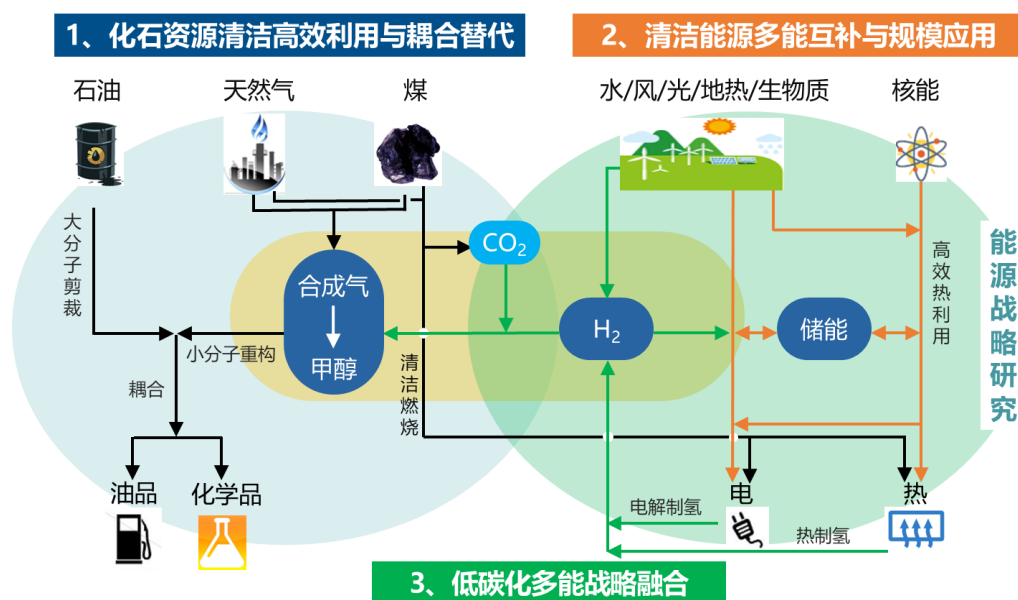




洁净能源科技动态监测快报

2021 年第 11 期（总第 25 期）



本期看点

- IEA 《世界能源展望 2021》：实现净零排放需要更高减排承诺
- IEA 《全球氢能评估报告 2021》提出氢能未来发展战略建议
- 英国发布 2050 净零排放战略
- 美国能源部资助超 2 亿美元支持先进动力电池技术研发
- 德国氢能研究网络发布氢能研发需求专家建议报告
- 日本 NEDO 投入 160 亿日元资助 CO₂ 资源化利用技术开发

目 录

2021 年第 11 期 (总第 25 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

- DOE 化石能源办公室发布矿产可持续发展多年期计划..... 2
- 美国能源部资助 4500 万美元开发天然气发电和工业 CCS 技术..... 6
- 巴斯夫将在未来五年扩大应用化工脱碳新技术..... 8

◆ 清洁能源多能互补

- 英国发布 2050 净零排放战略..... 9
- 美国能源部资助超 2 亿美元支持先进动力电池技术研发..... 12
- 美国能源部部署先进太阳能发电研发项目推进电力系统脱碳..... 13
- 工业级封装工艺有效解决钙钛矿太阳电池铅元素泄漏问题..... 14
- 普适性新型整合剂开辟非锂储能电池研究新路径..... 15

◆ 低碳化多能融合

- 德国氢能研究网络发布氢能研发需求专家建议报告..... 17
- 美国能源部投入 2000 万美元支持核能制氢..... 20
- 日本 NEDO 投入 160 亿日元资助 CO₂ 资源化利用技术开发..... 20
- 英国投入 5500 万英镑支持工业低碳替代燃料技术..... 21
- 高性能析氧反应单原子铈催化剂大幅提升电解制氢效率..... 22
- 新型低成本合成路线实现电池级钠盐 NaPF₆ 制备浓度突破..... 23

◆ 能源战略研究

- IEA 《世界能源展望 2021》: 实现净零排放需要更高减排承诺..... 25
- IEA 《全球氢能评估报告 2021》提出氢能未来发展战略建议..... 33

本期概要

国际能源署 (IEA) 发布《世界能源展望 2021》报告, 指出目前各国政府的**减排承诺及政策措施无法实现到 2050 年净零排放目标**。报告要点包括: 随着清洁能源技术的快速发展, 新的能源经济格局正在形成, 清洁技术已成为电力和各种能源终端应用的首选技术。然而, 不同情景模型下全球气候变化差异明显, 当前政策框架和措施尚无法实现已承诺目标, 而且即使实现承诺目标仍无法在 2050 年达到净零排放。加快电气化、提高能效、减少甲烷排放以及推动清洁能源创新, 将有助于将全球温升控制在 1.5°C 以内。同时, 能源转型中还存在多种不稳定性, 将导致全球贸易紧张和技术转让限制。低排放替代燃料 (如现代生物能源和氢基燃料) 将对实现净零排放目标发挥关键作用。

国际能源署 (IEA) 发布《全球氢能评估报告 2021》, 提出了**氢能的未来发展战略建议**: 报告强调, 氢能尤其在难减排的行业 (如化工、钢铁、长途卡车运输、海运和航运等行业) 具有重要应用潜力; 全球到 2030 年需投资 1.2 万亿美元, 以构建全球氢能市场, 实现全球净零排放。报告总结了当前主要国家的氢能战略布局情况, 评估了氢能制、储、输、用全价值链各项技术的成熟度水平, 以及具备潜力的低碳制氢技术。针对氢能未来发展, 报告提出了五大战略性建议: 各国需要制定氢能战略/路线图; 发展低碳制氢技术; 推进氢能项目投资; 加速技术创新和商业化; 构建配套的认证、标准和监管体系。

英国政府发布《净零战略》, 阐述了英国实现到 2050 年净零排放承诺的**重要举措**。该战略以英国“绿色工业革命十点计划”为基础, 制定了全面的计划以降低所有经济部门的排放, 涵盖电力, 燃料供应及氢能, 工业, 供热及建筑, 交通, 自然资源、废物和含氟气体等, 同时提出利用温室气体去除技术减少剩余排放, 支持英国向清洁能源和绿色技术转型, 逐步实现净零排放目标。根据该战略, 英国到 2030 年将撬动 900 亿英镑的私人投资, 创造 44 万个绿色产业岗位。

美国能源部 (DOE) 宣布资助 2.09 亿美元支持先进动力电池技术研究, 涵盖**四大主题领域**: 用于锂金属电池的固态电解质, 快充电池技术, 电动汽车技术, 基于互联网的先进自动驾驶技术。

美国能源部 (DOE) 化石能源与碳管理办公室发布矿产可持续发展多年期计划, 提出了**长期愿景、使命和目标**: 该计划围绕矿产供应链 4 个技术领域提出了未来研发、示范及部署的方向、需求和目标, 包括: 资源表征和技术开发; 可持续资源开采技术开发; 加工、精炼和合金化技术开发; 加工、制造技术开发。

德国氢能研究网络发布氢经济价值链研发需求的专家建议报告, 针对氢能价值链各环节提出了**未来主要研发需求, 包括如下领域**: 氢及氢基产品生产; 基础设施和系统集成; 氢能应用; 氢能安全性、接受度和可持续的市场部署。

日本新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) 宣布将在“碳循环、下一代火力发电等技术开发”框架下, 2021-2025 年投入 160 亿日元支持 6 个新增研发主题以推进 CO₂ 资源化利用, 包括: CO₂ 直接合成制烯烃技术研发; CO₂ 合成甲醇的优化系统开发; CO₂ 大规模制甲烷及注入天然气管道技术; 炼钢炉渣固定 CO₂ 工艺开发; 炼钢炉渣快速大量固定 CO₂ 创新技术开发; CO₂ 化学分解制碳材料技术开发。

化石资源清洁高效利用

DOE 化石能源办公室发布矿产可持续发展多年期计划

10月20日，美国能源部（DOE）化石能源与碳管理办公室（FECM）发布矿产可持续发展多年期计划¹，提出了未来的长期愿景、使命和目标，旨在促进行业建立关键矿物供应链，以支持美国向清洁能源经济转型。该计划围绕矿产供应链3个环节的4个技术领域提出了未来的研发示范及部署方向、需求和目标，包括：资源表征和技术开发；可持续资源开采技术开发；加工、精炼和合金化技术开发；加工、制造技术开发。关键内容如下：

一、愿景及使命

1、愿景。促进建立环境和经济可持续发展的关键矿物和含碳矿产资源回收行业，以支持：（1）清洁能源部署，包括创造制造业就业岗位；（2）建立安全、多样化、有弹性的国内关键矿物供应链；（3）开发联合生产和回收技术，促进环境和社会公平。

2、使命。支持向无碳经济和清洁能源制造转型：（1）从化石能源相关副产品和相关资源中表征和评估国内关键矿物和含碳矿产资源；（2）开发先进的资源开采、加工和提炼冶金技术；（3）评估关键矿物和含碳矿产联合生产高价值产品的潜力。

二、关键技术领域的未来方向

1、资源表征和技术开发

（1）研发、示范及部署方向

①关键矿物（CM）资源表征。该领域的研究活动集中在样本/岩心、露头/矿场和区域的特征活动。将进行特征表征，为非常规和二次来源的关键矿物和含碳矿产资源制定一份区域和国家清单。工作重点是开发和应用新技术，为实验室和现场方法制定标准化流程和最佳方案，并确定关键矿物和含碳矿产资源潜力。

②资源评估和预测。该领域的研究重点是开发能够无缝集成样品和现场表征结果的可靠方法，例如使用人工智能/机器学习（AI/ML）资源模型，以预测目前非常规和二次来源中关键矿物和含碳矿产的位置、含量和价值。

（2）研发、示范及部署需求

①关键矿物资源表征。开发标准化流程（实验室和现场）和技术，用于确定、表征和评估特定材料、矿场或区域内非常规和二次来源的潜在关键矿物和含碳矿产

¹ Multi-Year Program Plan for Division of Minerals Sustainability. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-10/MSD%20Multi-Year%20Program%20Plan%202021_0.pdf

含量。使用创新的、现场可用的手持式分析仪，如 X 射线荧光光谱仪（XRF）、便携式激光诱导击穿光谱仪（LIBS）和拉曼光谱仪（Raman）等，以降低勘探成本，实现快速采集信息，并推进关键矿物和含碳矿产资源的预测和评估。集成多种测量技术，如地球物理（地震、磁力和重力）测量、激光雷达、数字钻孔和岩心扫描系统等。通过开发标准化协议和最佳实践来支持野外勘探，充分利用先进光谱技术，例如 X 射线吸收近边结构（XANES）、拉曼光谱和傅里叶变换红外光谱（FT-IR）、高分辨率电感耦合等离子体光学发射光谱仪/质谱仪（HR-ICP-OES/MS）等光谱测定法，以及扫描电子显微镜（SEM）、激光诱导击穿光谱（LIBS）、激光烧蚀电感耦合等离子体质谱仪（LA-ICP-MS）等空间表征技术。

②资源评估和预测。开发用于不确定性计算的关键矿物和含碳矿产标准化产出概率模型。利用 AI/ML 技术，将样品和现场表征结果集成到区域资源模型中，用于计算非常规和二次来源的资源潜力。开发集成资源矿床和产出概率模型的区域和国家 AI/ML 模型，实现快速预测非常规和二次来源中的关键矿物和/或含碳矿产的位置、含量和价值。

（3）研发、示范及部署目标

识别和验证“最合适”的新领域和实验室技术，以及高精确度和精密度的技术。为现场和实验室的表征方法制定标准流程和最佳实践。利用新收集样本和历史样本以及现场表征结果，开发标准化的产出概率模型。基于 AI/ML 技术开发区域和国家级方法，预测非常规和二次来源的位置、含量和价值。

2、可持续资源开采技术开发

（1）研发、示范及部署方向

①变革性、非常规和常规开采技术。研究旨在开发新的战略和技术，以环境友好的方式从非常规和二次来源中安全提取关键矿物和含碳矿产。

②工业选矿方法与技术。开发处理关键矿物和含碳矿产的创新技术和选矿策略。该技术可使关键矿物含量提高 5-10 倍，通过选矿来提高含碳矿产品位。

③现有矿场和废弃矿山残留物的环境修复。从二次来源生产关键矿物和含碳矿产将有助于解决与矿山废物有关的环境遗留问题。需要制定减少和消除矿山残留物的策略、风险评估方法和最佳实践，鼓励清理现有和废弃矿场，同时为弱势社区提供经济和环境效益。

（2）研发、示范及部署需求

①变革性、非常规和常规开采技术。该领域的研究将建立在现有技术和新技术的基础上，提高效率和产量，同时最大限度地减少浪费、降低风险。技术开发以及现场验证包括：“选择性”水平钻探、原地浸出、农业采矿或生物采矿，从主岩中提取所需原料；通过微生物-矿物相互作用数据库和数据驱动分析技术（如 AI/ML），

降低生物采矿试剂使用的不确定性；开发新型过滤器和膜技术，进而提高关键矿物回收率，以及从废水中进行高特异性分离。

②工业选矿方法和技术。通过生产高富集关键矿物或含碳精矿，降低将物料运输到加工设施的成本，并减少浸出所需的化学品用量。研究途径包括：识别（从地表和地下开采）和开发新的矿物精选方法和技术，以提高关键矿物和含碳矿产的含量和品位，改善环境性能，并提高能源效率；使用数据库和 AI/ML 技术为特定原料选择适当的精选方法和精选策略；将关键矿物和含碳矿产的联产与当前的工业活动相结合。

③现有矿场和废弃矿山残留物的环境修复。为了减少和消除矿山残留物，必须确定对矿区进行分类和优先排序的最佳做法。这将通过：与其他联邦机构合作，制定评估方法和最佳做法，以便对矿址进行分类和优先排序，并评估环境问题和资源集中情况；组织外联活动和社区参与，讨论社区可获得的环境和经济效益。

（3）研发、示范及部署目标

开发和验证从非常规和二次来源中安全地提取关键矿物和含碳矿产的技术和工艺。开发和验证非常规和二次废水来源的提取技术和工艺。开发和测试现场精选技术并示范：**①**提高非常规和二次来源的关键矿物含量；**②**以经济的方式回收细粒煤颗粒；**③**通过精选技术从煤废料中获得高价值材料。设计最佳做法，在考虑风险评估和资源集中度等因素的情况下，对矿场进行分类和优先排序。

3、加工、精炼和合金化技术开发

（1）研发、示范及部署方向

①先进的分离和金属还原技术。研究不仅涉及从高纯度混合精矿中生产稀土元素（REE）和关键矿物并转化为金属进行合金化的常规技术，还将涉及先进或新型分离技术和金属还原工艺，有可能使资本和运营支出成本比当前的常规标准做法低 20%。

②实现商业化生产。研究将确定创新路径以提高生产率，降低成本，减少环境影响。

③试点示范。研究将以更大的中试规模来示范非常规和二次来源关键矿物生产技术。新试点设施将建立在前几代设施的基础上，以增强环境绩效并降低运营成本。

（2）研发、示范及部署需求

①先进的分离和金属还原技术。该研究的目的是提高关键矿物和单独分离的高纯度稀土氧化物和/或稀土盐的整体回收率和纯度。将开发先进的、环境友好、低成本的高纯度单独分离技术和金属还原概念。

②实现商业化生产。将继续开发创新技术并进行进一步验证，以提高生产率、降低成本并减少任何潜在的环境影响。该领域的研究将包括：开发和验证新概念，

以实现当前方法的创新，测试结果将用于技术经济评估，将现有加工系统与替代技术进行比较；确定并增强国内稀土、关键矿物和含碳产品的联产潜力，使金属提取、分离和回收加工更加经济和有利可图，将通过开发热力学和动力学 AL/ML 数据库以减少金属提取和分离技术的不确定性。

③**试点示范**。该领域的研究活动着重于进行不同规模的试点示范，从第一代混合稀土氧化物（MREO）和混合稀土盐（MRES）产量为 1-3 吨/天的试验规模，到第二代示范/近商业项目（生产规模为 10 吨/天），两者均具备高纯度单独分离和金属还原能力。

（3）研发、示范及部署目标

开发对环境无害的提取、分离和回收关键矿物和稀土元素工艺，最大限度地减少化学品的消耗和废料生成。开发用于清洁能源制造的非常规国内原料资源的关键矿物加工能力。启动第一代设备的最终设计、建造和运行，除了可以生产 1-3 吨/天的混合稀土氧化物和混合稀土盐，还可联产关键矿物和其他初级产品（如水泥工业用沸石和粉煤灰）。设计、建造和运行设备，生产单独分离的高纯度稀土元素和关键矿物，以及满足终端用户要求规格的混合稀土氧化物金属还原设备。设计、建造并部署第二代示范/商业化混合稀土氧化物设施，每天生产 10 吨混合稀土氧化物和混合稀土盐，并具有生产单独分离的高纯度稀土氧化物和稀土盐并随后还原为金属的能力。

4、加工、制造技术开发

（1）研发、示范及部署方向

①**建筑和基础设施开发**。该领域的研究旨在通过开发大型替代用途试点项目，支持开发高价值碳基建筑和基础设施材料。第一代试点项目确定和开发从批量生产向连续生产碳基材料的技术。

②**先进碳材料生产**。该领域的研究活动包括实验室/台架规模的高效加工技术的开发和放大，以生产碳纤维、石墨烯、石墨等产品。

③**对关键供应链进行再投资**。该领域的研究包括制定战略以建立弹性供应链，使国内煤炭和煤炭副产品能够生产石墨和金属硅等产品。

（2）研发、示范及部署需求

①**建筑和基础设施开发**：该研究领域将包括以下内容：设计、建造和运营生产系统，生产碳基瓦片和其他建筑材料，以及用于建筑材料和航空航天的碳泡沫。道路、隧道、桥梁等交通运输结构件；用于废水处理和固废管理的功能材料；堤坝等。开发未来变革性建筑技术，包括利用含碳矿产生产壁板、地板、隔热、托梁/立柱、护套、瓷砖、地毯、包裹物和饰面材料，以及具有卓越强度和绝缘性的建筑砌块。

②**先进碳材料生产**。开发和测试实验室/台架规模概念，以创新途径生产碳基中

间相沥青前驱体，用于生产碳产品。包括：通过清洗、蒸馏和其他工艺将碳转化为清洁能源制造的原料，以及开发碳基中间相沥青；开发用于电池负极和其他用途的碳基石墨；石墨烯、纳米管、碳纤维等高价值碳产品的大规模生产；将碳基中间相沥青的批量生产进一步扩大为连续生产。

③**对关键供应链进行再投资**。改善半导体和太阳能光伏供应链所需产品的含碳矿产关键材料的供应，包括开发新技术以提高常见技术（即石墨化和煅烧）的能源效率，以及确定符合制造业规范的碳基替代添加剂。

(3) 研发、示范及部署目标

开发和验证新技术和工艺，利用国内含碳矿产生产高附加值优质建筑和基础设施材料，实现从批量生产到连续生产。开发利用含碳矿产制造中间相沥青前驱体材料的创新技术，用于碳纤维生产，实现中间相沥青从批量加工到连续加工的转变。开发新型节能技术，从含碳矿产生产合成石墨和高纯金属硅。识别和开发创新的碳基替代品和添加剂，满足商业产品的性能指标。

（刘亚蓝 岳芳）

美国能源部资助 4500 万美元开发天然气发电和工业 CCS 技术

10月6日，美国能源部（DOE）宣布投入4500万美元支持12个碳捕集和封存（CCS）项目²，助力天然气发电和水泥、钢铁生产等碳排放源的脱碳，实现美国2050年碳中和目标。本次资助聚焦3个主题领域：碳捕集技术研发；碳捕集技术的工程规模测试；碳捕集系统工程设计研究。详情如下：

1、碳捕集技术研发

(1) 天然气联合循环（NGCC）电厂高效部件和工艺的实验室规模测试。该主题共投入300万美元支持2个项目，包括：①为NGCC电厂开发用于碳捕集的吸附剂涂层热集成接触器，示范接触器与金属/共价有机骨架吸附剂的集成系统，实现从烟气中捕集95%的CO₂，并减少15%的电力成本；②设计、制造和测试一种高效的NGCC碳捕集系统再生模块，该模块能够以95%或更高效率从稀释源中捕集CO₂，与目前采用碳捕集技术的NGCC电厂相比，捕集成本降低20%。

(2) NGCC 电厂高效碳捕集集成工艺的实验室规模测试。该主题共投入745万美元支持3个项目，包括：①开发、优化和小规模测试一种新型、低成本的碳捕集集成工艺，通过整体式胺接触器捕集NGCC电厂烟气中的，然后进行蒸汽介导的热解吸和CO₂收集，该过程发生在多床循环过程单元中，不需要真空，可增强大型

² DOE Invests \$45 Million to Decarbonize the Natural Gas Power and Industrial Sectors Using Carbon Capture and Storage. <https://www.energy.gov/articles/doe-invests-45-million-decarbonize-natural-gas-power-and-industrial-sectors-using-carbon>

NGCC 电厂的可扩展性；②设计和制造一种新型的 NGCC 电厂燃烧后碳捕集吸附工艺，将吸附剂模块与微波加热器集成，并在模拟烟气环境下进行评估，验证在 30 分钟内实现吸附和解吸的快速循环，同时满足 DOE 的碳捕集目标；③开发双回路碳捕集方案，解决 NGCC 烟气的低 CO₂ 浓度（约 4%）和高氧气浓度（约 12%）技术挑战，实现超过 95%的碳捕集率，可将资本成本降低 50%，并通过负碳排放和氢气生产抵消运营成本。

2、用于工业的燃烧后碳捕集技术的工程规模测试

该主题将投入 1500 万美元支持 3 个项目，包括：①设计、建造、调试和运行工程规模的水泥厂低温碳捕集工艺，首次将该碳捕集系统规模扩大到 30 吨 CO₂/天，并示范从烟气中捕集超过 95%的 CO₂（纯度超过 95%）；②验证使用 4 种协同变革性新技术的创新碳捕集系统，在 Nucor Steel Gallatin 工厂的现有系统（CO₂ 浓度为 1.5% 的气流中捕集 3 吨 CO₂/天）进行台架规模验证，处理电弧炉产生的气体。

3、碳捕集系统工程设计研究

（1）现有（改造）工业设施碳捕集系统的前端工程设计（FEED）研究。该主题共投入 800 万美元支持 2 个项目，包括：①Genevieve 水泥工厂碳捕集改造的前端工程设计研究，该工厂有全球最大的单线窑炉。此次设计将采用液化空气公司的 Cryocap™ FG 系统，将变压吸附以预浓缩 CO₂，并与低温制冷技术相结合，净化和压缩 CO₂ 产品，从而实现高 CO₂ 捕集率和高 CO₂ 纯度。②壳牌化工综合体碳捕集 FEED 研究，使用壳牌公司的 CANSOLV 技术（一种基于胺的燃烧后捕集技术），从德克萨斯州迪尔帕克的几家壳牌烯烃工厂、芳烃工厂和一个热电联产工厂中每年分离和捕集超过 95 万吨 CO₂。

（2）现有（改造）NGCC 发电厂碳捕集系统的前端工程设计（FEED）研究。该主题共投入 1638 万美元支持 3 个项目，包括：①商业规模（年捕集 500 万吨 CO₂）模块化第二代 CCS 系统的 FEED 研究，用于捕集 NGCC 发电厂 95%的碳排放，将使用壳牌 CANSOLV 碳捕集技术，该技术利用具有低能耗、快速动力学和极低挥发性的可再生胺，并已在商业规模的煤烟气中进行了 8 年的捕集测试。②Calpine 公司 Delta 能源中心 857 兆瓦 NGCC 发电站 CCS 改造的 FEED 研究，该设计将利用 ION 清洁能源公司的 ICE-21 溶剂，比一般商业溶剂碳捕集系统体积更小、能耗更低、降解溶剂更少、成本更低，并将捕集 95%的 CO₂ 进行地质封存。③F 级 NGCC 电厂集成 CCS 商业系统（碳捕集率 95%）的 FEED 研究，将研究先进的技术和控制概念，以将联合循环发电厂与第二代碳捕集技术相结合。

（岳芳）

巴斯夫将在未来五年扩大应用化工脱碳新技术

9月22日，巴斯夫公司宣布计划在2020年代后半期，在化学品生产过程扩大应用两项关键脱碳技术：电解技术和甲烷热解技术³。目前，技术中的电加热蒸汽裂解炉和甲烷热解新技术处于试验阶段。电加热蒸汽裂解炉使用可再生电力代替通常用于加热的化石燃料；甲烷热解将甲烷或天然气直接分解为氢和碳，与其他无排放制氢工艺相比只需要大约五分之一的电能，该技术有望使用可再生能源提供电力。

（李娜娜）

³ INTERVIEW: BASF to Scale up New Decarbonisation Tech in Second Half of Decade - CEO.
<https://www.icis.com/explore/resources/news/2021/09/22/10687504/basf-to-scale-up-new-decarbonisation-tech-in-second-half-of-decade-ceo>

清洁能源多能互补

英国发布 2050 净零排放战略

10月19日，英国政府发布《净零战略》⁴，阐述了英国实现到2050年净零排放承诺的重要举措。该战略以英国“绿色工业革命十点计划”为基础，制定了全面的计划以降低所有经济部门的排放，同时利用温室气体去除技术减少剩余排放，支持英国向清洁能源和绿色技术转型，逐步实现英国净零排放目标。根据该战略，英国到2030年将撬动900亿英镑私人投资，创造44万个绿色产业岗位。关键内容包括：

一、电力部门

1、主要目标。清洁、低成本电力是英国实现净零经济的基础。到2035年，在保证电力安全的前提下，英国电力系统将完全脱碳。英国电力系统将由丰富、经济的可再生能源和核能组成，并结合储能、配备碳捕集与封存（CCS）的天然气、氢能等灵活性技术。具体目标包括：①到2024年创造5.9万个工作岗位，到2030年创造12万个工作岗位；②开始撬动1500-2700亿英镑的额外公共和私人投资，符合英国到2037年实现“第六次碳预算”（CB6）的发展进程；③到2035年实现电力系统完全脱碳。

2、关键举措。①到2035年，在保证供应安全的前提下，完全由清洁电力供电。②在本次议会结束前确保对大型核电站做出最终投资决定，并启动一项新的1.2亿英镑未来核能支持基金，发展包括小型模块化反应堆等未来核能技术，潜在的部署地点包括北威尔士的威尔法核电站。③到2030年部署40吉瓦的海上风电，并部署更多陆上风电、太阳能和其他可再生能源，采用最新的并网技术以最有效地整合新的低碳发电和需求，同时考虑到环境影响和当地社区需求。④为海上风电提供3.8亿英镑的资金支持，到2030年部署1吉瓦的浮动式海上风电，确保该技术达到世界领先。⑤部署储能等新的灵活性措施，以避免未来电价上涨。

二、燃料供应及氢能部门

1、主要目标。在难以电气化的部门，更清洁的燃料供应对于实现净零排放至关重要。在《北海过渡协议》承诺的基础上，英国政府将大幅减少传统石油和天然气燃料供应的排放，同时扩大氢和生物燃料等低碳替代品生产，通过保护就业和投资、利用现有基础设施、维持供应安全和最大限度减少环境影响的方式来实现。具体目标包括：①到2030年在燃料供应方面支持1万个工作岗位；②开始撬动200-300亿英镑的额外公共和私人投资，符合英国到2037年实现CB6的发展进程；③部署5

⁴ Net Zero Strategy: Build Back Greener. <https://www.gov.uk/government/publications/net-zero-strategy>

吉瓦的制氢设施，同时将石油和天然气的排放量减半。

2、关键举措。①目前已经设立“工业脱碳和氢收益支持”（IDHRS）计划，以资助新的氢能和工业碳捕集商业模式。政府将提供最高 1.4 亿英镑用于该计划，包括到 2023 年签署最高 1 亿英镑的 250 兆瓦电解制氢合同，并在 2024 年进一步拨款。②投入 2.4 亿英镑实施“净零氢能基金”，并在 2022 年完成氢能商业模式和低碳氢标准制定。③制定交通运输低碳燃料战略，于 2022 年发布，并实现可持续航空燃料承诺。④与利益相关者合作，在 2022 年第四季度之前解决石油和天然气生产电气化的障碍，并继续减少常规燃烧和排放。⑤以最大限度降低温室气体排放的方式监管石油和天然气部门，特别是通过修订后的《石油和天然气管理局（OGA）战略》，该战略授权 OGA 通过有效的净零排放测试来评估运营商排放水平的计划，并为英国大陆架未来的许可建立新的气候兼容性检查站。

三、工业部门

1、主要目标。通过支持转向更清洁燃料、提高资源和能源效率以及公平的碳价推动工业深度脱碳。与 CCUS 和可再生能源一起发展低碳氢新产业，将加速工业集群的脱碳，这些集群将有机会获得政府 CCUS 计划的支持。具体目标包括：①到 2030 年在工业领域支持 5.4 万个工作岗位；②开始撬动 140 亿英镑的额外公共和私人投资，符合英国到 2037 年实现 CB6 的发展进程；③到 2030 年部署 4 个 CCUS 工业集群，每年可捕集 2000-3000 万吨 CO₂，包括 600 万吨的工业碳排放，到 2035 年工业碳捕集能力达到 900 万吨。

2、关键举措。①设立“工业脱碳和氢收益支持”（IDHRS）计划，以资助新的工业碳捕集和氢能商业模式。②通过 10 亿英镑的“CCS 基础设施基金”支持 CCUS 部署。③Hynet 和东海岸集群被确立为第一批 CCUS 部署集群。④通过 3.15 亿英镑的“工业能源转型基金”（IETF）支持能效和现场脱碳措施。⑤支持燃料转向低碳替代品，目标是到 2035 年每年替代约 50 太瓦时的化石燃料。⑥与钢铁协会合作，设定到 2035 年实现近零排放的炼钢目标，以及支持转型所需的商业环境。⑦制定多项资源和能源效率措施，以实现到 2035 年实现减少 1100 万吨碳排放，包括钢铁行业 300 万吨的减排量。⑧就英国碳排放交易系统（ETS）净零排放上限进行咨询，以激励行业中具有成本效益的减排。⑨探索在 2020 年代加快分散排放点源脱碳。

四、供热及建筑部门

1、主要目标。提高英国各地住房和非住宅的能效，以确保使用更少的能源来供热，在确保经济性、舒适性的同时减少对进口能源的依赖。到 2035 年，只要成本下降到足够低，所有家庭和工作场所的新供热设备都将采用低碳技术，如电热泵或氢气锅炉。具体目标包括：①到 2020 年代中期支持 10 万个工作岗位，到 2030 年支持 17.5 万个工作岗位；②开始撬动 2000 亿英镑的额外公共和私人投资，符合英国到

2037 年实现 CB6 的发展进程；③为家庭和工作场所到 2035 年使用新型供热设备设定低碳路径。

2、关键举措。①到 2035 年，不再销售新的天然气锅炉。②投入 4.5 亿英镑设立一项三年期“锅炉升级计划”，为家庭提供最高 5000 英镑的低碳供热系统补贴，以确保其成本与天然气锅炉相当。③投入 6000 万英镑推出“热泵就绪计划”，用于资助开创性的热泵技术研发，并将支持政府到 2028 年每年安装 60 万台热泵的目标。④提供更便宜的电力以降低热泵使用成本。

五、交通部门

1、主要目标。推行更环保、快捷、高效的交通方式，通过实施零排放汽车（ZEV）授权开启道路交通转型，为低碳汽车技术提供额外资金支持，实行购车补贴，投资电动汽车基础设施，推进铁路电气化，投资 30 亿英镑改造公交服务、20 亿英镑用于自行车，推出清洁航运多年期计划。具体目标包括：①到 2024 年支持 2.2 万个工作岗位，到 2030 年支持 7.4 万个工作岗位；②开始撬动 2200 亿英镑的额外公共和私人投资，符合英国到 2037 年实现 CB6 的发展进程；③消除所有道路排放并开始推进零排放国际旅行。

2、关键举措。①支持投资零碳汽车，到 2030 年停止销售新的汽油和柴油汽车，到 2035 年所有汽车完全实现零排放。②投入 6.2 亿英镑作为零排放汽车补贴和电动汽车基础设施支持，重点推进街道住宅充电。③在 10 亿英镑的“汽车转型基金”（ATF）中划拨 3.5 亿英镑支持汽车及其供应链的电气化。④基于 2000 万英镑的零排放道路货运试验结果，大规模试验三种零排放重型货运卡车技术，以确定其运营效益和基础设施需求。

六、自然资源、废物和含氟气体

1、主要目标。通过恢复农村生态以减少排放、固碳，并建立适应气候变化的能力。支持农民实施一系列低碳农业实践，以提高生产力并更有效地利用土地。增加植树造林以固碳，并保护和恢复泥炭地。改革资源和废物制度，发展循环经济，提高资源效率。继续根据国内法规和国际承诺逐步减少含氟气体的使用。具体目标包括：①植树造林到 2024 年支持 1900 个工作岗位，到 2030 年支持 2000 个工作岗位；②开始撬动 300 亿英镑的额外公共和私人投资，符合英国到 2037 年实现 CB6 的发展进程；③英格兰的造林率增加两倍，在本次议会结束前将种植率目标提高到 3 万公顷/年。

2、关键举措。①通过“农业投资基金”和“农业创新计划”支持低碳农业和技术创新，投资设备、技术和基础设施以提高盈利能力、造福环境并支持减排。②向现有的 6.4 亿英镑“自然气候基金”增加投入 1.24 亿英镑，以确保到 2025 年在泥炭地恢复、林地创造和管理方面的总支出超过 7.5 亿英镑，使农民和土地所有者有更

多机会通过改变土地用途来支持净零排放。③到 2050 年恢复英格兰约 28 万公顷的泥炭地，并使英格兰的造林率增加两倍。④投入 7500 万英镑用于自然资源、废物和含氟气体的净零相关技术研发。⑤为实现到 2028 年几乎完全取消填埋可生物降解城市垃圾，将投入 2.95 亿英镑促使英格兰地方当局从 2025 年开始为所有家庭部署免费的食物垃圾收集设施。

七、温室气体去除

1、主要目标。通过技术创新使英国在温室气体去除方面全球领先，短期内将支持温室气体去除的早期商业部署，并开始建立市场框架。具体目标包括：①在工业中心地区创造高技能岗位；②开始撬动 200 亿英镑的额外公共和私人投资，符合英国到 2037 年实现 CB6 的发展进程；③到 2030 年至少部署 500 万吨 CO₂/年的温室气体去除工程设施。

2、关键举措。①投入 1 亿英镑支持温室气体去除相关技术创新。②探索监管监督措施，以实现温室气体去除的监测、报告和验证。

八、支持零碳转型的跨领域行动

1、主要目标。支持技术创新和发展全球领先的绿色金融部门。通过降低创新链各阶段的成本，并引入关键技术以实现净零排放。与私营部门合作，促进私人投资并为绿色金融的蓬勃发展创造条件。将消费者置于转型的核心，使绿色技术更方便、低成本和有价值。支持工人进行再培训和技能提升，并通过能够适应变化的强大供应链建立低碳产业。与地方政府合作以确保所有地区都具备实现净零目标的能力。政府将气候纳入政策和支出决策，提高实现气候目标进展的透明度，并提供资金以推动学校和医院实现减排。

2、关键举措。①投入至少 15 亿英镑支持净零创新项目。②通过英国基础设施银行（UKIB）吸引私人融资，支持超过 400 亿英镑的投资，并推动低碳技术和行业走向成熟和规模化。③引入新的可持续性披露制度，包括强制性气候相关财务披露和英国绿色分类法。④改革技能培训体系，在净零转型中发挥更好作用。⑤发布关键指标的年度进展。

（岳芳）

美国能源部资助超 2 亿美元支持先进动力电池技术研发

10 月 27 日，美国能源部（DOE）宣布资助 2.09 亿美元支持先进动力电池技术研究⁵，旨在整合国家实验室、高校和企业的研究力量开展联合攻关，实现先进动力电池技术（如全固态电池、快充技术）研发突破，同时打造完善的国内电池供应链减少对外依赖风险，维持和强化美国在电动汽车和电池技术创新领域的全球领先地位

⁵ DOE Announces \$209 Million for Electric Vehicles Battery Research.
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-209-million-electric-vehicles-battery-research>

位。本次资助研究项目主要涵盖四大主题领域，主要内容如下：

1、用于锂金属电池的固态电解质

通过开发新材料和电池架构来增强全固态电池循环寿命和能量密度；开发 3D 打印制备固态电池的新工艺；开发高精度的电池模拟仿真系统；针对锂硫电池开发高性能的全固态电解质；针对全固态锂硫电池开发先进的电极涂层材料；围绕锂金属电池开发新型的高性能硒硫正极材料；开发用于全固态电池的高导电性高化学稳定性的硫代硼酸锂固态电解质；开发高导电性的有机聚合物固态电解质；开发有机无机复合的固态电解质。

2、快充电池技术

研发快充特性的锂离子电池并开展技术性能评估；针对快充电池的电化学和热稳定性问题开展专题研究；开发全新的快充技术解决方案；从微观尺度来探明快充电池的工作机制；整合电解质和电极研发以获得高能量密度的快充电池技术。

3、电动汽车技术

加快电动汽车基础设施建设和部署工作，推进电池快充技术的研发突破，解决电动车汽车大规模部署面临的基础设施和技术问题。

4、基于互联网的先进自动驾驶技术

开发基于互联网的自动驾驶协议框架，优化在不同场景下卡车、乘用车等车辆的自动驾驶路径，减少拥堵和能源消耗。

（郭楷模）

美国能源部部署先进太阳能发电研发项目推进电力系统脱碳

10月19日，美国能源部（DOE）宣布资助4000万美元支持下一代先进太阳能发电技术研究⁶，旨在整合高校和企业的研究力量开展联合攻关，实现太阳能发电技术和配套储能技术的研发突破，进一步提升太阳能发电效率和太阳能发电设施的使用寿命（如将太阳能电池板寿命从30年增加到50年），降低太阳能电力成本，扩大太阳能电力装机规模，助力2035年美国100%清洁电力目标实现。本次资助研究项目主要涵盖四大主题领域，主要内容如下：

1、太阳能光伏（资助金额：450万美元）

开发效率更高、成本更低的新一代太阳能光伏发电技术（如钙钛矿太阳电池）；开发先进的太阳能电池板防护技术提高其应对极端天气能力，增加太阳能发电设施的使用寿命，从当前的30年增加到50年，减少运维成本。

2、聚光太阳能热发电（资助金额：2500万美元）

研发具有更高运行温度和发电效率的新一代太阳能光热发电技术并进行示范；

⁶ DOE Awards Nearly \$40 Million for Grid Decarbonizing Solar Technologies
<https://www.energy.gov/articles/doe-awards-nearly-40-million-grid-decarbonizing-solar-technologies>

开发储能性能更加优异的吸收器的储热材料；研发先进的太阳能热化学循环制燃料和高价值化学品技术。

3、热泵储电技术（资助金额：400 万美元）

针对热泵储能设施开发性能更加优异的高效压缩机、膨胀机和蓄冷/蓄热换热器；开发能够实现 10 个小时电力存储的长时热泵储电技术。

4、新技术的示范验证（资助金额：400 万美元）

针对上述新开发的技术依据技术成熟度开展相关的示范验证，加快新技术从实验室走向商用的进程，促进成果转化。

（王珍 郭楷模）

工业级封装工艺有效解决钙钛矿太阳能电池铅元素泄漏问题

钙钛矿太阳能电池效率已经突破 25%，且具备制备工艺简单、成本低廉的优点，被视为是最有希望替代硅基太阳能电池的下一代新概念电池。然而目前高效率的钙钛矿太阳能电池通常含有毒性的铅元素，在使用过程中存在泄漏问题。因此，解决钙钛矿电池的铅元素泄漏问题是推进该电池迈向商用的关键因素之一。

北伊利诺伊大学 Tao Xu 教授课题组联合美国国家可再生能源实验室设计制备了一种具有铅元素吸收功能的封装胶带，能够实现对破损电池中铅元素的 99.9% 吸收，可将泄漏在水中的铅元素浓度降低到低于美国环保署的饮用水标准，有效克服了铅的泄漏问题。而且，该铅吸附封装胶带可以通过工业标准化的硅基电池封装工艺进行操作，方便规模化生产，有利于钙钛矿太阳能电池加速迈向商用。研究人员首先将二-(2-乙基己基)亚甲基二磷酸酯 (DMDP) 乙醇溶液涂覆在乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 (EVA) 薄膜上，随后在常温下进行溶剂蒸发形成了 DMDP 层压的透明状 EVA 薄膜，该薄膜能够紧密地粘附在钙钛矿电池玻璃基底上，而不影响太阳光的入射辐照。为了验证 DMDP 层压 EVA 薄膜对铅元素的吸收性能，研究人员制备了正向和反向结构两种钙钛矿太阳能电池，接着均采用 DMDP 层压 EVA 薄膜对其进行封装处理。随后开展滴水实验以模拟动态降雨，无 EVA 薄膜封装损坏的正向结构电池 1 小时收集到的水中铅离子的平均浓度为 19.14 ppm，而 EVA 封装后的这一数值仅为 2.13 ppb。类似的情况在反向结构中也观测到，即滴水实验 1 小时后，水中铅离子的平均浓度从无 EVA 薄膜的 28.88 ppm 减少到 15 ppb。表明无论器件结构如何，DMDP 层压 EVA 胶带对铅离子均具有显著的吸收能力，且能够将铅离子浓度降低到美国环保署规定的饮用水限制标准 (15 ppb)。除了动态降雨环境，部署在室外的太阳能电池器件还会遇到被雨水长时间浸泡的情况，为此研究人员进一步模拟了雨水浸泡 7 天的情况，实验结果呈现出与动态降雨类似的结果，表明新型的铅吸附封装胶带具有稳定的铅吸收作用。最后研究了封装胶带对电池性能的影响，结果显示

EVA 封装器件性能与无封装器件基本相同，表明 EVA 封装胶带对电池性能无负面影响。

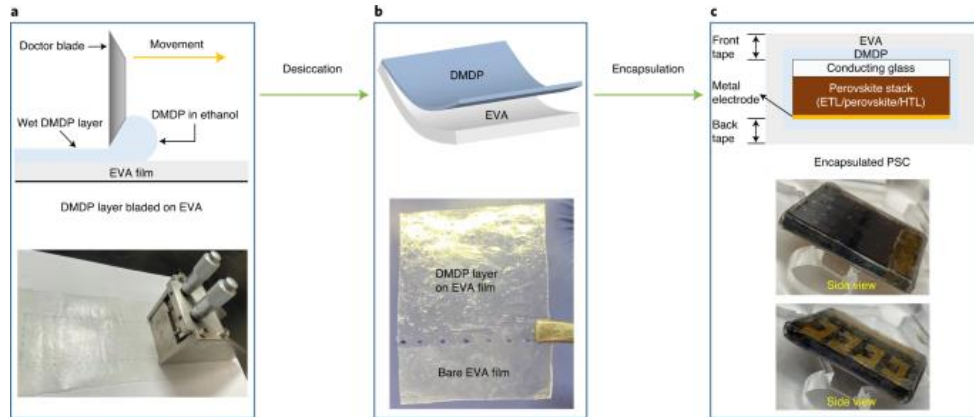


图 1 铅吸附封装胶带制作及器件集成

该项研究精心设计制备了一种 DMDP 层压 EVA 封装胶带，能够实现对破损钙钛矿太阳能电池泄漏铅元素高达 99.9% 的吸收，有效解决了钙钛矿太阳能电池使用过程中毒性铅元素的泄漏问题，且该封装过程可以通过成熟的硅基太阳能电池工业级封装工艺完成，呈现出良好的规模化制造特性，为钙钛矿太阳能电池迈向商用铺平了道路。相关研究成果发表在《*Nature Sustainability*》⁷。

(郭楷模)

普适性新型螯合剂开辟非锂储能电池研究新路径

探索新型低成本、高能量密度、高安全性的非锂储能电池是电池领域的研究热点前沿。其中可充电镁 (Mg)、钙 (Ca) 金属电池的双电子转移会带来更大的比容量，此外 Mg 和 Ca 金属均具有低还原电位，并减少了金属负极潜在的枝晶沉积等安全问题，被认为是锂离子电池良好的替代品。然而由于缓慢的电荷动力学过程和更强的静电相互作用，使得过电位增加、电解质分解以及二价金属离子不可逆嵌入正极材料等问题，限制了二价金属电池性能，上述问题亟需解决。

马里兰大学 Chunsheng Wang 教授课题组牵头的联合研究团队利用甲氧基乙胺螯合剂来调控二价金属离子的溶剂化结构，显著改善了离子的动力学过程，实现快速电荷转移，使得 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 能够快速在层状氧化物正极材料中嵌入和脱嵌，实现了高度可逆的离子嵌入和脱嵌，增强了电池性能和循环稳定性，以 Mg 和 Ca 为负极的电池均获得了与锂电池相当的比能量密度，分别为 412 Wh/kg 和 471 Wh/kg 可逆放电比容量。为开发设计高性能低成本的非锂可充电电池开辟了新技术路径。

⁷ Xun Li1, Fei Zhang, Jianxin Wang, et al. On-device lead-absorbing tapes for sustainable perovskite solar cells. *Nature Sustainability*, 2021, DOI:10.1038/s41893-021-00789-1

相关研究表明，以 Mg、Ca 为代表的二价金属电池广泛存在可逆性不佳和电荷转移动力学缓慢问题。为此研究人员在固态电池电解质中引入了甲氧基乙胺螯合剂 $[-(\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{N})_n-]$ ，以增强导电离子的去溶剂化作用，旨在改善上述不利问题。研究人员首先将甲氧基乙胺螯合剂电解质、Mg 金属负极和氧化物层状正极组装成

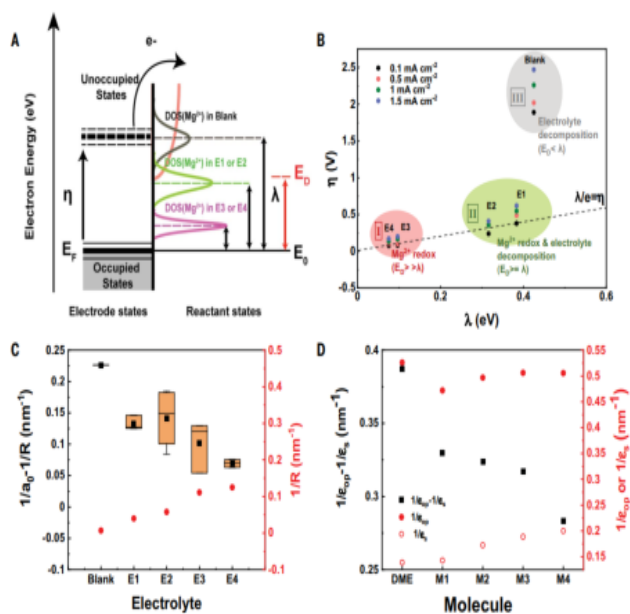


图 1 引入螯合剂溶剂化鞘重组过程

完整的电池器件，并开展了电化学性能测试。在 2-3.3 V 之间、0.5C 倍率下 ($1\text{C}=200\text{ mA/g}$)，Mg 金属电池获得了 412 Wh/kg 比容量，且可以稳定循环 200 余次，上述结果表明了电池具备良好的可逆性。为了探究电池性能改善的潜在机制，研究人员对电池进行了一系列的微观表征，实验显示螯合剂引入后，通过溶剂化鞘重组绕过了能量不利的去溶剂化过程，极大地促进了电解质膜界面电荷转移动力学，实现了 Mg^{2+} 在层状氧化物电极中的快速嵌入和脱嵌，并抑制了正极和

金属负极上的副反应，从而增强了电池性能和循环稳定性。而为了进一步探索该方法的普适性，研究人员又基于上述含有螯合剂的电解质制备了 Ca 金属电池，同样获得了优异电化学性能，可逆比容量达到了 471 Wh/kg。表明了上述方法的确具备良好的普适性，可以应用于其他金属电池研究开发中。

该项研究通过在电解质中引入甲氧基乙胺螯合剂，实现了对二价金属离子溶剂化过程的优化调控，显著改善了电荷转移动力学并实现了离子在层状氧化物正极薄膜中可逆的嵌入和脱嵌，进而增强了镁、钙金属电池放电比容量和循环稳定性，且实验方法具备良好的普适性，为开发高性能低成本的非锂储能电池开辟了新技术路径。相关研究成果发表在《Science》⁸。

(王珍 郭楷模)

⁸ Singyuk Hou, Karen Gaskell, Peng-Fei Wang, et al. Solvation sheath reorganization enables divalent metal batteries with fast interfacial charge transfer kinetics. *Science*, 2021, DOI: 10.1126/science.abg3954

低碳化多能融合

德国氢能研究网络发布氢能研发需求专家建议报告

9月10日，德国氢能研究网络发布氢经济价值链研发需求的专家建议报告⁹，针对氢能价值链各环节提出了未来主要研发需求，包括如下领域：氢及氢基产品生产；基础设施和系统集成；氢能应用；氢能安全性、接受度和可持续的市场部署。德国氢能研究网络由联邦经济事务与能源部（BMWi）组建，是德国国家氢能战略提出的行动之一，涵盖了德国氢能价值链相关的学术界和产业界专家。具体研发需求如下：

一、氢及氢基产品生产

1、电解制绿氢。①碱性电解槽（AEL）需研发适用于高压和高温的材料及组件并实现批量生产，以及改进电解槽设计；②碱性膜电解槽（AEMEL）制氢需进一步开发组件（膜、催化剂），提高长期稳定性，并扩大电堆和系统规模；③质子交换膜电解槽（PEMEL）需减少稀有金属用量或开发替代材料，并解决工业生产和回收的问题；④固体氧化物电解槽和质子陶瓷电解槽等高温电解槽需进一步研发可提高功率密度、耐久性和寿命的材料，扩大电堆规模并开发全自动生产工艺。

2、通过替代工艺制绿氢。光电化学、光催化、太阳能热化学、光生物等制氢方法尚处于低技术成熟度（TRL）阶段，需进一步提高效率和长期稳定性，包括：①开发高效和稳定的材料；②开发低成本可扩展的电解槽和反应器概念；③优化光电化学系统；④优化太阳能热化学系统的集热器或热回收等。

3、生物质和生物残余物制绿氢。涉及生物质发酵、重整、气化和等离子体技术等，需开发低成本的原料来源，并与碳捕集、利用和封存（CCUS）系统相结合，需研究将此类系统扩展到工业规模的方法以及氢气的高效分离和提取技术。

4、蓝氢和蓝绿氢生产。蓝氢由结合碳捕集与利用（CCU）的化石燃料制氢得到，蓝绿氢由天然气或生物基甲烷热解产生，所需能量由可再生能源提供。需通过研发将热解工艺扩大为示范规模，并开发CCU工艺和CO₂永久安全封存的相关工艺。

5、氢基副产品生产。研发氢或合成气生产可持续合成原料及燃料的技术，包括甲烷、甲醇、氨、烯烃和醚等。需优化现有技术以实现大规模经济生产，开发新的颠覆性工艺，如甲烷、甲醇、氨和二甲醚的直接电化学合成、太阳能热合成、光化学合成和生化合成等。

二、基础设施和系统集成

⁹ Forschungsnetzwerk empfiehlt nächste Schritte für den schnellen Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft.
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/09/20210910-forschungsnetzwerk-empfehl-t-naechste-schritte-fuer-den-schnellen-aufbau-einer-wasserstoffwirtschaft.html>

1、公路、铁路和航运的氢能基础设施。①开发经济、高效、环保的氢气运输技术，如液氢、压缩氢、合成燃料、液体有机氢载体（LOCH）、金属及其氢化物、氨等；②进一步开发和优化移动式储氢、加氢技术/工艺；③开发公路、铁路和航运的储氢压力容器安全评估的新方法；④开发储氢罐无损检测方法（材料检测）及氢气质量保证方法。

2、管道分配网络。①进行材料研究以确定和开发用于管道、配件和系统的氢气兼容材料，同时考虑主要负荷（压力和温度循环）和氢渗透；②开发用于气体分离的材料和用于升级现有氢气管线的涂层工艺；③开发从传统天然气网络到氢气网络的安全转化过程和策略，包括转化为纯氢网络和向天然气中掺入氢气；④开发气体质量测量方法，用于监测管线中的气体混合比，并在可能发生泄漏时进行气体检测。

3、管道运输网络。①进行材料研究以确定和开发用于管道、配件和系统的氢气兼容材料，同时考虑压力和温度循环参数以及氢渗透；②进一步开发氢气压缩（机械和电化学方法）、气体处理、传感器、测量技术；③开发满足大流量氢气输送的氢气压缩及其驱动设备。

4、中大型储氢。①开发地质储氢设施，考虑微生物学、适应性测试、气体净化等方面；②开发和测试储氢系统的运行策略，以适应热力学特性等动态变化；③进一步开发高压储氢、固体储氢、液体储氢、化学储氢技术以及多模式储氢方案，以实现规模化部署并降低成本。

5、整体系统建模与集成。①开发集成系统的规划仿真工具，考虑供应安全、经济效率、可持续性和弹性等因素，并进行基础设施建模；②开发将所有能源部门与氢能基础设施分散耦合的技术和概念，同时考虑分布式氢气转化利用方法（如氢能热电联产）；③氢输送和分配网络的开放科学建模，并优化各供能部门（电力、氢、绿色碳氢化合物、供热等）与用能部门（交通、物流、工业、贸易、建筑）之间的耦合建模；④制定转型战略以及考虑不同情景和市场发展的路线图。

三、氢能应用

1、用于工业原料，尤其是金属冶炼。①用于生产还原过程所需的 NH_3 和合成气，以及用于捕集 CO_2 的利用；②研究基于氢原料的生产中原材料对产品特性和工艺条件的影响；③系统集成研究，包括过程模拟、控制输出、 H_2 回收等。

2、提供工业过程热和蒸汽。①系统部件和耐火材料研发；②在高温工艺中使用氢气代替天然气/二次气体；③产品质量、污染物排放、传热、效率、系统输出的影响研究。

3、固定式应用。（1）**商业和工业应用：**①优化氢燃烧（尤其是纯氢）的运行管理，开发燃烧过程监控；②燃料电池应用，需扩大至大规模工业化，开发运行状态监测、互操作系统技术等。（2）**家庭应用：**①开发供暖、通风和空调相关应用；

②进行真实条件下的现场测试。

4、移动式应用。（1）**乘用车应用：**①开发 H₂ 燃烧过程的仿真模型；②燃料电池堆、储氢罐系统和组件的工业化；③膜电极组件中稀有金属的替代研究；④运营策略、混合动力系统设计、系统结构、总拥有成本研究。（2）**卡车应用：**①整体传动系统及车辆的优化，包括运行/混合动力策略、冷却系统等；②储氢及加氢技术；③开发（近）零排放内燃机概念；④效率优化研究，包括内燃机的摩擦学、废热、直喷、燃烧过程研究，以及燃料电池组件优化。（3）**铁路运输应用：**①研究与氢能经济相关的铁路特定要求；②改装现有列车以及新列车装备氢动力系统的方法和技术；③列车动力系统、冷却系统和混合能量管理的仿真方法。（4）**航运应用：**①不同动力系统的比较研究；②氢动力船舶示范；③活塞发动机燃烧氢燃料研究，以及在船上制氢用于燃料电池；④氢与其他燃料混合使用。（5）**航空应用：**①提升燃料电池及其系统的功率/能量密度；②航空航天专用零部件研发；③热力系统的开发和管理（包括液氢罐）；④飞行可靠性、使用寿命和可验证性研究；⑤燃料（氢气、电力转换燃料等）的供应、加注技术和基础设施研究。

四、氢能安全性、接受度和可持续的市场部署

1、氢能安全性。①泄漏监测研究，开发区域监测的创新方法（包括使用人工智能技术），传感器的选择、组合和分布；②保护概念研究，制定特定保护措施和保护区域指南（尤其针对液氢），开发定量风险评估（QRA）工具；③事故研究，增强对事故场景的理解，开发各种保护措施的风险降低潜力模型；④材料适用性和兼容性研究，制定安全选择合适材料的指南，开发氢气适用性和早期损坏检测的测试流程，开发新材料概念，扩展现有或开发新的测试概念和测试基础设施，以表征高温下（氢气燃烧、氢气压缩、高温燃料电池、高温电解槽等）的变形和损坏，开发材料模型预测与氢气接触部件的使用寿命；⑤将增材制造技术用于组件生产。

2、标准化。①制定标准化路线图，确定在国际竞争中的行动框架，并为未来技术创造有利于创新的条件；②产品的认证和批准，为产品的认证、验收和批准制定技术和监管框架，审议风险评估方法，并将测试与模拟相结合。

3、接受度。①专业人员的基础和高级培训，对氢能安全知识进行社会宣传，制定教育战略，设计验收标准；②为氢能相关负面舆情个案制定沟通策略；③目标群体的接受度研究，考虑生态和地缘政治问题，以及市场增长而引起的接受度变化；④建立风险模型以分析风险的可接受标准；⑤氢能用于能源和交通的转型研究。

4、可持续性。①通过生命周期分析进行可持续性评估；②所有制氢路径的温室气体排放和其他环境影响研究；③进一步制定社会标准并创建统一数据集以对技术进行评估；④经济可持续性研究；⑤绿氢采购意愿研究。

5、商业模式。①确定在环境标准和资源方面考虑整个价值链的项目模式；②将

循环经济整合到商业模式概念中；③加强非技术领域的跨学科研究方法，如教育学家的参与；④技术工人的基础和高级培训；⑤公民参与和继续教育；⑥开发利益相关者可访问的开放数据库。

（岳芳）

美国能源部投入 2000 万美元支持核能制氢

10 月 7 日，美国能源部（DOE）宣布投入 2000 万美元，支持亚利桑那州的核能制氢示范项目¹⁰，使清洁氢能成为核电站除发电以外的重要经济产品，助力在未来 10 年内实现 DOE “氢能攻关”计划的制氢成本目标（1 美元/千克）。该项目由 PNW Hydrogen 公司牵头，将在亚利桑那州凤凰城的 Palo Verde 核能发电厂利用核能生产清洁氢，可储存 6 吨氢气用于在需求高峰期生产约 200 兆瓦时的电力，还可用于制造化学品和其他燃料。该项目将深入探索将核能与制氢技术相结合的方式，并为未来清洁制氢的规模化部署提供信息。

（岳芳）

日本 NEDO 投入 160 亿日元资助 CO₂ 资源化利用技术开发

10 月 15 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布将在“碳循环、下一代火力发电等技术开发”框架下，2021-2025 年投入 160 亿日元支持 6 个新增研发主题¹¹，以推进二氧化碳（CO₂）回收利用技术研发。此次新增的主题设立在“CO₂ 减排和有效利用的实用技术开发”子领域下，涉及 CO₂ 转化为化学品、气体燃料以及矿化综合利用技术等。详情如下：

1、CO₂ 制化学品技术

该领域将开发以 CO₂ 为原料制烯烃和甲醇的最佳合成系统，包括：①CO₂ 直接合成制烯烃技术研发，将以燃烧废气中回收的 CO₂ 和氢气为原料，开发低碳烯烃生产工艺，并考虑将该工艺与乙烯装置（目前以石脑油为原料）整合，以利用现有的蒸馏/精炼设施和后续的塑料制造/供应价值链。②CO₂ 合成甲醇的优化系统开发，将开发利用钢铁厂废气合成甲醇的整体系统优化工艺，包括通过变压吸附法实现低成本 CO₂ 分离，以及开发可高效脱水的膜分离甲醇反应器，同时将构建包含预处理设备和生成水回收设备的甲醇合成整体系统。

2、CO₂ 制气体燃料技术

该领域将开发以 CO₂ 为原料制气体燃料技术的规模化生产工艺，包括：①CO₂

¹⁰ DOE Announces \$20 Million to Produce Clean Hydrogen From Nuclear Power. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-20-million-produce-clean-hydrogen-nuclear-power>

¹¹ CO₂ の化学品や燃料、鉱物への有効利用に向け 6 テーマを新たに採択。
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101486.html

大规模制甲烷及注入天然气管道技术，将利用火力发电厂和天然气生产排放的 CO₂ 以及可再生能源生产的氢气为原料，建造规模为 400 标立方米 CO₂/小时的全球最大规模 CO₂ 转化系统验证实验设施，有效利用长冈矿山的 CO₂ 排放，生产的甲烷将注入天然气管道。

3、CO₂ 矿化综合利用技术

该领域将开发高效利用工业副产品固定 CO₂ 的工艺和 CO₂ 还原分解技术，包括：
①**炼钢炉渣固定 CO₂ 工艺开发**，将开发炼钢炉渣中的钙提取技术、碳酸化固定 CO₂ 技术以及溶剂循环技术，还将开发生成物（残余炉渣、碳酸盐）的有效利用技术。
②**炼钢炉渣快速大量固定 CO₂ 创新技术开发**，将开发利用炼钢炉渣中的氧化钙大量快速固定 CO₂ 的技术，探索炉渣碳化机理，开发热回收技术、熔融钢渣凝固及热破碎技术，评估碳化钢渣用于道路钢渣的可行性。
③**CO₂ 化学分解制碳材料技术开发**，通过粉末金属氧化物与氢气反应获得的还原剂，将 CO₂ 化学分解为碳纳米材料，涉及开发制氢和碳捕集技术、CO₂ 分解技术、碳纳米材料的高价值应用技术等。

（岳芳）

英国投入 5500 万英镑支持工业低碳替代燃料技术

9 月 28 日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）启动第 2 期工业燃料转换竞赛（IFSC），投入 5500 万英镑支持开发工业低碳燃料技术¹²，实现英国净零排放目标。英国于 2018 年推出第 1 期 IFSC，在水泥、炼油、玻璃和石灰等行业的技术创新已经发展至示范项目阶段。此次启动的第 2 期 IFSC 将继续推进氢能、电气化和生物能源在工业领域的应用。具体包括：

（1）氢能

重点关注如下主题：①试验氢气替代高碳燃料（如天然气）的应用；②开发和测试工业氢设备（如氢燃料锅炉或熔炉）；③氢直接还原炼铁；④开发和测试工业场所现场储氢方案。

（2）生物能源、废物和其他净零燃料

重点关注如下主题：①使用固体生物质/废物材料直接减少排放；②可持续来源的生物质或废物燃烧技术。

（3）工业电气化技术

重点关注如下主题：①开发和测试工业电器（如电锅炉、电窑炉、电熔炉等）；②开发和测试微波、红外或感应加热系统；③开发可再生能源电力存储系统；④开发和试验工业电热泵。

（岳芳）

¹² Industrial Fuel Switching competition: scope of competition. <https://www.gov.uk/government/publications/industrial-fuel-switching-competition/industrial-fuel-switching-competition-scope-of-competition>

高性能析氧反应单原子铱催化剂大幅提升电解制氢效率

在构建可持续发展社会进程中，开发高效且具有成本效益的电催化剂越来越成为研究人员关注的焦点。析氧反应（OER）参与多种清洁能源技术反应过程，但由于其动力学缓慢限制了功率转换效率和整体化学反应效率。因此，亟需开发高性能 OER 催化剂以提高电解制氢等多种电化学反应的效率。

美国斯坦福大学 Yi Cui 教授团队开发出一种新型单原子催化剂（SAC），得益于将单个铱（Ir）原子固定在催化剂表面，可实现最佳的 OER 催化性能，在 10 mA cm^{-2} 下获得了 183 mV 的过电位，在 KOH 电解液中运行 100 小时仍保持其性能，优于迄今为止已报道和商业化的大多数 Ir 基催化剂。相关研究表明，通过电位依赖性去质子化反应产生的高价过渡金属离子可以增强水氧化活性。此外，科学家们一直在研究高效使用铱、钌（Ru）和铂（Pt）等贵金属原子催化效率。具有可控配位环境和卓越的原子利用效率的单原子催化剂提供了一个可能的思路，通过精确控制单原子中心的局部配位环境和氧化态，明确的配位环境和增强的金属-载体相互作用可实现多个非均相反应中优异的催化性能。基于这一策略，研究人员通过低温-光化学原位还原法，首先构建了一个多孔结构来固定催化反应的铱原子。将这种多孔泡沫状结构浸润在含有铱化合物的溶液中，迅速将其冷冻，其表面形成了一层富铱冰状薄膜层。最终在 NiFe 羟基氧化物上稳定了 Ir 单原子，得到了具有优异水氧化性能的 $\text{Ir}_{0.1}/\text{Ni}_9\text{Fe}$ SAC。通过 X 射线对反应中的催化剂进行观察，结果显示铱原子在进行水氧化反应时异常活跃。结合模拟光谱和计算 OER 活性确定了 Ir 原子在反应过程中是单原子构型。高度氧化的 Ir 原子显示出优异的过电位性能， $\text{Ir}_{0.1}/\text{Ni}_9\text{Fe}$ SAC 在 10 mA cm^{-2} 条件下，其过电位为 183 mV ，优于目前已知的大多数 Ir 基催化剂。密度泛函理论计算进一步证实了上述实验结果，结果显示增加 Ir 的氧化态可以提高其活性。Ir 原子活性的提高是由于高度氧化的 Ir-SAC 中心的结合减弱所致。重要的是，利用 NiFe 羟基氧化物作为催化载体，为探索各种电催化反应中，金属单原子结构与其催化性能之间的关联提供了一个理想的模型体系。

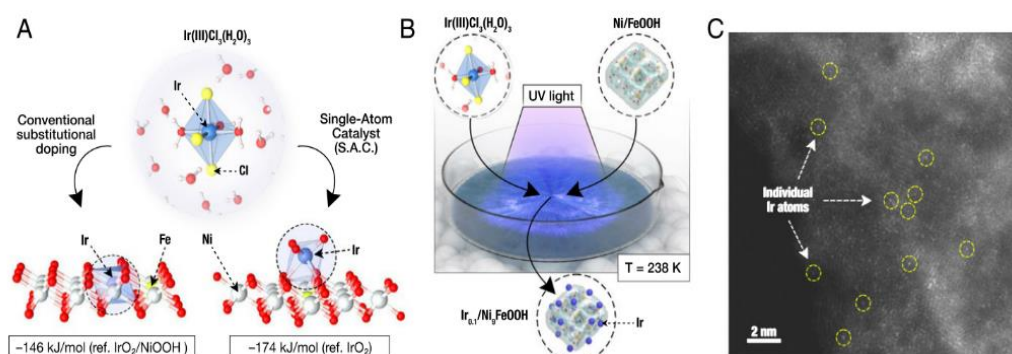


图 1 NiFe 载体 Ir 单原子的制备路线和 NiFeIr 的 HAADF-STEM 原子结构表征

该项研究开发出一种新型 $\text{Ir}_{0.1}\text{Ni}_0.9\text{Fe}$ 单原子催化剂，实现了最佳的 OER 性能，优于已报道的大多数 Ir 基催化剂。该项工作的概念和策略方法对设计单原子催化剂提出了一条新的途径。相关研究成果发表在《PANS》¹³。

(占威 汤匀)

新型低成本合成路线实现电池级钠盐 NaPF_6 制备浓度突破

钠离子电池 (SBI) 是一种具有潜在应用前景的锂离子电池替代品，六氟磷酸钠 (NaPF_6) 是钠离子电池中常用的钠盐，然而其复杂的工艺和合成成本阻碍了发展，因此亟需开发经济的 NaPF_6 合成工艺，以推进钠离子电池的商业化进程。

英国剑桥大学 Dominic S. Wright 教授开发了一种新的克级 NaPF_6 合成路线，通过六氟磷酸铵与金属钠在四氢呋喃 (THF) 溶剂中反应生成电解质盐，不含商业材料中常见的杂质，可制成高纯度电解液，使溶质在二元碳酸酯溶剂中的浓度达到 3 mol/L。研究人员首先将 NH_4PF_6 溶解在 THF 溶剂，而后再将溶液逐滴添加到悬浮在 THF 中的新切割金属钠中。将反应加热回流 6 小时，然后在 50°C 下再搅拌 16 小时，过滤多余的钠并真空干燥后即可得到高品质的 NaPF_6 ，其产率高达 89%。核磁共振波谱 (NMR) 表征结果证明了高品质 NaPF_6 的成功合成。由于合成的 NaPF_6 中不含不溶性杂质，可用于超浓缩电解质研究，分析不同浓度电解质电导率结果显示，1 mol/L 电解质溶液 (在 $T=35^\circ\text{C}$ 时为 19.0 mS/cm) 获得的电解质电导率最大，而 0.5 mol/L、2.0 mol/L 和 3.0 mol/L 电解质溶液，其电导率分别为 8.2、16.1 和 11.0 mS/cm。使用不同电解质浓度，在 1 MHz-0.1 Hz 之间对 Na-Na 对称电池进行了电化学阻抗谱 (EIS) 测试，进一步研究电解质电导率和固体电解质中间相 (SEI) 的老化情况。通过记录电池组装后连续 70 小时的阻抗谱，结果表明，超浓缩 (>2 mol/L) 电解质的界面阻抗约为 300 Ω (6.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$)，而在相同条件下，1 mol/L 的界面阻抗约为 500 Ω (3.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$)。更重要的是，1 mol/L 电解质的界面稳定性较慢，这可能是不同 SEI 组成、结构或溶解速率造成的结果。用循环伏安法 (CV) 测定合成的不同浓度 NaPF_6 (1-3 mol/L) 电解质的电化学稳定窗口 (ESW)。结果显示，电流密度均随着循环次数的增加而减小，其中 2 mol/L 和 3 mol/L 电解质的测量电流比 1 mol/L 电解质低三倍，表明电解质的电化学稳定性受 NaPF_6 浓度变化影响较大。最后，为了探究合成的 NaPF_6 商业应用前景，研究人员将合成的 NaPF_6 溶液组装到商用电池中，结果显示 NaPF_6 溶液与电池的正负极兼容性和稳定性均较好，质量达到了商业化基准电解液的要求，完全可以满足电池使用的要求。

¹³ Xueli Zheng, Jing Tang, Alessandro Gallo, et al., Origin of enhanced water oxidation activity in an iridium single atom anchored on NiFe oxyhydroxide catalyst. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, DOI: 10.1073/pnas.21018171118.

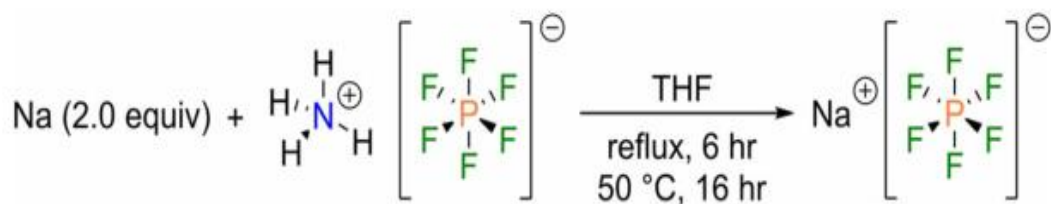


图 1 以金属钠和六氟磷酸铵为原料合成六氟磷酸钠示意图

该项研究设计开发了一条简单、低成本和可扩展的 NaPF_6 合成路线，用于生产与现有最高等级电池电解液相当的高纯度 NaPF_6 ，并且在 1 mol/L 浓度下具有优异的电化学性能。该方案避免了使用 HF 等危险物质，且不存在不溶性杂质，在标准的电化学溶剂中可以较为容易地制备 1 mol/L 浓度的 NaPF_6 溶液，并且可以精确地制备高达 3 mol/L 浓度的 NaPF_6 溶液。电化学结果揭示了使用更高浓度的电解质溶液对 SEI 特性的潜在好处，这将对优化电池性能和寿命具有重要价值。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》¹⁴。

(占威 汤匀)

¹⁴ Darren M. C. Ould, Svetlana Menkin, Christopher A. O’Keefe, et al., New Route to Battery Grade NaPF_6 for Na-Ion Batteries: Expanding the Accessible Concentration. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2021, DOI: 10.1002/anie.202111215.

能源战略研究

IEA《世界能源展望 2021》：实现净零排放需要更高减排承诺

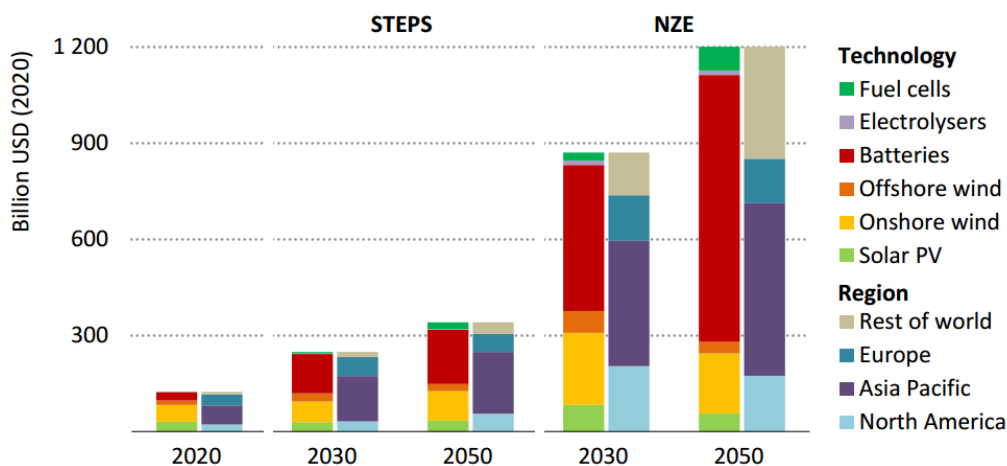
10月13日，国际能源署（IEA）发布《世界能源展望 2021》报告¹⁵指出，新能源经济正在全球兴起，但其发展速度还不足以到 2050 年实现净零排放。报告认为，即使太阳能和风电装机规模不断增长，今年全球煤炭消费量仍增长强劲，导致碳排放量将达到历史第二大增长幅度。目前全球政府承诺目标情景与 2050 净零排放情景之间存在明显差异，这表明世界如果要在本世纪中叶达到净零排放，就需要做出更高要求的减排承诺。报告要点如下：

一、随着清洁能源技术的快速发展，新的能源经济格局正在形成

2020 年，尽管受疫情影响全球经济下滑，但风电和太阳能光伏等可再生能源的新增装机容量实现了 20 年来的最大增长幅度，电动汽车销售量也创下了新的历史记录。电力的可靠性和可负担性对人们生活各方面起到关键作用。当前电力占能源终端消费的 20%，按照净零排放情景，到 2050 年电力将占全球终端能源消费的 50% 左右。清洁技术已成为电力和各种能源终端应用的首选技术，在大多数地区，太阳能光伏或风电已成为最便宜的新能源发电来源。巨大的清洁技术市场成为国际投资者竞争的新领域。数字技术在整合新能源系统方面将发挥至关重要的作用，管理和维护电力和交通系统有效运行所需的平台和数据成为新能源经济的核心。清洁电气化是全球能源经济转型初期的主要议题，需要加快推进尚未市场化的清洁能源技术的创新开发。能源清洁低碳转型将改变全球贸易和资本的流向，氢和关键矿物（如锂、钴、铜和稀土元素）在全球能源相关贸易中所占份额将不断增加。

按照净零排放情景，到 2030 年全球清洁能源投资将增加到 4 万亿美元/年，较目前水平增加两倍以上。到 2050 年，风力涡轮机、太阳能电池板、锂离子电池、电解槽和燃料电池的年度市场规模将增至 1.2 万亿美元，是 2020 年的 10 倍，其中电池占最大份额（60% 以上）。到 2050 年，将有超过 30 亿辆电动汽车投运。发达经济体和中国一直在建立研发中心，增加清洁能源创新支出。随着全球清洁能源部署规模的扩大，在净零排放情景中，到 2050 年亚太地区将占清洁能源市场规模的 45%。各国政府也在积极吸引更多的创新人才。中国、日本和美国均将能源技术研发和创新视为未来几年技术竞争的关键领域。

¹⁵ World Energy Outlook 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>



注：STEPS 为既定政策情景，NZE 为净零排放情景

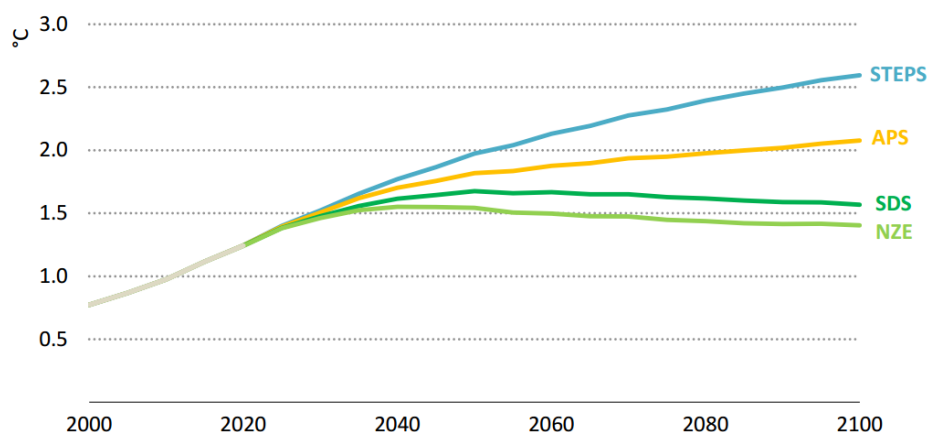
图 1 2020-2050 年按技术类别和地区划分的清洁能源技术市场规模 (单位: 十亿美元)

二、不同情景模型下全球气候变化差异明显，当前政策框架和措施尚无法实现已承诺目标

在既定政策情景中，全球能源相关和工业过程 CO₂ 排放量在 2021 年迅速反弹，到 2030 年将上升至 360 亿吨；在承诺目标情景中，碳排放量将在 2025 年左右达到峰值，到 2030 年降至略低于 340 亿吨；而在净零排放情景中，碳排放量在 2030 年将降至 210 亿吨。到 2030 年，既定政策情景和承诺目标情景之间碳排放量相差 26 亿吨，这表明已宣布的净零排放承诺与已出台的政策框架和具体措施间仍存在差距，需要更可靠的政策和长期计划作为支撑。然而，即使实现承诺目标仍无法达到净零排放，到 2030 年承诺目标情景与净零排放情景之间的碳排放量相差 120 亿吨，如果算上甲烷排放，两者间的差距将达到 140 亿吨 CO₂ 当量。

承诺目标情景中各国碳排放轨迹差异明显。到 2030 年，发达经济体的碳排放量将下降约三分之一（即 35 亿吨），但新兴经济体和发展中经济体碳排放量将上升约 10%（即 25 亿吨）。这将导致全球贸易和其他紧张局势显现，也将阻碍全球尽可能经济有效地实现净零排放，因为实现净零排放在很大程度上依赖于各国政府的共同努力。

报告利用温室气体引起气候变化评估模型（MGICC）进行了详细分析，结果显示。在既定政策情景中，全球平均地表温度将在 2030 年左右上升超过 1.5°C，到 2050 年碳排放量若为 320 亿吨，到 2100 年平均地表温度将上升 2.6°C；承诺目标情景中，到 2050 年碳排放量将为 210 亿吨，到 2100 年平均地表温度将上升 2.1°C；两种情景下 2100 年后全球地表温度均将继续上升，因为全球还未实现净零排放。在净零排放情景下，到 2050 年全球将实现净零排放，温升将略高于 1.5°C，到 2100 年温升将降至 1.4°C 左右；在可持续发展情景下，到 2050 年全球温升将在 1.7°C 左右，到 2070 年全球将实现净零排放，到 2100 年温升将在 1.6°C 左右。



注：STEPS 为既定政策情景，APS 为承诺目标情景，SDS 为可持续发展情景，NZE 为净零排放情景

图 2 2000-2100 年不同情景模型下全球地表温度上升变化 (单位: °C)

三、加快电气化、提高能效、减少甲烷排放以及推动清洁能源创新，将有助于将全球温升控制在 1.5°C 以内

大力推进能源终端用能的清洁电气化。清洁电力结构、扩大终端用电，在能源清洁转型中将发挥核心作用。2020 年全球电力部门碳排放量为 123 亿吨（占能源相关总排放量的 36%），高于其他任何部门。煤炭仍然是全球最大的单一电力来源，提供了全球 1/3 以上的电力供应，同时贡献了电力部门碳排放量近 3/4。相较于承诺目标情景，在净零排放情景下，更快的电力脱碳将减少 50 亿吨碳排放量，占两者碳排放差距的 40%。要实现电力部门快速脱碳，就需要大规模部署低碳发电。承诺目标情景下，到 2030 年可再生能源在全球发电量中占比将从 2020 年的近 30% 增加到约 45%，但较净零排放情景仍低 15 个百分点。核电、水电、生物质发电、地热发电都是重要的可调度低排放发电来源，但目前新增低排放电力主要来自太阳能和风能。此外降低现有发电的碳排放也是实现全球电力部门脱碳面临的一大挑战。因此，需要停止对新建燃煤电厂投资；对现有电厂进行改造、升级或淘汰高排放电厂；扩大电网规模，发展包括储能在内的所有灵活性技术。随着电网的快速扩张和现代化改造，在承诺目标情景下，到 2030 年公共事业规模电化学储能装机容量较 2020 年将增加 18 倍，而在净零排放情景下将增加 30 多倍。随着终端用电需求增长以及交通和供热设备电气化，电力消费将大幅增加。发达经济体和中国正大力扩大电动汽车市场规模，在净零排放情景下，到 2030 年电动汽车在全球汽车总销量中占比将超过 60%。此外，热泵将取代燃煤锅炉，推动建筑部门电气化。

不断提高能源效率。在净零排放情景下，2020-2030 年间全球能源强度每年将下降 4%，是前十年降幅的两倍多，如果能源效率不能提高，到 2030 年终端能源消费将增加约三分之一，大大增加能源供应脱碳的成本和难度。与承诺目标情景相比，在净零排放情景下，能效的提高将导致到 2030 年减少 13 亿吨碳排放量，这主要集

中在交通运输和建筑部门。通过数字技术和材料优化升级将再减少 13 亿吨碳排放量（主要由工业部门贡献）；行为方式的改变将再减少 10 亿吨碳排放量（主要由交通运输部门贡献）；而通过电器改造升级以及制定更严格的能效标准，建筑部门将再减少 5 亿吨碳排放量。

持续推进甲烷减排。当前全球气温上升的 30%是由甲烷造成，快速和持续减少甲烷排放是短期内控制气候变暖、改善空气质量的关键。能源部门是当前甲烷排放的最大来源之一，2020 年全球化石燃料排放了约 1.2 亿吨甲烷，相当于 35 亿吨 CO₂ 排放。仅仅通过减少化石燃料的使用，并不能长期有效地解决甲烷排放问题，还需各国实施一套完整的政策工具，包括：甲烷泄漏检测和修复要求；主要技术标准和禁止非紧急甲烷排放；实施绩效标准或征收排放税；更健全的监测和核查制度；先进的卫星观测等技术。在净零排放情景下，2020-2030 年间所有化石燃料甲烷排放量将减少 75%左右，其中三分之一来自化石燃料使用量减少，其余大部分来自快速部署减排措施和技术。

大力推动清洁能源创新。在净零排放情景下，到 2050 年几乎一半的减排来自于目前尚处于示范或原型阶段的技术，因此，当前各国需加大对先进电池、低碳燃料、电解槽和直接空气碳捕集等关键技术的支持力度，通过国际合作实现成本的降低，并为新技术进入市场铺平道路。净零排放情景下，约需投入 900 亿美元公共资金在 2030 年前完成一系列示范项目，而目前已宣布的预算只有 250 亿美元。近期政策支持应以尽快部署关键创新技术和发展支持性基础设施为目标。

四、新兴市场和发展中经济体将占未来能源消费的绝大部分

当前全球还有数亿人无法获得最基本的现代能源。除中国之外的新兴市场和发展中经济体占当今全球人口的三分之二，到 2050 年将占世界人口增量（20 亿）的绝大部分，新兴市场和发展中经济体对全球能源发展趋势将起重要作用。关键清洁能源技术成本下降为新兴市场和发展中经济体发展低碳能源提供了重要机会，但还未表现出终端用能部门跨越式采用低碳技术的趋势。在既定政策情景下，到 2030 年新兴市场和发展中经济体石油需求较 2020 年将增加 1200 万桶/天（增长近 30%），天然气需求将增加 5200 亿立方米（增长近 25%），煤炭需求将增加 1.6 亿吨（增长 4%）；而发达国家对化石燃料的需求将下降。中国目前在可再生能源基础设施建设方面处于全球领先地位，越来越多的新兴市场和发展中经济体也相继进行了部署示范。既定政策情景中，到 2030 年可再生能源占新兴市场和发展中经济体（不包括中国）新增电力装机容量的三分之二，而目前这一比例约为 50%。在既定政策情景下，新兴市场和发展中经济体的电力需求将快速增长，这主要是由于工业部门电机和电器拥有量的增加。综上所述，新兴市场和发展中经济体将对未来几十年内 CO₂ 排放量的增长至关重要。在既定政策情景下，到 2050 年新兴市场和发展中经济体（不包

括中国)的碳排放量将增加 55 亿吨,其中工业和交通部门碳排放量增幅最大;相比之下,发达经济体碳排放量将减少 37 亿吨,中国将减少 30 亿吨。在承诺目标情景下,碳排放量差别更为显著。尽管新兴市场和发展中经济体中只有小部分国家承诺净零排放,但应注意到该地区(不包括中国)的人均碳排放远低于发达国家,承诺目标情景中到 2030 年其人均排放量不到发达经济体平均水平的一半。

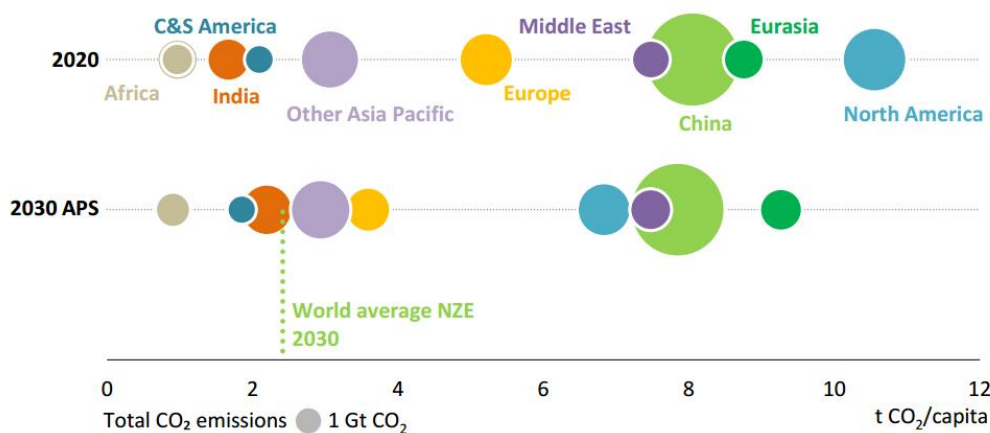


图 3 全球主要地区 2020 年和 2030 年承诺目标情景下的碳排放总量(单位:十亿吨)和人均碳排放量(单位:吨/人)

五、充分调动公私投资和各种金融激励措施

要实现 2050 净零排放,需加快推进清洁能源转型相关投资,到 2030 年实现投资水平增至 4 万亿美元/年。这将比承诺目标情景投资水平高 3/4,其中清洁发电和电力基础设施的年度投资高出 1.1 万亿美元,建筑、工业和交通部门能效和脱碳投资将高出 0.5 万亿美元。新兴市场和发展中经济体清洁能源投资的增幅最大。预计 70%的清洁能源投资将来自私人开发商、消费者和金融家,根据政府制定的市场信号和政策进行投资,公共财政投入也需增加,并发挥撬动私人投资的作用,以实现排放密集型行业的清洁能源转型。同时,私人开发商和金融家需要增加对新兴市场和发展中经济体的能源转型投资份额。能源投资可分为四类:①低排放领域:零排放(或低排放)能源技术或能源服务的投资,如可再生能源,低排放燃料,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术和直接空气碳捕集技术;②具有减排潜力领域:能够提供或实现零排放能源或能源服务的投资,如电网、终端设备电气化、电器能效、电动汽车等;③能源过渡领域:具有减排效益但本身不提供零排放能源或能源服务的投资,如减少化石燃料使用、天然气锅炉取代燃煤锅炉、翻新发电厂以支持使用低排放燃料共燃、提高波动性可再生能源并网比例的天然气发电厂等;④不减少排放的化石燃料:对不能减少任何排放的化石燃料投资。

六、清洁能源转型需注重以人为本

能源部门清洁转型的目的是改善生活生计,需将就业、公平、包容、可负担性、获取机会和可持续经济发展等诸多环节加以考虑。清洁能源领域的就业将成为劳动

力市场中最为活跃的一部分，其增长将大大抵消传统化石燃料供应下降带来的就业减少。在承诺目标情景下，预计到 2030 年将总共提供 1300 万个清洁能源相关的就业岗位；而在净零排放情景下，这一数量将翻一倍。各国政府需协调管理方式，最大限度地增加高质量工作岗位和为工人提供学习技能的机会。能源部门转型必须支持社会和经济的发展，提高生活质量。预计到 2030 年，普及电力和清洁烹饪将需要每年 430 亿美元的投资。针对能源公平和包容性问题，在政策制定时倡导年轻一代参与能源和气候政策讨论，并增加女性参与能源相关工作的比例。此外，能源转型还需全社会的支持与参与，例如公众支持改用电动汽车或热泵，行为方式的改变将贡献 4% 左右的碳减排量。

七、通过停建新的燃煤电厂和现有电厂改造逐步淘汰煤炭使用

所有情景模型均显示未来煤炭使用量将迅速下降，既定政策情景下到 2030 年全球能源系统中无减排能力的煤炭使用量将下降约 5%；承诺目标情景下将下降 10%；净零排放情景则将下降 55%，并在 2040 年将淘汰全部无减排能力的燃煤发电厂。电力部门逐步淘汰煤炭使用有两种方式：一是停止新建燃煤电厂；二是改造现有设备实现碳减排。第一种方法更容易实现，净零排放情景中已没有新的燃煤发电项目投资计划。七国集团（G7）所有成员国都承诺停止对无减排能力的燃煤电厂进行支持，中国也承诺停止支持在海外新建燃煤电厂。中国的承诺意义重大，按照承诺目标情景，这将导致到 2050 年取消 190 吉瓦煤炭项目，使用低排放发电取代这些技术将实现 200 亿吨的累积碳减排量。对现有燃煤电厂实施减排改造是气候行动的一个更可持续的手段，但对公共政策来说却更为棘手。净零排放情景中，采用三管齐下的方法，在保持电力可靠供应的同时，以经济高效的方式处理排放问题，即通过：CCUS 技术改造或生物质/氨等低排放燃料共燃以降低排放；重新调整电力用途，更注重发电充分性和灵活性；直接退役。这将促使到 2030 年燃煤电厂的排放量较目前减少 70 亿吨以上。未来十年将需要每年退役 90 吉瓦的燃煤电厂，到 2030 年将淘汰 40% 的燃煤电厂。

八、通过控制大宗商品价格、提高可再生能源发电比例，确保所有家庭都能获得可负担的能源服务

2021 年经济复苏导致全球大宗商品市场全面提价，原油价格从 2020 年中期的 20 美元/桶增至 2021 年中期的 70 美元/桶；天然气现货价格一直持续上涨，2021 年下半年达到欧洲历史最高水平；2021 年煤炭价格也在需求反弹的推动下出现强劲增长，尤其在亚洲增长最为显著。天然气和煤炭价格的增长导致多个市场电价上涨，尤其在可再生能源产量相对较低的市场。锂、铜等关键矿物的价格也出现强劲增长，接近或高于过去十年的最高水平。按照目前关键矿物现货市场价格，到 2030 年既定政策情景下清洁能源投资成本将增加 4000 多亿美元，净零排放情景下清洁能源投资

成本将增加 7000 多亿美元。

在既定政策情景下，发达经济体的家庭平均能源账单将从过去五年的年均 3200 美元降至 2050 年的 2400 美元；新兴市场和发展中经济体由于电力和油气价格以及家电和汽车保有量的上涨，到 2050 年将增加 80%。提高能效、电气化和改用低碳能源均有助于降低能源使用成本，但往往在前期需要付出较大投资。因此需要针对低收入家庭提供有针对性的补贴以减轻其经济负担。

九、能源转型中的不稳定性将导致全球贸易紧张和技术转让限制

能源转型的不稳定性将带来投资不匹配等安全隐患。能源转型将导致一次能源结构发生重大转变，从碳密集型能源转向低碳能源。过去几十年中化石燃料占比一直保持在 80% 左右；但到 2050 年，在承诺目标情景中化石燃料份额将降至 50% 左右，在净零排放情景中其份额将大幅降至略高于 20%。石油和天然气等化石燃料需求的减少将带来较大的不确定性。此外，能源转型中燃料需求量的变化将对投资产生重大影响，如果公司和投资者在转型中误判燃料未来需求趋势，将存在市场紧缩或过度投资导致的资产利用不足和搁浅的风险。

能源安全尤其是电力供应可靠性日益成为关注的焦点，因为社会越来越依赖电力来满足其能源需求。在所有情景下，到 2050 年波动性可再生能源在发电中占比将上升至 40%-70%（某些地区甚至更多），远高于目前略低于 10% 的全球平均水平。风能和太阳能光伏发电受环境影响较大，因此储能、需求响应和可调度的低排放电力对于满足电力供应灵活性要求至关重要。在净零排放情景下，对电力供应灵活性的需求较大：公用事业规模电池储能装机规模将从 2020 年的不足 20 吉瓦增加到 2050 年的超过 3000 吉瓦以上，并且电力系统中将接入数百万台用户侧灵活性设备，如智能电表、电动汽车和充电基础设施等。

清洁能源技术同样面临地缘政治风险所带来的安全问题。在所有情景中，地缘政治影响将从油气转向关键矿物的生产和贸易。到 2050 年，在既定政策情景下的矿物需求总量几乎增加了两倍；而在净零排放情景下，矿物需求增加了六倍。关键矿物价格的上升或波动性可能导致全球的清洁能源转型更为缓慢或昂贵。关键矿物开采和加工在地域上过于集中，在多数情况下，关键矿物的供应集中在石油和天然气储量较少的国家和地区，意味着许多国家使用进口材料的太阳能电池板、风力涡轮机和电池供应链将很快受到少数矿物资源集中国家的监管变化、贸易限制甚至政治不稳定性的影响。决策者应尽早制定确保矿物安全的综合办法，包括扩大投资和促进技术创新，同时注重材料的回收利用、供应链弹性和可持续性。此外，净零排放情景中，国际氢能贸易（包括氨基燃料）同样将出现供应危机。到 2050 年，在承诺目标情景下，全球氢能贸易额将增长至 1000 亿美元左右，高于目前全球煤炭贸易金额；而净零排放情景下，全球氢能贸易额将增长至 3000 亿美元。因此，氢能进口商

和出口商之间缺乏协调，或基础设施和设备生产能力出现瓶颈，都将带来能源供应安全危机。

十、清洁电气化是实现净零排放的核心要素，需将传统化石燃料与低碳燃料合理配比，实现 2050 气候目标

到 2050 年各种化石燃料仍将继续为全球能源稳定供应做出重大贡献。石油需求在所有情景中均呈现不同程度的下降：既定政策情景中，石油需求在 2035 年达到 1.04 亿桶/天，随后缓慢下降到 2050 年；承诺目标情景中，全球石油需求在 2025 年达到峰值（9700 万桶/天），并在 2050 年降至 7700 万桶/天；净零排放情景中，石油需求在 2030 年下降至 7200 万桶/天，并在 2050 年降至 2400 万桶/天。用于石化原料是石油需求唯一增长的领域，到 2050 年全球石油消费量 55% 将用于制造石化产品。未来五年天然气需求将增加，随后出现明显的下降：在既定政策情景中，天然气需求在 2030 年增长至 4.5 万亿立方米（较 2020 年增长 15%），随后到 2050 年增至 5.1 万亿立方米；在承诺目标情景中，全球天然气需求在 2025 年之后很快达到峰值，随后在 2050 年降至 3.85 万亿立方米；在净零排放情景中，天然气需求在 2025 年之后急剧下降，在 2050 年降至 1.75 万亿立方米。到 2050 年，超过 50% 的天然气用于生产低碳氢，70% 的天然气使用将配备 CCUS 技术。煤炭在所有情景中均呈现需求下降趋势：在既定政策情景中，全球煤炭需求在 2025 年略有上升，随后开始缓慢下降，到 2050 年较 2020 年下降 25%，其中 2025-2030 年，中国煤炭总需求开始下降，发达经济体煤炭使用量大幅下降，主要原因是电力行业需求下降；在承诺目标情景中，2030 年全球煤炭需求仅比既定政策情景低 6%，但 2030 年后，尤其是中国煤炭需求迅速下降，2050 年全球煤炭需求仅为 2020 年的一半；在净零排放情景中，到 2030 年全球煤炭需求下降 55%，到 2050 年下降 90%，并且剩余少量煤炭使用中 80% 配备有 CCUS 技术。

低排放替代燃料（如现代生物能源和氢基燃料）将对实现净零排放目标发挥关键作用。各国对低排放燃料的支持差别较大：2020 年生物燃料使用量略低于 200 万桶/天，但到 2030 年，既定政策情景中生物燃料需求将增加一倍，承诺目标情景将增加 2.5 倍，净零排放情景中将增加 3 倍。净零排放情景中，到 2030 年沼气将为全世界 4 亿人口提供清洁的烹饪途径，沼气需求量将上升至 5.5 艾焦。另外，当前已有 17 个国家公布了低碳氢战略，20 多个国家正在制定氢能战略。既定政策情景下，到 2030 年低碳氢和氢基燃料需求将小幅上涨；承诺目标情景和净零排放情景下增长更快。净零排放情景中，2030 年低碳氢产量约有一半来自于电解水制氢，一半来自配备有 CCUS 技术的煤炭和天然气制氢（这一比例因各国差异而有不同）。

（汤匀 岳芳）

IEA 《全球氢能评估报告 2021》提出氢能未来发展战略建议

10月4日，国际能源署（IEA）发布《全球氢能评估报告 2021》¹⁶指出，氢能将在全球能源转型中发挥关键作用。报告强调，氢能尤其在难减排的行业（如化工、钢铁、长途卡车运输、海运和航运等行业）具有重要应用潜力；全球到 2030 年需投资 1.2 万亿美元，以构建全球氢能市场，实现全球净零排放。针对氢能未来发展，报告提出了五大战略性建议：各国需要制定氢能战略/路线图；发展低碳制氢技术；推进氢能项目投资；加速技术创新和商业化；构建配套的认证、标准和监管体系。报告要点如下：

一、当前全球多国政府积极采取行动，推动氢能快速发展

迄今公布的氢能战略显示，几乎所有国家对氢能在其能源系统中所扮演角色的认识大致相同，都强调了其对交通运输和工业部门脱碳的重要性。具体国家氢能战略布局如表 1 所示：

表 1 不同国家氢能战略布局情况

国家	政策	部署目标（2030）	制氢技术	应用领域	公共投资
澳大利亚	国家氢能战略 2019	无	煤+CCUS；可再生能源电解水制氢；天然气+CCUS	建筑、电力、出口、工业、海运、陆运	9 亿美元
加拿大	加拿大氢能战略 2020	制氢：400 万吨/年	生物质制氢；工业副产物制氢；电解水制氢；天然气+CCUS；石油+CCUS	建筑、电力、出口、工业、采矿、海运、陆运	到 2026 年每年投入 1900 万美元
智利	国家绿色氢能战略 2020	电解槽装机容量 25 吉瓦	可再生能源电解水制氢	建筑、出口、化工、冶炼、采矿、陆运	2021 年投入 5000 万美元
捷克	氢能战略 2021	制氢：9.7 万吨/年	电解水制氢	化工、陆运	无
欧盟	欧盟氢能战略 2020	电解槽装机容量 40 吉瓦	可再生能源电解水制氢；天然气+CCUS	工业、精炼、陆运	到 2030 年投入 43 亿美元
法国	氢能部署计划 2018；国家氢能脱碳发展战略 2020	电解槽装机容量 6.5 吉瓦；20%-40%工业氢脱碳；2-5 万辆燃料电池轻型车辆；800-2000 辆燃料电池重型车辆；400-1000 个加氢站	电解水制氢	工业、精炼、陆运	到 2030 年投入 82 亿美元
德国	国家氢能战略 2020	电解槽装机容量 5 吉瓦	可再生能源电解水制氢	航运、电力、工业、精炼、海运、陆运	到 2030 年资助 103 亿美元
匈牙利	国家氢能战略 2020	制氢：2 万吨/年低碳氢；1.6 万吨/年无碳氢；电解槽装机容量 240 兆	电解水制氢；化石燃料	电力、工业、陆运	无

¹⁶ Global Hydrogen Review 2021. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>

利		瓦； 用氢：3.4 万吨/年低碳氢；4800 辆 燃料电池汽车；20 个加氢站	+CCUS		
日本	氢能和燃料电池 战略路线图 2019；绿色增长 战略 2020，2021 (修订)	制氢：300 万吨/年 供应：42 万吨低碳氢；80 万辆燃 料电池汽车；1200 辆燃料电池公 交；1 万辆燃料电池渣土车；900 个加氢站；300 万吨氢燃料	电解水制氢； 化石燃料 +CCUS	建筑、电力、 炼钢、精炼、 海运、陆运	到 2030 年投入 65 亿美 元
韩国	氢能经济路线图 2019	制氢：194 万吨/年；290 万辆燃料 电池汽车；1200 个加氢站；8 万辆 燃料电池出租车；4 万辆燃料电池 公交；3 万辆燃料电池卡车	工业副产物制 氢；电解水制 氢；天然气 +CCUS	建筑、电力、 陆运	2020 年 投入 22 亿美元
荷兰	国家气候协议 2019；国家氢能 战略 2020	电解槽装机容量 3-4 吉瓦；30 万辆 燃料电池汽车；3000 辆燃料电池 重型车辆	可再生能源电 解水制氢；天 然气+CCUS	航运、建筑、 电力、工业、 精炼、航运、 陆运	8000 万 美元/年
挪威	国家氢能战略 2020；氢能路线 图 2021	无	可再生能源电 解水制氢；天 然气+CCUS	建筑、海运、 陆运	2021 年 投入 2100 万 美元
葡萄牙	国家氢能战略 2020	电解槽装机容量 2-2.5 吉瓦；天然 气掺氢比例达到 10%-15%；50-100 个加氢站	可再生能源电 解水制氢	电力、建筑、 陆运	到 2030 年每年投 入 100 万 美元
俄罗斯	氢能路线图 2020	出口 200 万吨氢气	电解水制氢； 天然气 +CCUS	电力、建筑、 精炼、出口	无
西班牙	国家氢能路线图 2020	电解槽装机容量 4 吉瓦；工业部门 脱碳氢占比 25%；5000 辆燃料电 池轻型车辆；7500 辆燃料电池重 型车辆；150-200 辆燃料电池公 交车；100-150 个加氢站	可再生能源电 解水制氢	航运、电力、 化工、精炼、 海运、陆运	18 亿美 元
英国	英国氢能战略 2021	低碳氢产量 5 吉瓦	电解水制氢； 天然气 +CCUS	航运、建筑、 电力、工业、 精炼、海运、 陆运	13 亿美 元

二、当前全球制氢技术正在清洁转型，但进度较为缓慢

2020 年，全球氢气需求量达到 9000 万吨，几乎全部用于工业炼油和其他应用，且几乎完全通过化石燃料生产，给全球带来了近 9 亿吨 CO₂ 排放量。有迹象表明，过去 5 年，全球电解槽产能翻了一番，到 2021 年中旬达到 300 多兆瓦。目前全球正在开发的 350 个电解水制氢项目，到 2030 年将实现氢供应量超过 800 万吨。尽管发展显著，但这一数字仍远低于 IEA《全球能源部门净零排放路线图》中设定到 2050 年实现净零排放发展的需求，即氢气供应量需要达到 8000 万吨。

欧洲在电解槽产能部署方面处于全球领先地位，占全球装机容量的 40%，在欧盟和英国政府氢能战略的支持下，短期内欧洲仍将是全球最大的氢能市场。澳大利亚宣布将在几年之内赶上欧洲；拉丁美洲和中东地区也将部署大量电解槽；中国虽然起步较晚，但氢能项目建设数量正在迅速增加；美国近日也宣布了“氢能攻关计划”。目前，全球 16 个利用碳捕集、利用和封存（CCUS）技术制氢项目已投运，

每年可生产 70 万吨氢气。另外 50 个制氢项目正在开发中，预计到 2030 年，每年氢能产量将增加到 900 万吨以上。加拿大和美国利用 CCUS 技术在化石燃料制氢领域处于全球领先地位，占全球产能的 80% 以上。

三、氢能应用领域正逐渐扩大

近年来，氢能在交通运输部门应用取得较为显著的进展。自 2008 年以来，由于技术进步和燃料电池汽车(FCEVs)销量的增加，燃料电池汽车制造成本下降了 70%。在韩国、美国、中国和日本的努力下，投运的燃料电池汽车数量从 2017 年的 7000 辆增加到 2021 年中旬的超过 4.3 万辆，增长幅度达到 6 倍以上。2017 年，几乎所有的燃料电池汽车均为乘用车；而目前，五分之一为公共汽车和卡车，这表明氢燃料电池汽车可以更好地与电动汽车相竞争。然而，燃料电池汽车部署数量仍远低于电动汽车，后者的部署规模为 1100 万辆。铁路、航运和海运方面使用氢基燃料的几个示范项目正在开发，预计将为创造氢需求开辟新的机会。此外，在工业部门，氢是工业脱碳的一个重要支柱，尽管大多数突破性技术仍处在萌芽阶段。今年，世界上第一个利用低碳氢生产无碳钢的示范项目在瑞典启动；一个使用波动性可再生氢生产氨的试点项目将于 2021 年底在西班牙启动；数个数万吨氢气产能规模的项目预计将在未来 2-3 年内投入使用。水泥、陶瓷和玻璃制造等工业应用中使用氢能的示范项目也在开发中。

四、具有潜在应用前景的新兴制氢技术现状

1、固体氧化物电解槽（SOEC）制氢技术

固体氧化物电解槽（SOEC）利用蒸汽替代水来制氢，这是与碱性水电解和质子交换膜电解槽一个关键区别。由于 SOEC 采用陶瓷作为电解质，因此材料成本较低。在高温环境下，其工作效率高达 79%-84%，核能、太阳能热、地热以及工业余热都可作为 SOEC 的热源。此外，SOEC 可以作为燃料电池在逆反应模式下将氢能转换成电能，这是区别于碱性质子交换膜电解槽的另一个特点。将 SOEC 与储氢设施相结合，可以为电网提供支撑服务，提高设备整体利用率。SOEC 还可以促使水蒸汽与 CO₂ 共电解，从而制得合成燃料。

目前，SOEC 仍处于大规模应用示范阶段（技术成熟度<TRL>为 6-7 级），通常应用于合成碳氢燃料。荷兰 Rotterdam 正在开发 2.6 兆瓦的 SOEC 制氢系统；丹麦计划在 2023 年前启动 500 兆瓦的 SOEC 制氢工厂。

2、甲烷热解制氢技术

甲烷热解（也称为甲烷裂解）制氢技术是将甲烷转化为气态氢和固态碳（如炭黑、石墨）的过程，此过程不会直接排放 CO₂。反应需要相对较高的温度(>800℃)，可通过传统方式（如电加热装置）或使用等离子体来实现。甲烷热解每单位氢气耗电量比电解制氢减少 3-5 倍，但该方法与甲烷蒸汽重整制氢技术相比，需要消耗更

多的天然气。甲烷热解制氢的转换效率为 40%-45%，但其副产物炭黑可用于制造橡胶、轮胎、打印油墨和塑料制品，2020 年全球炭黑需求量为 1600 万吨。此外，热解生成的碳还可用于建筑材料，或替代炼钢过程中所需的焦炭。

目前，正在开发的甲烷热解制氢技术 TRL 为 3-6 级。2020 年美国 Monolith 材料公司启动了利用等离子体高温加热甲烷热解制氢工厂，并计划建立一个商业化规模的氨生产工厂；澳大利亚 Hazer 集团正在建造催化辅助流化床反应器示范工厂，用于将沼气转化为氢气和石墨；俄罗斯天然气公司正开发一种基于等离子体的甲烷热解制氢工艺；美国 C-Zero 公司正开发一种用于甲烷热解的电加热金属熔融反应器。

3、阴离子交换膜（AEM）电解制氢技术

阴离子交换膜（AEM）电解槽结合了碱性水电解和质子交换膜电解槽的优点，仅使用过渡金属催化剂（CeO₂-La₂O₃），并不需要铂金属。AEM 电解槽一个关键的优点是 AEM 为固态电解质，避免了在碱性水电解中使用的腐蚀性电解质。

目前，AEM 技术仍处于早期研发阶段（TRL 为 4-5 级），德国 Enapter 公司正在开发千瓦级 AEM 电解槽系统。

4、电气化甲烷蒸汽重整（ESMR）制氢技术

电气化甲烷蒸汽重整（ESMR）制氢是一种利用电加热反应器代替燃气蒸汽重整反应器的工艺。目前，ESMR 技术仅在实验室规模进行了测试（TRL 为 4 级），一个正在部署的示范项目计划将沼气作为 EMSR 原料生产氢气和一氧化碳，然后转化为甲醇用于工业生产。

五、制氢、储氢、运氢及氢能应用全价值链技术成熟度情况

氢是一种用途广泛的燃料，可以使用各种能源（如煤炭、石油、天然气、生物质、可再生能源和核能）通过多种技术（重整、气化、电解、热解、水分解等）来生产。制氢、储氢、运氢及氢能应用全价值链技术成熟度情况如图 1 和图 2 所示。

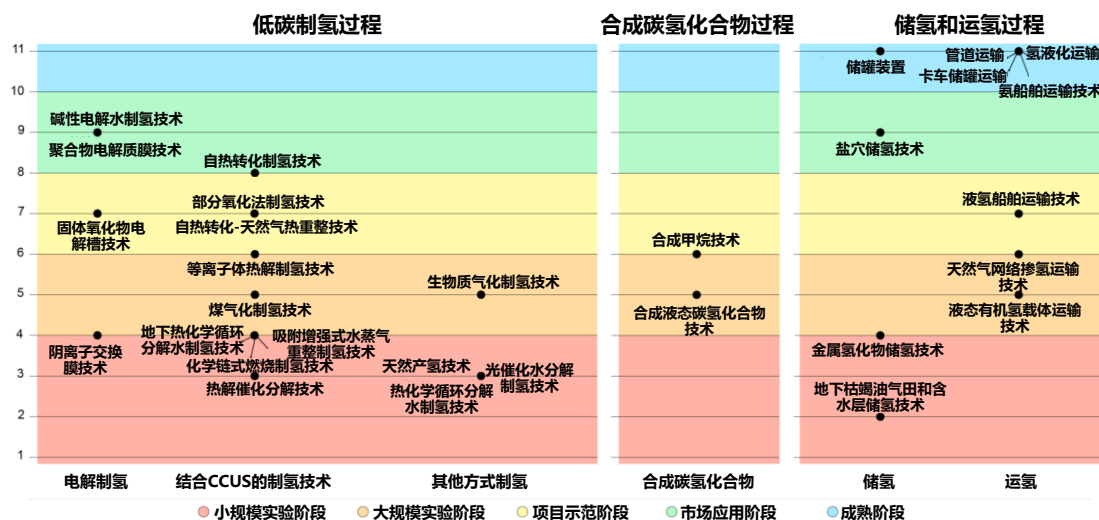


图 1 制氢、储氢、运氢过程技术成熟度

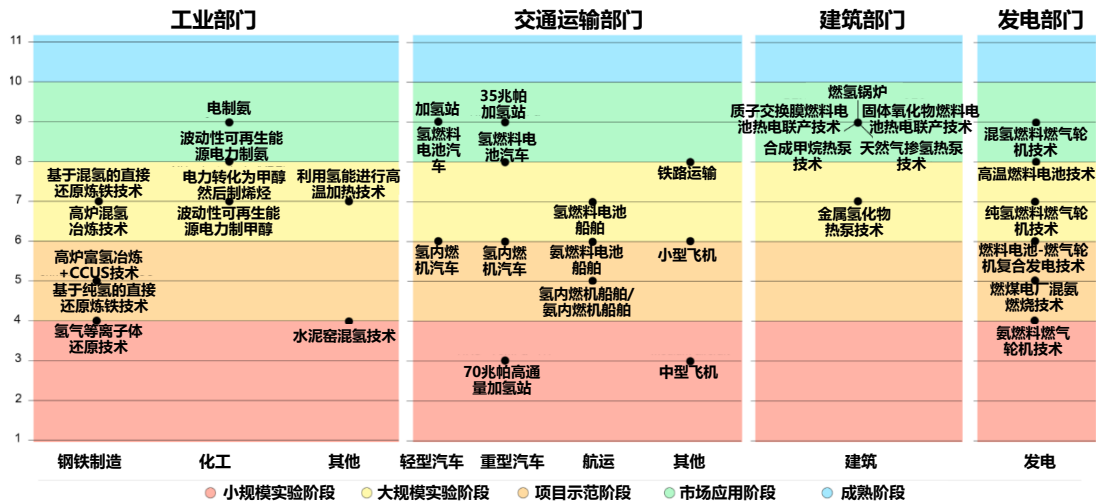


图 2 氢能终端应用各项技术成熟度

六、各国政府需加大投资，促进低碳氢生产以及氢能创新需求

目前，采取氢能战略的国家已承诺资助 370 亿美元，并联合私营部门投资 3000 亿美元用于氢能工业生产（如图 3 所示）。但要使氢能行业在 2050 年前实现净零排放，到 2030 年前需投资 1.2 万亿美元用于低碳氢的生产和应用。当前，大多数政府关注重点是生产低碳氢，对氢能创新需求关注较少。要提高低碳氢在清洁能源转型中的作用，需要在创新需求方面做出努力，多国政府已宣布包括制定碳价、配额、公共采购等各种政策激励手段，但这些措施尚未生效。未来需加速推广氢能创新需求激励手段，大规模推进氢能项目示范部署，扩大氢能需求。

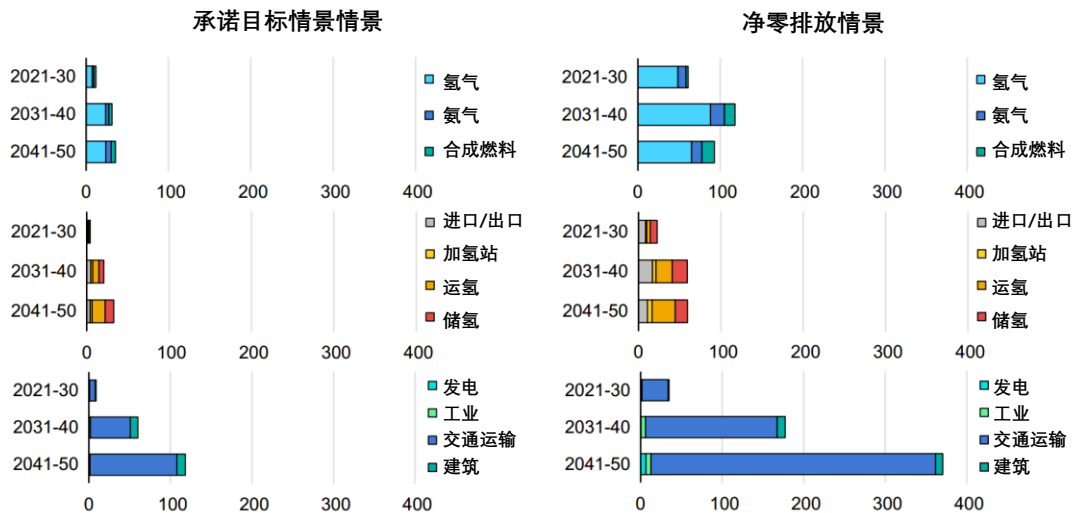


图 3 承诺目标情景和净零排放情景中各领域氢能相关技术投资额需求（单位：十亿美元）

七、未来十年低碳氢的市场竞争力将日益增强

目前，发展低碳氢的一个主要障碍是其成本远高于化石燃料制氢成本。化石燃料制氢是世界上多数地区最具经济效益的方式之一。根据各地区天然气价格的不同，通过天然气生产氢气的平均成本为 0.5-1.7 美元/千克。使用 CCUS 技术来减少氢生

产过程中的碳排放，将使氢生产成本提高到 1-2 美元/千克。而当前使用可再生能源制氢成本最高，为 3-8 美元/千克。通过技术创新和增加规模，将有效降低氢气生产成本。长远来看，根据 IEA 的 2050 净零排放情景，可再生能源电力制氢成本可降至 1 美元/千克（范围为 1.0-3.0 美元/千克），在一些地区，即使没有采用 CCUS 技术，太阳能光伏制氢的成本也将可以媲美天然气制氢成本。

八、实现气候承诺需采取更果断的行动，并加强国际合作

虽然氢燃料需求量和使用范围正不断增加，但以目前的发展进程仍无法达到 2050 年实现净零排放的要求。如果目前所有宣布的氢能计划都能实施，到 2030 年将实现如下进展：①与 2050 净零排放情景中超过 2 亿吨的氢能需求相比，目前总氢能需求将增加到 1.05 亿吨；②低碳氢产量将达到 1700 万吨，但这只是 2050 净零排放情景中所要求的八分之一；③电解槽装机容量将达到 90 吉瓦，但远低于 2050 净零排放情景中所要求的近 850 吉瓦；④最多可部署 600 万辆燃料电池汽车，但仅为 2050 净零排放情景中所要求部署规模的 40%（1500 万辆燃料电池汽车）。

国际合作对加速氢能市场构建至关重要，自 2018 年以来，日本一直通过氢能部长级会议引领该领域全球发展。此后，多个国家和组织宣布了若干双边和多边合作协议和倡议，包括清洁能源部长级氢能倡议、氢能创新使命和联合国工业发展组织的全球氢能伙伴关系。加强倡议间的协调对避免重复工作和确保有效进展具有重要意义。

九、国际能源署对构建全球氢能市场五大战略性建议

（1）各国需要制定氢能战略/路线图。特别是氢能需求较大的国家需要制定国家氢能战略/路线图，重点设定低碳氢产量的具体指标，通过刺激措施撬动更多的投资以扩大氢能市场价值，加速氢能项目部署速度，这将对利益相关方构建低碳氢潜在市场的信心至关重要。

（2）建立激励机制，发展低碳制氢技术以取代化石燃料。充分挖掘氢能作为清洁能源载体的潜力，一些国家/地区已经在利用碳价来缩小可再生能源制氢与化石燃料制氢之间的成本差距，但这还远远不够。为帮助行业降低风险和提高项目生产效率，政府应设计透明和可预测的政策框架和金融支持计划，如实施碳价、授权/配额、公共采购等措施。国际社会的积极参与将有助于推动氢能技术快速发展。

（3）推进氢能生产装置、基础设施和示范工厂的投资建设。在制氢领域，提升电解槽和碳捕集装置在制氢过程中的使用率，发展氢专用基础设施、提高氢能技术（如燃料电池和电解槽）的创新能力。政府需要缩短支撑技术的审批流程，允许私人企业和投资者进行投资，加快大规模低碳氢管道建设。此外，政府通过拨款、贷款和税收减免等措施为选定的旗舰项目提供量身定制的支撑，并建立今后的支持计划将有助于低碳氢的推广。

(4) 加速技术创新，确保关键技术迅速实现商业化。持续的技术创新对降低用氢成本和提高氢能竞争力至关重要。本世纪初须实现的商业化技术包括：在钢铁冶炼过程中使用氢能、利用波动性可再生能源电解水制氢用于生产氨气和甲醇、在重型交通运输中使用氢能以及在航运中使用氢能。在这一领域，国际合作至关重要，下一步计划在“创新使命”计划中将氢能研发经费翻倍，并利用国际能源署和先进燃料电池技术合作计划，召集并促进国际研发和信息交流。

(5) 构建配套的标准、认证和监管体系。氢气作为清洁能源有望刺激新市场和价值链的发展，因此需要加快构建配套的监管框架、认证计划和标准规范，以减少利益相关方推进氢能部署面临的障碍，在短期内需注重国际贸易、用氢安全、技术采用这三个领域标准的制定。标准制定之后需进行技术认证，以确保制造商遵守国际标准，激发低碳氢使用活力。此外，一个清晰、透明和支持性的监管框架将促进全球氢能市场快速发展。随着氢能需求和供应商数量的增加，以及全新的价值链和合作伙伴关系的出现，监管体系需变得动态灵活，以适应市场演变，并保障生产装置和基础设施投资的可靠性。最后，金融市场监管以及国际上对环境、社会 and 企业的碳排放监控将推动投资者将目光转向包括低碳氢在内的清洁能源领域。

(汤匀 郭楷模)



《洁净能源科技动态监测快报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

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

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：energy@whlib.ac.cn