

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

2020年第4期（总第10期）

新一代甲醇制烯烃（DMTO-III）技术通过科技成果鉴定



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

专项研发进展

- 煤液化残渣流化热解技术完成中试装置72小时现场考核..... 1
- “第三代甲醇制烯烃 (DMTO-III) 技术” 通过科技成果鉴定.....2
- 全球首座100kW风热机组成功运行.....3
- 农林废弃物制备生物航油联产高值化学品项目开工启动.....4
- 超长重力热管开采干热岩热能取得重大突破.....5
- 新一代全钒液流电池储能技术应用示范项目投入运行..... 5
- 钠离子电池基础研究取得重要进展.....6
- 国际首套百千瓦级热声发电系统成功运行.....7
- 全球首套年产千吨级二氧化碳加氢制汽油装置投料试车成功.....8

专项过程管理

- 洁净能源先导专项完成2020年度总结交流.....10

国内视点

- 中央经济工作会议：十四五开局年做好碳达峰、碳中和工作.....11
- 国家能源局正式发布首批科技创新（储能）试点示范项目.....13
- 科技部将继续加强氢能与燃料电池技术攻关.....14
- 南京大学10 cm²大面积全钙钛矿叠层太阳能电池效率首破20%.....16
- 异质结和硫空位共同作用大幅提升钠离子电池性能.....18
- 无负载超细氢化镁实现6.7wt%室温可逆氢储存.....20

国际瞭望

EPO和IEA发布《全球电池和电力储能技术专利分析》报告.....	23
DOE发布氢能计划发展规划提出研发重点及发展目标.....	30
美国能源部《储能大挑战路线图》提出五大重点领域行动.....	35
欧洲电池技术创新平台发布2030战略研究议程.....	38
牛津大学首次实现对钙钛矿薄膜的原子尺度表征.....	45
双金属氧化物催化剂助力甲烷高效催化转化.....	47

专项研发进展

煤液化残渣流化热解技术完成中试装置 72 小时现场考核

为进一步提高煤炭转化过程能效，解决煤液化过程含固油浆（煤温和加氢液化残渣、煤间接液化渣蜡等）的处理难问题，中科院山西煤炭化学研究所/中科合成油技术有限公司开发了含固油浆流化床热解技术，并于 2019 年开始在内蒙古鄂尔多斯市大路新区建设千吨级中试试验装置，2020 年 7 月 30 日完成中交。

该装置于 2020 年 10 月 9 日-2020 年 10 月 12 日，完成中国石油和化学工业联合会组织的现场 72 小时连续运行考核。现场考核采用的原料为煤炭温和加氢热解试验所产的液化残渣。



千吨级流化热解中试装置

该技术具有完全自主知识产权，技术性能和指标先进，其特点在于：

（1）开发了流化热解工艺、专有的进料系统、下行流化床反应器和再生器等设备，实现了千吨级流化热解技术的连续稳定运行目标，解决了高含固油浆处理的技术难题；

（2）开发、设计、建成的千吨级流化热解中试装置具有原料适应能力强、床层温度场均匀、操作参数控制灵活、可调范围宽、连续运行稳定、系统安全可靠等特点；

（3）实现了千吨级流化热解中试装置的安全稳定运行，煤液化残渣四氢呋喃可溶物基准的油收率达到 68.19%，油品收率高。

该技术的中试成功运行，表明该工艺具有处理煤液化残渣等含固油浆的技术与工程可行性，对解决煤炭液化（煤炭间接液化、煤炭温

和加氢热解/煤直接液化)过程中产生的含固油浆处理难问题,提高过程能源转化效率,促进煤炭清洁高效利用,实现节能减排和环境保护,具有重要的意义,可拓展至其它含固油浆、生活有机垃圾等领域。

[中国科学院山西煤碳化学研究所 杨勇]

“第三代甲醇制烯烃(DMTO-III)技术”通过科技成果鉴定

11月9日,由大连化物所开发的、具有自主知识产权的“第三代甲醇制烯烃(DMTO-III)技术”通过了石化联合会组织的成果鉴定。鉴定委员会专家一致认为:该成果创新性强,具有完全自主知识产权,成果处于国际领先水平,技术优势明显,引领行业技术进步,应用前景广阔;建议加快新一代催化剂推广应用,并早日建成DMTO-III工业示范装置。

该研发团队在对甲醇制烯烃反应机理和烯烃选择性控制原理进一步深入认识的基础上,研制了新一代甲醇制烯烃催化剂,开发了新型高效流化床反应器,完成了中试放大试验,研发了DMTO-III技术。新一代催化剂的工业化和DMTO-III技术的成功开发使我国在甲醇制烯烃技术领域保持了持续的国际领先地位。

在催化剂方面,该团队通过创新分子筛合成方法,实现对SAPO分子筛晶相、酸性和形貌的协同调控,同时结合催化剂制备工艺的创新,开发出了烯烃收率高、焦炭产率低、操作窗口宽、微量杂质少的新一代甲醇制烯烃催化剂。目前已建成5000吨/年规模的催化剂生产线并成功实现工业化生产。

在DMTO-III技术开发方面,该团队对甲醇制烯烃多尺度过程进行了深入研究,建立了从分子筛反应扩散到反应器内催化剂积碳分布的理论方法,发展了通过催化剂积碳调控烯烃选择性的技术路线。



新一代甲醇制烯烃（DMTO-III）技术科技成果鉴定会现场及科技成果登记证书

2020年10月，大连化物所已与宁夏宝丰集团一次性签订了5套100万吨/年烯烃产能的DMTO-III工业装置技术许可合同，总投资810亿元人民币，投产后可实现年产值约500亿元人民币。目前，DMTO系列技术已累计技术许可31套工业装置（投产14套），对应烯烃产能2025万吨/年，预计拉动投资超4000亿元人民币，全部投产后可实现年产值超2000亿元人民币。

[中国科学院大连化学物理研究所 杨伟伟]

全球首座 100kW 风热机组成功运行

全球首座 100kW 风热机组于 2020 年 11 月在河北省涿鹿县黄帝城小镇成功运行。该机组是基于空气动力学与热力学交叉理论而提出的风能利用新理念，不经过发电环节而直接将风能转化为热能，使系统造价降低的同时系统效率大幅度提升，经济指标优于当前主流的清洁能源供热/供冷技术。风热机组以土壤源为低温热源，设计工况下将产生 50~60°C 的热水，制热 COP 可达 3.0 以上，可为达华建国酒店 4000m² 建筑提供冷热源。



百千瓦级风热机组样机及示范

[中国科学院工程热物理研究所 钟晓辉]

农林废弃物制备生物航油联产高值化学品项目开工启动

9月28日上午，依托中科院广州能源所开发的生物航油与化学品多联产技术，以秸秆类农林废弃生物质为原料联产生物航油与乙酰丙酸等高值化学品项目启动开工。



该项目由克拉玛依森禾生物能源科技有限公司投资建设，系广州能源所与克拉玛依市人民政府在生物质能源化工领域战略合作内容之一。项目投产后，预计每年消纳当地秸秆类农业废弃物 15000 吨，

产出 1000 吨生物航油及 1000 吨糠醛与乙酰丙酸等化学品。对促进生物质能产业的健康快速发展，降低碳排放、改善环境质量有重要的示范推广作用。

[中国科学院广州能源研究所 周卫征]

超长重力热管开采干热岩热能取得重大突破

中科院广州能源研究所自主研发了 3000m 长度重力热管，并联合河北省煤田地质局在河北唐山马头营一口地热深井内，完成了长达 4 个月的采热试验。在地下取热段，岩石平均温度为 119°C 且未经过人



河北唐山开采干热岩热能场地试验

工热储改造的条件下，地面获得了最高达 90°C 的饱和水蒸汽；瞬时采热功率最高超过 400 kW、持续采热功率近 200 kW。世界范围首次实现中深层地热资源“取热不取水”、“无泵式”开采，取得了中深层地热开

发技术的重大突破，为地热资源利用开辟了新模式、新路径。在试验现场的专家会上，与会专家认为：“本项成果将引领我国中深层地热资源开采技术的创新发展，可作为中深层地热资源开采技术的重要示范应用成果。相关技术进一步发展成熟以后可以在全国范围内推广应用，不仅能够取得良好的生态效益，还有望实现较好的经济效益。”

[中国科学院广州能源研究所 蒋方明]

新一代全钒液流电池储能技术应用示范项目投入运行

2020 年 12 月，大连化物所储能技术研究部团队采用自主开发的新一代可焊接全钒液流电池技术集成的 8kW/80kWh 和 15kW/80kWh 储能示范系统在陕西省商洛市山阳县成功投入运行。该系统由电解液

循环系统、电池系统模块、电力控制模块以及远程控制系统组成，系统设计额定输出功率分别为 8kW 和 15kW，额定容量均为 80kWh。电池系统与太阳能光伏配套，作为项目现场机房重要负载的备用电源使用，以确保负载的供电可靠性。经现场测试，该电池系统满足客户使用要求，且运行稳定。



该储能示范系统的电堆采用了研究团队自主研发的可焊接多孔离子传导膜及其集成的可焊接电堆。新一代技术打破了传统的电堆装配模式，大幅提高了电堆的可靠性及装配自动化程度，与传统的电堆相比，电堆总成本降低 40%，进而提升了整个电池系统的稳定性和经济性。该应用示范项目的成功运行，为新一代全钒液流电池技术的工程化和产业化开发奠定了坚实的基础。

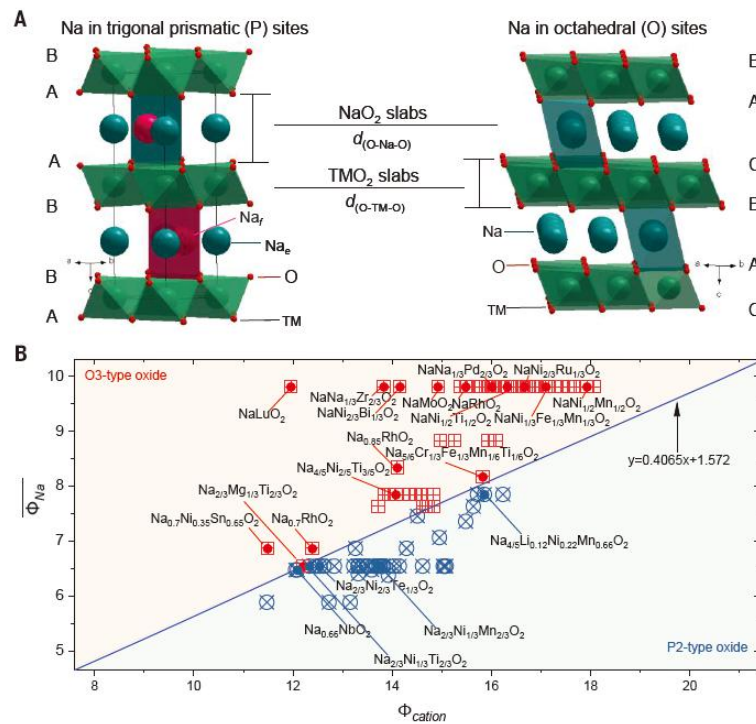
[中国科学院大连化学物理研究所 史丁秦]

钠离子电池基础研究取得重要进展

近日，中国科学院物理研究所胡勇胜研究员团队与荷兰代尔夫特理工大学 Prof. Marnix Wagemaker 及法国波尔多大学 Prof. Claude Delmas 等合作提出了一种简单的预测钠离子层状氧化物构型的方法。研究成果以“钠离子电池层状氧化物材料的理性设计（Rational design of layered oxide materials for sodium-ion batteries）”为题，于

2020年11月6日在线发表在《科学》(Science)杂志上,这是Science创刊以来首次发表钠离子电池方面的研究论文(论文链接:<https://science.sciencemag.org/content/370/6517/708>)。

该工作不仅为层状氧化物结构的设计提供了新的方法,而且用实验确认了该简单方法的有效性,为低成本、高性能钠离子电池层状氧化物正极材料的设计制备打下了坚实的科学基础。



(A) 典型 P2 型和 O3 型钠离子层状氧化物晶体结构示意图; (B) 具有不同钠含量、不同过渡金属氧化态和组成的 P2 型和 O3 型钠离子层状氧化物在以阳离子势 Φ_{cation} 为横坐标, 钠的加权平均离子势 $\overline{\Phi_{Na}}$ 为纵坐标的直角坐标系中的分布图。

[中国科学院物理研究所 胡勇胜]

国际首套百千瓦级热声发电系统成功运行

该工作突破了大功率热声发电系统中新型声学调相、新型高效换热、新型气浮支撑等多项设计、加工、装配难题,建成了国际上功率

最大的热声发电系统。采用模拟反应堆熔盐加热，在加热温度为 520℃ 时，该系统发电功率达到 65kWe，热电转化效率达到 23%，为国际上最大的热声发电系统，验证了热声发电作为反应堆新型热电转换技术路线的可行性。后续将进一步改进该系统，将发电功率提升到 100kWe，热电转化效率提升到 30% 以上。

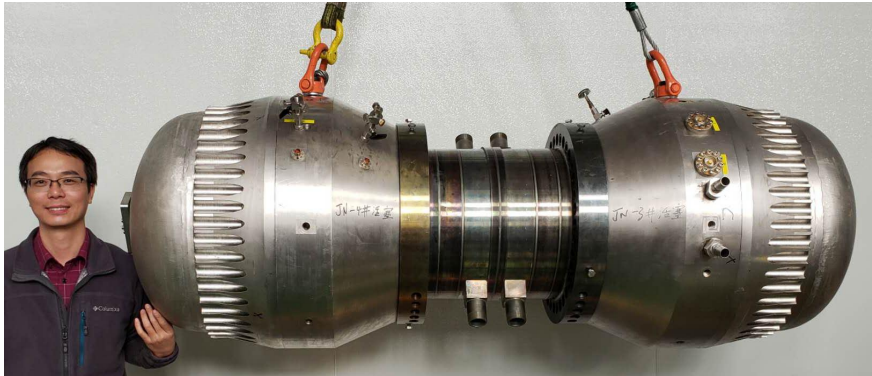


图 1 百千瓦级热声发电机

[中国科学院理化技术研究所 胡剑英]

全球首套千吨级二氧化碳加氢制汽油装置投料试车成功

2020 年 11 月 28 日，由中国科学院大连化学物理研究所和珠海市福泐能源科技有限公司联合开发的全球首套年产千吨级二氧化碳加氢制汽油中试装置，在山东省邹城工业园区一次投料试车成功，生产出合格汽油产品。



千吨级二氧化碳加氢制汽油中试装置

二氧化碳加氢转化制液体燃料，不仅可实现温室气体二氧化碳的资源化利用，还有利于可再生能源的储运，同时也为解决国家能源安全问题提供新策略。但二氧化碳的活化与选择性转化

极具挑战。国内外技术路线的产物多集中在甲烷、甲醇、甲酸等低碳

化合物，若能利用该过程选择性生产附加值更高的高碳烃类液体燃料，将为推进低碳、清洁的能源革命提供全新路线。

该技术经过实验室小试、百克级单管评价试验、催化剂吨级放大制备、中试工艺包设计等过程，于 2020 年 8 月在山东荣信集团园区率先建设完成了千吨级中试装置。该中试装置累计完成各项投资四千余万元，并于 2020 年 11 月实现投料试车，形成具有自主知识产权的近零排放汽油生产成套技术。该装置的试车成功标志着我国二氧化碳资源化利用技术进入新阶段，为努力实现碳达峰和碳中和的目标提供新策略。

[中国科学院大连化学物理研究所 孙剑、葛庆杰]

专项过程管理

洁净能源先导专项完成 2020 年度总结交流

根据专项总体工作安排，洁净能源先导专项总体组办公室于 2020 年 12 月组织各项目陆续完成了 2020 年度工作总结交流。此次交流旨在总结亮点成果、查找存在问题、确保重大产出。

各任务分别从年度工作计划完成情况、重要工作进展及亮点成果、组织管理情况、存在问题及举措以及 2021 年工作计划和预期成果进行了汇报。项目负责人及项目所属总体组责任专家对各任务进行了打分，每个项目排出前 20% 任务和后 20% 的任务，会议组织情况如下：

项目号	项目名称	日期	主要形式
项目 1	战略研究与专项总体	12 月 24 日	视频会议
项目 2	合成气下游及耦合转化利用	12 月 12 日	线下（大连）
项目 3	甲醇下游及耦合转化利用	12 月 13 日	线下（大连）
项目 4	高效清洁燃烧关键技术与示范	12 月 24 日	视频会议
项目 5	张家口黄帝城小镇 100% 可再生能源示范	12 月 28 日	视频会议
项目 6	可再生能源关键技术与示范	12 月 29 日	视频会议
项目 7	大规模储能关键技术与应用示范	12 月 26 日	视频会议
项目 8	核能非电综合利用	12 月 19 日	视频会议
项目 9	可再生能源制氢/液体燃料关键技术与应用	12 月 12 日	视频会议

院重大任务局、专项监理部及监理组专家、专项总体组、各项目负责人、专项办及各项目承担单位科研管理骨干等参加了相关会议。

[中国科学院大连化学物理研究所 卫小芳]

国内视点

中央经济工作会议：十四五开局年做好碳达峰、碳中和工作

中央经济工作会议 12 月 16 日至 18 日在北京举行¹，会上首次将“做好碳达峰、碳中和工作”作为 2021 年的重点任务之一，再次强调我国二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，力争 2060 年前实现碳中和。“十四五”是实现我国碳排放达峰的关键期，也是推动经济高质量发展和生态环境质量持续改善的攻坚期。2021 年作为“十四五”开局年，必须按照中央的要求和部署，为我国的低碳转型和实现碳达峰、碳中和目标开个好局。

1、做好碳达峰顶层设计，有条件地区应争当碳达峰“领头羊”

中央经济工作会议上提出，要“抓紧制定 2030 年前碳排放达峰行动方案，支持有条件的地方率先达峰”。目前，生态环境部已启动达峰行动方案编制工作。部长黄润秋在公开采访时表示，将从三方面展开工作²：首先，将明确目标、压实责任、严格监督，明确地方、行业的达峰目标和实施方案，并做到积极而有力度，鼓励有条件的地方率先达峰。其次，将采取更有力的措施控制化石能源消费，大力发展非化石能源，加快推动可再生能源发展；全面推进重点领域绿色低碳行动，大力发展低碳交通，积极发展绿色建筑，推动绿色低碳技术创新，推行绿色低碳生产生活方式。另外，将进一步加快启动全国碳排放权交易市场建设，并逐步扩大覆盖行业范围，丰富交易品种和方式，实现全国碳市场平稳有效运行和健康持续发展，切实提升气候治理能力。

地方是落实国家碳达峰任务的责任主体，应尽快开展达峰行动，确保落实碳达峰国家自主贡献。应坚持共同而有区别的责任原则，在国家层面加强统筹协调，提出不同区域分阶段达峰路线图，明确各地

¹ 中央经济工作会议在北京举行. <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/1219/c64094-31971981.html>

² “做好碳达峰、碳中和工作”作为 2021 年要抓好的重点任务——访生态环境部部长黄润秋. <http://www.nengyuanjie.net/article/44577.html>

达峰时限和重点任务。经济发展水平高、绿色发展基础好、生态文明创建积极性高的地区应争当“领头羊”，率先实现碳达峰。北京、上海、天津等直辖市，国家生态文明试验区、美丽中国创建示范区以及京津冀、长三角、粤港澳大湾区等应该积极主动作为，率先提出并实现碳达峰³。

2、加快产业和能源结构转型，推进重点领域清洁低碳能源替代

中央经济工作会议上提出，要“要加快调整优化产业结构、能源结构，推动煤炭消费尽早达峰，大力发展新能源”。实现重点行业尽早达峰是保证全国 2030 年前达峰的关键。工业领域应聚焦重点行业，明确达峰目标，提出行业碳排放标杆引领、标准约束、增量控制等手段机制，加强源头治理、系统治理、整体治理，加快产业结构转型升级，推进产业链和供应链低碳化。交通领域要制定实施以道路、航空运输等为重点的绿色低碳交通转型路线。建筑领域要做好统筹规划，推广绿色、节能、智能建筑，加大既有建筑改造。

我国能源消费的主体是以煤炭为代表的化石能源，因此，实施能源消费和能源生产革命，促进能源结构低碳转型，持续减少化石能源消费是实现碳达峰和碳中和的关键。应制定“十四五”及中长期煤炭消费总量控制目标，确定减煤路线图，加速煤炭生产、转化及利用全链条的绿色转型，保持煤炭消费占比持续快速降低，对大气污染防治重点区域继续加快推进煤炭总量下降。还应大力推动燃煤发电向低碳高效过渡，扩大对可再生能源等清洁能源的利用，推进终端用能部门的电气化和能效水平提升，构建清洁高效的现代能源体系，减少终端用能直接碳排放，打破能源消费与碳排放之间的锁定关系。

3、完善碳排放交易机制，加快推进全国碳市场建设

中央经济工作会议提出，要“加快建设全国用能权、碳排放权交易市场，完善能源消费双控制度”。我国从 2011 年开始在北京、上海

³ 加快实现碳排放达峰 推动经济高质量发展. http://paper.ce.cn/jjrb/html/2021-01/04/content_435446.htm

等 7 省市开展碳交易试点工作，截至 2020 年 8 月，试点碳市场共覆盖钢铁、电力、水泥等 20 多个行业，接近 3000 家企业，累计成交量超过 4 亿吨，累计成交额超过 90 亿元。全国碳市场试点范围内的碳排放总量和强度目前保持双降趋势，显示出碳市场以较低成本控制碳排放的良好效果。2020 年底，生态环境部发布《碳排放权交易管理办法（试行）》⁴，全国碳排放权交易体系正式投入运行。应在该办法的基础上，加快制定细则，做好试点与全国碳市场的衔接工作，进一步推进全国碳排放权注册登记系统和交易系统建设。以发电行业为突破口率先在全国开展交易，在发电行业碳市场稳定运行的基础上，逐步扩大市场覆盖行业范围，不断丰富交易品种和交易方式，实现全国碳市场的平稳有效运行和健康持续发展，有效发挥市场机制在实现二氧化碳排放达峰目标与碳中和愿景中的重要作用。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

国家能源局正式发布首批科技创新（储能）试点示范项目

为深入贯彻落实习近平总书记“四个革命、一个合作”能源安全新战略，加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系，助力实现 2030 年碳达峰及 2060 年碳中和目标，按照《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》要求，2020 年 7 月，国家能源局印发了《国家能源局综合司关于组织申报科技创新（储能）试点示范项目的通知》，在全国已投产电力储能工程（抽水蓄能除外）中组织筛选首批科技创新（储能）试点示范项目。

经过网上申报、地方能源主管部门网上初审、专家评审、网上公示等工作流程，2020 年 11 月 25 日，国家能源局正式发布了首批科技创新（储能）试点示范项目⁵，分别为青海黄河上游水电开发有限责任公司国家光伏发电试验测试基地配套 20 MW 储能电站项目、国

⁴ 碳排放权交易管理办法（试行）. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content_5577360.htm

⁵ 首批科技创新（储能）试点示范项目正式发布. http://www.nea.gov.cn/2020-12/15/c_139591533.htm

家风光储输示范工程二期储能扩建工程、宁德时代储能微网项目、张家港海螺水泥厂 32 MWh 储能电站项目、苏州昆山 110.88 MW/193.6 MWh 储能电站、福建晋江 100 MWh 级储能电站试点示范项目、科陆-华润电力（海丰小漠电厂）30 MW 储能辅助调频项目、佛山市顺德德胜电厂储能调频项目。

首批储能示范项目分别采用了电化学储能、物理储能、储热等多种技术类型，并覆盖了储能的主要应用场景，示范效应明显。从项目运行效果来看，可再生能源发电侧项目实现了与风电、光伏发电联合运行，能够有效增发清洁能源，促进大规模可再生能源消纳。电网侧项目既能够削峰填谷又能够参与辅助服务，实现了多功能复合应用，提升了电力系统运行的安全稳定性。联合火电厂参与辅助服务项目将明显提高火电厂跟踪调度曲线的能力，并避免机组反复调节出力带来的设备疲劳、系统效率下降和污染物排放增加等情况。用户侧项目能够有效调节用电负荷和增加分布式可再生能源应用，在为用户节约用电成本的同时，促进节能减排。

下一步，国家能源局将会同相关单位，组织建立试点示范项目督促落实工作机制，推动先进储能技术、装备与系统集成，研究推动完善政策、规范和市场机制，引导储能产业化应用健康发展，确保储能试点示范任务落地和项目顺利实施。

[中国科学院武汉文献情报中心 陈伟]

科技部将继续加强氢能与燃料电池技术攻关

11月9日，科技部官网公布对十三届全国人大三次会议第6592号建议的答复⁶。针对这份《关于加快推动燃料电池商用车发展的建议》，答复文件明确：科技部将结合国家中长期科技发展规划研究和“十四五”国家重点研发计划重点专项凝练等工作，继续加强氢能与燃

⁶ 对十三届全国人大三次会议第6592号建议的答复。

http://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/jyta/202011/t20201109_159585.html

料电池技术攻关，加快关键核心技术取得实质性突破，提升燃料电池技术成熟度，为燃料电池商用车技术进步和产业发展提供强有力技术支撑。

不仅如此，目前，财政部正联合科技部等部门，通过“以奖代补”方式，重点在积极性高、经济条件和政策基础好、具备氢能和燃料电池汽车产业基础、有市场需求的地区进行燃料电池汽车示范推广。

一直以来，科技部高度重视燃料电池汽车技术研发。“十五”期间，科技部启动实施电动汽车重大科技专项，确立“三纵三横”（三纵：纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车，三横：电池、电机、电控）研发布局，燃料电池汽车技术作为“三纵”之一得到重点研发部署，并在“十一五”到“十三五”期间持续进行科技攻关。

“十三五”期间，科技部牵头组织实施国家重点研发计划“新能源汽车”和“可再生能源与氢能技术”两个重点专项，氢能和燃料电池技术持续得到重点部署。具体来说，“新能源汽车”重点专项在车用燃料电池技术方面启动项目 13 项，重点在燃料电池乘用车及商用车应用领域，对面向产业化的和未来前瞻性的关键核心技术进行了针对性研发部署，其中，重大共性关键技术项目主要由整车企业牵头，将极大带动燃料电池系统技术和产业快速发展。“可再生能源与氢能技术”重点专项已启动项目 17 项，重点在高效电解水制氢、先进制氢技术，高压储运氢、固态储运氢、加氢站及安全评价技术，燃料电池发电、长寿命电堆及关键组件、分布式热电联供系统技术，膜电极、空压机、循环泵、氢气纯化、催化剂技术加强研发部署。

答复文件指出，经过 4 个五年国家科技计划的组织实施，我国燃料电池从电堆、系统到关键部件技术研发均取得一系列关键突破，形成了涵盖制氢、储氢、氢安全及燃料电池及整车应用等技术的产学研用研发体系，培育了一批从事燃料电池及关键零部件研发生产的企业，以分布式能源领域、移动通信基站以及城市客运、物流等商用车

型为先导开展了规模化示范运行，并以资本为纽带，带动广东、江苏、湖北等多地初步形成了产业集群，开展一定规模的示范应用。

在加强技术研发的同时，科技部积极推动燃料电池汽车示范运行考核工作。2008年北京奥运会投入燃料电池轿车作为马拉松先导车和燃料电池客车作为运动员收容车开始，燃料电池汽车示范运行拉开序幕。到2020年，在北京、上海、郑州、佛山、盐城等地开展累计百辆级的燃料电池客车、轿车、物流车商业化示范运行工作。

[中国科学院武汉文献情报中心 陈伟]

南京大学 10 cm² 大面积全钙钛矿叠层太阳能电池效率首破 20%

将窄带隙和宽带隙的太阳电池进行串联构建叠层太阳电池被认为是电池效率突破肖克利-奎伊瑟效率极限值（30.5%）有效的技术路径。但目前叠层电池主要局限在传统的无机半导体（如晶硅、碲化镉等），制备工艺复杂、成本高昂，且应用范围有限。相比之下全钙钛矿叠层电池在成本、制备工艺上具备了更好优势，且具备良好的机械柔韧性，可以应用于各种复杂几何表面结构，应用范围更广。相关研究表明，窄带隙铅锡（Pb-Sn）混合钙钛矿薄膜电池是全钙钛矿串联电池良好的子电池选项。但由于该薄膜存在表面晶界缺陷且锡离子存在易于被氧化的问题（Sn²⁺氧化 Sn⁴⁺），导致采用该薄膜电池的效率和稳定性不甚理想。由南京大学谭海仁教授课题牵头的国际联合研究团队通过在 Pb-Sn 混合薄膜中加入双极性抗氧化剂，成功实现了对其表面晶界缺陷的钝化和 Sn²⁺氧化问题的有效抑制。

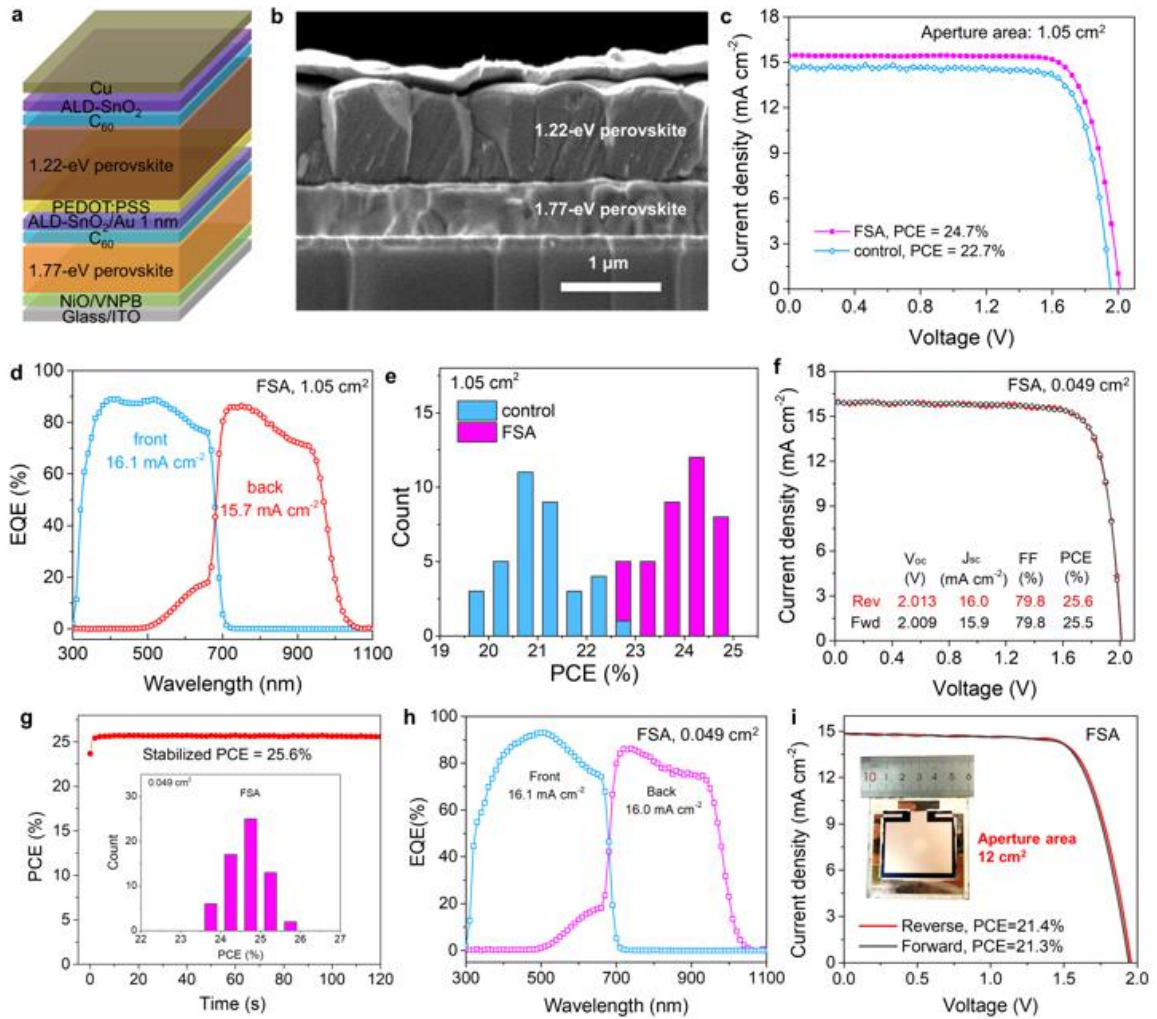


图 1 大面积全钙钛矿叠层太阳能电池的光伏性能

研究人员首先配置两种 Pb-Sn 混合卤素钙钛矿薄膜前驱体，一种加入了两性离子抗氧化剂甲脒亚磺酸（FSA），另外一种是无 FSA 前驱体，随后利用抗溶剂法制备出相应的薄膜。X 射线衍射表征显示两种薄膜都是单一的钙钛矿相，且两类膜均显示出相似的结晶度和晶体学取向。X 射线光电子能谱测试发现，引入 FSA 后，Pb-Sn 钙钛矿薄膜中 Sn²⁺的氧化被有效地抑制；相比之下，没有 FSA 薄膜中的 Sn²⁺会被快速氧化；表明了 FSA 引入能够改善薄膜稳定性。光致发光光谱（PL）测试显示，含有 FSA 的薄膜 PL 光强度是无 FSA 的三倍，意味着 FSA 有效地抑制了 Pb-Sn 钙钛矿薄膜非辐射复合；而 PL 寿命显示 FSA 薄膜的 PL 衰减寿命达到了 188 ns，近三倍于无 FSA 薄膜（64 ns），表明引入 FS 后载流子寿命得到了延长。接着以上述薄膜

为光敏层组装成电池并进行光电性能测试，结果显示采用 FSA 薄膜小面积电池效率较无 FSA 器件显著提升，从 16.1% 增加到了 21.7%，大面积（ 1.05 cm^2 ）电池效率为 16.1%。最后研究人员以 FSA 电池为子电池构建了全钙钛矿双结串联电池， 0.1 cm^2 小面积器件效率达到 25.6%，大面积（ 1.05 cm^2 ）器件为 24.7%；最后研究人员制备了 12 cm^2 的大面积全钙钛矿双结串联电池，器件转化效率首次突破了 20%，是迄今为止面积大于 10 cm^2 钙钛矿电池（无论单、双结）的效率最高值，创造了该类型电池世界纪录。而在 $54\text{-}60^\circ\text{C}$ 条件下，封装后的 FSA 串联器件连续工作 500 个小时后，仍能保持其 88% 的初始性能，表现出良好的长程稳定性，证明该电池具备了产业化应用的潜力。

该项研究通过在铅锡卤素混合钙钛矿薄膜中引入双极性的抗氧化剂，一方面有效地抑制了锡离子的氧化，另一方面实现了对薄膜晶界缺陷的钝化，从而显著提升了基于上述薄膜单结电池器件的性能和稳定性；而基于该电池的双结全钙钛矿电池的小面积器件效率高达 25.6%，而超 10 cm^2 大面积的串联器件效率突破了 20%，创造了 10 cm^2 大面积器件的世界纪录。相关研究成果发表在《*Joule*》⁷。

[中科院武汉文献情报中心 郭楷模]

异质结和硫空位共同作用大幅提升钠离子电池性能

钠资源储量丰富、原材料成本相对低廉，因此钠离子电池成为新一代大规模储能技术的理想选择。但是，钠的标准电极电位较高、钠离子半径较大，导致现有钠离子电池能量密度不足。因此，亟需探索具有高比容量和快速离子传输动力学的先进电极材料。二维过渡金属硫族化物（TMC）具备开放的框架结构和良好的电化学性能，广泛应用于锂离子电池和钠离子电池。其较大的层间距和较弱的范德华相互作用，可实现钠离子的快速传输。但 TMC 的电导率低，导致比容

⁷ Xiao, K, Lin, R, Han, Q, et al. All-perovskite tandem solar cells with 24.2% certified efficiency and area over 1 cm^2 using surface-anchoring zwitterionic antioxidant. *Joule*, 2020, DOI:10.1038/s41560-020-00705-5

量和倍率性能不佳。北京理工大学材料学院吴锋院士团队吴川教授等和武汉理工大学麦立强教授的联合研究团队，针对这一问题提出了二硫化钨和硫化锌共筑含大量硫空位的异质结结构，强化了离子在电极中的扩散能力，使电极在高电流密度下依旧可以表现出极高的比容量和循环稳定性，推进了钠离子电池向商业化应用发展。

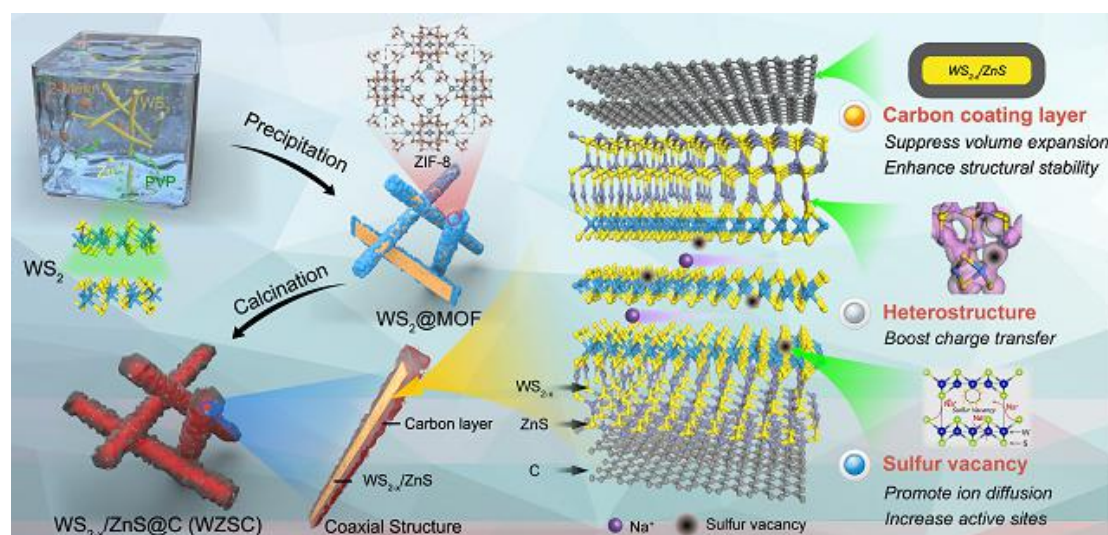


图 1 具有硫空位和异质结构的双金属硫化物/碳复合材料的设计思路

材料中的离子传输包括间隙扩散和空位扩散，金属硫化物固有的开放框架结构，已具备间隙扩散优势。因此，构建适量的晶格空位，有望引入空位扩散，进一步改善金属硫化物中的离子传输速率。研究人员设计了一种制备具有特殊硫空位和异质结结构的炭复合双金属硫化物的特殊方法。该合成手段“一石三鸟”，通过引入金属有机框架材料，能够在 WS_2 纳米棒的表面原位生长均匀的 ZIF-8 层。经煅烧处理后， WS_2 表面上形成了均匀的碳保护层。此外，由于金属 Zn 和 W 的电负性差异，Zn 与 S 更易结合，原位生成 WS_2/ZnS 异质结构；同时在 WS_2 中形成丰富的硫空位。该复合材料具备以下优点：1) 均匀的碳包覆层促进电子快速迁移并提供良好的电导性，同时抑制循环过程中材料的体积膨胀，从而保证复合材料的结构稳定性；2) 形成的 WS_2/ZnS 异质结构能够产生内置电场效应，促进额外的电荷转移，以增强反应动力学；3) WS_2 晶体中产生的硫空位不仅可以提供更多的反应活性位点，还可以诱导 W 金属原子周围产生过量电子，形成负

电荷中心，加速钠离子的快速传输。

该项研究对材料的微观结构精心设计，巧妙地利用异质结和硫空位共同作用，制备了具有特殊硫空位和异质结结构的炭复合双金属硫化物复合材料，具有极佳的钠离子扩散能力，展示出快速的电动力学特性和出色的可逆容量。该项成果突破了二维过渡金属硫族化合物的钠离子电池动力学壁垒，对能源材料的优化设计以及高比能动力电池的构建，提供前瞻性的理论支撑。相关研究成果发表在《*Advanced Materials*》⁸。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据北京理工大学新闻编辑]

无负载超细氢化镁实现 6.7wt% 室温可逆氢储存

氢是理想的能源载体，其高效、安全和经济的储存一直是实现氢经济的关键瓶颈，开发轻质、高容量的储氢材料成为研究重点。镁在地壳中储量丰富，成本低廉，氢化镁的重量储氢密度高达 7.5 wt%，且具有良好的可逆性，是最具应用发展前景的高容量储氢材料之一。然而，其热力学稳定性较高，吸放氢反应动力学壁垒较大，导致吸放氢温度偏高，吸放氢速率较慢。研究表明，纳米化可以显著降低氢化镁的吸放氢温度，提高其吸放氢速率，但由于氢化镁强还原性和高水氧敏感性，其无负载超细纳米化一直难以实现。浙江大学潘洪革教授团队刘永锋课题组联合烟台大学和悉尼科技大学，开发了一种超声驱动无负载超细纳米氢化镁合成新方法，有效储氢容量高达 7.2 wt%，其中 6.7 wt% 的氢气可以在室温下可逆吸放，经历 50 个吸放氢循环后容量保持率 97%，有望满足燃料电池对储氢材料的要求。

⁸ Yu Li, Ji Qian, Minghao Zhang, et al. Co-Construction of Sulfur Vacancies and Heterojunctions in Tungsten Disulfide to Induce Fast Electronic/Ionic Diffusion Kinetics for Sodium-Ion Batteries. *Advanced Materials*, 2020, DOI: 10.1002/adma.202005802

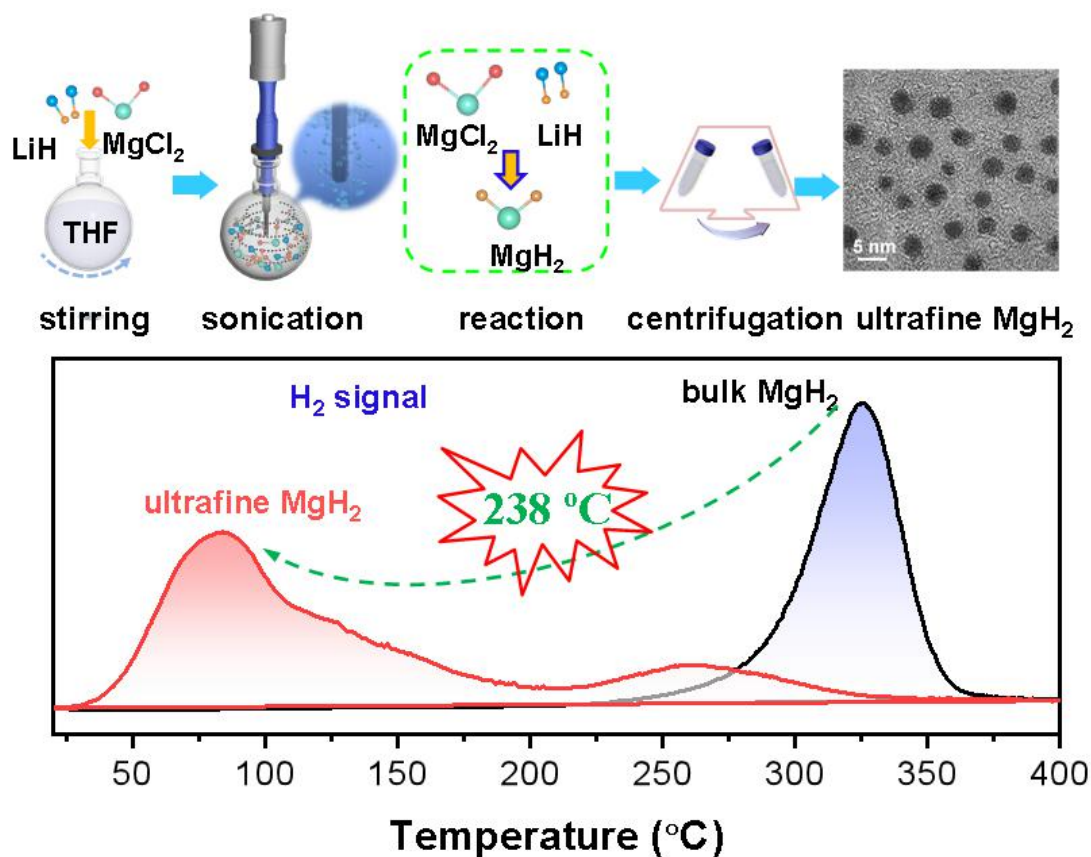


图1 无负载超细纳米氢化镁合成方法及储氢性能

研究人员利用超声波为驱动力进行化学合成，选择四氢呋喃为介质，氯化镁和氢化锂为反应物。超声波一方面为化学反应提供能量，促进氯化镁和氢化锂发生复分解反应，产生氢化镁和氯化锂，而生成的氯化锂则会立即溶解四氢呋喃中；另一方面，超声波的震荡分散效应避免生成的氢化镁发生团聚长大。反应结束后，将混合物进行离心，成功分离出纳米氢化镁。结构表征发现，所制备的纳米氢化镁粒径在4-5 nm，粒径分布均匀，没有明显的团聚出现。为了揭示超声作用下氢化镁纳米颗粒的形成过程，研究人员系统研究了不同超声反应时间产物的结构和形貌，发现超声2小时后的产物颗粒尺寸较小，具有较好的储氢性能。根据车载燃料电池对储氢系统的要求，储氢材料吸放氢温度应该低于85°C，目前能够在该温度条件下大量吸放氢的储氢体系鲜有报道。研究人员通过系统的吸放氢性能表征发现，无负载超细纳米氢化镁在室温下即开始脱氢，加热至300°C时，放氢量高达7.2 wt%，接近其理论储氢容量。在等温模式下，辅助动态真空，样品在

30°C下保温可放出 6.7 wt%的氢气，放氢产物在 30°C/100 bar 氢压下可以完全氢化，首次实现了氢化镁的室温可逆大量储氢。热力学和动力学性能研究发现，无负载超细纳米氢化镁的焓变和活化能分别为 59.5 kJ mol⁻¹ H₂ 和 80 kJ mol⁻¹，相比大颗粒氢化镁降低了 22%和 50%，在较低的温度下即可获得较快的吸放氢速率。为了表征无负载纳米氢化镁的循环性能，研究人员将样品在 150°C下进行等温循环测试。结果显示，经过 50 个循环后，样品的储氢容量保持率为 97%，循环后纳米氢化镁粒径仍保持在 5 nm 左右，没有出现明显的团聚长大。随后，研究人员构建了氢化镁和镁的纳米团簇模型及颗粒模型，模拟计算表明，纳米化导致上述过程的能垒（动力学）和反应能（热力学）都有明显下降，进一步验证了相关实验结果。

该项研究开发了一种超声波驱动的非负载超细纳米氢化镁的制备方法，系统研究了氢化镁超细纳米颗粒的形成过程以及纳米化对氢化镁热力学和动力学性能的影响规律和机制。利用超声波为氢化镁的生成反应提供驱动力，同时结合超声波产生的机械震荡抑制颗粒团聚长大，避免了载体材料的使用，制备的超细纳米氢化镁在室温下有效储氢量可达 6.7 wt%。该制备方法可扩展到其他轻金属氢化物及配位氢化物的纳米化研究，有望推动固态储氢材料研究领域的进一步发展。相关研究成果发表在《*Energy & Environmental Science*》⁹。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据武汉大学新闻编辑]

文章来源：<http://kfy.whu.edu.cn/info/1003/2233.htm>

⁹ Xin Zhang, Yongfeng Liu, Zhuanghe Ren, et al. Realizing 6.7 wt% reversible storage of hydrogen at ambient temperature with non-confined ultrafine magnesium hydride. *Energy & Environmental Science*, 2020, DOI: 10.1039/D0EE03160G

国际瞭望

EPO 和 IEA 发布《全球电池和电力储能技术专利分析》报告

9月22号，欧洲专利局（EPO）和国际能源署（IEA）联合发布《全球电池和电力储能技术创新专利分析》报告¹⁰指出，电池和储能领域的专利申请在过去10年中大幅增长，年增长率为14%，在储能领域中电池专利占据高达90%的份额，创新主要集中在可充电锂离子电池、电子设备和电动汽车领域。电动汽车的发展推动了新型锂离子电池技术的创新，以提高功率输出、耐久性、充放电速度和可回收性。将风能和太阳能等可再生能源整合到电网中的需求也推动了储能技术的进步。报告关键要点如下：

一、电池与电力储能在能源转型中的作用

（1）全球储能技术发展低迷。可持续发展情景下，全球碳排放将从2018年的330亿吨降至2050年的不足100亿吨，在2070年实现净零排放。2020年储能技术发展无法满足可持续发展情景要求，电网级储能发展十年来首次减缓。电动汽车技术发展正步入正轨，未来十年预计持续呈指数增长，2040年充电桩数量将达到目前的100倍。

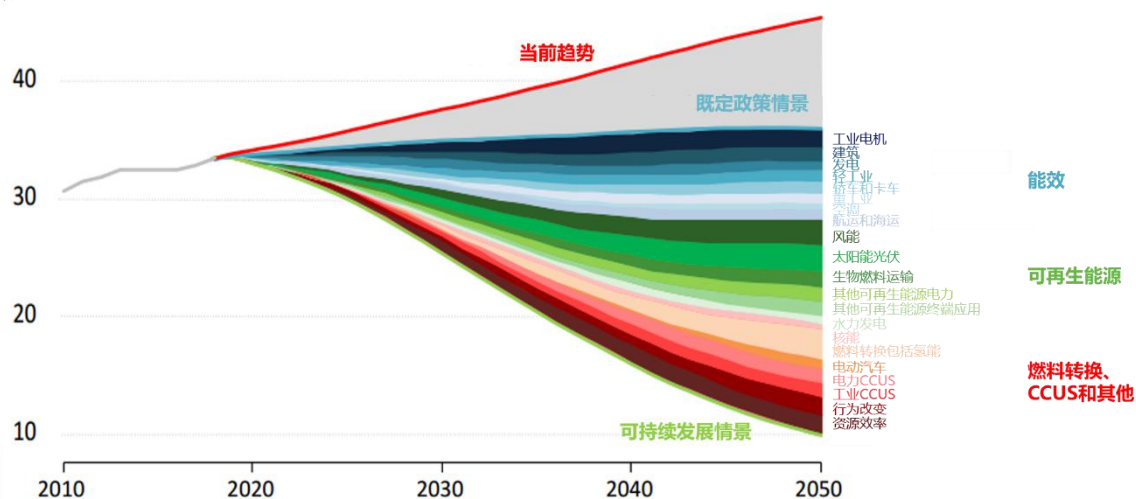


图1 可持续发展情景中 CO₂ 减排技术的贡献（单位：十亿吨 CO₂）

¹⁰ Innovation in Batteries and Electricity Storage.

<https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>

(2) 可持续发展情景下电池和储能技术的部署将急剧扩张。当前，能源转型相关电池和其他储能技术的总需求已接近 200 吉瓦时/年，其中电动汽车领域占总需求的 75% 以上。可持续发展情景下，到 2040 年所有终端应用部门对电池和其他储能设备的需求接近 10 000 吉瓦时。

(3) 电动汽车电池创新有利于储能技术发展。储能未来发展的一个关键因素是：电动汽车技术发展能在多大程度上影响电网规模储能电池。鉴于电动汽车电池的市场规模已经是电网规模电池的 10 倍，创新和降低电动汽车成本的间接影响可能会带来显著的推动作用。目前，约 60% 的电网规模电池采用了镍钴锰酸锂（NMC）混合材料，这是受电动汽车的新兴技术发展推动的。因此，随着供应链向下一代性能更高的混合材料或技术迈进，对电动汽车吸引力下降的技术可能在电网上以较低的成本进行部署。下一代锂离子电池技术将在未来 5-10 年内进入市场，采用镍含量较低的正极材料如镍钴铝酸锂（NMC，镍含量低于 10%）或 NMC 811。虽然能量密度大大提高，但受城市实际交通情况影响，有些电动汽车不一定要达到最高的能量密度，但此类高能量密度材料更有可能满足电力部门的要求。2019 年，由于中国政府提高了电动汽车电池的能量密度要求，导致能量密度相对较低的磷酸铁锂（LFP）电池产能过剩，转而用于电网规模储能。

(4) 电池和其他技术在储能领域的应用迅速扩大。全球储能总装机容量接近 200 吉瓦时，其中 90% 以上为抽水蓄能，而电池占比不到 3%。尽管如此，抽水蓄能和压缩空气储能的进一步应用受到选址的限制。固定式储能对电池的应用正呈现指数级增长。锂离子电池已迅速成为电池主导技术，2018 年其占到除抽水蓄能以外的新型储能技术新增装机容量的 93%。2019 年，大多数储能技术用于住宅、商业和工业部门。根据可持续发展情景，电池储能总装机容量将从 2019

年的 6 吉瓦增至 2040 年的 550 吉瓦。

二、电力储能专利申请主要趋势分析

储能相关技术主要包括四类：电化学储能（即电池）、电磁储能（例如超级电容器）、机械储能（例如抽水蓄能、飞轮储能）和热储能（仅限于储热和回收电能的技术）。本报告中的专利分析是基于国际专利家族概念，每个专利家族都代表一项独特的发明，包括在至少两个国家/经济体提交和公开的同族专利申请。

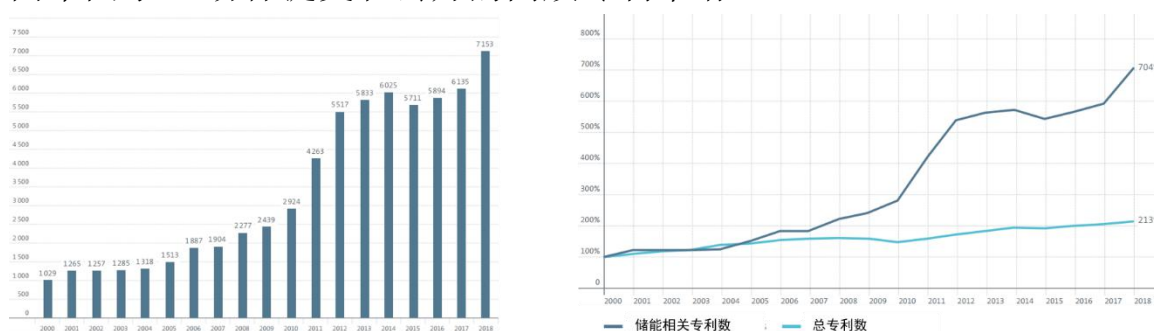


图 2 2000-2018 年储能相关专利申请数量（左图）及储能创新增长趋势（右图，以 2000 年专利数设为基准 100%）

（1）过去十年电力储能技术相关专利申请活动迅速增长。2000-2018 年，全球电力储能技术专利族申请量超过 6.5 万项，呈指数级增长。2005 年以后电力储能相关专利族申请量年均增长 14%，远超所有技术领域专利申请年均增长率（3.5%）。2012 年之前，电力储能相关专利族数量呈指数级增长，随后几年趋于稳定。2018 年再次显著增长，增长率达到 16.6%。总体而言，2018 年电力储能相关专利族年申请量相较 2000 年增至 7 倍，同期所有专利族年申请量仅翻了一番。

（2）电池技术主导电力储能创新。电力储能创新主要由电化学技术（即电池）主导，2018 年电力储能相关专利 80% 以上是电池技术。电磁储能技术居第二，2018 年占有所有电力储能相关专利族数量的 7%，机械储能和热储能分别仅占 3% 和 2%。不同技术的研究基础不同，但 2012 年前所有电力储能技术专利申请增长强劲，与 2000 年相比，电化学（电池）技术专利申请增长超过 400%，机械储能增长

超过 1000%。但 2012 年以后，除电池外，其他技术都停滞不前甚至下降。

(3) 过去十年里电池创新相关专利申请活跃。2000 年以来，电池技术主要由电池单元创新推动。2018 年专利族数量同比增长 14.9%，占有所有电池相关技术专利近 3/4。2005 年以来，锂离子技术一直主导电池技术创新，尤其是便携式电子产品和电动汽车领域。2018 年，锂离子电池专利占电池相关专利总数的 45%。2009 年以后，电池组技术在汽车应用领域发展活跃。尽管汽车领域在过去十年里占据电池应用主导，但其他领域也从中受益，22% 的汽车电池组相关专利也可用于其他两个应用领域。

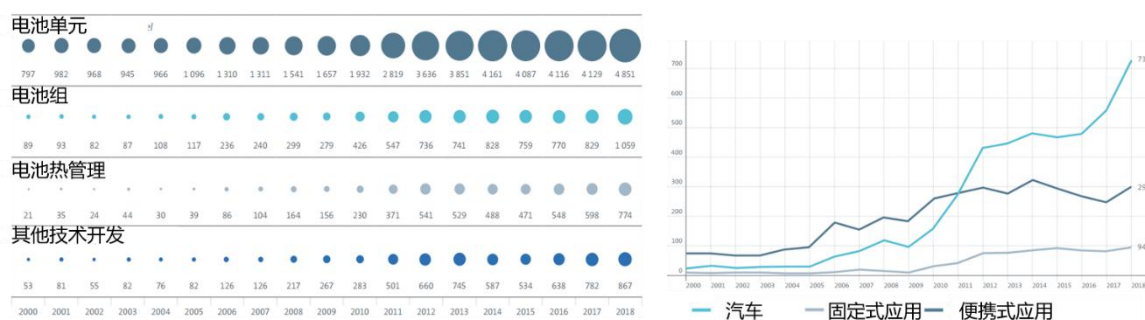


图 3 2000-2018 年电池技术专利族数量（左图，单位：项）及不同应用领域电池组相关专利族数量（右图，单位：项）

三、电池技术专利申请人分析

(1) 亚洲企业在电池技术创新中占领先地位。电池技术创新主要来自亚洲，全球前 10 名申请机构中亚洲企业占 9 个，前 25 名中亚洲企业占 2/3。三星几乎在所有电池技术领域都名列前茅；松下拥有更加多样化和平衡的投资组合，在锂离子和其他电池领域都拥有相对较强的地位（专利族数量占比平均为 7.1%）；中国台湾富士康虽然在电池领域没有很强的影响力，但在电池组终端应用方面显示出强大的技术专长。

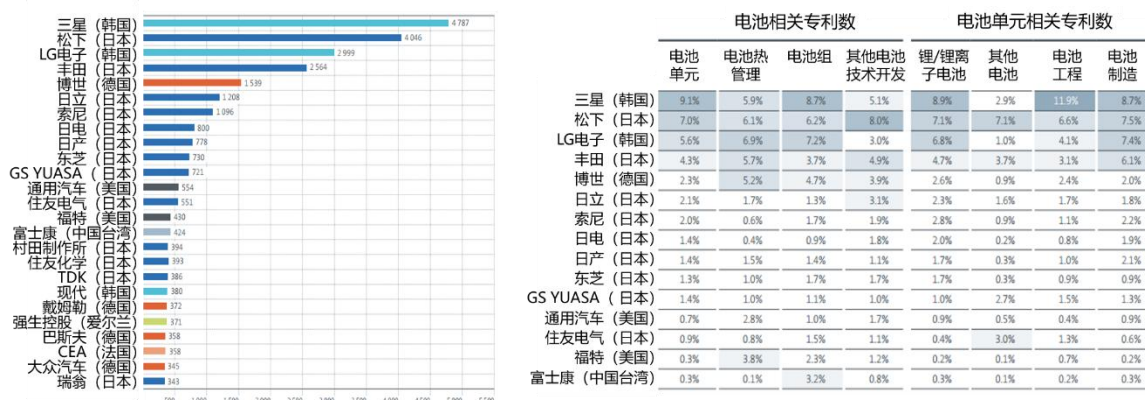


图 4 2000-2018 年电池技术专利前 25 名申请机构（左图）及其技术分布概况（右图）

(2) 电池技术创新主要集中在大型企业。过去五年，排名靠前企业的电池技术创新活力略有下降。电池技术创新仍主要集中在大型企业，2000-2018 年，这些公司在所有电池相关专利中保持约 80% 的份额。2000-2018 年，约 70% 的专利申请来自成立 20 年以上的企业。过去十年，成立 10-20 年的企业提交专利数量占比几乎翻番，2018 年已上升至 18%。

四、电池技术创新区域分析

(1) 全球电池技术创新区域分布。2000-2018 年，日本在电化学储能和电磁储能领域的专利申请最为活跃，占比分别达到 40.9% 和 47.1%，超过排名第二和第三地区的总和。在机械储能和热储能领域，欧洲处于优势地位。2000 年以后，日本的电池专利申请全球领先，但并未转化为市场动力，其仅占有全球 2% 的电动汽车市场。过去十年，中国电池技术创新显著增长，2018 年专利申请数量已超越美国。欧洲电池技术创新主要由德国主导，其电池技术专利申请数量占据欧洲的一半以上。

(2) 日本在电池创新技术中占据绝对优势。韩国和日本在电池创新的专业化方面处于世界领先地位，而美国、中国和欧洲则相对较弱。在欧洲，德国是明显的领跑者。过去五年，虽然欧洲和美国在电池创新的相对贡献有所下降，但它们参与国际合作的比例却有所上升（欧洲从 8.3% 上升到 8.5%，美国从 11.8% 上升到 12.4%）。相比之下，中国在电池创新领域的迅速崛起伴随着中国涉外合作专利数量急

剧下降（13.2%降至 6.6%）。日本和韩国的电池创新主要由大企业主导，美国主要以中小企业和大学/科研机构为主。

五、锂离子电池技术进展

(1) 锂离子电池电极材料技术进展情况。自 2000 年以来，锂离子电池电极材料相关专利申请数量一直稳定增长。2010-2013 年间，从 355 件增加到近 900 件。到 2018 年，约 40% 电极专利均涉及锂离子技术。锂离子电池正极材料一直是发明竞争的焦点，因为它是决定电池的体积能量密度、质量能量密度等性能和降低成本的限制因素。体积能源密度对于便携式设备至关重要；体积能量密度和质量能量密度均对电动汽车极为重要，必须确保与内燃机汽车的性能和成本相当，同时保持车辆重量。具体技术进展如表 1 所示。

表 1 锂离子电池电极材料技术进展

正极材料	主要特点	目前主要应用领域
锂钴氧化物 (LCO)	优异的能量密度和高循环稳定性；高输出电压；由于钴的供应有限，成本高	便携式电子产品
锂镍钴氧化锰 (NMC)	高能量密度和高容量；高输出电压；镍可以提高容量，但化学稳定性低；钴改善了充放电动力学，但价格昂贵，供不应求；锰提高了化学稳定性；从 NMC 811 到 NMC 111，在降低放电能力的同时，获得了更好的热稳定性和容量保留	电动汽车；便携式电子产品
锂镍钴氧化铝 (NCA)	与 NMC 相比能量密度更高；阴极材料含镍量相近，容量大；安全性低于 NMC	电动汽车；便携式电子产品
氧化锂锰尖晶石 (LMO)	容量适中，能量密度适中，安全性好；寿命短	电动工具；医疗器械
磷酸铁锂 (LFP)	比 NMC 具有更高的热稳定性和化学稳定性，输出电压恒定，循环寿命长，价格便宜，无毒；能量密度和容量低于 NMC	固定式发电；电动汽车；电动工具
负极材料	主要特点	目前主要应用领域
氧化钛酸锂 (LTO)	安全性高、使用寿命长、充放电高、循环周期长、无毒；低能量密度、低容量、低输出电压	固定式发电；小型电动汽车
碳/石墨/软碳/硬碳	高压输出，高容量，高能量密度，良好的稳定性，低成本；有限的低温快速充电性能	高能量锂离子电池
锂金属	高能量密度，高容量，高输出电压；由于热失控和枝晶生长引起安全问题；制备昂贵，需要惰性气体	未用于二次锂电池
硅	高容量；由于在循环过程中体积膨胀导致循环稳定性差	与碳基负极少量结合

(2) 锂离子电池正极材料和负极材料专利申请趋势。目前，锂离子电池技术挑战重点已从提高体积能量密度和稳定性转向提高质量能量密度、耐用性、功率输出、充放电速度和可回收性等，正极材料也逐渐转向 NMC 和 LFP。2005 年 LCO 专利申请数量是 NMC 的两倍，但在 2011 年被 NMC 超越，NMC 的专利申请数在 2009-2018 年间增加了 400%。锂离子负极材料专利在过去十年增长了 200%。石墨作为一般性活性材料广泛用于便携式锂离子电池负极。然而，石墨负极也有其局限性，如锂的嵌入能力差。锂合金是目前第二大最常用的负极材料，在 2011-2018 年期间专利数增长了四倍。

(3) 锂离子电池相关专利申请机构所占份额差异明显。2014-2018 年，锂离子电池前 15 位申请机构中，电极材料和固态电池相关专利数占比略低于一般锂离子技术。不同领域申请机构所占份额差异很大（尤其是正极材料），前 15 位机构在主要材料如 NMC（50.6%）和 LMO（44.5%）的专利累计占比很高，而新兴材料如 NCA（27.9%）和 LFP（29%）专利占比相对较小。锂离子技术中 78% 的专利来自于大企业，但中小企业、大学和公共研究机构在新兴技术领域中也扮演着重要角色，如大学和公共研究机构在锂及其合金负极（23%）和 LFP（21%）领域具有优势，中小企业对 NCA（20%）技术拥有一定优势。

六、其他新兴技术进展

(1) 氧化还原液流电池技术发展情况。氧化还原液流电池的创新最近几年才出现，该领域专利申请数量在 2012 年几乎翻了一番，到 2018 年已达到 166 项。2000-2018 年，中小企业、大学和公共研究机构在氧化还原液流电池技术发展中扮演着重要的角色，占该领域所有申请专利的近一半。排名前五的机构在该领域专利总占比为 18%，明显低于一般电池领域（28%）。美国在氧化还原液流电池领域占主导地位，2000-2018 年占该领域专利份额的 1/3，其次是欧洲（23.7%）

和日本（19.2%）。

（2）超级电容器技术发展情况。2000年以来超级电容器有了重大发展，2017年专利申请量增至500多项。早期发展主要集中在静电超级电容器以及混合型、赝电容型和电化学超级电容器。2006年以来，纳米管和石墨烯电极是一个不断增长的创新领域。除静电超级电容器（大型企业专利占比达81.2%），超级电容器的大部分创新来自中小企业和公共研究机构。从超级电容器创新区域来看，日本是明显的领先者。2000-2018年间，所有专利数量中日本几乎占了50%，美国以18.2%的市场份额排名第二。

[中科院武汉文献情报中心 汤匀]

DOE 发布氢能计划发展规划提出研发重点及发展目标

11月12日，美国能源部（DOE）发布《氢能计划发展规划》¹¹，提出了未来十年及更长时期氢能研究、开发和示范的总体战略框架。该方案更新了DOE早在2002年发布的《国家氢能路线图》以及2004年启动的“氢能计划”提出的战略规划，综合考虑了DOE多个办公室先后发布的氢能相关计划文件，如化石燃料办公室的氢能战略、能效和可再生能源办公室的氢能和燃料电池技术多年期研发计划、核能办公室的氢能相关计划、科学办公室的《氢经济基础研究需求》报告等，明确了氢能发展的核心技术领域、需求和挑战以及研发重点，并提出了氢能计划的主要技术经济指标。关键内容如下：

一、“氢能计划”使命及目标

DOE“氢能计划”使命为：研究、开发和验证氢能转化相关技术（包括燃料电池和燃气轮机），并解决机构和市场壁垒，最终实现跨应用领域的广泛部署。该计划将利用多样化的国内资源开发氢能，以确保丰富、可靠且可负担的清洁能源供应。

“氢能计划”设定了氢能发展到2030年的技术和经济指标，主要

¹¹ Energy Department Hydrogen Program Plan.
<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>

包括：①电解槽成本降至 300 美元/千瓦，运行寿命达到 80 000 小时，系统转换效率达到 65%，工业和电力部门用氢价格降至 1 美元/千克，交通部门用氢价格降至 2 美元/千克；②早期市场中交通部门氢气输配成本降至 5 美元/千克，最终扩大的高价值产品市场中氢气输配成本降至 2 美元/千克；③车载储氢系统成本在能量密度 2.2 千瓦时/千克、1.7 千瓦时/升下达到 8 美元/千瓦时，便携式燃料电池电源系统储氢成本在能量密度 1 千瓦时/千克、1.3 千瓦时/升下达到 0.5 美元/千瓦时，储氢罐用高强度碳纤维成本达到 13 美元/千克；④用于长途重型卡车的质子交换膜燃料电池系统成本降至 80 美元/千瓦，运行寿命达到 25 000 小时，用于固定式发电的固体氧化物燃料电池系统成本降至 900 美元/千瓦，运行寿命达到 40 000 小时。

二、氢能系统的技术需求及挑战

1、制氢。该领域的技术需求和挑战为：①开发成本更低、效率更高、更耐用的电解槽；②重整、气化和热解制氢技术的先进设计；③开发利用可再生能源、化石能源和核能的创新制氢技术，包括混合制氢系统以及原料灵活的方法；④开发从水、化石燃料、生物质和废弃物中生产氢气的高效低成本技术；⑤开发低成本和环境友好的碳捕集、利用和封存（CCUS）技术。

2、输运氢。该领域的技术需求和挑战为：①开发成本更低、更可靠的氢气分配和输送系统；②开发氢气分配的先进技术和概念，包括液化和化学氢载体；③氢气输运的通行权和许可，以及降低部署输运氢基础设施的投资风险。

3、储氢。该领域的技术需求和挑战为：①开发低成本储氢系统；②开发更高储氢容量、重量和体积更小的储氢介质；③开发大规模储氢设施，包括现场大量应急供应和地质储氢；④优化储氢策略，将氢气存储设施布置于最终用途附近，以满足吞吐量和动态响应要求，并降低投资成本。

4、氢转化。该领域的技术开发需求和挑战为：①开发可大规模生产的低成本、更耐用、更可靠的燃料电池；②开发以高浓度氢气或纯氢为燃料的涡轮机；③开发和示范大规模混合系统。

5、终端应用和综合能源系统。该领域的技术需求和挑战为：①系统集成、测试和验证，以识别和解决各应用的特有挑战；②终端应用的示范，包括钢铁制造、氨生产以及利用氢气和二氧化碳生产合成燃料的技术；③示范电网集成以验证氢用于储能和电网服务。

6、制造和供应链。该领域的技术需求和挑战为：①标准化制造流程、质量控制和优化制造设计；②增材制造和自动化制造工艺；③可回收和减少废物的设计。

7、安全、规范和标准。该领域的技术需求和挑战为：①适用、统一的规范和标准，用于所有终端应用，包括燃烧（如涡轮机）以及燃料电池（如卡车、船舶和铁路等需大规模加注氢气的重型应用）；②改进安全信息、分享最佳做法和经验教训。

8、教育和专业人员。该领域的技术需求和挑战为：①针对不同利益相关方的教育资源和培训计划，包括应急响应人员、标准规范人员和技术人员（例如，氢及相关技术的操作、维护和处理）；②获得关于氢能相关技术的准确、客观信息。

三、近、中、长期技术开发选项

DOE 基于近年来氢能关键技术的成熟度和预期需求，提出了近、中、长期的技术开发选项，具体包括：

1、近期。①制氢：配备 CCUS 的煤炭、生物质和废弃物气化制氢技术；先进的化石燃料和生物质重整/转化技术；电解制氢技术（低温、高温）。②输运氢：现场制氢配送；气氢长管拖车；液氢槽车。③储氢：高压气态储氢；低温液态储氢。④氢转化：燃气轮机；燃料电池。⑤氢应用：氢制燃料；航空；便携式电源。

2、中期。①输运氢：化学氢载体。②储氢：地质储氢（如洞穴、

枯竭油气藏)。③氢转化：先进燃烧；下一代燃料电池。④氢应用：注入天然气管道；分布式固定电源；交通运输；分布式燃料电池热电联产；工业和化学过程；国防、安全和后勤应用。

3、长期。①制氢：先进生物/微生物制氢；先进热/光电化学水解制氢。②输运氢：大规模管道运输和配送。③储氢：基于材料的储氢技术。④氢转化：燃料电池与燃烧混合系统；可逆燃料电池。⑤氢应用：公用事业系统；综合能源系统。

四、关键技术领域研发及示范重点

1、制氢

该领域的研发和示范重点事项包括：①开发减少铂系金属含量的新型催化剂和电催化剂；②开发分布式和大容量电力系统的模块式气化和电解系统；③开发低成本、耐用的膜和分离材料；④开发新型、耐用、低成本的热化学和光电化学材料；⑤加速应力试验并探索退化机制以提高耐久性；⑥降低自热重整等重整技术的资金成本；⑦改进辅助系统（BOP）组件和子系统，如电力电子、净化和热气体净化；⑧通过组件设计和材料集成实现大规模生产和制造；⑨包括电力和氢的多联产可逆燃料电池系统；⑩系统设计、混合和优化，包括过程强化。

2、输运氢

该领域的研发和示范重点事项包括：①材料在高压或低温下与氢的相容性；②氢液化的创新技术；③用于氢气储存、运输和释放的载体材料和催化剂；④用于氢气低成本分配的创新组件（如压缩机、储氢罐、加氢机、喷嘴等）。

3、储氢

该领域的研发和示范重点事项包括：①降低材料、组件和系统成本；②开发用于高压罐的低成本高强度碳纤维；③开发与氢气相容的耐久、安全性好的材料；④低温液态储氢和冷/低温压缩储氢的研究、

开发和示范；⑤发现和优化储氢材料，以满足重量、体积、动力学和其他性能要求；⑥利用化学氢载体优化储氢效率；⑦以化学载体形式储氢用于氢燃气轮机；⑧地质储氢的识别、评估和论证；⑨氢和氢载体出口的系统分析；⑩研究可广泛部署的储氢技术和终端用途的优化目标；11 研发用于安全、高效和稳定储氢的传感器和其他技术。

4、氢转化

(1) 氢燃烧方面，重点关注如下事项：①在简单循环和组合循环中实现燃料中更高的氢浓度（最高达 100%）；②研究燃烧行为并优化低 NO_x 燃烧的组件设计；③应用和开发先进计算流体动力学；④开发先进的燃烧室制造技术；⑤开发新材料、涂层和冷却方案；⑥优化转换效率；⑦提高耐用性和寿命，降低成本，包括运维成本；⑧开发系统优化和控制方案；⑨评估和缓解水分对传热和陶瓷退化的影响；⑩开发和测试氢燃烧改装组件；11 实现碳中性燃料（氨气、乙醇蒸汽）的燃烧。

(2) 质子交换膜燃料电池方面，重点关注如下事项：①通过材料研发，降低铂族金属催化剂的负载量；②开发耐高温、低成本、耐用膜材料；③改进组件设计和材料集成，以优化可制造和可扩展的膜电极组件的电极结构；④开发自供燃料的燃料电池所用碳中性燃料的内部重整技术；⑤加速压力测试，探索老化机理以及缓解方法；⑥改进 BOP 组件，包括压缩机和电力电子设备；⑦开发适用于多种重型车辆的标准化、模块化堆栈和系统；⑧改进混合和优化系统的设计。

(3) 固体氧化物燃料电池方面，重点关注如下事项：①研发材料以降低成本并解决高温运行相关问题；②管理燃料电池电堆中的热量和气体流量；③解决堆栈和 BOP 系统的集成、控制和优化，以实现负荷跟踪和模块化应用；④改进 BOP 组件，包括压缩机和电力电子设备；⑤开发标准化、模块化堆栈；⑥进一步研究杂质对材料和性能的影响；⑦系统设计、混合和优化，包括可逆燃料电池。

5、终端应用

该领域的研发和示范重点事项包括：①为氢能的特定用途制定严格的目标；②解决各终端应用中的材料兼容性问题；③降低成本，提高工业规模电解槽、燃料电池系统、燃气轮机和发动机以及混合动力系统的耐用性和效率；④组件和系统级的集成和优化，包括 BOP 系统和组件；⑤集成系统的优化控制，包括网络安全；⑥制造和规模扩大，包括过程强化；⑦协调规范和标准，包括氢气加注协议；⑧开发新的氢能应用的容量扩展模型，以确定其经济性。

[中科院武汉文献情报中心 岳芳]

美国能源部《储能大挑战路线图》提出五大重点领域行动

12月21日，美国能源部（DOE）发布《储能大挑战路线图》¹²，提出将在“技术开发，制造和供应链，技术转化，政策与评估，劳动力培养”五大重点领域开展行动，以建立美国在储能领域的领导地位。作为 DOE 第一份综合性储能战略，该路线图除了进一步推进储能基础研究外，还强调加速储能相关技术从实验室向市场的转化，重点关注增强美国国内具有竞争力的大规模制造能力，并确保供应链的安全性。路线图提出：到 2030 年，美国国内的储能技术及设备的开发制造能力将能够满足美国市场所有需求，无需依靠国外来源。关键要点如下：

一、“储能大挑战”路线图背景

2017-2020 年期间，DOE 在储能相关技术研发投入了 16 亿美元资金，平均每年 4 亿美元。虽然储能相关各业务部门已制定了各自的发展目标与方向，但 DOE 尚未提出解决储能问题的全面战略。为此，DOE 于 2020 年 1 月推出“储能大挑战”计划，旨在加速下一代储能技术的开发、商业化和应用，维持美国在储能领域的全球领导地位。

“储能大挑战”路线图的使命是成为全球储能创新、制造和应用的

¹² Department of Energy Releases Energy Storage Grand Challenge Roadmap.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-releases-energy-storage-grand-challenge-roadmap>

领导者，愿景是通过储能技术使美国乃至全球能源系统更具弹性、灵活性、可承受性和安全性。

二、路线图是基于“美国创新、美国制造和全球部署”目标的一个全部门战略

路线图设定了“美国创新、美国制造和全球部署”三大战略目标，加速一系列储能技术的创新。DOE 确定的成本目标，包括：

(1) 到 2030 年，长期固定式储能的平均成本降至 0.05 美元/千瓦时，比 2020 年降低 90%。实现这一目标将推动储能在一系列领域的商业应用，包括：满足高峰需求期间的负荷；保障电网能够满足电动汽车快速充电；确保关键基础设施（包括信息通信技术）的可靠性。

(2) 到 2030 年，300 英里续航里程电动汽车的电池组制造成本降至 80 美元/千瓦时，与目前 143 美元/千瓦时的锂离子电池成本相比降低 44%。实现这一目标将使电动汽车具有成本竞争力，同时有利于固定式储能电池的技术发展。

三、为实现“美国创新、美国制造和全球部署”三大目标，路线图提出在五个领域开展重要行动

为实现 DOE 提出的“美国创新、美国制造和全球部署”三大战略目标，“储能大挑战”路线图将在以下五个领域开展行动，包括：

(1) **技术开发：**使 DOE 当前和未来的储能研发活动围绕以用户为中心和维持长期领导地位的目标进行。具体包括：①开发一组利益相关方案例，识别并更新 2030 年及以后的储能技术性能和成本目标；②确定能在 2030 年前实现成本目标的研发路径和储能技术组合；③开发标准化的度量标准，以促进技术成本和性能评估；④支持美国创新生态系统（包括国家实验室、大学、初创企业）所有储能技术从实验室到市场转化的路径。

(2) **制造和供应链：**为美国储能制造业发展技术、方法和策略，以支持和加强美国在创新和持续规模制造的领导地位。包括：①深入

理解各种储能技术生产和制造中的技术障碍，识别关键技术指标；②支持创新，降低制造成本，克服技术壁垒；③加速新兴制造工艺工业化推广，加强美国在商业规模测试/验证创新技术的能力；④制定系统设计和测试标准化条例，简化新兴储能技术制造创新的应用过程；⑤加深理解并追求创新，加强国内供应链（包括与盟友和合作伙伴）合作，提高国内供应链弹性，推进关键材料采购的多样化，改善回收利用过程，减少对国外原材料和零部件的依赖；⑥建立国内电池制造生态圈。

表 1 不同储能技术的制造挑战

	先进加工和回收，使关键材料采购多样化	降低制造成本			提高技术性能			扩大生产规模	制定标准化系统设计和测试协议
		过滤膜	先进阳极、阴极、电解液	安全壳结构和材料	电槽	先进储能材料	双极板		
锂离子电	√		√					√	√
其他化学	√	√	√			√			√
液流电池	√	√	√	√			√		√
机械储能						√			√
化学储能	√	√	√		√	√	√		√
热储能				√		√		√	√

(3) 技术转化：通过现场验证、示范项目、公私合作、融资业务模式开发以及高质量市场数据的传播，来确保 DOE 研发成果向国内市场转化。具体包括：①加强外部合作伙伴对 DOE 国家实验室专家、设备和知识产权的获取能力，以加速技术创新推向市场进程；②开发全球化项目进行技术测试，生成用于技术验证和标准化评估的数据，降低技术市场转化风险；③寻求行业合作和跨部门参与，将私营部门与政府联系起来，解决储能技术的融资风险；④提供行业和市场分析，支持投资、市场开拓和决策活动；⑤扩大数据收集和分析能力，将 DOE 资助项目与商业机遇联系起来。

(4) 政策与评估：提供数据、工具和分析方法，以支持政策决策并最大程度地发挥储能的价值。具体包括：①识别和评估联邦、州和地方政府的政策法规，对固定式和交通运输领域相关储能技术的部署、运行和价值有重大影响；②开发最前沿的数据、工具和分析系统，解

决政策评估问题；③制定一个协调、系统的客户参与计划，向利益相关方交付开发的储能技术产品；④帮助利益相关方做出明智决定，最大化能源系统和终端用户储能技术的效用和价值。

(5) 劳动力培养：培养研究、开发、设计、制造和运营储能系统的专业队伍。具体包括：①通过在“储能大挑战”框架下增加利益相关方的投入，加强和扩大现有计划的相关性；②对所有教育层次和目标人群进行需求评估和技能评估；③为员工发展提供创新机会，以工会为合作对象，促进应对更广泛的储能技术挑战，满足劳动力发展需求。

[中科院武汉文献情报中心 汤匀]

欧洲电池技术创新平台发布 2030 战略研究议程

12月15日，欧洲电池技术创新平台“电池欧洲”（ETIP Batteries Europe）发布《电池战略研究议程》¹³，明确了到2030年欧洲电池技术研究和创新优先事项。ETIP Batteries Europe 由欧盟委员会在“战略能源技术规划”（SET-Plan）框架下于2019年创建，汇集了工业界、学术界和行业协会的代表，旨在推进电池价值链相关研究和创新行动的实施，加速建立具有全球竞争力的欧洲电池产业。该议程从电池应用、电池制造与材料、原材料循环经济、欧洲电池竞争优势四方面提出了未来十年的研究主题及应达到的关键绩效指标，关键内容如下：

一、电池应用

1、交通应用

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：①电池系统，包括电池单元和系统设计及相关制造工艺，需考虑机械、电气和热等方面；②电池管理，基于知识和数据的电池管理研究，考虑算法、软件和硬件，包括传感器集成、标准化、与车辆内/外系统的互操作性以及车辆

¹³Strategic Research Agenda for batteries.

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/batteries_europe_strategic_research_agenda_december_2020_1.pdf

到电网技术相关研究；③用于电池设计、制造和管理的数字孪生技术；④开发评估电池性能和安全性的新方法和工具，包括结合物理和虚拟测试的方法。

2、固定式储能

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

(1) 通过创新的技术和组件降低固定式储能电池的成本，改进循环寿命，以确保最佳性能。该主题研究将改进电池能量密度、功率密度、循环和周期寿命、放电深度、充放电倍率等，并降低资本支出、运营支出等，还将进行再利用和再循环设计。**关键绩效指标：**固定式储能电池的完全等效循环寿命增至 15000 个循环或 30 年；充放电倍率达到 8C/8C；自放电率达到 0.1%荷电状态/月；放电持续时间超过 10 小时。**预算：**5000 万欧元。

(2) 提高固定式储能系统安全性的技术、方法和工具。该主题研究将解决固定式储能电池系统尺寸和安装相关的安全性问题，如通过组件和系统设计来增强安全性，或通过先进建模进行运行监控以实现故障主动预防和预测。**关键绩效指标：**安全相关的系统维护和运行的运营成本下降 20%；故障报告减少 90%；建立一套监管框架和技术标准。**预算：**5000 万欧元。

(3) 开放式和可互操作的先进电池管理系统。该主题研究将开发可开放访问的电池管理系统，并对数据和格式进行标准化，有助于对电池寿命进行可靠预测并评估第二生命周期，同时将通过可互操作的先进电池管理系统促进系统的集成。**关键绩效指标：**循环寿命大于 15000 次；促进对电池的大规模部署，增加电池的再利用；成本降低 30%。**预算：**3000 万欧元。

(4) 互操作性、数字孪生和多服务模式。该主题研究将通过增强互操作性降低电池成本，更有效地实现机对机协作，通过数字孪生进行仿真模拟以将电池储能系统和混合储能系统纳入电网规划中，以及

开发储能系统的多种服务。**关键绩效指标**：到 2024 年互操作性达到 3 级；到 2030 年平准化储能成本（深度放电循环下）低于 0.01 欧元/千瓦时/循环。**预算**：5000 万欧元。

(5) 电动汽车电池可持续性以及二次应用于固定式储能。该主题将解决电池二次再利用的耐久性、性能以及老化带来的安全风险，示范有效的商业模式，开发低成本的技术和生态设计用于电池拆卸和调整。**关键绩效指标**：到 2030 年可二次使用的电池占比达到 20%；所有类型电池的回收效率均得到提高。**预算**：5000 万欧元。

(6) 中长期储能。该主题将开发经济高效的系统和技术，用于中期（大于 5 小时）至长期（几星期至几个月）储能，以实现备用电源、市场套利和可再生能源电力的转移。**关键绩效指标**：中期储能自放电率低于 2%/月；长期储能自放电率低于 0.5%/月；循环寿命大于 15000 次；到 2030 年平准化储能成本低于 0.01 欧元/千瓦时/循环。**预算**：6000 万欧元。

二、电池制造与材料

1、电池制造

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

(1) 创新电池单元组件的设计及制造工艺研究。该主题将通过改进电池设计和配置，在电池单元中应用可改善性能的新型先进材料和组件，同时在电池设计阶段考虑增强安全性和可回收性。**关键绩效指标**：电池能量密度和安全性提高 40%；通过在电池单元中减少使用非活性材料，使每千瓦时的碳强度降低 25%；与当前锂电池生产相比，电池生产成本至少降低 20%。**预算**：9000 万欧元。

(2) 电池单元设计的数字化。该主题将数字化技术用于开发先进多尺度模型、电化学以及老化机理研究，以缩短电池开发设计时间和成本，并减少对环境的影响。**关键绩效指标**：电池单元开发成本至少下降 20%；实验次数减少 1/5 至 1/3。**预算**：5000 万欧元。

(3) 制造设备和工艺创新。该主题将改进制造能力，降低材料损耗，提高能效和产品一致性，还将开发适用于新型电池（如固态电池）的新工艺以及循环和数字化概念。**关键绩效指标：**与当前锂离子电池最先进生产水平相比，电池生产率提高 10%-15%，电池单元整体生产效率提高 90%以上；通过改造将设备资本投入成本降低 8000 万欧元/吉瓦时；能耗降低 25%。**预算：**1 亿欧元。

(4) 工艺集成和工厂数字化运营。该主题将通过数据分析以改进生产线，并进行预防性故障排除。在生产线层面将应用机器学习和人工智能技术，在工厂层面将整合能量流和材料流形成供应生态系统。**关键绩效指标：**生产率提高 10%-15%；与当前锂离子电池生产相比，能耗降低 25%。**预算：**6000 万欧元。

2、电池先进材料

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

(1) 车用第 3 代¹⁴锂离子电池的研究与创新。该主题将开发可实现更高能量密度和功率密度的先进材料，用于更大容量和/或更高电压下运行，将重点关注调整正极和负极材料、更稳定的电解质材料、粘结剂等。**关键绩效指标：**质量及体积能量密度分别达到 350-400 瓦时/千克和 750-1000 瓦时/升；可在 4.7 伏以上的高电压下运行；在高容量或高电压下可深度循环超过 3000 次或 2000 次；电堆成本低于 100 欧元/千瓦时。**计划上市时间及预算：**2025 年以后，1 亿欧元。

(2) 车用第 4 代¹⁵锂电池的研究与创新。该主题将开发固态电解质以及正负极材料，实现更高的热稳定性和电化学稳定性以及更高能量/功率密度，实现快速充电、可循环性并提高安全性。材料开发范围从传统材料到锂金属基负极和高电压正极材料。**关键绩效指标：**4a 代

¹⁴ 欧盟对电池进行了分类，第 3 代锂离子电池为优化的锂离子电池，包括：3a 代，正极材料为 622 型或 811 型镍钴锰酸锂三元材料（NMC622 或 NMC811），负极材料为碳（石墨）+硅（含量 5%-10%）；3b 代，正极材料为高能锂镍锰钴氧化物（HE-NMC）或高电压尖晶石（HVS），负极材料为硅/碳（Si/C）。

¹⁵ 第 4 代锂离子电池包括 4a、4b 和 4c 代。其中，第 4a 代为固态锂离子电池，正极材料为镍钴锰酸锂三元材料（NMC），负极材料为 Si/C；第 4b 代为固态锂金属电池，正极材料为 NMC，负极材料为锂金属；第 4c 代为先进固态电池，正极材料为 HE-NMC 或 HVS，负极材料为锂金属

锂离子电池单元质量能量密度超过 400 瓦时/千克，体积能量密度超过 1000 瓦时/升；4b 和 4c 代锂电池单元体积能量密度分别超过 800 瓦时/升和 500 瓦时/升；循环寿命达到 3000 次；充电倍率达到 3-5C；电池堆成本降至 75 欧元/千瓦时以下。计划上市时间及预算：2030 年以后，2 亿欧元。

(3) 固定式储能用锂离子电池的研究与创新。该主题将开发正负极、电解质、粘结剂等材料以确保固定式储能锂离子电池可用于公用事业规模（超过 100 兆瓦）和商业高功率应用（低于 100 兆瓦），通过多种材料策略提高公用事业规模应用的导电率、能量密度、寿命以及高功率应用的导电率和容量。**关键绩效指标：**商业高功率应用中电池体积能量密度超过 500 瓦时/升，寿命超过 6000 次循环，充电倍率达到 5-6C；公用事业规模应用中电池体积能量密度超过 500 瓦时/升，寿命超过 10000 次循环，成本低于 0.05 欧元/千瓦时/循环。计划上市时间及预算：2030 年，1 亿欧元。

(4) 电动汽车轻质先进材料的研究与创新。该主题将开发基于玻璃纤维、碳纤维、新型塑料、高强度钢材的新型轻质材料，并示范材料用于汽车结构和功能部件的高强度重量比性能。**关键绩效指标：**电动汽车车身重量减轻 40%；电池包重量减轻 70%；轻质材料占电动汽车材料的 65%；传动系统成本降低 30%，耐久性提高 30%；行驶里程达到 700 公里；可回收性达到 99%。计划上市时间及预算：2025 年后，0.5 亿欧元。

(5) 实现超快充电的先进材料研究与创新。该主题将开发各种材料体系，实现用户友好、安全可靠、功率传输能力超过 350 千瓦的超快速充电站。**关键绩效指标：**充电时间低于 10 分钟；功率传输能力超过 350 千瓦；充电过程中欧姆电阻导致的能量损失低于 2%。计划上市时间及预算：2025 年后，0.5 亿欧元。

三、原材料循环经济

1、电池一次及二次原材料的可持续加工

到 2030 年关键绩效指标： 电池原材料加工中无液体排放；石墨、电池化学和正极活性材料前驱体加工能效比当前最先进水平提升 25%；锂提取及加工过程碳排放比当前最先进水平降低 50%；欧洲电池制造商的原料中，25%的碳酸锂当量由欧洲自身供应。

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

(1) 原材料来源、可持续性和可追溯性。 该主题将开发协调和直接的方式从全球供应链中获得原材料。**短期（2021-2025 年）优先事项：** 开发评估成员国原材料资源/储量的通用方法；确定从欧盟以外地区获取原材料的可持续性要求；全球供应链的可靠采购和可追溯性；开发和评估跟踪和标记技术、数字账本技术。**中期（2026-2030 年）优先事项：** 在整个生命周期内对材料进行跟踪和标记。

(2) 电池原料的可持续提取和精炼。 该主题将开发锂、镍、钴、锰和石墨的加工方案，用于国内和进口原料。**短期（2021-2025 年）优先事项：** 可持续锂价值链解决方案；开发正极活性材料前驱体可持续加工工艺，替代当前工艺；电池化学和正极活性材料前驱体加工中无液体排放；用于电池金属浸出和提取的新型可回收试剂；将欧洲的石墨生产整合到电池生产中；开发协同加工和工艺集成的新业务模式；开发新型冶炼和矿渣工程技术，以解决冶炼过程中镍和钴的损失；将加工流程建模与针对单个主要流程的环境影响评估相结合。**中期（2026-2030 年）优先事项：** 从工业或城市废物等新来源中回收金属和化学品；开发经济可行的锰回收工艺；合成石墨生产中石油基原料的替代；开发二次产品回收的通用流程；在电池原料加工装置和/或矿山中替代化石燃料并使用智能和/或可再生能源解决方案；开发新的硅生产方法；使用多孔硅等新型策略/材料制造富硅负极（负极密度超过 1200 毫安时/克）。

(3) 原材料生命周期评估和材料流分析。 该主题将通过新型、整

体的电池循环定量工具，增强环境可持续性。**短期（2021-2025年）优先事项：**原材料生命周期数据的开放存取；电池生态标签；在早期设计过程中进行生命周期评估；原材料流分析；可靠的原材料（包括化学品和前驱体）生命周期信息；可靠的回收材料生命周期信息数据；全面可持续性评估；评估一次材料和二次材料的能耗、成本及其他影响。**中期（2026-2030年）优先事项：**采矿的区域生命周期评估、生命周期数据和下一代电池生命周期评估；社会生命周期评估方法在电池价值链中的开发和应用，尤其是原材料相关研究。

2、回收

关键绩效指标：①电池回收，到2025年便携式电池回收率达到55%，2030年达到65%，工业和车用电池回收率达到100%；②电池材料回收，到2030年电池材料回收率超过60%，锂离子电池材料回收率钴>95%、镍>95%、锂>70%、铜>95%。

未来十年该领域将主要进行如下主题研究：

（1）电池收集、反向物流、分选和拆解。该主题将开发综合性技术，以安全有效地处理不断增多的废弃电池，最终进入回收流程。**短期（2021-2025年）优先事项：**研发电池健康评估新技术和新设备；研发产品二次利用和废物回收的标准化诊断协议和界限标准；开发标准化、经济高效的储存和运输容器，配备可视和热负荷监测系统，必要时还配备惰性气体；研发配备能量回收系统的放电技术和装置；开发标准化电池标签系统并探索与电池信息数据库集成；研发自动化电池分选和拆解技术。**中期（2026-2030年）优先事项：**可持续循环利用设计；模块化自动拆解技术；电池拆卸全过程的风险和安全性研究；特殊材料的分选；装配方法。

（2）冶金回收工艺、工业集成和基于二次材料的前驱体。该主题将对电池进行有效加工，以尽可能低的环境足迹和成本回收有价值（或有害）的原材料。**短期（2021-2025年）优先事项：**目前正大规模

模生产的锂离子电池和镍氢电池的回收；建立可行的整体回收流程，以有效利用在未来 10 年内报废的大量汽车电池废料以及生产废料；电解液、隔膜和电极粘结剂等非金属元素的下游循环或安全处理；进一步开发冶金工具和建模，以对替代技术方案进行技术经济性比较；制定所有回收工艺装置的安全规程；减少回收过程对环境的影响；实现工业闭环，将制造过程的低价值化学品投入电池制造中。**中期（2026-2030 年）优先事项：**开发集中、集成和自动化闭环过程；作为替代方案，开发用于电池废料灵活处理的分散式（本地或移动式）冶金处理装置，以最大限度地减少运输过程；探索直接回收电池材料和组件的方法；探索包含非金属元素回收的电池全材料回收技术；新工艺概念的试点。

四、欧洲电池竞争优势

该领域旨在基于对电池价值链的深入研究，实现新概念前沿电池技术开发的飞跃，以研发低成本、可持续和安全的高性能电池，使欧洲在电池生产和部署方面处于领先地位。因此，未来十年将需要对如下电池技术主题进行研发：

（1）对技术成熟度（TRL）超过 2 级的电池技术进行改进。主要包括：①超越第 4 代电池的锂金属电池（TRL 为 2-4 级），采用创新的高电压（大于 4.8 伏）/高容量（大于 500 毫安/克）正极和固态电解质，实现较高能量密度和完全可回收性；②锌基二次电池（TRL 为 2-6 级），实现更绿色、安全的储能；③使用低成本电解液的钠离子电池（TRL 为 2-3 级），用于无锂储能；④更绿色的液流电池（TRL 为 3-6 级），使用低成本活性材料（无关键原材料），具备更高能量密度。

（2）对技术成熟度 1-2 级的电池概念进行基础研究，以开发使用高可用性金属的新型电池。主要包括：①有机电池（TRL 为 1-3 级），包括液流电池；②从钠开始到多价离子金属（除锌以外）的金属电池（TRL 为 1 级）；③基于阴离子穿梭的电池（TRL 为 1 级）；④基于

活性金属如钠、钾、铝、锌等的高功率一次再生电池（TRL 为 1-2 级），用于季节/年度级的电化学储能。

[中科院武汉文献情报中心 岳芳]

牛津大学首次实现对钙钛矿薄膜的原子尺度表征

多晶杂化金属卤化物钙钛矿是高效光伏应用的良好材料，但其出色性能背后的原理机制还没有完全明了。因此亟需利用先进成像技术实现对多晶杂化金属卤化物钙钛矿薄膜纳米（甚至原子）尺度的高分辨表征，以探明其潜在的工作机制，为钙钛矿太阳能电池技术的进一步发展提供科学理论依据。

由牛津大学 Laura M. Herz 教授课题组牵头的联合研究团队利用低剂量低角度环形暗场（LAADF）扫描透射显微镜（STEM）成像技术，首次实现了对甲脒碘化铅（FAPbI₃）钙钛矿薄膜原子尺度的高分辨成像，系统观测研究了薄膜的晶界、缺陷、分解等形成过程和机理，为人们深入理解钙钛矿电池工作机制积累了关键的理论知识。由于多晶有机无机杂化金属卤化物钙钛矿薄膜中含有有机成分，因此其对电子束的能量较为敏感，传统的透射电镜电子束能量过高会破坏钙钛矿相结构。为此研究人员利用先进的低电子辐射剂量的 LAADF-STEM 成像系统来观测 FAPbI₃ 薄膜微观结构，低分辨率的透射电镜图片显示薄膜为单一的立方相结构，而高分辨率的图像显示薄膜晶格具有择优的[001]取向，即沿着[001]轴方向呈现出有序的排列。通过对薄膜长时间观察，研究发现成像系统的电子束辐照会导致 FA⁺离子的损失，这导致薄膜在成像的最初阶段钙钛矿结构转变为部分 FA⁺耗尽但有序的钙钛矿晶格，在电镜图像中表现为有序的明暗相间方格图案。成像图片观察到的中间方格图案就是由最初随机的、电子束诱导的 FA⁺损失触发的，随后是 FA⁺离子的重新排序。这个中间结构的发现解释了为什么在偏离化学计量情况下钙钛矿可以保持其钙钛矿结构，

从而保障了钙钛矿薄膜的优异光电化学性质。而进一步延长成像时间则电子束会导致预期钙钛矿组分分解，形成分解产物碘化铅（ PbI_2 ）。研究人员进一步研究了杂化钙钛矿膜内部界面上的原子排列规律发现：在杂化钙钛矿膜中过量的 PbI_2 与 FAPbI_3 晶格无缝地交织在一起，并且可以从其本体六方结构变形以形成相干过渡边界，表现出较低的晶格失配和应变，即 PbI_2 结构区域几乎完全跟随周围钙钛矿的结构和取向，这表明 PbI_2 可能是钙钛矿的生长种子。上述实验结果很好地解释了目前实验中普遍存在的现象，即过量 PbI_2 的存在往往不影响钙钛矿太阳能电池的性能。进一步观察发现钙钛矿薄膜这种有序的晶格结构一直延伸到薄膜的晶界处，而晶界就没有择优取向。最后，研究人员研究了 FAPbI_3 晶格中缺陷、位错和堆垛层错的性质。发现位错沿垂直于其滑移面的方向分离，在 Pb-I 子晶格上以空位形式存在的对准点缺陷，和对应于半个单元格移位的叠加，将 Pb-I 序列与 I 序列列连接而不是与 FA^+ 列连接。

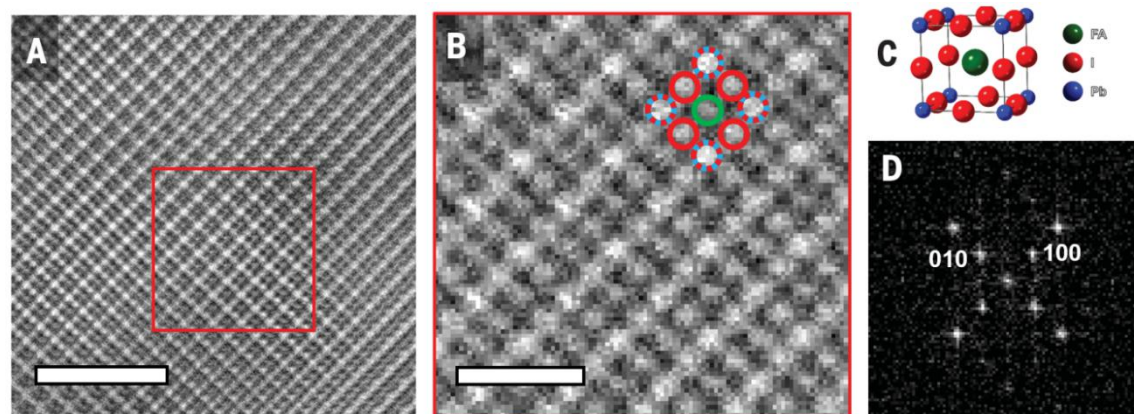


图 1 FAPbI_3 钙钛矿薄膜微观结构 LAADF-STEM 表征图谱

该项研究利用低剂量低角度环形暗场扫描透射显微镜（LAADF-STEM）成像技术，首次实现了原子尺度对钙钛矿微观结构观察，揭示了薄膜的晶界、缺陷、分解等形成过程和机理，为设计开发高性能的钙钛矿太阳能电池奠定了关键理论知识。相关研究成果发表在《*Science*》¹⁶。

¹⁶ Mathias Uller Rothmann, Judy S. Kim, Juliane Borchert, et al. Atomic-scale microstructure of metal halide perovskite. *Science*, 2020, DOI: 10.1126/science.abb5940

[中科院武汉文献情报中心 郭楷模]

双金属氧化物催化剂助力甲烷高效催化转化

将甲烷（ CH_4 ）催化转化为液体燃料（如甲醇、丙醇等），不仅有助于应对温室气体效应，还有利于解决能源问题。然而，由于甲烷中的碳-氢（C-H）键键能较高，室温下不易氧化成甲醇（反应动力学缓慢）。因此，开发室温下的高效低成本催化剂是该领域的研究重点。路易斯安那大学拉法叶分校 Xiao-Dong Zhou 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计开发了一种胶囊状的双金属氧化物催化剂，其独特的催化剂结构和电子转移路径，一方面降低了甲烷解离能，另一方面提升了电子的转移速率，从而增强了室温下催化转化甲烷的活性，在 13.35 mA/cm^2 催化电流密度下，甲烷高效转化为丙醇的产率超过 56%，且可以稳定运行 40 余小时。

相关研究表明，氧化锆（ ZrO_2 ）具有丰富的 Lewis 酸活性中心和电子可接受性，对 CO_3^{2-} 具有显著的吸附能力。一些过渡金属氧化物（TMO）如氧化镍（ NiO ）和氧化钴（ Co_3O_4 ）等，可以掺杂到 ZrO_2 中形成 TMO/ ZrO_2 复合材料，在室温

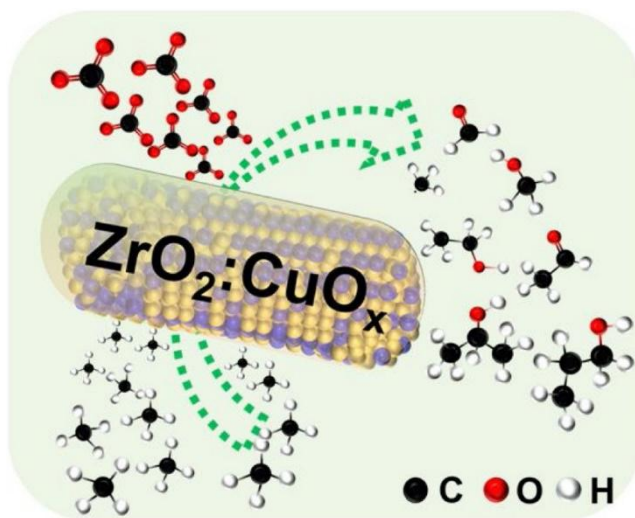


图 1 $\text{ZrO}_2:\text{CuO}_x$ 催化剂

下显示出甲烷氧化的潜力。与 NiO 和 Co_3O_4 相比，铜基催化剂在室温下催化 C1 反应体系形成液态有机物时具有较高的活性和长期耐久性。此外，其对 CH_4 和甲醇也具有有良好的吸附性能。为此，研究人员通过一步水热法制备了 $\text{ZrO}_2:\text{CuO}_x$ 复合材料。X 射线衍射表征显示，材料衍射峰对应于 ZrO_2 、 Cu_2O 和 CuO 的相关特征峰。透射电镜测试

发现，制备的复合材料存在两套晶格常数，其中 0.369 nm、0.261 nm 和 0.187 nm，分别对应于 ZrO_2 的 (110)、(020) 和 (022) 晶面；0.248 nm 对应于铜基氧化物的 (111) 面。且 ZrO_2 纳米粒子均匀地生长在 CuO_x 纳米杆周围形成类似胶囊的形貌。随后通过三电极法，在 0.5 mol 的碳酸盐电解液中对比研究 $\text{ZrO}_2:\text{CuO}_x$ 、 ZrO_2 和 CuO_x 催化剂的催化活性，实验结果显示， $\text{ZrO}_2:\text{CuO}_x$ 催化电流密度为 13.35 mA/cm^2 ，分别是 ZrO_2 (1.27 mA/cm^2) 和 CuO_x (1.85 mA/cm^2) 的 10 倍和 7 倍，且三者中 $\text{ZrO}_2:\text{CuO}_x$ 的 Tafel 斜率最小 (21 mV/dec)，因此表现出更强的催化活性、更快的反应动力学。反应产物检测显示，反应 18 h 后收集到大量的 1-丙醇 ($2105.8 \text{ }\mu\text{g/mL}$) 和 2-丙醇 ($2084.8 \text{ }\mu\text{g/mL}$) 作为主要的醇产物，其生产效率 $>56\%$ ，且整个催化反应能够稳定运行 40 小时而几乎没有性能衰退，表现出了优异的稳定性。密度泛函理论计算表明，催化活性增强的主要原因是，独特的催化剂结构形成了稳定的 $\text{ZrO}_2/\text{CuO}_x$ 二元金属氧化物结构，具有长期稳定性；且双金属复合材料导电性得到增强形成了电子快速转移路径。

该项研究精心设计开发了基于铜基催化剂的双金属氧化物电催化剂，其独特的催化剂结构和快速电子转移路径，增强了催化剂的室温催化活性，实现了甲烷到液态醇的高效稳定催化转化，为开发高效低成本的双金属氧化物电催化剂开辟了新思路。相关研究成果发表在《*Applied Catalysis B: Environmental*》¹⁷。

[中科院武汉文献情报中心 郭楷模]

¹⁷ Nengneng Xu, Cameron A. Coco, Yudong Wang, et al. Electro-conversion of methane to alcohols on “capsule-like” binary metal oxide catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.119572

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权益，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