

# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- 美国能源部《储能大挑战路线图》提出五大重点领域行动
- 欧洲电池技术创新平台发布 2030 战略研究议程
- 加拿大发布国家氢能战略提出 2050 愿景
- DOE 资助 5000 万美元推进先进反应堆项目研发
- DOE 4500 万美元资助研发先进太阳能技术
- *Science* 封面文章：探索单晶富镍正极材料裂纹形成机理

主管：中国科学院文献情报系统战略情报服务协调组

主办：中国科学院武汉文献情报中心



**中国科学院武汉文献情报中心**  
Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences  
**湖北省科学图书馆**  
Hubei Sciences Library



**《先进能源科技动态监测快报》**

中国科学院武汉文献情报中心  
湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

**网址:**  
<http://www.whlib.ac.cn>

**联系人:**  
郭楷模  
[guokm@whlib.ac.cn](mailto:guokm@whlib.ac.cn)

**电话:**  
027-87199180



先进能源情报网

<http://energy.whlib.ac.cn>



先进能源科技战略情报研究中心  
微信公众号



先进能源情报网微信公众号

**中国科学院文献情报系统先进能源情报网简介**

中国科学院文献情报系统先进能源情报网是在中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组的整体组织和指导下, 由中国科学院武汉文献情报中心牵头组建, 联合中国科学院文献情报系统能源领域相关研究所, 共同搭建的情报研究资源共享及协同服务的非营利性情报研究及服务团体。先进能源情报网将汇聚中科院文献情报系统内与领域相关的战略情报研究人员、学科情报人员、研究所科研管理人员、研究所文献情报人员, 以及相关的管理和学科专家, 通过“协同开展情报研究服务、组合共建情报产品体系、促进情报资源交流共享、提升整体情报保障能力”的工作方式, 创新院所协同的情报研究和服务保障模式, 促进情报资源的共享、情报需求和情报供给的对接、情报技术方法的合作开发, 实现情报能力的扩散和提升, 进而对中国科学院各个层面(院层面、所层面、项目团队层面及科研人员层面)的重要情报需求提供坚实保障。

**先进能源情报网成员单位**

成员单位	单位名称
组长单位	武汉文献情报中心
副组长单位 (排名不分先后)	合肥物质科学研究院 大连化学物理研究所 青岛生物能源与过程研究所 广州能源研究所
成员单位 (排名不分先后)	上海高等研究院 山西煤炭化学研究所 上海应用物理研究所 兰州近代物理研究所 广州地球化学研究所 过程工程研究所 电工研究所 工程热物理研究所 武汉岩土力学研究所 武汉物理与数学研究所 苏州纳米技术与纳米仿生研究所 福建物质结构研究所

## 目 录

### 决策参考

- 美国能源部《储能大挑战路线图》提出五大重点领域行动..... 2
- 欧洲电池技术创新平台发布 2030 战略研究议程..... 4
- 加拿大发布国家氢能战略提出 2050 愿景..... 9

### 项目计划

- DOE 资助 5000 万美元推进先进反应堆项目研发..... 13
- DOE 4500 万美元资助研发先进太阳能技术..... 15

### 前沿与装备

- Science* 封面文章: 探索单晶富镍正极材料裂纹形成机理..... 16
- 共轭磺胺类有机正极材料实现锂电池比容量突破 520Wh kg<sup>-1</sup>..... 17
- 可伸缩超薄摩擦纳米发电机助力实现自驱动触觉传感器..... 18

## 本期概要

美国能源部 (DOE) 发布《储能大挑战路线图》，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，并确定了成本目标，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%。；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%。最终实现到 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。

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》，明确提出到 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。

加拿大自然资源部发布《加拿大氢能战略》，提出至 2050 年的氢能战略愿景和发展路径：加拿大政府计划通过发展氢能，到 2050 年实现如下目标：①高达 30% 的能源以氢的形式输送；②成为全球前三大清洁氢生产国，国内供应量超过 2000 万吨/年；③建立低碳氢供应基地，交货价格达到 1.50-3.50 加元/千克；④超过 500 万辆燃料电池汽车投运；⑤建立全国加氢网络；⑥在当前通过天然气供应的能源中，实现 50% 以上由氢气掺混现有天然气管道和新建专用输氢管道来提供；⑦通过低成本氢气供应网络带动新兴产业发展；⑧国内市场氢能直接部门收入超过 500 亿美元；⑨形成有竞争力的氢出口市场；⑩相关 CO<sub>2</sub> 减排量最高达到 1.9 亿吨/年等。

美国能源部 (DOE) 相继宣布了 ARDP 计划框架下“未来示范反应堆风险管控专项”和“先进反应堆概念开发专项”资助情况：(1) 未来示范反应堆风险管控专项：设计、建造和运营小型氟化物熔盐冷却高温气冷堆；设计开发热管冷却微型反应堆；开发一种商业可行的移动式微型反应堆；加速 SMR-160 小型模块化轻水反应堆的发展；设计、建造和运营全球首个临界快中子氟化物熔盐堆；(2) 先进反应堆概念开发专项：开展一种地震隔离的先进钠冷反应堆设施的概念设计；(7) 开发一种 50 兆瓦 (电功率) 快中子模块化反应堆概念设计；推进模块式一体化高温气冷反应堆 (MIGHTR) 概念设计。

美国能源部 (DOE) 宣布在“太阳能技术办公室 2020 财年资助计划”(SETO FY2020) 框架下提供 4500 万美元资助先进太阳能技术研发，在确保大电网稳定运行前提下实现太阳能高比例并网集成。包括：(1) 构建电网技术研发联盟；(2) 为太阳能电力配备智能电表；(3) 开发更加先进高效低成本的太阳能硬件制造工艺和流程；(4) 进行太阳能硬件的大批量或高通量低成本制造工艺测试。

### 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》<sup>1</sup>，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：

<sup>1</sup> Department of Energy Releases Energy Storage Grand Challenge Roadmap.  
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-releases-energy-storage-grand-challenge-roadmap>

**(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	先进正极、负极、电解液	安全壳结构和材料	电槽	先进储能材料	双极板		
锂离子电池	√		√				√	√	
其他化学电池	√	√	√		√			√	√
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人才队伍。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。

(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》<sup>2</sup>，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

<sup>2</sup>Strategic Research Agenda for batteries.

[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/batteries\\_europe\\_strategic\\_research\\_agenda\\_december\\_2020\\_1.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/batteries_europe_strategic_research_agenda_december_2020_1.pdf)

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<sup>3</sup>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<sup>4</sup>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

---

<sup>3</sup> 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）。

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

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。

(高天 岳芳)

## 加拿大发布国家氢能战略提出 2050 愿景

12 月 16 日，加拿大自然资源部发布《加拿大氢能战略》<sup>5</sup>，旨在通过建设氢能基础设施以及促进终端应用，使加拿大成为全球主要氢供应国，推进国家的清洁能源转型。该战略分析了加拿大发展氢能的机遇和挑战，提出了至 2050 年的氢能战略愿景和近、中、长期发展路径，并明确将在战略合作、降低投资风险、研发创新等 8 个方面开展 32 项行动。详细内容如下：

### 一、加拿大发展氢能的机遇和挑战

#### 1、发展机遇

**(1) 氢能生产。**加拿大具有氢能生产的丰富原料储备、熟练技术工人和战略性能源基础设施，在氢能和燃料电池技术创新方面也处于领先地位。目前，加拿大主要通过天然气蒸汽重整技术年产约 300 万吨氢，已建立了氢生产供应链，并做好准备向清洁制氢转变。预计到 2050 年加拿大氢能产量将增至目前的 7 倍，每年生产超过 2000 万吨低碳氢，氢能生产方式也将转为多种途径，包括电解制氢、化石燃料制氢、生物质制氢、工业副产氢等。

<sup>5</sup> Hydrogen Strategy for Canada. [https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan\\_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf)

**(2) 终端应用。**氢能应用将集中在能源密集型行业，包括将氢气用于长途运输（燃料电池车、氢发动机）、发电、工业和建筑供热，以及用作工业原料。加拿大政府制定了到 2025 年零排放汽车（包括燃料电池车）占轻型汽车年销量 10%、2030 年达到 30%、2050 年达到 100% 的目标。加拿大在燃料电池车方面具有技术优势，当前全球投运的 2000 多辆燃料电池巴士中约一半为加拿大技术。此外，燃料电池有望在中/重型货运、铁路运输和航运发挥重要作用，在采矿设备（包括物料搬运车）方面也有较大应用潜力。而在短期内，氢-柴油混燃卡车将成为可能的发展方向。在发电方面，可通过氢燃气轮机或固定式燃料电池供电，用于负荷管理、长期储能以及偏远社区和工业区（如矿区）的供电。在工业领域，氢可为石油和天然气的上游开采供热，并用作下游精炼环节的化学原料，此外还可为水泥、钢铁、造纸等工业过程供热，以及用作沥青、氨、甲醇、液体燃料、钢铁、氮肥等生产中的原料。将氢气混入天然气网或发展纯氢输送管网，可为建筑供气及供热。

**(3) 氢气出口。**加拿大拥有强大的氢气生产能力，建立了国际贸易伙伴关系，并拥有深水港、管道网络等基础设施，有助于加拿大成为全球最大清洁氢供应国，预计到 2050 年加拿大氢出口额可能达到 500 亿加元。

## **2、面临挑战**

**(1) 经济和投资。**目前氢与其他传统燃料相比还不具备成本竞争力，以燃料电池为主的终端应用成本也较高，未来 5-10 年需要强有力的政策和财政支持以降低风险，吸引投资。

**(2) 技术和创新。**尽管加拿大的某些氢能和燃料电池技术已处于商业准备阶段，但仍需进一步支持研发以降低成本，并开发新的应用解决方案、实现新的技术突破。

**(3) 政策和法规。**加拿大目前缺乏全面和长期的氢能相关政策和监管框架，已制定政策的各地区政策缺乏一致性。

**(4) 氢能基础设施可用性。**加拿大目前低碳制氢供应有限，而且缺乏输运和存储氢气的基础设施，阻碍了试点和应用推广，长期来看还需建设专门的输氢管道和液化工厂等基础设施，以确保低碳氢的供应。

**(5) 规范和标准。**目前加拿大的氢能部署尚处于早期阶段，缺乏相关规范和标准，以确保氢能应用的最佳实践。

**(6) 公众意识。**民众、工业界和各部门对氢能发展机遇和安全性缺乏认知，需增强对氢能安全利用和经济、环境效益的认识和理解，以建立良好发展的氢能行业。

## **二、发展愿景及路径**

### **1、氢能战略 2050 愿景**

加拿大政府计划通过发展氢能，到 2050 年实现如下目标：（1）高达 30% 的能源以氢的形式输送；（2）成为全球前三大清洁氢生产国，国内供应量超过 2000 万吨/年；（3）建立低碳氢供应基地，交货价格达到 1.50-3.50 加元/千克；（4）超过 500 万辆燃料电池汽车投运；（5）建立全国加氢网络；（6）在当前通过天然气供应的能源中，实现 50% 以上由氢气掺混现有天然气管道和新建专用输氢管道来提供；（7）通过低成本氢气供应网络带动新兴产业发展；（8）造就约 35 万个氢能行业岗位；（9）国内市场氢能直接部门收入超过 500 亿美元；（10）形成有竞争力的氢出口市场；（11）相关 CO<sub>2</sub> 减排量最高达到 1.9 亿吨/年。

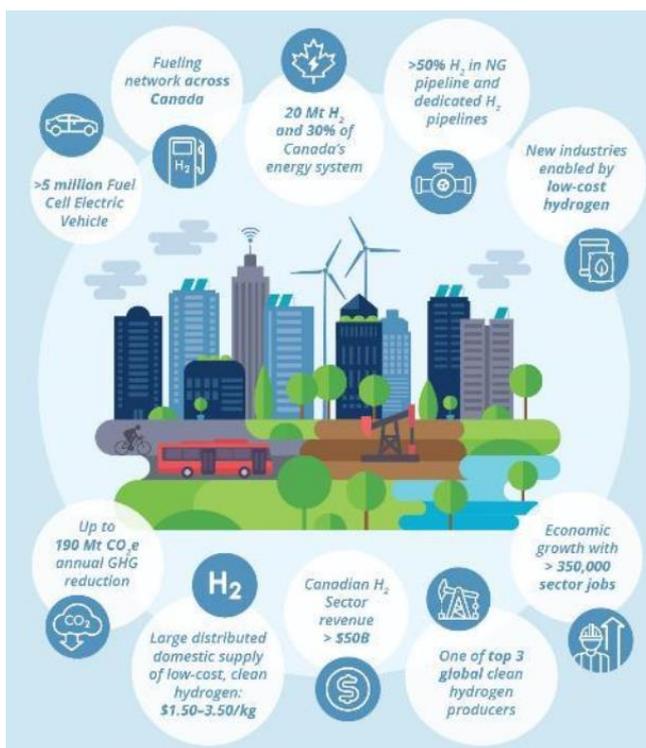


图 1 加拿大氢能战略 2050 年愿景

## 2、发展路径

（1）近期（至 2025 年）：**奠定氢能经济基础**。规划和开发新的氢供应和分配基础设施，以支持成熟应用的早期部署，同时支持新兴应用的示范。清洁燃料标准等法规将是推动氢能行业近期投资增长的基础，同时还需出台新的政策和监管措施。

（2）中期（2025-2030 年）：**实现氢能行业增长和多样化**。随着技术的成熟和终端应用的技术成熟度达到或接近商业化，氢能应用将聚焦于相比其他零排放技术能够实现价值最大化的途径。

（3）长期（2030-2050 年）：**氢能市场快速扩张**。随着部署规模的扩大和新商业应用的增多，在氢能供应和分配基础设施的支持下，加拿大将开始受益于氢经济。

## 三、行动举措

该战略针对加拿大氢能发展提出在 8 个方面采取 32 项行动，具体包括：

### 1、战略合作

战略性利用现有和新的合作伙伴关系，合作规划促进氢能发展。具体行动包括：

（1）通过政府间工作组、跨多级政府和独立团体进行协作，确定优先部署领域，并分享通过早期部署获得的知识、最佳做法和经验教训；（2）利用加拿大的创新清洁技术公司和世界领先的氢能和燃料电池专业知识，扩大公私合作伙伴，以加速跨价值链的项目部署；（3）促进区域部署中心的跨部门合作，以展示氢能多种应用对综

合生态系统的经济和运行优势；（4）加强与国际伙伴的合作并采取协同举措，吸引外国投资，并加速加拿大在全球市场上获得发展机遇。

## **2、降低投资风险**

建立资金计划、长期政策和商业模式，以鼓励工业和政府投资发展氢经济。具体行动包括：（1）实施长期政策以确保产生持续的氢需求，并降低建造氢能供应和分配基础设施的私营投资风险；（2）启动多年期计划并形成清晰的长期监管环境，以支持氢能生产和终端应用项目，包括项目的可行性评估；（3）开发区域部署中心，以示范、验证和实施整个价值链（生产、分配到终端应用）的商业案例；（4）促进各级政府和私营部门的共同资助。

## **3、研发创新**

采取行动支持进一步技术研发，制定研究重点，促进利益相关方之间的合作，以确保加拿大在氢能和燃料电池技术方面保持全球竞争优势和领先地位。具体行动包括：（1）制定战略性基础研究优先事项，确保持续取得氢能技术进步并提升经济性，设定技术性能和成本目标；（2）投入专门资金持续支持研发，以确保加拿大保持氢能和燃料电池的技术领先地位；（3）利用学术界、政府实验室和私营部门实验室的专业知识，创建区域研究中心，并鼓励以任务为导向进行研究、开发和试点部署；（4）支持企业基础研究项目，协调审查和信息共享，促进联邦实验室、工业界、学术界以及国际合作伙伴之间的合作。

## **4、规范和标准**

更新并制定规范和标准，以适应行业的快速变化，消除国内和国际部署障碍。具体行动包括：（1）更新、协调并确认规范和标准，以支持部署并促进新技术和基础设施在早期市场的采用；（2）成立规范和标准工作组，其中包括有管辖权的省级主管部门，以共享经验教训并确定准则和标准的差异；（3）制定基于性能的标准，并确保不会将氢排除在更广泛的法规、标准和规定之外；（4）促进加拿大在国际标准和认证方面的领导和参与（例如制定全球碳强度指标、天然气系统中氢的掺混标准等），简化国际贸易。

## **5、扶持性政策和法规**

确保各级政府将氢能纳入清洁能源路线图和战略，并鼓励其应用。具体行动包括：（1）确保各级政府在制定新的政策、计划和法规时考虑氢能在加拿大未来能源体系中的重要作用；（2）鼓励政府更新现有政策、计划和法规，以促进国内氢能生产和终端应用的增长；（3）确保氢能成为国家和省/地区级综合清洁能源路线图的一部分；（4）制定基于性能的标准，定义氢能的碳强度阈值，明确政府支持项目中可再生氢应用程度的时间进度要求。

## **6、公众意识**

在技术快速发展的时期，从国家层面引导公民和社区了解氢能安全性、用途和益处。具体行动包括：（1）支持氢能区域部署中心的社区参与；（2）开展宣传和推广活动，对政府、行业、公众和其他重要影响者进行氢能安全、用途和效益方面的宣传教育；（3）为氢能早期市场开发一套工具和资源，以帮助终端用户进行定量评估，并依托政府运营网站管理工具和资源；（4）支持工业界和学术界合作开发氢能课程，进行认识、兴趣、技能培养和培训，开发下一代人才库，为新的氢能发展机遇做好人力准备。

## 7、区域规划

实施多层次、协同的政府工作，促进制定区域氢能发展规划，以确定氢气生产和终端应用的具体机遇和计划。具体行动包括：（1）多级政府共同努力促进区域氢能规划的制定，确保联邦政府参与以及国家氢能战略取得协同效应；（2）确定建立区域氢能中心的机会，涵盖整个价值链相关项目；（3）制定和实施区域氢能规划，涵盖公用事业、主要相关行业以及清洁技术公司；（4）确定与其他省/地区协调和交叉的领域，以促进和加速氢能整体应用。

## 8、国际市场

与国际伙伴合作，确保在全球推广包括氢气在内的清洁燃料，促进加拿大工业在国内外蓬勃发展。具体行动包括：（1）发展领先的加拿大品牌，使加拿大成为全球低碳氢及其应用技术的首选供应商；（2）投资氢能基础设施，将氢能供应与国际市场联系起来，例如用于氢气运输的液化设施以及从加拿大西部到美国的氢气管道；（3）开展国内旗舰项目，突出加拿大的专业知识，吸引国内市场投资，并在国际上推广；（4）利用现有国际论坛/组织展现加拿大的领导地位，并开拓新的市场机会。

（高天 岳芳）

## 项目计划

### DOE 资助 5000 万美元推进先进反应堆项目研发

在美国能源部（DOE）2020 年 10 月公布了“先进反应堆示范计划”（ARDP）框架下第一个资助专项<sup>6</sup>详情后，DOE 于 12 月 16 日和 22 日相继宣布了 ARDP 其余两个专项资助情况，分别是“未来示范反应堆风险管控专项”和“先进反应堆概念开发专项”，2020 财年将共资助 5000 万美元。具体如下：

#### 一、未来示范反应堆风险管控专项

12 月 16 日，DOE 宣布为“未来示范反应堆风险管控专项”提供第一期（2020 财年）3000 万美元资助<sup>7</sup>，目的是设计开发安全、经济的先进反应堆技术，能够在未

<sup>6</sup> 详见本刊 2020 年第 22 期报道。

<sup>7</sup> Energy Department's Advanced Reactor Demonstration Program Awards \$30 Million in Initial Funding for Risk

来10-14年内获得许可并部署。DOE计划在七年内向这一专项总共资助约6亿美元，产业合作伙伴将匹配至少20%的资金投入。专项第一期选定五个团队开展课题研究，具体研究内容如下：

表1 未来示范反应堆风险管控专项具体研究内容

研究机构	研究内容	总资助金额 (DOE 出 资) /百万美元	资助周期
凯罗斯电力 有限责任公 司	Hermes 小型试验反应堆。将设计、建造和运营氟化物熔盐冷却高温气冷堆，采用卵石型三结构各向同性 TRISO 颗粒核燃料和低压氟化物熔盐冷却剂	629 (303)	七年
西屋电气公 司	eVinci™ 微型堆。将设计开发热管冷却微型反应堆，支持在 2024 年之前进行示范。降低与慢化剂罐设计有关的技术风险，提高制造热管吸液芯的能力，并发展经济可行的换料流程和许可方法	9.3 (7.4)	七年
BWXT 先进 技术公司	BWXT 先进核反应堆。将开发一种商业可行的移动式微型反应堆，其设计侧重于使用 TRISO 颗粒燃料实现更高的铀负载量，并使用碳化硅 (SiC) 基复合材料改进堆芯设计	106.6 (85.3)	七年
Holtec 政府 服务公司	Holtec SMR-160 小型模块化反应堆。推进早期设计、建设和许可活动，加速 SMR-160 小型模块化轻水反应堆的发展	147.5 (116)	七年
南方电力公 司	氟化物熔盐反应堆实验。将设计、建造和运营全球首个临界快中子氟化物熔盐堆，该反应堆与泰拉能源公司的氟化物熔盐快堆技术有关	113 (90.4)	七年

## 二、先进反应堆概念开发专项 (ARC-20 专项)

12月22日，DOE宣布为“先进反应堆概念开发”(ARC-20)专项提供第一期(2020财年)2000万美元资助<sup>8</sup>，旨在推进先进反应堆概念设计早期发展，目标是能够到2030年代中期进行示范。DOE计划在四年内向ARC-20项目总共资助约5600万美元，产业合作伙伴将匹配至少20%的资金投入。ARC-20项目第一期选定三个团队开展课题研究，具体研究内容如下：

Reduction Projects. <https://www.energy.gov/ne/articles/energy-department-s-advanced-reactor-demonstration-program-awards-30-million-initial>

<sup>8</sup> Energy Department's Advanced Reactor Demonstration Program Awards \$20 million for Advanced Reactor Concepts. <https://www.energy.gov/ne/articles/energy-department-s-advanced-reactor-demonstration-program-awards-20-million-advanced>

表 2 先进反应堆概念开发（ARC-20）专项具体研究内容

研究机构	研究内容	总资助金额 (DOE 出 资) /百万美元	资助周期
先进反应堆 概念有限责 任公司	固有安全先进小型模块化反应堆。将基于一个 100 兆瓦（电功率）反应堆设施的早期预概念 设计,开展一种地震隔离的先进钠冷反应堆设 施的概念设计	34.4 (27.5)	三年半
通用原子公 司	快中子模块化反应堆概念设计。将开发一种 50 兆瓦（电功率）快中子模块堆概念设计,验 证燃料、安全性和运行性能方面的关键指标	31.1 (24.8)	三年
麻省理工学 院	水平布置紧凑型高温气冷堆。将推进模块式一 体化高温气冷反应堆（MIGHTR）概念设计	4.9 (3.9)	三年

(汤匀)

## DOE 4500 万美元资助研发先进太阳能技术

12 月 16 日,美国能源部(DOE)宣布在“太阳能技术办公室 2020 财年资助计划”(SETO FY2020)框架下提供 4500 万美元资助先进太阳能技术研发<sup>9</sup>,重点聚焦太阳能系统集成和太阳能硬件研究,在确保大电网稳定运行前提下实现太阳能高比例并网集成。本次资助主要关注两大技术主题,具体内容如下:

### 1、太阳能系统集成技术

(1) **电网技术研发联盟,资助金额为 2500 万美元**,主要研究工作将促进电网相关的所有利益相关方开展合作,来开发先进的太阳能电力稳定可靠的并网集成技术,以确保集成太阳能的电网高效安全稳定运行。

(2) **为太阳能电力配备智能电表,资助金额为 600 万美元**,主要研究工作是利用先进的传感器技术在太阳能电力设施中大规模部署智能电表,以将其数据整合到公用电力数据系统中,实现对集成太阳能电力系统更加精准的预测、控制和运行。

### 2、先进太阳能制造技术

(1) **产品开发,资助金额为 600 万美元**,研究工作主要致力于开发更加先进高效低成本的制造工艺和流程,并开展现场的技术经济评估,加速新技术新制造工艺的商用进程,降低制造成本,提升美国太阳能制造业竞争力。

(2) **技术和产品测试,资助金额为 800 万美元**,研究工作主要包括太阳能硬件的大批量或高通量低成本制造工艺测试;基于新制造工艺的太阳能硬件现场性能测试;基于新制造工艺的中试规模生产线示范。

(郭楷模)

<sup>9</sup>Energy Department Announces \$45 Million in Funding for Solar Technologies.  
<https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-45-million-funding-solar-technologies>

### **Science 封面文章：探索单晶富镍正极材料裂纹形成机理**

高能富 Ni 材料因为其高压低成本的优势，是最常用也最具前景的正极材料之一。传统的正极材料  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  通常利用共沉淀法制得。问题在于，这种常见的含有 Ni、Mn、Co 的多组分多晶正极材料在高压下会产生裂纹，导致表面积增加，并更容易遭受潮气影响，使副反应增加，电池循环寿命更短，从而导致电池失效。单晶富镍正极具有更少的相界，有望解决多晶正极所面临的挑战。单晶富镍正极中的超电势、微观结构和电化学反应之间存在根本的联系，但高性能单晶富镍正极的合成仍依然是一个关键难题。美国能源部西北太平洋国家实验室 Jie Xiao 等人从原子尺度深入探索了单晶富镍正极材料裂纹形成的机理，并提出了抑制正极材料开裂的有效策略。研究人员使用尺寸为  $3\ \mu\text{m}$  的单晶富镍正极材料  $\text{LiNi}_{0.76}\text{Mn}_{0.14}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$  (NMC76) 作为模型材料，基于 AFM 和理论模型，考察富镍正极电化学反应行为和结构变化。研究发现，随着材料充电和锂的脱除，沿 (003) 晶面可观察到可逆的平面滑移和微裂纹。然而，在放电时会发生可逆过程，从而使得微裂纹消失不见。研究人员认为，微观结构缺陷的可逆形成与晶格中锂原子的浓度梯度引起的局部应力相关。基于以上认识，研究人员开发了扩散引起的应力模型，以了解平面滑移的起源，并提出了稳定这些富镍正极的有效方法：（1）将晶体尺寸减小到  $3.5\ \mu\text{m}$  以下；（2）通过改变结构对称性，吸收累积的应变能；（3）简单地优化充放电深度，而无需牺牲大量可逆容量。这项研究探索了单晶富镍正极材料裂纹形成的机理，并提出了抑制正极材料开裂的有效策略，为提高锂电池寿命提供了新的思路。相关研究成果发表在《Science》<sup>10</sup>。

（汤匀）

<sup>10</sup> Yujing Bi, Jinhui Tao, Yuqin Wu. et al. Reversible planar gliding and microcracking in a single-crystalline Ni-rich cathode. *Science*, 2020, 370 (6522):1313-1317.

## 共轭磺胺类有机正极材料实现锂电池比容量突破 520Wh kg<sup>-1</sup>

最早的有机正极电池材料可以追溯到半个多世纪前,Williams 等人报道了 3V 锂/二氯异氰尿酸原电池。在这一开创性的发展之后,有机电极材料的研究出现一段短暂的活跃期,但很快就被无机过渡金属的兴起所淹没。然而,过去十年随着人们对锂离子电池技术在能量密度、效率和安全性方面的担忧,有机电池因其更环保、可持续以及对关键原材料供应的依赖性更小,而备受关注。在过去几十年里,研究人员提出并研究了各种有机化合物作为电化学储能电极材料。然而,这些化学物质中并没有多少符合实际要求。这是因为,这些化学物质的高共价和高电位性质使得 n 型锂材料面临空气中水分的快速水解、分子氧的氧化反应所带来的挑战。迄今为止,有机锂离子正极(n 型,含锂和空气稳定)的最新进展几乎没有。因此,设计能够满足锂离子正极材料要求的化学材料,促进有机电池这一新兴领域对性能不断提高的追求显得尤为迫切。近日,比利时法语区鲁汶大学 Alexandru Vlad 团队报道了利用共轭磺酰胺(CSAs)扩展有机锂离子正极材料的化学空间结构,使其比容量与传统 LiFePO<sub>4</sub> 电池材料相媲美,达到 520 Wh kg<sup>-1</sup>。此锂离子正极材料与其他正极材料相比:(1)合成步骤减少;(2)在大气环境下,该正极材料与锂离子构建了稳定的化学键;(3)在电位接近或高于 3V 时,仍显示出可逆的多电子氧化还原反应。通过实验与理论研究相结合,研究人员揭示了磺-胺-亚胺氧化还原单元在 CSAs 中具有丰富的结构-性能-电荷-存储性能的相互作用。根据对 CSAs 结构的设计,在 2.85-3.45V 电压下,其可逆容量范围为 100-200 mAh g<sup>-1</sup>,在活性材料水平表明,其最高比容量将达到 520 Wh kg<sup>-1</sup>。这些结果证实了 CSAs 是除了共轭羧基体系之外具有氧化还原中心的有机正极材料,作为新兴有机电池领域的潜在应用材料,其结构和组成的多样性有待进一步探索,为未来有机电池的实际应用提供了新的方向。相关研究成果发表在《*Nature Materials*》<sup>11</sup>。

(汤匀)

<sup>11</sup> Jiande Wang, Alae Eddine Lakraychi, Xuelian Liu, et al. Conjugated sulfonamides as a class of organic lithium-ion positive electrodes, *Nature Materials*, 2020, DOI: 10.1038/s41563-020-00869-1.

## 可伸缩超薄摩擦纳米发电机助力实现自驱动触觉传感器

可穿戴触觉传感器通过与物体的物理接触获取信息，在机器人、医疗保健监控、可穿戴设备等领域具备广阔应用前景，引起了人们极大的关注。目前主要类型的触觉传感器是基于压阻、压电、摩擦电等传感方法，来检测物体的形状、纹理和力度。

中国科学院北京纳米能源与系统研究所 Zhonglin Wang 教授课题组牵头的国际联合研究团队，设计开发了一种基于可伸缩、可水洗、超薄纳米发电机（TENG）的自供电触觉传感器，具备了优异抗拉伸、高耐用性、轻量化、高压电灵敏度等优点，表现出优异的人体机械运动能量收集和自供电传感能力，为自驱动可穿戴电子设备的电源设计研发提供了新思路。研究人员首先利用同步静电纺丝方法制备了热塑性聚氨酯（TPU）纳米纤维网络，并同步利用电喷涂技术制备了银纳米线（AgNWs），随后将两者均衡混合在一起形成了复合电极 AgNWs-TPU。一方面，TPU 材料的良好拉伸特性使得复合电极机械柔韧性较好，抗形变率达到了 580%（定义为拉伸到原有尺寸的 580%，电极仍旧没有破裂）。另一方面，AgNWs 材料确保了电极具备良好的导电性。随后基于该电极构建出一个面积为  $4\text{ cm}^2$  的柔性薄膜 TENG，拉伸性能测试显示，该器件抗形变率高达 800%，表现出良好的抗拉伸特性。压力灵敏度表征显示，器件灵敏度可达  $9.973\text{ mV/Pa}$ ，即具有优异的压力灵敏度，可以充当触觉传感器监测人体健康信息。随后，研究人员向器件施加规律的摩擦压力，在  $8\text{ N}$  和  $1\text{ Hz}$  的负载频率时，获得了  $95\text{ V}$  开路电压（Voc）、 $0.3\text{ }\mu\text{A}$  短路电流（Isc）和  $6\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$  功率密度。研究人员随后开展了器件的长程稳定性研究，经过 4000 余次的摩擦敲击和释放、数十次反复水洗操作后，器件的性能基本没有变化，表现出了优异的稳定性。此外，整个器件厚度仅为  $89\text{ }\mu\text{m}$ ，质量仅为  $0.23\text{ g}$ ，具备超薄轻量化特性，可以作为自供电触觉传感器应用于人体健康监测。

该项研究精心设计制备了耐拉伸、耐水洗、高导电性的超薄聚氨酯纳米纤维网络和银纳米混合电极，在此基础上构建出可拉伸、可水洗的轻量化自供电触觉传感器，具有出色的能量收集和自供电传感能力，在监测复杂的人体生理信号和模拟人体触觉方面具有良好的应用前景。相关研究成果发表在《*Advanced Functional Materials*》<sup>12</sup>。

（程向阳 郭楷模）

---

<sup>12</sup> Yang Jiang, Kai Dong, Xin Li, et al. Stretchable, Washable, and Ultrathin Triboelectric Nanogenerators as Skin-Like Highly Sensitive Self-Powered Haptic Sensors. *Advanced Functional Materials*, 2020, DOI: 10.1002/adfm.202005584

## 中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心是服务国家和中科院能源决策管理、科技创新、产业发展的专业情报研究机构，历年来承担和参与了多项国家级、中科院、省部级能源科技战略规划和重要科技计划研究。中心的主要产品包括《先进能源发展报告》、《先进能源动态监测快报》（半月刊）、《能源与科技参考》及各类深度能源情报研究分析报告，主要研究方向包括能源科技领域的国际科技战略与规划、科技计划与预算、科技进展与动态、科技前沿与热点、重大成果工程应用、重要科技政策与管理研究。

	研究内容	特色产品
战略规划研究	开展科技政策与科研管理、发展战略与规划研究等相关服务，为科技决策机构和管理部门提供信息支撑。	先进能源发展报告：科技引领能源 国际能源战略与新能源技术进展 金融危机背景下的能源战略 世界能源强国能源科技创新体系分析报告 美国能源科技计划管理机制及启示 .....
领域态势分析	开展特定领域或专题的发展动态调研与跟踪、发展趋势研究与分析，为研究机构、企业的科研项目提供情报服务。	核电技术国际发展态势分析报告 太阳能热发电技术国际发展态势分析报告 智能电网国际发展态势分析报告 规模化电力储能技术国际发展态势分析报告 高端洁净煤发电技术国际发展态势分析报告 .....
技术路线研究	开展产品、成果、专利或标准的情报研究，分析相关行业的现状及发展趋势，为企业发展与决策提供参考。	国际能源领域技术路线图解析 低阶煤热解/气化/循环流化床专利态势分析 新型煤气化技术发展报告 太阳能技术新突破：钙钛矿太阳电池 我国能源互联网发展重要战略问题研究 .....

编辑出版：中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号（430071）

联系人：陈伟 郭楷模 岳芳

电话：（027）87199180

电子邮件：[energy@whlib.ac.cn](mailto:energy@whlib.ac.cn)

微信公众号：CASEnergy

