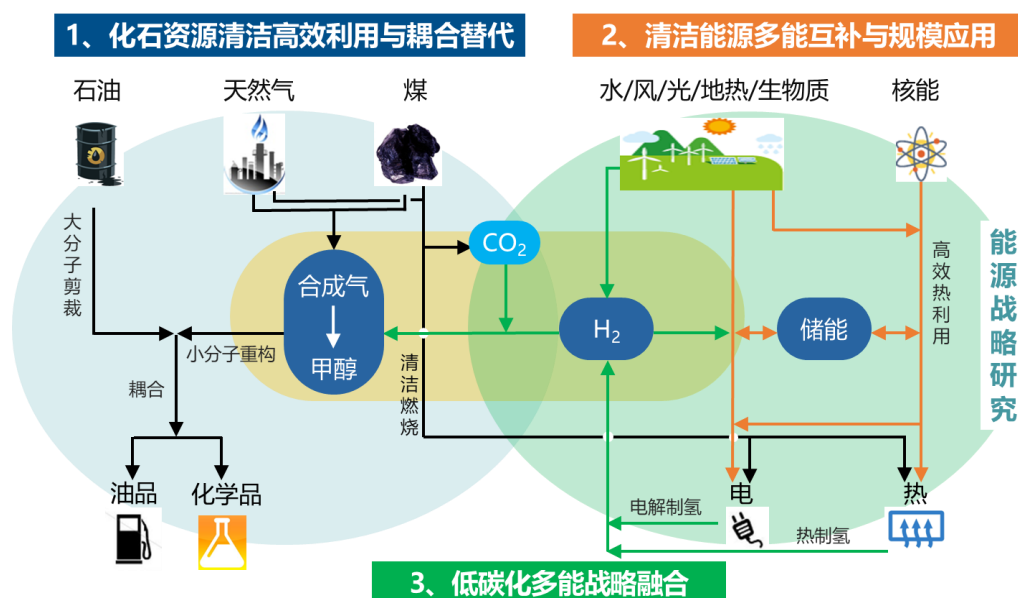




# 洁净能源科技动态监测快报

2022 年第 04 期（总第 30 期）



## 本期看点

- IEA：低排放煤炭技术将对亚洲净零转型起关键作用
- 美国能源部首次发布清洁能源供应链安全保障战略
- 美 ARPA-E 资助 1.75 亿美元资助变革性清洁能源技术研发
- 日本 NEDO 发布重型车辆燃料电池技术开发路线图
- 美国科学院《化学工程新方向》报告探讨能源脱碳关键技术
- IEA 发布《追踪清洁能源创新：聚焦中国》报告

# 目 录

2022 年第 04 期 (总第 30 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

- IEA: 低排放煤炭技术将对亚洲净零转型起关键作用 ..... 2
- 美国能源部资助开发煤炭废料转化建筑材料技术 ..... 6
- 水泥厂协同燃煤电厂的余热回收新设计 ..... 7
- LaNiO<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub> 双功能材料实现 CO<sub>2</sub> 稳定捕集和原位氢化 ..... 8

## ◆ 清洁能源多能互补

- 美国能源部首次发布清洁能源供应链安全保障战略 ..... 10
- 美国能源部地热能开发多年期计划提出未来五年发展路线 ..... 13
- 美 ARPA-E 资助 1.75 亿美元资助变革性清洁能源技术研发 ..... 15
- DOE 资助 3600 万美元研发核废料安全处置技术 ..... 20
- 协同化学工艺助力锡基钙钛矿太阳能电池获得创纪录稳定性 ..... 21
- 3D 打印微柱阵列生物电极首次实现半人工光合成 ..... 22

## ◆ 低碳化多能融合

- 日本 NEDO 发布重型车辆燃料电池技术开发路线图 ..... 25
- 澳大利亚启动德澳氢能联合资助项目首轮招标 ..... 27
- 英国资助新型长时储能技术 ..... 27
- 杂配金纳米团簇实现 CO<sub>2</sub> 高效电催化还原 ..... 28
- 研究首次提出短路将导致固态电池出现显著安全风险 ..... 30

## ◆ 能源战略研究

- 美国国家科学院《化学工程新方向》报告探讨能源脱碳技术 ..... 32
- IEA: 2021 年全球能源相关 CO<sub>2</sub> 排放强劲反弹创历史新高 ..... 39
- IEA 发布《追踪清洁能源创新: 聚焦中国》报告 ..... 45

## 本期概要

国际能源署（IEA）煤炭工业咨询委员会（CIAB）工作组发布《亚洲净零未来进程中低排放煤炭技术的作用》报告：提出支持先进低排放煤炭技术创新以应对亚洲减排挑战。报告认为，对亚洲大部分地区而言，煤炭依然是主要的能源选择，在未来几十年逐步淘汰煤炭的可行性较低，先进煤炭技术将在亚洲实现净零排放进程中发挥不可或缺的作用。

美国能源部（DOE）发布《美国实现清洁能源转型的供应链保障战略》，对 11 项能源关键技术供应链和 2 项交叉主题进行了评估，提出了针对性的一系列战略性建议，包括：（1）DOE 和联邦机构间的跨领域政策行动建议，涉及增加国内原材料供应、扩大国内制造能力、增加清洁能源的使用和部署等；（2）面向技术的政策行动建议，涵盖能源基础设施、电力市场和制造和创新等；（3）跨领域国会行动建议，包括颁布相关法律提供税收激励措施、建立区域和州级部门合作关系和注册学徒计划和制定完善的政策，建设基础设施等。

美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布资助 1.75 亿美元支持国家实验室、高校和企业协同开展具有潜在颠覆性影响的变革性清洁能源技术研发，主要聚焦十三个主题领域，包括：建筑能效；分布式能源；电力电子器件和设备效率提升；发电技术；电力电网；制造业节能技术；碳捕集技术；储能技术；交通运输能量转换技术；能源生产和脱碳技术；交通运输网络；交通运输储能技术；交通工具新材料等。

日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）发布《重型车辆燃料电池技术开发路线图》，提出了技术开发重点和技术、经济指标，以实现到 2030 年燃料电池重型车辆的普及。涉及如下领域：（1）燃料电池膜电极（MEA）；（2）电解质材料；（3）电极催化剂；（4）隔板、气体扩散层（GDL）、密封结构等；（5）实用技术/配套设备；（6）基础技术。

美国国家科学院、工程院和医学院联合发布《化学工程新方向》报告，呼吁对美国化学工程相关科研和产业活动进行新的投资，并开展必要的跨学科、跨部门合作，以推进实现碳中和转型的社会目标，确保可持续生产和使用食品和水，开发先进的医疗技术和工程解决方案以实现健康公平，减少制造业的浪费和污染。报告中专章探讨了能源系统低碳转型关键技术面临的挑战和机遇：包括开发新的低碳或零碳能源技术，推进光化学领域的发展，尽量减少能源系统相关用水量，开发具有成本效益且安全的碳捕集、利用和封存技术，实现向低碳能源系统转型

国际能源署（IEA）发布《追踪清洁能源创新：聚焦中国》报告，深入解析中国清洁能源创新的制度和政策现状：过去 20 年中国能源创新在国际舞台发挥了重要作用，在能源领域的知识产出数量和质量双增长，已成为全球能源领域专利申请的关键参与者，能源科技创新人、财、物投入不断加大，在太阳能光伏、风力涡轮机、电动汽车等行业已成为全球关键的技术开发和制造国。未来，清洁能源创新是中国“十四五”的核心政策之一，也将在中国实现 2030 年碳达峰、2060 年碳中和进程中发挥关键作用。

# 化石资源清洁高效利用

## IEA：低排放煤炭技术将对亚洲净零转型起关键作用

2月7日，国际能源署（IEA）煤炭工业咨询委员会（CIAB）工作组发布《亚洲净零未来进程中低排放煤炭技术的作用》报告<sup>1</sup>，提出支持先进低排放煤炭技术创新以应对亚洲减排挑战。报告认为，对亚洲大部分地区而言，煤炭依然是主要的能源选择，在未来几十年逐步淘汰煤炭的可行性较低，先进煤炭技术将在亚洲实现净零排放进程中发挥不可或缺的作用。报告关键点如下：

### 1、经济不断增长的亚洲地区需加速部署低排放煤炭技术

研究普遍认为，实现净零排放意味着不再使用煤炭。许多发达国家已经承诺逐步淘汰煤炭，但这些国家属于高收入经济体，经济增长缓慢，且以服务业为基础，人口稳定，且有核电、相对便宜的天然气和可再生能源等多种选择。然而，由于成本相对低廉且易于获得，煤炭仍是亚洲大部分地区的主要能源。由于亚洲国家经济和人口快速增长，城市化进程不断加快，意味着能源和电力需求持续增长。城市化和工业化也增加了对基础设施的需求，钢铁和水泥需求随之增长，这些行业很大程度上依赖于煤炭。因此，对于不断增长的亚洲经济体而言，淘汰煤炭要比欧洲或北美发达国家困难得多。亚洲拥有庞大且运行年限较短的煤炭机组（机组平均使用年限为13-14年），为该地区提供了57%的电力。这意味着需要加速部署低排放煤炭技术，以助力世界在2050年实现净零排放目标。

### 2、碳捕集、利用与封存技术至关重要

碳捕集、利用与封存（CCUS）是亚洲实现净零排放转型的必要战略技术。未来数年内，煤炭和天然气仍对电力和难以减排的钢铁、水泥等现有行业十分重要，同时，CCUS对生物能源、氢、氨、二甲醚等新兴产业也有重要影响。CCUS是推进上述行业减排的重要技术，目前已具备商业推广的潜力，需扩大在亚洲范围内的部署，以确保实现《巴黎协定》目标。目前，全球有30家大型CCUS设施在运营，每年可封存约4000万吨CO<sub>2</sub>，且设施可靠性和可用性不断提高。当前CCUS成本也已显著下降，碳捕集成本约为65美元/吨，通过实践其成本可进一步降低，随着该技术的商业化推广，可能会下降50%-75%。预计到2024-2028年，碳捕集成本将达到43-45美元/吨，如图1所示。亚洲，特别是中国，应该成为CCUS商业推广的重点地区。目前中国燃煤电厂应用碳捕集的典型案例是锦界电厂，已投运捕集能力15万吨/年的

<sup>1</sup> The role of low emission coal technologies in a net zero Asian future. <https://www.sustainable-carbon.org/report/the-role-of-low-emission-coal-technologies-in-a-net-zero-asian-future/>

碳捕集装置。其他项目有：华能陇东 2 吉瓦超超临界电厂，碳捕集能力为 150 万吨/年，计划于 2023 年底完工；华能绿色煤电计划（GreenGen）整体煤气化联合循环（IGCC）第三阶段将在 2025 年之前实现 100-200 万吨/年的捕集能力。

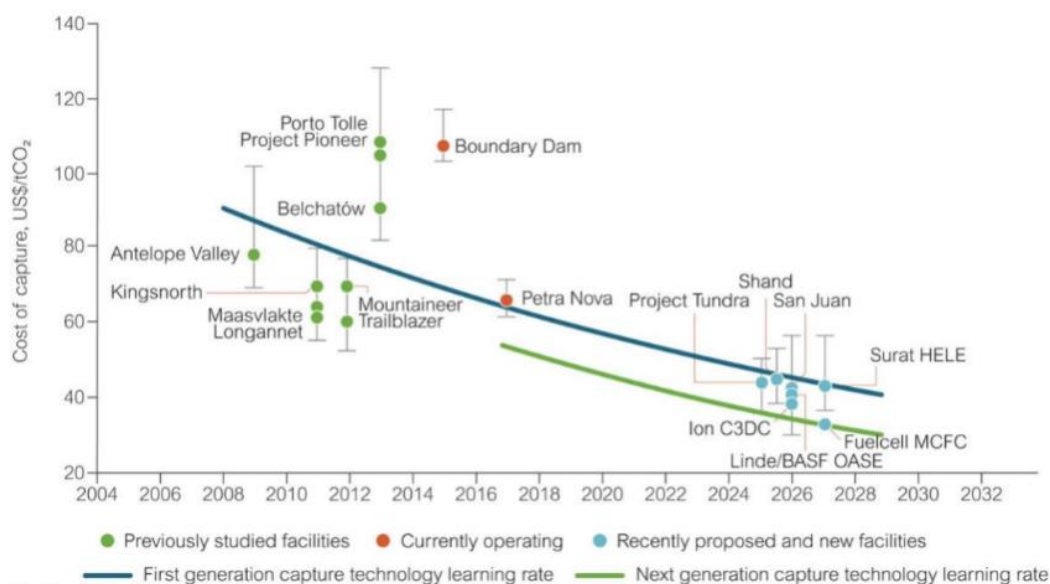


图 1 配备燃烧后碳捕集技术的大型燃煤电厂碳捕集成本下降曲线

### 3、高效低排放燃煤电厂是有效的减排措施

亚洲电力部门碳排放量超过 80 亿吨/年，几乎占该地区碳排放总量的一半。小型、低效的燃煤电厂应该关闭。提高发电厂效率可以显著减少二氧化碳和其他污染物的排放。目前，全球燃煤电厂平均低热值效率为 37.5%，而最先进的超超临界燃煤发电效率已达到 47%，CO<sub>2</sub> 排放强度相当于约 720 克 CO<sub>2</sub>/千瓦时。效率每提高一个百分点，碳排放量就减少 2%-3%，而且高效低排放电厂更适合部署 CCUS 设施。因此，所有新建大型燃煤机组都应该采用高效低排放超超临界工况和最佳的污染物控制手段，而从长远来看，所有燃煤机组都需要采用 CCUS 来减轻污染。

基于 IGCC 的几种替代高效技术还具有其他益处，如燃料灵活性、生产高价值产品以及与碳捕集的良好兼容性。将燃料电池技术，特别是固体氧化物燃料电池和熔融碳酸盐燃料电池集成到 IGCC 燃煤电厂中，有可能进一步提高效率。长期来看，这些电厂有可能将效率提升到 60%（低热值）。虽然效率较低的亚临界燃煤机组将逐步被淘汰和替换，但对于大于 240 吉瓦的机组，必须考虑多种选择。例如，现有的升级改造技术可将效率提高 5 个百分点，还可转化为生物质共燃、热电联产机组，或转变为高度灵活的电厂。CCUS 仍然是燃煤电厂低排放的关键技术。目前，大多数大型 CCUS 应用于发电以外的部门。而亚洲要实现净零排放目标，就必须推动燃煤发电领域 CCUS 技术的应用。超临界 CO<sub>2</sub> 循环具有巨大潜力，如 Allam-Fetvedt 循环<sup>2</sup>，可以提供先进的发电系统，以更低成本实现更高发电效率，并接近完全碳捕集。

<sup>2</sup> Allam-Fetvedt 循环是一种布雷顿循环技术，曾入选《麻省理工科技评论》2018 年“全球十大突破性技术”。该

一些小型的低温超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环发电系统已开始商业应用。

#### 4、与低碳燃料共燃可以减少燃煤电厂排放量

亚洲要实现净零排放目标，关键在于到 2030 年乃至以后持续推进先进低排放技术。生物质、氨和其他产品与煤炭共燃可以帮助实现 2030 年排放目标，并联合 CCUS 技术提供长期净零排放解决方案。将煤炭与农林业废料以及低排放的氢和氨进行共燃，可以减少发电厂的温室气体排放，并有助于以低成本实现发电厂净零排放。例如，通过碳捕集减少 90% 排放、通过共燃减少 10%。亚洲正推动煤炭与低碳燃料的共燃，中国、日本和印度尼西亚都出台具体政策支持生物质共燃。一些亚洲国家拥有良好的农林和废物资源，生物质共燃减排潜力较大，也可以改善当地的空气质量。

氨具有几个理想的特性，可以成为一种有效低成本的氢气储运载体。同时，氨燃烧不排放二氧化碳，在减少温室气体排放方面有很大优势。此外，如果实现适当的安全标准、成功示范和优势成本，氨可以作为过渡燃料使用，如用于发电。日本正在探索使用低排放混氨燃烧发电，其中氨由配备 CCUS 设施的化石燃料制备或电解生产。目前，日本计划构建全球供应链，以提供低排放氨。

#### 5、利用煤炭支持更多可再生能源电力并网

随着波动性可再生能源在亚洲地区电网所占比例的提高，可调度的燃煤电力在整个电网的需求响应中起着重要作用。当风、光资源不足时，燃煤电厂可以增加发电量，以维持稳定的电力供应。波动性可再生能源装机容量增加降低了燃煤电厂容量，但并不一定意味着关闭燃煤电厂。燃煤电厂并不与波动性可再生能源竞争，相反通过维持稳定的电网，能够提高波动性可再生能源的占比。

未来几十年，煤炭发电仍将在亚洲地区发挥重要作用。即使波动性可再生能源占比高达 50%-70%，燃煤发电仍将是确保供应安全的关键。考虑到这些电厂仅平均服役了 13-14 年，利用燃煤电厂提供辅助服务和系统灵活性，是支持风能和太阳能等波动性可再生能源占比增加的最佳选择。

然而，尽管电力部门转型的投资和政策聚焦于波动性可再生能源，但低效的燃煤电厂仍在继续运营，而不是被替代为配有 CCUS 设施的高效低排放电厂，国际金融和技术供应商退出煤炭行业更加剧了这种现象。因此，虽然煤炭仍是亚洲电网的基础，仍应通过适当评估可调度容量、增加电网可靠性、继续支持研发和国际合作，推进向高效低排放技术快速转型。

#### 6、煤炭在亚洲工业部门扮演着重要而难以替代的角色

工业对于亚洲可持续经济发展和繁荣至关重要。工业部门每年直接排放约 80 亿吨 CO<sub>2</sub>，70% 来自水泥、钢铁和化工行业。亚太地区约占 2/3，每年约为 56 亿吨 CO<sub>2</sub>。如果加上间接排放，工业部门碳排放约占全球碳排放的 40%。

---

技术采用富氧燃烧，并将超临界 CO<sub>2</sub> 作为工作流体，能够回收废热并消除传统污染物和 CO<sub>2</sub> 排放。

鉴于目前可用的替代能源有限，水泥、钢铁和铝等行业在未来几年将继续依赖煤炭和天然气，这些难减排行业的碳排放约占亚洲工业部门的 40%。其中，约 20 亿吨 CO<sub>2</sub> 为工业生产过程中化学反应的副产品，且无法避免。在人口和经济增长的推动下，对工业产品的需求预计将继续增长。目前正在探索各种技术解决方案，并有可能大幅削减工业部门排放量，但开发和部署将需要一段时间。此外，这些行业的典型特征为年轻资产。因此，如果这些行业要实现净零排放转型，CCUS 技术必须发挥关键作用。

工业部门要实现净零排放目标，将需要一系列的方法，包括：①部署先进技术，包括 CCUS；②燃料替代，转向具有成本竞争力的氢、生物质能和电力；③提高能源效率，增加废钢和铝的使用。而在向净零排放转型的进程中，煤炭将继续发挥关键作用，CCUS 改造对工业脱碳至关重要。

中国将在减少工业排放方面发挥关键作用，水泥、钢铁和铝产量占全球总产量的 50%-60%，而煤炭是这些行业的主要原料和供热来源。目前，中国 70% 的钢铁、83% 的水泥和 75% 的铝生产由煤炭提供原料和能源，如图 2 所示。

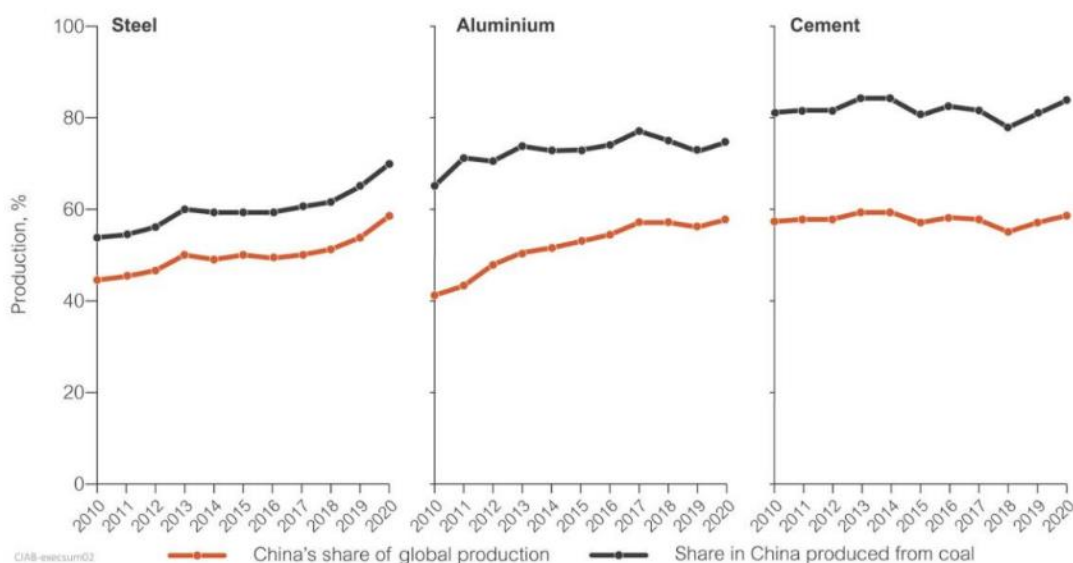


图 2 中国钢铁、铝和水泥生产中煤炭作为原料和能源的比例

## 7、不断增长的化工行业依赖煤炭

化工行业每年排放量达到 11 亿吨 CO<sub>2</sub>，仅次于钢铁和水泥，其中超过 30% 的碳排放与生产过程有关。对于利用煤炭生产化学品和燃料工艺而言，煤气化为亚洲地区提供最好的生产流程，且在中国也有良好的实践。化学和燃料行业正快速增长，并可能在转型过程中扩大规模。甲醇作为中间产物，在替代天然气、煤制油和煤制焦油、深加工以及褐煤提质等方面的应用将快速增长。工艺流程优化可以提高转换效率，但必须采用 CCUS 技术以确保迈向净零排放。

## 8、低碳排放氢的作用越来越重要

氢是一种用途广泛的燃料，在所有领域都将发挥重要作用。到 2050 年，全球氢需求可能达到 6.5 亿吨/年，较 2018 年增加 560%，约占预计能源需求总量的 14%。氢将主要用于工业原料、能源供应、交通运输、建筑供热和电力。

制氢的首选方法取决于各国实际情况。一般来说，采用 CCUS 结合煤气化或天然气生产低碳氢的成本比电解水要低，这意味着 CCUS 结合煤气化技术将成为亚洲低成本大规模制氢来源。而可再生能源成本相对较低的地区，利用大量风能或太阳能电力电解制氢，将成为煤炭或天然气制氢的竞争对手。

CCUS 结合煤气化可以使制氢碳强度降低到 0.4-0.6 千克 CO<sub>2</sub>/千克 H<sub>2</sub>，碳捕集率可达 98%。将生物质或氨与煤共燃，提高捕集率，或使用 Allam-Fetvedt 循环等先进技术，都可以将 CO<sub>2</sub> 排放量降低到近零水平。

### 9、亚洲实现净零排放面临挑战

亚洲地区在全球 GDP、能源消费和碳排放中占有较大份额，其发展趋势正影响全球能源格局。尽管工业和制造业仍是亚洲 GDP 的重要组成，但服务业已成为主要组成部分。整个亚洲的工业化和经济财富分布不均衡。经济发展可能会增加除经合组织亚洲国家和中国以外经济体的能源消耗。随着基础设施的不断完善，电力供应得到改善，对现代电网电力的需求将增加。

实现净零排放目标将需要提高亚洲的波动性可再生能源比例，并减少传统化石燃料相关排放。未来一段时间内，亚洲仍将继续使用煤炭，其原因包括能源供应安全、电网稳定、工业原料等。因此，目前依赖煤炭的亚洲国家需要开发利用电力以及钢铁、水泥和铝等基础工业、化学工业的低排放技术，以及有助于发电、工业、建筑和交通脱碳的氢能技术。

CCUS、高效率低排放发电、生物质和废物与煤共燃将是关键技术，帮助亚洲大部分地区在保持经济增长的同时接近净零排放目标。现有的低排放技术和其他接近商业化的技术对亚洲实现净零排放至关重要。因此，投资先进煤炭技术是实现净零排放和《巴黎协定》预期目标的重要组成部分。

(刘俊 李岚春 岳芳)

## 美国能源部资助开发煤炭废料转化建筑材料技术

3月18日，美国能源部（DOE）化石能源和碳管理办公室（FECM）宣布在“含碳矿石加工计划”框架下，投入 220 万美元支持一个将煤炭废料转化为高强度建筑材料项目<sup>3</sup>，旨在开发新型碳基转化技术以开辟煤炭利用新用途。

此次选定项目由 X-MAT Carbon Core Composites 公司承担，将建造一个原型结

<sup>3</sup> DOE Invests \$2.2 Million to Develop High-Strength Building Materials, Providing New, Clean Uses for Coal Waste. <https://www.energy.gov/fecm/articles/doe-invests-22-million-develop-high-strength-building-materials-providing-new-clean>



构以测试煤基建筑材料，包括屋顶瓦片、壁板、砖块和砌块。该项目将进行碳基建筑的详细设计，并更新技术经济性分析，以提高技术成熟度向示范阶段发展。

（岳芳）

## 水泥厂协同燃煤电厂的余热回收新设计

在工业过程中，大部分输入能量作为废热损失，进行废热回收具有重要意义。水泥生产是能源密集型工业过程之一，回转水泥窑产生的废气整体热损失占总能量输入的 30% 以上。近年来，针对水泥厂的余热回收开发、评估和优化已经提出了几种解决方案。然而，很少有研究提出将水泥厂的余热回收系统（WHRS）与其他高效热力系统（尤其是燃煤电厂）相结合探究其益处。

华北电力大学 Gang Xu 教授团队将干法水泥厂的 WHRS 与超临界燃煤电厂相结合，开发出一种与燃煤电厂高度集成的新型 WHRS，将水泥厂的废热用于燃煤电厂蒸汽循环，显著提高了发电效率和净热效率。该设计回收水泥厂旋风预热器废气和熟料冷却器排放空气中的热能，用于部分加热燃煤电厂的给水，可以节省一些用于给水加热的抽汽，该部分抽汽可以继续驱动汽轮机发电（被视为 WHRS 的功率输出）。因此，从水泥窑尾气中捕获的热能被送入燃煤电厂的蒸汽循环，获得了更多的净功率，具有更高的余热利用效率。此外，集成后不需要传统水泥厂的 WHRS 组件，从而降低了 WHRS 的资本和运营成本。另外，一旦水泥窑的负荷变低，WHRS 产生的净功率减少，而燃煤电厂效率可以继续保持相对较高。即使在水泥厂停产的情况下，燃煤电厂也可以无需 WHRS 继续工作。研究人员基于 5000 吨/天的水泥厂和 350 MW 燃煤电厂进行了能源分析、焓分析和经济分析，比较了新型 WHRS 与传统 WHRS 的性能。结果表明，新型 WHRS 的发电效率和净热效率分别提高了 18.11% 和 8.11%，燃煤电厂汽轮机的功输出增加了 16.31 MW，总发电量增加了 7.15 MW。当假设燃煤电厂的总焓损失为常数时，新型 WHRS 的总焓损失减少了 6.75 MW。因此，净总焓输出（电）增加了 6.75 MW，新型 WHRS 的发电焓效率和系统焓效率分别显著提高了 38.91% 和 28.90%。当采用一体化设计时，新型 WHRS 的总资金成本减少 813.1 万美元，年收入增加 411.8 万美元。新型 WHRS 的动态投资回收期减少了 2.03 年，净现值增加了 4171.5 万美元。结果表明，从热力学和经济学的角度来看，这种新颖的设计都是有利的。

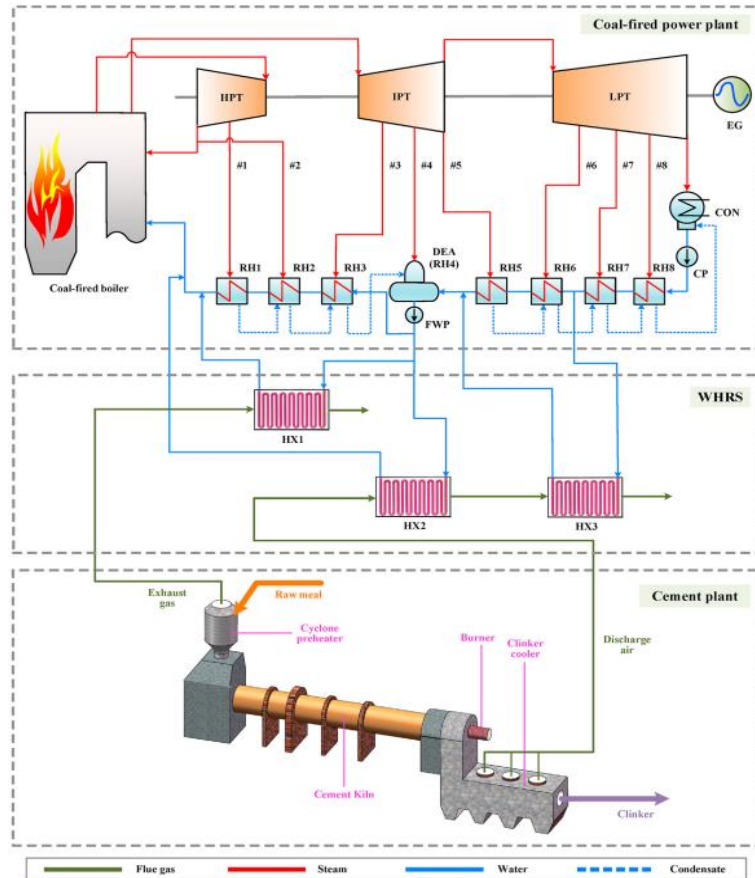


图 1 水泥厂 WHRS 与燃煤电厂集成示意图

该项研究创新地将水泥厂的 WHRS 与燃煤电厂高度集成，探讨了性能提升的根本原因，并评估了技术经济效益，为增强燃煤发电和水泥厂的能量协同利用提供了新的解决方案和理论及技术指导。相关研究成果发表在《Energy》<sup>4</sup>。

(薛凯丽 岳芳)

## LaNiO<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub> 双功能材料实现 CO<sub>2</sub> 稳定捕集和原位氢化

二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 的捕集和原位氢化被认为是减少碳排放、降低碳捕集利用能耗的一种有潜力解决办法。CO<sub>2</sub> 的氢化是放热反应，因而在较低温条件下反应更加彻底。然而，较低温度会导致 CO<sub>2</sub> 活性降低，对如何在较低温度下催化 CO<sub>2</sub> 氢化反应提出了挑战。

西班牙巴斯克大学 Juan R. González-Velasco 教授课题组首次采用了 LaNiO<sub>3</sub> 钙钛矿作为双功能材料前驱体进行 CO<sub>2</sub> 的捕集和原位氢化。通过结合柠檬酸和浸渍方法制备了 30%LaNiO<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub>、30%LaNiO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 30%LaNiO<sub>3</sub>/La-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三种不同配比的 Ni 基钙钛矿。采用高角度环形暗场的扫描透射电子显微镜观测、X 光衍射测试、温控二氧化碳解吸和氢气还原试验等多种手段，证实了如上 Ni 基双功能材料具有更

<sup>4</sup> Heng Chen, Yihan Wang, Liuming An, et al. Performance evaluation of a novel design for the waste heat recovery of a cement plant incorporating a coal-fired power plant. *Energy*, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123420.

小的  $\text{Ni}^0$  粒子尺寸以及更多的位点浓度，从而显著拓宽了利用双功能材料对  $\text{CO}_2$  进行捕集和原位氢化的实际操作范围，实现在  $280\text{-}520^\circ\text{C}$  的温度范围内兼具出色的选择性（达 90% 以上）及甲烷转化效益（ $80\text{-}103\ \mu\text{mol g}^{-1}$ ）。其中， $\text{LaNiO}_3/\text{CeO}_2$  相比于其他两种配比具有最小的  $\text{Ni}^0$  粒子尺寸（7 nm）和最多的位点浓度，保证了氢化反应的高效进行。进一步分析指出， $\text{LaNiO}_3/\text{CeO}_2$  由于其在受控还原过程后能够析出  $\text{Ni}$  形成均匀的  $\text{Ni}^0$  和  $\text{La}_2\text{O}_3$  相混合物，强化了  $\text{Ni}^0$  纳米颗粒与  $\text{La}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$  之间的相互作用，促进了解离  $\text{H}$  向吸附的  $\text{CO}_2$  靠近，是提高  $\text{CO}_2$  氢化转化为甲烷的深层机理。在  $440^\circ\text{C}$  时，以  $\text{LaNiO}_3/\text{CeO}_2$  为前驱体的双功能材料可达到最大甲烷生产效益（ $104\ \mu\text{mol g}^{-1}$ ）。相比于现有报道的传统  $\text{Ni}$  基双功能材料， $\text{LaNiO}_3/\text{CeO}_2$  还能够在严苛的反应条件和长周期实验条件下实现稳健的  $\text{CO}_2$  捕集和原位氢化。此外，氧气作为最常见的氧化剂对甲烷的生产过程起着关键的影响。传统  $\text{Ni}$  基双功能材料易被氧气氧化导致甲烷生产效率显著下降，然而， $\text{LaNiO}_3/\text{CeO}_2$  具有强大的抗氧化能力，抑制了氧气对甲烷生产效率的影响；甚至在无氧环境中，原处于有氧环境中的该双功能材料可以自发恢复活性，重新实现稳定高效的甲烷生产效率。

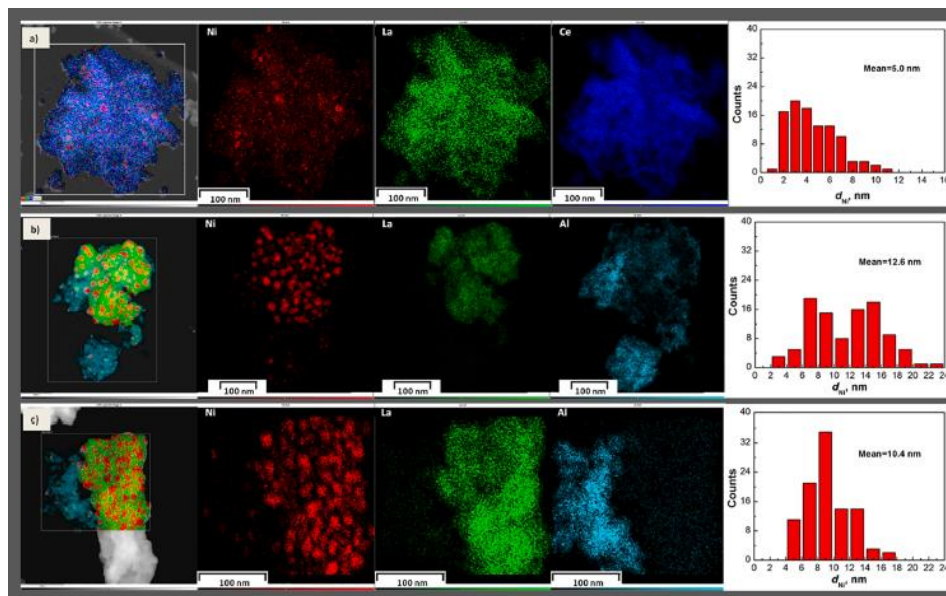


图 1 扫描透射电子显微镜照片及  $\text{Ni}$  纳米颗粒尺寸分布直方图

该研究证实了混合  $\text{CeO}_2$  的  $\text{LaNiO}_3$  钙钛矿具有长期高稳定性、抗氧化性以及自恢复性等多重优势，以  $\text{LaNiO}_3/\text{CeO}_2$  为前驱体的新型双功能材料有望成为  $\text{CO}_2$  捕集利用技术最有前景的应用材料，为提高  $\text{CO}_2$  捕集和氢化效率、增强稳定性、降低  $\text{CO}_2$  捕集利用能耗提供了潜在可行的技术解决方案。相关研究成果发表在《*Fuel*》<sup>5</sup>。

(王一峰 岳芳)

<sup>5</sup> Onrubia-Calvo J A, Bermejo-López A, Pérez-Vázquez S, et al. Applicability of  $\text{LaNiO}_3$ -derived catalysts as dual function materials for  $\text{CO}_2$  capture and in-situ conversion to methane. *Fuel*, 2022, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123842.

# 清洁能源多能互补

## 美国能源部首次发布清洁能源供应链安全保障战略

2月24日，美国能源部（DOE）发布《美国实现清洁能源转型的供应链保障战略》<sup>6</sup>，这是美国首个保护清洁能源供应链的全面战略，旨在建立安全、弹性和多样化的清洁能源产业基础，确保清洁能源制造和创新的全球领先地位，摆脱对他国（点名中国）的过度依赖，保障国家安全和产业竞争力。该战略基于美国总统拜登第14017号行政命令，对11项能源关键技术供应链和2项交叉主题<sup>7</sup>进行了评估，提出了62项行动建议，关键内容如下：

### 1、DOE 和联邦机构间的跨领域政策行动建议

**（1）增加国内原材料供应。**包括：①审查并更新联邦采矿法律法规，以提供更有效的许可；②促进采矿、选矿和产品制造相关全球环境、人权和劳工标准的改进和执行，并推进可追溯解决方案的开发和利用；③开展国家实验室、学术界和工业界合作，以协调和扩大清洁能源材料相关现有计划、市场分析和商业化活动；④支持环境可持续和下一代关键矿物和材料的提取、加工和精炼创新；⑤建立专用流程以确定对DOE任务领域至关重要的关键材料；⑥探索建立能源转型关键材料自愿储备的多边协调机制，包括通过国际能源署。

**（2）扩大国内制造能力。**包括：①提高认识、协调和扩大支持清洁能源转型所需的制造计划；②制定路线图以扩大国内制造基础所需的下一代大型工业设施；③通过有针对性的 SelectUSA 工具以利用外国对美国清洁能源技术制造的直接投资；④与制造企业以及政府协调建立区域清洁能源产业集群；⑤加强美国政府范围内的贸易政策一致性，为美国清洁能源行业及从业者创造公平条件。

**（3）投资并支持建立多样、可靠的国外供应链，以实现全球气候目标。**包括：①增加联邦政府对进行国外投资或出口的美国企业的财政支持；②制定并资助一项全球范围内扩大清洁技术制造能力的计划，显著提升与实现净零排放承诺相关的关键气候和清洁能源设备制造能力；③推动采用和实施可追溯标准，以提高全球供应链映射能力，强化产品保管完整性，加强社会责任，并协助应对能源供应链碳排放。

**（4）增加清洁能源的使用和部署。**包括：①利用联邦购买力，为国内清洁能源

<sup>6</sup> DOE Releases First-Ever Comprehensive Strategy to Secure America's Clean Energy Supply Chain. <https://www.energy.gov/articles/doe-releases-first-ever-comprehensive-strategy-secure-americas-clean-energy-supply-chain>

<sup>7</sup> 11项关键技术为：碳捕集材料，电网（包括变压器和高压直流输电），储能，燃料电池和电解槽，水电（包括抽水蓄能），钕磁铁，核能，铂族金属和其他催化剂，半导体，太阳能光伏，风能；2项交叉主题为：商业化和竞争力，网络安全和数字元件。

产品及制造能力提供持续需求信号；②制定联邦采购材料偏好清单，并促进美国工业界和外国政府的合作以确保产能；③确定并推进相关活动，以增加和维持可持续交通燃料和相关供应链行业的需求信号；④确保实施美国政府清洁技术竞争力出口战略的过程中，能够利用国际市场的清洁技术需求拉动国内制造业；⑤考察分析授权联邦机构签署公用设施服务合同和购电协议（其期限超出了目前清洁能源技术领域的最长 10 年购电期限）的成本和收益。

**（5）改进报废废物管理。**包括：利用美国政府的购买力和需求，支持再循环成分产品供应链、市场开发和可持续采购等实践。

**（6）吸引和支持本国熟练技术工人助力清洁能源转型。**包括：①与多个机构和利益相关方协商以促进能源劳动力发展；②将强有力的劳工标准和对有组织劳工的支持纳入政府资助范围。

**（7）改进供应链数据和分析工具以扩展知识和支持决策。**包括：①建立一个制造和能源供应链办公室，并建立相关数据库和分析建模能力；②支持开展对所有清洁技术能源供应链的经济、环境、社会和人权影响的评估和量化研究；③支持以美国长期战略为基础的深入分析，为高度优先的脱碳战略和美国经济领导地位战略提供信息；④促进政府和私营部门合作，为能源部门工业基础制定安全的数字组件供应链战略；⑤促使政府和私营部门共同制定能源相关软件、固件、虚拟平台和服务以及数据安全方面的国家标准、指南和要求。

## 2、针对具体技术的政策行动建议

**（1）能源基础设施。**包括：①燃料电池和电解槽，促使政府和私营部门共同探索多种制氢技术；②核能，制定综合废物处置策略，初期重点是明确选址过程，以确定临时和综合性乏燃料联邦储存设施选址；③储能，政府和私营部门共同部署长时（超过 10 小时）储能项目，利用结构化框架来满足成本可行性目标和供应链可持续性指标。

**（2）电网和市场。**包括：①储能，提供技术援助，以设计和支持由公用设施企业或第三方主持的“储能认购”融资模式，提供储能融资方案；②燃料电池和电解槽，促使政府和私营部门制定新型公用事业设施所有权结构和监管支持措施，包括新购电协议结构，以便与电解槽和燃料电池供应商之间签订长期合同；③储能，评估在高比例电动汽车部署情况下回收电池再应用于电网对电池拥有方的影响。

**（3）制造和创新。**包括：①半导体，促使政府和私营部门扩大对高功率和高电压电气化应用的高压（最高 10 千伏）碳化硅宽禁带半导体的研发，并投资先进封装研发技术以扩大传统半导体供应链产能；②半导体，政府和私营部门将能效提升纳入研发、示范和商业应用投资范围，未来 20 年提高微电子能源效率；③核能，与核监管委员会（NRC）协作，通过实施《核能创新能力法案》（NEICA）、《核能创

新和现代化法案》（NEIMA）、DOE 先进反应堆示范计划和高性能低浓缩铀可用性计划，以支持及时部署先进核反应堆；④钕磁体，由政府和私营部门带头利用《国防生产法案》，发展国内稀土磁体市场，需要国会拨款；⑤电网，政府和私营部门扩大研发，以提高大型变压器和相关材料的模块化程度，提供灵活设计、提高效率并降低制造成本；⑥风能，政府和私营部门扩大研发，解决陆上风能的物流限制，包括叶片和塔架等大型部件的模块化、现场组装和制造。

**（4）老旧/过时基础设施。**包括：水电，根据《购买美国产品法案》，增加贸易协议中的国产水电组件，并支持水电站升级改造。

### 3、跨领域国会行动建议

①作为 14017 号行政命令 100 天报告相关实施措施的一部分，扩大国防储备库存和/或优先关键矿物和材料的战略承购协议，实现民用和工业能源的清洁转型，并满足未来需求。②对于某些关键供应链，扩大《2005 年能源政策法案》第 XVII 章的创新要求，将支持创新清洁技术的供应链投资纳入其中。③颁布相关法律提供税收激励措施，支持国内清洁能源生产和部署，包括针对新建设施及其持续运行的激励措施。④向能源部提供额外的研发资金，以解决供应链漏洞并提高国内清洁能源制造业弹性。⑤确保国家能源政策与气候政策目标保持一致。⑥向 DOE 提供相应资金，根据《国防生产法》第 III 章支持国内关键材料供应。⑦修订《购买美国产品法案》，将采购授权范围扩大到发电设备和为新设施储能的设备，以支持清洁能源技术发展。⑧制定完善的政策，建设基础设施，以便能通过循环清洁能源经济实现关键部件和材料的回收再利用。⑨支持处置对清洁能源部署至关重要的有害物质。⑩提供相应资金，建立区域和州级部门合作关系和注册学徒计划，以雇佣、培训和安排人员从事国内供应链所需职业。U 资助并扩大 DOE、国家实验室的供应链分析能力，并与伙伴机构合作。

### 4、针对特定技术的国会行动建议

**（1）能源基础设施。**包括：①风电，利用现有的交通部海事管理局（MARAD）计划和能源部贷款计划办公室（LPO）计划优先为海上风电港口和船舶融资；②风电，通过研究计划、竞争性拨款和联邦资助资金的州级计划，鼓励州内和州际交通许可协调，并探索多模式基础设施投资以缓解瓶颈问题；③燃料电池和电解槽，考察和分析可能用于应急备用电源和主电源（例如数据中心）的燃料电池税收优惠措施，以及氢气管道优惠措施；④燃料电池和电解槽，将清洁氢纳入《购买美国产品法》，扩大采购授权范围以涵盖氢生产、运输、存储、分配和终端应用技术，并要求所有部件、子系统和系统的国产率超过 55%；⑤碳捕集、封存和输运，进一步开展研发以解决技术挑战和成本问题，并在《两党基础设施法案》的基础上，鼓励建设二氧化碳管道和封存设施，包括提供投资和许可支持；⑥水电，考察和分析可能的

激励措施，以支持现有水电设施现代化，为无动力水坝供电和开发抽水蓄能设施；⑦核能，继续投资研发基础设施，包括快中子辐照反应堆或多功能试验反应堆；⑧核能，修订《核废物政策修正法案》以便 DOE 能够实施综合废物处置战略。

**(2) 电网和市场。**包括：核能，向国防部、国家航空航天局和能源部提供研发示范和部署资金，以开发和加速部署创新核能系统。

**(3) 老旧/过时基础设施。**包括：电网，根据具体情况，提供资金以升级扩建现有电网系统以及地下设施。

**(4) 制造和创新。**包括：半导体，资助半导体研究、设计和制造，以加速国内半导体行业发展，确立美国的全球领导地位。

### 三、DOE 为保障能源供应链安全采取的行动

当日，DOE 还宣布了为解决能源供应链漏洞采取的一系列重大举措。包括：①投入 4400 万美元关键资源采矿创新 (MINER) 计划，以支持可商业化应用的技术，增加国内铜、镍、锂、钴、稀土元素和其他清洁能源转型关键元素供应能力。②成立制造和能源供应链办公室，以加强和保护能源供应链。③拨款 1.4 亿美元设计、建造一个稀土元素加工设施，示范完全集成稀土元素提取、分离和精炼的商业可行性，以加速发展稀土元素加工技术。④拨款 80 亿美元建立至少 4 个区域清洁氢中心，作为清洁氢生产商、潜在清洁氢消费者和连接基础设施的网络。⑤拨款超过 60 亿美元支持国内电池材料加工、制造和回收利用，以提高电网弹性和推动电动汽车、卡车和公共汽车规模化。DOE 已发布两份意向通知，由《两党基础设施法案》拨款近 30 亿美元支持企业在美国扩大和新建工厂，并提供就业机会。

(岳芳)

## 美国能源部地热能开发多年期计划提出未来五年发展路线

2月17日，美国能源部 (DOE) 发布了《2022-2026 地热能开发多年期计划》<sup>8</sup> 指出，地热能作为一种稳定、可靠的清洁能源，能够在美国能源低碳转型、应对气候变化和实现碳中和愿景等发展目标中发挥关键作用。预计到 2050 年，美国地热发电装机容量有潜力增加 26 倍 (相比 2019 年水平)，达到 60 GW 装机规模。为了实现上述发展愿景，DOE 提出了未来 5 年 (2022-2026 年) 地热能发展的三大战略目标，以及为实现目标需要开展的六大优先研发领域，具体内容如下：

### 1、地热能多年期计划三大战略目标

**战略目标 1：**通过开发部署基于干热岩的增强型地热系统 (EGS) 和传统的水热型地热系统，以将地热装机容量增加到 60 GW，助力美国 2035 年的零碳电力目标。

<sup>8</sup> GTO Multi-Year Program Plan FY 2022-2026.

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/GTO%20Multi-Year%20Program%20Plan%20FY%202022-2026.pdf>

简化 EGS 和水热型地热项目开发部署许可和监管审批流程，节省时间，提升地热发电的大规模部署效率，以支持到 2035 年实现零碳电力部门的发展目标，以及 2050 年净零排放经济的实现。

**战略目标 2：**到 2050 年，完成 17 500 个地热区域供暖能源站的建设以及全国 2800 万个家庭地源热泵的安装，以零碳方式为住宅和公共建筑供暖与制冷。地热供暖和制冷技术在改善建筑用能效率方面提供了潜在的机会，它能够减少供暖和制冷的峰值负荷，并减轻大型电力系统的压力，以到 2035 年实现将美国建筑碳足迹减少 80%。

**战略目标 3：**通过增加地热技术的开发和部署投资，促进经济、环境和社会和谐进步。地热技术创造了清洁能源的就业机会，并产生了大量的地方经济活动，包括工资支出、土地租赁支付、财产税、特许权使用费和等。地热能源解决环境和社会公平公正问题，因为它的高容量系数、小的碳足迹能够确保它可以在城市中心、农村地区和偏远社区使用。

## 2、支撑地热能多年期计划战略目标的六大优先研发领域

**勘探和表征：**所有资源形式（传统水热型或干热岩）的地热能资源的勘探、表征和开发都需要经过钻探、完井形成的过程。该研究主题致力于减少地热井钻井的时间和成本，最终获取经济的钻井成本曲线这一关键目标。开发新型使能工具和其他硬件增强其适应地热油藏钻井和生产活动中的极端环境。本研究旨在解决高温、坚硬、裂缝性岩层的钻井难题，克服钻井障碍。

**地下资源可获得性：**无论何种地热资源（干热岩或者水热型），都需要经过钻探和形成完井步骤，才能实现对其勘探、表征和开发利用。该研究主题致力于减少地热井钻井的时间和成本，解决高温、坚硬、裂缝性岩层的钻井难题。

**地下开发能力增强和可持续性：**要实现地热能资源的高效开发利用，需要构建人工地热储层以提升地热能抽取效果。为了优化地热能利用效果，必须在项目生命周期内加强地热能回收再利用。该研究领域旨在克服中深层地热开发利用技术成本的障碍和现有数值模型的局限性，确保地热能可持续高效利用。

**资源开发最大化：**利用地热发电有助于改善美国电网的可靠性、弹性和安全性，支持发展强大的国内清洁能源制造供应链，并为依赖电网的供暖和制冷提供有效的替代方案。该研究主题旨在开发和部署新技术，以最大限度地利用地热资源。

**数据、建模和分析：**地热开发多年期计划里所有主题领域的研发工作都涉及到数据。确保此类数据的质量和有效利用对于支持 DOE 技术和成本模型开发、以及开展战略分析以识别新兴前沿技术、跟踪项目进展至关重要。该主题致力于利用海量数据开展建模和分析，为地热开发多年期计划涉及的所有研究活动提供科学数据参考。



**地热知识整合：**一般而言，地热开发多年期计划每一个子项目都有自己的侧重点，也即关注地热开发利用技术某个具体技术主题领域，以解决地热开发利用面临的各项挑战；但其中也有某些课题会同时覆盖多个研究主题领域，也即跨主题交叉领域。该研究领域将在研发活动中引入机器学习技术，还会将先进制造业创新工艺引入到地热技术开发，以加速推进地热技术商业化。此外，还会将现有的石油和天然气基础设施、劳动力和知识沿用到地热行业，并与州和社区等关键利益相关方进行合作，提高人们对地热开发机会的认识和支持。

（廖明月 郭楷模）

## 美 ARPA-E 资助 1.75 亿美元资助变革性清洁能源技术研发

2月14日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布最新一期的 OPEN 2021 公开招标计划<sup>9</sup>，资助 1.75 亿美元支持国家实验室、高校和企业协同开展具有潜在颠覆性影响的变革性清洁能源技术研发，确保美国在未来绿色能源技术的全球领导地位，同时助力美国 2050 年实现净零排放目标。本次资助主要聚焦十三大主题领域，具体内容如下：

### 1、建筑能效

研究新型基于氮化镓（GaN）半导体的直接发射绿光的发光二极管（LED），以加速固态照明（SSL）光源的使用和普及。与非固态照明相比，可以减少约 25% 与照明相关的温室气体排放。到 2035 年，向 SSL 过渡可以使美国能源相关温室气体排放比非 SSL 减少 55%。

### 2、分布式能源

设计和建造一个能够利用可再生能源直接将烟道气中的 CO<sub>2</sub> 电催化还原为高价值化学品（如乙醇、丙醇等）的高性能反应装置，以实现绿色高效减排。

### 3、提高电力电子器件和设备效率

包括：①开发一种突破性的无线充电系统，用于电动汽车的静态和动态充电，以大幅减少对昂贵和笨重的车载电池需求，提高续航里程，并加速电动汽车的普及。②开发基于 GaN 的二极管和晶体管的新一代电力电子产品，其性能将大大超过目前的电力电子器件。③研究通过增材制造技术制造具有网络状结构的非晶金属氧化物软磁复合材料（SMC），从而降低成本，减少材料浪费。④为电力电子模块开发 3D 打印陶瓷封装，以改善其热管理、功率密度、性能和寿命。⑤为数据中心开发一种节能的两相冷却系统，以减少冷却能耗并减少用水。⑥开发一种高性能冷却板，其带有一个螺旋扰流器，可以将换热速率提高 3 倍，从而提高数据中心未来服务器的能源效率。⑦开发一种高效、资源节约的热能设备，它将同时提高服务器冷却能源

<sup>9</sup> DOE Announces \$175 Million for Novel Clean Energy Technology Projects. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-175-million-novel-clean-energy-technology-projects>

效率，并提供可直接用于建筑供暖与制冷的高质量热能。⑧开发能量高达数十兆电子伏特的氮化硼快中子探测器（FND），用于反应堆高温高辐照的极端环境中直接监测反应堆和燃料状态，该技术也有潜力取代目前在地热和测井工具中使用的氦-3 气体管中子探测器。

#### 4、发电

**（1）核能利用的相关技术改进和材料研究。**包括：①利用先进的增材制造技术开发一种新型钨基高熵合金面向等离子体组件（PFC）。②研究利用一种简单的熔盐（一种氟化锂和氟化铍的混合物）方法在聚变电厂中增殖氚（T）的可行性。③开展新型的氢硼（硼-11 元素）核聚变研究。④利用高能非中子粒子（如光子和质子）开发一种高效经济处理高放长寿命裂变产物（LLFP）嬗变技术。⑤激光等离子体不稳定饱和机制及其抑制方法研究。⑥开发关键技术以高效回收核废料中高价值的元素可以提高核资源的利用率，减少核废料的产生，降低燃料成本。

**（2）先进燃气轮机燃烧技术改进。**研究一种新的无焰燃烧法，用于使用氢气和天然气混合燃料的先进燃气轮机。新技术可以打破目前燃气轮机因为材料受限而导致的效率上限，使得燃气轮机联合循环（GTCC）效率有望达到 67%或更高，同时满足严格的排放标准。

**（3）海上可再生能源利用的相关研究。**研究如何使海上漂浮式风力涡轮机和海洋流体动力系统能够部署在现有系泊和锚定技术无法到达或成本过于昂贵的地区，以降低海上可再生能源的成本。

**（4）地热能利用的相关研究。**包括：①提出了“电-水力压裂”（E-HF）技术用以提高增强型地热系统（EGS）的发电效率。该技术利用高压电力和少量注水进入更大的裂缝网络进行热回收。与传统的水力压裂相比，该技术通过限制水的使用，可节约 2700 亿加仑的水，并将提供未开发的地热能。②开发下一代长时储热技术，实现地热能多天的长时存储。此外将开发一种基于光纤诊断平台，以优化监测地下动态过程。

**（5）熔盐反应堆和太阳能热发电系统研究。**包括：①开发一种具有抗蠕变、辐照和耐腐蚀性强的沉淀强化合金，该合金将能够应用于熔盐反应堆（MSR）、氟盐冷却高温反应堆（FHR）和聚光太阳能热发电（CSP）系统中。②开发一种耐高温、耐化学腐蚀的基于金刚石的微流控阿尔法谱仪，该谱仪能够在线精确测量液体燃料熔盐反应堆（LF-MSR）燃料中的阿尔法同位素。

#### 5、电网

**（1）开发高比例可再生能源并网下的电网高效稳定运营技术。**包括：①开发一种 100 千伏的 GaN 光导半导体开关取代传统硅技术制造的半导体开关，极大地提高效率并降低成本。②把电力电子的功能优势与高压电缆的功率密度优势结合起来，

创建一个紧密、一体化的结构，以取代当今电网中笨重、不灵活的变电站。③为逆变器主导的电力系统开发创新的保护方案，提高可再生能源并网比例。

**(2) 围绕电网开发相关的算法、模型、软件和控制技术，优化电网运行效能。**包括：①利用超导架空和地下输电线路，在单电压（10 千伏）的情况下，以具有成本效益的方式将大量电力（高达 400 兆瓦）从发电站向外输送。②开发演示一个结构化的微电网协调/控制协同设计流程，从而选择合适的设备、综合控制和通信软件及硬件架构。研究结果将在模拟环境中进行验证。还将开发和演示一个模块化弹性微电网控制集成平台。

## **6、针对制造业开发先进的节能技术，提高生产制造过程的能源效率**

包括：①开发一种有潜力的氢等离子体-回转窑零碳炼钢工艺来替代传统工业，该工艺无需使用焦炭或天然气，所消耗能源比目前的工艺更少，并可能使钢铁行业每年减少超过 10 亿吨碳排放。②开发一种无表面活性剂多相（MP）成形生产纤维复合材料产品的技术，减少生产纤维复合材料（如纸、纸巾、纸板、非织造布和新型纤维产品）的能耗和碳排放。③开发一种熔模铸造技术，该技术可能从根本上改变工业燃气轮机高价值金属部件的生产工艺流程，可比现有的铸造方法节省 90% 的能源，同时将生产周期从一年多缩短到三个月以下。④利用电化学将废旧产品和低价值矿物转化为有价值的碳中性材料。⑤创建可扩展的用于氨氧化的高熵合金（HEA）催化剂制造工艺，以提高催化活性、选择性和稳定性。⑥利用低成本的可再生电力、垃圾废弃物原料生产可循环利用的建筑材料。

## **7、提高资源利用效率以及碳捕集技术的研发以减少碳排放**

**(1) 碳捕集技术研发。**包括：①使用无碳电力驱动直接空气捕集（DAC）或海洋直接捕集（DOC）环境中的 CO<sub>2</sub>，可减少 DAC 和 DOC 的前期投资和运营成本。②设计、建造并演示一种改造平台，有效封堵泄漏的废弃油气井，显著减少和防止甲烷排放。③开发一种利用海水矿化 CO<sub>2</sub> 的新型电化学过程。④开发一种新型固体吸附剂材料，称为 CO<sub>2</sub> 捕集利用和封存气凝胶（CACTUS），用于 CO<sub>2</sub> 的直接空气捕集（DAC）。⑤开发碳封存工艺，使 CO<sub>2</sub> 矿化成为碳酸盐稳定地存储在地质地层中。

**(2) 针对电源系统和新能源研发能源技术。**包括：①开发基于 GaN 的小型脉冲电源系统架构，以提高脉冲电源功率密度（电容器尺寸减小 10 倍）和功率转换器寿命（在 175°C 以上运行 1000 小时）。②研发成本更低且能够以超快的方式去除移动和固定电气系统上的冰/雪/霜堆积新技术，计划应用于光伏电站、热泵热交换器、风力涡轮机和电动飞机等特别受冰/雪/霜聚集现象影响的领域。

## **8、储能技术研发**

包括：①研究将非活跃的油气井转换为名为重力井的能源存储设备（即以“重力”的形式储存能量，当重物被强大的缆绳和绞车吊在空中时，它们就能储存大量

的势能。当需要这些能量时，它们可以被放下井筒、转动绞车，然后将电能输送到电网中），以创造一种新的能源存储解决方案。②开发一种能够使用可再生能源的混合电化学/光催化方法直接产生高压氢气（H<sub>2</sub>）技术，其在 700 bar 的压缩条件下生产氢气的成本有望低于 2 美元/千克。③开发新型的筒管式架构锂电池，该设计将增加电极材料的厚度，从而存储超过目前研究的同等尺寸下储存的能量，以降低每千瓦时能源存储的总成本。

## 9、交通运输中的能量转换相关技术研究

包括：①研发一种全新的固体氧化物燃料电池（SOFC）架构，该架构可以实现更小体积、更高功率密度，适用于交通运输应用，可以实现快速启动和长期耐用，解决传统 SOFC 的缺点，包括质量、体积大、启动时间长、成本高等问题。②研发新型磁性和绝缘材料：一种新型复合磁粉（CMP）材料与陶瓷电泳沉积（EPD）绝缘材料，来改变电动汽车电机的设计和制造过程。③开发新型无离子聚合物电极，以实现铂合金催化剂的超高氧还原反应活性，获得高功率密度聚合物电解质膜（PEM）燃料电池。

## 10、能源生产和脱碳技术研究

（1）生产生物能源以及生物固碳研究。包括：①开发新的光合系统，利用太阳能光谱中以前未充分利用光谱（如近红外波段）来生产太阳能燃料。②开发首个负碳生物精炼厂，将多种有机废物原料转化为挥发性脂肪酸（VFA）。③开发一种可扩展的技术，实现直接从环境空气中捕获 CO<sub>2</sub> 并将其转化为丁醇，可以用于航空喷气燃料。④研究大型藻类快速高产的培育技术，以实现利用藻类减少碳排放。⑤开发一种新的生物碳固定途径，以实现利用更有效的羧化酶来更好地利用 CO<sub>2</sub>。⑥利用植物或相关细菌对当前和未来的合成氮源进行生物固定，每种方法的每种成分都在不同的时间向作物提供氮，并影响能源、产量和排放。⑦开发一种新技术，由低成本的无线传感器阵列组成，用于测量一氧化二氮（N<sub>2</sub>O）浓度和排放驱动因素（铵态氮、硝酸盐、氧气、水分、温度、pH 值和反硝化酶）。⑧利用工业级无人机，演示适用于大型农业用地的高时空分辨率远程 N<sub>2</sub>O 监测技术。

（2）通过其他的可再生方式生产低碳能源或者降低生产工艺中的碳排放。包括：①开发一种使用质子传导氧化膜（POM）的低温电解槽，与目前的商用聚合物电解质膜（PEM）电解槽相比，具有实现电流密度和效率阶梯变化的潜力。可以在电流密度高于传统 PEM 电解槽的情况下实现高效的低温水电解。②开发变革性的自热式氧化还原脱氢（RDH）技术，在模块化包装床中灵活地生产各种烯烃，验证 RDH 技术的可行性和经济性。③使用增材制造技术为化学反应器打印 3D 陶瓷组件，该反应器能够将 CO<sub>2</sub> 转化为一种航空燃料。

## 11、交通运输网络

把人工智能与多尺度模拟和实时控制结合起来，创建一个名为 **AutonomIA** 交通管理系统，该系统可以减少交通拥堵，提高能源效率，并减少区域交通系统的 CO<sub>2</sub>。

## 12、交通运输储能技术研究

包括：①研发镁负极代替锂负极，用有机材料代替过渡金属正极，这种替代方式可以增强国家能源供应链的安全。②开发一种新型电池隔膜，可以有效防止枝晶的形成。③开发由纤维素离子导体组成新型电解质，在此基础上设计开发快速充电电池。

## 13、交通工具研究

**(1) 高性能电动交通工具相关研究。**包括：①开发新型磁体，以提高磁体的运行能量密度，提高电机效率。②开发一种高功率密度的电机，以开发出功率高达 10 兆瓦及以上的电动飞机推进系统。③开发一个自动、电池驱动的轨道车辆运输系统，并带有一个先进的测试程序。该新型运输系统将使终端变得更小、更清洁，为新型、清洁的货物运输开辟道路。④为电动飞机开发超轻、高效的直流-直流 (DC-DC) 电源转换器，以减少温室气体排放量，同时减少全国机场的噪音污染。

**(2) 利用轻量化材料开发设计更加先进的车辆架构。**开发一种新的复合材料成形路线，即复合架构材料加工 (CAMP)，以提供一种快速经济的复合材料轻量化车辆架构制造过程，从而实现大批量成本效益、轻量化和节能的汽车结构组件生产制造。

**(3) 高效的氢动力涡轮发动机开发。**为商用航空设计一种新颖、高效的氢动力涡轮机，减少 CO<sub>2</sub> 以及氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 排放。

**(4) 改进催化剂设计，减少化学工业中的温室气体排放。**设计新的化学催化剂，以减少能源的使用和大量化学反应产生的碳足迹。

**编者按：**ARPA-E 除了设立特定领域主题研究计划外，还每三年开展一次开放式项目招标计划。OPEN 招标计划于 2009 年推出，旨在支持非共识探索研究和机会型探索研究，避免遗漏在主题研究领域之外的创新思想。2009 年第一轮开放式招标 (OPEN 2009) 资助了 1.67 亿美元，2012 年第二轮 (OPEN 2012) 资助了 1.3 亿美元，2015 年第三轮 (OPEN 2015) 资助了 1.25 亿美元，2018 年第四轮 (OPEN 2018) 资助了 1.99 亿美元。

(刘俊 郭楷模)

## DOE 资助 3600 万美元研发核废料安全处置技术

3 月 10 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布在“优化反应堆核废料处置系统”主题计划框架下资助 3600 万美元支持高校和企业联合开展先进、安全可靠的核废料处置技术研发<sup>10</sup>，解决核能使用过程中的放射性核废料安全问题，以进一步扩大美国的核电部署规模，助力 2035 年零碳电力目标实现。本次重点资助 11 个研究项目，具体内容如下：

**1、承担机构：杨百翰大学（资助金额：90 万美元）**

开发先进的核废料分离技术，提升分离效率，分离出各种有用的核元素（如铀、钚）进行循环利用，并且去除长寿命和不稳定的核元素。

**2、承担机构：Citrine Informatics 材料开发公司（资助金额：90 万美元）**

利用人工智能和基于物理的仿真模拟来开发更加安全可靠的核废料处置或再利用技术，从而减少核废料处置库负担。

**3、承担机构：美国深层隔离公司（资助金额：360 万美元）**

将建立通用性能标准和核废料存储罐系统，以最大限度地降低乏燃料和核废料长期管理成本。

**4、承担机构：通用电气全球研究中心（资助金额：450 万美元）**

开发一个能够在核燃料处理设施环境中稳定运行的计算系统。

**5、承担机构：爱达荷国家实验室（资助金额：207 万美元）**

开发一种基于现有商业热分离技术的金属燃料回收工艺。

**6、承担机构：美国 Oklo 公司（资助金额：400 万美元）**

开发下一代先进的乏燃料回收设施并开展技术-经济性评估。

**7、承担机构：法国欧安诺公司（资助金额：225 万美元）**

开发先进处理系统，能够有效处理不同类型核废料处理设施产生的放射性废气、废液和固体废物。

**8、承担机构：罗格斯大学（资助金额：400 万美元）**

开发一种能够将乏燃料转化为高密度、高耐用性的金属陶瓷材料技术解决方案。

**9、承担机构：伦斯勒理工学院（资助金额：60 万美元）**

将专注于提供有效管理复杂的氟化盐废水的解决方案，以推进核燃料循环利用技术进步。

**10、承担机构：纽约石溪大学（资助金额：340 万美元）**

开发提高核燃料利用率和减少铀负载的技术，从而减少核废物产生。

**11、承担机构：泰拉能源公司（资助金额：855 万美元）**

---

<sup>10</sup> DOE Awards \$36 Million to Reduce Waste from Advanced Nuclear Reactors.  
<https://www.energy.gov/articles/doe-awards-36-million-reduce-waste-advanced-nuclear-reactors>

利用高温下氯化铀盐的挥发性开发出从核废料中高效回收铀元素的工艺路线，以探索最佳的核燃料循环技术。

(廖明月 郭楷模)

## 协同化学工艺助力锡基钙钛矿太阳能电池获得创纪录稳定性

金属卤化物钙钛矿太阳能电池光电转换效率已经从最初的不到 4% 提高到了 25.7%，十分接近单晶硅，被认为是最具未来发展前景的下一代太阳能电池技术。但是，目前高效率的电池主要是基于含铅 (Pb) 元素的钙钛矿光敏材料，而 Pb 具备毒性，存在危害环境和人类身体健康的隐患，亟需给予高度关注和有效解决。探索非 Pb 的钙钛矿材料则是潜在的有效解决路径之一。

西班牙海梅一世大学 Ivan Mora-Sero 教授牵头的国际联合研究团队利用协同化学工程方法有效克服了锡 (Sn) 基钙钛矿中二价  $\text{Sn}^{2+}$  离子易于氧化问题，从而在保障电池性能前提下显著提升电池稳定性，电池获得了超过 10% 效率，且连续稳定运行 1300 余小时后仍可保持高达 93% 的初始效率，表现了极其优异的稳定性，为探索环境友好非 Pb 钙钛矿电池指明了方向。相关研究表明 Sn 基钙钛矿具备良好的带隙结构、较低的激子分离能和高载流子迁移率，是良好的钙钛矿太阳能电池候选光敏材料；但由于二价  $\text{Sn}^{2+}$  离子易于被氧化导致电池稳定性不甚理想有待改善，而实验表明了通过添加适当添加剂是一种良好的手段。为此，研究人员首次将二丙基碘化铵 (DipI) 与还原剂硼氢化钠 ( $\text{NaBH}_4$ ) 同时作为添加剂一起添加到甲脒碘化锡 ( $\text{FASnI}_3$ ) 前驱体中，随后通过旋涂法制备了同时含有 DipI 和  $\text{NaBH}_4$  两种添加剂的  $\text{FASnI}_3$  钙钛矿薄膜，为了对比还制备了单一/无添加剂的  $\text{FASnI}_3$  钙钛矿薄膜。扫描电镜表征显示，无添加剂的  $\text{FASnI}_3$  钙钛矿薄膜表面形貌呈现出不均匀的晶粒尺寸，且存在大量的孔洞，这增加了钙钛矿与外部环境接触的机会增加了不稳定性，主要原因是溶剂诱导了二价  $\text{Sn}^{2+}$  离子氧化；而单一添加剂 (DipI 或  $\text{NaBH}_4$ ) 修饰的薄膜的形貌得到了一定改善，均匀性提升，但仍然存在一定的孔洞；而同时含有 DipI 或  $\text{NaBH}_4$  两种添加剂的薄膜则呈现出了无孔洞致密且均匀的形貌，而且晶粒尺寸也显著增加 (有助于减少晶界和缺陷)。随后分别利用上述薄膜制备电池器件并开展电化学性能测试，结果显示无添加剂的  $\text{FASnI}_3$  性能最差仅为 4.8%，单一添加剂器件性能均得到提升 ( $\text{NaBH}_4$  为 7.3%，DipI 为 8.3%)，而同时含有两种添加剂的电池性能最佳，效率超过 10% 达到了 10.6%。进一步研究人员开展了器件长程稳定性研究，结果显示在氮气氛围下，无添加剂的  $\text{FASnI}_3$  电池仅仅运行 200 小时后性能便大幅下降 60%，而含有两种添加剂的电池稳定性运行 1300 多小时后仍保持了高达 93% 的初始效率，表现出十分优异的长程稳定性，这也是目前文献报道的 Sn 基钙钛矿太阳能电池稳定性最佳纪录。为了探究电池性能增强的潜在机制，研究人员对电池进

行了微观表征,实验结果显示  $\text{NaBH}_4$  添加剂能够有效地增加电池的开路电压,而 DipI 添加剂能够很好的改善成膜均匀性、减少孔洞,起到良好的钝化作用,因此两者协同作用增强了电池的性能和稳定性。

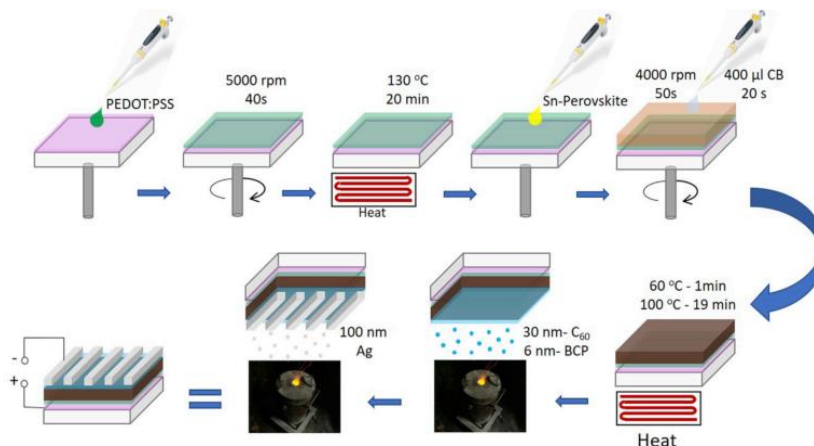


图 1 基于协同化学工艺制备钙钛矿薄膜的流程示意图

该项研究利用分子工程将两种不同功能的添加剂二丙基碘化铵 (DipI) 与还原剂硼氢化钠 ( $\text{NaBH}_4$ ) 同时引入到钙钛矿前驱体中,得益于两种添加剂的协同作用,显著改善了电池性能和长程稳定性,电池转换效率从无添加剂的 4.8% 大幅增加到了 10.6%,且在氮气氛围中连续稳定运行 1300 余小时后依旧保持 93% 的初始效率,表现出了优异的长程稳定性,为制备高效稳定长寿命的钙钛矿电池提供了新思路和技术路线。相关研究成果发表在《*Joule*》<sup>11</sup>。

(王珍 郭楷模)

### 3D 打印微柱阵列生物电极首次实现半人工光合成

蓝藻(光合细菌)是一种极易繁殖、自我修复、存量丰富的太阳能生物催化剂,可以与电极相连接用于发电和化学物质合成,这种将光合生物与电极机械连接的方式是可持续生物发电和燃料生产的一种前瞻性半人工途径。然而目前,尚不清楚该如何设计电极和生物材料界面以满足生物光电化学性能的复杂要求。

英国剑桥大学 Jenny Z. Zhang 教授团队提出了一种强大的 3D 打印方法,利用纳米粒子制备出具有多标量分层特征的微柱阵列结构。该方法采用气溶胶喷流打印技术,可以高效且重复制造出大量由铟锡氧化物(ITO)纳米颗粒组装而成的大型微柱电极库,实验证明这种打印方法可以在一个打印步骤中生产跨越 5 个数量级长度的可调谐电极阵列,而目前还没有其他方法能达到这种制备效果。为了生产柱状结构,对载气与鞘气焦点压力比进行了调整。实验结果表明,在压力比为 2.4 ~ 3.5 的条件下,可以打印出高达 800  $\mu\text{m}$  的色谱柱。在这个压力比值以下,会导致打印的材料动

<sup>11</sup> JesúsSanchez-Díaz, Rafael S.Sánchez, SofiaMasi, et al. Tin perovskite solar cells with >1,300 h of operational stability in  $\text{N}_2$  through a synergistic chemical engineering approach. *Joule*, 2022, DOI: 10.1016/j.joule.2022.02.014



力不足；超过这个范围，就会出现“溢出”效应，导致柱子底部厚而不稳定。此外，还通过改变油墨前驱体中的非经典共溶剂体系，如水（非挥发性）和甲醇（挥发性），赋予印刷柱微尺度粗糙度，确定了制备结构良好的 ITO 纳米粒子光滑微柱阵列和 ITO 纳米粒子分支微柱阵列的理想条件。该制造方法能够在大型电极制备装置上进行比较研究，实验证明，尽管大型电极为生物催化剂高负载提供了较大的电化学活性面积（EASA），但其结构限制了光和电解质的互相渗透。微柱电极的设计克服了这个问题，亚微米粗糙度的增加提高了电化学活性面积（EASA）、电池负载和光收集。为了检测该电极生物光电性能，在暗/光循环条件下（ $\lambda=680\text{ nm}$ ， $1\text{ mW cm}^{-2}$ ），使用计时安培法评估生物光电化学的总输出。采用三电极结构，以囊泡菌负载电极为工作电极。在缺乏外源性电子介质的情况下，微柱 ITO 电极产生了聚囊藻生物膜的特征光电流剖面。添加常用的膜透性电子介质 2,6-二氯-1,4 苯醌（DCBQ）后，反蛋白石结构（IO）-ITO、光滑微柱阵列（SP）-ITO 和分支微柱阵列（BP）-ITO 电极的光电流分别比其相应的未介导的光电流增加了约 80 倍、100 倍和 110 倍。介质对微柱阵列电极的影响更大，这表明电极支架上的许多细胞不是直接连接的。这可能与电极基底细胞的多层化或微支外围细胞的松散附着有关。聚囊藻负载 BP-ITO 电极的光电流密度是同等高度的 IO-ITO 电极的两倍。在这项比较研究中， $600\text{ }\mu\text{m}$  柱高的集胞藻负载 BP-ITO 电极产生了最高的非介导光电流，展现的光电流输出的介导电子转移高达  $245\text{ }\mu\text{A cm}^{-2}$ ，直接电子转移高达  $1.93\text{ }\mu\text{A cm}^{-2}$ ，其光电效率是生物光电化学一个新的里程碑。当这种生物负极与合适的正极配对时，预计该电池功率密度达到  $541\text{ mW m}^{-2}$ ，该理论值已达到商业化生物燃料发电所需的功率密度（ $<403\text{ mW m}^{-2}$ ）。

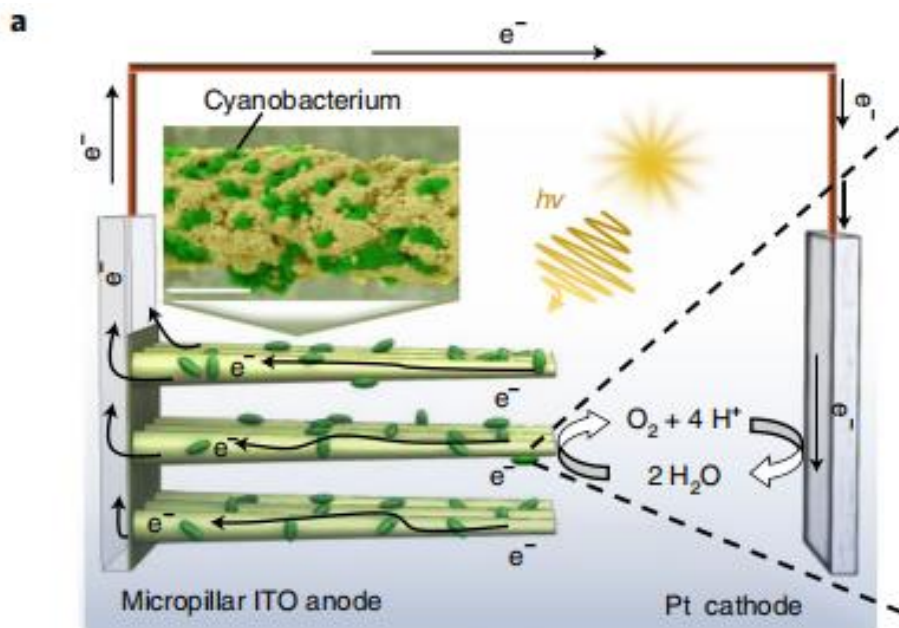


图 1 利用光合生物膜作为光催化剂进行发电的生物光电电化学电池示意图

本研究开发了一种使用氧化锡锡纳米粒子生成分层电极结构的气溶胶喷射打印方法，打印了高度和亚微米表面特征不同的微柱阵列电极，并研究了跨生物电极界面的能量/电子转移过程。这项研究将指导未来高性能生物电极结构的发展，展示了3D打印技术在3D电极设计中的强大功能，并为理解和增强生物电极界面开辟了新的方向。相关研究成果发表在《*Nature Materials*》<sup>12</sup>。

(严烙意 汤匀)

---

<sup>12</sup> Xiaolong Chen, Joshua M. Lawrence, Laura T. Wey, et al., 3D-printed hierarchical pillar array electrodes for high-performance semi-artificial photosynthesis. *Nature Materials*, 2022, DOI: 10.1038/s41563-022-01205-5

# 低碳化多能融合

## 日本 NEDO 发布重型车辆燃料电池技术开发路线图

3月18日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）发布《重型车辆燃料电池技术开发路线图》<sup>13</sup>，提出了技术开发重点和技术、经济指标，以实现到2030年的普及。路线图明确了膜电极（MEA）、电解质材料、电极催化剂、隔板、气体扩散层（GDL）、实用技术/配套设备、基础技术等方面的研发路线，详情如下：

### 1、膜电极（MEA）

**关键技术开发：**①未来5年，开发能够支持更宽运行温度（-30~120℃）的MEA，载铂量为0.24毫克/平方厘米情况下提升性能和耐久性，离聚物覆层形态控制、催化层结构优化；②未来6-10年，扩展MEA运行温度至超过120℃，开发高电位高活性MEA技术。

**实用技术开发：**①未来6-10年，实现燃料电池堆更高性能和更高耐久性，开发更宽运行温度（-30~120℃）MEA的低成本量产工艺；②未来11-15年，进一步提升燃料电池堆性能，支持更宽运行温度条件，减少贵金属用量，降低成本。

**基础技术开发（评估、分析技术等）：**未来15年内，分析催化剂、电解质和MEA内部的高耦合性和耐久性，探明MEA中的水分、气体和质子传输现象，明确电极形成过程、相界面设计。

### 2、电解质材料

**探索型研究/基础研究：**未来5年，低温/高湿度~高温（120℃以上）/极低湿度材料开发，功能性增强层材料开发。

**关键技术开发：**①未来5年，开发能够支持更宽运行温度（-30~120℃）的膜和离聚物技术，开发提高膜耐久性的技术（增强层、自由基清除剂、提高阻气性），提高低温/高湿度-高温/低湿度条件下的质子传导率，改善离聚物的透氧性并减缓对催化剂的特定吸附；②未来6-10年，开发能够支持更宽运行温度（-30~120℃以上）的质子膜和离聚物技术。

**实用技术开发：**①未来6-10年，开发更宽运行温度（-30~120℃）质子膜量产工艺，开发高耐久性技术；②未来11-15年，支持更宽运行温度，降低成本。

**基础技术开发（评估、分析技术等）：**未来15年内，探明质子膜中的水分、气体和质子传输现象，探明电解质膜老化机理。

<sup>13</sup> 大型・商用モビリティ（HDV）向け燃料電池の技術開発ロードマップを公開。  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101524.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101524.html)

### 3、电极催化剂

**探索型研究/基础研究：**未来 5 年，探索新型高电位、高活性阴极催化剂和非贵金属催化剂。

**关键技术开发：**①未来 5 年，开发能够支持更宽运行温度（-30~120℃）的催化剂技术，减少贵金属使用量（空气极含量 0.2 毫克/平方厘米、燃料极含量 0.04 毫克/平方厘米），开发提高空气极活性和耐久性的技术，抑制碳载体老化、开发非碳载体材料技术，开发抗氧化性、抑制过氧化氢生成、抗杂质的燃料极催化剂技术；②未来 6-10 年，开发新型高电位、高活性阴极催化剂和非贵金属催化剂技术。

**实用技术开发：**①未来 6-10 年，开发更宽运行温度（-30~120℃）电极催化剂膜量产工艺，开发高耐久性技术，开发从报废燃料电池中回收贵金属的技术；②未来 11-15 年，支持更宽运行温度，减少贵金属用量，降低成本。

**基础技术开发（评估、分析技术等）：**未来 15 年内，探明电极表面反应机理和电极催化剂退化机理。

### 4、隔板、气体扩散层（GDL）、密封结构等

**关键技术开发：**未来 5 年，开发降低气体扩散阻力的技术，与其他组件结合优化 GDL 和微孔层（MPL）性能，开发具有高耐腐蚀性和降低接触电阻的隔板技术，开发更宽运行温度（-30~120℃）的垫片、粘合剂技术。

**实用技术开发：**①未来 6-10 年，开发隔板、GDL、垫片的量产技术（隔板生产速度<1 秒/张），开发快速粘合技术（循环时间<1 秒/单池），开发高耐久性技术；②未来 11-15 年，支持更宽运行温度，降低成本。

### 5、实用技术/配套设备

**关键技术开发：**未来 5 年，开发 MEA、隔板的高速量产技术。

**实用技术开发：**①未来 10 年，大幅提升冷却性能，开发支持高温运行的空压机和增湿器，开发燃料电池堆量产技术；②未来 11-15 年，通过提高功率密度大幅减少材料使用量，简化系统、缩小电堆尺寸。

### 6、基础技术

**实用技术开发：**①未来 10 年，性能、耐久性分析技术和电池评估技术在产业中的应用和示范；②未来 11-15 年，开发检测/分析技术，以及基于现象和机理的燃料电池电堆设计技术。

**基础技术开发（评估、分析技术等）：**未来 15 年内，提升检测技术的时间、空间分辨率，提升计算科学技术的规模和精度，基于模型/数据驱动的材料设计，开发电堆/电池系统设计方法，使用人工智能/自主技术探索材料，在原子和分子水平上确立燃料电池材料设计方法和创新材料探索方法。

（岳芳）

## 澳大利亚启动德澳氢能联合资助项目首轮招标

3月8日，澳大利亚可再生能源署（ARENA）宣布与德国联合资助的“德澳氢能创新和技术孵化器”（HyGATE）项目启动首轮招标<sup>14</sup>，旨在促进两国产业界和学术界合作开发创新绿氢技术，加快实现绿氢成本下降目标。HyGATE项目是2021年德、澳政府签署氢能协议达成的三项重要举措之一，澳大利亚将投入5000万澳元，德国将投入5000万欧元，支持在澳大利亚开展绿氢供应链相关技术的试点、试验和示范。本次招标涉及可再生氢的全价值链技术，将优先关注如下方面：

1、可降低绿氢价值链的生产、输运和使用成本的技术，包括：①可降低电解槽成本或提高电解槽效率的技术；②降低氢气存储和处理成本的技术；③降低氢气转化/再转化设施成本的技术；④创新氢能利用解决方案。

2、示范绿氢应用案例，以支持相关技术或商业模式的未来部署。

3、太阳能或风能发电站内集成大型电解槽的规划和运营，包括运行管理、电解槽优化、系统设计等。

4、支持降低澳大利亚向德国出口氢气成本的项目，如将氢转化为合成燃料或绿氨对于运输、存储和使用的影响。

5、将可再生氢输运至德国的相关技术，重点关注氢气转化和再转化技术及工艺，以及相关存储技术。

6、部署和使用基于绿氢的合成燃料和相关技术以促进澳大利亚矿业脱碳。

7、使用绿氢可持续生产工业产品，如绿氨、绿色炼钢等。

（岳芳）

## 英国资助新型长时储能技术

2月23日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布“长时储能示范计划”（LODES）第一阶段招标结果，投入670万英镑支持24个创新储能技术项目<sup>15</sup>，以促进风、光等波动性可再生能源消纳，助力英国能源系统向绿色转型。此次资助重点关注如下领域：储热；电力转化为多种载体（Power-to-X）储能；电力存储。后续将在第一阶段资助成果基础上，选择部分项目投入6800万英镑进行第二阶段资助。此次中标项目详情如下：

### 1、储热技术

该领域共资助6个项目：①热电池的可行性研究；②36兆瓦时超高温储能系统测试；③创新长时储热技术及相关智能控制系统开发；④电网规模热泵储能系统可

<sup>14</sup> Australia-Germany HyGATE Initiative funding round now open. <https://arena.gov.au/news/australia-germany-hygate-initiative-funding-round-now-open/>

<sup>15</sup> £60 million boost for floating offshore wind. <https://www.gov.uk/government/news/60-million-boost-for-floating-offshore-wind>

行性研究；⑤基于相变复合材料的储热系统开发；⑥Q-zeta 公司家用储热装置用于大容量、低成本长时储能的可行性研究。

## 2、Power-to-X 储能技术

该领域共资助 5 个项目：①20 兆瓦无隔膜电解槽制氢项目，通过过剩风电制取的绿氢将存储在地下盐穴中；②改进聚变能领域的金属氢化物存储氘和氚技术，用于大规模长时储氢；③将金属氢化物储氢技术接入电网进行 Power-to-X 示范的可行性研究；④制氢电解槽铂族金属替代材料开发；⑤基于储氢介质 Carbon280 Hydrilyte™的储氢系统长期示范。

## 3、电力存储技术

该领域共资助 13 个项目：①重力储能示范系统设计，通过在垂直竖井中提升和下降重物来储放能量；②海上长时储能技术开发，利用新型液压气动储能技术将加压海水和压缩空气相结合实现大规模储能；③40 兆瓦时钒液流电池长时储能示范；④先进压缩空气储能设施开发；⑤用于电网的储热和压缩空气储能技术开发；⑥兆瓦规模长寿命高能量密度锂硫基液流电池技术示范；⑦可调度的电网低成本储能解决方案开发；⑧锌基储能电池开发；⑨新一代有机液流电池技术可行性研究；⑩基于混凝土 3D 打印的船用抽水蓄能技术开发；⑪用于海上大陆架的压缩空气储能技术开发；⑫液流电池与光伏发电集成的可行性评估；⑬铜/锌电池储能技术示范。

(岳芳)

## 杂配金纳米团簇实现 CO<sub>2</sub> 高效电催化还原

电化学催化 CO<sub>2</sub> 还原反应 (CO<sub>2</sub>RR) 因能将 CO<sub>2</sub> 转化为高价值化学品和燃料，被认为是一种具有发展潜力的研究方向。金纳米材料是目前研究最广泛的用于 CO<sub>2</sub> 电化学还原的催化剂之一，尽管在制备高催化活性和选择性的单分散金纳米颗粒方面取得了重要进展，但由于金催化剂表面结构无法精确解析和明确定义，难以研究其结构和性能关系。因此，创建明确的催化活性中心，在表面金原子的配位环境中实现精确的合成控制，将有助于阐明金纳米催化的结构和性能之间的关系。

美国加利福尼亚大学河滨分校 De-en Jiang 教授团队报告了杂配三氢化金纳米团簇 [Au<sub>22</sub>H<sub>3</sub>(dppe)<sub>3</sub>(PPh<sub>3</sub>)<sub>8</sub>]<sup>3+</sup> 的合成和 CO<sub>2</sub> 电催化还原过程。[Au<sub>22</sub>H<sub>3</sub>(dppe)<sub>3</sub>(PPh<sub>3</sub>)<sub>8</sub>]<sup>3+</sup> 簇 (以下简称为 [Au<sub>22</sub>H<sub>3</sub>]<sup>3+</sup>) 是由过量的硼氢化钠与 Au<sub>2</sub>(dppe)Cl<sub>2</sub> 和 Au(PPh<sub>3</sub>)Cl 前体的混合物反应合成，为了确保 [Au<sub>22</sub>H<sub>3</sub>]<sup>3+</sup> 上的 3 个 H 原子不是来自电喷雾离子源 (ESI) 过程，用 NaBD<sub>4</sub> 代替 NaBH<sub>4</sub> 进行了相同的反应，得到了 [Au<sub>22</sub>D<sub>3</sub>]<sup>3+</sup>。通过单独使用 Au<sub>2</sub>(dppe)Cl<sub>2</sub> 进行相同的合成，得到了 [Au<sub>11</sub>(dppe)<sub>5</sub>]<sup>3+</sup> 簇，缩写为 [Au<sub>11</sub>]<sup>3+</sup>，同时得到相应的 ESI 质谱和核磁共振 (NMR) 波谱，结果表明样品纯度高。研究人员使用密度泛函理论 (DFT) 计算对两个簇进行了结构优化，实验结果表明 [Au<sub>11</sub>]<sup>3+</sup> 被二膦配

体完全盖住。然而，在 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 簇中，3个H原子与6个Au相连接，而其余14个Au原子则与磷化氢配体进行了配位。随后，对 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 表面氧化还原性质和 $\text{CO}_2$ 的RR活性进行研究，并与 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 进行比较。结果表明， $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 团簇中H原子的存在导致在0.88 V处有一个独特的氧化峰，Au(I)/Au(0)还原峰相对于 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 从1.02 V移至1.05 V。在析氢反应(HER)和 $\text{CO}_2\text{RR}$ 测试中，相同电位下，两个簇体在 $\text{CO}_2$ 饱和溶液中均具有较高的电流密度，表明两个簇体均能有效地电催化还原 $\text{CO}_2$ ，实验发现在所有电压下， $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 簇比 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 簇对CO表现出更高的法拉第效率(FE)。当施加更大的负电位时，FE先增大后减小，在-0.6 V时达到最大值。这种趋势与最近报道的磷化氢/硫代盐共保护 $\text{Au}_{55}$ 簇相似。 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 的最佳催化性能是在-0.6 V下， $\text{FE}_{\text{CO}}$ 值为92.7%，显著高于硫代酸盐保护的 $\text{Au}_{25}$ 簇，此外， $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 簇在-0.6 V时表现134 A/g<sub>Au</sub>的质量活度，远高于相同电位下Au纳米粒子的值。相比之下， $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 簇在-0.6 V时的 $\text{FE}_{\text{CO}}$ 值为70.6%，与 $[\text{Au}_{11}(\text{PPh}_3)_8\text{Cl}_2]^+$ 的报道值接近，质量活度为75.8 A/g<sub>Au</sub>，表明 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 的活度较低。值得注意的是， $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 簇不仅对 $\text{CO}_2\text{RR}$ 表现出良好的选择性和活性，而且在电化学 $\text{CO}_2\text{RR}$ 过程中能够维持较好的稳定性，稳定性测试结果表明，在-0.6 V下电解10 h，电流密度稳定在-3.5 mA cm<sup>-2</sup>， $\text{FE}_{\text{CO}}$ 仅略有下降（下降了5.6%）。而且 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 电极在空气中存放一个月后，其性能测量结果显示，-0.6 V时 $\text{FE}_{\text{CO}}$ 仅下降3.4%。这些结果证明了 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 团簇是一种稳定的 $\text{CO}_2\text{RR}$ 催化剂。最后为了理解 $\text{CO}_2\text{RR}$ 在 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 上的作用机理采用了DFT计算，通过两种纳米团簇的反应路径，发现 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3]^{3+}$ 中的H原子可以直接氢化 $\text{CO}_2$ 生成吸附的\*COOH，吉布斯自由能( $\Delta\text{G}$ )变化为0.85 eV。随后\*COOH上发生电质子还原过程，形成吸附的 $\text{CO}^*$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 。虽然CO在 $[\text{Au}_{22}\text{H}_2]^{3+}$ 上的解吸势垒比在 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 上的解吸势垒高，但\*COOH中间体在 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 上的生成要比在 $[\text{Au}_{22}\text{H}_2]^{3+}$ 上的生成困难得多。这是因为 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 簇需要电解质中的质子还原才能形成\*COOH。DFT谱图表明，在 $[\text{Au}_{22}\text{H}_2]^{3+}$ 上比在 $[\text{Au}_{11}]^{3+}$ 上更有利于CO的形成，这与实验测试结果一致。此外，理论计算结果还表明 $[\text{Au}_{22}\text{H}_2]^{3+}$ 中的H空位可以通过质子还原很容易地得以恢复，从而实现催化循环。

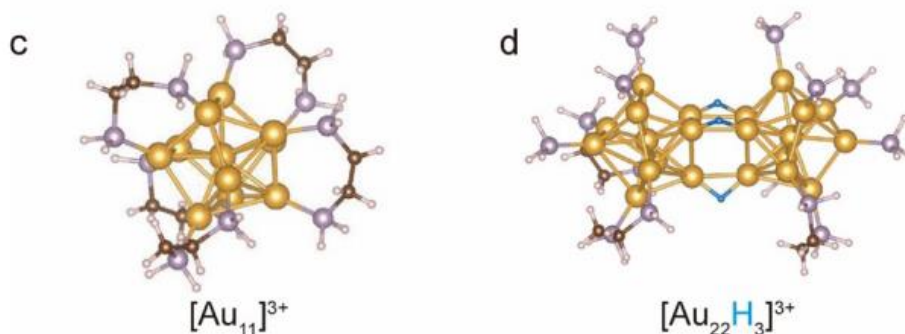


图1  $[\text{Au}_{11}(\text{dppe})_5]^{3+}$ 和 $[\text{Au}_{22}(\text{dppe})_3(\text{PPh}_3)_8\text{H}_3]^{3+}$ 簇结构式（颜色：Au=黄色；C=棕色；P=紫色；氢化物=蓝色；H在配体=白色上）

该研究合成了一种新的杂配型三氢化金纳米团簇 $[\text{Au}_{22}\text{H}_3(\text{dppe})_3(\text{PPh}_3)_8]^{3+}$ 。混合配体的使用为簇提供了 Au-H 活性位点和良好的稳定性。该簇是一种优异的电化学  $\text{CO}_2\text{RR}$  催化剂，对 CO 表现出高选择性（在 -0.6 V 时，92.7% FE 和 134 A/g<sub>Au</sub> 质量活性）和长期稳定性。对  $\text{CO}_2\text{RR}$  机制的 DFT 研究表明，Au 纳米氢化物簇促进关键\*COOH 中间体的形成，从而有利于 CO 产物。该研究揭示了一种独特的具有良好原位保护的金纳米氢化物簇  $\text{CO}_2\text{RR}$  的催化中心机制，并提出新的设计方法用于理解结构与性能之间关系和能源应用的纳米催化剂。相关研究成果发表在《*Journal of the American Chemical Society*》<sup>16</sup>。

（严烙意 汤匀）

## 研究首次提出短路将导致固态电池出现显著安全风险

固态电池（SSB）技术是目前电化学储能领域的新兴前沿技术，能够广泛应用于小型设备到电动汽车和电网储能等诸多领域。用不易燃烧的固体电解质（SEs）替代传统锂离子电池（LIBs）中使用的挥发性和可燃液体电解质（LEs）几乎被普遍认为可以提高电池的安全性，然而，具有高能量密度的锂金属负极固态电池的安全性尚未得到严格的研究认证。

美国桑迪亚国家实验室 Alex M. Bates 及其同事提出了首个用于在几种故障情况下定量评估固态电池和锂离子电池的热量释放的热力学模型。在这项工作中，使用热力学模型来研究关于电池安全性的常见假设。首先，研究工作考虑了三种电池故障情况：①外部加热导致的热失控，进一步促使正极分解，以及可燃液体电解质在正极与氧气（ $\text{O}_2$ ）发生反应，对于 LIB，则与锂化石墨发生反应；②在保持电池机械完整性的同时，发生电池内部短路，将促使存储的电化学能转化为热能；③固体电解质的机械故障，正极产生的气体可以与负极中的锂自由反应。根据上述三种情况分别进行实验，结果表明，虽然在外部加热失效的情况下固态锂电池更具安全性这一观念是正确的，但是在电池短路失效时，ASSBs、SSBs 和 LIBs 中产生了相同的热量释放；在固体电解质完整性受到损害的情况下，将可能导致  $\text{O}_2$  在正极一侧更快的与锂金属接触，从而释放更多的热量，这表明 ASSBs 不一定比 LIBs 更安全。由于锂金属负极具有更高的能量密度，当在较小的质量和体积上产生相同热量的情况下，预计 ASSBs 将比 LIBs 达到更高的温度。而在固态电池应用过程中，由于锂枝晶可以通过固体电解质生长到达正极表面，因此，短路是一个常见现象。固态电池中受能量密度不断增大的需求驱动，固体电解质变得更薄，防止枝晶生长的能力也相应降低。在将 ASSBs 商业化应用之前，防止锂枝晶生长并确保活性物质不会穿过固体电解质是需要克服的关键安全问题。上述模型测试提供的数据表明，随着 ASSB

<sup>16</sup> Ze-Hua Gao, Kecheng Wei, Tao Wu, et al., A Heteroleptic Gold Hydride Nanocluster for Efficient and Selective Electrocatalytic Reduction of  $\text{CO}_2$  to CO. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, DOI: 10.1021/jacs.2c00725



和 SSB 技术的成熟，尽管材料的进步可能避免电池短路的概率，但潜在温度上升问题依然存在。目前的工作清楚地表明，能量密度、固体电解质厚度和电池设计的演变会影响电池潜在的安全问题。因此，研究人员提出随着材料、组件和更大规格电池的开发，对当前和更高级别的安全测试可能并不代表未来 SSB 完全的安全性。在此，对包含可燃液体电解质的 SSB 安全性进行定量分析，结果表明，在 SSB 中添加可燃液体电解质可提高界面电阻，但这一操作被认为会降低 SSB 的安全性，它不是商业上可行的解决方案。由于在所有装置中，能量存储过程中放电而导致的意外热释放是一种常见现象，其后果很大程度上取决于能量密度，这将对 SSB 的选择产生不利影响，随着对提高能量密度电池的继续推进，故障时的最高温度将会升高，这将导致电池安全问题。

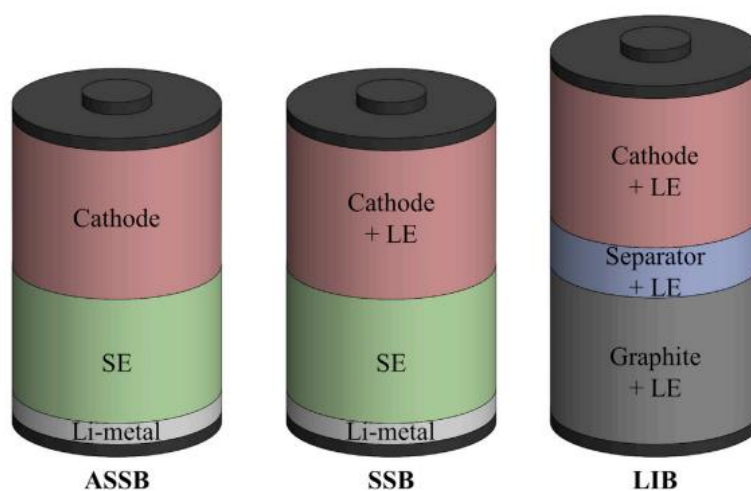


图 1 ASSB、SSB 和 LIB 的配置示意图

该研究首次提出了在故障情况下定量评估固态电池和传统锂离子电池的热量释放的热力学模型。结果表明，短路的全固态电池可以达到比传统锂离子电池高得多的温度，可能通过易燃包装或附近其他的材料导致火灾。随着对更高能量密度电池的持续推动，失效时的最高温度将会增加，预计这将对全固态电池安全性产生重大影响。相关研究成果发表在《Joule》<sup>17</sup>。

(严烙意 汤匀)

<sup>17</sup> Alex M. Bates, Yuliya Preger, Loraine Torres-Castro, et al. Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries? *Joule*, 2022, DOI: 10.1016/j.joule.2022.02.007

# 能源战略研究

## 美国国家科学院《化学工程新方向》报告探讨能源脱碳技术

2月9日，美国国家科学院、工程院和医学院联合发布《化学工程新方向》<sup>18</sup>报告，呼吁对美国化学工程相关科研和产业活动进行新的投资，并开展必要的跨学科、跨部门合作，以推进实现碳中和转型的社会目标，确保可持续生产和使用食品和水，开发先进的医疗技术和工程解决方案以实现健康公平，减少制造业的浪费和污染。报告中专章探讨了能源系统低碳转型关键技术面临的挑战和机遇，包括开发新的低碳或零碳能源技术，推进光化学领域的发展，尽量减少能源系统相关用水量，开发具有成本效益且安全的碳捕集、利用和封存技术，实现向低碳能源系统转型。关键内容如下：

### 1、能源系统脱碳必要性

国际气候科学界已经确立了全球温室气体排放与人类行为和能源使用之间的联系。从1750年工业革命开始到现在，大气中的CO<sub>2</sub>浓度与人为碳排放速度密切相关（图1）。20世纪中叶全球CO<sub>2</sub>排放量上升到约50亿吨/年，到2000年超过350亿吨/年。为实现在本世纪将全球温升控制在2°C以内，对于2040年前能源系统的发展具有以下共识：①石油和天然气将继续在能源结构中占有重要地位；②煤炭使用量将显著下降；③来自非生物可再生能源（如太阳能、风能、水力发电）和生物基（如生物能源）的能源载体将显著增长；④碳捕集、利用和封存（CCUS）技术将成为降低CO<sub>2</sub>排放的关键技术。

到2070年，电力在终端能源需求中的份额将从目前20%左右增长到50%以上。其中三分之一的电力需求将来自太阳能，另外20%的电力来自风能。全球所有行业（发电、工业、交通运输和建筑等）为实现温升低于2°C目标需采取四大关键行动：①提升能源效率；②增加低碳能源使用比例；③开发和部署新能源和储能技术；④政府需推动制定具有成本效益的解决方案。

<sup>18</sup> New Directions for Chemical Engineering. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26342/new-directions-for-chemical-engineering>

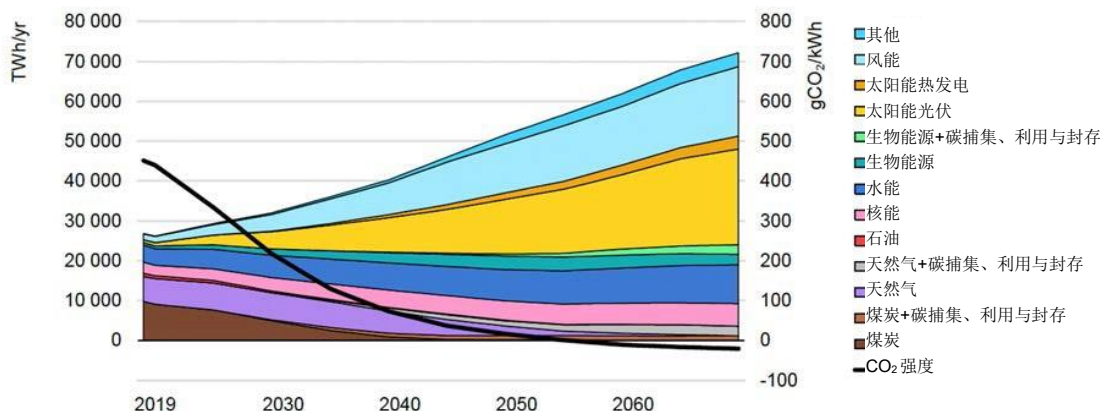


图 1 2019-2070 年可持续发展情景中按燃料技术类型预测的全球发电量

## 2、不同一次能源对实现能源系统脱碳的关键作用

### (1) 太阳能

地球上的主要能源来自太阳光子通量，与其他能源载体相比，光子不能被储存，而是通过自然过程转化为热、化学或电的形式，对局部和全球气候产生重大影响。对于光子，其被捕获和转化为能源载体（电子、热、化学能，如  $H_2$ 、 $NH_3$  或低碳氢化合物/醇等）后可以储存并运输到消费者和市场中。几种重要的光子直接捕获和转化方式包括：①直接光子捕获并转换为电子作为能源载体。半导体首先通过带隙的电子激发捕获光子，然后以光伏发电的形式收集激发的电子，将太阳能直接转换为电子。②将光子转化为  $H_2$ 、 $NH_3$  或有机燃料作为能源载体。这种策略解决了太阳能捕获中固有的间歇性问题，通过光催化分解水制氢是将太阳能转化为高价值化学品的有效途径。③光子转化为热作为能源载体。这种光子能量作为热量的捕获和存储可以直接用于商业或住宅空间的环境温度控制；或作为现有化工厂或生产流程中的工艺热；或转化为电子或氢。

### (2) 化石燃料

化石燃料（煤炭、石油和天然气）对社会的发展和进步至关重要，到 2050 年，化石燃料仍将继续在能源结构中占有重要地位，因此当务之急是减少化石燃料的碳足迹。

**煤炭**是所有化石燃料资源中最丰富和最廉价的，可以转化为气体或液体来生产化学品和燃料，但目前主要用于直接燃烧。未来对煤炭脱碳行动主要在于提高燃煤电厂热效率，产生成本效益，实现碳捕集和封存，进一步改善排放控制和降低耗水量，具体包括：①通过高温材料和更高的涡轮入口温度提高工厂效率；②在新的或改造燃煤电厂中应用具有成本效益和可扩展的二氧化碳捕集技术；③永久封存二氧化碳；④改进排放控制系统，以实现所有污染物的近零排放；⑤开发先进的冷却水管理方法，以减少用水需求和污染物排放。

**天然气**为迈向可再生能源的未来提供了更清洁的桥梁，预计将是未来几十年唯

一增长的化石能源。然而，天然气的长期前景不太确定，需要在整个价值链中进行创新，才能继续在未来低碳能源结构中扮演关键角色，具体行动包括：①在天然气开采过程的水质管理方面取得进展；进一步减少甲烷向大气中的排放；加速开发二氧化碳替代水作为压裂剂。②开发天然气分离和提纯的低能耗工艺。③控制天然气储运过程的甲烷泄漏；应用更高效的压缩机和热交换器；提高管道运营效率的智能传感器；通过管道进行洲际运输；开发低成本管道材料，实现天然气和高浓度氢气（>20%）的掺混运输。④开发商业上可行的碳捕集、利用与封存技术；提高天然气系统整体效率，包括提高燃烧效率和废热回收，以及开发创新控制和低成本传感器，以实现数据驱动的作业；开发三联产技术（冷热电联供系统）；设计天然气与可再生能源，特别是太阳能和风能多能融合的新工艺。

石油工业的需求推动了化工科技的诸多进步，而这些进步反过来又促进了石油工业的发展。非常规致密油/页岩油的挑战在于提高其采收率，因此，需要对储层进行水力压裂以形成油气流动路径，具体行动包括：①改善水资源管理。需要低成本水处理技术来最大限度地循环利用水，从而最大限度地减少淡水的使用。②提高采收率，延长油井寿命。需要改进压裂技术以创造更高效和更耐用的油气流动通道。③实现数据赋能。从储层数据中获得有意义的知识，用于实时快速可视化和预测，以实现有效决策。④甲烷管理。开发低成本模块化技术，用于转换为液体产品作为通风的替代品；开发使用空气代替天然气作为气动控制器工作流体的方法；开发用于甲烷泄漏控制和检测的智能传感器；改进部署高效压缩机的方法。

### （3）生物燃料

自 20 世纪 70 年代以来，生物乙醇已在巴西成功实现规模化生产，随后在其他国家也实现规模化，主要来自甘蔗和玉米。而生物柴油主要来自废弃油脂。目前，如何从副产品中高效提取高价值产品（例如，生物柴油生产中的甘油），从乙醇生产过程中捕集和分离二氧化碳，以及扩大乙醇以外的燃料产品范围，仍然是提高生物燃料规模化生产关键所在。

### （4）风能

风能目前是美国最大的可再生电力来源。2019 年，风能输出约占美国电力供应的 7%，装机容量为 100 吉瓦，相当于为约 3200 万户家庭供电。在全球范围内，截至 2020 年风能约占电力需求的 5%。风能领域材料研究、开发和推广的具体行动包括：①开发用于风力涡轮机叶片的碳复合材料和/或回收材料；②开发用于风力涡轮机结构单元（如电机和齿轮箱）的水泥和钢铁低碳制造工艺；③开发最先进的风力涡轮机加工制造方法和润滑剂。现代涡轮机的大直径带来了巨大的制造和运输挑战，以及陆上和海上装置对模块化制造和现场组装的高需求。用于捕获风能的装置还需要配套本地的储能装置和强大的传感器和控制系统，并且伴随着对沿海生态系统以

及陆地和海洋动物生命的负面影响和环境问题。

### **(5) 海洋能**

海洋能源包括来自海浪、潮汐运动、洋流、盐度梯度和热转换等，未来海洋能开发利用的具体行动包括：①开发耐海水腐蚀的材料；②开发能够应对波浪以 8-10 秒快速周期施加疲劳载荷的柔性材料；③开发水下设备用防污涂料；④开发电活性聚合物（例如，介电弹性体、压电材料、离子聚合物金属复合材料和摩擦电材料等）。

### **(6) 核能**

目前技术主要是基于轻水反应堆的核裂变。先进的核工业热电联产为解决大规模工业排放问题提供了一条潜在的应用途径。先进核反应堆能够为各种工业过程提供高温工艺热，但要实际应用还需要显著降低成本，具体将进行三方面行动：①开发新型三层各向同性碳包覆（TRISO）燃料颗粒和熔盐，具有更好的工艺安全性；②实现广泛或完全的自动化，从而显著降低运营成本；③对标准反应堆电厂进行智能监控。

## **3、不同二次能源及其相关技术对实现能源系统脱碳的关键作用**

### **(1) 电力**

在发电过程中减少温室气体排放、轻型和中型车辆电气化以及住宅/商业供暖，对于近期和中期能源部门的脱碳至关重要。自 2009 年以来，美国最大的 CO<sub>2</sub> 排放源燃煤电厂的发电量有所下降，而天然气和可再生能源的发电量均有所增加。2020 年，美国公用事业规模的发电量约为 4000 太瓦时，其中约 60% 来自化石燃料，约 20% 来自核能，还有大约 20% 来自可再生能源。与页岩气、风电、太阳能发电和并网储能相关的关键技术成本大幅下降，使得从煤炭向天然气和可再生能源的转型成为可能。最近研究表明，随着技术创新，发电领域将加速实现脱碳。

### **(2) 低碳液态化石燃料**

来自原油的液态烃因具有更高能量密度、易于储存、成本低且基础设施完善等优势，已经成为交通领域更受青睐的二次能源。然而，要使其在未来低碳能源结构中发挥更大作用，就需要进一步减少碳足迹。2019 年，全球液态烃的需求量为 1 亿桶/天，其中 58% 用于交通运输领域，14% 用于化学品加工，12% 用于发电/建筑领域，16% 用于其他工业领域。预计到 2040 年，其需求量将增加，但不同领域需求有所变化：预计工业领域和发电/建筑领域的需求将减少；化学品加工领域液态烃的需求将增加；交通运输领域预计总体需求将增加，特别是在重型长途运输领域。

### **(3) 石油炼化**

目前大多数炼油厂的设计和改进主要是为了更高效生产汽油，而柴油和其他燃料及化学品通常是次要产品。在炼油厂运营过程中减少二氧化碳排放的行动包括：

①进一步改进能源管理系统（EMS）来提高能源效率，确保炼油厂按照最节能的标

准运行；②用可再生能源（例如绿色电力）代替液体燃料的燃烧；③使用进口或本土的可再生能源，并生产可再生（绿色）氢气；④利用运营过程中产生的低品位热量来发电；⑤用电替代蒸汽驱动旋转电机和加热器；⑥炼油厂烟气应用碳捕集、利用和封存技术；⑦使用更轻、更低硫原油，并将石油和生物质精炼相结合；⑧在现有炼油厂内整合电力合成燃料（e-fuels），以降低低碳液体燃料的生产成本；⑨进一步耦合石化产品生产以优化产品结构。

#### （4）氢能

氢能是一种多用途能源载体，对清洁、低碳能源体系转型具有重大推动潜力。为实现这一潜力，需采取以下行动：①增加非化石能源制氢产量；②使用清洁电力进行水解制氢，大幅增加清洁氢气的产量；③建造用于氢能大规模制备和存储的基础设施，以满足不断增长的能源需求。如今，氢气主要通过天然气蒸汽重整来生产，天然气部分氧化（催化和非催化）和自热重整等技术也在小范围使用。在一些国家，特别是在亚洲国家，主要是通过煤制氢。通过水电解生产也是一种商业化技术，但规模较小，成本较高。甲烷热解，或利用可再生电力对天然气进行甲烷裂解以生产氢气，目前正处于商业示范阶段。另外，还有多种途径生产低碳氢，例如热化学分解水、直接光催化、微生物的生物生产等，都处于不同的研发阶段。

#### （5）合成燃料

合成燃料是通过氢和碳源转化制成可用作能源载体的化合物，如甲烷、甲醇、乙醇，以及汽油、柴油、航空燃料等高碳产品。氨也越来越多地被视为一种不产生二氧化碳的合成燃料，尽管目前合成氨仍然是二氧化碳排放的主要来源之一。电力合成燃料的生产需要大量电力，例如，需要 25 千瓦时的电能才能从电解水制氢和直接空气碳捕集的 CO<sub>2</sub> 中生产 1 升合成煤油。

#### （6）储能

世界能源系统不断演变的特性为储能规模发展创造了巨大需求，并且这一趋势在未来几年将会加速演进。储能系统的特性可以随规模和应用而变化。例如，在车辆应用中，动力电池的重量和尺寸至关重要；相比之下，在电网规模储能中，电池的重量并不重要。电子储能和化学键储能之间的重要区别在于特定的存储介质可以循环的次数。对于基于化学键的燃料，存储只需要一个油箱，即使经过数千次循环，预计存储介质也几乎不会发生变化，未来可以在认识蒸发和侵蚀以及改进泄漏检测方面采取积极措施。然而，电池在循环过程中往往会退化，许多此类降解过程源于化学反应或由基本化工原理驱动的相成核和生长，未来可以在延长电池寿命的开发方面发挥积极行动。同时，为了使电池成为真正可持续能源系统的核心部分，需考虑其报废处理或回收利用。

### 4、不同能源终端应用部门对实现能源系统脱碳的关键作用

## (1) 交通运输部门

2018 年，交通运输部门排放的二氧化碳占全球二氧化碳排放量的近四分之一，努力实现交通运输脱碳对于实现《巴黎协定》的目标至关重要。低碳转型战略将依赖于电子、氢能和低碳液体燃料等能源载体的联合使用，特别是先进的生物燃料和合成液体燃料。

在**电动汽车领域**，锂离子电池的成功开发和制造发挥了关键作用，未来推动锂电池技术发展将采取以下行动：①进一步增加每单位重量和体积的能量密度；②在 1 美元/千瓦时的基础上持续降低成本；③能够快速准确地验证和预测电池寿命；④快速充电，同时尽可能延长电池寿命和保持整体安全性；⑤直接回收电池正负极，以减少昂贵的地质开采；⑥积极研究下一代锂电池，包括锂空气电池、锂硫电池、锂金属电池以及固态电池。

在**燃料电池汽车领域**，燃料电池汽车更适合长距离行驶、承载重量更大的重型商用车。未来该领域主要挑战和实施行动包括：①降低成本。降低催化剂中铂含量，开发无铂电极组件。②提高耐用性。一个重要手段是增加催化剂负载，但这会增加成本。因此，设计耐烧结催化剂或用成本较低的金属代替铂。③提高效率。目前，质子交换膜燃料电池的峰值功率效率仅为 60%。

在**内燃机汽车领域**，未来可以在提高燃油效率方面加快创新，具体行动包括：①开发先进的燃烧技术（包括低温燃烧）；②实现配件电动化和余热回收；③开发混合动力汽车；④开发重量轻、具有新的空气动力学特征的汽车；⑤开发节能轮胎和监控系统；⑥开发基于 GPS 的先进预测监控技术。通过使用低碳液体燃料，可以减少以内燃机为动力的重型汽车温室气体排放量。

## (2) 工业部门

工业部门作为能源密集型行业，世界上几乎一半的能源都用于工业活动，其中，水泥、钢铁和化工生产占工业二氧化碳排放量的 70% 左右。

在**水泥生产方面**，超过 50% 的 CO<sub>2</sub> 排放量与工艺相关（石灰石煅烧），与能源无关。水泥行业深度脱碳的关键利用是熟料替代（如补充胶凝材料）、低碳燃料、CCUS 以及水泥窑电气化，此外进一步研发和示范脱碳水泥工艺是十分必要的，包括：①使用替代原材料提高混凝土性能和耐久性，同时满足施工规范和标准；②开发创新方法，以低能耗和低成本方式实现大规模非净化 CO<sub>2</sub> 用于不同的产品流；③开发能够在高温下满足水泥生产的电窑；④推进废生物质和绿氢在水泥窑中的利用；⑤在改造和新建的水泥厂中实现高碳捕集效率（超过 90%）；⑥开发更好的催化剂和工艺设计，以提供更高的效率水平，降低成本，并降低水泥厂碳捕集、利用与封存的材料消耗或废物产生；⑦完善 CCUS 技术的基础设施建设。

在**钢铁生产方面**，脱碳关键技术包括：①提高能源效率；②转向低碳燃料；③

使用绿氢代替天然气直接还原铁（DRI）；④使用可再生电能电解铁矿石生产铁；⑤燃烧后利用碳捕集、利用与封存技术（如高炉炉顶气体循环）；⑥推进碳利用（碳转化为乙醇或化学品）；⑦绿氢等离子体熔炼还原。

在**化工方面**，脱碳关键技术包括：①进行能源系统工程优化；②低碳燃料转换；③开发创新催化工艺（例如，通过石脑油催化裂化或可再生甲醇生产烯烃）；④开发先进的分离工艺；⑤实现电气化；⑥向低碳原料和工艺过渡（例如，生物质、氢和氨、人工光合成、可再生能源电化学、生物基塑料生产等）；⑦采用 CCUS 技术。

在**石化方面**，脱碳关键技术包括：①低碳燃料转换；②实现电气化；③实现生物质水热液化和生物炼油；④开发合成燃料；⑤减少或消除燃烧；⑥开发先进的选择性膜；⑦开发先进的控制和改进的监控系统；⑧采用碳捕集、利用与封存技术；⑨开发催化裂化、渐进式蒸馏、自热回收和生物脱硫等先进工艺。

在**食品饮料生产方面**，脱碳关键技术包括：①燃料转换为低温室气体来源；②提高工厂效率；③利用热泵、混合锅炉、感应加热、电介质加热和先进的冷却/制冷技术；④实现脱水、干燥和工艺加热应用的电气化；⑤开发先进的加工和保存材料，减少在食品供应中的浪费。

### （3）商业和建筑部门

提高建筑材料的性能是提高商业住宅能源效率的关键途径。具体行动包括：①开发节能材料，例如研发更有效反射太阳光的屋顶涂料，从而减少建筑物的制冷负荷；②开发活性物质，例如“智能玻璃”，能适应外部阳光减少建筑物净能源需求。

## 5、不同负碳技术对实现能源系统脱碳的关键作用

### （1）碳捕集、利用与封存技术（CCUS）

未来发展 CCUS 技术将开展以下行动：在**碳捕集领域**，将设计高性能溶剂，开发环保溶剂工艺；设计吸附材料和集成工艺；设计并开发高性能薄膜和制膜工艺。在**碳利用领域**，设计提高碳储量的碳氢化合物界面；将 CO<sub>2</sub> 通过催化、电化学和光化学途径转化为燃料、化学品和新材料；利用微生物和仿生方法来转化 CO<sub>2</sub>。在**碳封存领域**，推进多物理场和多尺度流体流动以实现碳封存；定位、评估和修复现有和废弃的油井；优化 CO<sub>2</sub> 的注入速率。在**跨领域方面**，进行跨尺度集成实验、模拟和机器学习，以指导材料和工艺开发；将社会因素纳入决策研究；整合生命周期评价和环境、社会因素，以优化技术组合。

### （2）直接空气碳捕集技术（DAC）

该领域未来将重点关注以下内容：①开发低成本的固体吸附剂；②开发 CO<sub>2</sub> 高选择性材料；③开发空气环境条件下高活性物质；④开发具有提高传质系数、高通量和低压降的碳捕集装置；⑤开发长寿命、高稳定性的催化剂添加剂和吸附剂基质材料。



### (3) 碳利用技术

CO<sub>2</sub>利用的主要途径包括矿物碳化、化学利用和生物利用，而甲烷（CH<sub>4</sub>）利用的主要途径是化学利用、生物利用和直接用作燃料。大多数碳利用技术都处于早期开发阶段。**矿物碳化领域**挑战和机遇包括控制碳化反应、工艺设计、加速碳化和晶体生长、碱性反应物的绿色合成路线、分析和表征工具以及构建方法。**CO<sub>2</sub>化学转化领域**挑战和机遇包括开发持久稳定的催化剂；开发低温电化学转化工艺；提高单位转化率并避免碳酸盐的形成。**CH<sub>4</sub>化学转化领域**挑战和机遇包括催化剂的开发、催化剂和反应器技术的整合，以及新化学目标的确定。**CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>生物转化领域**挑战和机遇包括优化生物反应器；开发分析和监测工具；进行基因组规模建模；提高代谢效率；探索副产物的价值化利用。

（汤匀 郭楷模）

## IEA：2021 年全球能源相关 CO<sub>2</sub> 排放强劲反弹创历史新高

3月8日，国际能源署（IEA）发布《全球能源回顾：2021 碳排放》报告<sup>19</sup>，对2021年能源相关CO<sub>2</sub>排放情况进行了系统回溯和分析，报告关键点如下：

### 1、2021 年能源相关二氧化碳排放量创下历史新高达到 363 亿吨

全球能源燃烧和工业过程产生的CO<sub>2</sub>排放量在2021年出现强劲反弹，较2020年同比增长6%达到363亿吨，达到了有史以来年度最高水平。

新冠疫情的流行对2020年的能源需求产生了深远影响，同期全球CO<sub>2</sub>排放量减少了5.1%。而2021年以来，在前所未有的财政和货币刺激以及疫苗快速推广的推动下（尽管不均衡），世界经历了极其迅速的经济复苏。2021年，尽管可再生能源发电量创下了有史以来最大的年度增长，但恶劣天气和能源市场条件使得能源需求强劲回升，导致了燃煤发电大幅增加。

与2020年相比，2021年全球能源相关CO<sub>2</sub>排放增量超过20亿吨，超过2010年成为绝对值同比增幅最大的一年。2021年的反弹逆转了2020年新冠疫情大流行产生的接近19亿吨CO<sub>2</sub>排放下降趋势。2021年的CO<sub>2</sub>排放量比2019年疫情前的水平还高出约1.8亿吨。

<sup>19</sup> Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>

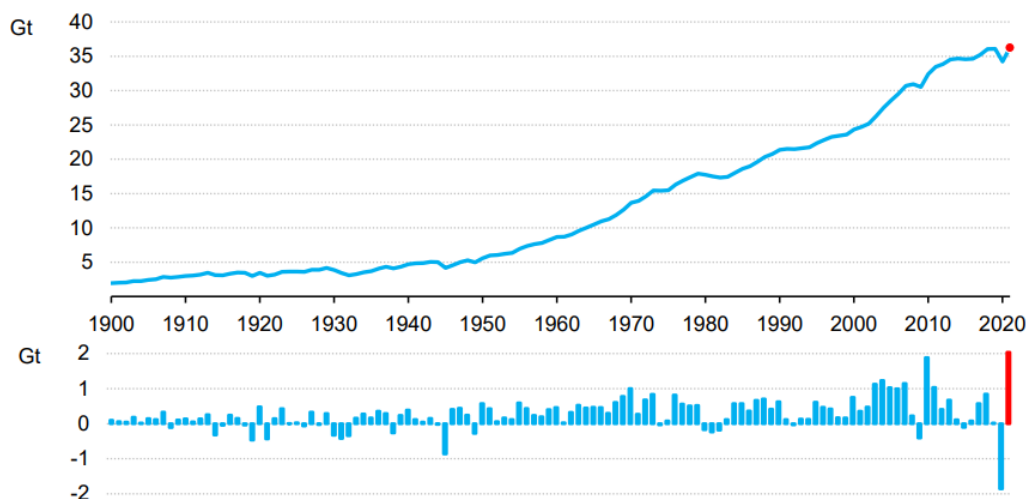


图 1 1900-2021 年能源燃烧和工业过程 CO<sub>2</sub> 排放总量及其年度变化（单位：十亿吨）

2021 年全球 CO<sub>2</sub> 排放增幅与全球经济产出增长 5.9% 一致。这标志着自 2010 年以来，二氧化碳排放量与国内生产总值（GDP）增长之间的最强耦合，2010 年随着世界摆脱全球金融危机，全球排放量反弹了 6.2%，经济产出增长了 5.1%。

## 2、世界并未完全走在可持续复苏的正确道路上

全球碳密集型经济复苏并非可持续复苏。尽管如此，某些发达经济体在经济复苏过程中强调了脱碳措施。IEA 的可持续复苏追踪显示，截至 2021 年 10 月，全球已支出 4700 亿美元用于 2030 年之前的可持续复苏措施。展望 2021-2023 年这一关键时期，迄今为止的措施每年可支出 4000 亿美元用于清洁能源和可持续复苏投资。然而，这仍然仅占 IEA 可持续复苏规划所需投资的 40%，该规划旨在到 2050 年实现全球净零排放的目标。

## 3、来自煤炭的 CO<sub>2</sub> 排放创历史新高

2021 年，煤炭使用产生碳排放占全球 CO<sub>2</sub> 排放增量的 40% 以上，达到 153 亿吨创造了历史新高，比 2014 年的峰值高出近 2 亿吨。由于各行业对天然气的需求都增加，天然气使用产生的碳排放量也反弹至 75 亿吨，远高于 2019 年的水平。由于 2021 年全球交通运输行业复苏有限，石油使用产生的碳排放仅为 107 亿吨，仍远低于疫情前的水平。

## 4、交通运输部门的石油需求比疫情前减少了 8%

2021 年，新冠疫情继续影响交通运输行业的石油使用量，石油每日需求量比 2019 年低 600 多万桶，相应的 CO<sub>2</sub> 排放量减少 6 亿吨。2021 年，与国际航空有关的 CO<sub>2</sub> 排放量仅为疫情前水平的 60%（3.7 亿吨）。在这一年中，由于许多主要经济体继续采取封锁措施和其他减少新冠疫情传播的措施，这也阻碍了道路交通运输活动的复苏进程。如果交通运输活动恢复到疫情前的水平，2021 年全球 CO<sub>2</sub> 排放量就会再增加 6 亿吨，而这会使石油碳排放达到 2019 年的水平，由此产生 7.8% 的 CO<sub>2</sub> 总

排放量增幅将是自 20 世纪 50 年代以来最快的增长速度。

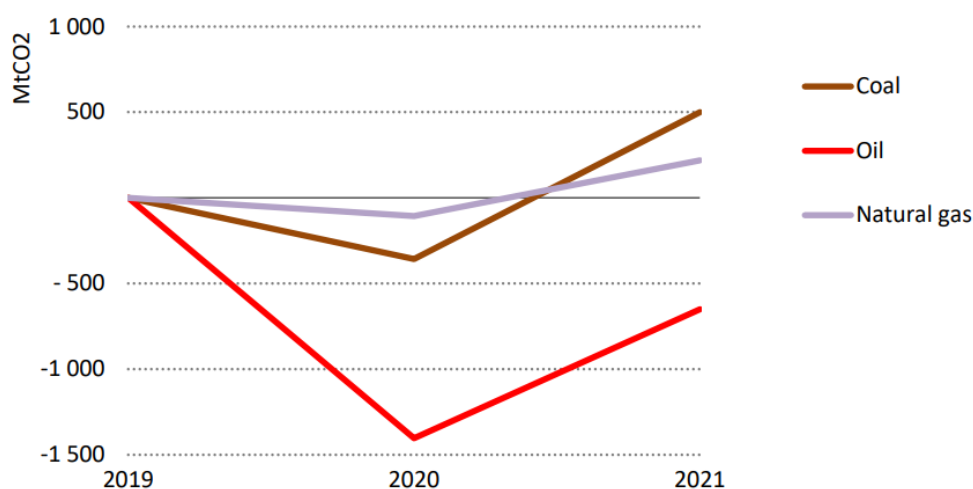


图 2 2019-2021 年化石燃料产生 CO<sub>2</sub> 排放量的变化态势 (单位: 百万吨)

### 5、全球发电厂的排放量达到了有史以来的最高水平

2021 年，CO<sub>2</sub> 排放增加最显著的部门是电力和供热行业，增长了 9 亿吨，占全球 CO<sub>2</sub> 排放增量的 46%。中国是推动上述增长的主要驱动力。

目前，受发达经济体、新兴市场和发展中国家增长的推动，全球建筑和工业部门的 CO<sub>2</sub> 排放量反弹至 2019 年的水平。中国是一个明显的例外，工业用煤减少，使工业部门的 CO<sub>2</sub> 排放量连续第二年低于 2019 年的水平。其中交通运输是全球唯一 CO<sub>2</sub> 排放量远低于 2019 年的行业。2021 年创纪录的电动汽车销售带来的减排效果被 SUV 销售的同步增长所抵消。

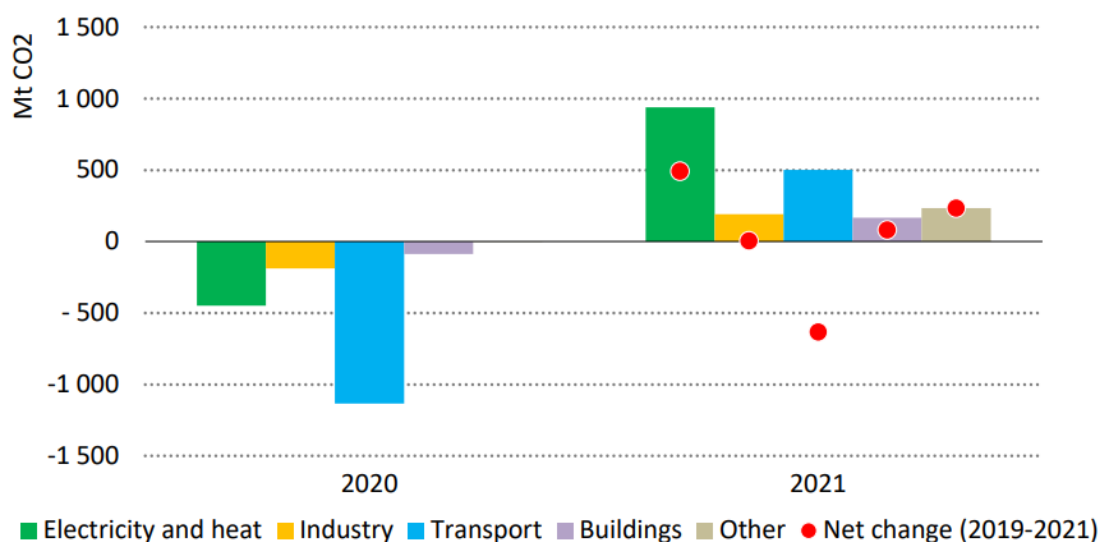


图 3 2020-2021 年各终端用能部门 CO<sub>2</sub> 排放量的变化态势 (单位: 百万吨)

2021 年，电力和供热部门的 CO<sub>2</sub> 排放量增加了 6.9%，这是全球电力需求创造有史以来最大同比增幅的结果。2021 年全球电力需求增加了近 1400 TWh，即同比增

长 5.9%，是 2020 年需求下降幅度的 15 倍以上。

供应的限制和高价格影响了中国和印度在一年中的某些时期煤炭消费量，否则 2021 年全球用于发电的煤炭使用量将会更高。

## 6、飙升的天然气价格导致从天然气转向为煤炭，产生超过 1 亿吨的新增排放

创纪录的天然气价格加剧了 2021 年对燃煤发电的依赖。在 2021 年的大部分时间里，美国和许多欧洲电力系统现有燃煤电厂的运营成本要比燃气电厂的运营成本低得多。天然气转向煤炭使全球发电的 CO<sub>2</sub> 排放量增加了超过 1 亿吨，尤其是在美国和欧洲，天然气发电厂和燃煤发电厂之间的竞争最为激烈。在美国，燃煤电厂的排放量在 2021 年增加了 17%，但仍低于 2019 年水平。欧盟增幅为 16%，但仍明显低于 2020 年 21% 的降幅。

## 7、2021 年可再生能源发电量创造有史以来最大的增长

尽管煤炭使用量出现反弹，但 2021 年可再生能源和核能在全球发电中所占份额高于煤炭；且可再生能源的发电量达到历史最高水平，超过 8000 TWh，比 2020 年高出 500 TWh。风能和太阳能光伏发电量分别增加了 270 TWh 和 170 TWh，而水电由于干旱的影响减少了 15 TWh，尤其是在美国和巴西。核电增加了 100 TWh。如果不增加可再生能源和核能的发电量，2021 年全球 CO<sub>2</sub> 排放量将增加 2.2 亿吨。

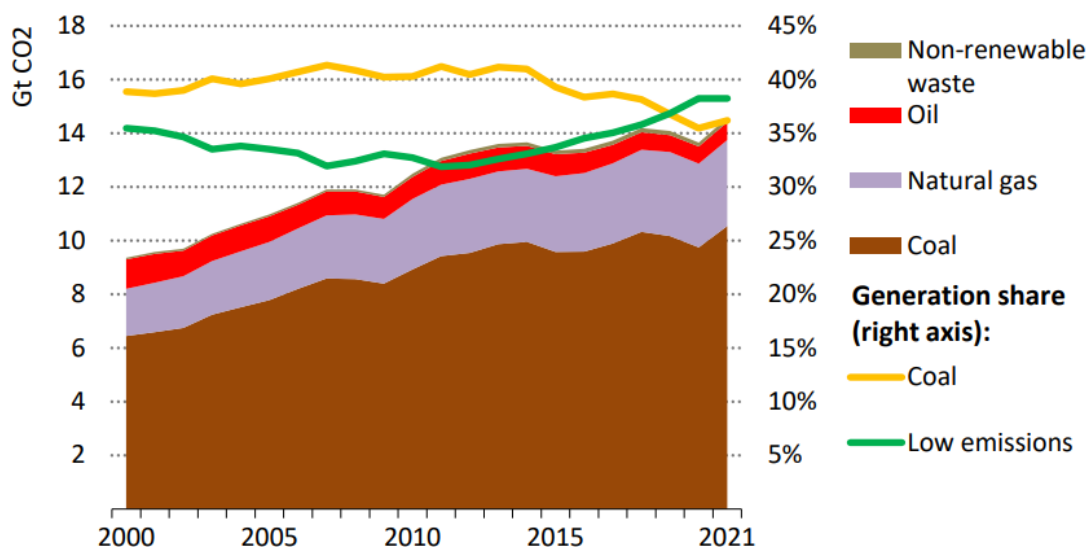


图 4 2000-2021 年发电和供热产生的 CO<sub>2</sub> 排放量变化态势（按燃料划分，单位：十亿吨）

## 8、全球 CO<sub>2</sub> 排放量反弹至超过疫情前水平，在很大程度上是由中国推动的

2021 年，全球几乎所有地区的 CO<sub>2</sub> 排放量都出现了增长，巴西和印度均增长超过 10%，日本小幅增长约 1%，中国增长 5%，而美国和欧盟的排放量均增长了约 7%。

2019-2021 年期间，中国 CO<sub>2</sub> 排放量增加了 7.5 亿吨。中国是唯一在 2020 年和 2021 年均实现经济增长的主要经济体。2019-2021 年期间，中国的碳排放增量超过了世界其他地区 5.7 亿吨的总计排放减量。

## 9、2021年中国的电力需求增长了10%，相当于整个非洲的总需求

中国的经济复苏应属于能源密集型活动。2019-2021年，中国单位GDP一次能源需求强度年均仅改善1%，而2008-2010年间为1.2%，2010-2019年平均改善率为3.7%。2021年，中国的能源强度主要受到电力行业变革的影响。随着GDP的快速增长和能源服务的进一步电气化，中国的电力需求在2021年增长了10%，高于8.4%的经济增速。近700 TWh的需求增加是中国有史以来最大的一次。尽管中国在2021年也实现了有史以来可再生能源发电量的最大增长，但随着需求的增长超过了低排放电力供应的增长，煤炭满足了56%的新增电力需求。2021年，中国可再生能源发电量接近2500 TWh，占全国总发电量的28%。

受到发电用煤量的增加，2021年印度的CO<sub>2</sub>排放量出现了明显反弹，比2019年的水平高出8000万吨。印度燃煤发电量创历史新高，比2020年的水平上升了13%，当时煤电发电量下降了3.7%。一定程度上是因为可再生能源的增长速度降至前五年平均速度的三分之一造成的。

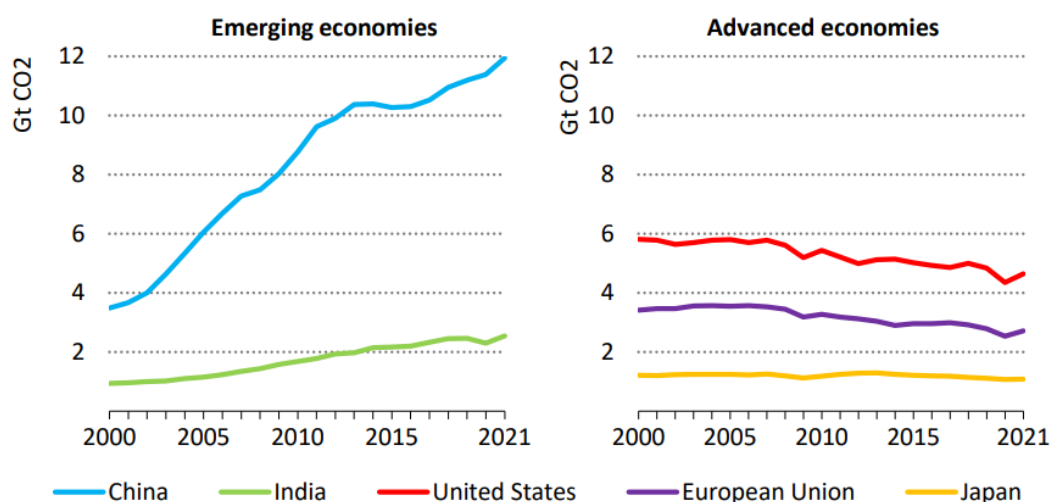


图5 2000-2021年主要新兴经济体和发达经济体CO<sub>2</sub>排放量变化趋势（单位：十亿吨）

2021年发达经济体的全球经济产出恢复至疫情前水平，但CO<sub>2</sub>排放量反弹的幅度没有那么大，表明经济增长和排放结构性脱钩具有长久趋势。2021年美国CO<sub>2</sub>排放量比2019年的水平低4%。在欧盟，这一数字不到2.4%。在日本，2020年排放量下降了3.7%，而到2021年反弹不到1%。在整个发达经济体，与2020年相比，2021年的可再生能源增加、电气化和能效提高等结构性改革避免了1亿吨CO<sub>2</sub>排放增量。

## 10、中国的人均CO<sub>2</sub>排放量现已超过发达经济体的平均水平

发达经济体的人均CO<sub>2</sub>排放量已降至8.2吨，低于中国8.4吨的水平。然而，发达经济体的总体平均水平掩盖了内部显著的差异：美国的人均排放量为14吨，而欧盟为6吨。

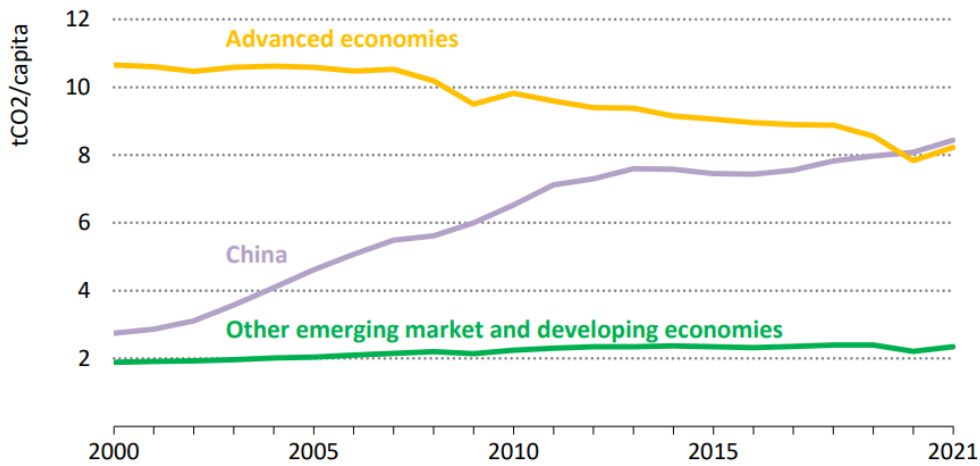


图 6 2000-2021 年各地区人均 CO<sub>2</sub> 排放量变化趋势 (单位: 吨 CO<sub>2</sub>/人)

2021 年, 全球 CO<sub>2</sub> 排放和 GDP 均增长约 6%, 全球经济产出的平均排放强度保持在 0.26 吨 CO<sub>2</sub>/千美元。中国单位 GDP 排放强度下降, 下降幅度超过 3%, 至 0.45 吨 CO<sub>2</sub>/千美元。尽管如此, 在主要经济体中, 中国单位 GDP 排放强度仍是最高, 主要原因是煤炭在中国能源结构中占据主导地位(占 60%, 而全球平均水平为 27%), 以及工业在中国经济中所占比例较高(占 39%, 而全球平均水平为 30%)。尽管如此, 中国单位 GDP 排放强度自 2000 年以来已经下降了 40%。在发达经济体中, 2021 年单位 GDP 排放强度略有上升, 但仍保持下降趋势。自 2010 年以来, 美国和欧盟的年均改善率约为 3%。

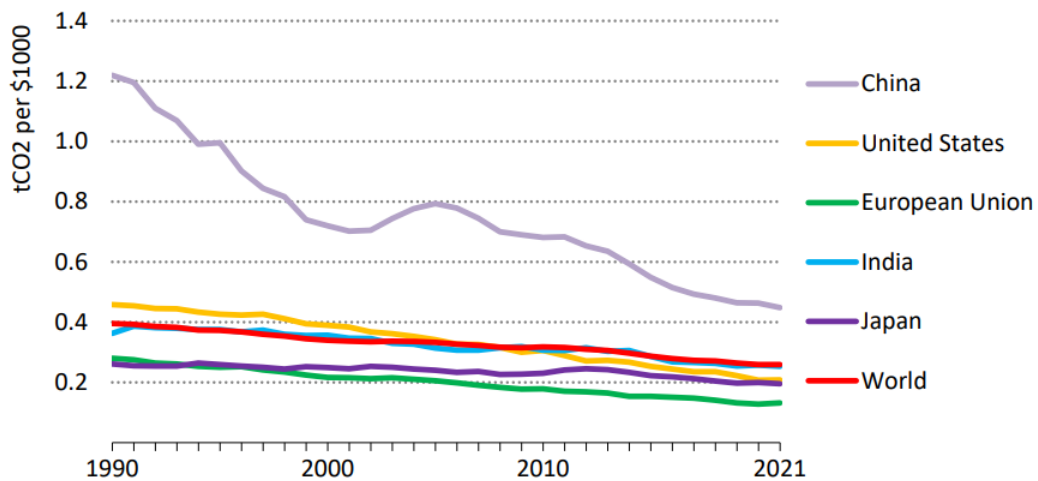


图 7 1990-2021 年主要经济体单位 GDP 排放强度变化趋势 (单位: 单位: 吨 CO<sub>2</sub>/千美元)

### 11、化石燃料使用量的激增将温室气体排放推至一个新的高峰

2021 年, 与能源相关 CO<sub>2</sub> 排放的增加, 推动能源领域温室气体排放上升到历史最高水平。2021 年温室气体总排放量达到了 408 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量, 超过了 2019 年的历史最高水平。2021 年, 能源燃烧和工业过程产生的 CO<sub>2</sub> 排放占能源部门温室气体总排放的近 89%。天然气放空燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放量占 0.7%。除 CO<sub>2</sub> 外, 与燃烧有关的逃逸甲烷排放量几乎占总量的 10%, 与燃烧有关的一氧化二氮排放量占 0.7%。2021

年，能源部门的甲烷排放量增加了不到 5%，仍低于 2019 年的水平。

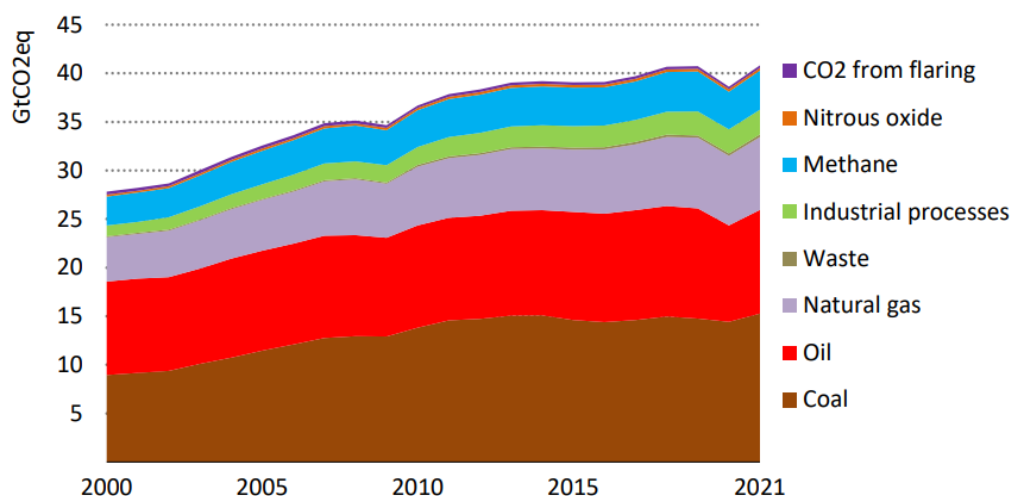


图 12 2000-2021 年与能源有关的温室气体排放（单位：十亿吨 CO<sub>2</sub> 当量）

（廖明月 郭楷模）

## IEA 发布《追踪清洁能源创新：聚焦中国》报告

3 月 7 日，国际能源署（IEA）发布《追踪清洁能源创新：聚焦中国》<sup>20</sup>报告，在 2021 年发布的《中国能源体系碳中和路线图》<sup>21</sup>报告基础上，进一步深入解析中国清洁能源创新的制度和政策现状。报告认为，过去 20 年中国能源创新在国际舞台发挥了重要作用，在太阳能光伏、风力涡轮机、电动汽车等行业已成为全球关键的技术开发和制造国，这离不开几十年来注重技术创新的政策布局，技术创新也不断支撑中国经济社会的进步。未来，清洁能源创新是中国“十四五”的核心政策之一，也将在中国实现 2030 年碳达峰、2060 年碳中和进程中发挥关键作用。报告关键点如下：

### 1、中国已成为全球能源领域专利申请的关键参与者

过去 30 年，中国低碳能源技术<sup>22</sup>专利申请量快速增长。1990 年，中国低碳能源技术国际专利申请数量几乎为零，1990-2000 年间迅速增长，但与其他发达国家相比总体活跃度仍较低。自 2000 年以来，中国以储能电池、电动汽车和太阳能为首的低碳能源技术专利申请蓬勃发展。2000-2012 年，中国专利申请量累计增长 35%；2015 年专利申请爆发式增长，2017 年申请量达 2012 年的两倍；2018-2019 年，中国光伏和电动汽车国际专利申请数量分别为 2008-2009 年的 6 倍和 8 倍。期间，国际专利申请占专利申请总量的比例不断增加，目前约 80% 的低碳能源技术专利在国外也受

<sup>20</sup> Tracking Clean Energy Innovation: Focus on China. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-innovation-focus-on-china>

<sup>21</sup> 本刊 2021 年第 6 期报道。

<sup>22</sup> 低碳能源技术指与能源部门相关的气候变化缓解技术。

到保护，这表明专利质量有所提高。基于能源领域技术专利布局分析发现，近年来中国已成为能源领域专利申请的关键参与者，特别是太阳能光伏、电动汽车和照明等技术，在全球所占份额越来越大，2019年中国在照明、供热/制冷、可再生能源、电动汽车技术专利申请份额分别为25%、21%、19%、11%。1990-2019年，中国可再生能源领域专利申请最为活跃，占全部专利申请的29%，其中光伏占17%、风能占4%。其次，储能电池技术专利申请占比达27%以上，电动汽车占13%。2017-2019年，中国储能电池、电动汽车和太阳能光伏技术占其能源专利申请量的2/3以上。

中国已实现由简单的太阳能光伏制造到技术创新的转变。通过资源支持、研发资助、市场拉动和有序竞争等政策引导，中国在短短20年内建立了全球领先的太阳能光伏产业，成为全球光伏电池和组件的主要创新来源，并多次打破效率纪录，在全球专利申请中所占份额越来越大。中国在降低太阳能光伏成本和提高性能方面取得显著成效，为储能电池和电动汽车领域的发展奠定了基础。中国在太阳能光伏领域的政策表明，“十四五”及未来，中国希望继续保持太阳能光伏和新型光伏技术的领先地位。

## 2、中国重视能源创新制度框架建设

中国能源创新格局主要包括设定优先目标、实施研发示范活动。“五年规划”为中国的能源创新活动指明了方向。在过去十年中，技术创新越来越得到重视，包括能源领域的技术创新。根据中央政府制定的指导方针，相关机构制定行动计划和研发计划，其中许多能源领域技术研发计划由科技部指导出台。“十四五”期间确定了多项能源创新优先发展的技术领域，包括新能源汽车和相关组件、电池、氢能、生物质能、储能及碳捕集、利用与封存（CCUS）等方面。

## 3、中国能源领域科技创新的“人、财、物”投入不断加大

根据IEA的统计数据，“十三五”期间，中国能源领域研发公共支出由2015年的73亿美元增加到2020年84亿美元（约占研发公共支出总额的5.5%），成为仅次于美国的全球第二大能源研发公共支出国，超过日本和欧洲等其他发达经济体，单位GDP的能源研发支出强度排全球第8。尽管中国在低碳技术开发方面的预算一直在稳步增加，履行了“创新使命”<sup>23</sup>组织的承诺，在清洁能源研发方面的支出仅次于美国，但仍在化石燃料研究方面投入了相当大一部分的预算。事实上，中国仍是世界上化石能源研发支出最多的国家。

IEA对全球上市公司研发支出的预估数据显示，中国企业，无论是国有、私营还是混合所有制企业，在能源研发上的支出比其他任何国家都多。2020年，中国企业在能源研发方面的支出接近350亿美元，比2019年增长15%，而欧洲、日本和美国企业的支出分别为300亿美元、175亿美元和150亿美元。中国企业能源研发支

<sup>23</sup> “创新使命”是一项全球倡议，旨在显著加快公共和私人全球清洁能源创新以应对全球气候变化、提供负担得起的清洁能源。这将加快实现《巴黎协定》目标和实现净零排放途径的进展。



出大部分用于开发更清洁或更有效地利用化石燃料技术。据估计，石油、天然气和煤炭约占总投资的 30%，高于电力和电网（27%）、汽车（16%）、可再生能源（11%）、氢能和储能（5%）、核能（4%）。目前，中国国有企业在核电、化石燃料等领域创新发挥着主体作用，而民营企业则是太阳能光伏、电动汽车和电池技术开发的核心参与者。

近年来，中国已成为由电动汽车初创企业等主导的清洁能源风险投资大国，这些企业获得大量的政府支持，包括公共基金、国有企业和大学合作等。

在人才培养方面，中国正提倡创新创业文化，并努力培养一支能够推动国家科技发展的成熟劳动力队伍。尽管中国的人均研发水平仍落后于其他任何国家，但受教育程度在不断提高，且中国研发人员的数量仍高于其他任何国家。

#### 4、中国在能源领域的知识产出数量和质量“双增长”

中国科研机构 and 高等院校在自然科学和工程领域的学术论文发表上位居全球前列。IEA 分析表明，2016-2019 年期间，中国发文量占全球的 1/3，超过欧洲（24%）、美国（13%）、日本和韩国（各占 4%）。中国科学院发布的《新能源技术研究的机遇与挑战》<sup>24</sup>报告显示，2015-2019 年，中国在 8 个新能源技术领域发表的学术论文占全球的 25%，且有继续增长的趋势。高被引学术论文的数量正在增加，这意味着知识产出质量提升，且有着更广泛的可见性。2021 年，中国在“自然指数”（Nature Index）<sup>25</sup>排名中位居第一。其中，中国科学院自然指数得分远高于其他国家国立科研机构，其科研产出超过法国国家研究中心、美国国家卫生研究院和劳伦斯伯克利国家实验室、西班牙国家研究委员会之和。

另一方面，中国被引用的自然科学和工程领域学术论文占全球的比例较小。具体来说，中国机构占全球 TOP 1% 论文（在特定领域和年份）的比例为 29%，低于其发文量占全球 33% 的比例。例如，2016-2019 年期间，清华大学在自然科学和工程领域发表的论文数量超过哈佛大学、斯坦福大学和麻省理工学院之和，位居全球第一，但全球 TOP 1% 论文仅为 1.7%，低于哈佛大学的 4.4%、斯坦福大学的 3.9% 和麻省理工学院的 3.7%。根据《新能源技术研究的机遇与挑战》报告，中国学术论文篇均被引频次落后于美国、德国和日本，研究成果的整体影响力需要进一步提高。然而，在以太阳能、氢能和生物质能为主导的能源领域，中国学术论文表现优于全球平均水平。在全球 TOP 1% 论文中，太阳能燃料（4.5%）、制氢（3.1%）、储能电池（2.3%）、太阳能光伏（2.2%）和燃料电池（1.3%）等占据相当大比重，表明这些技术在中国具有广阔的前景。

中国注重通过合资企业、海外研发技术中心等方式加强技术创新，这种协作创

<sup>24</sup> 《新能源技术研究的机遇与挑战》是由中国科学院与施普林格·自然集团合作，基于文献计量和专利分析，主要考察太阳能、风能、生物质能、地热、核能、氢能、储能和能源互联网等 8 类新能源技术。

<sup>25</sup> 自然指数是基于 82 种自然科学期刊评选出的高质量研究成果。

新已有效融入到中国创新体系中，并推动国内技术创新。例如，中国根据技术转让协议从美国和法国引入两种国外设计的核能反应堆，并成功建造反应堆实现商业化应用和出口。

除了增加能源研发支出、打造领军企业、投资科研机构 and 大学以外，中国还实施了有针对性的知识产权政策，强调自主技术创新，并设立专利申请激励机制。然而，中国与贸易伙伴之间仍存在有关知识产权不当行为的争议，同时由激励机制驱动的“申请专利”行为削弱了专利平均质量。

加强国际合作是中国能源创新战略的核心。在过去 30 年里，中国加强参与国际社会和多边能源创新平台，如国际能源署技术合作计划、“创新使命”组织、清洁能源部长级会议等，与 50 多个国家和地区建立联合研究创新机制，并积极推动伙伴关系可持续发展。然而，高层次的接触并不能立即转化为积极的合作。虽然中国政府积极参与国际能源创新合作，但中国研究人员与国际同行在共同申请发明专利或发表科学论文方面的合作仍相对较少。

### **5、市场作用机制有效推动能源科技创新**

中国具有独特的市场和经济特征，如国内市场规模大、中央决策和地方参与、产业发展的廉价资本、综合性全行业战略、清晰的国家愿景和市场信号等，是中国市场有效拉动创新的成功密码。市场创造和产业政策是中国发展战略的核心内容，推动制造业快速发展，服务于国内外市场。通过边做边学、合资企业和知识伙伴关系，并结合资源推动支持，随着产业的发展市场创造有助于提高科技创新能力。

然而，依靠集中管理的大规模产业政策在某些情况下可能会阻碍科技创新，需要解决关键问题才能实现碳中和行动目标。首先，中央决策能够迅速有效引导新的科技优先事项和长期目标，但存在“挑选赢家”的风险。相对于技术中立的政策方法，存在限制市场合理化和激进创新的可能性。其次，在某些情况下，产业政策会出现供需失衡现象，导致重工业等行业出现产能过剩。最后，当产业政策寻求降低成本以夺取国际市场份额或促进本地产业部署时，制定激励措施以提高技术性能可能是一项挑战，在某些情况下可能导致全球绩效创新水平的降低

此外，市场需求驱动型创新也是中国能源科技创新的重要因素，这是指传统的建制化研发计划体系之外的技术创新。中国在 20 世纪的创新体系，受到快速增长的能源技术市场需求与低支持、低研发资源之间矛盾的影响，形成一种由地方需求和支持刺激的创新文化，也叫“节俭式创新”。一个典型案例就是中国太阳能热水器技术的成功，这是随着对廉价、高效舒适供热系统的市场需求增加，但在早期阶段没有得到中央政府的支持，而是由民间技术开发到大规模生产。不过，这种创新模式存在局限性，技术水平落后于国家建制化研发计划体系集中支持的技术。

### **6、中国将重点布局面向碳中和目标的清洁能源科技创新**

过去 20 年，中国能源创新在国际舞台发挥了重要作用。展望未来，清洁能源创新将为中国实现碳中和目标发挥关键作用。政府政策显示，中国将重点推动原创和突破性创新项目；针对国家需求和战略机遇，优化资源配置；提高科研机构效率和效益，并使其结构现代化；进一步将企业作为创新主体；加强评估和监测机制。

“十四五”规划将能源创新作为加快经济社会发展的核心主题。2021 年，中国政府进一步完善了实现长期碳中和目标的计划，重点关注开发新技术，在全球供应链中寻求战略机遇（如低碳氢生产和应用、CCUS、生物质能、储能和先进电池、核能、关键矿物等）。未来，中国将努力继续保持清洁能源技术领导者地位，同时保持其在制造业的主导地位和竞争优势。

（刘俊 李岚春）



## 《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](mailto:energy@whlib.ac.cn)