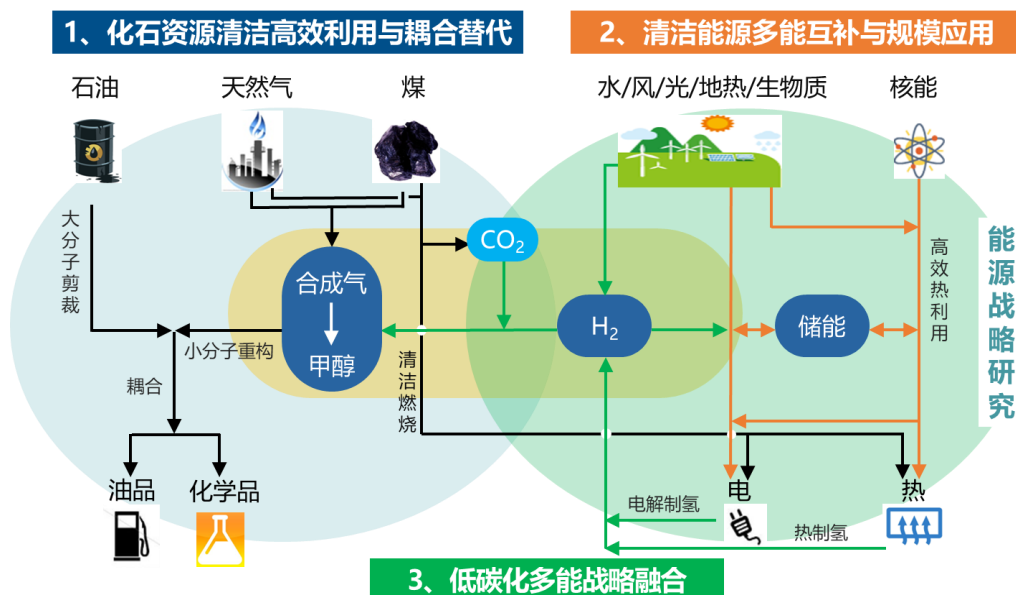




洁净能源科技动态监测快报

2021 年第 06 期（总第 20 期）



本期看点

- DOE 上亿美元支持能源技术创新助力煤炭资源型地区转型
- 日本 NEDO 推进燃煤电厂混氨燃烧技术
- 经合组织核能署评述小型模块化反应堆发展机遇与挑战
- DOE 提出综合能源系统协同研究的机遇与挑战
- IEA 发布全球首份能源部门实现 2050 净零排放路线图
- 国际能源署与欧专局分析全球清洁能源技术创新趋势

目 录

2021 年第 06 期 (总第 20 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

- DOE 上亿美元支持能源技术创新助力煤炭资源型地区转型 2
- 日本 NEDO 推进燃煤电厂混氨燃烧技术 3
- DOE 资助 620 万美元支持高效氢燃气轮机前沿研究 4

◆ 清洁能源多能互补

- 经合组织核能署评述小型模块化反应堆发展机遇与挑战 6
- ARPA-E 资助 3500 万美元支持先进生物燃料技术研发 8
- 英国部署主题研究项目支持波浪能技术研发 10
- 贗卤素阴离子工程助力钙钛矿太阳能电池创 25.6%世界纪录 11

◆ 低碳化多能融合

- DOE 提出综合能源系统协同研究的机遇与挑战 14
- Hydrogen Europe 提出“三步走”氢经济发展路线图 17
- 澳大利亚公私投入 6800 万澳元推进氢工业发展 20
- 三明治固态电解质助力锂金属电池实现超万次循环 20
- Z 型异质结催化剂将光合作用合成 H_2O_2 速率提升数十倍 22

◆ 能源战略研究

- IEA 发布全球首份能源部门实现 2050 净零排放路线图 24
- 国际能源署与欧专局分析全球清洁能源技术创新趋势 33

本期概要

美国能源部 (DOE) 宣布投入 1.095 亿美元支持创新能源技术项目, 以促进煤炭开采和发电地区的经济转型, 此次资助重点关注 3 个技术领域, 包括: 碳捕集, 开发用于天然气联合循环 (NGCC) 发电厂和工业过程的低成本、高效、可扩展的碳捕集技术; 从煤炭和废物流中提取关键矿物; 地热能开发。

日本新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) 支持燃煤电厂混氨燃烧发电技术研发和示范, 以推进用氨燃料代替化石燃料, 为 2050 碳中和目标做出贡献: NEDO 在“碳回收和下一代火力发电等技术开发”计划框架下新设立了两个研发主题, 即“火力发电厂推广使用无 CO₂ 排放氨燃料技术研发”和“1000 兆瓦燃煤电厂 20% 氨混煤燃烧示范研究”, 以减少燃煤电厂碳排放。项目执行期为 2021-2024 年, 总预算为 110 亿日元。

经合组织核能署 (OECD-NEA) 发布《小型模块化反应堆发展机遇与挑战》报告, 系统阐述了 SMR 的发展现状和机遇, 重点分析了其面临的挑战: 小型模块化反应堆 (SMR, 每个模块装机容量不超过 300 MW) 具备初期投资少、建造周期短、可以有效解决中小电网输电问题等优势, 得到了世界各国广泛关注。除了发电, SMR 还可以适用于海水淡化、制氢、区域供暖等, 具备了广阔的不同应用场景和市场。但其商业化仍然面临一系列挑战, 包括: 技术选择、审查许可框架、供应链、公众接受度等问题。

美国能源部 (DOE) 发布《综合能源系统: 协同研究机遇》报告指出, 与传统独立能源系统相比, 综合能源系统 (HES) 通过总体控制或物理方式集成多种能源生产、存储和/或转换技术, 以实现节约成本、增强能效和环境效益: 综合能源系统对美国经济脱碳、生产高价值产品 (如氢气)、提高电网灵活性, 以及扩大可再生能源技术的部署方面将发挥重要作用。但综合能源系统作为全新的能源系统形态, 也为电力市场的设计、运营和监管, 国家监管以及能源政策的设计和 implement 带来了挑战。报告系统探讨了综合能源系统技术研究开发的机遇和挑战。

国际能源署 (IEA) 发布全球首份《能源部门实现 2050 净零排放路线图》报告, 提出了全球能源部门实现 2050 年净零排放的路线图, 阐述实现净零排放需要实现的关键里程碑以及需要采取的优先行动: (1) 实现 2050 年净零排放需要达成不同时间节点的里程碑; (2) 实现 2050 年净零排放有赖于 2030 年前清洁能源技术的发展步伐; (3) 实现 2050 年净零排放要求清洁能源技术创新工作取得质的飞跃; (4) 实现 2050 年净零排放很大程度上取决于人的因素; (5) 打造一个以可再生能源为主体的能源部门; (6) 本路线图提供的实现净零排放路径不需要投资新的化石燃料; (7) 新的能源安全问题开始显现, 但旧问题依然存在; (8) 国际合作对实现 2050 净零排放目标意义重大。

国际能源署 (IEA) 和欧洲专利局 (EPO) 联合发布《专利与能源转型: 清洁能源技术创新全球趋势》报告, 分析了全球低碳能源技术创新的发展趋势: 在经历了过去十年专利申请活动的低迷之后, 许多关键的低碳能源新兴技术和交叉技术专利申请已连续三年增长, 这与 2015 年以来化石燃料专利数量下降趋势形成了鲜明对比, 但总体上低碳能源技术专利的增长率仍低于 2013 年之前的水平。为了实现共同的净零排放目标, 全球迫切需要将清洁能源创新的复苏推向全新转型阶段。

化石资源清洁高效利用

DOE 上亿美元支持能源技术创新助力煤炭资源型地区转型

4月23日，美国能源部（DOE）宣布投入1.095亿美元支持创新能源技术项目¹，以促进煤炭开采和发电地区的经济转型，旨在通过这些地区投资创新能源技术开发以培育发展下一代产业，创造新的就业机会。此次资助重点关注3个技术领域：碳捕集；从煤炭和废物流中提取关键矿物；地热能。详细内容如下：

一、碳捕集技术（7500万美元）

该项资助将支持开发用于天然气联合循环（NGCC）发电厂和工业过程的低成本、高效、可扩展的碳捕集技术，具体主题为：

1、NGCC 电厂碳捕集装置高效部件和工艺的台架试验。将开发和测试用于NGCC（不包括简单循环）的变革性燃烧后碳捕集技术，其碳捕集率将超过95%，还将示范能够降低20%碳捕集成本的重要工艺。该主题包括两个子领域：

(1) NGCC 电厂碳捕集装置高效部件的台架级测试，尤其关注：①提高材料对氧化和水热降解的稳定性；②通过新型设备和/或组件设计（例如低压降吸附装置）来减少所需的辅助电源，采用新型解吸方式来减少热量和电力需求；③最大限度地提高组件的碳捕集容积生产率，以减少NGCC碳捕集系统的资本支出。

(2) NGCC 电厂碳捕集装置高效集成工艺的台架级测试，尤其关注：①基于新型溶剂的工作溶液、结构化吸附剂、包含吸附剂的结构化材料系统、在NGCC烟气环境下具有长期稳定性的新型概念或复合系统；②提高材料对氧化和水热降解的稳定性；③通过使用新型设备和/或组件设计（例如低压降吸附装置）来减少所需的辅助电源；④最大限度地提高组件的碳捕集容积生产率，以减少NGCC碳捕集系统的资本支出；⑤能够整合两个或多个单元的工艺或运行过程，以降低碳捕集成本，提高碳捕集效率。

2、用于工业过程的变革性燃烧后碳捕集的工程规模测试。该主题将设计、构建和测试变革性的燃烧后溶剂、吸附剂或膜捕集系统，以及新概念系统或复合系统，上述技术将在工业设施真实烟气条件下验证，捕集率和CO₂纯度均需超过95%。其应用的工业部门包括炼油、化工生产（氨和石化）、矿物生产（水泥和石灰）、天然气加工和钢铁生产。

3、碳捕集系统前端工程设计。该主题领域将为商业规模碳捕集项目完成前端工

¹ DOE Announces \$109.5 Million to Support Jobs and Economic Growth in Coal and Power Plant Communities.
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-1095-million-support-jobs-and-economic-growth-coal-and-power-plant>

程设计研究，这些项目将捕集工业设施或 NGCC 电厂碳排放总量的 95%。先进的碳捕集系统（技术成熟度达到 6 级或以上）需具备从工业设施中每年分离超过 10 万吨 CO₂，或从 NGCC 发电厂每年分离超过 50 万吨 CO₂，并用于地质封存。该主题包括两个子领域：（1）现有（改造）工业设施碳捕集系统前端工程设计研究；（2）现有（改造）NGCC 电厂碳捕集系统前端工程设计研究。

二、从煤炭和相关废物流中提取关键矿物（1950 万美元）

该项资助将支持从煤矿和煤电厂的废物中提取关键矿物的技术，用于生产电池、磁铁及其他重要部件，以应用于电动汽车及其他清洁能源技术。

三、西弗吉尼亚大学和桑迪亚国家实验室地热能研究项目（1500 万美元）

该项资助将支持两个地热能研究项目，以降低开发地热资源用于发电、供热/制冷的成本和风险。西弗吉尼亚大学将探索在校园中全年深度利用地热能直接供暖和制冷。桑迪亚国家实验室将使用创新方法进行电磁勘测，以完善地热勘探方法，并应用于美国西部地热勘探时的钻井作业，为石油和天然气下岗工人创造就业机会。

（岳芳）

日本 NEDO 推进燃煤电厂混氨燃烧技术

5 月 24 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布将在“碳回收和下一代火力发电等技术开发”计划框架下新增两个研发主题²，支持燃煤电厂混氨燃烧发电技术研发和示范，以推进用氨燃料代替化石燃料，为 2050 碳中和目标做出贡献。

根据《绿色增长战略》，日本将推进氨燃料产业的绿色发展，其中包括推进氨燃料与煤的混合燃烧（混燃）技术，到 2030 年将实现在火力发电厂掺混 20%氨燃烧，随后成套实用化部署氨混燃与氮氧化物减排装置。为此，NEDO 新设立两个研发主题，即“火力发电厂推广使用无 CO₂ 排放氨燃料技术研发”和“1000 兆瓦燃煤电厂 20%氨混煤燃烧示范研究”，以减少燃煤电厂碳排放。项目执行期为 2021-2024 年，总预算为 110 亿日元。前者将在现有燃煤发电设施中引入氨燃烧器来开发与煤的混燃技术，并研究以稳定和低成本方式采购氨作为燃料的可行性；后者将在 1000 兆瓦级商用燃煤发电设施中进行 20%氨燃料混烧燃烧器的示范运行。

（岳芳）

² アンモニア混焼技術の実用化へ向けた技術開発を加速。
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101432.html

DOE 资助 620 万美元支持高效氢燃气轮机前沿研究

5月12日，美国能源部（DOE）宣布投入620万美元支持8个由大学牵头的氢燃气轮机前沿研究项目³，旨在发展高效、可靠、高性能的氢能发电技术，减少电力碳排放，助力到2035年实现100%清洁电力目标。本次资助在“大学燃气轮机系统研究”计划资助框架下进行，将研究与提高纯氢、氢和天然气混合物以及其他无碳氢基燃料燃气轮机的性能和效率相关的基本科学挑战和应用工程问题。详细内容如下：

一、燃气轮机氢燃烧基础研究（220 万美元）

1、高氢混合燃料燃烧的点火、湍流火焰速度和排放研究。佐治亚理工学院将进行燃气轮机相关条件下的高氢燃料燃烧的关键动力学、火焰传播和排放特性机理研究，将使用最先进的高压激波管和湍流火焰设施等进行实验研究以获取数据，作为开发和验证高氢燃料燃烧的简化化学动力学模型和湍流火焰模型的数据基础。数据测量将专注于量化自燃、层流火焰速度、湍流火焰速度和湍流火焰排放。该项研究还将开发一个简化的动力学模型，包括一个氮氧化物（NO_x）模块。

2、燃气轮机含氢燃料燃烧的基础实验和数值研究。中佛罗里达大学将针对此前从未探索过的氢基燃料和燃烧条件进行基础实验和数值研究，预期结果包括自燃特性、一氧化氮（NO）和一氧化碳（CO）随时间的演化、层流和湍流燃烧速度、应变率及其与NO_x排放的关系、择优扩散对燃烧特性的影响，以及通过高保真模拟了解湍流边界层中的回火。该项研究还将采用深度学习人工智能模型快速分析基本燃烧的详细特性，以支持含氢燃料燃烧器开发中的设计和故障排除过程。

3、利用高保真仿真分析、简化模型和测试进行增材制造微混氢燃气轮机燃烧器的设计实践。圣地亚哥州立大学将与索拉透平公司（Solar Turbines）合作进行模拟和测试，以推进工业燃气轮机中微混氢燃气轮机燃烧器的增材制造设计。该项目将开发一个通用建模框架，以预测氢燃料喷射器的几何设计和制造异常对混合、流速、压力损失、传热和火焰稳定性的影响。

二、燃气轮机氢燃烧应用研究（240 万美元）

1、氢燃气轮机燃烧火焰结构研究。普渡大学将研究燃气轮机使用氢燃料、氨燃料以及上述燃料与天然气的混合燃料燃烧火焰结构和动力学，探索火焰稳定、点火和回火等过程，并在商用航改型和重型F级和H级燃气轮机系统的燃烧条件下表征燃烧效率和污染物排放。该项研究将重点关注多级、多管微混喷射器的增材制造，设计为适用于氢、氨、天然气及其混合燃料，并将与通用电气合作在其先进诊断燃烧室装置上进行测试，使用多种激光诊断方法研究火焰结构和动力学，包括双泵相

³ DOE Awards \$6.2 Million for Cutting-Edge Research for Efficient Hydrogen Gas Turbines.
<https://www.energy.gov/articles/doe-awards-62-million-cutting-edge-research-efficient-hydrogen-gas-turbines>

干反斯托克斯拉曼散射 (CARS)、超高速粒子成像测速和平面激光诱导荧光。此外，还将对火焰气体进行探针采样，以确定燃烧效率并检测污染物排放。

2、氢燃料对贫预混和分级燃气轮机燃烧器稳定性和运行的影响。俄亥俄州立大学将通过实验和模拟研究，推进燃气轮机的高氢含量燃料运行。主要包括：(1) 使用先进的激光诊断技术同时测量多个与火焰相关的参数，以研究火焰稳定、回火和轴向燃料分级；(2) 开发一套综合计算模型来模拟与火焰稳定和回火相关的不稳定和瞬态过程；(3) 结合实验和模拟来表征具有轴向燃料分级设计的多管主燃烧器的运行特性和限制。

3、多点阵列喷射概念在含氢燃料燃气轮机运行中的开发和应用。加州大学尔湾分校将与索拉透平公司 (Solar Turbines) 和柯林斯宇航公司 (Collins Aerospace) 合作，进行如下研究：(1) 将 Collins Aerospace 设计的先进液体燃料喷射器用于航空发动机，以适应纯氢、氢/天然气混合燃料的喷射；(2) 在加州大学尔湾分校使用实验室级的模型燃烧器配置在升高压力和温度条件下进行运行试验；(3) 开发测试硬件设计，在 Solar Turbines 的测试设施中进行发动机条件下的演示。

三、氢气-空气旋转爆轰发动机 (160 万美元)

1、将旋转爆轰燃烧器与燃气轮机相结合以最大化压力增益的稳健方法。阿拉巴马大学、弗吉尼亚理工学院、航空喷气洛克达因公司 (Aerojet Rocketdyne)、科莱特半导体产品公司 (Kulite Semiconductor Products) 和海军研究实验室合作，开发一种将旋转爆轰燃烧器与燃气轮机集成的方法，并确定损失机制对旋转爆轰燃烧器性能的影响。该项研究将针对 F 级燃气轮机相关条件下的氢燃料以及氢/甲烷混合燃料进行。

2、将氢气-空气旋转爆轰技术集成至燃气轮机发电厂。普渡大学将与大学和行业合作伙伴共同开发一种新型的紧凑型燃烧器-扩散器-燃气轮机策略，将旋转爆轰燃烧器的高速、非定常流动应用于工业燃气轮机。该研究将开发物理模型以将其扩展至 F 级燃气轮机，最终采用实验/数值方法来建立架构并确定相关无量纲参数，以实现发电厂的高热力循环效率运行。具体包括：(1) 通过实验和计算研究来表征各种损失机制对旋转爆轰燃烧器-燃气轮机系统性能指标的影响；(2) 开发高马赫数、非定常旋转爆轰燃烧器出口到燃气轮机转子的有效过渡机制，以实现可靠的功提取。

(岳芳)

清洁能源多能互补

经合组织核能署评述小型模块化反应堆发展机遇与挑战

4月13日，经合组织核能署（OECD-NEA）发布《小型模块化反应堆发展机遇与挑战》报告⁴指出，发展核电是应对气候变化、推动社会经济可持续发展的关键手段之一。小型模块化反应堆（SMR，每个模块装机容量不超过300 MW）能够满足更广泛用户和应用的灵活发电需求，并取代老化的化石燃料发电厂，具备初期投资少、建造周期短、可以有效解决中小电网输电问题等优势，得到了世界各国广泛关注。报告系统阐述了SMR的发展现状和机遇，重点分析了其面临的挑战，包括SMR技术选择、审查许可框架、供应链、公众接受度等问题，要点如下：

1、全球已发展出不同技术路线和成熟度的SMR设计及概念

依据国际原子能机构（IAEA）最新统计数据，全球目前约有70种SMR设计和概念，处于不同开发阶段。这些SMR设计使用不同类型冷却剂和燃料形式，并具有不同的技术成熟度水平和许可审批进展。SMR具备优异的灵活性，能够以单一或多模块形式进行部署，并且可以在工厂内建造，根据需求运输到现场安装。

当下，在供应商提出的一系列SMR设计概念中，最成熟的概念是在世界范围内广泛采用的第二代和第三代/三代+轻水反应堆（LWR）的变种，主要得益于该反应堆几十年的建造、运行和监管经验。它们大约占到了正在设计开发的SMR的50%。另外50%的SMR概念设计是基于第四代反应堆技术，采用了替代冷却剂（即液态金属、气体或熔融盐）、先进的核燃料和创新的系统配置。虽然基于第四代反应堆技术的SMR设计与基于LWR技术的操作和监管经验水平存在一定差距，而且在某些领域仍需要额外的研究，但还是可以从开发商和监管机构过往各种反应堆研究开发的丰富经验中获得启示。

2、全新的交付模式和价值是SMR竞争力核心

相比大型堆，小堆单机装机容量小，不能从单堆的规模经济中受益，因此需要“批量建设”以克服上述经济性问题。但相比大型堆，SMR可以模块化制造和装配，可以进行工厂预制，有利于提高生产效率，加强质量控制，降低建设风险以及引进新的制造技术。

SMR建造周期短，前期投资低，提供更好的前期资本成本承受能力，其结果是降低了潜在客户和投资者的财务风险。此外，SMR可以适用于海水淡化、制氢、区域供暖等，具备了广阔的不同应用场景和市场。

⁴ Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities.
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities

3、SMR 规模化部署面临的挑战

尽管 SMR 具备了一系列优点，但其规模化部署仍然面临诸多严峻挑战，包括：

(1) 技术选择问题。如上文所示，目前全球正在开发的 SMR 设计概念有众多技术路径，每种技术路径的发展成熟度不同。普遍认为其中有几种会最终实现商业化。但关于哪些技术应该进一步开发或商业化，在何时、如何以及由谁来决定这些问题上存在分歧。

(2) 审查许可框架问题。由于目前各国的法律法规、核电项目审查许可程序等主要针对大型核电站，并不适用于小型堆，如目前的许可框架主要依赖于使用氧化铀燃料（铀-235 丰度低于 5%）的大型轻水堆运行经验。拟开发中的以 LWR 技术为基础的 SMR 具有类似的运行条件和燃料，这将有助于提升其许可程序效率。然而，新型 SMR 概念和设计则面临经验基础有限的问题，这使得 SMR 项目的安全评估论证和批准面临挑战。此外，燃料和/或冷却剂的变化将导致与以往监管模式产生显著差别，可能需要更灵活的许可方法，以及在核安全监管机构内发展大量新的专业知识。

(3) 首个 SMR 示范堆问题。即使有一套适当的筛选制度来保证最好的技术能够走到最后阶段实现商用，由于 SMR 创新本质，一些技术不确定性和额外的技术风险仍然存在。而从投资者角度来看，在无法知晓和确认 SMR 性能和商用价值之前就往 SMR 领域投入大量资金不太可能。因此建造 SMR 示范堆以对技术性能和商业价值进行全面评估论证显得意义重大，是 SMR 走向商用的关键一步。

(4) 供应链问题。随着技术研发工作的不断推进以及首批示范堆的建成，SMR 面临的技术风险将会降低，对潜在客户的吸引力也会增加，规模化部署将逐步得到推进。因此 SMR 各利益相关方应开展供应链能力建设，做好为小堆商业化提供支持的准备，包括设备制造能力和高丰度低浓铀燃料及其他新型燃料制造能力，以及开展必要的人才培养和研发基础设施建设。

(5) 公众接受度问题。受到核事故带来的影响，世界范围内的核能发展普遍陷入低潮。任何新建核能项目都需将公众接受程度放在首位，做好公众宣传，让公众清晰了解新技术的益处（技术安全性、创造就业等）和风险（核泄露、辐射等），提高公众对 SMR 的接受度。而 SMR 固有的良好安全性是提升接受度的关键突破口之一。

4、政府支持和国际合作是推动 SMR 规模化部署的关键驱动力

在 SMR 商业化进程中，政府支持和国际合作能够在四个方面发挥关键作用：

(1) 公众参与。通过尽早推动当地公众参与到 SMR 项目中，未来的 SMR 项目可从国际合作以及经验教训和最佳实践的交流中获益。

(2) 首个 SMR 反应堆的建造。政府应采用多种形式支持 SMR 首堆建设工作，

包括：从签署长期购电协议到采用费用分担机制，以降低建设风险，吸引更多投资者；支持监管机构建立必要的取证体系并开展相应的能力建设也同样至关重要；与此同时，政府还应通过为首堆建设提供选址或为研究基础设施建设提供资金等方式，推进 SMR 的商业化部署进程。

(3) 协调审查许可框架体系。利用在大堆领域的现有合作体系，推进各国审查许可体系的协调工作。尽管完全统一可能不切实际（有时甚至是不可取的），监管部门仍应继续努力，在部分领域就监管立场达成一致。应当考虑核能署在各国设计评估计划等项目下开展的多边审查许可协调、双边合作和联合安全评估工作。

(4) 制造能力建设。通过实施支持多座小堆建设的国家计划，相关国家能够建立并加强反应堆装备制造能力。对于拥有大型反应堆建设能力的国家，还能够充分利用现有经验和制造能力。各国应该加强国际合作，采取措施应对 SMR 规模化部署面临的装备制造产业链挑战，以加快小堆开发和商业化进程。

（王珍 郭楷模）

ARPA-E 资助 3500 万美元支持先进生物燃料技术研发

5 月 14 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布在“生物燃料低碳化（ECOSynBio）”主题计划框架下资助 3500 万美元支持新遴选的 15 个研究项目⁵，旨在整合高校、企业和国家实验室的研究力量联合开发先进的生物质转化燃料技术，以实现整个转化过程的去碳化（即把生物质转化燃料过程中产生的碳也重新利用），同时实现产量的最大化。本次资助的研究课题主要内容如下：

1、负碳化学品生产平台（承担机构：郎泽科技公司；资助金额：416 万美元）

开发变革性技术，以利用经济合理、可再生的氢气来与被捕集的 CO₂ 反应，以实现将 CO₂ 直接转化为乙醇或者高价值化学品，实现碳资源的 100% 转化利用。

2、利用发酵技术制备甲酸（承担机构：国家可再生能源实验室；资助金额：283 万美元）

开发一种新型的生物精炼技术，可以利用电化学生成的甲酸酯和糖作为原料进行发酵，实现在不释放 CO₂ 的情况下合成脂肪酸甲酯（FAME），用于进一步生产可持续航空燃料。

3、利用乙酸盐制备燃料和化学品（承担机构：威斯康星大学；资助金额：342 万美元）

开发一种新技术，可以利用 CO₂ 和 H₂ 生产醋酸盐，随后以醋酸盐为原料转化为燃料或高价值化学品，实现生物质制氢过程中的 CO₂ 循环利用，避免排放。

4、革命性的生物质制化学品技术（承担机构：斯坦福大学；资助金额：258 万

⁵ DOE Invests \$35 Million to Dramatically Reduce Carbon Footprint of Biofuel Production.
<https://www.energy.gov/articles/doe-invests-35-million-dramatically-reduce-carbon-footprint-biofuel-production>

美元)

探寻创新工艺来取代传统的发酵方法，用于生物基化学品制备。这种新工艺能够以大气中的 CO₂ 和玉米淀粉中获得的葡萄糖为原料制备可再生燃料和化学品，实现 CO₂ 有效利用，避免排放到大气中。

5、生物能源（承担机构：特拉华大学；资助金额：275 万美元）

开发一种基于梭状芽孢杆菌分解合成技术，能够快速高效地将可再生碳水化合物（包括葡萄糖底物、CO₂）转化为生物燃料，如异丙醇、正丁醇等。

6、生物代谢制备生物燃料（承担机构：加州大学戴维斯分校；资助金额：157 万美元）

拟开发一种系统将使用一种异养菌株，通过合成代谢将糖底物转化为生物燃料，并将与一种自养菌株共培养，以实现糖发酵过程中释放的 CO₂ 有效循环利用。

7、生物催化合成负碳化学品（承担机构：INvizyne 科技公司；资助金额：166 万美元）

依托碳中性的 CO₂ 利用技术开发并演示一种生物催化平台，实现以碳中性方式合成制备高价值化学品，且该技术具备良好的成本竞争力。

8、CO₂ 羧酸化转化为生物燃料和化学品（承担机构：加利福尼亚大学尔湾分校；资助金额：184 万美元）

开发出一种基于生物酶催化技术，将 CO₂ 转化为化学品，即各种功能化羧酸和衍生物；随后以羧酸及其衍生物作为原料进一步转化为生物燃料和化学品。

9、CO₂ 工业循环利用（承担机构：哈佛大学维斯研究所；资助金额：298 万美元）

通过基因工程和改进的发酵技术，提高改性微生物的能力，实现将工业排放的 CO₂ 转化为生物燃料和化学品。

10、生物电催化制备碳基燃料或化学品（承担机构：明尼苏达大学；资助金额：111 万美元）

设计一种生物催化系统，结合可再生能源电力和碳捕集系统，将 CO₂ 有效电催化转化为甲酸。

11、生物电催化制备碳基燃料或化学品（承担机构：麻省理工学院；资助金额：210 万美元）

设计一种产油酵母 *Yarrowia lipolytica*，生产生物柴油类脂质和烷烃，减少或消除脂质/烷烃生产过程中的 CO₂。

12、木质素糖转化为丁醇（承担机构：俄亥俄州立大学；资助金额：161 万美元）

设计、模拟和构建由三种细菌组成的合成微生物菌群，将木质纤维素糖 100% 转

化为丁醇，同时实现 CO₂ 零排放。

13、生物电催化和发酵混合技术（承担机构：ZymoChem 公司；资助金额：105 万美元）

开发一种生物电催化和发酵混合技术，通过生物催化将 CO₂ 转化为甲酸；再利用微生物发酵将甲酸转化为高价值化学品。

14、规模化生物转化（承担机构：华盛顿大学；资助金额：166 万美元）

开发一种多功能多酶系统，以实现 CO₂ 到工业化学品苹果酸盐的经济高效规模转化。

15、规模化生物转化（承担机构：ZymoChem 公司；资助金额：318 万美元）

开发新型的生物催化剂，将 C1 原料（如甲醇）和生物质衍生底物（如糖）共同转化为燃料或化学品中间体。

（廖明月 郭楷模）

英国部署主题研究项目支持波浪能技术研发

近期，英国研究与创新局（UKRI）宣布资助 750 万英镑支持新遴选的波浪能技术相关的 8 个主题研究项目⁶，旨在开发先进的波浪能转换器，提升波浪能到电力转换效率，同时增强其抵御海上极端环境冲击的能力（如海上风暴），延长使用寿命，扩大波浪能在英国的部署规模，充分释放英国海洋资源潜力，助力英国 2050 碳中和目标的实现。本次资助主要用于 8 大主题任务研究工作，包括：

1、用于波浪能转换器的仿生自适应可伸缩材料（资助金额：97.5 万英镑；承担机构：思克莱德大学）：从水生动物的鳍或者其他部位汲取灵感，开发适用于波浪能转换器的可伸缩弹性材料；该弹性材料能够根据周围环境负荷的变化自适应调整自身形态，以更好地应对复杂的海洋环境。

2、波浪能弹性响应系统（资助金额：98.4 万英镑；承担机构：普利茅斯大学、南安普顿大学和牛津大学）：利用可变性的柔性材料开发适用于波浪能的弹性响应系统，并通过海盆实验和数值模拟，测试系统性能及其在海上风暴中的生存能力。

3、波浪能转换器控制系统原型和接口（资助金额：98.7 万英镑；承担机构：思克莱德大学）：开发新型控制系统，可为波浪能转换器提供最佳阻抗，并在不同情况下实现发电效率最优，且开发远程部署技术以经济高效地远程部署新型波浪能控制器。

4、波浪能转换器系泊系统（资助金额：99.7 万英镑；承担机构：曼彻斯特大学）：对海浪各种系泊方案进行建模研究，以生成关键信息和有效的建模方法，帮助设计更好抵御海洋极端环境冲击的系泊系统，延长其使用寿命。

⁶ Projects to unlock the potential of marine wave energy.
<https://www.ukri.org/news/projects-to-unlock-the-potential-of-marine-wave-energy/>

5、波浪能发电机（资助金额：77.6 万英镑；承担机构：纽卡斯尔大学）：开发和测试用于波浪能转换器的先进发电机，同时研发高性能的防腐蚀保护涂层材料；并在北海地区开展为期 12 个月的实地测试工作。

6、新一代建模工具（资助金额：98.7 万英镑；承担机构：伦敦大学）：结合机器学习开发新型高精度数值建模工具，用于模拟研究评估在极端海洋环境条件下波浪能转换器的生存性能。

7、利用机器学习技术开发长寿命高性能波浪能转换器（资助金额：79.8 万英镑；承担机构：兰卡斯特大学）：结合机器学习和先进算法开发新型波浪能转换器的控制和监视系统，该系统集成耦合了高保真的海况信息，能够有效高精度预测海洋气候，从而有助于设计开发长寿命的波浪能转换器。

8、系统级协同设计和控制（资助金额：98.6 万英镑；承担机构：伦敦玛丽大学、曼彻斯特大学、埃克塞特大学）：波浪能转换器包含多个能量转换阶段和组件，传统研发思路是从单个组件出发；而本研究将跳出原有的单个组件设计开发到组装的思路，而改为从整个系统层面来开展协同设计和控制研究，以提升转换器的能量转换输出效率和可靠性。

（廖明月 郭楷模）

贍卤素阴离子工程助力钙钛矿太阳能电池创 25.6%世界纪录

甲铵碘化铅（MAPbI₃）、甲脒碘化铅（FAPbI₃）是钙钛矿太阳能电池中被广泛应用和研究的两种钙钛矿薄膜材料；相比前者，FAPbI₃ 具备更高的热稳定性、以及更加接近肖克利-奎伊瑟极限带隙结构，因此具备了获得最高效率值的可能性，被认为是最有前途的钙钛矿材料。然而在温度低于 150°C 时，FAPbI₃ 薄膜会从具备光响应的黑色 α 相转变为无光响应的黄色 δ 相，使得电池性能下降。因此，如何抑制相转变是增强 FAPbI₃ 薄膜钙钛矿太阳能电池性能的关键研究领域。

韩国蔚山国立科学技术研究所 Jin Young Kim 教授课题组牵头的国际联合研究团队利用阴离子工程技术，将贍卤素甲酸离子（HCOO⁻）引入到 FAPbI₃ 薄膜钙钛中，有效地抑制了相转变，实现对薄膜晶界和薄膜表面的阴离子空位缺陷的有效抑制，削弱了非辐射的载流子复合同时增强了薄膜的结晶度，进而增强了电池的性能和稳定性，获得了高达 25.6% 转换效率（认证效率 25.2%），是迄今文献报道的最高效率纪录，且表现出良好的长程稳定性，为钙钛矿薄膜钝化、抑制晶格缺陷开辟了新思路、提供了新技术路径。在多晶薄膜中存在大量的晶界和表面缺陷，导致了大量的非辐射复合损失。相关研究表明 FAPbI₃ 薄膜缺陷主要来自贍卤素阴离子的空位缺陷。为此研究人员制备了不同摩尔比的甲酸甲脒（FAHCOO）掺杂 FAPbI₃ 前驱体溶液（x FAHCOO: FAPbI₃=x, x=0, 2%, 4%）。紫外可见光谱和光致发光谱测试显

示，所有薄膜具备相同的光谱吸收阈值和光致发光峰位置，但是 4% 比例的薄膜的光吸收强度出现了下降，表明了最佳的掺杂度为 2%。后续实验选择 0% 比例的薄膜样品 FAPbI_3 和 2% 样品 $\text{FAPbI}_3\text{-2\%}$ 进行对比分析：时间分辨光致发光光谱表征显示， $\text{FAPbI}_3\text{-2\%}$ 具备更慢的光致发光衰减速度，表明薄膜非辐射复合被有效抑制；且具备更大的晶粒尺寸，结晶性得到了提升，有助于光电性能改善。在 30°C 、100% 相对湿度环境中进行二维掠入射 XRD 测量，结果显示无掺杂 FAPbI_3 薄膜中出现了 δ 相，表明出现了相转变；而 $\text{FAPbI}_3\text{-2\%}$ 薄膜没有出现 δ 相，依旧是 α 相，表明 FAHCOO 的引入有效抑制了 α 相到 δ 相转变，增强了薄膜的稳定性。为了探明 FAHCOO 增强薄膜稳定性的潜在工作机理，研究人员对薄膜进行了核磁共振谱分析，发现 FAHCOO 的引入并不会改变薄膜 Pb 共振峰，表明 HCOO^- 离子没有取代碘离子。分子动力学模拟进一步研究揭示，一个 HCOO^- 阴离子钝化 FAPbI_3 表面的一个 I^- 空位，从而抑制了非辐射的复合损失，即 HCOO^- 阴离子的作用是消除阴离子空位缺陷。接着研究人员分别以 FAPbI_3 和 $\text{FAPbI}_3\text{-2\%}$ 薄膜为光敏层组装成完整的电池器件进行对比研究，电压-电流曲线表征显示，含有 HCOO^- 阴离子钙钛矿薄膜电池器件各项性能指标（电流密度、开路电压和填充因子）均得到了明显改善，分别从 FAPbI_3 电池器件的 25.7 mA/cm^2 、 1.15 V 和 80.7% 增加到了 26.4 mA/cm^2 、 1.19 V 和 81.7% ，进而增强了电池转换效率，从 23.9% 增加到了 25.6% ，是目前文献报道的钙钛矿太阳能电池效率最高值，且认证效率依旧高达 25.2% 。随后在 25°C 、20% 相对湿度环境下进行 1000 小时的老化测试，显示 $\text{FAPbI}_3\text{-2\%}$ 薄膜器件光电转换效率仅仅下降了 10%，而 FAPbI_3 电池器件则大幅下降了 35%，表明 FAHCOO 的引入显著改善了电池器件的长程稳定性。

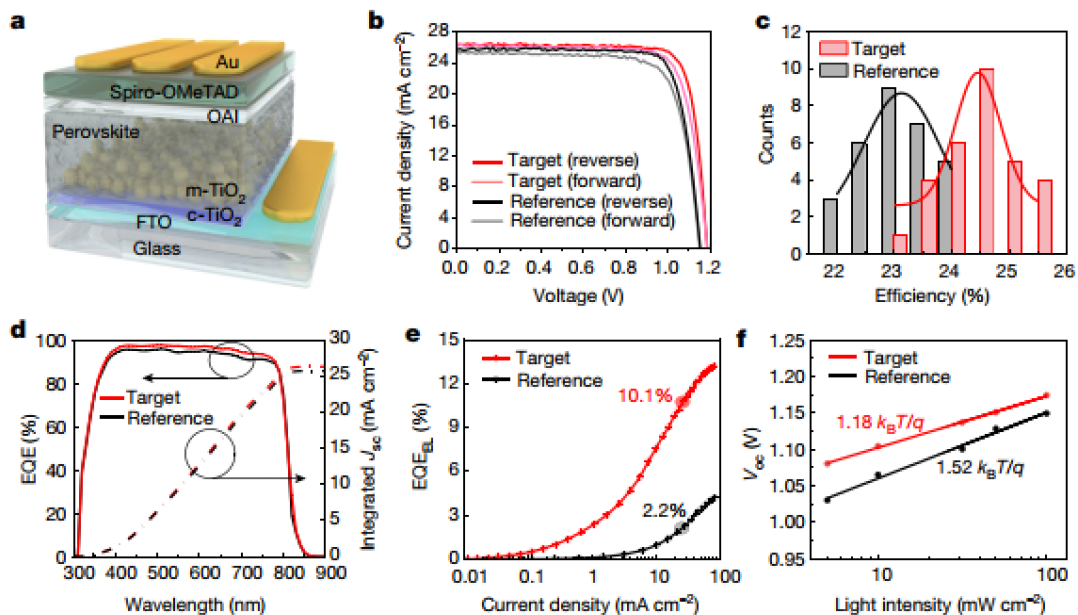


图 1 含有卤素甲酸离子 (HCOO^-) 钙钛矿薄膜电池结构示意图和电化学性能表征

该项研究通过阴离子工程进行原位替代掺杂，成功实现了对甲脒碘化铅钙钛矿薄膜阴离子空位缺陷的钝化，同时有效地抑制了薄膜从光响应的黑色 α 相转变为无光响应的黄色 δ 相，从而增强了电池性能和稳定性，获得了迄今文献报道的最高转换效率 25.6%，创造了新纪录，且具备良好的长程稳定性，为设计开发高性能长寿命钙钛矿太阳能电池器件指明了方向，进一步加速了该电池技术的商业化进程。相关研究成果发表在《*Nature*》⁷。

（王珍 郭楷模）

⁷ Jaeki Jeong, Minjin Kim, Jongdeuk Seo, et al. Pseudo-halide anion engineering for α -FAPbI₃ perovskite solar cells. *Nature*, 2021, DOI:10.1038/s41586-021-03406-5

低碳化多能融合

DOE 提出综合能源系统协同研究的机遇与挑战

4月29日，美国能源部（DOE）发布《综合能源系统：协同研究机遇》⁸报告指出，与传统独立能源系统相比，综合能源系统（HES）通过总体控制或物理方式集成多种能源生产、存储和/或转换技术，以实现节约成本、增强能效和环境效益。综合能源系统对美国经济脱碳、生产高价值产品（如氢气）、提高电网灵活性，以及扩大可再生能源技术的部署将发挥重要作用。但综合能源系统作为全新的能源系统形态，也为电力市场的设计、运营和监管，国家监管以及能源政策的设计和 implement 带来了挑战。报告系统探讨了综合能源系统技术研究开发的机遇和挑战，关键点如下：

一、综合能源系统技术与开发

HES 技术开发研究领域涵盖了从硬件、软件到组件、系统层面等多个主题。对于硬件，最常研究的是控制组件。其中“光伏+储能电池”HES 控制组件研究最为广泛，而在分布式能源中兼容风力涡轮机和柴油发动机组件在 HES 中也较为常见，该组合通常用于微电网和偏远地区电力部署。DOE 还资助了一系列 HES 的集成和测试研究，包括燃料电池、电解槽、供电、供热以及一系列储能技术（如储热、电化学储能等）。此外，还包括制氢和制化学品的一体化监管系统。

除了控制系统，DOE 还注重对传感器和遥感探测技术、网络安全以及循环测试技术的资助研究。并努力解决 HES 技术开发研究领域中的各项问题，如通过将光伏系统与散热片集成，将系统产热合理扩散，解决光伏系统中的热量累积问题；以及通过将储能电池与超级电容器集成，以构建具备高功率高比能量和持续放电特性的综合发电系统也是在实际应用中需突破的一大问题。

DOE 资助的技术研究一个显著特点是强调技术研究成果的及时转化，这项工作的关键是与企业界开展密切合作，将 HES 技术成果及时示范验证并推向市场。大多数由 DOE 资助的示范项目都涉及成本分担和多个利益相关方，包括研究机构、电力运营商、公共事业部门、以及各州或地方政府，这有助于降低 HES 部署风险，并获得行业的支持。总之，HES 技术研发主要集中在“化石燃料+储能”以及“光伏+储能”这些综合能源系统类型。

二、综合能源系统技术的关键挑战

当前和新兴的 HES 发展面临的最突出技术挑战是确保高经济性的 HES 技术解

⁸ Energy Department Unlocks Innovative Opportunities for Coordinated Research on Hybrid Energy Systems. <https://www.energy.gov/index.php/eere/articles/energy-department-unlocks-innovative-opportunities-coordinated-research-hybrid-energy>

决方案。例如，提供更多、更好的服务和产品需要先进的 HES 控制组件，将 HES 构建成一种经济、可调度和灵活的能源系统。同时，需要与遥感测量、计量和其他通讯设备进行关联，以促进电网响应和市场信号的多个子部件的安全协调运行。此外，HES 可能涉及热、氢和化学物质的非电组件的集成，因此弹性集成组件（如热载体和耐腐蚀管道）以及耦合控件亟待开发。此类设备的安全部署取决于对设备的充分测试和验证、技术标准的制定以及适当的网络安全保障。

对于当前和新兴的 HES，还需解决商业部署面临的潜在风险，即如何降低 HES 技术成本以提升其经济效益。由于缺乏技术表征将无法探明哪些类型的研发对 HES 性能扩展优化具有支撑作用，因此技术表征同样是 HES 未来发展的一个关键挑战，它能够促使 HES 以最经济的方式提供更好的服务和更多元化的产品。另一个关键挑战是确定和改进可能影响 HES 未来成本和性能的单个子组件的缺陷。最后，虽然近期全新的 HES 系统部署可以进行自定义设计，但长期 HES 系统稳定运行需要通过与标准协议一致的系统组件架构集成，以实现系统子组件的兼容性和互操作性。

表 1 HES 面临的关键技术挑战

挑战	描述	综合类型
特定技术的 HES 控件所支持的服务和产品的限制	实现 HES 中多个子系统高效协同运行，需要工厂级的操控来协调控制多个子组件。需要有效的控制理论、模型和控制 器架构演示来大规模部署公用事业规模的 HES，以最优化控 制和运行 HES，提供广泛的服务和产品	虚 拟 发 电 厂；综合系 统
确保与多个 组件之间信 息的快速、 安全传输	协调多个子组件的运行需要子组件和 HES 之间的信息快速 传输。考虑到多个节点和路径，必须尽量减少设备中的延迟， 以确保网络信号快速响应。HES 不一定会带来新的网络安全 威胁，但合并多个子组件会导致攻击面增加，旧设备与新设 备互操作性问题，以及可能使用缺乏安全供应链的第三方组 件	虚 拟 发 电 厂；综合系 统
对组件进行 额外测试和 验证	在 DOE 实验室和工业测试平台上进行广泛的测试和验证， 以实现单个硬件组件（如电力电子、逆变器和热交换器）高 效集成耦合	虚 拟 发 电 厂；综合系 统
消除技术壁 垒	当作为独立系统运行时，当前的发电、储能和能源转换技术 受到不同的应用场景的要求，影响技术使用标准。因此要创 建这些技术的耦合集成解决方案，必须要解决不同技术之间 的技术壁垒，以实现不同技术的兼容性、互操作性	虚 拟 发 电 厂；综合系 统
首台套系统 相关的风险 管控	要克服首台套 HES 部署时面临的风险，需要对新技术进行 多次大规模的测试验证，包括完整的 HES 项目和单个组件 （如硬件和控件）测试	虚 拟 发 电 厂；综合系 统
对电网和终 端用户的技术要求了解 不全面	对于电网和终端用户的技术要求了解不足，缺乏基础数据。 而这些基础信息有助于科研人员开展 HES 技术开发，因此 需要加强相关数据的收集和分析	资源分配； 虚 拟 发 电 厂；综合系 统

单个子组件局限性	单个子组件的局限性会影响 HES 的性能和成本。例如，解决锂离子电池的易燃性和温度稳定性问题，以及实现对波动性可再生能源资源的高精度预测，这是 HES 能否成功的关键因素之一	资源分配； 全综合系统
兼容性和互操作性	子组件系统通常都是为特定的应用程序定制的，这使得组件集成耦合存在一定的壁垒（如技术、标准协议等）。需要标准化的设计和系统架构来支持子组件和控件的互操作性和兼容性。	综合系统

三、综合能源系统技术协同的研究机遇

HES 需要在不同的时间尺度上将不同的波动性可再生能源和传统的燃煤发电、储能和能源转换技术集成到能源系统和电力管理系统中。如何将 HES 组件有效的耦合集成以及其与能源系统（如电网）有效连接是 HES 发展面临的一个重大挑战。针对这一挑战，HES 的技术研发将在控件开发和测试、工厂级设计优化、HES 组件的开发和测试、项目示范以及优化的集成耦合策略几个领域提出未来发展的可能机遇。

1、控件的开发和测试

HES 大规模市场化应用的关键在于为每种技术组合开发稳定且高效的控制解决方案。该领域的未来发展机遇包括：①利用先进计算方法进行控件研究，实现对 HES 海量数据高效解析。②优化电力输配网络的利用率。③开展高精度的可再生能源资源预测技术研究。④建立微电网控制器标准，弥补尚未建立 HES 控制标准的空缺，实现灵活和模块化微电网控制模型的构建。

2、HES 工厂级设计优化

设计 HES 是一个复杂的过程，涉及大量的设计参数，优化 HES 子组件的规模、互联和运行以最大化整合系统性能是一项数据密集型和计算密集型工作。该领域的未来发展机遇包括：①利用先进计算技术进行 HES 设计。将机器学习方法引入到 HES 设计中，实现对组件尺寸优化、系统性能提升、系统寿命延长。②在动态模型中进行 HES 设计。为综合电力系统（集成不同发电资源）开发计算机模型，开展系统运行模拟研究，以确保综合电力系统稳定运行。

3、HES 组件的开发和测试

HES 组件开发和测试的研究核心是将新开发的硬件组件与之前硬件组件高效兼容，以实现成本的降低和系统效率的提升。此外，未来 HES 研发需在不同时间尺度下，提供大规模电力电子、电力/能源设备和通信的多种技术，以确保其在实际应用中的运营安全。该领域的未来发展机遇包括：①开发高效、经济、可兼容的硬件组件。②通过大规模仿真技术进行组件测试，了解他们是否能够兼容 HES 相关的其他子组件。

4、项目示范

技术示范有助于证明技术可行性，从而降低应用风险，是获得行业认同、加速

市场采用的关键一环。该领域的未来发展机遇包括：①将终端用户的需求映射到示范的 HES 功能上。终端用户需求高度多样化，其需求可以通过优化 HES 设计和配置得以满足。②通过大规模项目部署和示范降低技术风险。为确保效率和避免重复工作，可以由 DOE 国家实验室主持具有特定风险的示范项目，这是因为这些实验室具有良好的设备以及专业知识来应对未知风险，此外，各州能源办公室可以在支持示范项目方面发挥关键作用。

5、优化集成耦合策略

未来 HES 相关的研发需要将 HES 集成耦合策略优化工作贯穿于技术研发活动始终。该领域的未来发展机遇包括：①HES 中各组件紧密耦合集成。HES 系统能够将不同的能源品种和独立能源系统进行有效整合，从而实现能源高效利用，提高能源系统的经济价值，而这有赖于 HES 系统中不同单元组件能否高度紧密耦合。而紧密耦合的 HES 系统还必须对固有或计划外的系统扰动具有良好的应对能力，需要全系统的监测和全自动控制系统的应用，以便根据能源可用性和市场信号预测，调整能源流和各组件单元操控。②下一代先进电力转换技术。下一代先进电力转换技术将发展更高效的热电转换技术以利用和回收余热，如超临界 CO₂ 闭式布雷顿循环技术；将开发新的热交换器技术，以便构建更高效的热存储系统；还将推进动力循环过程中产生的废热用于工业过程加热或其他应用，如脱盐和水处理。

（汤匀 郭楷模）

Hydrogen Europe 提出“三步走”氢经济发展路线图

4月7日，“氢能欧洲”组织（Hydrogen Europe）发布《氢能法案：创造欧洲氢能经济》报告⁹，提出了氢能立法的总体框架构想，作为推动《欧盟氢能战略》实施的愿景文件，旨在协调和整合所有氢能相关行动和立法以充分发挥氢能潜力。该报告从氢能基础设施和市场两方面，提出了建立氢经济的三阶段发展路线图，详情如下：

一、欧盟需要立即采取立法行动以实现氢能发展目标

2020年，氢能在欧洲有了前所未有的发展，已迅速成为欧盟向2050年气候中性社会转型的系统性元素。氢将成为重要的能源载体，以取代不同领域的煤炭、石油和天然气，并成为能源转型中与可再生电力并列的另一分支。氢能的快速发展不仅对实现欧盟气候目标非常重要，而且对保持和提高欧盟的工业和经济竞争力也尤为重要。欧洲氢能战略制定了雄心勃勃的目标以发展氢能经济，这一战略是迈向成功的第一步。现在，欧盟需要“行动起来”，把雄心壮志变成现实。目前的氢能政策和监管要素分布在天然气、电力、燃料、排放和工业等政策框架，总体协调有限，氢能在实现碳中和方面的关键作用意味着需要一个专门的框架。

⁹ Hydrogen Act Towards the creation of the European hydrogen Economy.
https://www.hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/04/2021.04_HE_Hydrogen-Act_Final.pdf

二、欧洲氢能法案及氢经济路线图

报告提出了氢能立法的总体框架，侧重于基础设施和市场方面，阐述了氢经济发展的三个阶段：启动阶段、提升阶段和市场增长阶段。

为实现欧盟氢能战略的 2024 年和 2030 年目标，启动阶段将在有限的时间内对现有的欧盟法规设置例外或部分废除，例如放宽和/或改革欧盟国家援助规则。考虑到“欧洲绿色协议”、欧洲经济复苏以及氢能战略的背景下氢能行业所面临的挑战，应加快制定国家对氢能技术援助的专门指导方针。长远来看，应在生产和需求方面激励市场，包括为清洁炼钢和氨生产设定配额目标。在基础设施方面，氢能网络的监管需要一种与市场 and 基础设施开发相适应的渐进方法。这一提升阶段应该从 2025 年开始，从而将政府资金补贴控制在最低限度。市场增长阶段即为氢能实现市场增长的时期。

为了建立一个强有力的碳减排体系，能源载体和介质的二氧化碳含量将成为能源系统转型和欧盟经济复苏的“新货币”。这需要采用一种计算可再生氢和低碳氢的生命周期温室气体排放量的方法，以及符合循环经济原则的透明和强有力的可持续性标准来支持。该方法应作为欧盟相关资助计划和所有能源载体（包括氢能项目）的财政支持以及与第三国氢能贸易的基础。为了支持这一点，需要一个可追踪、可追溯、可交易、透明和可信的认证方案，以提高氢作为全球商品的可信性和可交易性。

报告提出的《氢能法案》主要由氢能基础设施法案和氢能市场法案组成，如图 1 所示，具体实施路线均分三个阶段进行。

1、启动阶段（2021-2025 年）

启动阶段将奠定欧洲氢能经济的基础。启动阶段结束时，欧盟的清洁氢产量将达到 100 万吨/年，并且将安装至少 6 GW 电解槽。由于缺少明确、统一的欧盟氢能框架，并且在主要应用领域缺乏竞争力，因此必须采用快速方法来实现目标。

重点将放在氢能可扩展性项目以及足够成熟项目的示范，如欧洲清洁氢能联盟项目、欧洲共同利益重要项目（IPCEI）、氢谷项目、混合氢项目、输氢管道以及储氢试点项目。还应优先考虑支持商业化、规模化和提高欧洲竞争力的研究、开发和示范（RD&D）项目。此外，符合国家能源和气候计划（NECP）并在复苏基金（RRF）计划下提交的项目将有助于大幅增加氢气生产和需求。为了促进项目数量增加和缩小初始成本差距，在这一阶段应放宽国家援助规则，允许欧盟委员会和成员国提供高达 100% 的支持。

应为这些特别支持措施提出一项适当的日落条款，并鼓励立即采取紧急行动。此外，在启动阶段，当务之急是确保相关欧盟立法能够适用，以认识并提高氢的重要作用，同时消除部署氢能的障碍。

氢能法案

氢能基础设施法案

氢能市场法案

建立复杂的欧洲氢能基础设施，取代大部分天然气基础设施。

价格合理、可靠的氢能取代天然气和其他化石燃料，形成一个成熟的市场。

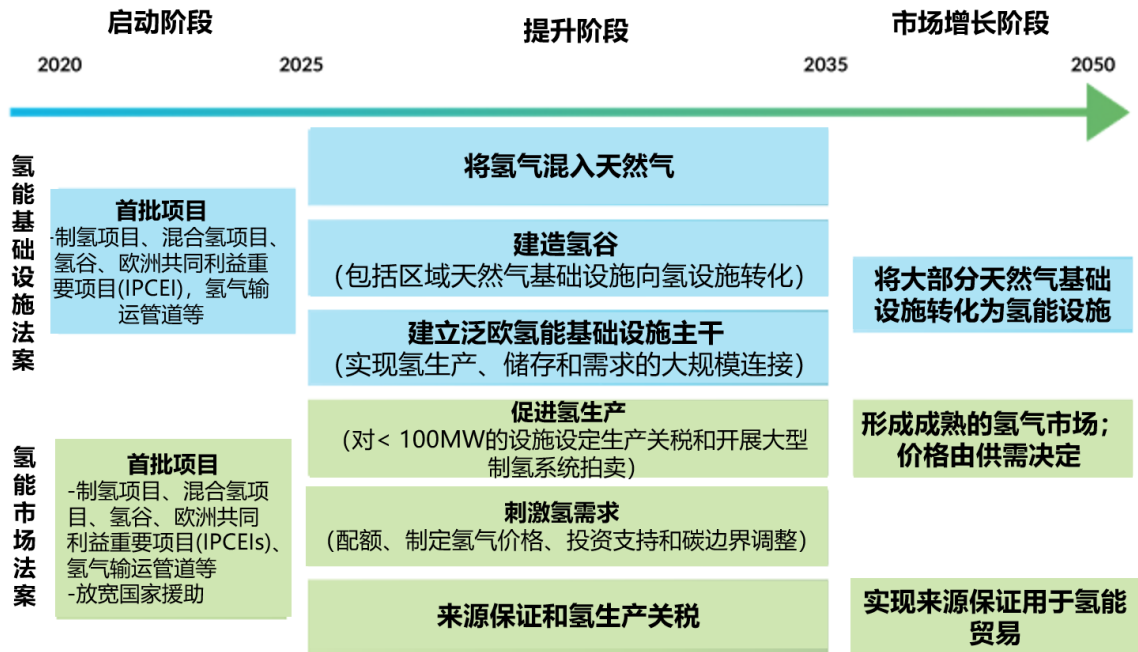


图 1 氢经济路线图

2、提升阶段（2025-2035 年）

在提升阶段，支持框架旨在促进欧洲氢经济的关键要素，并最终实现氢能的商业竞争力。将建设大规模氢气储存和氢能基础设施主干，氢能专用解决方案和氢谷也将得到实现，并将采取适当措施来刺激供应和需求。对于大多数氢能应用，将需要某种监管措施来支持，包括关税、拍卖/招标、配额、投资支持、税收减免，由来源保证（GO）支持。大多数氢能生产和应用将在提升阶段结束时实现商业竞争力。GO 将成为一种可交易的商品，类似于当前的绿色电力 GO。

GO 可以证明生产氢能的电力或气体是由特定来源产生，不仅是可再生能源生产，还应考虑生命周期的温室气体排放评估。建议 GO 系统满足以下 5 个要求：可追踪、可溯源、可交易、透明、可信赖。

3、市场增长阶段（2035-2050 年）

在氢能获得商业竞争力后，前期阶段的许多支持框架将不再适用。将继续通过推进天然气管道向运氢管道转变，以及进一步整合欧洲氢能系统来替代化石燃料。氢能市场将是透明和流动的，价格制定将主要由供求机制来控制。随着网络集成的深化，将需要对市场进行监管。例如，确保互操作性和市场规则能够避免垄断行为。

（高天 岳芳）

澳大利亚公私投入 6800 万澳元推进氢工业发展

5月26日，澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）宣布启动一项新的氢工业计划¹⁰，将在未来五年公私合作¹¹共同投入 6800 万澳元支持 100 多个氢能项目，旨在推动将氢能生产成本降至 2 澳元/千克以下，助力澳大利亚在 2030 年前成为全球氢能出口领先国家。该计划将重点实施四方面工作，其中部分已经启动，主要内容如下：

1、氢能知识中心，促进澳大利亚的氢能项目和工业发展。第一个模块“HyResource”已由 CSIRO 和澳大利亚国家能源资源公司（NERA）、未来燃料研究中心（FFCRC）、澳大利亚氢能委员会共同推出，其宗旨是梳理将清洁氢作为低排放能源资源的相关项目、政策和关键组织的核心信息。

2、向政府、行业和社区提供可靠建议的可行性和战略研究。该项工作将建立在近期的氢能成本建模和障碍分析研究工作基础上，这是制定国家氢能战略的支撑工作之一。

3、验证氢能价值链和降低氢能风险的关键技术示范项目。斯威本大学和维多利亚州政府正在维多利亚州克莱顿合作开发新设施。

4、投资突破性科学以推进氢能科技发展。包括与福蒂斯丘金属集团（FMG）建立合作伙伴关系，投资 2000 万澳元专注于对新型氢能技术的开发和商业化。

该计划确定了未来五年部分阶段性成果，包括：第 1 年，与产业界、政府和研究伙伴建立氢能知识中心；第 3 年，在 CSIRO 的研究场地建成氢能技术示范设施（包括加氢装置），以示范氢能生产技术；第 5 年，CSIRO 牵头的联合团队将示范一个偏远地区电力系统，以支持区域能源转型，CSIRO 的制氢技术将实现商业部署。

（高天 岳芳）

三明治固态电解质助力锂金属电池实现超万次循环

以锂为负极的锂金属电池在提升能量密度方面具有优势，能够更好满足对高能量密度动力电池的需求（如电动汽车、各类电子移动设备），是业界研究热点之一。然而基于传统液态电解质的锂金属电池存在严重的锂枝晶生长问题，导致电池性能衰减和寿命减少。因此如何有效抑制锂枝晶生长是该电池研究热点前沿领域之一，而发展固态电解质则是解决上述问题行之有效的手段。

哈佛大学 Xin Li 教授课题组设计开发了一种三明治结构的固态电解质，将不稳

¹⁰ Fuelling a clean and bright future: CSIRO and partners launch \$68M Hydrogen Industry Mission. <https://www.csiro.au/en/news/News-releases/2021/Fuelling-a-clean-and-bright-future>

¹¹ 包括澳大利亚工业、科学、能源与资源部（DISER），澳大利亚可再生能源署（ARENA），福蒂斯丘金属集团（FMG），斯威本大学，维多利亚州政府，未来燃料研究中心（FFCRC），澳大利亚国家能源资源公司（NERA），澳大利亚氢能委员会，CSIRO，丰田公司，现代公司，波音公司

定的固态电解质置于两个稳定固态电解质之间，实现了对不稳定电解质分解的有效局域限制，避免了其与锂金属电极的接触，抑制了锂枝晶的生长，从而显著增强了电池循环寿命，实现了上万次的循环。

相关实验表明锂锗磷硫 ($\text{Li}_{10}\text{Ge}_1\text{P}_2\text{S}_{12}$, LGPS) 固态电解质能够提升电池循环性能，但其电化学稳定性较差。为此研究人员将其置于两层电化学稳定性较好的固态电解质锂磷硫氯 ($\text{Li}_{5.5}\text{PS}_{4.5}\text{Cl}_{1.5}$, LPSCl) 中间形成三明治结构的固态电解质。随后与 Li 金属负极、高镍三元正极 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC811) 组装成完整的电池器件并开展电化学性能测试。在 1.5 C (0.64 mA/cm^2) 的倍率下，电池稳定循环 1000 次之后，容量保持率高达 92.8%；而当增大倍率到 20 C，循环 10000 次之后，依旧可以保持 82% 的初始比容量，表现了优异的倍率性能和电化学循环稳定性。更重要的是，电池可以获得高达 110.6 kW/kg 的比功率和 631.1 Wh/kg 的比能量。上述性能参数是锂金属电池系统迄今为止文献报道的性能最优值。作为对比研究，同时制备了只有单一 LGPS 或 LPSCl 固体电解质锂金属电池，并在同样条件下测试了电化学性能，结果显示单一固态电解质 LGPS 电池存在显著的电解质分解（如 S、Ge 还原反应）但有效抑制锂枝晶，而 LPSCl 固体电解质没有显著分解但出现了严重的锂枝晶生长。因此三明治结构的固态电解质一方面有效抑制电解质分解避免电池性能衰减，一方面抑制锂枝晶生长增强电池的循环寿命。

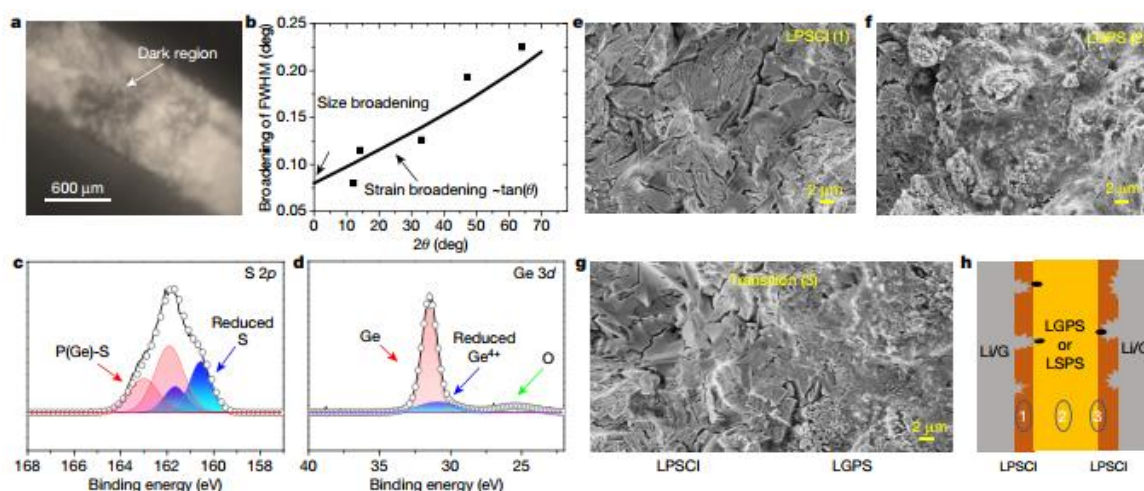


图 1 三明治结构固态电解质充放电循环测试及其形貌表征

该项研究精心设计制备了新型的三明治结构固态电解质，有效克服电解质分解和锂枝晶生长问题，增强了电池性能和循环寿命，获得高达 110.6 kW/kg 的比功率和 631.1 Wh/kg 的比能量，且可以稳定循环上万次，创造了目前文献报道的锂金属电池（无论是液态还是固态电解质）性能最优值，为开发高性能长寿命固态电池指明了新方向。相关研究成果发表在《Nature》¹²。

(王珍 郭楷模)

¹² Luhan Ye, Xin Li. A dynamic stability design strategy for lithium metal solid state batteries. *Nature*, 2021, DOI:10.1038/s41586-021-03486-3

Z 型异质结催化剂将光合作用合成 H₂O₂ 速率提升数十倍

先进氧化技术 (AOPs) 由于其高效的氧化能力被广泛应用于环境中难降解有机污染物的处理。过氧化氢 (H₂O₂) 是 AOPs 中最常用的氧化剂。然而, 过氧化氢 (H₂O₂) 在一般条件下的光合作用经济效益不佳, 且具有一定环境污染, 严重限制了其在原位修复中的应用。因此亟需开发高氧化性能且经济的光催化剂。

中山大学化学学院欧阳钢锋教授团队设计开发出了一种 Z 型异质结光催化剂, 得益于其具有较高的电荷分离效率, 实现了在纯水和露天条件下生产 H₂O₂, 揭示了 Z 型异质结和 II 型异质结的调控和潜在机制, 为开发高效的 Z 型光催化剂提供了一种可行策略。相关研究表明, 在传统光合作用合成 H₂O₂ 过程中, 由于光催化剂中电子和空穴会在皮秒到纳秒时间内快速复合, 以及会产生微弱的氧化还原电位, 通常需要增加有机给电子体 (如甲醇) 的用量和纯 O₂ 的连续鼓泡来提高光催化效率, 高昂成本和二次污染问题显然不适合工业化合成以及应用到实际环境中原位修复。为此, 研究人员以 ZnPPc 为还原极、NBCN 为氧化极, 制备了 Z 型异质结光催化剂 ZnPPc-NBCN。DFT 计算与 XPS 表明 ZnPPc 与 NBCN 之间存在较弱的内建电场。为了验证其光能合成 H₂O₂ 能力, 在不添加任何添加剂, 即通过牺牲有机电子给体或调节 pH 值的条件下, 用可见光驱动光催化反应, 在环境 O₂ 浓度下研究的光催化活性。ZnPPc-NBCN 的 H₂O₂ 产生速率高达 114 μmol·g⁻¹·h⁻¹, 是 NBCN (2 μmol·g⁻¹·h⁻¹) 的 57 倍, 这表明负载在 NBCN 上的 ZnPPc 在决定光催化效率方面具有重要作用, 而后的研究也表明酞菁配位的 Zn 原子是 O₂ 还原为 H₂O₂ 的活性中心。随后, 研究人员发现用纯 O₂ 代替反应液上方的空气对 ZnPPc-NBCN 催化生成 H₂O₂ 的速率没有影响, 这表明在此体系中不需要使用纯 O₂。ZnPPc-NBCN 氧化水的主要产物是 O₂, 除了从空气中放出 O₂ 外, 从氧化水中放出的 O₂ 还可以用来生产 H₂O₂, 这也解释了纯 O₂ 对催化速率无影响的现象。此外, 由于水氧化的高效空穴反应, 可以避免使用牺牲的有机电子给体。研究人员还探究了以 NaIO₃ 为电子清除剂时, ZnPPc-NBCN 的产 H₂O₂ 速率, 结果显示, 产 H₂O₂ 速率高达 242 μmol·g⁻¹·h⁻¹, 是 NBCN (24 μmol·g⁻¹·h⁻¹) 的 10 倍, 显著高于已报道的光催化剂催化效率。催化剂经 5 次循环使用后, 其官能团和微观结构均保持不变。用原位 XPS 光谱研究了 ZnPPc-NBCN 两组分之间光生电子-空穴对的迁移路径, 表明锌原子是光照下的电子受体。随后, 通过原位电子顺磁共振 (EPR) 谱和开尔文探针力显微镜 (KPFM) 验证了催化剂极高的电荷分离效率。同时, 原位 XPS 表征等数据也有力地表明 Zn 原子是电子供体。

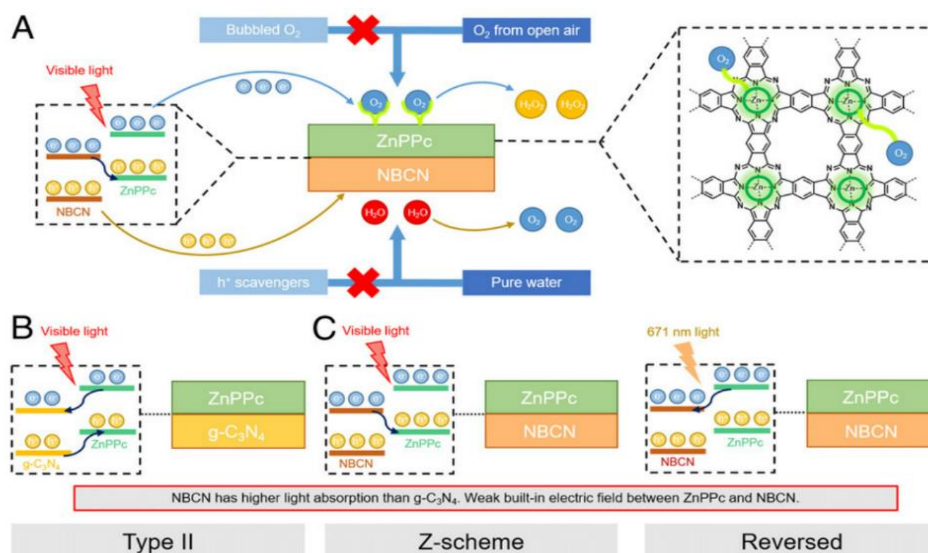


图 1 (A)从 H₂O 和 O₂ 光能合成 H₂O₂；(B)可见光照射下 ZnPPc-g-C₃N₄ 中的电子转移；(C) 在可见光或单色光照射下 ZnPPc-NBCN 中的电子转移。

这项研究设计开发出全新的异质结光催化剂，得益于金属多酞菁和改性氮化碳形成的 Z 型异质结，可以在可见光驱动下光合作用合成 H₂O₂，而不需要消耗纯 O₂ 和有机电子给体。在相同条件下，ZnPPc-NBCN 的催化活性远远超过文献报道的光催化剂。此外，基于原位 XPS 的深入研究揭示了控制异质结类型的调控机制，表明在内建电场较弱的异质结中，元件的光响应可以作为调节电子转移方向的驱动力。这项研究提出了一种创新的策略来改善氧化半导体的光响应，从而在弱内建电场下构建高效的 Z 型异质结，相关成果发表在《PNAS》¹³。

(占威 汤匀)

¹³ Yu-Xin Ye, Jinhui Pan, Fangyan Xie, et al. Highly efficient photosynthesis of hydrogen peroxide in ambient conditions. *PNAS*, 2021, 118(16): e2103964118

能源战略研究

IEA 发布全球首份能源部门实现 2050 净零排放路线图

5月18日，国际能源署（IEA）发布全球首份《能源部门实现 2050 净零排放路线图》报告¹⁴指出，能源部门产生了当前全球约四分之三的温室气体排放，因此推动能源部门实现净零排放是应对全球气候变化的关键抓手，成为了国际社会的普遍共识。为此，世界各国纷纷提出实现净零排放的政策承诺，这些国家承诺覆盖了全球近 70% 的 CO₂ 排放量；但当前承诺远未达到使全球能源相关的 CO₂ 排放量到 2050 年达到净零排放的要求。为此，本报告提出了在保障全球能源可靠、安全和经济供应的前提下，全球能源部门实现 2050 年净零排放的路线图，阐述实现净零排放需要实现的关键里程碑以及需要采取的优先行动，关键要点如下：

1、实现 2050 年净零排放需要达成不同时间节点的里程碑

为了在 2050 年之前实现净零排放，全球能源部门需要达成不同时间节点的关键里程碑：到 2030 年，全球每年的清洁能源投资将需要增加两倍以上，达到约 4 万亿美元。这将创造数百万个新工作岗位，显著推动全球经济增长，并在全球范围内促进电力和清洁烹饪的普及。在此期间，全球需要加大清洁能源研发创新力度；因为到 2050 年，几乎一半的减排量将来自于目前还处于示范或原型开发阶段的能源技术。为了及时将这些新技术推向市场，在最近十年必须做出重大的创新努力。到 2035 年，全面禁止销售燃油汽车。到 2040 年，逐步淘汰化石燃料发电厂，实现电力系统净零排放，将电力发展成为全球能源消费主要形式（电力消耗全球 50% 的能源），而这将需要大幅提高电力系统的灵活性，包括大规模采用电池、需求侧响应、氢燃料、水力发电等，以确保可靠的电力供应。到 2045 年，低排放新产业繁荣发展，道路上的绝大多数汽车将依靠电力或燃料电池运行，飞机将主要依靠先进的生物燃料和合成燃料，全世界数百家工厂将使用碳捕集技术或氢能。到 2050 年，一个以可再生能源为主体的清洁能源系统正式形成，其中太阳能将是最主要的可再生能源资源。而能否实现这一更清洁的未来能源系统，将有赖于所有政府、企业、投资者和公民之间紧密合作；以及各国之间进一步强化的国际合作，特别是要确保发展中经济体拥有及时达到净零排放所需的资金和技术支持。

2、实现 2050 年净零排放有赖于 2030 年前清洁能源技术的发展步伐

实现 2050 年净零排放的目标机会窗口比较窄，如果要想实现这一目标，就必须保持现有的技术创新势头，立即大规模部署一切可用的清洁高效能源技术。而在全

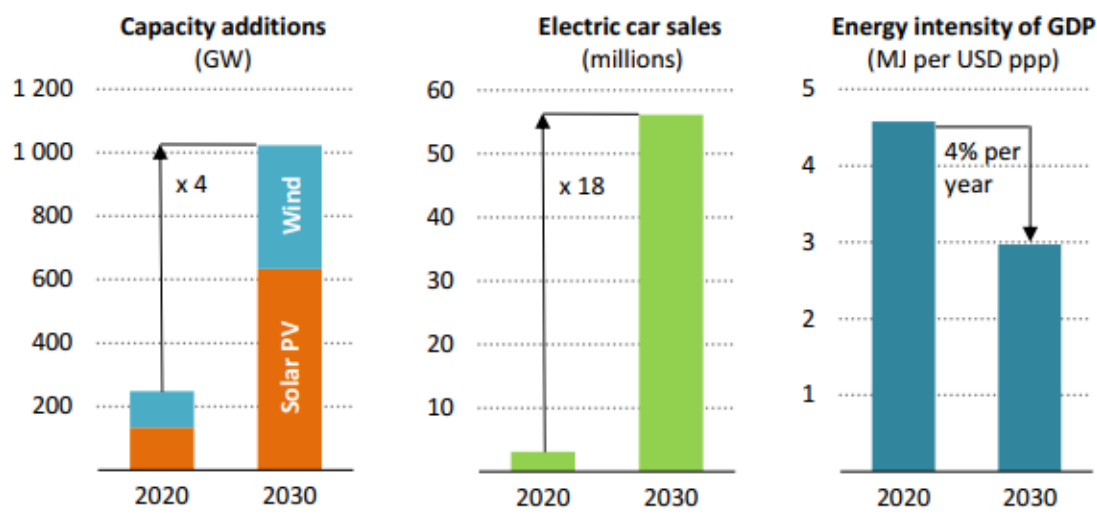
¹⁴ Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector.
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

全球范围内提高能效的努力是上述工作的重要组成部分，其结果能使到 2030 年能源强度的年均改善速度达到 4%，大约是过去 20 年平均改善速度的三倍。能源部门的减排并不局限于 CO₂，还包括其他温室气体如甲烷。预计通过全球共同努力采用所有可用减排措施和技术，化石燃料供应产生的甲烷排放量在未来 10 年减少 75%。

越来越便宜的可再生能源技术将使电力在净零排放竞争中处于优势地位。本报告路径要求在未来十年里迅速扩大太阳能和风能的部署规模，到 2030 年每年需要新增 630 GW 太阳能光伏和 390 GW 风能，是 2020 年创纪录水平的 4 倍。对于太阳能光伏而言，这相当于每天安装一个世界上最大的太阳能公园。水电和核电是目前两大低碳电力来源，它们为电力转型提供了必要基础。随着电力行业变得更加清洁，电气化成为全社会减少排放的一个重要工具。到 2030 年，电动汽车占全球汽车销量的比例要从 5% 上升到 60% 以上。

优先行动：让清洁能源技术在 21 世纪 20 年代实现大规模扩张

由于新冠疫情大流行的影响，世界各国正在积极制定支持经济复苏的政策，但上述政策必须与实现净零排放的路径协调一致。相关政策需要进一步强化清洁高效能源技术的部署速度。强制性政策和指标指令对推动消费者和投资者选择最高效的能源技术意义重大。竞争性拍卖制度有助于太阳能和风能部署规模的进一步扩张，加速电力系统的低碳转型。化石燃料补贴逐步淘汰、碳定价和其他市场改革能够确保适当的价格信号。政策应该对使用化石燃料及其相关技术（如燃煤电厂、内燃机汽车）加以限制。政府应该制定相关规划和激励措施来促进低碳清洁能源技术基础设施的投资建设，如智能输电网、分布式电网等。



Note: MJ = megajoules; GDP = gross domestic product in purchasing power parity.

图 1 到 2030 年关键清洁能源技术相比 2020 年的发展变化

3、实现 2050 年净零排放要求清洁能源技术创新工作取得质的飞跃

到 2050 年实现净零排放需要进一步快速部署现有技术，并广泛使用尚未上市的技术。未来十年必须作出重大的创新努力，以便及时将这些新技术推向市场。就本

报告的发展路径，到 2030 年全球大部分的 CO₂ 减排可以通过现有的技术实现。但到 2050 年，几乎一半的减排将来自目前仍处于示范或原型开发阶段的新技术。在重工业和长途运输业中，目前仍在开发的技术所带来的减排贡献甚至更高。

最大的创新机遇包括先进电池、氢电解槽和直接空气 CO₂ 捕集和封存。这三项技术将共同为 2030-2050 年的 CO₂ 减排做出重要贡献。未来十年的创新不仅要通过研发和示范，还要通过建造相关技术需要的大规模基础设施。这包括新建管道来运输捕集的 CO₂，以及在港口和工业区之间运输氢气的系统。

优先行动：通过技术创新为下一个阶段的转型做好准备

政府清洁能源研发投入需要进一步增加并重新确定研究工作的优先次序。电气化、氢能、生物质能以及碳捕集、利用与封存（CCUS）等关键技术领域的创新投入只是成熟低碳发电技术和能效技术公共研发资金的三分之一。此外，还需要加快示范项目的部署，撬动更多私人资本，扩大部署规模降低成本。全球需要投入 900 亿美元资金以实现在 2030 年前完成一系列的示范项目，而当下这一金额仅为 250 亿美元。开发和部署新技术将创造出新产业、新商业模式和新的就业岗位。

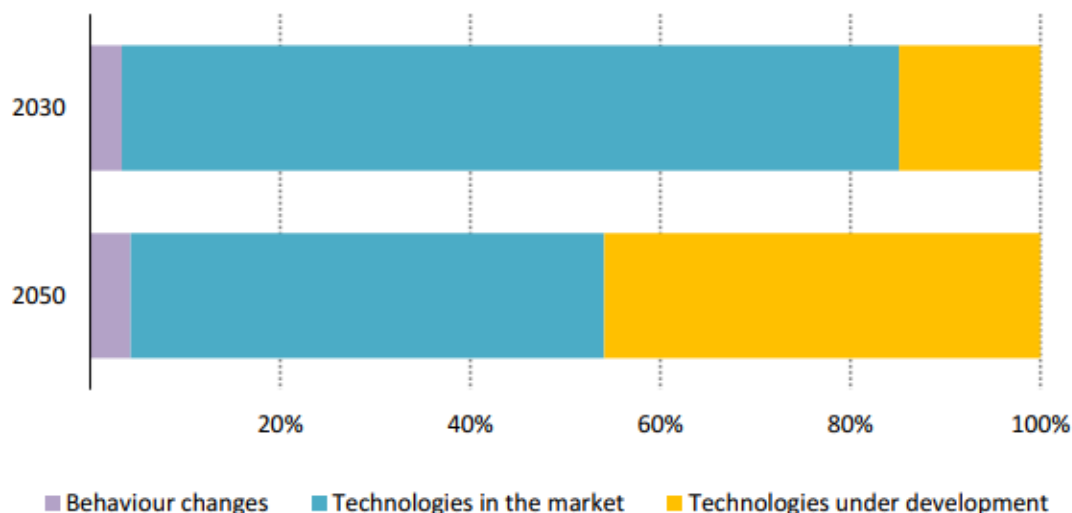


图 2 相比 2020 年本路线图净零排放路径在 2030 年和 2050 年可以实现的年度减排量

4、实现 2050 年净零排放很大程度上取决于人的因素

如果没有公民的持续支持和参与，就无法实现以本路线图所描述的规模和速度进行的转型。转型带来的变化将深刻影响人们生活的多个方面——从交通、取暖、烹饪到城市规划和就业。估算表明，本路线图中大约 55% 的累计减排与消费者的选择有关，如购买电动汽车、利用节能技术改造房屋或安装热泵。行为的改变，特别是在发达国家，例如用步行、骑自行车或公共交通代替汽车出行，或放弃长途飞行，也将贡献大约 4% 的累计减排量。

为大约 7.85 亿无电力人口提供电力，为 26 亿人口提供清洁的烹饪解决方案，

是本路线图的一个重要组成部分。减排必须与确保到 2030 年所有人都能获得能源的可持续发展目标同步进行。这项工作每年预计花费 400 亿美元，相当于能源部门年均投资总额的 1% 左右。

清洁能源转型带来的一些变化可能难以实施，因此决策必须透明、公正并具有成本效益。各国政府需要确保清洁能源转型是以人为中心并具有包容性。随着越来越多的人获得能源，对现代能源服务的需求迅速增加，新兴市场和发展中经济体的家庭能源支出占可支配收入的份额（包括购买节能电器和燃料账单）将略有上升。确保家庭能源的可负担性要密切关注能够直接支持最贫困人口的政策工具，包括税收抵免、贷款和有针对性的补贴。

优先行动：清洁能源产业就业人口会强劲增长，但需要解决旧岗位流失问题

向净零排放能源系统转型将带来大量新的就业机会，由于清洁能源领域的新项目和投资，到 2030 年本路线图转型预计将创造 1400 万个就业机会。在更高效的电器制造、电动汽车和燃料电池汽车制造、建筑改造和节能建筑建造等产业将需要额外的 1600 万就业人口。但这些新的就业机会往往存在于不同的地点、不同的技能组合和不同的部门。在本路线图的转型过程中，预计大约有 500 万旧工作岗位将消失。这些工作岗位大多与化石燃料产业相关，而且很多都是高薪岗位。这意味着结构变化可能会对社区造成冲击，且其影响将长期存在。这就需要制定审慎的政策予以关注，以解决就业流失问题，比如对工人进行再培训。

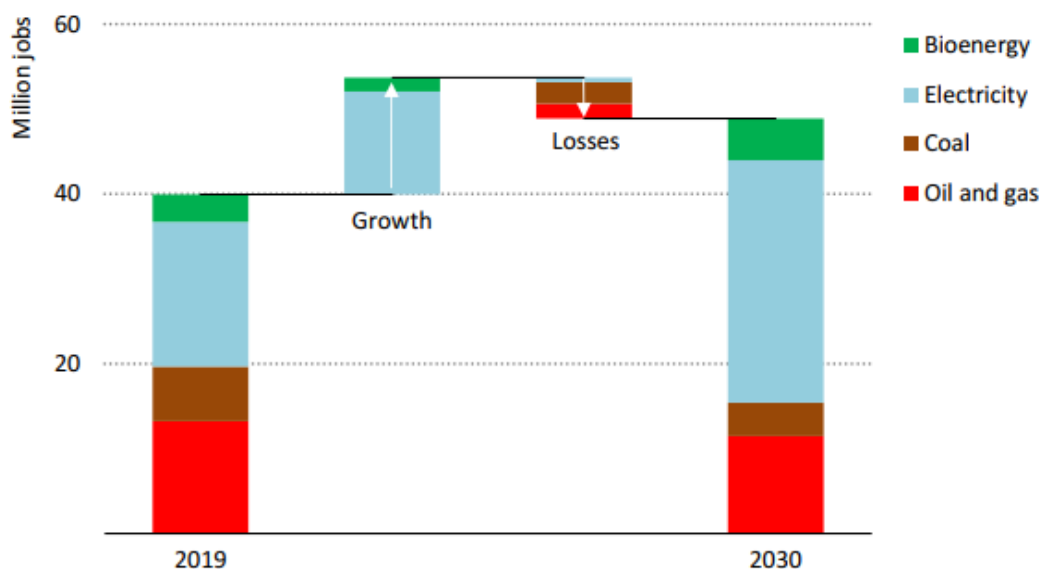


图 3 相比 2019 年本路线图净零排放路径能源供应端就业岗位数量变化（单位：百万人）

5、打造一个以可再生能源为主体的能源部门

按照本路线图开展转型，到 2050 年预计全球经济将增长两倍以上，人口增加 20 亿，但全球能源需求将较当前减少约 8%。随着世界经济的增长和能源更广泛的普及，更高效地利用能源、提高资源效率和改变行为方式，才能有效地抵消日益增长的能

源需求。未来的能源部门主要基于可再生能源，而不是化石燃料。2050年，能源供应总量的2/3将来自风能、太阳能、生物质能、地热能和水能，其中太阳能将成为最主要的能源资源，占能源供应总量的1/5。到2050年，太阳能光伏发电装机容量将增加20倍，风电增加11倍。

净零排放意味着化石燃料的使用需要大幅减少。到2050年，化石燃料占能源供应总量的比例将由当前的4/5下降至略高于1/5，其主要用于塑料等含碳产品生产、配有CCUS设施以及低排放技术等领域。

到2050年，电力几乎占能源消耗总量的50%，在交通、建筑、工业等所有部门都将发挥关键作用，对制氢等低排放燃料制备也至关重要。为实现这一目标，2050年总发电量需增加2.5倍。与此同时，不应投资新建燃煤电厂，且应在2030年前逐步淘汰低效燃煤电厂，2040年前改造仍在使用的燃煤电厂。到2050年，近90%的发电来自可再生能源，风能、太阳能光伏发电量合计占比接近70%，其他大部分则来自核能。

工业、交通和建筑部门减排需更长时间。到2050年，工业部门将实现减排95%的目标，需加大新型基础设施建设力度。到2030年前，全球必须加快付诸行动，通过技术研发、示范和初步部署将新的清洁能源技术推向市场。从2030年开始，每月要有10家重工业工厂安装CCUS装置，新建3家氢基工业工厂，工业基地新增2GW电解槽装机容量。到2035年，停止销售新的内燃机汽车，并通过电气化政策，为大规模减少交通部门排放奠定基础。到2050年，全球汽车将使用动力电池或燃料电池。但电力无法满足所有的不同领域能源需求，因此低排放燃料是必不可少的。例如，航空业将主要依赖生物燃料和合成燃料，而氨燃料对航运至关重要。在建筑部门，新的化石燃料锅炉禁令需从2025年开始在全球范围内实施，这将推动电热泵市场发展。大多数旧建筑和所有新建筑均需符合零碳排放建筑指令。

优先行动：设定近期的转型里程碑以确保长期目标的实现

各国政府需提供可信的、循序渐进的分步骤计划来实现净零排放目标，以在投资界、工业界、公民和其他国家建立信心。各国政府必须制定长期政策框架，使政府各部门和各利益攸关方能够为变革制定计划，促进有序转型。《巴黎协定》所呼吁的国家长期低排放战略，可以为国家转型设定愿景。这些长期目标愿景需与可衡量的短期目标和政策紧密联系，也即需要设定明确的不同阶段的里程碑，以确保长期的转型目标的实现。

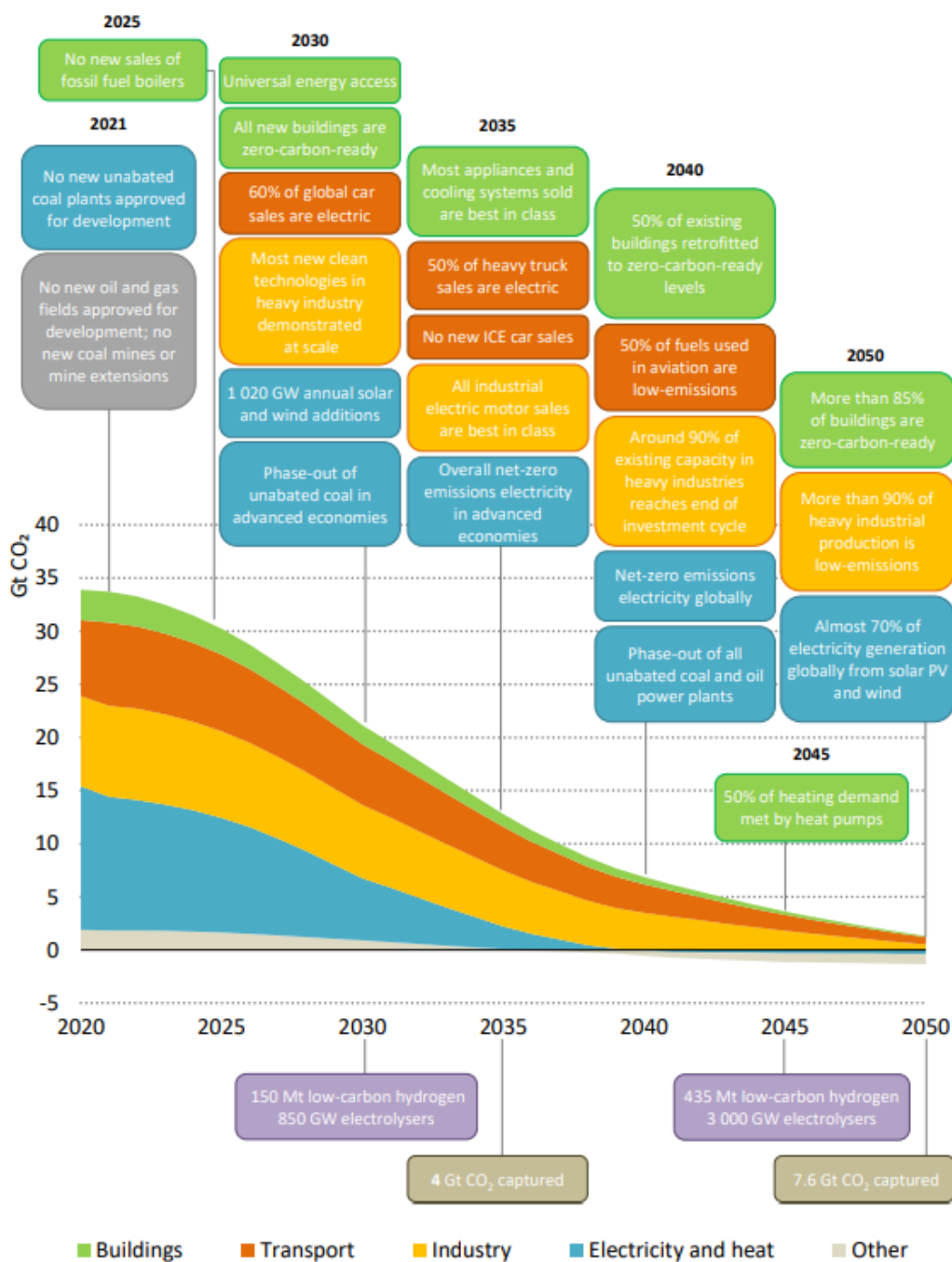


图 4 本路线图净零排放路径中主要的里程碑减排量（单位：十亿吨 CO₂）

6、本路线图提供的实现净零排放路径不需要投资新的化石燃料

本路线图提供的净零排放实现路径中，除了 2021 年以前已经承诺的项目之外，将没有新的油气田获准开发，也不需要开发新的煤矿或者矿井。路径中持续坚定的关注气候变化的政策会导致化石燃料的需求急剧下降，这意味着石油和天然气生产商的重点完全转向现有资产的运营和减排。到 2050 年，煤炭需求将下降 90%，仅占能源消费总量的 1%；天然气需求将下降 55% 至 17500 亿立方米；石油需求将下降 75% 至 2400 万桶/天。

清洁发电、网络基础设施和终端用能部门是增加投资的关键领域，它们对于能

源系统转型至关重要。到 2030 年，年度输配电网投资额将从今天的 2600 亿美元扩大到 8200 亿美元；电动汽车的公共充电桩数量将从今天的 100 万个增加到 4000 万个，每年需要投资近 900 亿美元；电动汽车的电池年产量将从今天的 160 GWh 增加到 6600 GWh。2030 年后，氢能和 CCUS 需要得到普及，这意味着 CO₂ 管道和氢能相关基础设施的年投资额将从今天的 10 亿美元增加到约 400 亿美元。

优先行动：清洁能源投资需要实现历史性的增长

政策需要发出明确市场信号，以催生新的商业模式，并撬动私人资本进入清洁能源领域，特别是在新兴经济体。加快国际公共财政资金支出，对能源转型至关重要，特别是在发展中经济体。但最终，大多数的投资主要还是依靠私营部门提供的资金。调动私营部门资本用于大规模基础设施建设，需要开发商、投资者、公共金融机构和政府之间开展更密切的合作。降低投资者的风险对于确保成功、负担得起的清洁能源转型至关重要。许多新兴市场和发展中经济体主要依靠公共资金来建设新能源项目和工业设施，它们将需要改革政策和监管框架，以吸引更多的私人资金。

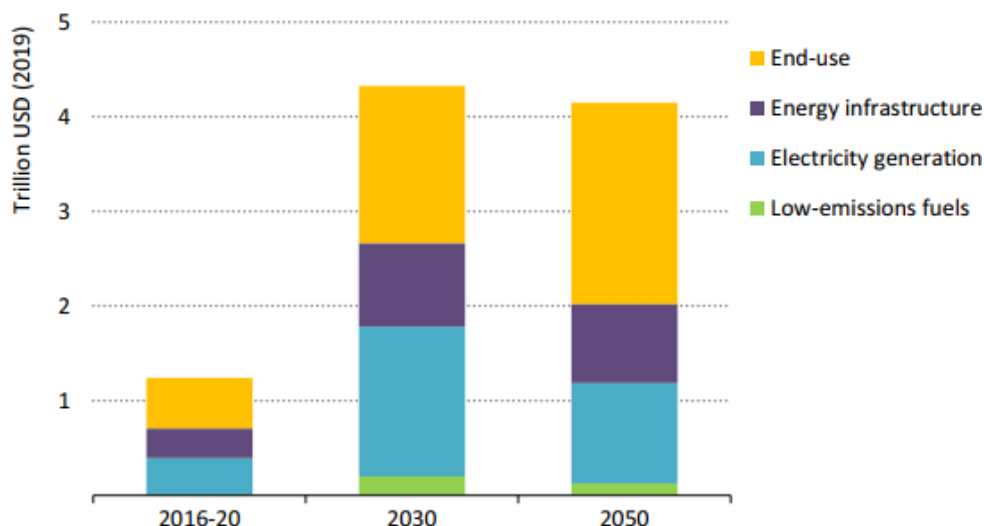


图 5 本路线图净零排放路径中 2030 年和 2050 年清洁能源投资增长（单位：万亿美元）

7、新的能源安全问题开始显现，但旧问题依然存在

石油和天然气产量的萎缩将对所有这些燃料的生产国和企业产生深远影响。本路线图提供的路径不需要新的石油和天然气田，石油和天然气供应越来越集中在少数低成本生产商。石油方面，欧佩克（OPEC）在全球石油供应中的份额将从近年来的 37% 左右增加到 2050 年的 52%，比石油市场历史上任何时期都要高。然而，石油和天然气生产国的人均年收入预计将下降约 75%，从近年的 1800 美元下降到 21 世纪 30 年代的 450 美元。因此结构性改革和新的收入来源是必要的，尽管这些不太可能完全弥补石油和天然气收入的下降。

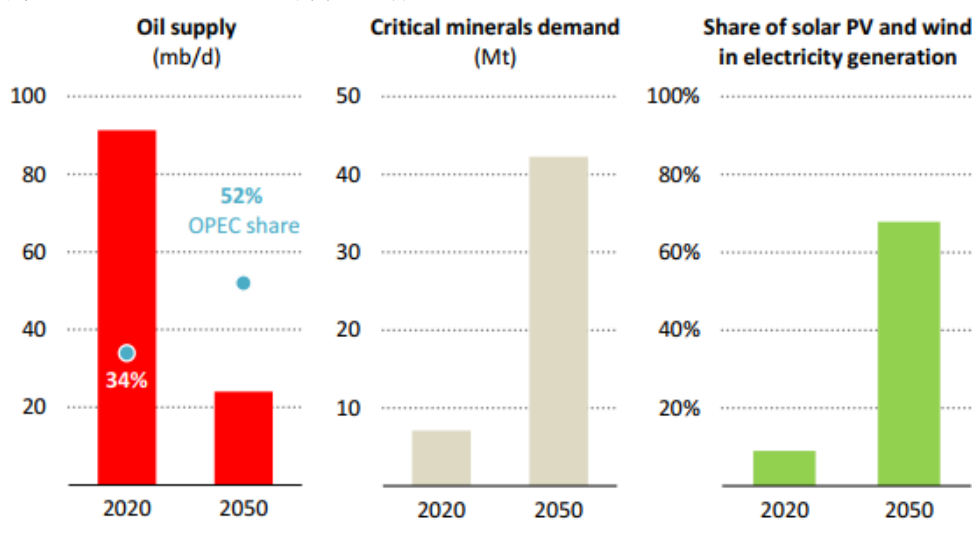
能源转型需要大量的关键矿产资源，它们的供应成为一个重要的增长领域。未来十年（2020-2030 年），铜、钴、锰和各种稀土金属等关键矿产资源的总市场规模

将增长近 7 倍。在 2030 年之前，这些矿产资源带来的收入远远大于煤炭。这为矿业公司创造了大量的新机会。如果供应跟不上快速增长的需求，它还会引发新的能源安全问题，包括价格波动和额外的交易成本。

与今天相比，所有行业的快速电气化使电力在全球能源安全问题中作用更加重要。到 2050 年，灵活性电力装机容量将翻两番，而同期化石燃料的装机将显著下降。这一转变要求在所有更灵活的电力来源上实现更大的增长：电池、需求响应和低碳灵活发电厂，并获得更智能和更数字化的电力网络的支持。电力系统对网络攻击和其他新兴威胁的抵御能力也需要增强。

优先行动：现在就需开始采取行动应对新兴的能源安全问题

在实现净零排放的路径中，以可负担的价格确保不间断和可靠的能源以及与能源相关的重要商品供应的重要性会日益凸显。随着对可再生能源电力的依赖增强以及对石油和天然气依赖的减弱，能源安全的重点将发生变化。电力系统面临的潜在风险包括波动性电力供应和网络安全风险增加。清洁能源技术对关键矿产资源的需求依赖日益严重，需要建立新的国际治理机制，以确保供应的及时性和可持续性。但是，传统的能源安全问题将依然存在。



Note: mb/d = million barrels per day; Mt = million tonnes.

图 6 相比 2020 年本路线图净零排放路径中到 2050 年能源安全的相关问题

8、国际合作对实现 2050 净零排放目标意义重大

能否实现 2050 净零排放目标很大程度上有赖于政府与企业、投资者、公民的共同努力，所有的利益相关方都需要发挥自己的作用。各级政府在净零排放路径中采取的广泛措施，会影响消费者购买行为和企业的投资。这包括能源企业如何投资于生产和供应能源服务的新方式，企业如何投资于设备，以及消费者如何为他们的家庭提供制冷和供暖。

所有这些变化的基础是政府做出的政策决定。制定具有成本效益的国家和地区

净零排放路线图需要政府各部门之间的通力合作，将能源纳入每个国家的财政、劳工、税收、运输和工业等各项政策制定中。仅靠能源或环境部门无法实施到 2050 年实现净零排放所需的政策行动。

能源消费的变化将导致化石燃料税收收入大幅下降。在今天的许多国家，柴油、汽油和其他化石燃料消费税是公共收入的重要来源，在某些情况下甚至高达 10%。本路线图的净零排放路径中，石油和天然气零售的税收收入预计在 2020-2030 年间下降约 40%，想要管控这种下降就需要进行长期的财政规划和预算改革。

优先行动：将国际合作推向新的高度

实现全球能源系统的净零排放不是一个所有政府仅聚焦自己国家减排的问题，而是需要通过协调行动来应对全球挑战。各国政府必须以有效和互利的方式共同努力，开展跨国的协调合作。这包括谨慎管理国内创造就业机会和当地商业优势，以及全球对清洁能源技术部署的集体需求。加快创新，制定国际标准，协调推广清洁能源技术。合作就必须认识到不同国家发展阶段的差异和社会不同部分的不同情况。对许多富裕国家而言，如果没有国际合作，实现净零排放将更加困难，成本也将更高。对许多发展中国家而言，没有国际援助的净零排放路径尚未发现。需要技术和财政支持，以确保关键技术和基础设施的部署。如果没有更大的国际合作，到 2050 年全球 CO₂ 排放量将不会实现净零。

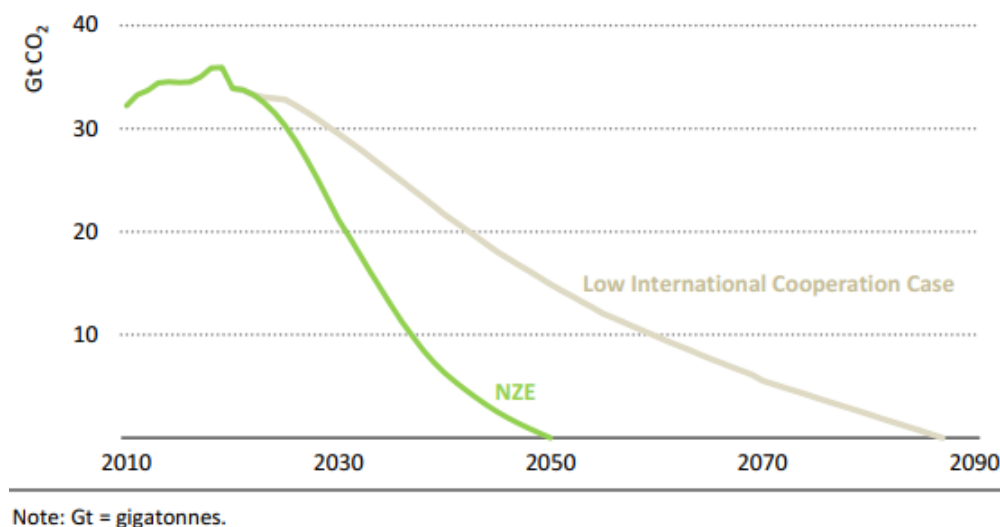


图 7 路线图低国际合作情景将到 2090 年才能实现净零排放（单位：十亿吨 CO₂）
（廖明月 李岚春 郭楷模）

国际能源署与欧专局分析全球清洁能源技术创新趋势

4月27日，国际能源署（IEA）和欧洲专利局（EPO）联合发布《专利与能源转型：清洁能源技术创新全球趋势》报告¹⁵，分析了全球低碳能源技术创新的发展趋势。研究显示，在经历了过去十年专利申请活动的低迷之后，许多关键的低碳能源新兴技术和交叉技术专利申请已连续三年增长，这与2015年以来化石燃料专利数量下降趋势形成了鲜明对比，但总体上低碳能源技术专利的增长率仍低于2013年之前的水平。为了实现共同的净零排放目标，全球迫切需要将清洁能源创新的复苏推向全新转型阶段。报告关键点如下：

一、能源供应技术创新趋势

1、太阳能技术在低碳能源供应技术专利申请中继续占据主导地位。2000-2019年，太阳能（特别是光伏）相关的技术专利申请数量最多，达46500件，其次是风能（17000件）、替代燃料（10000件）相关技术，同期其他可再生能源、核能和高效率燃烧技术专利申请数量相对较低，分别为2000、5000、6600件。

2、太阳能电池仍然是技术创新密集度最高的领域。2010-2019年，光伏领域中太阳能电池技术专利申请比例最高（48%）。在电池设计方面，专利申请活动已经由无机太阳能电池转向新一代有机太阳能电池，这有助于实现更低成本、更广阔场景应用，如可穿戴和物联网设备。日本、韩国在太阳能电池领域处于领先地位，中国在有机太阳能电池领域已取代了专门生产无机太阳能电池的美国。

3、太阳能光伏等能源供应技术创新已转向下游。自2010年以来，商业太阳能光伏技术在很大程度上围绕晶体硅电池的主要设计进行整合，持续活动转向优化制造和扩大规模以降低生产成本。这种趋势降低了其他设计达到规模化的竞争力，并抑制发明新电池的动力。与此同时，值得注意的两个明显趋势是转向其他类型太阳能光伏设计，以及聚焦于更具成本效益的安装和运行技术。随着电池和组件价格的下降，移动安装和智能跟踪等能有效实现成本削减、产量提升，其技术价值也在不断增加，这也导致提高太阳能光伏板性能和价值的相关技术专利快速增长，尤其在主要采用进口太阳能光伏组件的地区。

二、终端应用技术创新趋势

1、全球低碳能源技术创新正在从供应端转向终端应用技术。自2012年以来，终端领域的燃料转换和能效技术创新活动高度活跃，推动低碳能源专利申请稳步增长。这些技术在过去五年中占到低碳能源技术国际专利族总量的60%，反映了整个经济发展深刻影响能源需求的巨大挑战。尽管如此，风能、太阳能、地热或水电等可再生能源和其他低碳能源供应技术在2019年仅占低碳能源技术国际专利族总量

¹⁵ Patents and the Energy Transition Global trends in clean energy technology innovation April 2021. <https://www.iea.org/reports/patents-and-the-energy-transition>

的 17%。与之前 10 年的快速增长形成鲜明对比，2012 年以来这些领域的专利申请数量一直在下降。

2、电动汽车及其相关基础设施的快速发展成为过去十年低碳能源技术创新的最大驱动力。在不同终端低碳能源技术中，交通领域的专利申请占比最高。2000-2019 年，超过 40% 国际专利与终端应用技术有关，交通领域约占 35%；电动汽车增长速度最快，其他减少内燃机车辆碳足迹技术及其他交通领域技术均保持增长。降低工业生产排放和能源强度是另一个主要的创新领域，约占终端部门国际专利的 1/3；金属矿物加工领域节能技术创新尤为活跃，2000-2019 年年均增长率接近 12%；自 2015 年，石油化工领域与清洁能源技术相关的国际专利数量显著减少；其他工业领域国际专利占比达 16%，包括消费品创新和清洁农业技术。建筑节能也是重要的创新领域，占终端部门国际专利总量的 17.7%，但 2015-2019 年较 2000-2014 年下降了 10%；信息通信技术领域的清洁能源国际专利以年均 10% 的惊人速度增长。

三、使能技术创新趋势

1、使能技术的快速进步成为能源供应和终端应用创新的强大驱动力。电池、氢能、智能电网和碳捕集、利用与封存（CCUS）等交叉技术在能源转型中发挥着关键作用，这将有助于在供应方面部署清洁能源，同时促进这些能源（特别是可再生能源发电）在终端应用领域的部署。自 2010 年以来，多达 1/3 的使能技术相关国际专利申请达到了低碳能源供应和/或终端技术的水平。

2、交叉技术领域发挥越来越重要的作用。作为低碳能源技术的推动者，交叉技术领域使能源系统更加灵活并可以协同相关领域，且与能源供应和终端应用技术的重叠日益明显。自 2017 年以来，低碳能源增长的主要驱动力是电池、氢能、智能电网、CCUS 等交叉领域技术创新，这些技术在低碳能源技术国际专利族总量的份额由 2000 年的 27% 增加到 2019 年的 34%。其中，低碳能源使能技术专利活动的积极发展趋势主要来自于电池技术创新，其在 2000-2019 年就创造了 57% 的国际专利数量，年均增长率达 13%。

3、氢能技术创新仍有待重大突破。尽管在 2010-2015 年间，氢能技术的关注度有所减弱，但近期热度激增，相关专利活动仍保持相对稳定，反映持续的研究资金确保了稳定的技术发明产出，以及缺乏促进竞争、扩大规模的供氢市场。日本在燃料电池研究中占据着主导地位，而欧洲在低碳氢供应和储存（包括电解槽）的技术开发方面处于领先地位，其中仅德国就约占欧洲氢能存储技术相关的国际专利数量的一半，低碳氢气供应技术的三分之一。氢能供应和储存领域的专利申请数量在 2010-2019 年间迅速增加，但仍低于燃料电池领域。

四、低碳能源技术专利申请人分析

1、大学和公共研究机构低碳能源技术创新发明活跃。过去 20 年，大学和公共

研究机构在低碳能源技术国际专利族总量中的比例一直在增加，由 2000-2009 年的 6.6% 增长至 2010-2019 年的 8.5%。低碳能源终端应用技术在整体低碳能源技术专利申请活动中占主导地位，研究机构在低碳能源供应技术（替代燃料、核能和一些可再生能源）和新兴应用技术（如 CCUS 和氢能）方面尤其活跃。除化学和炼油之外，研究机构在终端应用技术的国际专利数量中占比较低。

2、全球主要汽车制造公司持续部署电动汽车技术创新。低碳能源技术专利申请人排名前 15 位的机构包括：6 家汽车公司（丰田、通用、福特、本田、大众、现代），6 家主要电池供应商（三星、松下、LG、博世、日立、东芝），2 家直接涉足能源领域的公司（通用电气、西门子公司），以及美国雷神公司（航空业低碳能源技术为其专长）。这突显了主要制造商对电动汽车持续增长的专利布局，以及在不断变化的交通运输领域争夺市场份额的发展格局。

五、低碳能源技术专利地理分布分析

1、欧、日、美在低碳能源技术国际专利处于领先地位。自 2000 年以来，欧洲在低碳能源技术专利申请活动中保持领先，2010-2019 年占国际专利族总量的 28%（仅德国就占 11.6%），在大多数可再生能源领域排名第一，在铁路等终端领域表现良好。日本、美国分别以 25%、20% 紧随其后，日本在电池和氢燃料方面处于全球领先，电动汽车领域也具有优势；除化石燃料技术外，美国在低碳燃烧（替代燃料、高效燃烧、核能以及 CCUS）和航空等相关终端领域具有技术优势。韩国（占国际专利总量的 10%）和中国（8%）专利活动在过去十年持续增长，也是低碳能源技术创新中心。韩国主要优势在于电池、太阳能光伏技术、能效和通信技术，中国主要优势在信息通信技术和铁路。

2、低碳能源技术国际合作促进知识扩散，为进一步加快研发工作提供基础。合作网络通常涉及美国和欧洲国家，尤其美国在这些网络的组织和技术导向方面发挥着重要作用。在 10 个最具协作性的领域中，美、欧在 7 个领域显示出技术优势，并且几乎在所有领域主要的双边合作中（铁路除外）都是合作伙伴。

（李岚春 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 汤匀

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：energy@whlib.ac.cn