

先进能源科技动态监测快报



本期重点

- 国际能源署发布《美国能源政策评估》报告
- 美信息技术与创新基金会发布全球能源创新指数报告
- 欧洲能源研究联盟发布至 2030 年氢能与燃料电池研究规划
- DOE 资助 1.1 亿美元推进 CCUS 项目研发和部署
- 新工艺有机太阳能电池理论寿命超过两万年

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

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

国际能源署发布《美国能源政策评估》报告2
美信息技术与创新基金会发布全球能源创新指数报告5

项目计划

欧洲能源研究联盟发布至2030年氢能与燃料电池研究规划8
DOE资助1.1亿美元推进CCUS项目研发和部署12
DOE资助1520万美元支持先进核能技术研发13
澳大利亚可再生能源署资助电网消纳、氢能和工业脱碳研究14

前沿与装备

新工艺有机太阳电池理论寿命超过两万年16
全钙钛矿双结叠层太阳电池创下24.8%转换效率纪录17
基于全柔性组件的柔性可伸缩全固态锂电池18
双活性位点非金属催化剂实现中性溶液中高效裂解水产氢19

本期概要

国际能源署 (IEA) 发布《2019 美国能源政策评估》报告，系统评述了页岩革命后美国能源政策调整变化情况：页岩革命使美国油气产量大幅度增长，美国从能源进口国转变为能源出口国。基于这一情况，美国政府将能源政策由“能源独立”调整为“能源主导”，即将能源作为一种重要的国家战略资源，利用能源出口扩大美国在国际能源市场势力，以加强美国全球领导力。美国正探索在实现经济不断增长的同时缓解气候变化、降低能源强度的策略，并支持能源技术创新和可再生能源并网集成，实施煤改气以降低煤炭需求，不断扩大石油、天然气、煤炭等传统能源的出口。美国正极力恢复和扩大核电行业，并寻求核废料的安全处置和存储方法。美国实施一系列政策强化能源系统应对风险的能力，并基于当前能源供应现状解除石油禁令、制定天然气应急供应条令。

美国信息技术与创新基金会 (ITIF) 发布《全球能源创新指数：各国对全球清洁能源创新系统的贡献》报告，系统评估了 23 个加入“创新使命”(Mission Innovation) 行动的成员国对全球能源创新的贡献：相较于自身的经济规模，挪威、芬兰和日本对全球清洁能源创新做出了最重要的贡献。尽管宣布退出巴黎协定，2018 年美国对清洁能源技术和能源基础科学的公共经费投入总额均远超其他国家。中国对清洁能源技术研发示范的公共经费投入总额居世界第二，但综合排名靠后，在推动清洁能源技术的规模化应用维度表现较好。9 个国家和欧盟对清洁能源技术研发示范的公共经费投入低于 2015 年水平。碳捕集与封存 (CCS) 和先进核电等资本密集型技术的示范是全球清洁能源创新体系中的薄弱环节。

欧洲能源研究联盟 (EERA) 发布了新版《氢能与燃料电池联合研究计划实施规划》，确定了欧盟到 2030 年在氢能与燃料电池技术领域内的研究目标、行动计划和优先事项：本次更新的实施规划提出了 7 个子领域的研究重点和关键项目，并明确了实施优先级和预算：电解质；催化剂与电极；燃料电池电堆材料与设计；燃料电池系统；建模、验证与诊断；氢气生产与处理；氢气储存。

DOE 宣布资助 1.1 亿美元支持先进碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术的研发、设计与试验，着重聚焦三大主题领域，包括：(1) 煤炭和天然气电厂碳捕集系统的前端工程设计 (FEED) 研究；(2) 加速 CCUS 区域部署；(3) 碳封存保障设施事业 (CarbonSAFE)。

澳大利亚可再生能源署 (ARENA) 公布了新的可再生能源资助计划，提出了三个新的研究优先领域：电网消纳可再生能源方面，将研究提高电网安全性、可靠性和灵活性的方法，以及储能、分布式能源、电动汽车、光伏发电等领域的技术；加速氢能发展方面，将关注促进氢能出口、将氢气作为工业原料、混合氢气的天然气网络、纯氢气网络、氢气用于交通运输和电力部门，以及氢气新技术等的研发示范；在支持工业脱碳方面，将重视重工业等的脱碳技术。

密歇根大学 Stephen r. Forrest 教授研究团队利用热蒸发方法制备了新架构的有机太阳电池器件：新器件在一个标准模拟太阳光辐照下连续运行 9000 余小时（相当于一整年）后转换效率依旧维持初始效率的 90% 以上，由此推算出理论寿命可以长达 27000 余年，表现出惊人的长程稳定性，使得有机太阳电池向实用化迈进了一大步。

国际能源署发布《美国能源政策评估》报告

9月13日，国际能源署（IEA）发布《2019美国能源政策评估》¹报告指出，得益于页岩革命，美国国内的油气产量大规模增长，其中原油产量自2008年以来大幅飙涨了124%，到2018年达到1550万桶/日，同期天然气产量也显著增长40%达到7604亿立方米/日；这一显著变化使得美国逐步从能源进口国转变成出口国。在此背景下，美国政府顺势调整了能源政策，从谋求“能源独立”转向“能源主导”，即将能源作为一种重要的国家战略资源，意在扩大能源出口，在实现能源独立的过程中谋求世界能源霸主的发展之路，以加强美国全球领导力。毫无疑问，页岩革命成功地让美国在全球能源市场上的角色发生了转变，而这必将对全球的能源版图和地缘政治带来深远影响。报告对美国当前的能源政策进行了系统评述，关键点如下：

一、美国能源战略整体思路：从能源独立转向能源主导

页岩气革命不仅让美国成功转变成为世界上最大油气生产国，同时也成为了主要的油气出口国。IEA数据显示，2017年美国原油产量占全世界原油总产量的13%，天然气占20%。同期，国内能源产量满足了全美98%的一次能源消费。显而易见，页岩革命正逐步将美国从能源进口国转变为强势的出口国，实现能源独立。在这种转变之下，美国顺势调整了其能源政策，从最初的追求“能源独立”转向了谋求“能源主导”，即成为全球油气供应增长中心，最大限度地利用能源出口，扩大美国在国际能源市场影响力，从而维持和强化美国在全球的霸权。

“能源主导”战略的核心内容之一就是减少美国扩大能源生产和提高能源行业竞争力的监管障碍。2017年，美国宣布退出《巴黎气候协定》，解除奥巴马总统制定的限制传统能源发展的各类环保规章制度。其二是扩大能源出口，2014年美国能源部（DOE）简化了液化天然气（LNG）的出口监管审批，促使美国成为全球主要的LNG供应商，以及天然气净出口国；2015年美国正式解除了实施长达40年的原油出口禁令。展望未来，出口增长将取决于油气管道基础设施建设情况。尽管联邦政府已努力简化能源基础设施的建设许可制度，但基础设施仍难以跟上页岩产量增长，需要及时铺设天然气管道。能源技术创新是推动页岩革命成功的关键因素。因此联邦政府高度重视能源技术研发，投入大量研发资金，维持其全球能源技术领先地位。2017年，美国联邦政府投入73亿美元支持能源研究、开发和示范（RD&D），较前一年增长9%。

二、美国国内能源生产消费现状

¹ Energy Policies of IEA Countries: United States 2019 Review.
https://webstore.iea.org/download/direct/2829?fileName=United_States_2019_Review.pdf

1、寻求能源和气候发展平衡点

美国正在探索在实现经济不断增长的同时缓解气候变化的策略。2017年，美国GHG排放总量达到64.57亿吨二氧化碳当量，占全球排放总量的12%，仅次于中国。国家安全战略强调美国正在寻求一种兼顾能源发展和气候保护的方法，在经济不断增长的同时减少GHG等传统污染物排放。美国的环境和气候政策仍然面临着缺少两党支持和政策不稳定的挑战。2017年，美国政府决定退出巴黎协定，但对于针对美国改进条款，以及重新加入《巴黎气候协定》仍然保持开放态度。同时美国也已制定国家自主贡献计划（NDC），计划到2025年GHG排放相对于2005年水平减少26%-28%。

2、能耗和经济脱钩

过去几十年，美国能源强度在降低。1990到2017年，美国人口增长约30%，同时GDP几乎翻倍，而终端能源消费（TFC）总量仅增长18%。尤其在2008-2009年经济危机后，经济增长放缓和能源消费降低导致TFC总量进一步减少，使得经济增长和能源消费逐步脱钩。在IEA成员国中，美国是能效改善速度较为突出的国家。尽管如此，美国仍是能源强度较高的国家。2017年，美国单位GDP能耗居第四位，高出IEA平均水平19%；人均能耗排第三，高于IEA成员国平均水平61%。

3、传统能源资源

自2014年起，得益于水平钻井、水力压裂等开采技术的进步，美国国内页岩油的产量急剧增加，推动石油供应大幅增加，过去十年美国石油对外依存度（石油进口量占石油总需求份额）减少了一半以上，目前为25%，促使美国解除了长达40年之久的原油出口禁令。美国已经成为全球第一大石油产出国，并有望在2021年成为石油净出口国。

页岩革命使美国天然气产量急剧增加，从而改变了天然气在美国国家能源结构中的比重。2009年之后，美国成为世界上最大的天然气生产国，同时天然气也成为国内第二大能源资源。2018年，天然气在美国一次能源供应总量中占比已从2008年的24%增长到了32%。美国在2017年已经成为天然气净出口国。美国天然气市场已经高度成熟，但随着美国成为世界上最大的天然气出口国之一，如何改善大量的天然气供应和出口设施成为当下的问题所在。为了解决天然气管道的运输能力和运输终端问题，美国政府已经开始采取措施消除行政障碍，尤其是在小型LNG终端方面。

美国是主要的煤炭生产和消费国，其煤炭产量全球第二（中国第一），煤炭消耗全球第三（中国、印度前二）。美国国内的煤炭产量主要用于发电领域，在过去10年中，由于页岩革命、环境保护政策、可再生能源增长等影响，煤炭需求逐渐减少。2008年，发电领域煤炭占比近50%，而到了2018年这一比例已经降到30%以

下。随着国内需求减少，美国开始增加煤炭出口，这需要加大基础设施建设投资。

4、可再生能源

在美国能源系统中，可再生能源扮演着日益重要的角色，尤其是在发电领域。2018年，由于低成本和政府政策支持，风能和太阳能发电在美国有了空前的增长，可再生能源发电占到全美发电总量的17%。可再生能源在一次能源供应总量（TPES）中的占比达到了8%，占到终端能源消费总量的9%（包括可再生电力的使用）；其中燃料乙醇在交通运输领域发展迅猛，其在美国交通能源消耗中的比重占到了5.2%，远高于IEA其他成员国。可再生能源的持续增长对美国既是机遇也是挑战。随着可再生能源快速发展，如何在保障电网稳定性前提下实现可再生能源的高比例并网成为了关键挑战。如果有正确的部门政策和技术发展的支持，可再生能源将在促进交通领域脱碳起到更重要的作用。

5、核能

美国是全球最大的核电生产国，占全球核能发电总量近1/3。核电也是美国国内占比最大的低碳电力，发电量在国内电力结构中排第四位。美国在30个州内有59座商业化运营核电站，包含了98个轻水反应堆（LWR）（65个压水反应堆和33个沸水反应堆），大多建于1967-1990年间。美国商业化运营核电站的特点是高功率，核能发电从1970到1990年一直处于快速增长态势，而且一直维持每年增长800 TWh。

过去6年，由于经济原因，几个反应堆在运行许可到期前就已经关闭。而随着其他能源（尤其是天然气和可再生能源）的持续增长，核电占比将继续下降，这对于美国电力系统的灵活性和稳定性将产生一定影响。同时核电为美国提供50万个工作岗位，联邦政府也极力恢复和扩大核电行业，核电在美国电力系统中仍然占据着重要位置，其技术和市场/政策发展都不可或缺。最后，美国也在极力寻求核废料的安全处置和存储方法。

6、电力

美国的电力资源正在发生显著变化。2008年，燃煤发电几乎占电力结构的一半，但到2018年这一数值已经减少至三分之一。其中主要原因就是页岩气比例激增，资源丰富、低成本天然气使得天然气发电在电力部门的占比超过了燃煤发电。过去10年天然气发电量增长了60%以上，超过了燃煤发电的份额。与此同时，不断下降的成本和对可再生能源的政策支持促使风能和太阳能发电量激增。天然气和可再生能源的蓬勃发展使得长期以来一直为美国电力市场提供支持的核电站面临严峻挑战。IEA建议采取政策和监管措施，以确保电力部门的平稳过渡，充分利用波动性可再生能源的增长，同时确保整个电力系统的可靠性和灵活性。

三、能源安全

能源系统恢复力不仅需要增强能源系统抵御能力，更强调在面临无法避免的故

障时，能有效利用各种资源灵活应对风险，适应变化的环境，维持尽可能高的运行功能，并能迅速、高效恢复能源系统性能。美国政府已经通过一系列政策强化能源系统应对风险的能力。2018年，DOE成立网络、能源安全和应急响应部门(CESER)，致力于打造能源系统应对网络风险能力。电力部门在和工业界、学术界、国家实验室以及其他政府机构的协作过程中，引领下一代技术和方法的发展，不断改善国家重要能源基础设施的安全性和恢复力。

美国是全球战略石油储备最多的国家，但随着美国已成为世界最大的石油生产国，石油进口量逐年下降，已接近实现能源独立。因此美国政府宣布自2018年10月开始到2028年，将出售40%的战略石油储备，使战略石油储备从目前的约7亿桶减少到4.1亿桶。由于页岩革命，天然气在能源领域的重要性日益增加（尤其是发电部门），因此美国政府制定天然气应急供应条令，包括购买、分配以及优先使用权。美国政府花费多年维护电网的稳定性，避免电力短缺。如今面对极端天气、新型网络攻击、多元化能源资源的发电系统，以及传统基荷电力（燃煤发电、核电）减少等情况，美国面临着电力系统稳定性和恢复力的双重挑战。

四、能源技术创新

美国是能源技术创新的全球领导者。联邦政府在能源RD&D上的工作主要是由DOE牵头开展，核心力量是DOE下辖的国家实验室，它们拥有世界级的先进能源研究设施。2017年，美国投入73亿美元用于推动能源的RD&D工作，相较于前一年增长了9%。大部分RD&D资金用于清洁能源技术研究，包括核能（尤其是小型核反应堆），碳捕集、利用和封存(CCUS)，能效等。随着可再生能源发电量的增长和电动汽车的发展，以及极端天气和网络攻击的发生频率增加，电网现代化研究成为重要的环节。

此外，美国还积极参与众多的国际性能源研发创新合作项目，IEA组织协调的能源技术合作研究项目大部分都有美国的参与。美国倡议并创立了清洁能源部长级会议(CEM)，以促进全球在能源领域的合作，推动全球向清洁能源经济过渡。美国要保持其在清洁能源技术创新方面的全球领导地位，就必须继续支持和参与国际能源合作。

(张凯宏 郭楷模)

美信息技术与创新基金会发布全球能源创新指数报告

8月26日，美国信息技术与创新基金会(ITIF)发布了《全球能源创新指数：各国对全球清洁能源创新系统的贡献》报告²，基于技术研发、规模化应用和社会接纳三种维度14项评价指标，计算了23个加入“创新使命”(Mission Innovation)

² The Global Energy Innovation Index: National Contributions to the Global Clean Energy Innovation System. <http://www2.itif.org/2019-global-energy-innovation-index.pdf>

行动的成员国³能源创新指数，以评估各国对全球能源创新的贡献。报告指出，各国的贡献差异很大，相较于自身的经济规模，挪威、芬兰和日本对全球清洁能源创新做出了最重要的贡献。尽管美国宣布退出巴黎气候协定，但 2018 年其对清洁能源研发的公共经费投入总额居首位，超过了其后的中国和日本之和，在基础能源科学方面的公共经费投入总额也远超其他国家的总和。碳捕集与封存（CCS）、先进核电等资本密集型清洁能源技术示范规模不足是清洁能源创新体系中亟待改善的一个薄弱环节。报告主要内容如下：

一、全球能源创新指数评价指标体系

（1）“技术研发”维度（权重 50%）包含 4 个评价指标：①清洁能源技术研发示范（RD&D）公共经费投入强度（每千美元 GDP），②基础能源科学研究公共经费投入强度（每千美元 GDP），③清洁能源技术 RD&D 公共经费投入增幅（每千美元 GDP，以 2015 年为起点），④RD&D 技术多样性（用 Shannon-Wiener 多样性指数表征）；

（2）“规模化应用”维度（权重 25%）包含 6 个指标：①缓解气候变化技术高价值专利（专利族数量大于等于 2）申请量（每 10 亿美元 GDP，取 2013-2015 年平均值），②清洁能源示范项目公共经费投入强度（每千美元 GDP，2015-2018 年投入之和），③CCS 示范项目（二元变量“有、无”），④先进核电产业（二元变量“有、无”），⑤高影响力清洁技术初创企业数量（每万亿美元 GDP，来自美国 Cleantech 集团评选的全球清洁技术百强企业），⑥安永可再生能源国家吸引力指数（RECAI）；

（3）“社会接纳”维度（权重 25%）包含 4 个指标：①碳价格（化石燃料补贴计算为碳价格负值），②燃料税，③清洁能源技术 RD&D 公共经费投入占比（占能源技术 RD&D 公共经费总额的比例），④清洁能源技术 RD&D 国际合作参与度（作为创新使命挑战计划的牵头国或成员国）。

二、全球能源创新指数总体评价结果

1、从全球能源创新指数总得分来看，挪威居于首位，且在三个维度方面都位于前四名以内。在清洁能源技术 RD&D 方面，挪威和芬兰的每千美元 GDP 公共经费投入最多，且是仅有的两个投入强度水平达到专家建议的国家，日本位居第三且在规模化应用维度表现突出。相较于其经济规模，上述三国为全球清洁能源创新做出了最大贡献。

2、美国在总得分中排名第四，但其对清洁能源技术 RD&D 的公共经费投入绝对值最高，超过了排名二、三位的中国和日本总和。而且，美国在基础能源科学研究的公共经费投入比其他国家高出一个数量级，高于其他所有国家的总和。然而，

³ 阿联酋、澳大利亚、奥地利、巴西、丹麦、德国、法国、芬兰、韩国、荷兰、加拿大、美国、墨西哥、挪威、日本、瑞典、沙特阿拉伯、意大利、印度、印度尼西亚、英国、智利、中国

由于缺少碳价方面的措施，且燃料税较低，其社会接纳方面仅排第 15 位。

3、澳大利亚、意大利和荷兰在发达国家中总排名最低，主要原因是其在技术研发维度的贡献较低。

4、中国在总得分中排名靠后，位于第 15 位。中国在“规模化应用”维度表现相对较好（第 9），主要原因是在 CCS 和先进核能技术示范、吸引可再生能源投资方面均位居榜首。2018 年，中国对清洁能源技术 RD&D 的公共经费投入总额位居第二（38 亿美元），但是由于其对未配备 CCS 的化石燃料 RD&D 的投入抵消了对清洁能源技术创新的部分贡献，且排名基于公共经费投入强度来衡量，因此其“技术研发”维度排名第 15。过高的化石燃料消费补贴和化石燃料 RD&D 公共经费也使得中国在“社会接纳”维度的排名落后（第 19）。

三、不同维度指标评价得出的主要结论

1、各国在不同维度下的表现差异较大。芬兰在清洁能源技术研发投入方面表现最好，但其技术示范和专利申请的得分偏低，导致在规模化应用维度排名靠后。与之相反，中国由于支持 CCS 和先进核能技术的应用，并促进可再生能源的部署，因此在规模化应用维度居第九位，但其对化石燃料消费补贴使其在社会接纳维度排名倒数第五。

2、尽管各国加入“创新使命”行动均承诺在五年内将清洁能源 RD&D 的公共经费投入较 2015 年翻一番，但韩国、法国、意大利、荷兰、澳大利亚、瑞典、丹麦、挪威和芬兰等九国和欧盟目前的投入绝对值均低于 2015 年水平。大多数国家履行“创新使命”行动承诺的程度都有不足，只有沙特阿拉伯的清洁能源研发经费投入增长趋势有望实现翻一番至 1.5 亿美元，但与其 2018 年高达 447 亿美元的化石燃料消费补贴相比不值一提。

3、CCS 和先进核电等资本密集型清洁能源技术示范部署规模不足是全球能源创新体系中亟待改善的薄弱环节。尽管绝大多数国家正在或计划实施 CCS 示范项目，但其部署进展未达到实现 2050 年能源系统深度脱碳所需的规模。只有略超过一半的国家拥有先进核电产业，有 10 个国家不支持该技术，包括德国、挪威和荷兰等技术领先的国家，部分正使用该技术的国家（如韩国）也在考虑淘汰核电。高影响力初创企业对于推广清洁能源技术至关重要，然而公共政策能起到的促进作用有限，各国此类企业的数量差异很大，美国拥有全球近一半的高影响力初创企业，韩国、日本则远低于平均水平。

4、2018 年，中国、沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国、印度尼西亚、印度、墨西哥和韩国等 7 个国家为化石燃料消费提供了 1710 亿美元的补贴，远远超过 23 个国家和欧盟在清洁能源 RD&D 方面的投入总和（227 亿美元）。大多数国家能源 RD&D 公共经费投入都以清洁能源为目标，但墨西哥、中国、澳大利亚、挪威、意

大利和加拿大等 6 国仍将至少六分之一的经费用于传统化石燃料 RD&D 项目，其中中国将其能源 RD&D 预算的 40% 用于化石燃料。14 个国家在国家或省/州层面实施碳定价，或是参与欧盟碳排放交易系统。尽管如此，一些高排放国家的化石燃料补贴超过了上述国家的碳价水平，因此所有“创新使命”成员国的加权平均有效碳价为-3.44 美元/吨 CO₂。

（岳芳）

项目计划

欧洲能源研究联盟发布至 2030 年氢能与燃料电池研究规划

9 月 4 日，欧洲能源研究联盟（EERA）发布了新版《氢能与燃料电池联合研究计划实施规划》⁴，确定了欧盟到 2030 年在氢能与燃料电池技术领域的研究目标、行动计划和优先事项，以促进氢能与燃料电池技术的大规模部署和商业化。EERA 是欧洲最大的低碳能源研究非营利性国际协会，由超过 250 家公共科研机构 and 高校组成，是欧盟战略能源技术规划（SET-Plan）的研究支柱，目前共开展了 17 个低碳能源技术领域的联合研究计划，氢能与燃料电池是其中之一。本次更新的实施规划提出了 7 个子领域的研究重点和关键项目，并明确了实施优先级和预算：电解质；催化剂与电极；燃料电池电堆材料与设计；燃料电池系统；建模、验证与诊断；氢气生产与处理；氢气储存。详细内容如下：

一、电解质

1、燃料电池和电解质隔膜中输运过程研究。该领域计划投入 2400 万欧元资助 4 个项目，包括：聚合物和无机纳米结构复合材料中的离子输运研究；将宽带电子光谱（BES）、核磁共振（MRI）同步加速器和中子散射技术用于聚合物、氧化物/陶瓷材料的化学和输运特性研究；多相氧化物材料中的离子输运研究。

2、电解质材料降解过程及其缓解方法研究。该领域计划投入 4600 万欧元资助 5 个项目，包括：质子导电陶瓷基电解质材料的降解研究（尤其是在高压电解模式下）；开发监测隔膜和电解质降解的原位诊断传感器；利用 BES、MRI、同步加速器和中子散射等技术开发电解质降解现象的化学、结构和形态变化表征新技术，如；开发增强聚合物膜化学稳定性和机械稳定性的方法，并进行验证。

3、新型膜材料和薄膜电解质沉积方法。该领域计划投入 4200 万欧元资助 6 个项目，包括：开发稳定的碱性阴离子交换膜；开发具备质子电导率的中温固体氧化物燃料电池电解质；利用 3D 打印技术生产高表面积电解质的可行性研究；开发适用于 200-450℃ 的质子导电材料；通过新的电解质膜化学、设计和架构开发智能、自

⁴ EERA JP Fuel Cells and Hydrogen publishes its Implementation Plan up to 2030.
<https://www.eera-set.eu/eera-jp-fuel-cells-and-hydrogen-publishes-its-implementation-plan-up-to-2030/>

适应材料，以缓解材料随时间的老化；开发薄膜电解质沉积的新工艺和方法。

4、膜电极界面电解质研究。该领域计划投入 1000 万欧元资助 2 个项目，包括：通过性能、制备、加工路线、表征技术和工具研究，开发用于膜电极界面的改进离子聚合物；包含新型离聚物材料的油墨催化剂，研究电池运行过程中聚合物的降解现象。

5、在实际运行条件下膜电极组件电解质的性能和耐久性验证。该领域计划投入 1800 万欧元资助 4 个项目，包括：新型材料的耐久性研究；建立燃料电池和电解槽长期测试数据的开放获取数据库；材料重复利用的可行性研究。

二、催化剂与电极

1、燃料电池和电解槽电化学反应过程和材料基础研究。该领域计划投入 3600 万欧元资助 5 个项目，包括：电极、催化剂和载体的模型和表征；新型分段式双极板；实际运行条件下的催化剂表面结构研究；用于高温、电压跨度大的稳定氧电极；优化催化剂和电极性能。

2、电极、催化剂和载体的设计和开发策略。该领域计划投入 6500 万欧元资助 8 个项目，包括：集成电荷转移和催化活性的多功能电催化剂，用于含碳燃料；改进化学稳定性的质子交换膜燃料电池、便携式微流体燃料电池、直接甲醇/乙醇燃料电池，使电池具有更高活性和更佳性能；用于干燥环境的多相电极、结构化电极；耐腐蚀高温电极；中温电池（200–600℃）新型电极；纳米级催化剂、氧化物陶瓷电极和载体的稳定与控制；用于中温燃料电池中碳氢化合物直接利用的新型阳极电催化剂；低贵金属含量的阳极电催化剂，用于低温直接氧化甲醇/乙醇。

3、改进催化剂性能。该领域计划投入 3200 万欧元资助 3 个项目，包括：多功能电极材料，用于直接转化和合成氢载体，使用无毒、无害的原料作为电催化剂；非贵金属电催化剂的合成与表征；耐碱性介质腐蚀电极，质子-电子混合导电电极。

4、材料集成、电极设计与制造。该领域计划投入 5200 万欧元资助 3 个项目，包括：电池中先进电极的集成和示范；使用最少电催化剂的纳米结构电极概念原型；通过可升级、环保和自动化制造技术开发纳米结构电极。

三、燃料电池电堆材料与设计

1、连接件和双极板。该领域计划投入 4400 万欧元资助 8 个项目，包括：开发用于高温燃料电池和电解槽的无腐蚀陶瓷连接件的 3D 打印新工艺；开发用于集成电路（IC）的 3D 打印材料；开发 3D 打印的 IC 设计；开发连接件的铬蒸发阻挡层的低成本涂层技术；开发用于低温运行的新型 IC 材料；开发质子交换膜燃料电池双极板的非贵金属涂层；开发用于燃料电池和电解槽管状电池的连接件；开发燃料电池和电解池双极板性能和稳定性的原位表征方法。

2、接触和气体分布研究。该领域计划投入 2200 万欧元资助 5 个项目，包括：

低电阻和高稳定性质子交换膜燃料电池微孔层研究；热循环过程的接触损耗原因研究；电堆中电池互连的接触行为建模和仿真；新型阴极柔性接触层的开发；通过增材制造改善接触并减小面积比电阻。

3、电堆密封。该领域计划投入 3400 万欧元资助 10 个项目，包括：固态反应烧结法开发陶瓷密封；固态氧化物电池电解运行对电堆密封胶的影响研究；铸造和/或成型接近最终形状密封件的自动化生产；开发双极板或膜电极密封的低成本集成生产工艺；开发用于模块的玻璃-陶瓷密封胶；研究耐用和低成本密封的精确成型增材制造技术；开发密封材料以提高固态燃料电池电堆耐用性，实现 200 次以上热循环；不同玻璃-陶瓷密封胶材料的测试和表征；开发玻璃-陶瓷密封胶在工作条件下的表征方法；热循环过程中电堆热应力建模与仿真。

4、传感器新型设计。该领域计划投入 1400 万欧元资助 3 个项目，包括：基于 O₂ 压力差和/或湿度传感器开发燃料利用率传感器；嵌入式传感器；将诊断算法和传感器等硬件直接集成到现有燃料电池辅助系统（BoP）组件中。

5、电堆和 BoP 新型设计。该领域计划投入 3200 万欧元资助 7 个项目，包括：通过结合氧气运输膜更好地回收燃料；优化 BoP 以减少低温系统寄生损耗；开发加压制氢电解池新型设计，具有更高的稳定性和更低的成本；基于氢能和燃料电池的轻便高效便携式发电新概念；质子交换膜电池和超级电容深度集成的电堆概念。

四、燃料电池系统

1、系统组件材料开发。该领域计划投入 1800 万欧元资助 7 个项目，包括：燃料电池 BoP 组件的经济高效合金材料；高温 BoP 组件新型材料；高温热交换器用涂层开发；BoP 组件耐腐蚀涂层开发。

2、组件/功能开发。该领域计划投入 1500 万欧元资助 3 个项目，包括：在电堆中集成重整器和热交换器；开发选择性膜和其他燃料废气净化装置以获取热量、电力和氢气；开发阳极废气的再循环风机，用于蒸汽重整。

3、新系统概念开发。该领域计划投入 1500 万欧元资助 4 个项目，包括：联合固体氧化物燃料电池和燃气轮机的高度灵活热电联产系统，以及实现最高效发电；固体氧化物电池和储热结合，以最大化能量转换效率；固体氧化物电池和液态有机氢载体储氢结合，用于汽车和航空。

4、燃料电池和电解槽传感器及诊断工具。该领域计划投入 1000 万欧元资助 2 个项目，包括：集成燃料、温度、流量传感器的高温固体氧化物电池系统；集成传感器低温燃料电池和电解系统。

5、系统控制。该领域计划投入 1400 万欧元资助 2 个项目，包括：基于脚本的系统控制和运行自动化，以实现系统生命周期内简易低成本检测电堆性能；基于神经网络和人工智能的系统容错控制。

五、建模、验证与诊断

1、燃料电池组件建模。该领域计划投入 1000 万欧元资助 4 个项目，包括：利用从头计算法和连续模型，研究催化剂层的结构和物理特性，以改善其性能和耐久性；基于模型方法优化有源层结构以增加电池功率密度；多尺度输运机理研究以确定不同组件的最佳材料结构，开发快速可靠的多组件老化模型；通过双极板相变两相流仿真模拟以优化设计。

2、燃料电池单元、双极板建模及实验验证。该领域计划投入 900 万欧元资助 4 个项目，包括：电堆三维计算流体动力学（CFD）开源模型；用于下一代电池组的双极板设计和膜电极的共同优化；开发电堆先进三维模型，为开发模块化电池做准备；进行模型的实验验证。

3、燃料电池电堆建模。该领域计划投入 800 万欧元资助 2 个项目，包括：优化双极板、集电器等的参数、几何形状和配置，开发模型测试助剂对电池组性能的影响，并研究电池组与其他电气设备的相互作用，以优化电堆设计；电堆三维仿真、专有设计规则和最佳实践。

4、系统建模与控制。该领域计划投入 1400 万欧元资助 5 个项目，包括：开发可预测寿命的动态多物理场燃料电池系统模型；建立燃料电池系统数据库；不同环境下运行状况与寿命关系的模型研究；优化燃料电池管理系统，包括电池组和系统级的性能和耐用性；开放的快速原型仿真平台用于优化车用燃料电池系统。

5、开发表征工具。该领域计划投入 1100 万欧元资助 4 个项目，包括：从纳米级到微米级结构的多尺度表征；分段式双极板，用于局部检查和实时诊断；开发用于表征单个现象和微观结构的燃料电池先进异位测试方法，用于模型参数识别和模型验证；加速压力测试以验证老化模型。

六、氢气生产与处理

1、生物质/生物废物制氢。该领域计划投入 2000 万欧元资助 4 个项目，包括：非贵金属催化剂生物质制氢；高性能气化炉实现废物气化连续运行一万小时以上；改进催化剂和优化过程控制提高气化炉运行时间；废物制燃料的标准化并开发过程中燃料分析方法。

2、藻类制氢。该领域计划投入 3600 万欧元资助 3 个项目，包括：确定光转换效率高于 5% 的高性能藻类；藻类制氢用膜的开发，如聚合物和金属膜；生物水煤气变换反应中一氧化碳脱氢酶和[镍铁]-氢化酶对碳纳米管的生物功能化。

3、水热分解制氢。该领域计划投入 600 万欧元资助 1 个项目：开发水和二氧化碳低温热分解的新型催化剂。

4、更高效的光催化制氢。该领域计划投入 1600 万欧元资助 6 个项目，包括：共掺杂 $\text{TiO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4$ 纳米结构异质结作为光阳极，通过光催化水分解生产氢；通过改

进光催化剂提高产氢率；用于光催化水分解和生产太阳能燃料的纳米结构非贵金属催化剂；光催化重整醇类制氢的催化剂；光催化重整生物质制氢；人工光合作用的多尺度模型开发。

5、氢气压缩、液化和净化。该领域计划投入 1000 万欧元资助 4 个项目，包括：减少 70 MPa 金属氢化物氢压缩机一半能耗，集成膜反应器，提高现场生产和膜分离效率；将氢气液化能耗降低至现有值的 1/3；开发金属膜和陶瓷膜等材料，提高气体分离膜化学稳定性和机械稳定性及选择性。

6、其他制氢方法的安全、规范和标准。该领域计划投入 800 万欧元资助 4 个项目，包括：确定监测氢气质量的方法，开发氢气质量传感器，评估质量下降对氢装置的影响，开发可利用低品质氢气的固体高分子燃料电池（PEFC）；通过监控设备、传感器等评估在建筑物等空间内对氢气的处理；氢气生产的安全性和风险评估；建筑物中氢气使用的风险评估和指南。

七、氢气储存

1、压缩储氢和液态储氢。该领域计划投入 600 万欧元资助 4 个项目，包括：低于目前压缩气态储氢压力的碳纤维替代材料，如玻璃纤维或芳纶纤维；高压氢气对氢气管路、阀门、比例调节器的影响；高压氢气罐快速加注的控制系统；液态氢对连接管线、阀门、比例调节器等的影响。

2、氢气载体。该领域计划投入 2400 万欧元资助 15 个项目，包括：酰胺/酰亚胺基材料；利用体心立方结构合金储氢；基于轻元素的复合氢化物；新型稀土-镁-过渡金属（RE-Mg-TM）三元氢化物实现在环境条件下固态储氢；基于氨硼烷和/或硼氢化物的混合系统；复合氢化物；高熵氢化物；金属氢化物；在环境条件下不稳定但在较高氢气压力下稳定的材料；过渡金属-合金和金属有机框架（MOFs）复合材料，可在低温条件下吸附和吸收氢气；多孔材料（如包合物、多孔冰）储氢；用于液态化学储氢的硼氢化钠溶液及其他化合物（如氨硼烷）；液体有机氢载体，如甲酸、芳烃、酒精等；低成本金属和氢化物化合物副产物的可控水解和回收。

3、储氢系统。该领域计划投入 900 万欧元资助 5 个项目，包括：低温压缩储氢、固态压缩储氢；储氢罐与燃料电池系统集成；制定储氢规范。

（岳芳）

DOE 资助 1.1 亿美元推进 CCUS 项目研发和部署

9 月 13 日，DOE 宣布资助 1.1 亿美元支持先进碳捕集、利用与封存（CCUS）技术的研发、设计与试验⁵，以大力推动 CCUS 技术进一步发展、应用与大规模商业化部署。本次资助着重关注三大主题，包括煤炭和天然气电厂碳捕集系统的前端工

⁵U.S. Department of Energy Announces \$110M for Carbon Capture, Utilization, and Storage.
<https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-110m-carbon-capture-utilization-and-storage>

程设计(FEED)研究,加速 CCUS 区域部署以及碳封存保障设施事业(CarbonSAFE),具体内容如下:

1、煤炭和天然气电厂碳捕集系统的前端工程设计 (FEED) 研究 (资助金额: 5540 万美元)

在德克萨斯、伊利诺伊、加利福尼亚、北达科他和阿拉巴马州多家燃煤电厂和燃气联合循环发电厂完成基于胺基碳捕集工艺的燃烧后碳捕集系统前端工程设计研究,评估技术和经济可行性;对内布拉斯加州一座燃煤电厂改造加装基于新型化学溶剂吸收的先进碳捕集系统,并开展前端工程设计和成本核算研究,为后续的 CCUS 部署提供经济数据参考;在怀俄明州一座燃煤电厂完成基于膜法碳捕集技术的 CCUS 系统的前端工程设计研究,为大规模商业部署积累实践经验;在德克萨斯州一座燃气联合循环发电厂开展基于哌嗪(PZ)及其混合胺溶液 CO₂ 吸附新工艺的 CCUS 系统性能验证试验,评估 CO₂ 捕集效能和经济性。

2、加速 CCUS 区域部署 (资助金额: 2000 万美元)

巴特尔研究所和伊利诺伊州地质调查局领导下的美国中西部地区地质封存合作伙伴联盟合作,共同评估美国中西部和东北部三个盆地地区碳捕集和地质封存的潜力以及存在的技术挑战;新墨西哥州矿业技术学院将组建西部地区碳利用和封存合作伙伴联盟,对西部地区现有 CCUS 数据进行分类建库,并利用这些数据进行建模分析,为美国西部地区部署 CCUS 创建一系列成熟度指标;南部各州能源委员会将组建东南地区碳利用和封存合作伙伴联盟,旨在该地区确定至少 50 个合适的碳封存地点,同时解决该地区碳封存技术面临的关键技术挑战;北达科他大学将组建平原地区二氧化碳减排合作伙伴联盟,评估美国西北地区和加拿大各省的沉积盆地 CO₂ 地质封存潜力,加速上述地区的 CCUS 商业化部署进程。

3、碳封存保障设施事业 (资助金额: 3500 万美元)

完成一个 30 年内能够捕获 5000 万公吨 CO₂ 的商业规模二氧化碳地质封存场址的详细物理表征;申请并获得地下注入井六类井许可证,以建造注入井;完成二氧化碳捕集性能评估;并严格按照《国家环境政策法案》要求,开展封存场址的各项环境指标评估工作。

(廖明月 郭楷模)

DOE 资助 1520 万美元支持先进核能技术研发

9 月 10 日,美国能源部(DOE)宣布向 3 个先进核能技术项目提供 1520 万美元⁶,旨在组织以工业界为主导,联邦机构、公共和私人实验室、高校等共同参与的

⁶ U.S. Department of Energy Awards \$15.2 Million for Advanced Nuclear Technology.
<https://www.energy.gov/ne/articles/us-department-energy-awards-152-million-advanced-nuclear-technology-0>

新概念核能技术的研发工作，以推进下一代核反应堆的研发、示范和商业化，复兴美国核电产业。本次资助将重点关注两个领域：先进反应堆开发；先进反应堆设计认证及监管许可的管理。具体内容如表 1。

表 1 先进核能技术研发项目具体内容

主题	资助项目	资助金额/ 万美元
先进反应堆开发	轻水堆（LWR）和电解水制氢装置集成耦合系统接口技术的开发与示范。将在戴维斯-贝斯核电站上耦合集成一个低温电解水制氢装置，解决 LWR 和电解装置耦合系统运行所需的主要接口技术问题，如通过动态控制分配电网和电解装置的功率输出	918
	应用机器学习技术增强核电厂的诊断能力和预报能力。开发基于机器学习技术的解决方案，以改善和拓展核电厂预测维护过程的诊断能力和预报能力。整合来自约 15 个沸水反应堆（BWR）的多个燃料循环过程中收集的大量结构化和非结构化历史数据，以掌握核电厂组件的完整动态运行环境	548
先进反应堆设计认证及监管许可的管理	行波反应堆（TWR）先进燃料合格认证方法。为泰拉能源（Terra Power）公司的 TWR 撰写先进燃料合格认证方法报告，并将该报告提交给核监管委员会（NRC）进行审核。该过程和方法将适用于其他类型核燃料，从而帮助工业界解决燃料认证问题	49

（杨晓亮 岳芳）

澳大利亚可再生能源署资助电网消纳、氢能和工业脱碳研究

9 月 11 日，澳大利亚可再生能源署（ARENA）公布了新的可再生能源资助计划⁷，提出了三个新的研究优先领域，即电网消纳、氢能和减少工业碳排放，旨在进一步提高澳大利亚可再生能源技术的竞争力，促进澳大利亚能源系统向可再生能源顺利过渡。该计划面向澳大利亚的未来能源系统，提出克服可再生能源并网挑战，加速氢能产业发展以占据氢气出口的主导地位，并通过促进可再生能源在工业中的应用来降低排放，使澳大利亚成为可再生能源超级大国。计划提出的优先研究事项如下：

1、电网消纳可再生能源

（1）提高电网安全性和可靠性的新方法。主要包括：电网稳定性服务；新软件、算法和提高逆变器性能以增强系统稳健性；系统建模、预测和数据可视化工具以改善电力系统规划及为投资和运营决策提供依据；政策、监管框架或市场开发方案的研究；协调发电和输电投资的研究，输电和系统安全通用基础设施开发研究。

⁷ ARENA prioritises grid integration, hydrogen and reducing industrial emissions under new renewable energy plan. <https://arena.gov.au/news/arena-investment-priorities/>

(2) 电网灵活性和储能解决方案。主要包括：需求响应、抽水蓄能、电池、带储能装置的聚光式太阳能热发电、电制气（power-to-gas）和生物能等低排放灵活性技术的低成本高性能示范，或先进运行能力示范；上述灵活性技术商业部署途径的可行性研究。

(3) 分布式能源。主要包括：新的商业模式或方法以发挥分布式能源的潜在价值，降低电力系统总成本或提高稳定性；应用分布式能源背景下增强系统网络安全的技术和方法；用户体验和行为研究；基于数据的消费产品和服务；利用分布式能源优化配电网容量的技术；灵活负荷和分布式能源的集成与协调示范，如虚拟电厂模型、储热、建筑物作为分布式能源、电动汽车为电网提供服务等；改进监管框架以支持更多分布式能源。

(4) 电动汽车。主要包括：电动汽车可控充电、车辆到电网等技术的研究和示范，以验证技术、经济和监管方案；电动汽车充电数据收集。

(5) 光伏发电。主要包括：部署新的光伏发电商业应用；降低光伏成本，提高效率并开发报废设备的处理方案。

2、加速氢能发展

(1) 促进氢气出口。主要包括：促进澳大利亚氢气出口行业发展的可行性研究；降低液化成本或将氢气转化为其他出口产品的技术试点和示范。

(2) 氢气作为工业原料。主要包括：可再生能源电力制氢的商业部署可行性研究；可再生能源电力制氢的新型商业模式研究；将氢气用于新的工业过程的试点和示范。

(3) 将氢气注入天然气网络。主要包括：通过试点和示范获得将氢气加入天然气网络的实际应用成本和性能数据；通过首次示范解决天然气网络中加大氢气混合量的问题。

(4) 纯氢气网络。主要包括：通过试验和研究提供纯氢气网络的物流和经济数据；进行首次工业和家用纯氢气网络的示范；从混合氢气网络过渡到纯氢气网络的相关基础设施问题解决方案的首次示范。

(5) 交通运输。主要包括：氢动力汽车的示范；氢动力长途运输工具、重型车辆等试验和研究；通过多部门的示范提高氢气在交通运输领域的竞争力；降低加氢基础设施成本的技术首次示范。

(6) 将氢气用于电力部门。主要包括：将氢气用于偏远地区的电力系统；氢气支持可再生能源并网的研究和示范。

(7) 氢气新技术。主要包括：降低氢气供应链成本的技术首次示范；开发降低氢气供应链成本的变革性技术。

3、支持工业脱碳

(1) 重工业，如金属冶炼、合成氨、化学制药和水泥行业。重点关注将可再生能源及相关技术应用到能源密集型工业过程的可行性研究、示范和商业前部署。

(2) 其他工业，如食品、饮料、造纸、砖和陶瓷、木材和木制品、采矿等。重点关注：将可再生能源及相关技术应用到制造过程或现场的可行性研究、示范和商业前部署；将可再生能源及相关使能技术应用到绿地项目或棕地项目的示范，以实现 100% 使用可再生能源的工业；信息和知识共享；模块化、分布式可再生能源技术的示范。

(3) 跨部门应用。在低温工业过程应用如下技术：生物质或沼气锅炉；太阳能热利用技术，如平板集热器、真空管集热器、抛物线槽集热器、线性菲涅尔集热器等；机械式蒸汽再压缩技术；热泵或其他电气化技术；可再生能源制氢。在高温工业过程中应用如下技术：太阳能热利用技术，如定日镜、碟式集热器；电磁、电阻、电弧等电加热技术；可再生能源制氢。通过工业生态园示范余热或其他能源的协同利用。

(岳芳)

前沿与装备

新工艺有机太阳能电池理论寿命超过两万年

有机太阳能电池光电转换效率已经突破 15%，达到了商业化应用的标准，且具有制备成本低廉、工艺简单、机械柔韧性良好等诸多优点，在便携式可穿戴领域具备广阔的应用前景。然而目前有机太阳能电池稳定性仍然较差，难以满足户外真实环境使用的需求，亟待改善。密歇根大学 Stephen R. Forrest 教授研究团队利用热蒸发方法制备了基于邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) / 富勒烯衍生物 (C₇₀) 活性层的有机太阳能电池，并引入了 n-型有机小分子 TPBi:C₇₀ 作为正极缓冲层，大幅提升了器件的稳定性，获得了超长寿命的电池器件。该器件在一个标准模拟太阳光辐照下连续运行 9000 余小时（相当于一整年）后转换效率依旧维持初始效率的 90% 以上，由此推算出理论寿命可以长达 27000 余年，表现出惊人的长程稳定性。研究人员首先利用热蒸发方法在透明导电薄玻璃 ITO 上逐层沉积氧化钼 (MoO₃)、DBP/C₇₀ 活性层，以及正极缓冲层 TPBi:C₇₀，以及铝对电极薄膜，形成完整的有机太阳能电池器件并进行电池封装保护。接着将封装好的电池器件置于一个标准的模拟太阳光辐照下（光强度为 1 kW/m²）进行电流电压测试，电池器件获得了 12.45 mA/cm² 短路电流密度，0.91 V 开路电压，60% 的填充因子，从而取得了 6.7% 的光电转换效率。随后开展器件的老化测试，发现电池经过 5000 小时运行后，性能没有出现任何的衰退；运行 7300 小时后仅仅衰减 3%，9000 小时后衰减依旧不超过 10%，表现出了惊人的稳定性。由于在标准太阳光下器件稳定性极佳，老化速率极慢。为此研究人员提升了测试的苛

刻条件，将模拟光源的辐照强度进行提高（10 个、20 个到 37 个标准的模拟太阳光辐照强度）以加速电池老化速度，实验结果显示电池的降解速率随光照强度呈超线性增加。在最大的 37 个标准模拟太阳光辐照下，电池运行 68 天后仍可保留初始效率的 87%，依旧表现出优秀的稳定性。依据上述实验结果，研究人员据此模拟推算出该有机太阳能电池器件其固有寿命 T_{80} （ T_{80} 是电池光电转换效率降低至其初始值 80%所需的时间）超过 4.9×10^7 小时，相当于可以在户外真实环境运行 27000 余年。最后研究人员将制备的同批次不同电池器件置于辐照条件更加苛刻的环境，即 20 个标准太阳光辐照强度的纯紫外线照射（中心波长为 365 纳米）下辐照 848 小时，实验结果显示器件效率基本没有损失，这相当于在室外环境运行 9.3 年而没有出现性能衰退。综合上述实验结果，新架构的有机太阳能电池器件展现出了前所未有的长程稳定性。该项研究精心设计制备了新架构的有机太阳能电池器件，不仅在标准太阳光辐照下具备了优异的稳定性，在高强度辐照下依旧展现出良好稳定性，其在一个标准模拟太阳光辐照下连续运行 9000 余小时后性能衰减不到 10%，理论寿命可以长达 27000 余年，使得有机太阳能电池向实用化迈进了一大步。相关研究成果发表在《Nature》⁸。

（郭楷模）

全钙钛矿双结叠层太阳能电池创下 24.8%转换效率纪录

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%）强有力的技术路径。但目前叠层电池主要还是局限在传统的无机半导体（如晶硅、碲化镉等），制备工艺复杂和成本高昂，且主要刚性电池结构应用范围有限。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，且其能够很容易柔性化，可以应用于各种复杂几何表面结构，应用范围更广。多伦多大学 Edward H. Sargent 教授课题组牵头的国际联合研究团队报道了一种有效抑制含锡元素的窄带隙钙钛矿中二价锡离子（ Sn^{2+} ）的氧化反应策略，从而有效钝化了钙钛矿薄膜的晶界，减少了薄膜的缺陷态，得到了高结晶质量薄膜，获得了长达 3 μm 的载流子扩散程（载流子扩散程越大，寿命越长，电池电流就越大）。随后将该窄带隙电池器件与宽带隙钙钛矿太阳电池串联形成两端点接触的全钙钛矿双结叠层太阳电池，小面积（0.049 cm^2 ）叠层电池获得了高达 24.8%的转换效率，创下了全钙钛矿双结叠层太阳电池效率纪录，更为关键的是该器件还具备了极其优异的长程稳定性，有力地推动了钙钛矿太阳电池从实验室走向商业化。研究人员配置了含有铅（Pb）和锡（Sn）双金属的钙钛矿前驱体，随后往前驱体中添加微量的 Sn 金属粉末，以抑制 Sn^{2+} 氧化反应，减少 Sn 空位的产生，减少缺陷态密度，增加

⁸ Quinn Burlingame, Xiaheng Huang, Xiao Liu, et al. Intrinsically stable organic solar cells under high-intensity illumination. *Nature*, 2019, DOI: 10.1016/j.joule.2019.07.015

载流子寿命。接着利用旋涂法制备了双金属双阳离子钙钛矿薄膜 $\text{MA}_{0.3}\text{FA}_{0.7}\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{I}_3$ ，紫外可见光谱测试结果显示该薄膜的光响应截止点在 1000 nm，通过计算可知其带隙为 1.22 eV，为窄带隙结构。载流子寿命表征结果显示无 Sn 金属粉前驱体制备的 $\text{MA}_{0.3}\text{FA}_{0.7}\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{I}_3$ 薄膜的载流子寿命和扩散程分别为 3 ns 和 0.75 μm ，而含有 Sn 金属粉的薄膜寿命和扩散程大幅增加到了 43 ns 和 2.99 μm 。为了探究载流子寿命和扩散程改善的潜在缘由，研究人员进一步通过空间电荷限制电流开展了薄膜缺陷密度研究，实验发现加入 Sn 金属粉后薄膜的空穴缺陷态密度从无 Sn 粉的 $2.14 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 减少到了 $1.06 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，缺陷态减少从而减少了载流子复合损失增加了载流子寿命和扩散程。随后研究人员以上述含有 Sn 金属粉的窄带隙钙钛矿薄膜作为光敏层制备了完整的电池器件，与宽带隙（1.77 eV）的钙钛矿电池器件进行串联，形成两端接触全钙钛矿叠层太阳电池。电流电压测试结果显示小面积（0.049 cm^2 ）叠层电池光电转换效率最优值可达 24.8%，这是目前双端接触全钙钛矿双结叠层太阳电池的最高效率（此前的最高值是 23.1%，由美国国家可再生能源实验室创造），且未封装电池在 1 个标准模拟太阳光辐照下连续工作近 500 小时后仍可维持 90% 的初始效率，表现出优异的长程稳定性。此外，研究人员还制造了大面积器件（1.05 cm^2 ），仍然获得了极高的转换效率，达到了 22.3%，表现出规模化制造潜力。该项研究首先精心设计了抑制含锡元素的窄带隙钙钛矿中二价锡离子（ Sn^{2+} ）的氧化反应策略，有效地消减了薄膜中的缺陷态密度，改善了载流子寿命；在此基础上将其与宽带隙的钙钛矿薄膜电池组合成两端点接触的叠层电池，小面积电池获得了 24.8% 的转换效率，刷新了该类型电池效率的世界纪录；此外，大面积器件也可以获得 22.3% 的高效率，同样创造了大面积同类型电池器件的效率纪录；并且电池具备了优异的长程稳定性，有助于推动钙钛矿太阳电池的商业化进程相关研究成果发表在《*Nature Energy*》⁹。

（程向阳 郭楷模）

基于全柔性组件的柔性可伸缩全固态锂电池

伴随着柔性便携式、可穿戴电子设备的快速发展，高性能柔性储能器件的开发成为近期研究的热点。但当前消费电子领域常用的锂离子电池通常都是刚性的。为了跟上柔性电子器件的发展速度，亟需开发高性能长寿命的柔性电池技术。瑞士苏黎世联邦理工学院 Markus Niederberger 教授课题组制备出了全球首个全组件（电极、电解质、集流体等）具备柔性可伸缩特性的柔性全固态锂电池，在 50%（相比原始长度而言）的拉伸状态下，电池循环 50 次后可以获得 20 Wh/kg 能量密度，呈现出

⁹ Renxing Lin, Ke Xiao, Zhengyuan Qin, et al. Monolithic all-perovskite tandem solar cells with 24.8% efficiency exploiting comproportionation to suppress Sn(ii) oxidation in precursor ink. *Nature Energy*, 2019, DOI: 10.1038/s41560-019-0466-3

优异的抗形变能力。研究人员将炭黑 (CB) 和碳纳米管 (CNT) 作为溶质置于甲苯、四氢呋喃、正己烷和苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS) 等混合溶剂中形成前驱体, 随后利用旋涂法将其沉积在涂覆有银纳米片的玻璃衬底上, 通过干燥处理后获得了 SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜, 扫描电镜表征显示该复合薄膜呈现多孔形貌, Ag 微米片连续均匀覆盖在多孔薄膜上。这种复合结构具有多重优点, 一方面由于 Ag 微米片的引入导电性极大改善, 另一方面导电聚合物基底 SEBS/CNT/CB 具备良好的柔韧性, 使得复合物具备了良好的抗拉伸特性, 即当复合薄膜 SEBS/CNT/CB/Ag 受到拉伸应力作用时, 具备可伸缩特性的导电聚合物基底 SEBS/CNT/CB 能够有效地缓解刚性 Ag 微米片脆裂带来的导电性下降。在不同拉伸应力 (0%, 50%, 100%) 作用下测试复合薄膜方块电阻 R_s 的变化情况, 实验结果显示 50%、100% 拉伸应力作用下, SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜 R_s 与原始状态的复合薄膜没有太大变化, 表明了 SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜确实具备良好的抗拉伸特性。接着以 SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜为集流体, 通过喷涂法分别将正极锂锰氧 (LiMn_2O_4) 和负极氧化钒 (V_2O_5) 材料涂覆在集流体上, 形成柔性可伸缩的正负极; 同时制备与之相匹配的柔性全固态凝胶电解质。接着将上述柔性可伸缩的组件正负电极、电解质组装成全电池进行电化学性能测试, 这是目前文献报道的首个基于全柔性组件的柔性全固态锂电池。在 120 mA/g 放电电流密度下循环 50 次, 未拉伸处理的柔性全固态电池获得了 43 mAh/g 可逆放电比容量, 35 Wh/kg 能量密度; 而经过 50% 拉伸应力作用后, 电池可以获得 28 mAh/g 可逆放电比容量, 17 Wh/kg 能量密度, 表现出良好的抗拉伸形变能力。该项研究设计制备出了一种全新的柔性可伸缩锂电池, 其电池所有组件均具备可伸缩的机械柔韧性, 使得电池器件具备了良好的可伸缩特性, 为柔性可穿戴电子设备电池电源研发设计提供了新思路。相关研究成果发表在《*Advanced Materials*》¹⁰。

(郭楷模)

双活性位点非金属催化剂实现中性溶液中高效裂解水产氢

开发非贵金属的裂解水产氢催化剂是当前催化领域的研究热点之一。但大多数催化剂仅能在酸性或碱性条件下发挥作用, 能在中性溶液中高效运行的催化剂少之又少。通过析氢反应 (HER) 催化剂从温和的中性溶液 (例如生活废水和海水) 中催化生成氢气 (H_2), 是非常环保且具有成本效益的, 因此开发能够在中性条件下实现高效 HER 催化剂意义重大。由西北太平洋国家实验室 Yuyan Shao 教授课题组牵头的国际联合研究团队成功设计制备了一种具备双活性位点的非金属催化剂, 得益于双活性位点协同作用, 实现了在 pH 中性溶液中高效催化裂解水产氢, 且催

¹⁰ Xi Chen, Haijian Huang, Long Pan, et al, Fully Integrated Design of a Stretchable Solid-State Lithium-Ion Full Battery. *Advanced Materials*., 2019, DOI:10.1002/adma.201904648

化活性优于传统的铂贵金属催化剂。研究人员通过将富含钼 (Mo) 元素的金属氧酸盐在 700 °C 下通过磷化反应和相结构控制, 得到具备二磷化钼 (MoP₂) 和磷化钼 (MoP) 双活性位点复合催化剂 MoP₂/MoP, 同时还制备了单一相结构的 MoP_x (x 为摩尔比, x=1 或者 2) 催化剂用于对比研究。扫描透射电镜表征显示, 合成的催化剂样品平均颗粒尺寸在 8-30 nm 之间, 但与单一相结构催化剂不同的是, 复合催化剂 MoP₂/MoP 出现了两套晶格常数, 其中 0.21 nm 对应 MoP 的 (101) 晶面, 0.56 nm 对应 MoP₂ 的 (020) 晶面, 表明了复合催化剂属于异质结构。X 射线光电子能谱分析 (XPS) 表明, MoP₂/MoP 中的 Mo 和 P 分别增强了正电荷和负电荷数量, 形成了较强的 Mo⁺-P⁻ 网络, 可以促进 H₂O 分子的解离, 从而提升 HER 催化活性。在 0.1 M 氢气 (H₂) 净化中性的磷酸盐缓冲溶液中测试不同催化剂 (MoP₂/MoP、Pt/C、MoP₂、MoP) 的 HER 活性。实验结果显示, 复合 MoP₂/MoP 催化剂起始过电位为 75 mV, 略高于贵金属 Pt/C 催化剂 (45 mV), 在 10 mA/cm² 电流密度的过电位为 196 mV, 接近贵金属 Pt/C 催化剂 (181 mV), 远低于单一相结构的 MoP₂ (267 mV) 和 MoP (327 mV) 催化剂, 为目前报道的催化剂中具有最优异的中性 HER 催化活性。塔菲尔斜率曲线显示, MoP₂/MoP 催化剂斜率最小, 且遵循 “Volmer-Tafel” 反应机制, 显示出其具备了较强的 H₂O 解离能力。同时, 电化学阻抗谱测试结果显示 MoP₂/MoP 还具备了优异的电子传输能力, 有助于析氢反应进行。接着将 MoP₂/MoP 应用于微生物电解池 (MEC, 主要用来处理污水), 测试其真实环境中催化性能, 发现在相同的负载量 (0.5 mg/cm²_{cathode}) 情况下, MoP₂/MoP 催化剂可以产生最大的电流密度 157 A, 高于 Pt/C 催化剂 (145 A); 最后研究人员还探究了其在海水中的性能, 发现同样具备了高效且稳定 HER 催化活性。密度泛函理论计算研究表明, MoP₂/MoP 催化剂优异的 HER 催化活性主要是来源于双活性位点的协同作用, 其中 Mo-MoP₂ 活性位点增强了 H₂O 解离, Mo-MoP 活性位点则增强了氢键形成。该项研究精心设计合成了 MoP/MoP₂ 异质结构的复合催化剂, 中性 pH 溶液中具有比商用 Pt/C 更出色的 HER 活性及稳定性, 甚至比真实的 MEC 设备 (废水作为原料) 和天然海水中的 Pt/C 催化剂还要好。实验和理论研究证实了 MoP₂ 和 MoP 两相之间的协同机制使复合催化剂获得了增强的中性 HER 催化活性。为设计和合成无贵金属、高效且生物相容性的新型产氢催化剂提供了一个新思路。相关研究成果发表在《ACS Catalysis》¹¹。

(郭楷模)

¹¹ Xiaohong Xie, Miao Song, Luguang Wang, et al. Electrocatalytic Hydrogen Evolution in Neutral pH Solutions: Dual Phase Synergy. *ACS Catalysis*, 2019, 998712-8718.

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

微信公众号：CASEnergy

