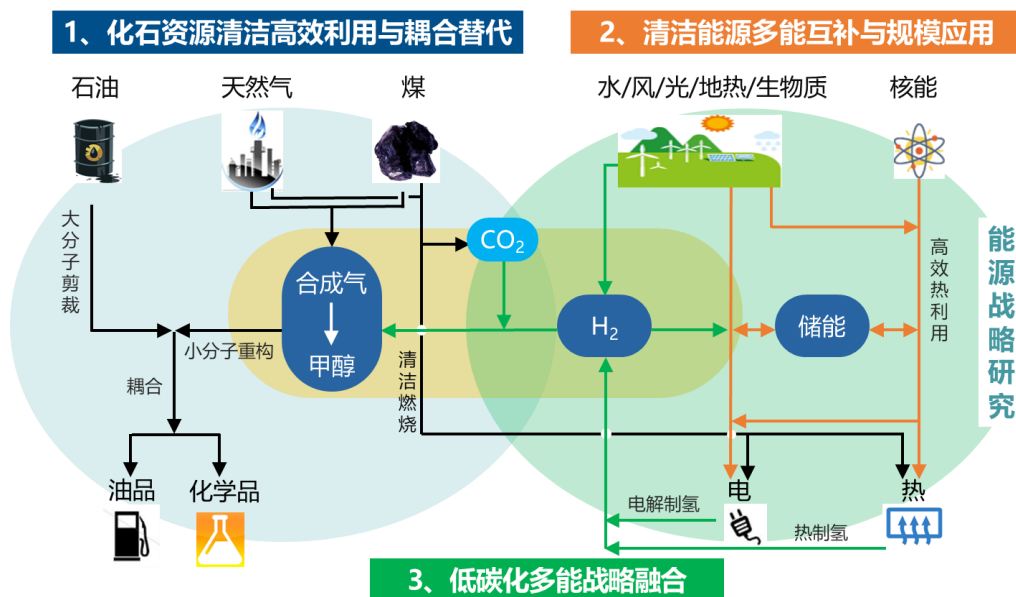




洁净能源科技动态监测快报

2021 年第 02 期（总第 16 期）



本期看点

- DOE 斥资 1.6 亿美元开发化石燃料制氢及其储运和利用技术
- 欧盟十二国投入 29 亿欧元支持电池价值链研究创新项目
- 美国能源部公布《太空能源战略》强化美国太空探索领导力
- 德国投入 7 亿欧元支持 3 个绿氢旗舰研究项目
- 全球铀资源足以满足百年需求 但投资不足导致产能受限
- 伍德麦肯兹预测 2021 年全球能源十大趋势

◆ 化石资源清洁高效利用

- DOE 斥资 1.6 亿美元开发化石燃料制氢及其储运和利用技术 2
- DOE 成立能源矿产可持续发展业务部门 3
- NETL 总结先进计算技术在极端环境材料研发应用进展 3

◆ 清洁能源多能互补

- 欧盟十二国投入 29 亿欧元支持电池价值链研究创新项目 5
- 美国能源部公布《太空能源战略》强化美国太空探索领导力 5
- DOE 资助 5000 万美元推进先进反应堆项目研发 8
- 空穴接触层助力晶硅-钙钛矿叠层电池创造近 30%效率纪录 10
- 光诱导局域表面等离子体共振开辟增强催化剂活性新策略 11

◆ 低碳化多能融合

- 德国投入 7 亿欧元支持 3 个绿氢旗舰研究项目 13
- ARPA-E 资助 4700 万美元支持变革性能源技术研发 14
- SCIENCE 封面文章: 探索单晶富镍正极材料裂纹形成机理 15
- 多核铈络合物催化剂实现温和条件下 CO₂ 加氢制甲醇 16

◆ 能源战略研究

- 欧盟统计局: 2019 年欧盟提前一年实现可再生能源占比目标 18
- 全球铀资源足以满足百年需求 但投资不足导致产能受限 21
- 伍德麦肯兹预测 2021 年全球能源十大趋势 24

恭 祝 春 节 快 乐

本期概要

美国能源部 (DOE) 宣布投入 1.6 亿美元支持开发基于化石燃料的氢生产、运输、储存和应用相关技术,以推进实现净零排放,重点关注七个技术主题:利用传统化石燃料和废物、生物质等混合原料通过模块化气化和共气化生产净零或负排放氢;开发固体氧化物电解槽 (SOEC);设计碳捕集、利用与封存系统;开发先进燃气轮机;开发天然气制氢技术;输氢基础设施;地下储氢。

欧盟委员会宣布设立一个欧洲共同利益重要项目 (IPCEI)“欧洲电池创新”,由法国、德国等十二个成员国共同投入 29 亿欧元,并将撬动 90 亿欧元的私人投资,旨在推进电池价值链的创新研发,建立泛欧电池生态系统:项目覆盖整个电池价值链,包括原材料提取、电池单元及组件的设计和制造,以及电池回收和处理,尤其注重可持续性。主要涉及的研究领域包括:原材料和先进材料;电池单元;电池系统;回收和循环经济。

美国能源部 (DOE) 发布《太空能源战略:强化美国在太空探索领域的领导力》报告,围绕如何确保美国在未来十年 (2021-2031 年) 内的太空探索和应用领先地位,提出了具体的四大发展目标:(1) 为太空探索提供能源动力,包括开发和部署放射性同位素动力系统、开发外星球用核电反应堆与核动力推进系统、开发应用太阳能和储能系统、研发热能管理和利用技术等;(2) 破解太空未解的科学之谜,包括探索太空科学知识、利用太空实验促进物理科学发展、发展应对太空极端环境研究能力和专业知识;(3) 维护美国太空领域的安全利益,包括发展太空感知能力、发展保护太空资产能力和近地天体偏转和撞击研究;(4) 促进太空产业发展。

德国联邦教研部 (BMBF) 宣布投入 7 亿欧元支持 3 个绿氢旗舰项目,包括:(1) H₂Giga 项目,将开发大规模、高性能制氢电解槽,并实现批量生产;(2) H₂Mare 项目,将开发海上风电-制氢一体化系统,直接利用海上风电生产氢气及副产品(甲烷、甲醇、氨、燃料等);(3) TransHyDE 项目,将开发并测试短、中、长距离运输氢气的解决方案,以促进建立高效氢经济。

经合组织核能署 (OECD-NEA) 和国际原子能机构 (IAEA) 联合发布《铀资源、生产与需求 2020》报告,提供了世界铀工业最新统计概况:截至 2019 年 1 月 1 日,已探明的常规铀资源(包括可靠资源和推断资源)中,开采成本低于 130 美元/kgU 资源量为 614.8 万吨,高开采成本(低于 260 美元/kgU)的铀资源估计有 807.0 万吨。未探明的常规铀资源总量为 722.0 万吨。2019 年,全球铀产量小幅增长至 5.4 万吨,主要原因是澳大利亚、哈萨克斯坦和尼日尔的产量增长。考虑到截至 2019 年 1 月 1 日的铀需求,已探明可开采资源足以满足全球 135 年以上的需求,但需要大量的投资和技术才能将这些资源推向市场。

咨询公司伍德麦肯兹发布观点文章,分析预测了 2021 年全球能源市场十大发展趋势:(1) 2021 年强劲的石油需求增长将推高油价;(2) 油气上游行业将再经历一年的低迷期;(3) 油气企业将加速向低碳能源多样化发展;(4) 更多企业将设定减排目标;(5) 美国致密油行业将达成轰动性的企业合并;(6) 太阳能电力购买协议价格将再创新低;(7) 全球电动汽车销量将接近 400 万辆;(8) 更多政府将向能源转型关键供应链投资;(9) 中国禁止从澳大利亚进口煤炭的禁令将持续一整年;(10) 拜登政府将在气候政策上小心谨慎。

化石资源清洁高效利用

DOE 斥资 1.6 亿美元开发化石燃料制氢及其储运和利用技术

1 月 15 日，美国能源部（DOE）发布项目招标文件，将投入 1.6 亿美元¹支持改造美国化石燃料和发电基础设施，开发基于化石燃料的氢生产、运输、储存和应用相关技术，以推进实现净零排放。根据 DOE 化石能源办公室《氢能战略》对制氢成本的最新评估显示，化石燃料制氢为目前成本最低的制氢技术，因此 DOE 将支持开发先进新技术，提高化石燃料制氢及其储运和应用的性能、可靠性和灵活性，并结合碳捕集和封存（CCS）降低其碳排放。本次资助招标重点关注七个技术主题，详情如下：

1、利用传统化石燃料和废物、生物质等混合原料通过模块化气化和共气化生产净零或负排放氢。该主题将改进气化制氢技术的性能、可靠性和灵活性，并集成燃烧前碳捕集实现净零排放或负排放。该主题研究还将实现利用低成本或负成本原材料和传统原料，生产低成本净零排放燃料和化学品。

2、开发固体氧化物电解槽（SOEC）。该主题将开发用于 SOEC 的新材料或改性材料，并提高对 SOEC 老化机理的认识，从而实现经济高效制氢。

3、设计碳捕集、利用与封存系统。该主题将完成对商业规模碳捕集、利用和封存（CCUS）系统的初步设计，这一系统可从甲烷蒸汽重整或自热重整装置中每年分离和封存超过 10 万吨纯度为 95% 的 CO₂，碳捕集率超过 90%。

4、开发先进燃气轮机。该主题将改进使用高纯氢气、氢气和天然气混合气以及其他碳中性燃料（如氨）的燃气轮机系统性能，此外还将在燃气轮机中示范燃氢旋转爆轰发动机。

5、开发天然气制氢技术。该主题将开发变革性的天然气脱碳技术，生产零碳或负碳氢气，以满足未来氢气市场需求。

6、输氢基础设施。该主题将开发先进技术以降低输氢管道和压缩站等基础设施的成本，提高基础设施性能（如弹性、安全性、可靠性、完整性等）。

7、地下储氢。该主题将开发先进技术以提高地下储氢经济性和效率、安全性、完整性等性能。

（岳芳）

¹ DOE Announces \$160 Million for Projects to Improve Fossil-Based Hydrogen Production, Transport, Storage, and Utilization. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-160-million-projects-improve-fossil-based-hydrogen-production-transport>

DOE 成立能源矿产可持续发展业务部门

1月15日，美国能源部（DOE）宣布新成立一个矿产可持续发展部门²，旨在保障美国关键矿产资源的供应链安全，改善美国的能源和制造系统，使其更清洁、安全和弹性。该部门将负责美国急需的关键矿产资源开采利用，包括与下一代核能、可再生能源、清洁高效的化石能源技术、储能和电动汽车技术相关的关键矿产资源，以保障国家安全，支持国防需求，并促进经济增长。

DOE 矿产可持续发展部门将向 DOE 化石能源办公室的洁净煤与碳管理办公室汇报工作，重点关注关键矿产资源供应链的技术开发和部署，包括关键矿产原料的提取、加工、使用和处置，并促进与其他联邦机构间的合作以及开展国际合作，解决能源、商业和国防相关关键矿产资源的可持续开采利用问题。具体而言，将关注如下技术：

1、资源表征和使能技术开发。包括：①区域矿产资源潜力的评估和预测；②开发表征技术，如无人机、实时传感和分析、微型钻头钻进技术等；③开发动态模拟等评估和预测技术。

2、可持续资源开采和选矿技术开发。包括：①常规或非常规矿产资源变革性采矿和选矿技术，以回收当前技术无法回收的矿产；②在开采中集成工业加工过程；③从废弃矿山中开采矿物并修复现有矿场，同时最大程度降低环境影响。

3、萃取冶金、还原和合金化技术开发。包括：①通过萃取冶金、还原和合金化开发先进矿物加工技术，最大程度提高产量，促进美国工业、能源和其他部门的发展；②进行萃取冶金、还原和合金化技术的验证试验，以实现商业化生产；③最大程度改进环境管理，降低对土壤的污染。

（岳芳）

NETL 总结先进计算技术在极端环境材料研发应用进展

1月19日，美国能源部国家能源技术实验室（NETL）发布文章³，总结了利用大数据和机器学习等先进计算技术，开发用于超超临界蒸汽发电和超临界 CO₂ 循环发电的超高温合金材料研发进展。未来化石燃料发电厂将在更高温度和压力下高效运行，因此需要开发具备优越耐腐蚀和抗蠕变性的新型超高温合金材料，其成本、可成型性和可焊接性需与传统高温材料相当，从而提高化石燃料发电效率并降低排放。由 NETL 牵头的 DOE 化石燃料办公室“极端环境材料”（eXtremeMAT）国家实验室联盟，致力于利用 DOE 在材料设计、高性能计算、先进制造、原位表征、性

²Department of Energy Launches Minerals Sustainability Division to Enable the Ongoing Transformation of the U.S. Energy System and Help Secure a U.S. Critical Minerals Supply Chain. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-launches-minerals-sustainability-division-enable-ongoing-transformation>

³ Harnessing Advanced Computing and Data to Craft Alloys of Tomorrow. <https://netl.doe.gov/node/10443>

能评估方面的领先专业知识和能力，加速开发极端环境下的高性能材料，重点关注改进耐热合金和模型，以预测现有和未来化石燃料发电系统中材料的长期性能。

借助于大数据和机器学习等技术，可将材料开发过程变得更简单和快速，eXtremeMAT 国家实验室联盟的研究团队将上述技术与模拟、建模结合，无需进行物理实验即可预测合金样品的性能，在短期内就取得了一系列重要进展，包括：

1、开发了一套物理模型，能够通过一定数量的短期蠕变测试来预测蠕变破裂。该模型有助于加速新材料研发，以及让新材料更加快速地通过恶劣环境材料耐用性测试的资格认证。

2、开发了第一代材料工程模型，该模型整合了材料在服役期间的微结构变化数据，能够预测承受多轴应力和循环载荷的组件性能。该模型可在商业有限元分析软件包中实现，可更好地预测组件故障和剩余寿命，并实现预测性维护。

3、筛选出了几种经济实惠的氧化铝成型奥氏体不锈钢，与先进的高温奥氏体合金相比具有增强的耐高温性能。这些成本较低的合金可以降低超临界发电系统在高温高压极端环境下运行的系统成本。

4、在数据管理方面，NETL 的研究人员为 eXtremeMAT 研发团队在计算多尺度建模、仿真和数据科学等领域的工作做出了贡献。例如，创建了一个数据库平台，用于整理材料数据分析所需的实验和仿真数据以及元数据，以加快材料的设计开发和寿命预测。基于 NETL 的先前研究，向奥氏体不锈钢信息数据库中增加了钢、镍超合金和高熵合金数据集。从文献中获取的数据集也已经被加入到数据库中，包括日本国立材料科学研究所的疲劳数据集。德克萨斯大学埃尔帕索分校收集的蠕变数据已与 eXtremeMAT 团队共享，其蠕变特性以及随附的元数据也已添加到 eXtremeMAT 数据集中。

编者按：“极端环境材料（eXtremeMAT）”国家实验室联盟于 2018 年成立，由 DOE 的 7 个国家实验室组成，包括艾姆斯国家实验室、爱达荷国家实验室、劳伦斯利弗莫尔国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室、橡树岭国家实验室和西北太平洋国家实验室，主要致力于加速经济、耐用的极端环境材料研发，应用于先进的发电系统，提升性能降低成本。

（岳芳）

清洁能源多能互补

欧盟十二国投入 29 亿欧元支持电池价值链研究创新项目

1 月 26 日，欧盟委员会宣布设立一个欧洲共同利益重要项目（IPCEI）“欧洲电池创新”⁴，由奥地利、比利时、克罗地亚、芬兰、法国、德国、希腊、意大利、波兰、斯洛伐克、西班牙和瑞典十二国共同投入 29 亿欧元，并将撬动 90 亿欧元的私人投资，旨在推进电池价值链的创新研发，建立泛欧电池生态系统。该项目是第二个电池价值链相关的欧洲共同利益重要项目，第一个项目由欧盟委员会在 2019 年 12 月批准设立⁵。

该项目将实施至 2028 年，有 42 个直接参与者（包括在欧盟国家开展活动的中小型企业 and 初创企业）和 150 多个外部合作伙伴，如欧洲各地的大学、研究机构和中小企业，计划实施近 300 个合作课题。该项目将覆盖整个电池价值链，包括原材料提取、电池单元及组件的设计和制造，以及电池回收和处理，尤其注重可持续性。项目将支持开发一整套全新的电池突破性技术，包括新型电池、生产工艺及电池价值链的其他创新技术，超越现有的技术和工艺，并使电池性能、安全性和环境影响得到显著改善。项目主要涉及的研究领域包括：原材料和先进材料；电池单元；电池系统；回收和循环经济。

（岳芳）

美国能源部公布《太空能源战略》强化美国太空探索领导力

1 月 6 日，美国能源部（DOE）发布《太空能源战略：强化美国在太空探索领域的领导力》报告⁶指出，随着越来越多的国家加入到太空探索竞赛中，美国所面临的太空竞争（无论是太空商业应用还是军事应用）环境愈加激烈，必须要认真审视和应对。为此，战略围绕如何确保美国在未来十年（2021-2031 年）内的太空探索和应用领先地位，提出了具体的发展目标、实施原则和实施机制，关键要点如下：

一、发展目标

1、为太空探索提供能源动力

DOE 将为美国太空用户开发适用于太空探索的能源技术（包括核能和非核能源），探索能源管理系统以满足太空任务中潜在的应用需求，并推进应用于太空系

⁴ State aid: Commission approves €2.9 billion public support by twelve Member States for a second pan-European research and innovation project along the entire battery value chain.
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_226

⁵ 详见 2020 年第 1 期《洁净能源科技动态监测快报》报道。

⁶ Department of Energy Releases ‘Energy for Space’ Strategy.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-releases-energy-space-strategy>

统的先进能源生产、收集、储存、分配、使用、耗散和热管理技术。具体而言，该目标包括四项具体的子目标：

(1) 针对太空探索任务开发和部署放射性同位素动力系统

DOE 将继续与美国国家航空航天局 (NASA)、其他联邦机构和商业实体合作，开发和设计用于近期和远期太空探索任务的放射性同位素动力系统 (RPS)。该系统利用放射性同位素的自然衰变产生的热量带来的温差电流为运行的航天器系统和科学仪器提供动力。目前，DOE 与 NASA 合作重点开发基于钷-238 放射性同位素的 RPS，以满足 NASA 长期太空探索任务的动力需求。

(2) 开发外星球用核电反应堆与核动力推进系统

由于太空探索任务执行时间和飞行距离不断增加，使得太空探索任务对登陆外星球可使用的核电系统和远程飞行核动力推进系统的需求日益强烈。DOE 将与 NASA 合作开发用于外星球登陆后供电的核裂变反应堆和用于航天器的核动力推进系统，前者提供稳定的基本负荷电力以满足漫游车等外星球表面设施的电力需求，后者主要用于满足长期星际飞行任务的航天器动力需求。

(3) 开发应用太阳能和储能系统

太阳能发电还将继续服务于卫星和外星球表面设施（如漫游车）的电力需求。此外，还需要部署储能系统作为备用电源以应对在主要能源资源不足时的电力需求。DOE 将致力于将其在太阳能发电、燃料电池、储能电池和微电网领域的技术研发成果应用于满足太空探索任务的能源需求。

(4) 研发热能管理和利用技术

由于太空环境的特殊性（极端环境），需要对设备进行热控制，以防止电子设备和系统遭受极端的高温或低温以及剧烈温度波动带来的潜在负面影响。因此 DOE 需要开发相关的热能管理技术，以及热利用技术对上述热能有效回收利用。

2、破解太空未解的科学之谜

DOE 将联合各利益相关方通过空间科学研究创新和空间技术应用突破来破解太空之谜。DOE 将充分利用其先进的实验室系统、设施、研究人员的专业科学能力和知识，推进太空科学研究的突破，促进对宇宙的基本理解，以及探明人类在宇宙中如何能够更加安全、可靠、高效和高质量生活和工作。具体包括以下几个目标：

(1) 探索太空科学知识支持人类的太空探索任务

DOE 支持宇宙基础科学研究，以提高对发生在近地轨道及深空环境中的复杂物理过程的理解，这些知识对人类在太空中长期生活和执行科学任务具有重要的指导意义。

(2) 利用太空实验促进物理科学发展

由于太空探索任务涉及众多学科和技术，通过在太空探索和开展的相关实验可

以有力地推动 DOE 在粒子物理学、天文学、材料科学、化学、地球科学、合成生物学以及计算机等学科发展。

(3) 发展应对太空极端环境研究能力和专业知识

由于太空探索处于极端环境（强辐射、剧烈的温度波动等），需要为此开展相关的科学知识研究。DOE 支持极端温度和辐射环境下材料核心专业知识研究和科学工具开发，有助于阐明极端环境条件下的材料降解、高温形变以及材料和微电子在辐照下的失效机制。

3、维护美国太空领域的安全利益

DOE 将支持太空环境感知技术研发、太空能源系统、多用途传感器和卫星开发/部署支持，将其应用于国家安全军用和民用太空项目。具体包括以下几个目标：

(1) 发展太空感知能力

DOE 的国家安全任务之一是提供太空探索需要的专业技术、设施和领域专家资源，如航天遥感、数据分析、计算机建模仿真、宇宙环境的独特理解等领域，以支持美国国防部（DOD）和其他政府机构安全进入太空。DOE 重点是构建太空空间感知能力，即通过上述技术和知识综合应用能够有效监测太空环境，同时收集分析太空数据并及时向地面接收站传输，这些数据能够提供关于太空环境及其演变的知识，有助于研究人员进一步认识太空环境。

(2) 发展保护太空资产能力

美国几乎在生活的各个方面都依赖太空，包括通讯、天气监测、导航等。当前美国太空资产面临一系列威胁，如近地轨道大量太空碎片、小行星之类的近地天体，他们可能对太空资产构成碰撞威胁，也可能对地球造成撞击威胁；还有可能在未来发生太空战威胁（敌对国家可能企图毁坏、干扰和致盲卫星）。因此必须设法遏制和消除太空领域中不利于美国及其盟国国家利益的威胁。DOE 重点是发展相关技术和能力提升太空能源基础设施对太空极端事件和其他破坏的抵御能力。

(3) 近地天体偏转和撞击研究

DOE 将与 NASA、美国国家核安全管理局（NNSA）等联邦机构合作，利用高性能计算机开展模拟研究发展近地天体偏转和撞击模拟分析能力，以及开发用于研究近地天体偏转和扰动各种物理特性的技术，构建防御可能撞击地球的近地天体的能力。

4、促进太空产业发展

DOE 将推动空间科学研究的创新，驱动美国未来的太空任务和太空商业应用的突破，促进和激励美国商业航天发展，以降低商业航天活动的成本和风险，强化美国在全球太空商业应用领域的领导地位。具体包括以下几个目标：

(1) 将新兴技术应用于太空探索领域

DOE 将把人工智能、机器学习等新兴数字技术引入到太空探索研究任务中，以实现海量实验数据的高效收集和处理，如将其应用于储能系统高性能材料和化学品发现，以提升实验效率、缩短实验周期。

(2) 鼓励在太空任务中使用 DOE 技术

DOE 在技术开发和商业化方面具有悠久的历史，迄今为止发展了数百种能源技术以及众多的科研设施，这些技术和设施在推动美国太空探索任务发展中发挥了关键作用。如 DOE 的国家同步加速器光源 II 已用于原位分析 NASA 从太空取回的样本，橡树岭国家实验室的超算系统用于处理太空科学任务获得的海量数据，劳伦斯伯克利国家实验室的回旋加速器使研究人员更好地了解辐射对材料和电子产品的影响等。因此，在未来的太空任务中，需要继续发挥 DOE 的关键作用，广泛应用 DOE 发展的相关技术和设施。

二、战略执行原则

DOE 执行战略时将以下述三项基本原则为基础：

1. DOE 在执行太空相关活动时需要同步发展 DOE 的科技人力资源；创造机会保持和留住经验丰富的科学家、工程师和技术人员队伍；并推进科学、技术、工程和数学（STEM）项目发展，为 DOE 培育下一代储备人才。

2. DOE 确保科学设施和基础设施发展受益于承担的太空研究、实验和技术开发任务。

3. DOE 继续采取灵活资助合作模式，如“联邦资助研发中心”（FFRDC）资助模式，以及与其他联邦机构、行业和大学的战略合作模式，不仅有利于 DOE 有效开展支持太空探索的研究活动，也为 DOE 提供了一套高效合同管理模式。

三、战略实施机制

DOE 将利用各种实施机制，如 DOE 项目导向的资助、DOE 赞助的跨学科科技计划、战略伙伴关系项目、国家实验室导向的研发活动、技术转型和私营部门伙伴关系倡议（例如创新峰会、合作研发协议等），来推进战略的实施和目标的实现。

（郭楷模）

DOE 资助 5000 万美元推进先进反应堆项目研发

在美国能源部（DOE）2020 年 10 月公布了“先进反应堆示范计划”（ARDP）框架下第一个资助专项⁷详情后，DOE 于 12 月 16 日和 22 日相继宣布了 ARDP 其余两个专项资助情况，分别是“未来示范反应堆风险管控专项”和“先进反应堆概念开发专项”，2020 财年将共资助 5000 万美元。具体如下：

一、未来示范反应堆风险管控专项

⁷ 详见 2020 年第 11 期《洁净能源科技动态监测快报》报道。

12月16日，DOE宣布为“未来示范反应堆风险管控专项”提供第一期（2020财年）3000万美元资助⁸，目的是设计开发安全、经济的先进反应堆技术，能够在未来10-14年内获得许可并部署。DOE计划在七年内向这一专项总共资助约6亿美元，产业合作伙伴将匹配至少20%的资金投入。专项第一期选定五个团队开展课题研究，具体研究内容如下：

表1 未来示范反应堆风险管控专项具体研究内容

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

二、先进反应堆概念开发专项（ARC-20 专项）

12月22日，DOE宣布为“先进反应堆概念开发”（ARC-20）专项提供第一期（2020财年）2000万美元资助⁹，旨在推进先进反应堆概念设计早期发展，目标是能够到2030年代中期进行示范。DOE计划在四年内向ARC-20项目总共资助约5600万美元，产业合作伙伴将匹配至少20%的资金投入。ARC-20项目第一期选定三个团队开展课题研究，具体研究内容如下：

⁸ Energy Department’s Advanced Reactor Demonstration Program Awards \$30 Million in Initial Funding for Risk Reduction Projects. <https://www.energy.gov/ne/articles/energy-department-s-advanced-reactor-demonstration-program-awards-30-million-initial>

⁹ Energy Department’s Advanced Reactor Demonstration Program Awards \$20 million for Advanced Reactor Concepts. <https://www.energy.gov/ne/articles/energy-department-s-advanced-reactor-demonstration-program-awards-20-million-advanced>

表 2 先进反应堆概念开发 (ARC-20) 专项具体研究内容

研究机构	研究内容	总资助金额 (DOE 出 资) /百万美元	资助周期
先进反应堆 概念有限责 任公司	固有安全先进小型模块化反应堆。将基于一个 100 兆瓦 (电功率) 反应堆设施的早期预概念设计,开展一种地震隔离的先进钠冷反应堆设施的概念设计	34.4 (27.5)	三年半
通用原子公 司	快中子模块化反应堆概念设计。将开发一种 50 兆瓦 (电功率) 快中子模块化反应堆概念设计,验证燃料、安全性和运行性能方面的关键指标	31.1 (24.8)	三年
麻省理工学 院	水平布置紧凑型高温气冷堆。将推进模块式一体化高温气冷反应堆 (MIGHTR) 概念设计	4.9 (3.9)	三年

(岳芳)

空穴接触层助力晶硅-钙钛矿叠层电池创造近 30%效率纪录

受限于固有带隙问题,单结电池效率存在肖克利-奎伊瑟效率极限 (S-Q 极限,约 32%)。而将基于不同带隙 (光谱响应范围不同) 光敏材料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单结电池 S-Q 极限强有力的技术路径。

由德国亥姆霍兹材料与能源研究中心 Steve Albrecht 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计开发了一种自组装的甲基取代咪唑单分子层材料 Me-4PACz,作为空穴接触层覆盖在空穴层表面,一方面该接触层增强了空穴的抽取效率,另一方面起到了界面钝化作用,从而有效地抑制了界面非辐射复合提升了开路电压和填充因子,进而增强了电池性能。研究人员在此基础上制备了钙钛矿-晶硅双结叠层太阳电池,1 cm² 有效辐照面积器件获得了高达 29.15% 的认证效率,创造了新的世界纪录 (此前纪录是 28%,由牛津光伏公司创造)。为了与晶硅太阳电池 (作为底电池) 形成良好的光谱互补吸收匹配,需要构建对近红外光 (800-1100 nm) 具备优异的透射率,以保证晶硅底电池能够充分吸收近红外光的钙钛矿顶电池,意味着钙钛矿电池的禁带宽度要控制在 1.6 eV 左右。为此,研究人员通过对钙钛矿组分的调控获得了禁带宽度为 1.68 eV 的三阳离子混合钙钛矿薄膜 Cs_{0.05}(FA_{0.77}MA_{0.23})_{0.95}Pb(I_{0.77}Br_{0.23})₃,最后组装成完整电池器件。实验研究发现含有单分子层 Me-4PACz 电池器件的开路电压和填充因子同时得到了提升,前者从 1.13V 增加到 1.23 V,填充因子从 78.2% 增加到了 84%,进而提升了电池转换效率,从 18% 增加到了 20%。通过光致发光谱测试可以发现,引入单分子层 Me-4PACz 钙钛矿薄膜的空穴抽取效率提高,界面非辐射复合损失减少,是电池性能改善的主要原因。接着以含有单分子层 Me-4PACz 钙钛矿电池为顶电池,以晶硅电池为底电池组装成

双结叠层太阳电池并测试了其光电性能。结果显示电池获得了逼近 30% 的高转换效率，为 29.15%，且通过了德国弗劳恩霍夫太阳能研究所的认证，创造了钙钛矿-晶硅双结叠层电池效率新纪录。研究人员进一步探索了电池的长程稳定性，在未封装的情况下电池运行 300 小时后仍可保持 95% 的初始效率，呈现出优异的稳定性的。

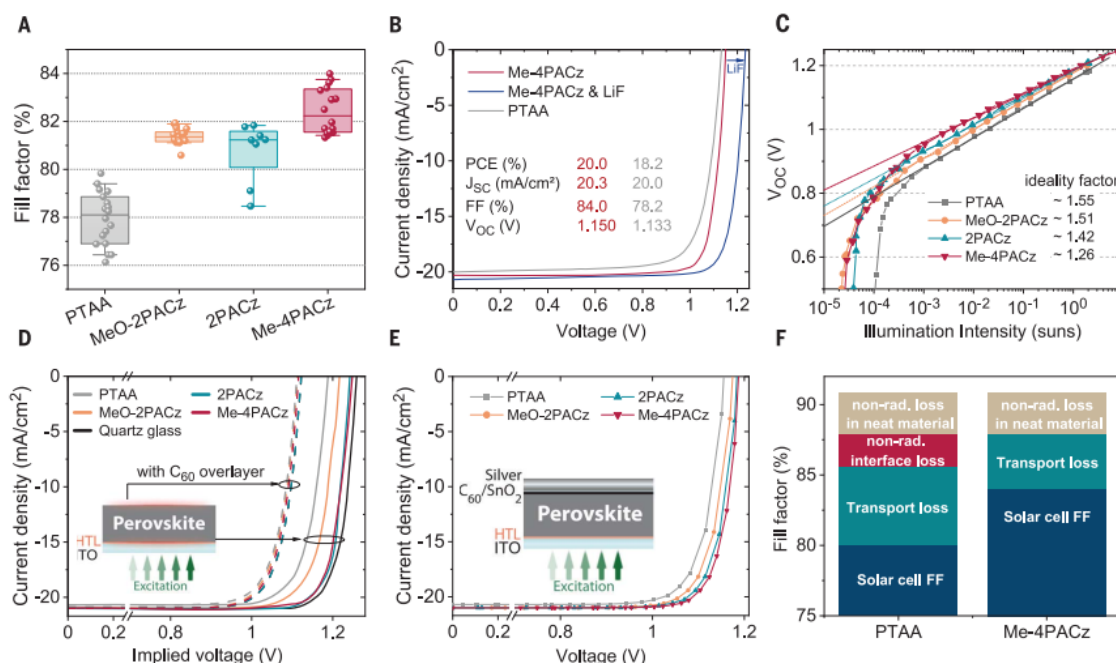


图 1 引入和未引入单分子层 Me-4PACz 钙钛矿电池电化学性能表征

该项研究精心设计制备了空穴有机分子覆盖层，有效地增强了空穴抽取效率并抑制了界面复合，增强了钙钛矿电池性能，最终与晶硅电池串联形成的叠层电池获得了创纪录转换效率，为效率突破 30% 提供了关键的技术路径。相关研究成果发表在《Science》¹⁰。

(程向阳 郭楷模)

光诱导局域表面等离子体共振开辟增强催化剂活性新策略

催化剂能够改变反应物化学反应速率，且本身的质量和化学性质在化学反应前后都没有发生改变。但由于催化剂中部分催化位点活性不足，通常情况下并非所有部分都参与了反应。因此，如果能够重新激活非活性位点，就可以进一步增强催化剂的催化活性，对于能源、医药、化工等行业意义重大。

斯坦福大学 Jennifer A. Dionn 教授课题组牵头的联合研究团队设计开发了一种金 (Au) - 钯 (Pd) 纳米杆复合催化剂反应体系，利用局域表面等离子体共振调控钯纳米杆催化剂活性位点，成功将原本无法参与反应的低活性位点转变为高活性位点，从而增强了催化活性，为设计开发高活性催化剂开辟了新的技术路径。研究人员在

¹⁰ Amran Al-Ashouri¹, Eike Köhnen¹, Bor Li, et al. Amran Al-Ashouri et al. Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with >29% efficiency by enhanced hole extraction. *Science*, 2020, 370, 1300-1309.

氮化硅 (Si_3N_4) 衬底上通过光刻方法在沉积了不同宽度 (60~90 nm) 的 Au 纳米杆 (不同宽度的等离子体共振频率不同, 也即共振峰位置不同), 随后在 Au 纳米杆上修饰一层厚度为 2 nm 的超薄二氧化硅 (SiO_2) 间隔层, 最后覆盖上 Pd 金属氢化物 (PdH_x) 纳米杆阵列, 构建出 Au-PdH_x 交叉天线反应器系统。透射电镜表征发现, 单纯的 PdH_x 纳米杆呈现出 β 相结构 β -PdH_x, 属于稳态相, 活化能高、催化活性低; 而在 Au-PdH_x 交叉天线反应器系统中, 稳态的 β -PdH_x 转变为亚稳态的 α -PdH_x, 后者属于低活化能高催化活性状态。为了探究潜在的转变机制, 研究人员利用暗场模式的环境 TEM 对 β -PdH_x 转变反应情况进行表征, 发现 Au-PdH_x 交叉天线中 α -PdH_x 相比 β -PdH_x 晶格参数降低了 2%-3%, 因此出现上述变化。进一步研究光照对催化反应的影响, 发现在 Au 等离子体共振峰处首先发生化学反应变化, 随后分别在 PdH_x 纳米杆的两端发生反应; 或者纳米杆的一端首先反应, 随后沿着一端反应直至结束, 不会在另一端产生第二个反应位点。这与无光照下, 只在纳米杆的两个尖端有催化活反应情况不同。上述结果表明, 通过光照诱导的局域表面等离子体共振能够将非催化活性位点转变为具备催化活性的反应位点。

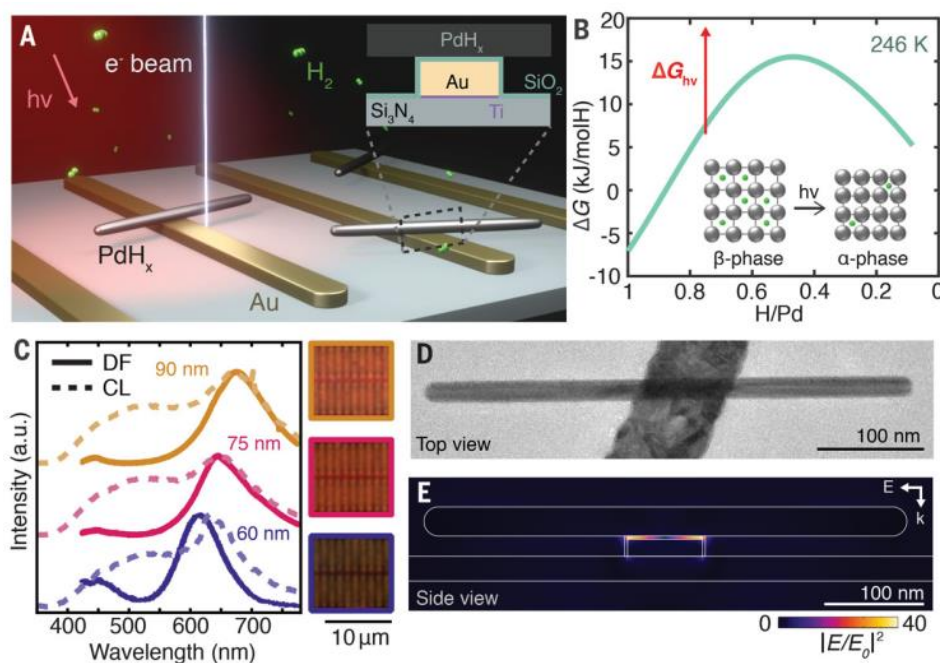


图 1 Au-PdH_x 交叉天线催化剂反应器结构示意图及其光电化学和电镜表征

该项研究构建了 Au-PdH_x 交叉天线催化剂反应器系统, 通过调控光照诱发局域表面等离子体共振成功实现将非活性位点转化为活性位点, 为设计开发高活性催化剂开辟了全新的技术路径。相关研究成果发表在《*Science*》¹¹。

(郭楷模)

¹¹ Katherine Sytwu1, Michal Vadai, Fariah Hayee, et al. Driving energetically unfavorable dehydrogenation dynamics with plasmonics. *Science*, 2021, DOI: 10.1126/science.abd2847

低碳化多能融合

德国投入 7 亿欧元支持 3 个绿氢旗舰研究项目

1 月 13 日，德国联邦教研部（BMBF）宣布投入 7 亿欧元支持 3 个绿氢旗舰项目¹²，以开发先进绿氢技术，推进德国氢能战略的实施。3 个旗舰项目的方案是从 2020 年夏季创意竞赛的 32 个方案中选取，将从 2021 年开始持续实施 4 年，预计将有 200 多个合作伙伴参与，以消除绿氢大规模部署的障碍。3 个项目详情如下：

1、H₂Giga 项目

该项目将开发大规模、高性能制氢电解槽，并实现批量生产。德国氢能战略目标是到 2030 年部署 5 吉瓦电解制氢设备，需要开发高效、耐用、可靠、可扩展的低成本电解槽。尽管目前市场上已经有大型电解槽可长时间工作，但尚未实现批量生产，因此需开发可批量生产的模块化电解槽。项目将开发质子交换膜电解槽、碱性电解槽和高温电解槽的批量生产技术，同时还将推进对阴离子交换膜电解槽的研究。

2、H₂Mare 项目

该项目将开发直接利用海上风电生产氢气及副产品（甲烷、甲醇、氨、燃料等）的解决方案，无需连接电网，以最大限度降低氢气生产成本。海上风力涡轮机发电能力高于陆上风力涡轮机，两者的平均额定容量分别为 5 兆瓦和 3.5 兆瓦。该项目将研究把电解制氢设备集成到海上风力涡轮机的方案，以直接利用海上风电制氢及副产品，最大化利用海上风电潜力，显著降低制氢成本。另外，电解装置无需与电网连接，能够降低电网负荷。同时，项目还将进一步探索利用海上风电制取的绿氢直接生产副产品，如生产甲醇、氨等，以及开发海上的“Power-to-X”（电力转换为其他能源载体）技术，还将进一步推进蒸汽电解、海水电解等新型技术。

3、TransHyDE 项目

该项目将开发并测试短、中、长距离运输氢气的解决方案，以促进建立高效氢经济。项目将评估和示范多种氢气运输技术，以确定最佳解决方案，建立经济高效的氢基础设施。德国未来的氢需求将大部分由本国生产满足，小部分采用进口方式，因此需开发相应的氢气输送方案。某些情况下，可以使用现有天然气网络和天然气存储基础设施，但在某些情况下将需要开发全新的氢运输技术。具体而言，该项目将在四个示范课题中分别测试和升级一种技术，包括：利用高压容器储运氢；液氢运输；利用现有和新的管道运输；以氨为载体的运输。

（岳芳）

¹² BMBF bringt Wasserstoff-Leitprojekte auf den Weg. <https://www.bmbf.de/de/bmbf-bringt-wasserstoff-leitprojekte-auf-den-weg-13530.html>

ARPA-E 资助 4700 万美元支持变革性能源技术研发

1 月 12 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布在“有应用潜力的领先能源技术种子孵化”（SCALEUP）主题研发计划框架下资助 4700 万美元¹³，旨在支持具有潜在颠覆性影响的变革性能源技术研发，并协助相关研发机构将其取得实验室进展、具有应用潜力的技术推向商业化。本次资助研究项目主要涉及电池、数据中心、电网现代化、减排等主题，具体内容如下：

1、用于电动飞机的下一代锂金属负极电池（承担机构：24M 技术公司；资助金额：900 万美元）

开发可用于电动飞机的下一代锂金属电池及年产能达到 1 兆瓦时的中试生产线，目标是将商业模块化生产线的电池成本降至低于 70 美元/千瓦时，功率密度超过 1.5 千瓦/千克，能量密度达到 450 瓦时/千克。

2、适用于高能效数据中心和 5G 网络的 8 英寸 3D 氮化镓（GaN）场效应晶体管制备技术（承担机构：剑桥电子公司；资助金额：432 万美元）

将已开发的一种 GaN 晶体管制备技术成果在美国一家 8 英寸硅片制造厂进行转化，并与外延晶片供应商、代工厂以及半导体芯片和模块制造商合作开发产品，以提高数据中心能效、减少温室气体排放。该项成果采用颠覆性 3D 打印方法制备晶体管，性能远超过传统技术制备的平面型 GaN 晶体管。

3、在电动汽车中加速规模化采用高容量的硅负极技术（承担机构：Sila 纳米技术公司；资助金额：1000 万美元）

开发一种硅基复合负极材料，将车用锂离子电池能量密度提高 20% 以上，并实现快速充电，并探索将上述硅负极应用于可穿戴设备、便携式电子设备和电动汽车。Sila 公司将通过更高效的材料筛选、在线诊断、改进前驱体利用率等提高开发效率，缩减开发周期，降低成本，进而降低电动汽车电池成本。

4、扩大具有成本效益的电网现代化技术（承担机构：转换资源公司；资助金额：856 万美元）

针对大型商业、工业客户以及电力公用事业单位，开发新一代配电自动化技术，该技术可经济高效地提高配电网的可靠性和弹性。该项目还将与相关合作伙伴开展技术验证试验，以消除商业化面临的潜在风险，推进新技术的市场化进程。

5、盆地规模的持续油气排放减排网络（承担机构：LongPath 科技公司；资助金额：500 万美元）

构建一个石油和天然气行业最大的连续排放监测网络，能够在美国西南部 700

¹³ DOE Announces an Additional \$47 Million in Funding for Commercial Scaling of Transformational Energy Technology Projects.
<https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/doe-announces-additional-47-million-funding-commercial-scaling>

平方英里的 Permian 盆地实时定位监测天然气排放位置及规模，目标是覆盖盆地内 850 多个石油和天然气设施，使整个盆地范围内油气生产相关甲烷排放减少 60%-80%。

6、适用于大规模储能和电动汽车的高度可扩展虚拟电厂平台（承担机构：AutoGrid 系统公司；资助金额：225 万美元）

将开发一款电网灵活性管理和虚拟电厂软件平台，使公用事业和能源服务提供商能够聚合和优化分布式能源资源，实现利用时间套利（在电力成本低的时候购买和储存能源，在成本高的时候出售或使用储存的能源）、按需收费（在高峰需求期间确定收费）管理和电网服务，以实现能源资源价值的最大化。

7、聚合物电解质制造工艺（承担机构：离子材料公司；资助金额：800 万美元）

验证聚合物电解质的三个关键要素，包括：大批量、商业化、高质量的聚合物电解质材料和组件的可制造性，高容量锂离子电池的安全性，是否达到商业规格的电池性能，以消除商业化道路上的关键技术、制造和市场风险。开发新制造工艺，将聚合物电解质生产成本降低 15%，并争取获得超大容量车用固态锂离子电池的第三方生产资质。

（郭楷模）

Science 封面文章：探索单晶富镍正极材料裂纹形成机理

高能富 Ni 材料因为其高压低成本的优势，是最常用也最具前景的正极材料之一。传统的正极材料 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ 通常利用共沉淀法制得。问题在于，这种常见的含有 Ni、Mn、Co 的多组分多晶正极材料在高压下会产生裂纹，导致表面积增加，并更容易遭受潮气影响，使副反应增加，电池循环寿命更短，从而导致电池失效。单晶富镍正极具有更少的相界，有望解决多晶正极所面临的挑战。单晶富镍正极中的超电势、微观结构和电化学反应之间存在根本的联系，但高性能单晶富镍正极的合成仍依然是一个关键难题。

美国能源部西北太平洋国家实验室 Jie Xiao 等人从原子尺度深入探索了单晶富镍正极材料裂纹形成的机理，并提出了抑制正极材料开裂的有效策略。研究人员使用尺寸为 $3\ \mu\text{m}$ 的单晶富镍正极材料 $\text{LiNi}_{0.76}\text{Mn}_{0.14}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC76) 作为模型材料，基于 AFM 和理论模型，考察富镍正极电化学反应行为和结构变化。研究发现，随着材料

充电和锂的脱除，沿（003）晶面可观察到可逆的平面滑移和微裂纹。然而，在放电时会发生可逆过程，从而使得微裂纹消失不见。研究人员认为，微观结构缺陷的可逆形成与晶格中锂原子的

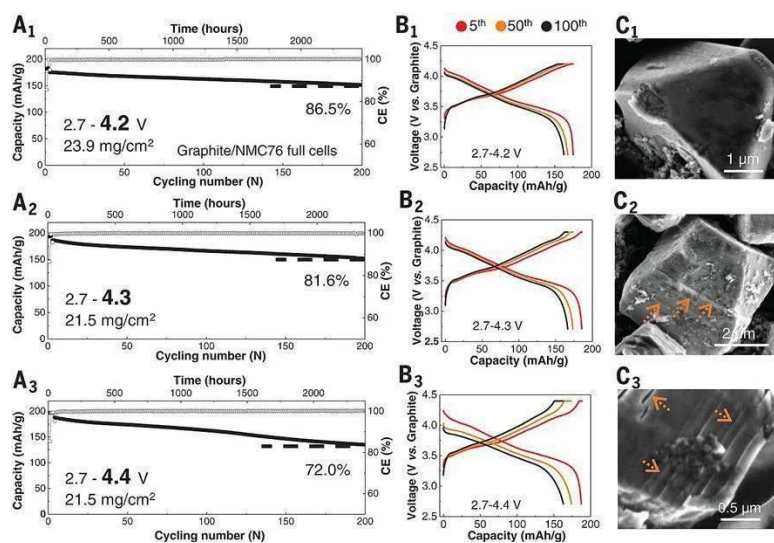


图 1 NMC76 单晶的电化学性能测试

浓度梯度引起的局部应力相关。基于以上认识，研究人员开发了扩散引起的应力模型，以了解平面滑移的起源，并提出了稳定这些富镍正极的有效方法：¹⁴

逆形成与晶格中锂原子的浓度梯度引起的局部应力相关。基于以上认识，研究人员开发了扩散引起的应力模型，以了解平面滑移的起源，并提出了稳定这些富镍正极的有效方法：

- （1）将晶体尺寸减小到 3.5 μm 以下；
- （2）通过改变结构对称性，吸收累积的应变能；
- （3）简单地优化充放电深度，而无需牺牲大量可逆容量。

这项研究探索了单晶富镍正极材料裂纹形成的机理，并提出了抑制正极材料开裂的有效策略，为提高锂电池寿命提供了新的思路。相关研究成果发表在《Science》

（汤匀）

多核铈络合物催化剂实现温和条件下 CO₂ 加氢制甲醇

二氧化碳（CO₂）加氢制甲醇一方面有助于减少二氧化碳排放，同时还能生产重要的化工原料，具有重要的环境和经济效益，因此受到科学界和工业界的广泛关注。然而由于 CO₂ 的高热力学稳定性和低反应性，使得上述反应需要在较为苛刻的条件（反应温度通常为 220℃ 以上）下才能进行。因此开发温和条件下高效催化 CO₂ 加氢制甲醇的新型催化剂是该研究领域的热点之一。

日本产业技术综合研究所 Yuichiro Himeda 教授课题组设计开发了一种多核铈络合物催化剂，能够在温和条件（反应温度在 100℃ 以下）下的气-固相反应中高效催化 CO₂ 加氢转化成甲醇，为发展甲醇经济提供了潜在的低成本技术路线。研究人员首先制备了单核、双核和多核的铈络合物催化剂，然后在传统的溶液环境、60℃ 温度下进行 CO₂ 催化加氢反应。实验结果显示，单核催化剂反应体系中没有甲醇生成，连中间产物甲酸也没有；双核催化剂反应溶液中探测到了甲酸和微量的甲醇；表明了增加催化剂的核数有利于 CO₂ 到甲醇的转化。为了增加产量，研究人员进一

¹⁴ Yujing Bi, Jinhui Tao, Yuqin Wu, et al. Reversible planar gliding and microcracking in a single-crystalline Ni-rich cathode. *Science*, 2020, 370 (6522):1313-1317.

步设计了多核铱络合物催化剂，实验结果证实了多核催化剂的确可以增加产量，但是在传统的溶液环境中产量不是很高，有甲酸副产品存在。为了避免溶液介质环境的负面影响（氢难溶于水不利于反应进行，且产物从水溶液中分离也比较困难），研究人员构建了气-固相的反应环境，在 60°C、4 MPa 氢压条件下，对不同体系的催化剂开展测试。结果显示，单核体系可以产生微量的甲醇，双核产量显著提升，到了多核体系后产物中只检测到了甲醇，表明了多核体系在低温气-固相中具有高效催化 CO₂ 加氢转化成

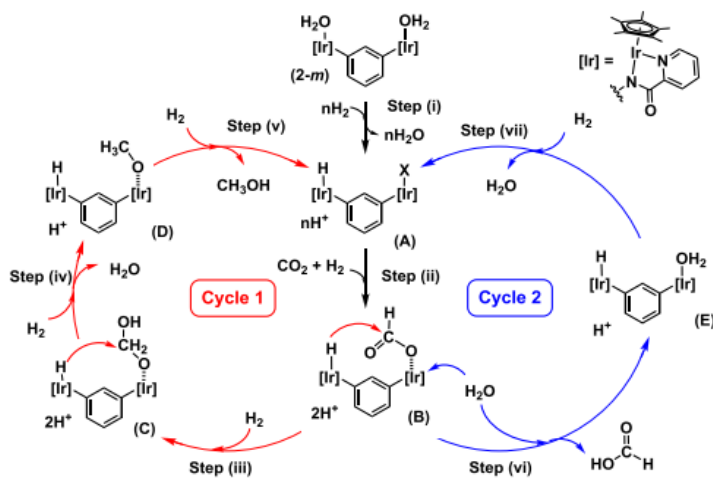


图 1 多核催化剂气-固相（左图）和液相（右图）反应环境下 CO₂ 加氢制甲醇化学反应路径

甲醇的催化活性。通过对反应中间过程的追踪研究，研究人员发现了多核体系在反应中间产生氢化物络合物，其在气-固相反应条件下能够抑制甲酸的释放，以及多核催化剂下分子内的多氢化物快速转移到 CO₂ 促进其转化为甲醇。

该项研究设计制备了多核铱络合物催化剂，并构建了与传统液相不同的气-固相的反应环境，实现了在温和条件下高效催化 CO₂ 加氢制甲醇，对发展甲醇经济提供了新的技术方案。相关研究成果发表在《*Journal of the American Chemical Society*》¹⁵。

（郭楷模）

¹⁵ Ryoichi Kanega, Naoya Onishi, Shinji Tanaka, et al. Catalytic Hydrogenation of CO₂ to Methanol Using Multinuclear Iridium Complexes in a Gas-Solid Phase Reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, DOI: 10.1021/jacs.0c11927

能源战略研究

欧盟统计局：2019 年欧盟提前一年实现可再生能源占比目标

1 月 11 日，欧盟统计局公布了欧盟可再生能源发展概况数据¹⁶，系统介绍了可再生能源在欧盟终端能源消费、电力、供热制冷和交通运输领域的应用情况。关键点如下：

1、2004-2019 年间可再生能源在欧盟终端能源消费中的占比实现了翻番

欧盟设定了 2020 年可再生能源占其终端能源消费总量 20% 的目标，并以“国家行动计划”方式将该目标分配给欧盟各成员国，旨在为每个成员国的可再生能源发展提供规范。2019 年，可再生能源在欧盟终端能源消费总量中的占比为 19.7%，基本实现欧盟设定的发展目标，较 2004 年水平（9.6%）翻了一番，主要驱动力来自欧盟的可再生能源指令（Directive 2009/28/EC）¹⁷。

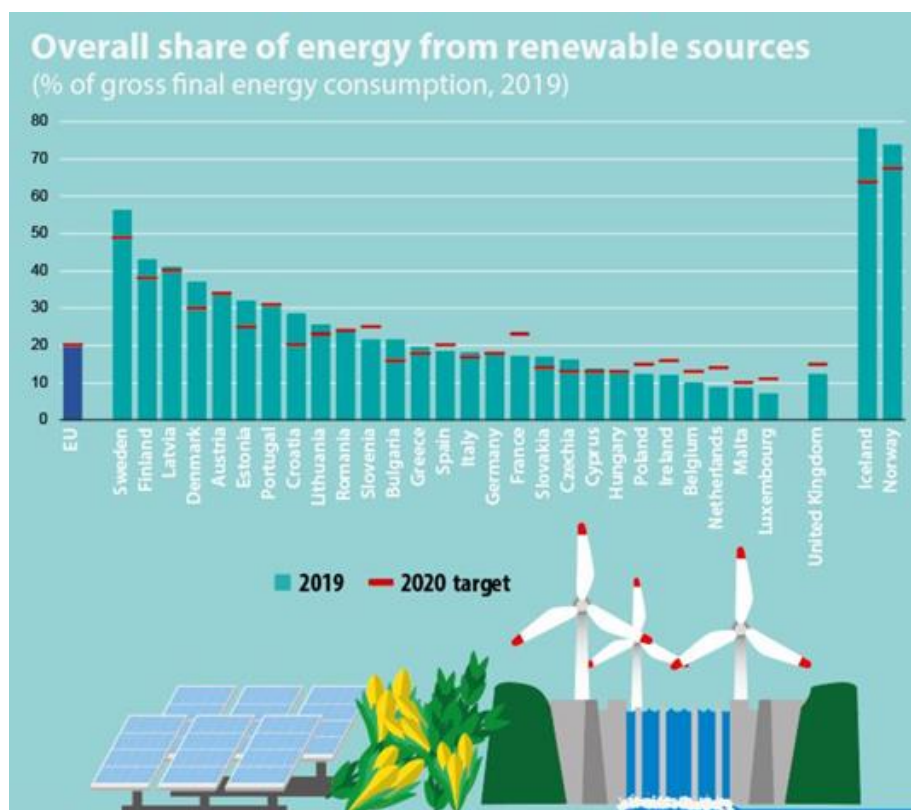


图 1 2019 年欧盟整体和各成员国终端能源消费总量中可再生能源占比情况

尽管整体发展情况较好，但各成员国的发展情况不一。2019 年，瑞典可再生能源在其终端消费总量中的占比超过一半，达到 56.4%，是欧盟成员国中占比最高的

¹⁶ Renewable energy statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics#Share_of_renewable_energy_more_than_doubled_between_2004_and_2019

¹⁷ 可再生能源指令（Directive 2009/28/EC）于 2009 年 4 月公布，要求欧盟 20% 的能源消耗来自可再生能源。

国家，紧随其后的是芬兰（43.1%）、拉脱维亚（41.0%）、丹麦（37.2%）和奥地利（33.6%）。从设定的国家目标来看，有 14 个成员国已经超过了原先设定的 2020 年发展目标；六个国家已接近目标，其中德国（17.4%）低了 0.6 个百分点；而法国（17.2%，比目标低 5.8 个百分点）、荷兰（8.8%，低 5.2 个百分点）、及爱尔兰（12%，低 4.0 个百分点）和卢森堡（7%，低 4.0 个百分点）可再生能源发展严重滞后于设定的国家目标。

2、风能和水电是可再生能源电力的主要来源，太阳能则是增长最快的电力来源

2009-2019 年间，欧盟可再生能源发电量的增长在很大程度上归因于三种可再生能源，主要是风力发电、太阳能发电和固体生物质燃料发电（包括可再生废弃物）。2019 年，可再生能源电力占到欧盟 27 国电力消费总量的 34%，较 2018 年（32%）增加了 2 个百分点。风力和水力发电占可再生能源发电总量的三分之二（各占 35%）。其余三分之一的电力来自太阳能（13%）、固体生物质燃料发电（8%）和其他可再生能源（9%）。在各种电力资源中，太阳能是增长最快的来源，2008 年其占比仅为 1%，2009 年其发电量仅为 7.4 TWh，而 2019 年已经大幅飙涨至 125.7 TWh，增长了近 16 倍。

就具体国家而言，2019 年奥地利是可再生能源电力占比最高的国家，达到了 75%，紧随其后的是瑞典（71%）、丹麦（65%）、葡萄牙（54%）和拉脱维亚（53%），上述几个国家可再生能源电力占比均超过 50%。与之形成鲜明对比的是，马耳他（8%）、塞浦路斯（10%）、卢森堡（10%）和匈牙利（10%）可再生能源电力占比均不超过 10%，属于排名垫底的几个国家。

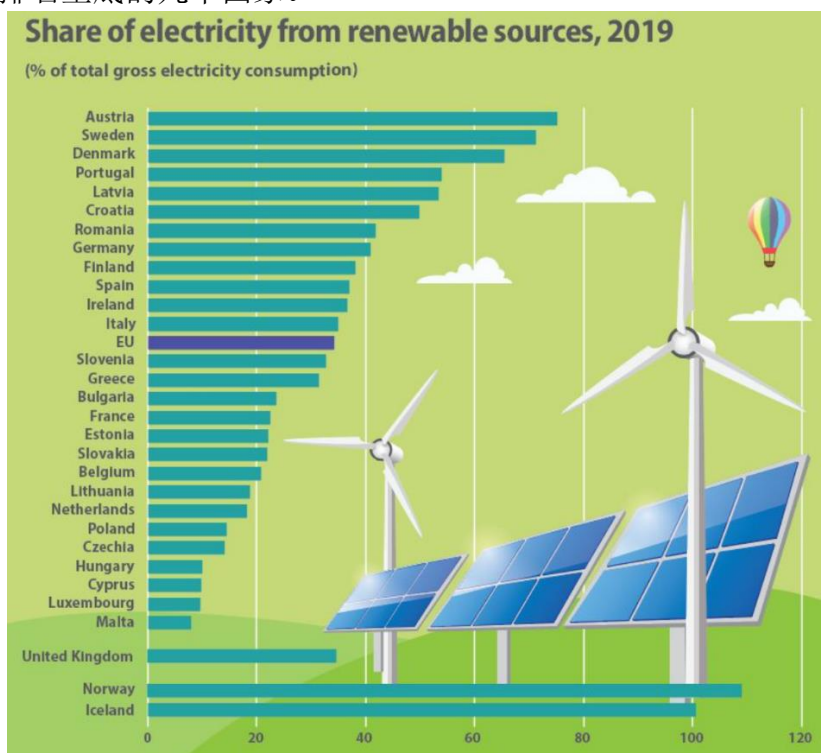


图 2 2019 年欧盟整体和成员国电力消费总量中可再生能源占比情况

3、可再生能源满足了欧盟五分之一以上的供热制冷用能需求

2019年，可再生能源占欧盟27国供热和制冷能源消费总量的22.1%，近两倍于2004年水平（11.7%）。工业、服务业和家庭供热制冷消费强劲需求推动了这一增长。在欧盟27国中，瑞典（66.1%）、拉脱维亚（57.8%）、芬兰（57.5%）和爱沙尼亚（52.3%）四个国家的可再生能源在其供热制冷中所占份额均超过50%，是可再生能源供热制冷普及程度排名前四位的国家。相反的是，爱尔兰（6.3%）、荷兰（7.1%）、比利时（8.3%）和卢森堡（8.7%）则是可再生能源供热制冷发展最慢的几个国家，可再生能源在上述四个国家的供热制冷能源消费总量中的占比均低于10%。

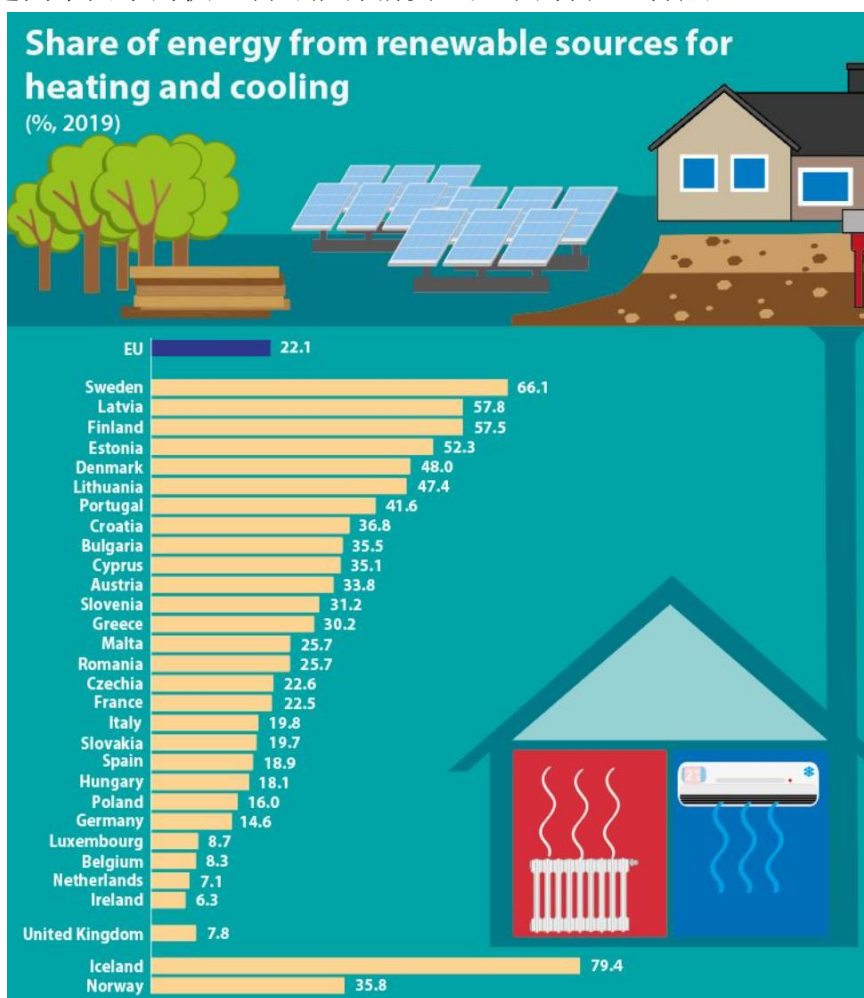


图3 2019年欧盟整体和成员国供热制冷能源消费总量中可再生能源占比情况

4、欧盟近9%的交通用能来自可再生能源

可再生能源在欧盟交通运输用能中的份额从2004年的1.6%增加到2019年的8.9%（欧盟设定的2020年目标是10%）。在27个成员国中，只有瑞典（30.3%）、芬兰（21.3%）和荷兰（12.5%）达到了欧盟设定的发展目标，其他成员国的占比均低于10%。与2018年相比，欧盟27个成员国中有22个创造增长纪录，其中芬兰（+3.6%）、克罗地亚（+3.3%）、荷兰（+2.9%）和斯洛文尼亚（+2.5%）是增幅最多的几个国家，均超过了2%，其他成员国要么低于2%增幅，要么出现下降情况。

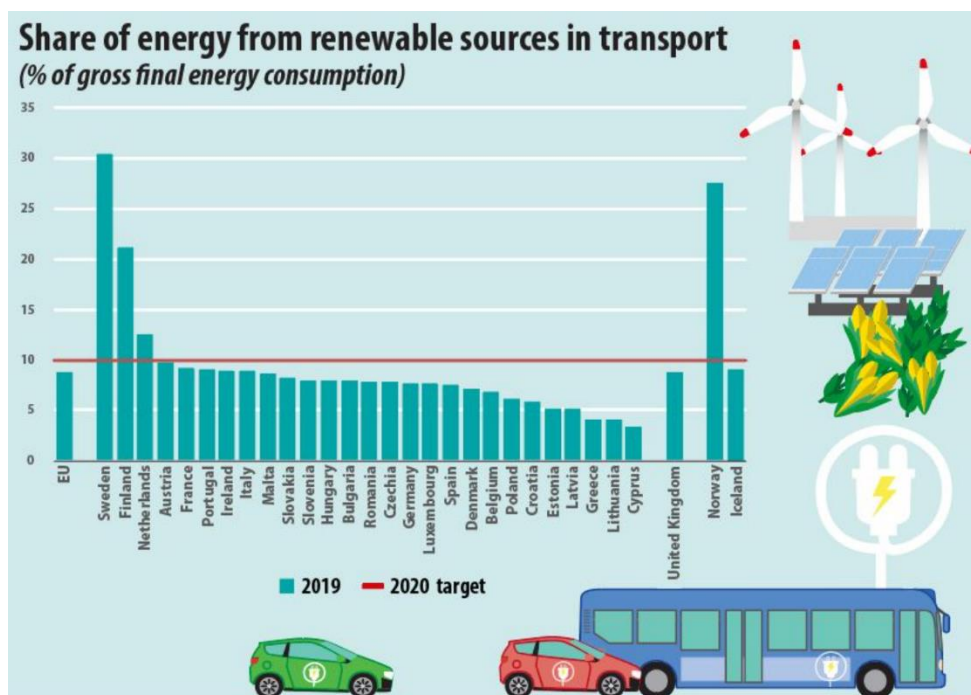


图 4 2019 年欧盟整体和成员国交通能源消费总量中可再生能源占比情况

(廖明月 郭楷模)

全球铀资源足以满足百年需求 但投资不足导致产能受限

12 月 23 日，经合组织核能署（OECD-NEA）和国际原子能机构（IAEA）联合发布了《铀资源、生产与需求 2020》报告¹⁸，对全球铀市场的基本面进行了最新分析，提供了截至 2019 年 1 月 1 日世界铀工业的统计概况。报告包含 31 个国家官方数据以及关于铀矿资源、勘探、生产和反应堆相关需求的国家报告数据，对到 2040 年核电装机容量和反应堆相关铀需求进行了预测。主要内容如下：

1、铀资源量

总体而言，全球已探明的铀资源有所增加，但增幅较小，较 2017 年已探明的资源总量仅小幅增加 1%。虽然这些增量中的一部分与新发现有关（例如加拿大新发现的铀矿资源），但大部分来自对先前探明的铀资源的重新评估。

截至 2019 年 1 月 1 日，已探明的常规铀资源（包括可靠资源和推断资源）中，开采成本低于 130 美元/kgU 资源量为 614.8 万吨，较 2017 年小幅增长 0.1%。高开采成本（低于 260 美元/kgU）的铀资源估计有 807.0 万吨，较上一版本报告增加了 1%。所有开采成本类别的可靠资源量都有所变化。其中变化最显著的是开采成本低于 80 美元/kgU 类别，与 2017 年相比下降了 2.8%；开采成本低于 40 美元/kgU 类别，较 2017 年增加了 4.4%。上述变化主要由澳大利亚、中国、纳米比亚等国的铀资源枯竭或铀资源重新评估以及加拿大和哈萨克斯坦新探明铀矿所致。相比之下，

¹⁸ Uranium 2020: Resources, Production and Demand. https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/7555_uranium_-_resources_production_and_demand_2020_web.pdf

开发成本低于 260 美元/kgU 的推断资源，从 2017 年的 317.3 万吨增加到 2019 年的 334.6 万吨，增长 5.5%，主要归因于铀资源的重新评估，其中澳大利亚、哈萨克斯坦、蒙古和尼日尔增长最为明显。

截至 2019 年 1 月 1 日，未探明的常规铀资源总量为 722.0 万吨，比上一版本报告中的 753.0 万吨减少 4%。非常规铀资源是未来潜在供应的另一个来源，目前已经超过 3900 万吨。值得注意的是，在某些情况下，包括拥有大量探明铀资源的主要生产国并没有报告未探明的铀资源估计量，或估计量已经几年没有更新。

2、铀矿勘探

自 2011 年年中以来，由于铀市场持续低迷，铀市场价格走低，导致总支出持续下降。其中，全球国内铀勘探和开采支出从 2014 年的 20 多亿美元下降到 2018 年的 5 亿美元左右，非国内铀勘探和开采支出下降至 2018 年不到 7000 万美元。2018 年报告的全球勘探和开采总支出较 2012 年下降 75%。许多国家的支出都在减少，主要是由于铀价持续低迷，这已导致多个勘探和开采项目放缓。

2016-2018 年间，全球铀勘探和开采的三年支出总额为 18 亿美元，在支出国家排行中，加拿大支出最多，随后依次是中国、印度、美国和哈萨克斯坦，其中加拿大一国的支出就超过其余四国的支出之和。

3、铀生产

2018 年，全球有 16 个国家开展了铀生产活动，总产量达 5.3 万吨。2019 年，全球铀产量小幅增长至 5.4 万吨，主要原因是澳大利亚、哈萨克斯坦和尼日尔的产量增长。受市场持续疲软影响，哈萨克斯坦铀产量于 2017 年停止增长。尽管如此，哈萨克斯坦依然是全球最大的铀生产国，2018 年其铀产量达到 2.2 万吨，超过当年排名第二、第三和第四产铀国加拿大、澳大利亚和纳米比亚总产量之和。原位浸出 (ISL，有时称为原位回收或 ISR) 生产继续主导全球铀生产，占 2018 年世界产量的 50% 以上，占 2019 年的近 57%。

总体而言，世界铀产量从 2016 年的 6.3 万吨下降到 2017 年的 6.0 万吨，下降了 4.6%，2018 年全球铀产量进一步下降至 5.3 万吨，主要归因于全球铀市场疲软抑制了包括加拿大、哈萨克斯坦和尼日尔在内的主要产铀国产量。

由于 2020 年新冠疫情的爆发和全球蔓延，全球铀产量进一步被抑制。2020 年 3 月，加拿大宣布暂停雪茄湖矿和麦卡琳湖矿的生产活动。哈萨克斯坦 4 月初也宣布将减少所有铀矿的运营活动。疫情还对其他国家如澳大利亚、纳米比亚或南非的采矿作业造成限制。8 月，其中一些限制开始放宽，一些生产商逐渐复产。但受到上述计划外减产的影响，实现 2020 年全球的铀生产目标面临严峻挑战。

4、铀需求预测

展望未来，随着全球能源需求的增加，以及清洁能源转型推进，核电装机容量

将大幅增长，从而促使铀的需求增长，但各地区的情况有所不同，预计东亚地区年度铀需求最大。

截至 2019 年 1 月 1 日，全球共有 450 个商业核反应堆并网，净装机容量为 396 GWe，每年需要消耗 5.9 万吨铀。考虑到若干国家宣布的政策变化和修订的核能发展计划，报告预计到 2040 年，在低需求量情景下世界核电装机容量将减少到 354 GWe，在高需求量情景下则增加到 626 GWe，分别较 2018 年下降 11% 和增长 58%。因此，到 2035 年世界核反应堆年度铀需求量（不包括混合氧化物燃料[MOX]）预计在 5.7-10.0 万吨之间。

不同地区的核电装机容量预测存在很大差异。东亚地区预计将经历最大的增长，到 2040 年低、高需求量情景下预计较 2018 年产能分别增加超过 24% 和 138%。预计欧洲大陆非欧盟成员国的核电装机容量也将大幅增加，到 2040 年预计将增加到 66 GWe，较 2018 年增加约 50%。其他预计经历核电装机容量显著增长的地区包括中东、中亚和南亚，预计非洲、中南美洲和东南亚地区的增长将较为温和。对于北美洲，预计到 2040 年核能发电量在低需求情景和高需求情景下都将下降，这主要取决于未来的电力需求、现有核反应堆的寿命和政府关于温室气体排放的政策。美国几个反应堆由于经济损失导致其被过早关闭。在欧盟，如果维持现有政策，到 2040 年低需求情景下核电装机容量预计下降 52%，在高需求情景下预计下降 8%。

6、供需关系

目前已探明的铀资源足以满足到 2040 年高、低需求情景下的全球铀需求，但需要及时投资将资源转化为实际产能。满足到 2040 年的高需求将消耗 2019 年成本低于 80 美元/kgU 已探明可开采资源量的约 87%。全球铀市场仍然面临挑战，供应过剩和库存量高导致持续的定价压力。铀矿开采中还存在一些其他问题，例如地缘政治因素、技术挑战以及法律及监管框架等。

截至 2019 年 1 月 1 日，世界铀产量（6.2 万吨）满足了世界反应堆需求量的约 90%，而 2017 年全球初级铀产量满足了约 95% 的需求，其余需求则是由二次铀资源提供，包括过剩的政府和商业库存、乏燃料后处理、供料不足贫铀尾矿再富集产生的铀，以及通过混合高浓缩铀（HEU）生产的低浓铀（LEU）。

在福岛第一核电站事故发生前，铀生产商对价格上涨的市场信号以及需求迅速增长的预测都会及时做出积极回应。然而，事故后铀市场价格持续走低，加上一些国家对核电发展的不确定性，一定程度上暂时降低了铀需求，导致价格进一步下跌，抑制了铀矿生产和开发活动。最近，铀现货价格在 2020 年春季出现暂时性大幅上扬（曾涨至约 88 美元/kgU），主要是新冠疫情导致铀矿停运进而导致大幅减产所致。应注意的是，由于电力公司和燃料循环生产商拥有大量库存，疫情引起的铀矿开采活动减少短期内不会造成核电反应堆运行中断。

在可预见的未来，如果按计划进行，预计原铀生产能力（包括现有、承诺、计划和前瞻性生产）将满足到 2040 年的低铀需求和部分高铀需求。满足到 2040 年高铀需求的消耗量将不到 2019 年已探明铀资源总量的 28%（开采成本低于 130 美元/kgU）。但在考虑成本较低的资源时，根据当前的市场价格，到 2040 年满足预计的高铀需求需要消耗约 87% 的成本为 80 美元/kgU 已探明资源。尽管能够满足市场的铀需求，但仍然需要大量的投资和技术才能将这些资源推向市场。

报告最后总结，全球有足够的铀资源满足长期、可持续核能低碳发电，以及工业供热和制氢等其他应用领域的需求。考虑到截至 2019 年 1 月 1 日的铀需求，已探明可开采资源，包括开采成本低于 260 美元/kgU 的可靠资源和推断资源，足以满足全球 135 年以上的需求。但需要及时足够的投资和技术创新才能将这些资源转化为可用于核燃料生产的精炼铀，促进核能部署规模的扩张。然而受到市场低迷以及新冠疫情冲击，铀矿产业可能面临着投资受限的严峻挑战，这将迫使该行业进一步优化其活动。

（汤匀 郭楷模）

伍德麦肯兹预测 2021 年全球能源十大趋势

12 月 18 日，知名咨询公司伍德麦肯兹（Wood Mackenzie）发布观点文章¹⁹，分析预测了 2021 年全球能源市场十大发展趋势。预计 2021 年全球石油需求将大幅增长，但油气上游行业仍将持续低迷；更多企业将转向低碳发展，设定减排目标；美国致密油行业可能出现轰动性的企业合并；太阳能电力购买协议价格将再创新低，跌破 13 美元/兆瓦时；全球电动汽车销量预计同比增长 74%；更多政府将入股能源转型关键资源供应链以确保供应安全；预计拜登政府将采取谨慎的气候政策。关键内容如下：

1、强劲的石油需求增长将推高油价

随着辉瑞公司的新冠疫苗于 12 月中旬在英国和美国逐步推行，疫情导致的停工停产将在 2021 年第一季度有所缓解。预计 2021 年全球石油需求将同比增加 660 万桶/天，扭转 2020 年全球石油需求减少近 1000 万桶/天的形势。<https://my.woodmac.com/document/454732> 中国 2020 年第四季度石油需求已经走强，高于 2019 年同期水平，预示着 2021 年全球石油需求量将同比大幅增长，这将缩小 2021 年下半年全球石油供需差距并支撑油价。

2、尽管油价上涨，油气上游行业将再经历一年的低迷期

预计 2021 年油气上游行业的投资水平将保持在 3000 亿美元左右。对项目的审批将越来越多地根据其环境、社会和治理资质来进行，预计 2021 年将批准 20 个左

¹⁹ Ten predictions for energy in 2021. <https://www.woodmac.com/news/opinion/ten-predictions-for-energy-in-2021/>

右大型项目（2020 年仅有 10 来个），但这也仅达到新冠疫情爆发前的一半。油气项目将向低碳、低成本发展。

3、油气企业将加速向低碳能源多样化发展

欧洲主要油气企业已经提出零碳增长的愿景，预计 2021 年将继续通过投资低碳技术，为净零排放转型奠定基础。美国政府换届、第 26 届联合国气候变化大会（COP26）以及利益相关方意愿的不断变化，都将为其他国际石油企业和国有石油公司带来更大压力。

4、更多企业将设定减排目标

有迹象表明，投资者应对气候变化的压力正在加大。2020 年 12 月，管理着 9 万亿美元资金的 30 名基金经理承诺将努力实现其投资组合到 2050 年实现净零排放，同时还承诺将设定 2030 年的中期目标，与将全球温升控制在 1.5℃ 的趋势保持一致。2021 年年初，欧盟和英国监管机构将开始推动上市公司采纳气候相关财务信息披露工作组的建议，讨论其碳排放和气候风险。来自投资者和监管部门的共同压力将促使更多企业做出减排承诺，更多怀有长远志向的公司将会制定中期减排目标。

5、美国致密油行业将达成轰动性的企业合并

大规模整合所需的一切都已准备就绪。财务实力雄厚的企业可以利用其资金成本优势，而明智的合并交易可以降低维护资本，多样化合并将快速缓解致密油企业面临的风险。因此，预计 2021 年将达成一场巨额交易，给整个致密油市场带来冲击。如果原油市场不出现大的波动，将有两家大型企业合并。最近的一些交易文件显示，甚至有可能出现三家大企业的合并，预计 2021 年将有一家（或三家）知名企业退出市场。

6、太阳能电力购买协议价格将再创新低，跌破 13 美元/兆瓦时，且此次新低将不会出现在中东

太阳能电力购买协议价（PPA）通常每几个月出现一次暴跌，而在电力购买协议的 5 次最低价合同中，就有 4 次出现在中东。中东拥有廉价太阳能的有利条件：低资本成本、有承购保证、供应商权益以及充足的光照。阿拉伯联合酋长国创下了世界最低的太阳能 PPA 价格（13.5 美元/兆瓦时）。西班牙和智利将分别在 1 月和 5 月举办可再生能源拍卖活动，两国都具有完善的批发市场，可以吸引开发商积极投标，并保证批发商在 PPA 交易后的盈利。资产所有者将变得越来越老练，当太阳能成本下降且资产预期寿命增加时可能放弃完全签约的收益，转而接受部分或全部商业风险。

7、全球电动汽车销量将接近 400 万辆，较 2020 年增长 74%

为了缓解新冠疫情造成的经济影响，许多国家的刺激计划包括了增加对电动汽车的支持，2020 年通过的措施有望在 2021 年见效。中国将原定于 2020 年到期的补

贴政策延长至 2022 年，一些欧盟国家增加了电动汽车补贴，美国新一任政府已承诺支持电动汽车产业，并且有望重新支持加利福尼亚州更严格的燃油经济性和汽车排放标准，这将有助于促进电动汽车的销售。这些趋势都预示了 2021 年电动汽车销量将迎来大幅增长，但其销量仍将仅占全球汽车总销量的 5% 左右。

8、更多政府将向能源转型关键供应链进行投资

拜登入主白宫后，全球所有最大经济体都将制定未来 30 或 40 年内实现温室气体净零排放的目标，低碳能源供应链将比以往更具战略意义。对于部分资源，包括锂、镍、钴等有时被称为“能源转型金属”的资源，政府将采取措施保障供应安全。这些举措有可能包括入股关键资产，以及为私营部门提供财务保证，在拥有基础资源但迄今尚未投资的国家进行投资。

9、中国禁止从澳大利亚进口煤炭的禁令将持续一整年

虽然从澳大利亚进口煤炭无疑会给中国买家带来极大便利，但是如果他们愿意支付更高的价格，也有许多其他资源可供选择。国际供应链可以重新调整以继续满足中国的煤炭需求。2020 年中国煤炭价格大幅上涨，表明中国政府愿意为其进口来源的转变提供资金支持。

10、拜登政府将在气候政策上小心谨慎

拜登赢得了美国大选，他承诺将立即采取行动应对气候变化，但美国的政治和经济现状将限制他的行动速度，参议院的构成将阻止任何激进的气候法规通过。至少在初期，脆弱的经济现状将延迟出台那些可能会导致失业的措施，例如对油气行业的压制。而拜登政府也将采取一些重要的象征性举措，其中包括让美国重返《巴黎气候协定》，以及制定最迟在 2050 年实现美国净零排放的目标。就具体政策而言，预计政府将更多地使用“胡萝卜政策”，例如采取措施放开对海上风电投资的限制，而非使用“大棒政策”。

（岳芳）



《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