再生能源并网率、平衡电网稳定性并提高电网可靠性。该电站的投用将对加快推进我国大规模储能在电力调峰及可再生能源并网中的应用具有重要意义。

［中国科学院大连化学物理研究所 刘慧颖］

国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目顺利并网并完成系统带电调试

2022年9月，河北省张家口国际首套百兆瓦先进压缩空气储能

国家示范项目顺利完成系统带电调试工作，相关测试指标均达到或超过设计指标。

河北省张家口国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目由巨人能源旗下张北巨人能源有限公司投资建设，技术提供方为中国科学院工程热物理研究所，设备提供方为中储国能（北京）技术有限公司，工程总承包单位为中国电建集团水电四局。项目规模为100MW/400MWh，系统设计效率70.4%，该项目于2018年立项，2021年8月完成电站主体土建施工，2021年12月完成主要设备安装及系统集成。目前已经实现压缩空气储能电站的并网和系统带电调试，即将实现电站的商业化运行。

先进压缩空气储能技术具有规模大、成本低、寿命长、清洁无污染、储能周期不受限制、不依赖化石燃料及地理条件等优势，是极具发展潜力的长时大规模储能技术，可实现电力系统调峰、调频、调相、旋转备用、黑启动等多个功能，在提高电力系统效率、安全性和经济性等方面具有广阔的发展空间和强劲的竞争力。

河北省张家口国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目建成后，将成为国际上规模最大、效率最高的先进压缩空气储能电站，可促进大规模先进压缩空气储能技术产业化进程，有效支撑能源革命和新型电力系统构建，具有里程碑意义。

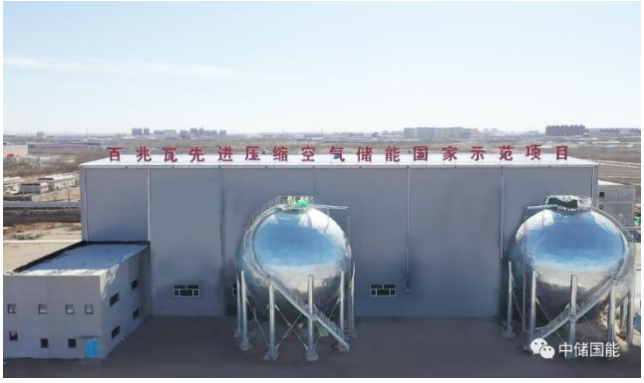
［中国科学院工程热物理研究所 赵钢炜］

中科院工程热物理研究所压缩空气储能技术的产业化公司入选《麻省理工科技评论》50家聪明公司

7月29日，《麻省理工科技评论》重磅揭晓 2021年度 TR50 入选名单，该榜单是全球科技领域最具权威的榜单之一，以“可持续未来”概念为导向，聚焦“在中国诞生的、由中国引领的、为中国服务

的”创新力量，从而预见未来有能力引领中国和世界科技发展浪潮的企业，研究所自主研发的先进压缩空气储能技术的产业化公司成功入选。

《麻省理工科技评论》给出的上榜理由是：突破多项关键技术，建成世界首套单机容量最大的100MW先进压缩空气储能和世界首套10MW盐穴先进压缩空气储能两个国家示范电站项目，实现了压缩空气储能技术应用与工程突破。关键词是100MW，因其成功落地的世界首套具有完全自主知识产权的100MW先进压缩空气储能电站，系统设计效率达70.4%，相较国际同类工程效率提高10-20%。



国际首套100MW先进压缩空气储能国家示范电站

国际首套10MW盐穴先进压缩空气储能国家示范电站

[中国科学院工程热物理研究所 赵钢炜]

国内视点

《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》解读

8 月 18 日，科技部等九部门发布《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》[1]（以下简称《实施方案》）提出，通过实施方案，到 2025 年实现重点行业和领域低碳关键核心技术的重大突破，支撑单位国内生产总值（GDP）二氧化碳排放比 2020 年下降 18%，单位 GDP 能源消耗比 2020 年下降 13.5%；到 2030 年，进一步研究突破一批碳中和前沿和颠覆性技术，形成一批具有显著影响力的低碳技术解决方案和综合示范工程，建立更加完善的绿色低碳科技创新体系，有力支撑单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 65%以上，单位 GDP 能源消耗持续大幅下降。要点解读如下：

一、出台《实施方案》的目的和意义

碳达峰碳中和是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策，事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。科技创新是同时实现经济社会发展和碳达峰碳中和的关键。

为深入贯彻落实党中央国务院关于碳达峰碳中和的重大决策部署，按照碳达峰碳中和“1+N”政策体系的总体安排，科技部会同发展改革委、工业和信息化部、生态环境部、住房和城乡建设部、交通运输部等九部门组织编制了《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》，《实施方案》统筹提出支撑 2030 年前实现碳达峰目标的科技创新行动和保障举措，并为 2060 年前实现碳中和目标做好技术研发储备，为全国科技界以及相关行业、领域、地方和企业开展碳达峰碳中和科技创新工作的开展起到指导作用。

二、《实施方案》的定位和编制原则

[1] 科技部等九部门关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》的通知. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm

1、定位

《实施方案》对标《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》有关部署，针对我国各重点行业碳排放基数和到 2060 年的减排需求预测，系统提出科技支撑碳达峰碳中和的创新方向，统筹低碳科技示范和基地建设、人才培养、低碳科技企业培育和国际合作等措施，推动科技成果产出及示范应用，为实现碳达峰碳中和目标提供科技支撑。

2、编制原则

一是统筹当前和长远。按照经济社会可持续发展的要求，基于我国 2030 年和 2060 年经济社会发展和碳排放的情景预测，研究提出支撑 2030 年前实现碳达峰目标的科技创新行动和保障举措，并构建低碳技术创新体系，为 2060 年前实现碳中和目标做好技术研发储备。

二是统筹科技创新与政策创新。科技创新和政策创新是实现碳达峰碳中和目标的两个重要方面，缺一不可。结合科技部的职能，《实施方案》更加侧重于科技创新，着力于加强高效率、低成本的低碳技术供给，同时也适当考虑了低碳技术标准等政策创新方面的内容，以促进低碳技术产业化。

三是统筹科技部门和相关方面的工作。在科技部已开展和正在部署的相关工作基础上，广泛征求相关部门和地方在低碳科技创新方面的科技需求，在《实施方案》编制过程中充分吸纳。按照碳达峰碳中和“1+N”政策体系的总体安排，与相关部门编制的实施方案做好协调和对接。

三、《实施》方案的重点任务

加强科技支撑碳达峰碳中和涉及基础研究、技术研发、应用示范、成果推广、人才培养、国际合作等多个方面，《实施方案》提出了 10 项具体行动。包括：

一是能源绿色低碳转型科技支撑行动。立足以煤为主的资源禀赋，抓好煤炭清洁高效利用，增加新能源消纳能力，推动煤炭和新能源优化组合，保障国家能源安全并降低碳排放；

二是低碳与零碳工业流程再造技术突破行动。是以原料燃料替代、短流程制造和低碳技术集成耦合优化为核心，引领高碳工业流程的零碳和低碳再造；

三是建筑交通低碳零碳技术攻关行动。是以围绕交通和建筑行业绿色低碳转型目标，以脱碳减排和节能增效为重点，大力推进低碳零碳技术研发与推广应用；

四是负碳及非二氧化碳温室气体减排技术能力提升行动。聚焦提升 CCUS、绿色碳汇、蓝色碳汇等负碳技术能力，对甲烷、氧化亚氮等非二氧化碳温室气体监测和减量替代技术进行针对性部署；

五是前沿颠覆性低碳技术创新行动。围绕驱动产业变革的目标，聚焦基础研究最新突破，加快培育颠覆性技术创新路径，引领实现产业和经济发展方式的迭代升级；

六是低碳零碳技术示范行动。形成一批可复制可推广的先进技术引领的节能减碳技术综合解决方案，并开展一批典型低碳技术应用示范，促进低碳技术成果转移转化；

七是碳达峰碳中和管理决策支撑行动。加强碳减排监测、核查、核算、评估技术体系研究建议，提出不同产业门类、区域的碳达峰碳中和发展路径和技术支撑体系；

八是碳达峰碳中和创新项目、基地、人才协同增效行动。着力加强国家科技计划对低碳科技创新的系统部署，推动国家绿色低碳创新基地建设和人才培养，加强项目、基地和人才协同，提升创新驱动合力和国家创新体系整体效能；

九是绿色低碳科技企业培育与服务行动。加快完善绿色低碳科技企业孵化服务体系，培育一批低碳科技领军企业，优化绿色低碳领域

创新创业生态；

十是碳达峰碳中和科技创新国际合作行动。持续深化低碳科技创新领域国际合作，构建国际绿色技术创新国际合作网络，支撑构建人类命运共同体。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据科技部解读新闻编辑]

《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》解读

8 月 29 日，工业和信息化部、财政部、商务部、国务院国有资产监督管理委员会、国家市场监督管理总局联合发布《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》[2]（以下简称《行动计划》）提出，推进火电、水电、核电、风电、太阳能、氢能、储能、输电、配电及用电等 10 个领域电力装备绿色低碳发展，并围绕上述领域的提出了六项行动。要点解读如下：

一、编制背景

我国电力碳排放在国家总排放中占比近 50%，推动电力行业绿色转型是实现碳达峰碳中和目标的重中之重。电力能源供给将由主要依靠传统煤电逐渐转变为更多依靠风电、光伏等低碳排放的新能源发电，能源生产将从主要依靠资源转变为更多依靠装备，电力装备成为落实“双碳”战略、实现能源强国建设目标的重要基础和支撑。

为深入贯彻落实党中央、国务院关于碳达峰碳中和的重大战略决策，推进能源生产清洁化、能源消费电气化，支撑新型电力系统建设，加快电力装备绿色低碳创新发展，工业和信息化部等五部门在深入调查研究、广泛听取意见的基础上，联合制定发布《行动计划》。

二、总体考虑

《行动计划》紧紧围绕碳达峰碳中和战略目标，坚持系统谋划，

[2] 工业和信息化部 财政部 商务部 国务院国有资产监督管理委员会 国家市场监督管理总局关于印发加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划的通知.
http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/29/content_5707333.htm

加强各部门政策间的衔接，统筹推进电力装备持续健康发展。

（一）突出问题导向和目标导向。在落实碳达峰碳中和战略和推进能源强国建设背景下，聚焦解决电力装备发展中的难点、重点、特点问题。注重可操作性，围绕供给结构改善，电网输配保障效率提升等目标，部署了重点任务和措施。

（二）坚持系统观念、统筹推进。坚持先立后破、通盘谋划，在发展方向上，既加快传统煤电装备改造升级，又大力发展新能源装备，实现电力能源绿色低碳转型与安全可靠供应相统一；在发展路径上，充分利用国内国际两个市场、两种资源，既注重研发创新，又支持“走出去”，在新发展格局下推进电力装备高质量发展。

（三）坚持市场主导、政府引导。注重强化企业市场和创新主体地位，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，加快电力装备绿色低碳创新发展。更好发挥政府引导作用，着力加强共性技术和公共服务平台供给，完善技术服务体系，健全政策支持体系，引导产业健康发展。

（四）强化创新驱动和示范引领。注重创新驱动，瞄准电力装备创新发展方向，建立健全产业创新体系，构建龙头企业为引领、大中小企业融通发展的创新生态。注重示范引领，开展智能制造、工业互联网试点示范，加快推进网络化智能化转型发展，支持试点应用，培育应用新模式新业态。

三、主要目标

通过 5-8 年时间，电力装备供给结构显著改善，保障电网输配效率明显提升，高端化智能化绿色化发展及示范应用不断加快，国际竞争力进一步增强，基本满足适应非化石能源高比例、大规模接入的新型电力系统建设需要。煤电机组灵活性改造能力累计超过 2 亿千瓦，可再生能源发电装备供给能力不断提高，风电和太阳能发电装备满足 12 亿千瓦以上装机需求，核电装备满足 7000 万千瓦装机需求。

四、重点任务

《行动计划》重点围绕火电装备、水电装备、核电装备、风电装备、太阳能装备、氢能装备、储能装备、输电装备、配电装备、用电装备等电力装备 10 个领域，提出六项行动。

（一）装备体系绿色升级行动。统筹发输配用电装备供给结构调整，聚焦火电装备、水电装备、核电装备、风电装备、太阳能装备、氢能装备、储能装备、输电装备、配电装备、用电装备等电力装备 10 个领域，围绕新型电力系统构建，加速发展清洁低碳发电装备，提升输变电装备消纳保障能力，加快推进配电装备升级换代、提高用电设备能效匹配水平，推进资源循环利用。

（二）电力装备技术创新提升行动。坚持创新驱动，强化企业创新主体地位，完善产业创新体系和产业发展生态，推动产业集群发展，不断增强产业链供应链竞争力。在电力装备领域突破一批关键核心技术，建设一批创新平台，培育一批产业集群。

（三）网络化智能化转型发展行动。深化与新一代信息技术融合，加快电力装备产品形态、研发手段、生产方式与服务模式创新变革，推进数字化绿色化服务化发展。在电力装备领域培育若干智能制造、工业互联网标杆企业和示范园区。

（四）技术基础支撑保障行动。以市场为主体，更好发挥政府作用，推动有效市场和有为政府更好结合，完善产业技术服务体系，引导产业规范发展。

（五）推广应用模式创新行动。加强政策引导和支持，推进应用创新和推广，形成需求牵引供给、供给创造需求的更高水平的动态平衡。在电力装备领域建设 3-5 家试验验证平台，开展典型场景应用试点，培育形成一批优质品牌。

（六）电力装备对外合作行动。充分利用国内国际两个市场、两种资源，围绕高质量共建“一带一路”、深入实施《区域全面经济伙

伴关系协定》，鼓励优势电力装备企业以多种方式加快走出去。加强国际产业合作，打造国际合作和竞争新优势。

五、保障措施

为保障主要目标和重点任务顺利完成，《行动计划》提出四方面保障措施。

一是加大统筹协调力度。充分发挥国家重大技术装备办公室作用，建立覆盖研发、制造、应用及服务等的部门协同工作机制。强化央地联动，指导地方行业主管部门结合实际出台配套措施。发挥行业组织桥梁纽带作用，助力创新发展、推广应用等方面的政策落实，加强行业自律，强化安全生产。依托高端智库、研究机构等开展深入研究，提供重要决策支撑。

二是强化财税金融支持。落实节能节水、资源综合利用等税收优惠政策。鼓励金融机构在依法合规、风险可控、商业可持续前提下，为符合条件的电力装备企业提供信贷支持等金融服务。发挥国家产融合作平台作用，引导社会资本等支持电力装备发展。

三是加强专业人才培养。支持具备条件的高等院校联合企业、科研院所等培育高端研发、技能及管理人才。引导专业服务机构创新人才培养模式，培育一批高端复合型人才。优化人才引进机制，建立健全人才激励制度，鼓励企业积极引进海外高层次人才。

四是营造良好舆论环境。强化舆论导向，加强典型项目、典型经验宣传报道，在全社会营造电力装备绿色低碳创新发展的良好氛围。鼓励地方政府、行业协会、龙头企业等联合举办电力装备展会论坛，发挥世界清洁能源装备大会作用，搭建国际交流展示合作平台。发挥权威优势媒体平台导向作用，灵活运用多种形式，强化电力装备质量品牌宣传。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据工业和信息化部解读新闻 编辑]

《工业领域碳达峰实施方案》要点

8 月 1 日，工信部、国家发改委、生态环境部发布《工业领域碳达峰实施方案》[3]，提出了工业领域碳达峰的总体目标，以及六大重点任务、两个重大行动和若干政策保障。要点如下：

一、总体目标

“十四五”期间，产业结构与用能结构优化取得积极进展，能源资源利用效率大幅提升，建成一批绿色工厂和绿色工业园区，研发、示范、推广一批减排效果显著的低碳零碳负碳技术工艺装备产品，筑牢工业领域碳达峰基础。到 2025 年，规模以上工业单位增加值能耗较 2020 年下降 13.5%，单位工业增加值二氧化碳排放下降幅度大于全社会下降幅度，重点行业二氧化碳排放强度明显下降。

“十五五”期间，产业结构布局进一步优化，工业能耗强度、二氧化碳排放强度持续下降，努力达峰削峰，在实现工业领域碳达峰的基础上强化碳中和能力，基本建立以高效、绿色、循环、低碳为重要特征的现代工业体系。确保工业领域二氧化碳排放在 2030 年前达峰。

二、六大重点任务

1、深度调整产业结构。推动产业结构优化升级，坚决遏制高耗能高排放低水平项目盲目发展，大力发展绿色低碳产业。包括：①构建有利于碳减排的产业布局；②坚决遏制高耗能高排放低水平项目盲目发展；③优化重点行业产能规模；④推动产业低碳协同示范。

2、深入推进节能降碳。把节能提效作为满足能源消费增长的最优先来源，大幅提升重点行业能源利用效率和重点产品能效水平，推进用能低碳化、智慧化、系统化。包括：①调整优化用能结构；②推动工业用能电气化；③加快工业绿色微电网建设；④加快实施节能降碳改造升级；⑤提升重点用能设备能效；⑥强化节能监督管理。

3、积极推行绿色制造。完善绿色制造体系，深入推进清洁生产，

[3] 工业和信息化部 国家发展改革委 生态环境部关于印发工业领域碳达峰实施方案的通知. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703910.htm

打造绿色低碳工厂、绿色低碳工业园区、绿色低碳供应链，通过典型示范带动生产模式绿色转型。包括：①建设绿色低碳工厂；②构建绿色低碳供应链；③打造绿色低碳工业园区；④促进中小企业绿色低碳发展；⑤全面提升清洁生产水平。

4、大力发展循环经济。优化资源配置结构，充分发挥节约资源和降碳的协同作用，通过资源高效循环利用降低工业领域碳排放。包括：①推动低碳原料替代；②加强再生资源循环利用；③推进机电产品再制造；④强化工业固废综合利用。

5、加快工业绿色低碳技术变革。推进重大低碳技术、工艺、装备创新突破和改造应用，以技术工艺革新、生产流程再造促进工业减碳去碳。包括：①推动绿色低碳技术重大突破；②加大绿色低碳技术推广力度；③开展重点行业升级改造示范。

6、主动推进工业领域数字化转型。推动数字赋能工业绿色低碳转型，强化企业需求和信息服务供给对接，加快数字化低碳解决方案应用推广。包括：①推动新一代信息技术与制造业深度融合；②建立数字化碳管理体系；③推进“工业互联网+绿色低碳”。

三、两个重大行动

1、重点行业达峰行动。聚焦重点行业，制定钢铁、建材、石化化工、有色金属等行业碳达峰实施方案，研究消费品、装备制造、电子等行业低碳发展路线图，分业施策、持续推进，降低碳排放强度，控制碳排放量。

（1）钢铁。到 2025 年，废钢铁加工准入企业年加工能力超过 1.8 亿吨，短流程炼钢占比达 15%以上。到 2030 年，富氢碳循环高炉冶炼、氢基竖炉直接还原铁、碳捕集利用封存等技术取得突破应用，短流程炼钢占比达 20%以上。

（2）建材。到 2025 年，水泥熟料单位产品综合能耗水平下降 3%以上。到 2030 年，原燃料替代水平大幅提高，突破玻璃熔窑窑外

预热、窑炉氢能煅烧等低碳技术，在水泥、玻璃、陶瓷等行业改造建设一批减污降碳协同增效的绿色低碳生产线，实现窑炉碳捕集利用封存技术产业化示范。

（3）石化化工。到 2025 年，“减油增化”取得积极进展，新建炼化一体化项目成品油产量占原油加工量比例降至 40%以下，加快部署大规模碳捕集利用封存产业化示范项目。到 2030 年，合成气一步法制烯烃、乙醇等短流程合成技术实现规模化应用。

（4）有色金属。到 2025 年，铝水直接合金化比例提高到 90%以上，再生铜、再生铝产量分别达到 400 万吨、1150 万吨，再生金属供应占比达 24%以上。到 2030 年，电解铝使用可再生能源比例提至 30%以上。

（5）消费品。到 2025 年，造纸行业产业集中度前 30 位企业达 75%，采用热电联产占比达 85%；到 2030 年，热电联产占比达 90%以上。到 2025 年，纺织行业差别化高品质绿色纤维产量和比重大幅提升，低温、短流程印染低能耗技术应用比例达 50%，能源循环利用技术占比达 70%。到 2030 年，印染低能耗技术占比达 60%。

（6）装备制造。到 2025 年，一体化压铸成形、无模铸造、超高强钢热成形、精密冷锻、异质材料焊接、轻质高强合金轻量化、激光热处理等先进近净成形工艺技术实现产业化应用。到 2030 年，创新研发一批先进绿色制造技术，大幅降低生产能耗。

（7）电子。到 2025 年，连续拉晶技术应用范围 95%以上，锂电材料、光纤行业非电能源占比分别在 7%、2%以下。到 2030 年，电子材料、电子整机产品制造能耗显著下降。

2、绿色低碳产品供给提升行动

（1）构建绿色低碳产品开发推广机制。到 2025 年，创建一批生态（绿色）设计示范企业，制修订 300 项左右绿色低碳产品评价相关标准，开发推广万种绿色低碳产品。

（2）加大能源生产领域绿色低碳产品供给。加强能源电子产业高质量发展统筹规划，推动光伏、新型储能、重点终端应用、关键信息技术产品协同创新。实施智能光伏产业发展行动计划并开展试点示范，加快基础材料、关键设备升级。持续推动陆上风电机组稳步发展，加快大功率固定式海上风电机组和漂浮式海上风电机组研制，开展高空风电机组预研。重点攻克变流器、主轴承、联轴器、电控系统及核心元器件，完善风电装备产业链。

（3）加大交通运输领域绿色低碳产品供给。大力推广节能与新能源汽车，强化整车集成技术创新，提高新能源汽车产业集中度。开展电动重卡、氢燃料汽车研发及示范应用。到 2030 年，当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到 40%左右，乘用车和商用车新车二氧化碳排放强度分别比 2020 年下降 25%和 20%以上。大力发展绿色智能船舶，加强船用混合动力、LNG 动力、电池动力、氨燃料、氢燃料等低碳清洁能源装备研发，推动内河、沿海老旧船舶更新改造，加快新一代绿色智能船舶研制及示范应用。推动下一代国产民机绿色化发展，积极发展电动飞机等新能源航空器。

（4）加大城乡建设领域绿色低碳产品供给。加快推进绿色建材产品认证，开展绿色建材试点城市创建和绿色建材下乡行动，推动优先选用获得绿色建材认证标识的产品。推广高效节能的空调、照明器具、电梯等用能设备，扩大太阳能热水器、分布式光伏、空气热泵等清洁能源设备在建筑领域应用。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

《“十四五”新型城镇化实施方案》能源要点

7 月 12 日，国家发改委印发《“十四五”新型城镇化实施方案》

[4]提出，到 2025 年，城市可持续发展能力明显增强，城镇开发边界全面划定，新增建设用地规模控制在 2950 万亩以内，城市内涝治理取得明显成效，城市燃气等管道老化更新改造深入推进，**能源资源利用效率大幅提升**，城市黑臭水体基本消除，地级及以上城市空气质量优良天数比率提高到 87.5%，城市建成区绿化覆盖率超过 43%。系统完备、科学规范、运行有效的城市治理体系基本建立，治理能力明显增强。《方案》能源要点如下：

[要点 1] 支持资源枯竭城市因地制宜发展接续替代产业，加强民生保障和救助扶助。

[要点 2] 建立完善横向生态保护补偿机制，推动大气、水等污染联防联治。

[要点 3] 探索跨行政区开展能源、通讯、应急救援等服务，建立健全自然灾害、公共卫生等重大突发事件和重要输电通道安全风险联防联控机制。

[要点 4] 加强超大特大城市治理中的风险防控，增强能源安全保障能力，结合实际加大粮油肉菜等生活必需品和疫情防控、抗灾救灾应急物资及生产供应配送等相关设施保障投入。

[要点 5] 推进环境基础设施提级扩能，建设垃圾、污水收集处理设施，加强低碳化改造，打造蓝绿公共空间。

[要点 6] 优化公共充换电设施建设布局，完善居住小区和公共停车场充电设施，新建居住小区固定车位全部建设充电设施或预留安装条件。

[要点 7] 推进水电气热信等地下管网建设，因地制宜在新城新区和开发区推行地下综合管廊模式，推动有条件城市路面电网和通信网架空线入廊入地。

[要点 8] 加强城市景观照明节约用电管理和用能清洁化。

[4] 国家发展改革委关于印发“十四五”新型城镇化实施方案的通知. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/12/content_5700632.htm

[要点 9] 开展老旧小区改造，推进水电路气信等配套设施建设及小区内建筑物屋面、外墙、楼梯等公共部位维修，促进公共设施和建筑节能改造，有条件的加装电梯，打通消防通道，统筹建设电动自行车充电设施，改善居民基本居住条件。

[要点 10]完善供水、供电、通信等生命线备用设施，加强应急救灾和抢险救援能力建设。

[要点 11] 全面推进燃气管道老化更新改造，重点改造城市及县城不符合标准规范、存在安全隐患的燃气管道、燃气场站、居民户内设施及监测设施。

[要点 12] 统筹推进城市及县城供排水、供热等其他管道老化更新改造。

[要点 13] 推行城市运行一网统管，探索建设“数字孪生城市”，推进市政公用设施及建筑等物联网应用、智能化改造，部署智能交通、智能电网、智能水务等感知终端。

[要点 14]地级及以上城市因地制宜基本建立分类投放、收集、运输、处理的生活垃圾分类和处理系统，到 2025 年城镇生活垃圾焚烧处理能力达到 80 万吨/日左右。

[要点 15] 锚定碳达峰碳中和目标，推动能源清洁低碳安全高效利用，有序引导非化石能源消费和以电代煤、以气代煤，发展屋顶光伏等分布式能源，因地制宜推广热电联产、余热供暖、热泵等多种清洁供暖方式，推行合同能源管理等节能管理模式。

[要点 16] 促进工业、建筑、交通等领域绿色低碳转型，推进产业园区循环化改造，鼓励建设超低能耗和近零能耗建筑，推动公共服务车辆电动化替代，到 2025 年城市新能源公交车辆占比提高到 72%。

[要点 17] 开展绿色生活创建行动，倡导绿色出行和绿色家庭、绿色社区建设，推广节能产品和新建住宅全装修交付，建立居民绿色消费奖励机制。

[要点 18] 推进统一的绿色产品认证和标识体系建设，建立绿色能源消费认证机制。

[要点 19] 在 60 个左右大中城市率先建设完善的废旧物资循环利用体系。

[要点 20] 统筹规划各类市政公用设施，推动供水供气供热管网向城郊乡和规模较大中心镇延伸。

[要点 21] 推进燃气入乡，建设安全可靠的乡村储气罐站和微管网供气系统。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据中国能源报新闻编辑]

南京大学提出高能长寿命固态锂-二氧化碳电池新策略

相比于传统的基于液态电解质的锂离子电池，全固态金属锂电池具有高比能、安全、宽操作温度及电化学窗口等优势。然而，固态电解质/电极界面具有在低温下低离子传输特性和高温下加剧的界面反应，使得全固态锂金属电池在 0℃以下的低温和 90℃以上的高温区均难以运行。

南京大学徐骏教授研究团队提出了一种基于原位内建的等离激元异质结构实现超低充电电位和长循环寿命固态锂-二氧化碳电池的新策略，制备了在高温（90℃至 170℃）下安全且稳定的固态锂-二氧化碳电池。针对金属锂与固态电解质（特别是 LAGP）之间高温下加剧的界面反应及由此引发的着火等安全问题，研究团队以高温下稳定且具有高锂离子电导率的三元熔融盐作为人工界面层来改善高温下金属锂/固态电解质之间的界面物理接触和化学稳定性，制备了高温条件下固态锂-二氧化碳电池。该电池在 150℃的高温下，以 500 mA g^{-1} 定容 500 mAh g^{-1} 可稳定循环 980 圈。针对该电池体系中放电产物 Li_2CO_3 难以分解的关键挑战，研究团队在提出的太阳能光热电池技术

的基础上报道了一种基于原位内建的等离激元异质结构来实现超低充电电位和长循环寿命固态锂-二氧化碳电池的新策略。基于此，获得的固态 Li-CO_2 电池以 500 mA g^{-1} 和 500 mAh g^{-1} 在＜3.0 V 的超低充电电位下可稳定可逆循环，获得了截至目前报道的充电电位最低的可循环固态锂-二氧化碳电池。相关研究成果发表在《*Nano Energy*》[5]和《*Advanced Energy Materials*》[6]。

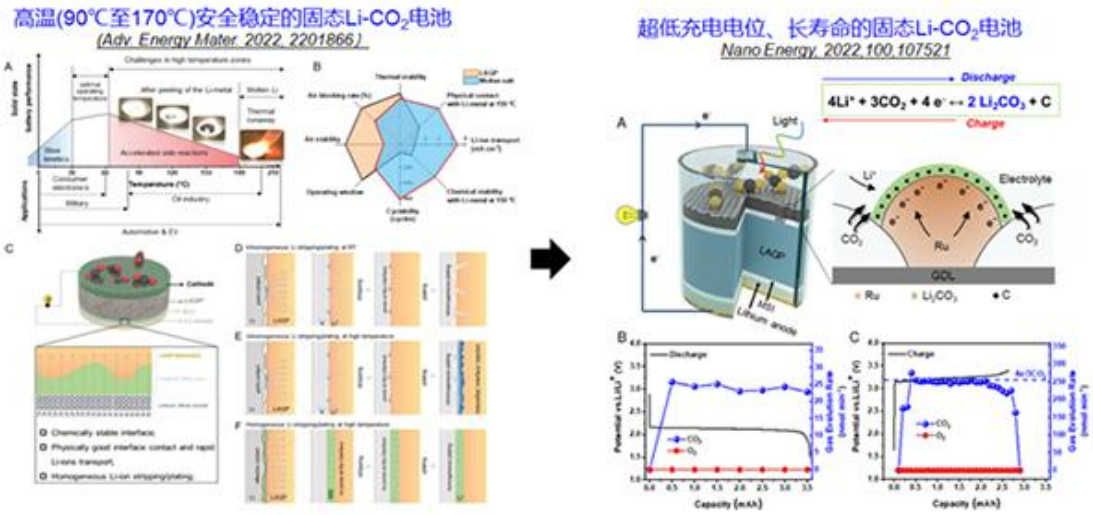


图 1 可呼吸二氧化碳的高比能长寿命固态储能电池

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据国家自然科学基金委新闻编辑]

武汉大学实现首例工业级电流密度纯水 CO_2 共电解制乙烯

电催化 CO_2 还原可以利用可再生能源产生的电能，将温室气体 CO_2 转化为 CO、乙烯、乙醇等高附加值燃料或化工产品，实现人工碳循环。为了达到工业级电流密度，需要采用基于气体扩散电极的流动电解器或聚合物膜电解器。其中，膜电解器中阴阳极紧密压合在仅有微米级厚度的聚合物电解质隔膜上，可以大幅降低内阻，提升电解的能量转化效率，同时还能够以纯水为工作介质，从而避免使用液态电解质造成的电解质消耗、电极易失活、器件维护困难等不利影响。

[5] Sheng Wanga, Hucheng Songa, Ting Zhu, et al. An ultralow-charge-overpotential and long-cycle-life solid-state Li-CO_2 battery enabled by plasmon-enhanced solar photothermal catalysis. *Nano Energy,* 2022, DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.107521

[6] Sheng Wang, Ke Xu, Hucheng Song, et al. A high-energy long-cycling solid-state lithium-metal battery operating at high temperatures. *Advanced Energy Materials,* 2022, DOI: 10.1002/aenm.202201866

然而，基于聚合物电解质/纯水体系的 CO_2 电解技术仍鲜见报道。

武汉大学庄林教授研究团队通过向 Cu 气体扩散电极中引入双功能的碱性离聚物聚季铵化聚醚醚酮（QAPEEK），实现了纯水 CO_2 膜电解器低槽压、工业级电流密度、高选择性地制备乙烯。1 A cm^{-2} 电流密度的槽压仅为 3.73 V，并且 3.54 V 槽压下乙烯产生的净电流密度达到 420 mA cm^{-2}。目前已报道的 CO_2 膜电解器中，往往需要向阳极侧加入液态电解质，但随着气体扩散电极中水的蒸发和电化学消耗，会逐渐出现“盐析”现象，从而阻碍 CO_2 气体传质，发生严重的析氢副反应。采用纯水为工作介质则能避免“盐析”危害，但直接以纯水介质运行，由于阴极催化层利用率低，很难达到高电流密度。需要在阴极催化层中加入离聚物进行离子传导，以确保器件在高电流密度条件下正常运行。表面修饰能够显著影响电催化 CO_2 还原的性能，在 H-型电解池中测试发现，与多种商业化离聚物相比，QAPEEK 修饰 Cu 电极能够有效促进乙烯产生。研究人员结合原位衰减全反射表面增强红外光谱（ATR-SEIRAS）研究和非水体系循环伏安扫描，发现 QAPEEK 中羰基在电化学还原后能够促进 CO_2 活化，从而加速 CO_2 转化为*CO 中间体，高覆盖度的*CO 中间体有利于 C-C 耦合产生乙烯。进一步将 QAPEEK 修饰到 Cu 气体扩散电极中，并进行纯水 CO_2 膜电解器的装配测试。通过调控 QAPEEK 离聚物的用量来优化三相反应界面，有效提升了 CO_2 电解性能。在 50 μg QAPEEK 优化用量下，最高乙烯选择性达到 50%，能够稳定运行 5 h。与多种商品化离聚物相比，QAPEEK 修饰 Cu 气体扩散电极得到更高的乙烯净电流密度。为了进一步提高电流密度，研究人员采用了磁控共溅射制备铜铝合金、原位溶出铝的策略，提高阴极催化层的粗糙度。最终实现 3.73 V 电解槽压下电流密度达到 1 A cm^{-2}，并且 3.54 V 槽压下乙烯产生的净电流密度达到 420 mA cm^{-2}，为目前非消耗性电解质体系中 CO_2 电解制乙烯的最高性能报道。

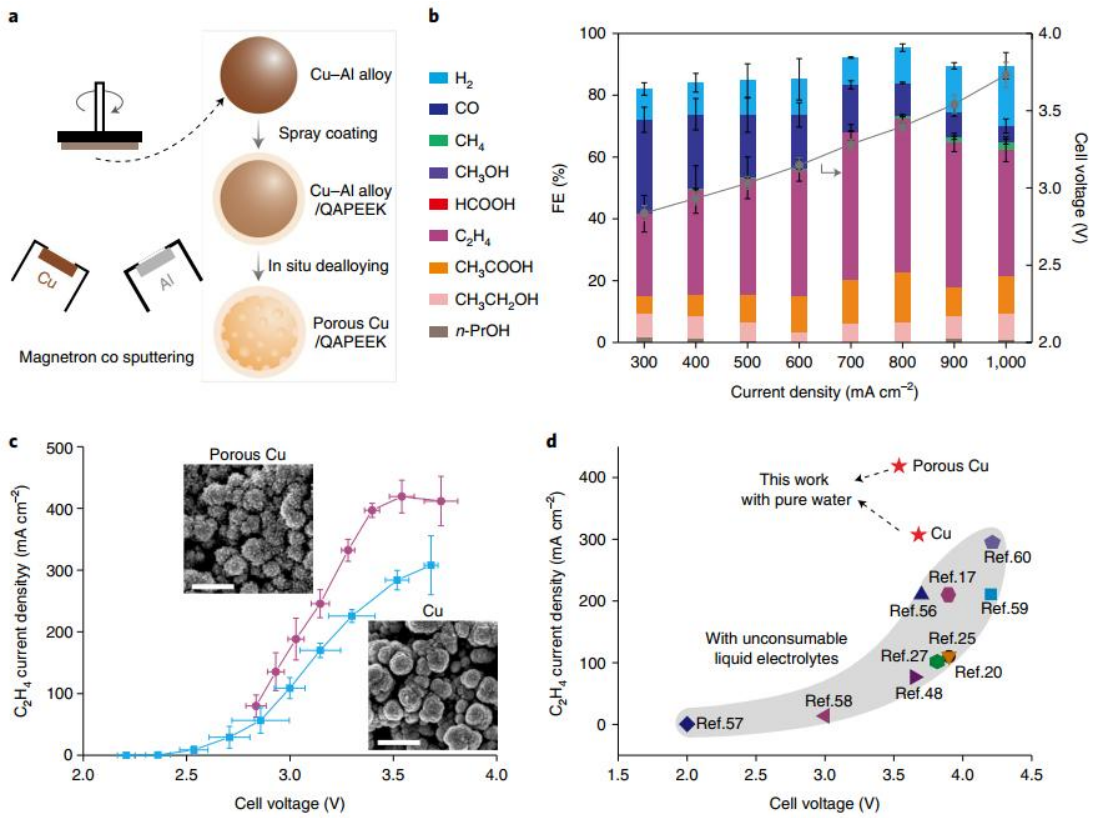


图 1 采用多孔 Cu 气体扩散电极的纯水 CO_2 膜电解器性能（a-c）及与文献中的乙烯净电流密度/电解槽压比较（d）

该项研究报道了首例工业级电流密度纯水 CO_2 共电解制乙烯的碱性膜电解器。通过向阴极引入既能传导离子、又能协同 CO_2 活化的双功能离聚物，促进 CO_2 还原选择性地制备乙烯。在不额外添加任何液态电解质的纯水体系中，乙烯产生的净电流密度达到 420 mA cm^{-2}，槽压仅为 3.54 V，为目前非消耗性电解质体系中 CO_2 电解制乙烯的最高性能报道。研究成果发表在《*Advanced Functional Materials*》[7]。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据科学网新闻编辑]

温度压力解耦助力纤维素低温快速水热转化

木质纤维素生物质，如木材、草和农业废弃物，由纤维素、半纤维素和木质素组成，是一种可再生的碳中性资源。纤维素的水热转化

[7] Yin Hu,Rongwei Shi,Yongyuan Ren, et al, A “Two-in-One” Strategy for Flexible Aqueous Batteries Operated at −80 °C, *Advanced Functional Materials*, 2022, DOI: 10.1002/adfm.202203081

可产生固体碳材料、液体生物油和可燃气体。其中的固体碳材料，可用于净水、储能和催化等多种领域。传统的批次反应器因其操作简单、适用性强，被广泛用于纤维素等水不溶性物质的水热过程研究。然而，在典型的批次反应器中，温度和压力是耦合的，因此很难单独控制这两个变量，这导致所谓的现有研究的“温度效应”可能本质上是温度和压力的综合影响。

清华大学张衍国教授、周会特别研究员和西湖大学王蕾助理教授联合研究团队提出了温度和压力解耦的概念，设计并开发了一套温度压力解耦的水热反应系统，实现了水热过程温度和压力的解耦。基于此，研究团队发现恒定高压对于纤维素转化具有显著的促进作用，设计了纤维素的低温快速转化路线，揭示了解耦条件下的反应机理。在温度压力解耦的路线下，纤维素可以在约 117℃时降解，低于传统路线近 100℃。在该路线下，纤维素衍生的亚微米碳球的生产不需要任何等温时间，与需要几个小时的传统工艺相比，大大节省了反应时间。全生命周期评估表明，与传统方法相比，该方法显示出更高的能源效率，能够有效减少温室气体排放。

该项研究通过解耦水热反应中的温度和压力，实现了纤维素的低温快速转化，并深入探究了纤维素的水热转化机理，为具有负碳效应的生物质高附加值利用提供了新的思路。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》[8]。

[8] Shijie Yu, Xinyue Dong, Peng Zhao, et al, Decoupled temperature and pressure hydrothermal synthesis of carbon sub-micron spheres from cellulose, *Nature Communications*, 2022, DOI: 10.1038/s41467-022-31352-x

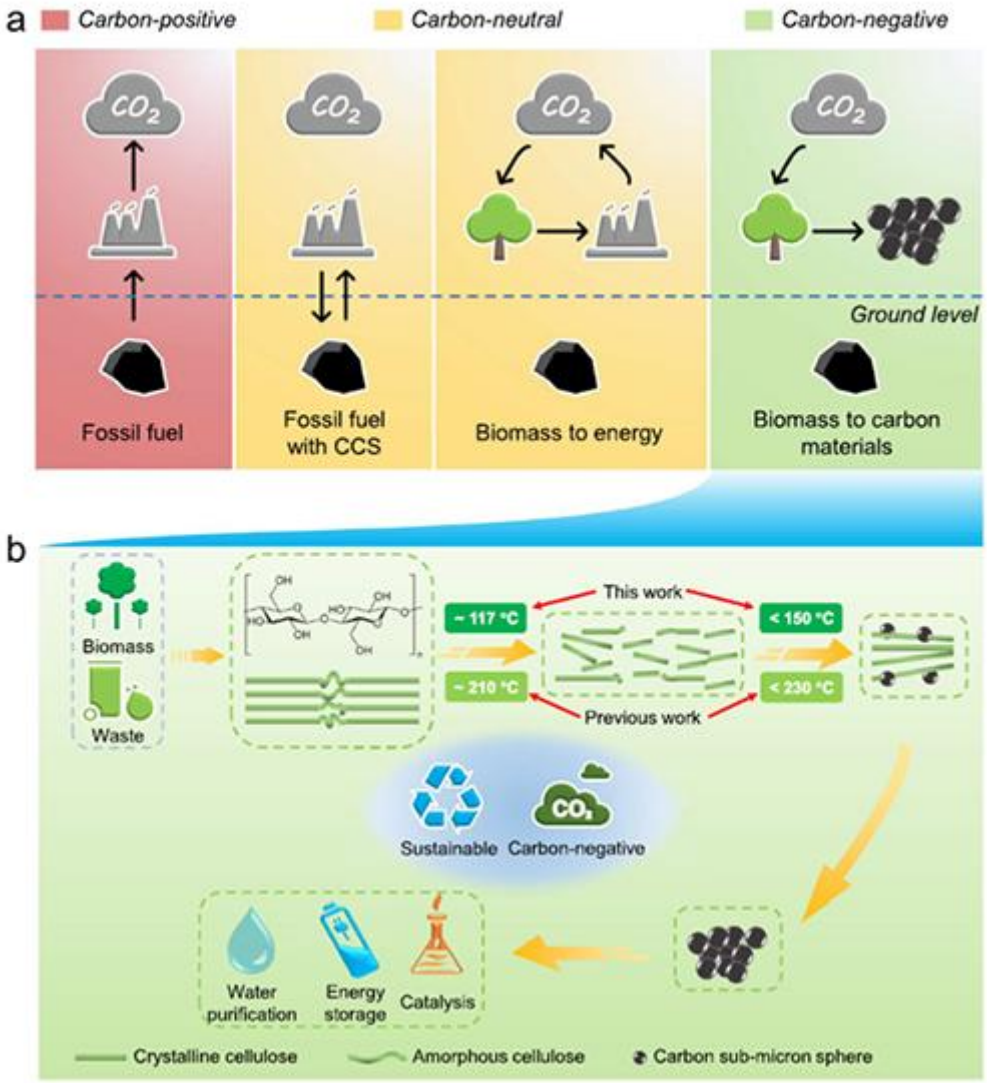


图 1 负碳排放的纤维素生成亚微米碳球示意图

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据 X-MOL 新闻编辑]

国际瞭望

IRENA 提出可再生能源助力中国碳中和的行动建议

7 月 8 日，国际可再生能源机构（IRENA）发布《中国的碳中和之路：可再生能源的视角和作用》报告[9]，针对中国实现碳中和面临的挑战，提出了通过可再生能源实现脱碳的 13 点优先行动建议，包括持续改进能效、改革电力网络、提高终端用能电气化水平等。关键要点如下：

1、制定和实施综合长期能源规划

有效和综合的能源规划是能源转型成功的基础，可以提供能源转型所需的有利条件。能源转型需要多个机构合作，在实现净零排放目标的背景下，在中国迄今为止良好实践的基础上进一步协调，不仅在能源规划机构之间，而且在能源和气候业界之间，建立一个强有力的治理结构。中国在有效制定和实施五年规划方面有着良好的经验。

近年来，中国的长期展望和指导方针明确了战略政策目标，可供中国考虑的建议包括：①到 2060 年，共同制定基于场景的碳中和长期战略计划，包括在国家和区域/省级和部门层面制定；②利用全球最佳实践开发长期情景，通过 IRENA 的长期能源情景网络汲取世界各地的最佳经验和实践。

2、将提高能源效率作为优先事项

最大限度地提高能源和资源效率，最小化经济活动的能源和资源强度，是减少能源消耗和碳排放的最经济策略。中国在许多领域都存在着提高效率的巨大潜力，仍需进一步开发终端用能部门电气化和能源效率之间的协同作用。

[9] China's Route to Carbon Neutrality: Perspectives and the Role of Renewables. https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Chinas-Route-to-Carbon-Neutrality

可供中国考虑的建议包括：①有重点地聚焦于能源和资源效率的最大化，以尽可能减少经济活动的能源和资源强度；②通过加快服务业增长、促进循环经济和使用数字技术以进一步改进效率。

3、加快减少煤炭使用

要实现“双碳”目标，必须限制并逐步减少化石燃料消费总量，逐步淘汰燃煤发电是一项优先任务。当前主要障碍不在技术或经济方面，主要与政策和立法的变化有关。在某些情况下，一些地区就业和经济严重依赖化石燃料（主要是煤炭）。解决这些障碍将需要明确的政治方向，同时进行谨慎的转型规划，以减少当前能源系统转型可能产生的社会经济影响。

可供中国考虑的建议包括：①逐步加强国家碳排放交易计划，以降低燃煤电厂的碳排放量；②“十五五”能源规划中进一步减少煤炭消费，这将是摆脱煤炭的重要信号；③通过合作和对话，利用越来越多的国际验证和经验，使中国能够对依赖煤炭地区制定经济转型战略做出明智决定，同时尽可能减少对当地经济的不利影响。

4、加快向可再生能源的转型

在全球范围内，随着电气化和电力转换燃料的发展，到 2050 年发电量需在目前水平基础上增加两倍。需要降低当前可再生能源发电成本使其逐渐成为经济的选择。目前，全球 75%的陆上风能和 40%的公用事业规模光伏发电比化石能源更经济。因此，可再生能源成为发电的首选途径，太阳能、风能和水电应成为未来中国电力供应的支柱。到 2050 年，可再生能源有望满足中国 90%以上的电力需求，其中太阳能和风能的占比将超过 60%。

可供中国考虑的建议包括：①利用中国在可再生能源方面的优势和经验，加快部署；②促进新兴可再生能源技术的发展和应用，如海上风能，这将发挥重要作用。位于中国东部沿海电力需求中心附近的海上风电场将减少偏远西部地区的长途输电需求。

5、改革电力网络

风能和太阳能的波动性对电力系统的安全稳定运行提出了挑战，但通过提高能源系统灵活性可应对这一挑战。到 2050 年，全球可再生能源在总发电量中的占比将达到 90%；近 3/4 的电力装机容量和超过 63%的发电量将来自波动性可再生能源，而全球当前水平为 20%的装机容量和近 10%的发电量。中国需要考虑如何将电力系统转型为集中式和分布式发电系统相结合的配置，还需要一个更灵活的区域间电力市场来维持这一转型。这种改变可以通过系统创新来实现，能够改进商业模式、市场结构、监管和系统运营以创造有利环境来促进创新技术的传播。

可供中国考虑的建议包括：①继续推进电力市场改革，形成灵活的能源电力市场，这反过来也将加速电力基础设施升级，包括智能电网、储能、分布式系统和其他数字技术的集成，并促进区域间电力交易；②刺激区域电力市场之间的超高压输电投资，鉴于中国大量的可再生能源分布在西、北部地区，尽管东、中部地区可再生能源使用量在不断增加，此类投资仍然很重要。

6、提升终端部门电气化水平

鉴于可再生能源发电的迅速部署，应考虑交通、工业和建筑部门的电气化，以降低终端用能部门的碳排放。在中国，电气化和可再生能源的结合已经开始改变轻型车辆运输和建筑等行业。电气化还将在工业和长途运输方面发挥作用。虽然加快电气化速度至关重要，但避免不协调的电气化也很重要，这可能会增加系统峰值负荷，导致输配电网出现问题。通过良好的规划和基于数字化技术的智能电气化将是减少峰值负荷的必要条件，从而减少对改进电网运行或增加发电容量的投资需求。

可供中国考虑的建议包括：①制定电力在中国能源系统中作用的长期愿景，包括强化各利益相关方参与，并扩大智能电气化基础设施，

如输配电网、分布式系统、电动汽车智能充电网络、集中供热和制冷系统，以及用于绿氢生产和分配的集成设施；②实现电网现代化，特别是加快部署数字电网技术和解决方案，加强各终端用能部门的整合，增加大规模储能；③在条件允许的情况下，将一些能源密集型产业的生产设施转移到中国西部和北部地区，以利用当地丰富的可再生能源电力；④调整法规以更好地反映部门之间的相互关系，例如进一步推动电力价格改革、消除采用创新技术的障碍，并鼓励广泛采用热泵、智能电表和其他智能电器。

7、扩大可再生能源的直接利用，特别是生物能源

更大规模地利用太阳能、生物能和地热能，通过直接利用这些资源，为供暖、制冷以及工业过程提供零碳热能。除了直接使用外，生物质还可作为替代燃料的原料，既可用于工业过程，也可用于生物燃料等交通燃料的生产。由于应用范围广泛，生物能源占全球终端能源消费总量的 10%。然而，现代生物能源的贡献仍然很小，只有 1.5%。预计到 2050 年，现代生物能源在全球终端能源需求占比将增至 17%。IRENA 分析表明，如果在监管、认证和监测方面采取有效措施，可以在不影响林业和其他土地利用的情况下满足作为能源原料的生物质需求，从而在 2050 年实现净零排放。在过去十年中，与太阳能光伏和风能相比，中国生物能源的开发和部署速度要慢得多。阻碍其发展的挑战在于资源有限和生物能源原料供应的可持续性。需要采取有效的方法和战略，确保原料的可持续开发和生态友好，并确保生物能源资源利用的最大化，如用于航空部门脱碳的生物喷气燃料，这是中国需要在技术和生产能力方面迎头赶上的领域。

可供中国考虑的建议包括：①通过建立能源、农业和林业政策制定者之间的跨部门协调机制，充分整合生物质在能源部门和其他终端用能部门的使用；②通过生物精炼为各种生物质的最终用户实现更大的价值；③探索使用生物质相关创新技术，如生物能源与碳捕集、利

用和封存（CCUS）结合，同时还需部署更多试点项目。

8、扩大氢和合成燃料的生产和使用

氢能可以为难以直接电气化的行业提供脱碳解决方案。在全球范围内，氢能和可再生能源可以满足不适合直接电气化终端用能部门约50%的能源需求。利用电解制氢还可提供额外的灵活性，有助于电力部门整合更多波动性可再生能源，还可以提供季节性储能，作为对电池等短期储能的补充。根据 IRENA 的分析，未来三十年全球氢及其衍生物将满足终端能源消费的 12%，其中 2/3 是绿氢。为了实现这一目标，绿氢生产需要迅速扩大规模以实现规模经济，使其在 2020 年代末期在许多国家和地区具备蓝氢的成本竞争力。中国在扩大绿氢生产方面仍有很大的空间，但需确保用于氢气的可再生能源装机部署，还需确保氢气不会取代更有效的电力使用（如直接使用）。中国在氢能方面有两个关键优势：①与其他国家相比，相对较低的劳动力成本和工业发展将有助于电解槽生产成本的持续下降；②中国对绿氢的需求有助于扩大产能部署，促进从化石燃料制氢向可再生能源制氢转变，并产生学习效应和降低成本。

可供中国考虑的建议包括：①制定支持性政策框架，鼓励工业燃料转换，并将符合条件的燃料范围扩大到氢及其衍生物；②示范并积累氢能最终用途的经验，包括氢燃料电池交通运输、钢铁工业中焦煤的替代还原剂、运输用氨和航空合成燃料。如果能够加大力度支持技术创新，克服电解槽目前存在的问题，中国可能取得这些技术的全球领先地位；③支持国内电解槽行业的发展，实现增长、学习和竞争，引领中国的技术领先。

9、支持城市成为低碳生活的倡导者

在过去的几十年里，中国以惊人的速度实现了城市化。城市居民目前占总人口的 60%，这给能源供应和使用带来了挑战。2018 年，工业占全国城市终端能源消费的 71%左右，建筑占 19%左右，交通占

10%。城市的低碳化没有一刀切的解决方案，未来的城市能源基础设施将受到当前投资决策和城市规划的影响。必须从长期、全系统角度来确定可持续的解决方案，以避免产生滞留资产。确定城市解决方案的有效分析框架应包括与长期、低碳城市和区域能源战略相协调的自下而上的规划要素。

可供中国考虑的建议包括：①鼓励地方政府制定长期的综合城市规划，实现碳中和和宜居双重目标；②优先考虑分布式能源发电，最大限度地利用当地可再生能源资源，结合终端用能部门和城市基础设施，利用数字化智慧能源管理系统，提高能源效率；③提升能源系统灵活性，消纳更多波动性可再生能源电力；④变革城市废物利用，鼓励回收和适当处理，包括废物管理系统。

10、继续推进轻型交通脱碳，并向重型运输和长途运输扩展

成本下降和可再生能源在电力结构占比上升，为中国交通运输行业转型打开了大门，重点集中在直接和间接电气化途径。可加速这种转变的技术包括：直接使用清洁、可再生能源电力（用于铁路和公路运输，包括重型公路货运）；使用清洁或低碳电力转换燃料，如氢、氨及其他合成燃料（尤其是用于航运和一些重型公路货运）以及生物燃料（尤其是在航空领域）。上述技术中，由于可再生能源发电成本的持续下降，交通电气化被普遍认为是最有前景的选择，特别是轻型汽车。

可供中国考虑的建议包括：

（1）国内运输方面：①继续推广电动汽车和充电设施，包括确保充电基础设施“智能化”以激励低碳道路运输，以及为交通部门制定综合路线图；②利用其他行业的通用激励措施，如降低电池成本，增加具有成本竞争力的绿氢的需求并建立绿氢供应链，以及为生物燃料提供可持续的原料来源。

（2）国际航空和航运方面：①在中国减少碳排放的总体举措基

础上，制定航空部门碳中和战略，并鼓励采用低碳飞行方案；②对主要替代航空燃料（如生物航空燃料和合成燃料）的部署潜力进行更详细的研究。

11、为工业部门净零排放奠定基础

工业部门实现净零排放是一个尚未解决的全球挑战，这是因为需要从根本上改变产品的生产、消费、回收和处理，而且工业部门是多样化的。中国是世界上几种关键能源密集型商品的最大生产国，因此其行动和领导作用至关重要。对于工业部门来说，2020 年代需要进行十年的准备，为生产流程的重大转变和随后几十年的大幅减排奠定基础。主要行动应侧重于开发和验证所需的解决方案，并创造有利的条件。优先行动包括：政府提供明确信号；通过建立更多示范工厂以确定有效的解决方案；提供有利条件，包括融资、燃料和原料供应基础设施、标准和认证以及贸易条件。

可供中国考虑的建议包括：①与行业和其他利益相关者共同制定各部门的低碳战略和路线图，确定明确的方向；②通过提高能源和资源效率、减少需求来减少能源使用；③建立在工业过程中从使用煤炭转变为使用可再生能源的专业知识；④探索工业生产的最佳地点，在其他关键生产因素可以满足的情况下，搬迁到有丰富可再生能源资源但现有电力需求低的地区。

12、继续支持技术研发和更广泛的系统性创新

自 2013 年以来，中国增加了清洁能源研究、开发和部署投入，并成为仅次于美国的全球第二大清洁能源公共投入国。然而，中国近一半的能源研发预算用于不符合中国“双碳”目标的技术。相比之下，2019 年欧盟能源研发预算的 97%用于清洁能源研发。如果中国希望实现其目标并在清洁能源技术方面发挥主导作用，就需要解决这种不平衡问题。对技术研发的支持还需要与更广泛的系统性创新联系起来，即将使能技术创新与创新商业模式、市场设计和能源系统运营创新结

合起来。

可供中国考虑的建议包括：①增加清洁能源研发公共投入；②采用系统性方法进行创新；③提高中国在国际研发合作中的领导地位。

13、深化全球参与

能源转型需要全球努力，需要加强国际合作。学习其他国家或地区的最佳实践可以使中国受益，而中国的专业知识可以帮助塑造全球市场。国际组织可以支持这种相互合作和学习。

可供中国考虑的建议包括：①成为全球能源和气候治理的领导者，加强参与全球和区域合作机制和国际机构；②展示中国作为全面碳中和系统性解决方案主要提供者的成功实践。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

美国能源部提出碳去除技术基础科学问题优先研究方向

6 月 1 日，美国能源部（DOE）发布“碳去除技术基础科学问题”圆桌会议总结报告[10]，讨论了 CO_2 捕集、转化和封存过程中的科学与技术难题，确定了 5 个优先研究方向，关键要点如下：

1、多时间和空间尺度 CO_2 运移反应的界面耦合过程研究

CO_2 分子穿过气-液-固界面的物理和化学耦合反应是所有 CO_2 去除（CDR）过程的基础。反应过程中，界面上 CDR 的驱动力（pH 值，反应物间的梯度）降低，会减缓捕集动力学或钝化天然/合成材料的表面。如何利用不同相之间的界面耦合来提高 CO_2 反应性及质量和能量传输是关键科学问题。持续再生反应性功能的强化可以彻底改变 CDR 介质的效能。为此，下一代 CDR 介质的成功设计和开发需要对界面过程进行从原子到宏观尺度的描述，在界面上对碳捕集和封存过程的准确描述必须考虑其固有的粗糙度、多组分和动态性质。

2、高亲和力、低能量释放屏障及化学转化屏障、耐久性好的 CO_2

[10] Foundational Science for Carbon Dioxide Removal Technologies. https://science.osti.gov/-/media/bes/pdf/brochures/2022/CDR_RT_Brochure.pdf

捕集/转化的高性能材料研发

研发新型高性能材料是减少从稀释源捕集 CO_2 所需能量并将 CO_2 转化为高价值的净负排放产品的关键。高结合亲和力、低能量释放屏障或化学转化的屏障和耐久性好的材料设计原则和合成方法研究是亟待解决的关键问题。新的合成方法、原位表征工具和计算方法的开发将加速发现耐久性好、可以实现高效捕集与转化的材料，对 CDR 技术产生变革性影响。

3、高效节能的 CO_2 捕集、释放和转化的非传统途径和材料探索

CO_2 吸附剂通常利用焓驱动原理进行 CO_2 捕集，当温度升高或压力降低时，吸附剂又将所吸附的 CO_2 脱附出来，完成 CO_2 的分离过程，同时吸附剂实现了再生。如何利用非常规的热力学和动力学来驱动 CO_2 的吸附/解析或低能耗的反应，将捕集 CO_2 所需的强亲和力从能量屏障分离、对之后的循环吸附/解析分离过程进行解耦是关键科学问题。为此，需要新的计算和实验工具来探测捕集点和界面上的局部能量转移和分子重组。

4、CO_2 转化为分子、矿物和材料的多相物理和化学相互作用研究

合理调整 CO_2 转化为矿物和材料的多相物理和化学相互作用，可以实现可扩展和持久的 CO_2 封存。控制 CO_2 转化为矿物和材料的动力学机制的关键多相界面结构和化学过程是需要解决的关键科学问题。在化学动态环境中，要定量地确定、预测和控制催化转化的速率，必须考虑活性位点、限制条件和物质传输。矿化策略需要了解多核物种、无定形或致密液体前体和离子脱溶对碳酸盐矿化速率的作用，以及仿生方法增强这两种过程的能力。

5、强化对 CO_2 封存地球化学-地质力学过程的预测性理解，创建 CO_2 长期安全封存预测模型

CO_2 地质封存必须将 CO_2 封存在复杂的千米级地层中数千年，这

些地层的岩性、地下水化学成分和结构各不相同。CO_2封存会对储层造成无法预测的变化，如何将实验数据和环境数据与基于物理的跨时间和空间尺度的建模相结合，以理解和发现地球化学-地质力学过程，并创建CO_2长期安全封存预测模型是亟待解决的关键科学问题。其中，现场数据为验证将储层完整性与分子尺度化学反应联系起来的实验和计算方法提供了机会。将地球物理信号与基于物理模型的机器学习驱动模拟相结合，可以加深对地球化学-地质力学耦合过程的理解，从而实现更可靠的储层长期动态预测。

[中国科学院武汉文献情报中心 李娜娜]

日本发布《蓄电池产业战略》

8 月 31 日，日本蓄电池产业战略研究公私理事会正式发布《蓄电池产业战略》[11]，提出到 2030 年建立 150 吉瓦时/年的国内制造基地，全球生产能力达 600 吉瓦时/年。该战略提出，电池对于日本实现 2050 年碳中和的目标至关重要，尤其是电气化、可再生能源等领域，但日本在与中国、韩国快速抢占市场的竞争中已落下风，为此日本从液态锂电池投资、提升全球竞争力、下一代电池市场三个方面制定 7 条具体举措。主要要点如下：

一、日本蓄电池产业技术现状

随着纯电动汽车市场的发展，车用蓄电池市场规模快速增长。凭借技术优势日本最初占据着蓄电池产业市场，但随着中、韩市场份额不断增加，日本已处于落后位置。

在蓄电池供应链上，日本电池组件正失去竞争力，原材料、电池制造等对外依赖风险增加。在电池材料竞争力上，日系材料在质量、市场份额方面占优势，中国具有成本优势，且材料质量也后来居上。

[11] 蓄電池産業戦略. https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy/battery_saisyu_torimatome.pdf

在原材料供应上，蓄电池原材料储量和产量集中在澳大利亚、刚果等，中游精炼生产集中在中国，石墨材料依赖中国进口。在电池形态上，目前液态锂电池仍是主流，日本在备受关注的新一代全固态锂电池上技术水平一直处于领先。

二、日本蓄电池产业战略基本思路

到目前为止，日本蓄电池产业主要集中投资全固态电池技术开发，而液态锂电池技术竞争力完全被中国、韩国企业赶超，在全固态锂电池实现应用前，液态锂电池企业存在被淘汰风险。因此，未来日本蓄电池产业发展方向和目标主要为：

（1）加强液态锂电池投资。重新审视以往战略，不再依靠私营部门，政府将大规模投资液态锂电池以支持产业链上游发展，保障国内制造基础。其目标：将《绿色增长战略》中“到 2030 年国内蓄电池制造能力提高到 100 吉瓦时/年”的目标提高到 150 吉瓦时/年。

（2）提升全球产业竞争力。以国内确立的技术为基础，维持和强化全球市场的竞争水平，战略性开展海外扩张。其目标：从标准化及国际影响力等角度出发，到 2030 年全球市场的整体产量达到 600 吉瓦时/年。

（3）占领新一代电池市场。加快技术开发，率先实现全固态电池等下一代电池技术的商业应用，稳步占领下一代电池市场。其目标：到 2030 年左右实现全固态锂电池的正式商业化应用。

三、日本蓄电池产业战略主要举措

为实现以上目标，日本制定 7 个方面的行动举措，具体包括：

（1）扩大国内基础设施一揽子政策。①建立国内蓄电池材料制造基础，实施投资 1000 亿日元基础促进政府和民间合作，加强对尖端制造工艺投资力度，推进低成本、高附加值等电池系统一体化探索研究。②蓄电池控制系统升级，在控制系统技术开发和实证应用的同时，建立多用途评估方法以适应市场需求。

（2）构建全球联盟和全球标准。①建立全球蓄电池产业联盟，开展材料保障、研究开发、回收利用等方面合作，打造安全可持续的蓄电池全球供应链。②建立全球产业融资体系，发挥先进制造工艺和安全优势，利用国内先进制造企业，实施海外投资培育一批蓄电池企业。③推动制定国际规则，参与甚至主导电池可持续发展国际讨论。④建立全球安全性功能性标准。⑤拓展蓄电池系统海外市场，推广解决方案。⑥电池新用途推广，探索船舶、飞机、农机以及 V2H（Vehicle to Home）等领域全球应用前景。

（3）确保上游产业安全。国内制造 150 吉瓦时/年目标每年大约需要 10 万吨锂、9 万吨镍、2 万吨钴、15 万吨石墨、2 万吨锰，全球制造 600 吉瓦时/年目标每年大约需要 38 万吨锂、31 万吨镍、6 万吨钴、60 万吨石墨、5 万吨锰。因此，一方面要加强资源保障支持力度，将电池金属材料等列为高风险矿种，扩大支持资源保障企业一揽子政策，完善中游冶炼工序。另一方面，加强与澳大利亚、南美、非洲等资源国家合作，确保产业链上游安全。

（4）开发下一代电池技术。①强化下一代电池技术开发，通过绿色创新基金等，加快以全固态电池为主的下一代电池和材料（包括材料评估技术）和回收技术的开发，力争在 2030 年左右实现全固态电池的全面商用，确保包括卤代电池、锌负极电池等新型电池的技术优势，并完善全固态电池量产制造体系。②完善相应的性能测试和安全评价体系。③通过人才培养联动，强化关西研究开发平台建设。

（5）拓展国内市场。①促进电动汽车普及，支持充电基础设施建设，到 2035 年实现乘用车新车销售全部为电动汽车。②促进固定蓄电池系统普及。③进一步确保固定蓄电池系统安全性，并作为电力基础设施的一部分。

（6）加强人力资源保障。提高整个产业人才保障及技能水平，到 2030 年，力争培养蓄电池产业供应链人才共 3 万人，其中培养蓄

电池制造相关人才 2.2 万人，包括制造技能人才 1.8 万人、产品开发和评价人才 0.4 万人。为此，日本专门成立官产学组成的“关西蓄电池人才培养联盟”[12]，并提出在工科类高校和高专等设立相关专业课程。

（7）完善国内蓄电池制造和利用环境。①促进可持续发展，试行碳足迹规则，到 2030 年前建立国内电池回收利用体系。②利用可再生能源扩大电力供给、降低成本负担，以提高产业竞争力。③修改相关法规，提高大容量电池安全性。④统一软硬件标准，促进行业规范发展。

[中国科学院武汉文献情报中心 李岚春]

英国发布关键矿产战略并启动多项支持举措

7 月 22 日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）发布《未来的弹性：英国关键矿产战略》[13]，旨在确保国内关键矿产供应链安全，提振经济并创造就业。该战略提出三方面目标：**①加快国内生产能力**，包括最大限度提高国内关键矿产产能，重建矿业相关技能，开展前沿研发解决关键矿产供应链挑战，加速关键矿产的循环经济；**②与国际伙伴合作**，包括促进全球供应多样化，支持英国企业在海外参与多元化、负责任、透明的供应链，发展外交、贸易和开发关系以提高对英国的供应灵活性；**③加强国际市场**，包括提高全球环境、社会和治理绩效，改进数据和可追溯性，发展运行良好和透明的市场，推进伦敦成为全球关键矿产金融之都。

7 月 4 日，BEIS 宣布正式启动首个收集和分析关键矿产供应信息的关键矿物情报中心[14]，该中心将由英国地质调查局运营，为政策

[12] 蓄電池産業戦略の最終とりまとめとともに、 関西蓄電池人材育成等コンソーシアムを設立します. https://www.meti.go.jp/press/2022/08/20220831001/20220831001.html

[13] Resilience for the future: The UK’s critical minerals strategy. https://www.gov.uk/government/publications/uk-critical-mineral-strategy/resilience-for-the-future-the-uks-critical-minerals-strategy

[14] UK’s first Critical Minerals Intelligence Centre to help build a more resilient economy. https://www.gov.uk/government/news/uks-first-critical-minerals-intelligence-centre-to-help-build-a-more-resilient

制定者提供关键矿产供应、需求和市场动态的相关最新数据和分析，提高英国关键矿产供应链的灵活性。

7 月 22 日，BEIS 还宣布支持稀土生产商 Pensana 建造英国首家磁铁材料精炼厂[15]，该工厂共计公私投入 1.45 亿英镑，将加工用于磁铁的关键矿产，以制造电动汽车和海上风电关键部件。预计该工厂将于 2023 年底开始运营，目标是达到 1.25 万吨稀土的产能，其中包括 4500 吨磁铁金属稀土（如钕和镨）。预计到 2025 年，该工厂生产的稀土将占全球供应量的 5%以上。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

美《通胀削减法案》拟拨款 3690 亿美元用于气候和清洁能源

8 月 16 日，美国总统拜登签署了《通货膨胀削减法案》（Inflation Reduction Act，IRA）[16]，该法案涉及总金额约 7400 亿美元，其中，政府计划拨款 3690 亿美元用于气候和清洁能源领域项目，重点覆盖清洁能源制造业，包括鼓励购买电动汽车和氢燃料电池汽车以及部署充电站等，是美国历史上规模最大的一揽子“气候法案”。对能源安全和气候变化相关条款进行了详细规定，关键要点如下：

一、降低消费者的能源成本

该法案将为消费者提供一系列激励措施，以减轻高昂的能源成本并减少水、电支出。包括直接激励消费者购买节能电器、清洁汽车和屋顶太阳能，并投资于家庭能源效率提升。具体包括：

（1）消费者家庭返利项目，重点关注低收入消费者，以实现家用电器电气化和节能改造，金额为 90 亿美元；

-economy

[15] UK’s first magnet refinery given huge financial boost as first ever strategy for supply of critical minerals published. https://www.gov.uk/government/news/uks-first-magnet-refinery-given-huge-financial-boost-as-first-ever-strategy-for-supply-of-critical-minerals-published

[16] Inflation Reduction Act of 2022. https://www.democrats.senate.gov/inflation-reduction-act-of-2022

（2）10 年期消费者税收抵免项目，以提高家庭能源效率并鼓励使用清洁能源，如热泵、太阳能屋顶、电动 HVAC（供热通风和空气调节）和热水器等；

（3）中低收入者购买二手清洁车辆可获得 4000 美元的税收抵免，购买全新清洁车辆可获得高达 7500 美元的税收抵免；

（4）旨在提高经济适用房能源效率的补助项目，金额为 10 亿美元。

二、保障美国能源安全并加速国内制造

该法案将支持能源可靠性和清洁能源生产，同时对美国清洁能源制造业进行创历史的高投资。其中包括提供超过 600 亿美元资金用于整个清洁能源和交通技术供应链。通过降低清洁能源和清洁汽车成本，缓解供应链瓶颈，这些制造业激励措施将有助于缓解通胀，降低未来价格冲击的风险。具体包括：

（1）加快生产美国太阳能电池板、风力涡轮机、电池和关键矿物的税收抵免项目，预计投资 300 亿美元；

（2）建设清洁技术制造设施的税收抵免项目，包括电动汽车工厂、风力涡轮机厂和太阳能电池板制造工厂，投资金额 100 亿美元；

（3）通过《国防生产法》用于热泵和关键矿物加工，投资金额 5 亿美元；

（4）改造现有汽车制造设施的资助项目，以制造清洁汽车，为当地社区保留汽车制造岗位，投资金额 20 亿美元；

（5）在全国建立新的清洁汽车制造工厂的贷款项目，投资金额 200 亿美元；

（6）支持国家实验室加速实现突破性能源研究，投资金额 20 亿美元。

三、实现经济脱碳

法案包括促进清洁电力和能源储存的税收抵免政策（ITC），重

点投资在 2022-2026 年符合条件的清洁能源电力公司，税收抵免可达到 30%。具体包括：

（1）促进清洁电力和能源储存的税收抵免项目，并为州和电力公司提供大约 300 亿美元的定向资助和贷款项目，以加速向清洁能源的过渡；

（2）为清洁燃料和清洁商用车辆提供税收抵免和资助项目，以减少交通部门的碳排放；

（3）为减少工业制造过程的碳排放提供资助和税收抵免项目，包括投资新的“先进工业设施部署计划”，以减少化学、钢铁和水泥厂等最大工业排放源的排放，投资金额近 60 亿美元；

（4）投资联邦采购的美国制造清洁技术，以创建一个稳定的清洁产品市场，总投资金额超过 90 亿美元，其中 30 亿美元用于美国邮政局购买零排放汽车；

（5）加速清洁能源技术开发推广的投资项目，以支持部署减少排放的技术，特别是在弱势社区，总投资金额 270 亿美元；

（6）资助甲烷减排项目，以减少天然气生产和输送过程中泄漏。

四、维护社区和环境公平

该一揽子计划包括超过 600 亿美元的环境公平优先投资项目，以推动对弱势社区的投资。具体包括：

（1）提供环境和气候公平综合资助，用于弱势社区建设项目和社区能力建设，以解决与污染和气候变化相关但不成比例的环境和公共卫生危害，投资金额达 30 亿美元；

（2）提供周围区域访问和公平资助基金，通过竞争性补助支持社区公平建设安全和负担得起的交通运输设施，以重新连接因现有基础设施障碍而分裂的社区，以及支持公平的交通规划方案和社区参与活动，投资金额 30 亿美元；

（3）资助为港口空气污染治理，用于支持在港口购买和安装零

排放设备和技术，投资金额 30 亿美元；

（4）用于购买重型清洁车辆的项目，如校车、公交巴士以及垃圾车，投资金额 10 亿美元；

（5）前面提到的一些针对弱势和低收入社区的计划，例如技术加速器和消费者家庭能源退税计划。此外，许多清洁能源税收抵免包括奖金或预留结构，以推动弱势社区的投资和经济发展。

五、支持农民、林地所有者和具有复原力的农村社区建设

通过投资于气候智慧型农业、森林恢复和土地保护，确定农业生产者和林地所有者在气候解决方案中的核心作用。此外，还对农村社区的清洁能源开发进行了大量投资。具体如下：

（1）支持气候智慧型农业实践，投资金额超过 200 亿美元；

（2）支持健康、防火的森林带、森林保护和城市绿植，投资金额 50 亿美元；

（3）支持国内生产生物燃料的税收抵免和拨款，并建设可持续航空燃料和其他生物燃料所需的基础设施。

（4）保护和恢复沿海栖息地，并保护依赖这些栖息地的社区，投资金额 26 亿美元。

[中国科学院武汉文献情报中心 朱丹晨 汤匀]

欧盟投入 54 亿欧元支持氢能技术价值链创新及首次工业部署

7 月 15 日，欧盟委员会宣布批准一个欧洲共同利益项目“IPCEI Hy2Tech”，支持在 15 个欧盟成员国开展的 41 个氢能项目，促进氢能技术价值链研发创新和首次工业部署[17]。该项目将提供 54 亿欧元的公共资金，预计将撬动 88 亿欧元私人投资，共计有 35 家公司参与，

[17] State Aid: Commission approves up to €5.4 billion of public support by fifteen Member States for an Important Project of Common European Interest in the hydrogen technology value chain. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_4544

其中包括 8 家中小型企业和初创企业。

欧盟将通过 IPCEI Hy2Tech 项目促进欧洲氢能技术从实验室研发走向工业部署，将技术优势转化为商业优势。IPCEI Hy2Tech 将涵盖广泛的氢能技术链，包括：①制氢；②燃料电池；③氢的存储、运输和分配；④终端应用，尤其是交通应用。所有 41 个项目都将开发超越现有市场的技术和工艺，并将在性能、安全性、环境影响、成本效益等方面取得重大进步，预计将促进新型高效电极材料、高性能燃料电池、创新氢能交通技术等突破。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

精确调控单原子催化剂实现 CO_2 高效电化学还原

单原子催化剂（SAC）因其独特的电子结构、最大化的原子利用效率、不饱和的配位环境和强金属-载体相互作用，被应用于热催化和电催化等领域。而与工业相关反应速率方面发挥主导作用的介孔结构的精确控制，往往受到忽视。

美国莱斯大学 Haotian Wang 教授课题组提出了一种通用的 SAC 合成方法，该方法可以灵活控制单原子位点的原子结构以及碳载体的介孔结构，具有优化的催化性能，并成功地制备出一系列金属单原子催化剂（M-SAC）。结果表明具有 3D 结构的 Ni-SAC 在 350 mA cm^{-2} 的电流密度下，CO_2 还原为 CO 的法拉第效率超过 90%。研究人员首先以 Ni-SAC 为合成目标对象，采用 SiO_2 硬模板分三步合成，通过透射电子显微镜（TEM）和高角环形暗场扫描透射（HAADF-STEM）原子成像技术，观察到具有明确孔隙且互连 3D 囊泡状结构、良好排列的单向 2D 阵列结构和多向 2D 通道结构。对 HAADF-STEM 图像进行测量，确定了孔阵列间距为 5.1±0.5 nm，平均孔径约为 2.5 nm，表明 SAC 的介孔结构可以通过硬模板辅助策略进行精确控制和调整。能量色散 X 射线谱仪（EDS）分析表明 C、N 和 Ni 在 Ni-SAC 上呈

现均匀分布。采用 X 射线光电子能谱技术（XPS）分析了 Ni 和 N 的氧化态，结合扩展 X 射线吸收精细结构衍射谱（EXAFS）拟合结果表明，对于所有 3D Ni-SAC，中心 Ni 原子与大约四个 N 原子配位。上述表征结果有力地支持硬模板合成方法能够精确控制相似的单金属原子位点，同时灵活地调整催化剂微观结构的优越性。随后研究人员进一步研究了硬模板方法在合成金属簇或纳米颗粒的不同单原子催化剂方面的机理。结果表明，控制不同金属元素形成 SAC 的原理包括如下三点：①硬模板在热解过程中形成高度稳定的 M-N 键。②硬模板有助于产生丰富的中孔结构，同时也有效抑制形成完全包裹在碳中的金属纳米颗粒结构。③在酸浸过程中，所有的纳米颗粒都可以被 H_2SO_4 溶解，而稳定的 M-N 键在此过程中仍然存在。最后研究人员对不同 Ni-SAC 上的电化学 CO_2RR 性能进行了测试，Ni-SAC 在标准三电极流通池反应器中 10 mA cm^{-2} 电流下表现出最佳的 CO 选择性，表明对 Ni 单原子具有最佳 CO_2RR 内在活性。与 2D 通道质量扩散催化剂相比，3D Ni-SAC 在相同电位下表现出更高的电流密度，在-0.87 V 时电流密度可达到 350 mA cm^{-2}，是相同条件下 2D Ni-SAC 的 3.5 倍，且在 100 mA cm^{-2} 下 CO 选择性高达 98.5%，在 350 mA cm^{-2} 下 CO 选择性仍保持 93%，也优于 2D Ni-SAC。最后为评估 3D Ni-SAC 的 CO_2RR 稳定性，构建了一个阴离子膜电极组件（MEA），通过在 MEA 中保持 100 mA cm^{-2} 的电流密度，连续操作 40 小时 CO_2RR 电解后，催化剂选择性或活性方面几乎没有发生降解现象。

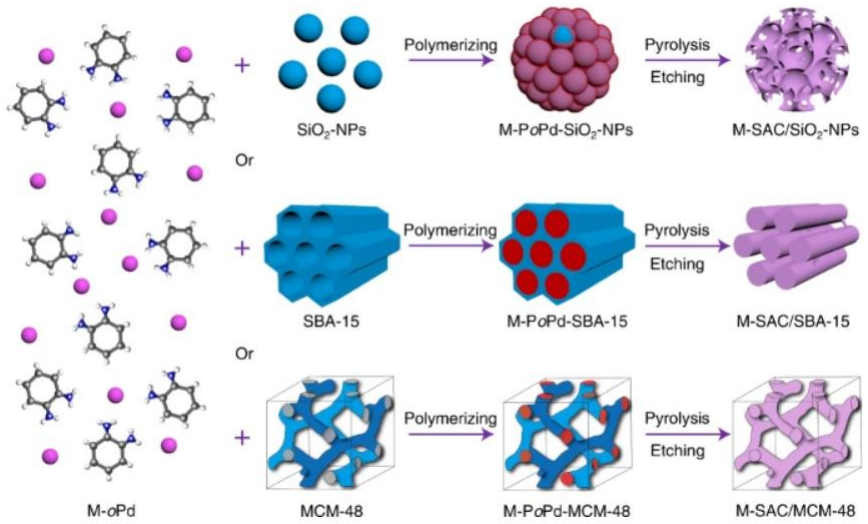


图 1 三种不同单原子催化剂合成方法示意图

该项研究提出了一种通用的硬模板辅助策略，用于合成具有可控原子和微观结构的单原子催化剂（SAC）。SAC 可以通过不同的介孔结构进行微调，从而控制不同类型（3D 和 2D）的质量扩散，这一扩散作用在工业电化学还原 CO_2 反应（CO_2RR）速率方面起主导作用，实现了优异的 CO 法拉第效率。这种通用的 SAC 合成策略将为催化和能源领域的实际广泛应用提供新的途径。相关研究成果发表在《*Nature Synthesis*》[18]。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

漂浮式钙钛矿-$BiVO_4$人造树叶助力太阳能燃料规模化生产

光电化学（PEC）人造叶片是通过将光吸收和电催化结合起来的光电化学设备，具有降低可持续太阳能燃料生产成本的潜力。然而，当前的沉积技术限制其可扩展性，且易碎和重型的散装材料会影响其运输和部署。

英国剑桥大学化学系 Erwin Reisner 教授团队通过使用薄、柔性基材和碳质保护层来制造具有（光）电化学燃料生产潜力的轻质人造叶片。该装置涂层与已有的金属涂层相比，具有材料成本低、室温可

[18] Wu Z Y, Zhu P, Wang H T, et al. A general synthesis of single atom catalysts with controllable atomic and mesoporous structures. *Nature Synthesis*, 2022, DOI: 10.1038/s44160-022-00129-x.

加工性、可扩展性和灵活性方面的优势。最终制备的 100 cm^2 独立人工叶片的性能和稳定性（大约 24 小时）与 1.7 cm^2 的普通 PEC 器件相当，且该装置能实现开放水域漂浮式应用，有效规避与土地使用相竞争。研究人员首先研究了可铺展石墨环氧树脂（GE）糊料作为连接钙钛矿器件与质子和 CO_2 还原催化剂的坚固界面可行性。将 Araldite 标准环氧树脂粘合剂以 4:3 的质量比与石墨粉混合以获得碳质密封剂，与已有的金属涂层相比，新制备的石墨糊具有材料成本低、室温可加工性、可扩展性和灵活性方面的优势。此外，该石墨糊还可以直接粘附到碳纳米管（CNT）片上，经过电阻测量，大约 500 μm 厚的 GE 具有 6.67±0.79 Ω的低横截面电阻。GE 为 CNT 片表面提供大面积的导电接触，最大限度地减少了电阻损耗。在 GE 上仅观察到一个小的跨平面欧姆下降，电流在 0.1 V 内达到 20 mA cm^{-2}，这进一步验证了其作为导电密封剂的适用性。为了减轻传统 PEC 器件的重量和机械脆弱性，将钙钛矿和 $BiVO_4$ 沉积在薄的柔性基底上。通过用 GE 封装钙钛矿太阳能电池获得柔性钙钛矿光电阴极（fPVK）。暴露的边缘和布线通过 10 μm 聚对二甲苯-C 涂层的化学气相沉积（CVD）进一步密封，取代了典型的块状环氧树脂密封剂。沉积在氧化铟锡涂层的聚对苯二甲酸乙二醇酯上的卤化铅钙钛矿光电阴极使用铂催化剂实现了 4266 μmol H_2 g^{-1} h^{-1} 的活性，而在较低光照（0.1 个太阳强度）下，具有用于 CO_2 还原性质的分子钴催化剂的光电阴极实现了 7.2 的高 CO:H_2 选择性。相应的轻质钙钛矿-$BiVO_4$ PEC 器件的无辅助太阳能燃料效率分别为 0.58%(H_2)和 0.053%(CO)。100 cm^2 的独立人工叶片证明了它们的可扩展性潜力，其性能和稳定性（大约 24 小时）与 1.7 cm^2 的普通 PEC 器件相当。在运行过程中形成的气泡进一步使 30-100 mg cm^{-2} 的设备能够漂浮，而轻型反应器则有助于在河流的户外测试期间收集气体。这种叶片状 PEC 装置弥合了传统太阳能燃料方法之间的重量鸿沟，其每克的活性可与光催化悬浮液和植物叶子的

活性相媲美。

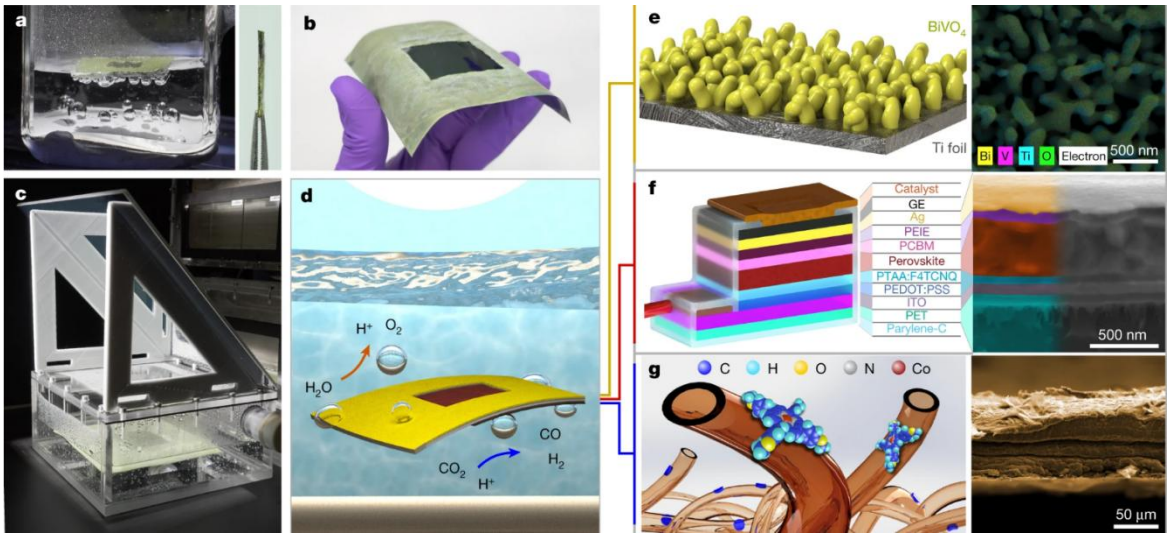


图 1 漂浮式超薄钙钛矿-$BiVO_4$ 人造树叶结构示意图

该项研究通过采用薄柔性基底和碳质保护层成功地制造出一种轻质光电化学（PEC）人造叶片。这种叶片每克光电活性可与植物叶片相当，采用柔性薄膜基底代替传统玻璃基底，可表现出高达 4266 μmol H_2 $g^{-1}h^{-1}$ 的活性。这种轻质光电化学漂浮式系统为实现开放水域的太阳能利用开辟一条新的途径。相关研究成果发表在《*Nature*》[19]。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

可扩展工艺实现 19.1%大面积全钙钛矿叠层光伏组件

近年来，随着钙钛矿/硅和钙钛矿/铜铟镓硒（CIGS）叠层太阳能电池的出现，两端全钙钛矿叠层太阳能电池（2TPT-SCs）引起了研究人员极大的兴趣，它结合了宽带隙（WBG）钙钛矿顶部亚电池（$E_{G\text{-top}}$≈1.6-1.8 eV）和窄带隙（NBG）钙钛矿底部亚电池（$E_{G\text{-bottom}}$ <1.3 eV）的优势。由于目前这类电池效率超过了商用单结多晶硅或 CIGS 电池的转换效率，因此为 2TPT 太阳能电池组件（2TPT-SMs）开发可扩展的制造工艺和互连方案是未来发展重点。

德国卡尔斯鲁厄理工学院微结构技术研究所通过引入可扩展的

[19] Virgil A, Ucoski G M, Pornrungroj C, et al. Floating perovskite-BiVO4 devices for scalable solar fuel production. *Nature*, 2022, DOI:10.1038/s41586-022-04978-6.

高效、两端、全钙钛矿叠层组件，推进了两端全钙钛矿叠层光伏发电。通过基于真空沉积工艺和刮涂涂层的组合以及可扩展的互连方案，实现了实验室规模、旋涂两端全钙钛矿叠层太阳能电池（0.1 cm^2，PCE 为 23.5%）到实验室规模组件（12.25 cm^2 孔径面积）的升级。采用真空辅助生长控制在顶部亚电池的 WBG 上成功扩大和无降解生长 NBG。组件互连通过惰性气氛中的全激光刻痕图案工艺实现，使几何填充因子（GFF）达到 94.7%。本研究展示的自旋涂层叠层组件中的每条电池开路电压（V_{oc}）约为 2.01 V 左右，而总组件的 V_{oc} 等于预期的 8.0 V。这意味着每条电池的 V_{oc} 损失仅为最小值，仅为 10 mV（相对 0.5%）。此外，组件保留了 75%的高填充因子（*FF*），表明引入的组件互连的不利影响可以忽略不计。对孔径面积为 2.56 cm^2 的冠军组件（无封装和掩膜，在环境大气中测量）的内部测量显示出 22.2%的高 PCE，V_{oc}=8.0 V，短路电流 I_{sc}=9.57 mA，*FF*=75%。在连续照明下，稳定功率输出为 54.7 mW 时，经过 15 小时最大功率点（MPP）跟踪电池呈现了 95%的初始效率（SPCE）。组件的制造采用刮涂涂层（2PACz、WBG 钙钛矿、PEDOT:PSS、NBG 钙钛矿和 PCBM）和真空沉积（LiF、C_{60}、SnO_X、Au、BCP 和 MgF_2）方法的组合进行。原型组件在 20 小时内达到 19.1%的 PCE（孔径面积为 12.25 cm^2，七个电池条和 94.7%的 GFF）和 18.3%的 MPP 跟踪（对应于 224 mW），相对下降小于 7%。飞行时间二次离子质谱法（ToF-SIMS）的测量展示了高度选择性激光图案，以及明确的 GFF（~94.7%±0.1%）。通过电致发光和光致发光成像以及光束诱导电流成像系统（LBIC）映射，证明了整个组件区域内的均匀电流收集和低缺陷密度，这解释了该研究的旋涂层叠层组件的 *V*oc 和 FF 低损耗（<2%），以及使用刮涂涂层和真空沉积扩大组件的合理损耗（<5%）。

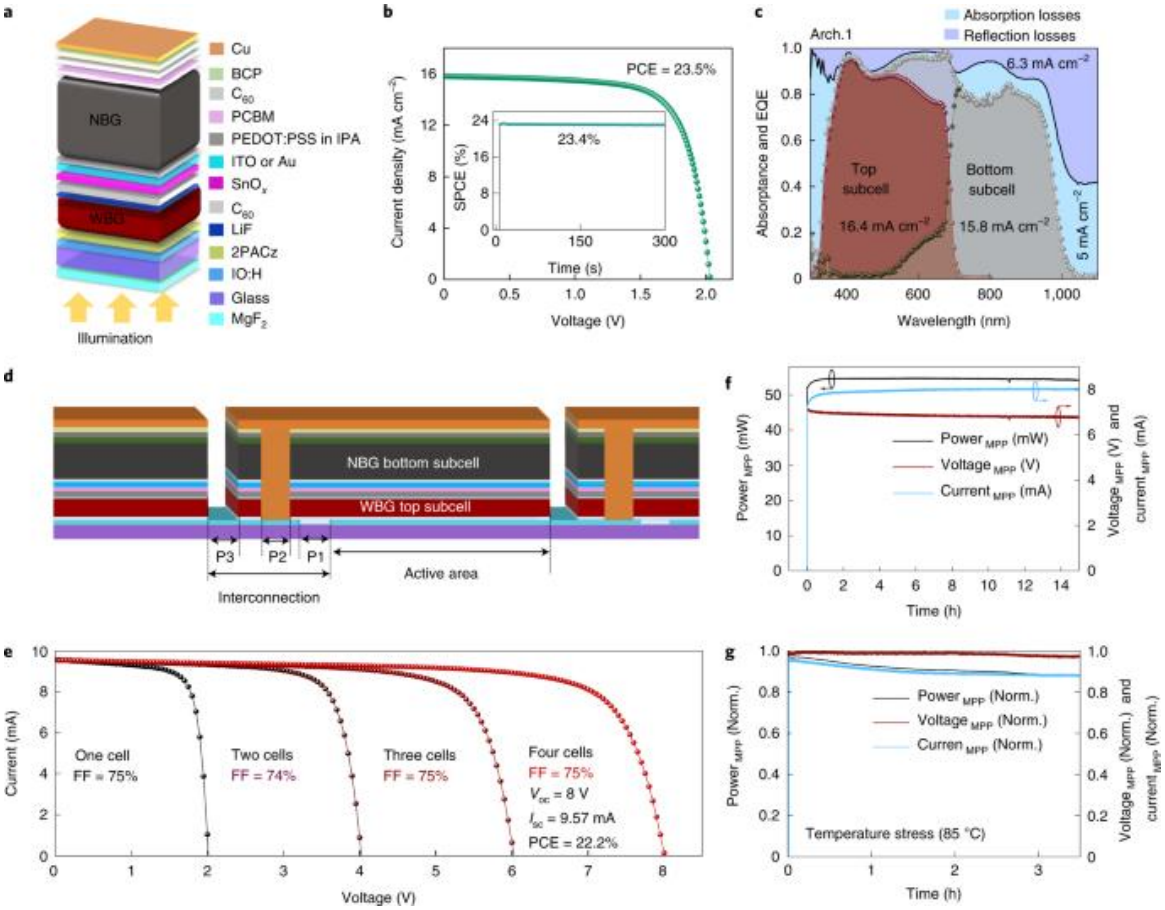


图 1 全钙钛矿叠层太阳能电池和组件的设计和性能

该研究对两端全钙钛矿叠层太阳能电池组件（2TPT-SMs）采用可扩展的沉积技术（刮涂涂层和真空沉积），并使用了一种廉价全激光刻痕太阳能薄膜图案，实现了两端全钙钛矿叠层太阳能电池（2TPT-SCs）从 0.1 cm^2 到 12.25 cm^2 的轻松扩展。同时，该研究在窄带隙（NBG）太阳能电池的组成和缺陷钝化方面的进展，促进了 NBG 底部亚电池表现出优异的稳定性。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》[20]。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

全氟聚醚基电解质实现超稳定全固态钠金属电池

钠金属负极可充电电池被认为是最具应用前景的高能、低成本储

[20] Bahram Abdollahi Nejand, David B. Ritzer, Hang Hu, et al. Scalable two-terminal all-perovskite tandem solar modules with a 19.1% efficiency. Nature Energy, 2022, DOI: 10.1038/s41560-022-01059-w

能系统之一。然而，在电池运行过程中使用高活性金属钠容易生成钠枝晶，特别是当使用高度易燃的液体电解质时，会引起安全问题。

澳大利亚迪肯大学 Andrew K. Whittaker 教授课题组开发了一种使用基于全氟聚醚（PFPE）的嵌段共聚物作为固体电解质的超稳定全固态钠金属电池。实验结果表明，PFPE 的加入提高了力学性能和储能模量；该 PFPE 聚合物减弱了与 Na^+的相互作用，Na^+迁移数和 Na^+电导率均增加，这导致复合嵌段共聚物电解质表现出显著的长期循环稳定性。该研究为设计新型氟化共聚物作为高度稳定的固体聚合物电解质，助力钠电池制备提供了新的机遇。研究人员为了增强 SPE 的机械完整性、界面稳定性和 Na^+传输，将一类具有受控形态的氟化嵌段共聚物作为 SPE。在该策略中，游离在 PEO 结构域中的 Na^+在醚氧侧链弛豫的辅助下进行了有效的转运，而 PEO 和 PFPE 块体之间的相分离，较好维护了机械完整性。由于形成了自组装的体心立方纳米结构，PFPE 块的引入增强了 PEO 域的弛豫，这种自组装的纳米结构提供了三维互联的离子传输通道和优越的机械完整性，这对于所有固体电池设备和宽温度范围内的应用来说具有重要意义。随后为了探究全固态钠金属电池内部结构、相互作用和电化学性质，研究人员进行了扫描电子显微镜（SEM）、核磁表征、Vogel-Fulcher-Tamman 方程拟合、电化学测试、分子动力学模拟等测试。SEM 图像证实聚偏二氟乙烯（PVDF）基质的孔完全被 PFPE 电解质填充，从而形成了一种灵活、无溶剂的 SPE；核磁结果表明，电解质中阴离子和 PFPE 聚合物之间的相互作用增加了，可以由“氟效应”解释。而循环伏安测试则证明了使用 PFPE 电解液时，电镀和剥离过程是可逆的，没有明显的氧化，在 5 V 之前的氧化电流较低，这表明在高压条件下具有更好的氧化稳定性，并保护电解液在高压下免受进一步氧化。最后对对称 Na/Na 电池和全固态钠金属电池的性能进行了研究。对称 Na/Na 电池结果证实：PFPE/PVDF 复合材料在 0.5 mAh cm^{-2} 的高电流密度

下，在 200 次循环中表现出极其稳定的钠镀/剥离行为，而没有明显的电压振荡；该复合材料在 1.0 mAh cm^{-2} 的苛刻循环条件下同样表现出极其稳定的循环性能，可循环 400 次（1000 小时），两种条件下超稳定电镀/剥离性能表明在含 PFPE 的电解质和钠金属负极之间形成了稳定的 SEI。同时为了进一步比较电镀/剥离过程中钠金属形态的变化，测试了不同电解质的钠/铜电池，发现将 PFPE 部分掺入 PEO 电解质中极大地抑制了枝晶和空隙的形成，从而在钠金属表面上产生了稳定的 SEI，也证实了氟化嵌段共聚物的多功能性和 PFPE 电解质与硬碳等非金属电极的优异相容性，这些在实际应用中是非常重要的。全固态 Na/NVP（NVP = $Na_3V_2(PO_4)_3$）电池的电化学性能测试结果表明，电池在各种速率下均表现出优异的循环能力，且经过 940 多次循环后，放电容量仅从 87.2 降至 85.0 mAh g^{-1}，容量保持率为 97.5%（平均容量损失率为 0.0026%），平均库伦效率高于 99.9%。最后应用实验表明：PFPE 复合电解质在钠金属电池和 Na/Na 电池中表现出良好的容量保持能力（940 次循环后仍保持 97.5%）和出色的容量输出能力。

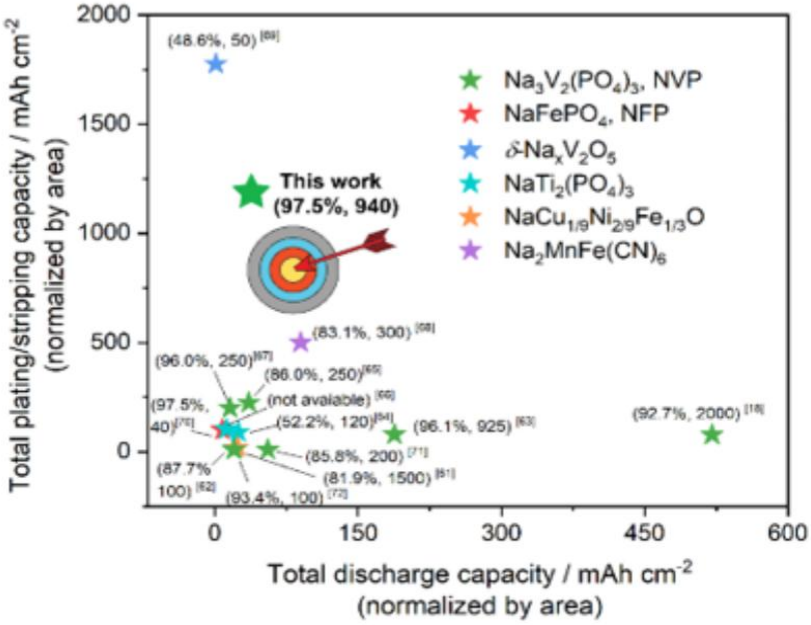


图 1 EO10-PFPE/PVDF 电解质组装的 Na/NVP 全电池电化学性能

该项研究设计和开发了基于全氟聚醚封端聚环氧乙烷（PEO）基

嵌段共聚物的无溶剂固体聚合物电解质（SPEs），并成功应用于安全稳定的全固态钠金属电池。在高电流密度下（0.5 mA cm^{-2} 和 1.0 mAh cm^{-2}，长达 1000 小时），新的 SPE 表现出高度稳定的对称电池循环性能。组装后的全固态钠金属电池表现出出色的容量保持率、长期充放电稳定性和高负载 $NaFePO_4$ 正极的良好性能，通过氟化作用形成的稳定 SEI 是制备有效固体电解质的一种通用策略。相关研究成果发表在《*Nature Materials*》[21]。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀 郭楷模]

[21] Xiaoen Wang, Cheng Zhang, Michal Sawczyk et al. Ultra-stable all-solid-state sodium metal batteries enabled by perfluoropolyether-based electrolytes. *Nature Materials,* 2022, DOI: 10.1038/s41563-022-01296-0

版权及合理使用声明

《变革性洁净能源关键技术与示范研究发展动态》（简称《洁净能源专项动态》）由中国科学院A类战略性先导科技专项资助、中国科学院大连化学物理研究所和中国科学院武汉文献情报中心合办，洁净能源先导专项管理办公室负责编辑出版。《洁净能源专项动态》反映中国科学院“变革性洁净能源关键技术与示范”A类战略性先导科技专项的研究成果以及国际发展动态。《洁净能源专项动态》遵守国家知识产权法的规定，保护知识产权，保障著作权人的合法利益，并要求参阅人员及研究人员认真遵守中国版权法的有关规定，严禁将《洁净能源专项动态》用于任何商业或其他营利性用途。未经中国科学院大连化学物理研究所同意，用于读者个人学习、研究目的的单篇信息报道稿件的使用，应注明版权信息和信息来源。未经中国科学院大连化学物理研究所允许，院内外各单位不能以任何方式整期转载、链接或发布相关内容。任何单位要链接、整期发布或转载《洁净能源专项动态》内容，应向中国科学院大连化学物理研究所发送正式的需求函，说明其用途，征得同意，并中国科学院大连化学物理研究所签订协议。
欢迎对《洁净能源专项动态》提出意见与建议。

中国科学院大连化学物理研究所

地址：大连市中山路457号
电话：0411-84379960

中国科学院武汉文献情报中心

地址：武汉市武昌区小洪山西25号
电话：027-87199180