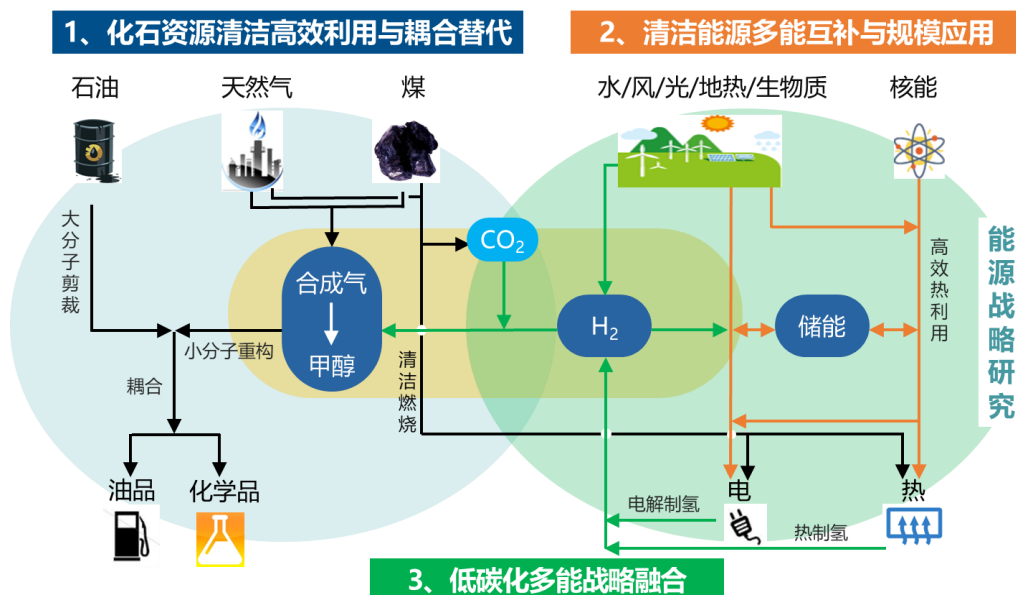




# 洁净能源科技动态监测快报

2020 年第 03 期（总第 05 期）



## 本期看点

- 牛津能源研究院分析新冠病毒疫情对全球石化行业影响
- DOE 资助 6400 万美元支持先进燃煤发电技术
- 欧盟可持续核能技术平台发布新版核能战略研究议程草案
- 欧盟总结先进替代燃料技术进展及部署障碍
- DOE 未来五年拟投入 1 亿美元推进人工光合系统研究
- IEA 发布德国能源政策评估报告

# 目 录

2020 年第 03 期 (总第 05 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

- 牛津能源研究院分析新冠病毒疫情对全球石化行业影响..... 2
- DOE 资助 6400 万美元支持先进燃煤发电技术..... 4
- 铜/氮掺杂纳米钻石复合催化剂开辟低成本高效电还原 CO<sub>2</sub> 新路径..... 5

## ◆ 清洁能源多能互补

- 欧盟可持续核能技术平台发布新版核能战略研究议程草案..... 7
- DOE 资助近 1.3 亿美元支持先进太阳能发电技术研发..... 10
- 美科学家在钙钛矿太阳电池封装工艺领域取得重大突破..... 11
- 原位表征技术首次揭露锂硫电池硫正极以液态存在于二维衬底..... 12

## ◆ 低碳化多能融合

- 欧盟总结先进替代燃料技术进展及部署障碍..... 14
- DOE 未来五年拟投入 1 亿美元推进人工光合系统研究..... 17
- 英国投入 9000 万英镑支持低碳排放能源技术开发与示范..... 18
- 丹麦资助 1.28 亿丹麦克朗支持可再生能源电力制氢项目..... 19
- 低成本异质复合双功能催化剂实现高效催化电解水产氢..... 20

## ◆ 能源战略研究

- IEA: 油气行业将为全球能源转型发挥重要作用..... 22
- IEA 发布德国能源政策评估报告..... 25

## 本期概要

**牛津能源研究院发布《新冠病毒：石化行业的风暴》报告，分析了新冠病毒爆发对全球石化行业的影响：**中国目前是全球制造业供应链的核心，新冠病毒的爆发对中国经济增长以及石化行业供应和需求的负面影响，使石化行业陷入了一场巨大的风暴。新冠病毒对中国制造业供应链的破坏远胜于 2003 年的 SARS 病毒，就石化产品而言，基本不可能改变中国作为最大需求方的情况，这将为全球石化市场带来风险。

**美国能源部（DOE）宣布在“Coal FIRST”计划框架下资助 6400 万美元，支持开发先进燃煤系统所需的关键部件，主要聚焦 7 大主题领域：**（1）超临界蒸汽循环发电系统的加压流化床燃烧器；（2）间接超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统；（3）直燃式超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统；（4）煤气化多联产系统；（5）直喷式燃煤发动机和燃气轮机再热联合循环系统；（6）模块化分级加压富氧燃烧发电系统；（7）无焰加压富氧燃烧发电系统。

**欧盟可持续核能技术平台（SNE-TP）发布新版《可持续核能战略研究议程》草案，提出了欧洲核能领域未来将开展的研究和开发优先事项：**（1）反应堆技术，涉及：运行和建造，在役检查、资格审查和无损监测，先进反应堆和下一代反应堆，小型模块化反应堆；（2）使能技术，涉及：核电厂安全，燃料开发、燃料循环和乏燃料管理，核电厂退役，社会、环境及经济条件；（3）交叉领域技术，涉及：数字化、建模与仿真，材料。

**欧盟委员会联合研究中心发布《先进替代燃料技术发展报告》，总结了先进替代燃料全链条技术的现状、发展趋势以及部署障碍：**尽管电力合成燃料所需的许多技术步骤已广泛用于工业中，但尚未实现完整的电力合成燃料技术链的规模化商业生产；微生物发酵制燃料技术已经到了试点/示范阶段。先进替代燃料的主要部署障碍在于成本、电网负荷和技术障碍。

**美国能源部（DOE）宣布未来五年将资助 1 亿美元支持人工光合系统制燃料技术研发，通过组建一个或两个跨学科、多机构组成的联合研究中心，解决人工光合系统制燃料面临的理论机理、应用基础、材料组件等一系列问题，实现太阳能到液体燃料或高价值化学品的经济高效转化。资助项目将聚焦四大优先研究方向：**探明人工光合系统工作和性能衰退机理；控制催化剂微环境提升产物选择性和太阳能到燃料转化效率；在时间和空间尺度上将太阳光激发和化学反应两个过程衔接起来；调谐复杂现象的相互作用提升多组件集成的人工光合系统性能。

**国际能源署（IEA）发布《2020 德国能源政策评估》报告，详细评估了德国“能源转型”战略及其进展：**德国实行以能效和可再生能源为支柱的“能源转型”战略，制定了积极的能源与气候目标，在可再生能源发电方面取得显著进展，提前达到了 2020 年目标，但在终端用能部门的进展差异较大，尤其是交通领域能源转型和能效提升进展落后。在碳减排方面，2017 年德国温室气体排放比 1990 年减少了 28%，距离 2020 年目标（降低 40%）差距较大。德国政府实施五年期能源研究计划作为能源技术创新的整体布局，“第七期能源研究计划”（2018-2022 年）的资助重点已从单项技术转向解决能源转型面临的跨部门和跨系统问题。

# 化石资源清洁高效利用

## 牛津能源研究院分析新冠病毒疫情对全球石化行业影响

2月13日，牛津能源研究院发布《新冠病毒：石化行业的风暴》<sup>1</sup>报告，分析了新冠病毒疫情爆发对全球石化行业的影响。报告指出，中国目前是全球制造业供应链的核心，新冠病毒疫情的爆发对中国经济增长以及石化行业供应和需求的影响增大了石化市场的不确定性，将为全球石化行业带来压力。内容如下：

### 1、石化行业进退维谷

石化行业是全球制造业供应链的重要组成部分，新冠病毒疫情的爆发使石化行业陷入了一场巨大的风暴，其原料供应受到中国炼油厂减产的极大限制，这意味着炼油厂的石脑油、液化石油气、重整产品（苯、甲苯和混合二甲苯）的供应将大大减少。同时，由于疫情管控导致劳动力缺乏，中国许多石化企业相关的下游公司也被关闭。这些公司主要是中小型企业，通常采购石化产品和聚合物产品用于制造成品和半成品（如塑料瓶、汽车仪表板和保险杠等）。此外，交通运输管制使得这些制造链末端的需求完全崩溃，消费者的信心和消费意愿也大大降低。出于谨慎原则，许多公司已决定让员工尽可能在家工作。中国的石化生产商将无法估计需购买多少原料，因为他们无法确定客户（石化产品加工商）何时恢复生产。同时，对在线购物和食品配送服务的需求激增。石化产品生产商面临两难的局面，既要避免因过量生产导致加剧供应过剩局面，又要防止增产速度太慢而错过需求恢复时的市场机会。

### 2、中国是全球石化行业的需求中心

中国强劲的经济增长使其成为石化行业最大的需求来源，因为石化产品的消费和总体经济增长趋于同步。以一种主要的聚合物产品聚乙烯（PE）为例，PE具有广泛的用途，以石脑油为主要原料通过蒸汽裂解生产。2019年全球乙烯总产量为5.45亿吨，因而石脑油需求为5.47亿吨。而2019年中国消耗了3200万吨PE，几乎占全球需求的1/3，而将中国目前在石化行业需求中的占比与发生SARS的2003年相比，并进一步扩展至其他聚合物产品，可以想见全球工业面临的风险。中国占全球各种主要聚合物产品总需求的比例已从2003年的22%增加到2020年的43%。

<sup>1</sup> The coronavirus: petrochemicals' perfect storm. <https://www.oxfordenergy.org/publications/the-coronavirus-petrochemicals-perfect-storm/?v=79cba1185463>

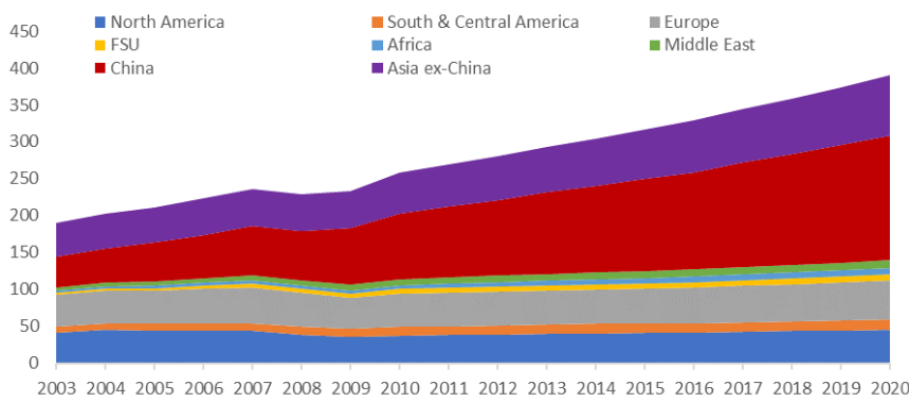


图 1 全球聚合物产品的主要消费地区 (单位: 百万吨)

此外，由于过去 20 年中国的需求增长迅猛，其产量一直无法跟上需求的增长。因此，中国已成为石化行业越来越重要的进口国。以 PE 和聚丙烯为例，预计 2020 年中国将分别占全球净进口总额的 61% 和 41%。世界各地的生产商已经投入资金提升产能和出口能力以满足中国的大量需求，如果中国的需求增长不如预期，则将给乙烯和石脑油市场带来压力。因此中国的突发事件将对全球产生巨大风险。

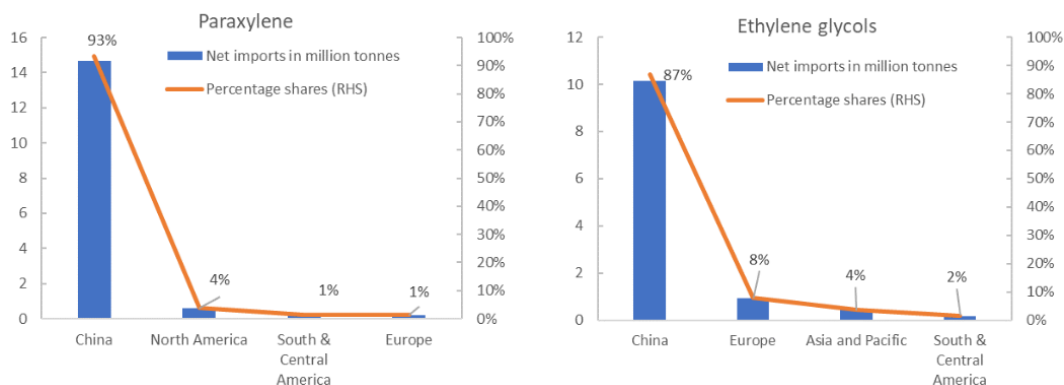


图 2 2020 年中国对二甲苯和乙二醇的净进口情况 (左轴单位: 百万吨; 右轴单位: %)

### 3、中国也是聚合物产品的主要出口国

中国同时也是一些聚合物产品的出口大国。对二甲苯是制造服装等产品的聚酯纤维的中间材料，其由炼油厂生产的混合二甲苯和经由乙烯制备的乙二醇制成。同时，上述材料也可用于生产 PET 薄膜和瓶级树脂，以制备包装和饮料瓶等。中国是 PET 薄膜和瓶级树脂的最大出口国，预计 2020 年中国 PET 薄膜净出口额将占全球的 46%。由于疫情导致中国 PET 瓶级树脂产量突然下降，使得买家转向中东和南亚进口，但可能出现供应不足导致价格上升。在其他制造链中也存在类似的情况。

总之，新冠病毒疫情对中国石化行业的损害将扩大至全球。新冠病毒疫情对中国制造业供应链的破坏远胜于 2003 年的 SARS 疫情。就石化产品而言，基本不可能改变中国作为最大需求方的情况。可以确定的是，中国市场是无可替代的。中国是否会采取经济激励措施促使需求复苏等不确定性因素，将会为全球石化市场带来风险。

(许丹霞 李由姿 岳芳)



## DOE 资助 6400 万美元支持先进燃煤发电技术

2月7日，美国能源部（DOE）宣布在“Coal FIRST”计划框架下资助 6400 万美元<sup>2</sup>，支持开发先进燃煤系统所需的关键部件，以推进更高效、清洁、灵活的未来小型燃煤发电技术发展。本次资助主要聚焦 7 大主题领域，包括：超临界蒸汽循环发电系统的加压流化床燃烧器；间接超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统；直燃式超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统；煤气化多联产系统；直喷式燃煤发动机<sup>3</sup>和燃气轮机再热联合循环系统；模块化分级加压富氧燃烧发电系统；无焰加压富氧燃烧发电系统。具体内容如下：

### 1、超临界蒸汽循环发电系统的加压流化床燃烧器

该主题下开发的项目将支持用于超临界蒸汽循环发电系统的加压流化床燃烧器，可在高压下燃烧并与天然气或生物质共燃。本次资助将关注如下关键组件：（1）加压燃烧后捕集系统，设计和测试能够在加压流化床燃烧系统所需的温度和压力下运行的燃烧后碳捕集系统，比常规系统的效率更高、成本更低；（2）集成储能系统，设计和测试集成储能系统，如流化床再循环系统，作为加压流化床燃烧器系统的一部分，以增强系统的爬坡和负荷跟随能力。

### 2、间接超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统

该主题下开发的项目将支持间接超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统的商业化，该类系统具有紧凑、高效、灵活和模块化等优点。本次资助将关注如下关键组件：（1）一次风加热器，将设计和优化一次风加热器，将其与超临界 CO<sub>2</sub> 发电循环和储能系统集成；

（2）集成储能系统，设计和测试与一次风加热器和/或超临界 CO<sub>2</sub> 发电循环集成的储能系统；（3）超临界 CO<sub>2</sub> 涡轮机密封件和轴承，开发多级超临界 CO<sub>2</sub> 轴向涡轮机，并研发高温干气体密封件和轴承。

### 3、直燃式超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统

该主题下开发的项目支持直燃式超临界 CO<sub>2</sub> 发电系统商业化，该系统具有比目前最先进的天然气和燃煤系统更低的发电成本。本次资助将关注如下关键组件：（1）合成气富氧燃烧器，设计一种合成气富氧燃烧器，可使用煤基合成气在较高温度和压力下运行，其相对于天然气具有较低热值和较高的火焰速度；（2）超临界 CO<sub>2</sub> 涡轮机，设计开发一种在 1150°C 和 300 bar 直接循环下运行的超临界 CO<sub>2</sub> 涡轮机，最大规模可达 300 MW。

### 4、煤气化多联产系统

该主题下开发的项目支持气化多联产系统关键组件商业化，该系统将利用已广泛使用的技术组件，通过创新设计和开发以推进先进煤气化多联产大规模发电系统。

---

<sup>2</sup> U.S. Department of Energy Announces \$64M for Components of Coal FIRST Power Plants.

<https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-64m-components-coal-first-power-plants>

<sup>3</sup> 直喷式燃煤发动机（DICE）是以微粉超洁净煤制成的燃液替代柴油燃料的柴油发动机，通过注入式喷嘴，喷射到发动机气缸内进行燃烧。

本次资助将关注如下关键组件：（1）燃烧前碳捕集系统，设计和测试燃烧前捕集系统，该系统能够在煤气化多联产系统所需的温度、压力和规模下运行，且其成本和效率都优于常规系统；（2）脱挥发分设备，设计开发用于煤气化多联产系统的脱挥发分设备。

### 5、直喷式燃煤发动机和燃气轮机再热联合循环系统

该主题下开发的项目支持直喷式燃煤发动机和燃气轮机再热联合循环系统关键组件的商业化。本次资助将关注如下关键组件：（1）超细精煤生产系统，设计和测试用于燃煤柴油发动机的超细精煤生产系统，例如水煤浆系统或燃料雾化和喷射系统；（2）直喷式燃煤发动机，该发动机测试的煤应为具备商业化潜力的超细精煤，系统设计应实现燃料快速雾化、喷射和点火，并确保能完全燃烧。

### 6、模块化分级加压富氧燃烧发电系统

该主题下开发的项目支持模块化分级加压富氧燃烧发电系统关键组件的商业化。本次资助将关注分级加压富氧燃烧和直接接触式冷却器的集成，设计和测试包括锅炉在内的集成式分级加压富氧燃烧系统的可操作性和性能，以达到指定的性能要求；另外将设计和测试直接接触式冷却器，以用于传热和  $\text{SO}_x/\text{NO}_x$  转化。

### 7、无焰加压富氧燃烧发电系统

该主题下开发的项目支持无焰加压富氧燃烧发电系统关键组件的商业化。本次资助将关注如下研究：设计和测试特定性能要求的集成无焰加压富氧燃烧发电系统的可操作性和性能。

（岳芳）

## 铜/氮掺杂纳米钻石复合催化剂开辟低成本高效电还原 $\text{CO}_2$ 新路径

电催化还原二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 为高价值的化学品（多碳产物，如乙醇、乙酸等），对缓解能源短缺和环境污染等全球性问题意义重大，因此引起了研究人员的广泛关注。然而目前电催化还原  $\text{CO}_2$  的催化剂存在产率不高、选择性不佳、稳定性较差、电催化还原电势较高等问题，因此亟需开发低还原电势高效稳定电催化剂。相关研究表明，铜 (Cu) 基催化剂是电催化还原  $\text{CO}_2$  性能最佳的催化剂，但稳定性和选择性有待进一步提升；氮掺杂的纳米钻石 (N-ND) 催化剂成本低，电化学活性高，表面积大，而且具有优异的化学稳定性。为此，由斯坦福大学 Yi Cui 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计制备了 N-ND/Cu 复合异质结催化剂，构建出了 N-ND 和 Cu 两种纳米颗粒异质界面，这一界面具有强 CO 吸附特性，同时显著降低了 CO 二聚化的能垒，有利于 C-C 耦合，促进了  $\text{C}_2$  产物产生，且具备优异的催化稳定性。

研究人员利用微波等离子体增强的化学气相沉积方法制备出了 N-ND 薄膜，同时制备了无氮掺杂的纳米钻石 ND 薄膜。扫描电镜表征发现，N-ND 和 ND 薄膜表面

形貌具备显著的差异性，相比无氮掺杂的 ND 薄膜，N-ND 薄膜颗粒密度较前者减小了一个数量级，颗粒尺寸也大幅缩小 15 倍至 20 nm。聚焦离子束测试揭示两种薄膜厚度均在 1.7  $\mu\text{m}$  左右；但粗糙度不同，N-ND 薄膜粗糙度为 11.9 nm，显著小于 ND 薄膜（34.3 nm），表明了前者的薄膜更加平滑。X 射线光电子能谱分析显示 N-ND 薄膜含有大量 N-sp<sup>3</sup> C 组分，而这一组分对电催化活性至关重要。在 1.2-1.5 V 电压窗口，CO<sub>2</sub> 饱和的碳酸氢钾溶液中进行线性扫描循环伏安测试，结果显示 N-ND 薄膜催化剂的电流密度显著大于 ND 薄膜，产物的核磁共振谱分析显示，ND 薄膜催化剂甲酸产物的法拉第效率不到 10%，大部分产物为氢气；相反，ND 薄膜催化剂产物选择性大幅提升，其甲酸和乙酸的（以甲酸为主）法拉第效率可提升到 45%。为了进一步提升 N-ND 薄膜催化剂性能，研究人员利用化学气相沉积方法在 N-ND 薄膜表面均匀生长一层均匀分散的 Cu 纳米颗粒，形成了 N-ND/Cu 复合异质结催化剂，随后测试其电催化活性。研究发现在较小的电压窗口区间（0.4-0.7 V），N-ND 没有表现出 CO<sub>2</sub> 催化还原活性；而 N-ND/Cu 则展现出强劲的 CO<sub>2</sub> 催化还原特性，其产物（为乙酸和乙醇混合物）的法拉第效率高达 89%，意味着 Cu 纳米颗粒引入显著降低了 CO 二聚化的反应能垒（这是产生多碳产物的关键中间反应）。更为关键的是该催化剂连续工作 120 小

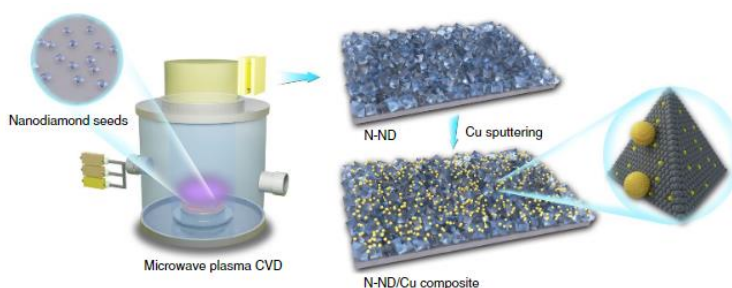


图 1 N-ND/Cu 复合材料

时后，催化活性仅仅减少 19%，表现出优异的催化稳定性。为了探究催化性能增强的潜在机理，研究人员利用密度泛函理论计算表明，CO 在 N-ND 和 Cu 界面的结合力增强，从而抑制 CO 脱附，且降低 CO 二聚化的反应能垒，从而促进 C<sub>2</sub> 产物的生成。

该项研究设计制备了铜/氮掺杂的纳米钻石异质复合催化剂，得益于铜和氮掺杂纳米钻石异质界面，显著增强了 CO 的吸附，降低了 CO 二聚化的反应能垒，提升了 C<sub>2</sub> 产物（如乙醇、乙酸等）的产率，为设计开发高性能低成本的 CO<sub>2</sub> 电催化还原剂指明了新方向。相关研究成果发表在《*Nature Nanotechnology*》<sup>4</sup>。

（郭楷模）

<sup>4</sup> Hongxia Wang, Yan-Kai Tzeng, Yongfei Ji, et al. Synergistic enhancement of electrocatalytic CO<sub>2</sub> reduction to C<sub>2</sub> oxygenates at nitrogen-doped nanodiamonds/Cu interface. *Nature Nanotechnology*, 2020, Published: 06 January



# 清洁能源多能互补

## 欧盟可持续核能技术平台发布新版核能战略研究议程草案

2月4日，欧盟可持续核能技术平台（SNE-TP）发布新版《可持续核能战略研究议程》草案<sup>5</sup>，提出了欧洲核能领域未来将开展的研究和开发优先事项。SNE-TP在欧盟战略能源技术规划（SET-Plan）框架下成立，旨在整合和提升欧洲核裂变能研发能力以推动欧洲先进核能技术发展，助力欧洲实现能源系统2050年转型目标，并使欧洲在民用核能领域保持技术和行业领先地位。本次更新议程共提出了3大技术领域研发事项：（1）**反应堆技术**，涉及：运行和建造，在役检查、资格审查和无损监测，先进反应堆和下一代反应堆，小型模块化反应堆；（2）**使能技术**，涉及：核电厂安全，燃料开发、燃料循环和乏燃料管理，核电厂退役，社会、环境及经济条件；（3）**交叉领域技术**，涉及：数字化、建模与仿真，材料。具体内容如下：

### 一、反应堆技术

#### 1、运行和建造

该领域将重点关注如下主题：识别和分析金属部件老化机制，开发监测系统和预测工具以减缓其老化；增进对长期辐照条件下混凝土性能的认知，并开发监测方法；开发电缆状态监测和建模方法；基于物理建模和在线监测数据，开发反应堆主要部件的数字化模型；使用人工智能、虚拟现实、3D成像等先进技术降低反应堆的建造、维护、停机等成本，并提高其安全性。

#### 2、在役检查、资格认证和无损监测

该领域将重点关注如下主题：为所有机械组件开发带风险预警功能的在役检查系统；了解阻碍国家间认证转移的技术（及其他）障碍，开发应对方法或规程；可检查性设计；验证无损检测检验模拟软件的准确性；探索新的核电厂状态无损监测方法；高质量、简单、可靠的组件接口。

#### 3、先进反应堆和下一代反应堆

（1）**MYRRHA项目**。MYRRHA是欧盟正在进行的铅铋加速器驱动研究堆，用于验证双重燃料循环中高放废物的嬗变。该项目将重点进行如下研究：①燃料和材料研究，包括混合氧化物燃料与冷却剂的相互作用，瞬态过程中燃料棒失效极限，包壳腐蚀，铅铋合金冷却剂中材料的机械性能，耐腐蚀涂层等；②冷却剂化学控制，包括冷却剂自身控制（氧浓度、质量传递、杂质管理），反应堆系统中放射性物质的释放和捕捉，反应堆部件清洁；③热工水力，包括研究流形以及潜在的滞留和分

<sup>5</sup> SNE-TP Strategic Research & Innovation Agenda. <http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2020/02/SNETP-Strategic-Research-Innovation-Agenda-SRIA-20-v5-aa.pdf>

层，湍流传热建模，地震的热工水力效应以及诱发晃荡的潜在影响，潜在冷却剂冻结过程研究；④组件测试，包括验证所有运行条件及瞬态条件下堆芯的完整性和可冷却性，通过对流固耦合引起的压降和振动进行实验和数值评估以评估事故场景中的故障风险，异常情况（如地震）下安全棒和控制棒的插入时间和可靠性评估，反应堆主泵液压设计的原理验证测试以及叶轮和轴承防腐蚀测试，燃料处理机的原理验证和可靠性测试；⑤加速器可靠性测试，进一步提高加速器部件的可靠性并开发快速容错恢复方案；⑥仪表和反应堆控制，包括反应堆仪器测试以及反应堆控制评估；⑦仿真工具代码验证，涉及热工水力、化学、中子学、机械性能等方面；⑧安全性评估，尤其要考虑严重事故等极端情况。

**(2) 钠冷快堆 (SFR)**。欧盟正开展的 ASTRID 项目为钠冷快堆原型反应堆，用于示范闭式燃料循环中的钠冷却剂技术。基于前期基础，将重点围绕如下主题研究：①设计与安全性研究，确定由 ASTRID 钠冷快堆设计衍生出的商用 1000 MW 快堆的功能描述和草图，并探索如何使钠冷快堆具备大型反应堆的成本竞争力；②仿真和代码验证，包括堆芯多尺度和多物理现象建模，严重事故中物理现象建模，反应堆化学风险评估；③燃料及材料鉴定，增加对高燃耗时燃料的认知，以及对将奥氏体不锈钢作为包壳材料时的性能评估；④仪器检查技术，开发可直接在钠冷却剂中操作的传感器和技术，尤其是用于速度测量的涡流流量计、中子测量（高温裂变室尽可能靠近堆芯）、利用声学传感器进行缺陷探测和目标可视化。

**(3) ALFRED 项目**。ALFRED 是欧盟正开展的铅冷却示范反应堆，用于示范闭式燃料循环中的铅冷却剂技术。该项目将重点进行如下研究：①开发解决冷却剂腐蚀的策略和技术，包括材料开发、冷却剂化学、表面处理等；②燃料处理以及在役检查和维修；③其他主题，包括燃料冷却剂相互作用、冷却剂中裂变产物研究、严重事故的进程及现象学研究等。

**(4) 气冷快堆 (GFR)**。将重点围绕如下主题进行研究：①燃料系统开发，尤其关注正常和意外条件下燃料的材料特性和性能研究；②陶瓷或难熔包壳材料的选取、开发和测试；③现有计算工具和核数据库用于气冷快堆设计验证；④极端条件下余热排出系统的电气保障；⑤制定应对严重事故的策略。

**(5) 高温反应堆 (HTR)**。高温反应堆的技术成熟度相对较高，将重点围绕如下主题研究：①冷却剂出口温度为 750-850℃ 的高温反应堆示范和许可；②高温反应堆与热电联产及其他终端应用的结合；③燃料制造的高性能、低成本质量控制，以及用于替代燃料循环或超高温反应堆的新型结构和功能材料（尤其是难熔金属和陶瓷复合材料）的开发和测试；④完善最大限度减少核废料的技术，如对被辐射的石墨进行净化和再循环，或将基质石墨中的三结构同向性型 (TRISO) 颗粒分离或再循环。

**(6) 熔盐堆 (MSR)**。将重点围绕如下主题研究：①熔融盐成分的物理和化学表征；②液体燃料行为分析与开发；③结构材料鉴定；④系统仪表和控制；⑤用于熔盐堆原型的组件设计规则修改建议；⑥开发现场燃料处理概念；⑦堆外和堆内模型开发；⑧熔盐示范堆开发。

#### **4、小型模块化反应堆 (SMR)**

**(1) 轻水堆 (LWR)**。将重点围绕如下主题研究：①堆芯，其重点是在无可溶硼设计中使用可燃毒物；②容器及其内部零件，开发紧凑型热交换器及相关制造工艺；③使用被动安全系统应对各种意外情况；④严重事故处理策略，尤其将注意堆芯保留策略以及堆芯老化和熔化的应对；⑤缩短现场施工时间；⑥研究由于采用一个监控室监控多个模块的方式引起的人为因素问题；⑦概率安全分析；⑧许可方面，开发通用的水冷 SMR 安全分析方法以及设计评估方案。

**(2) 先进模块化反应堆**。该领域将主要围绕如下方面进行研究：①实现 SMR 批量制造的相关研究，包括简化设计、紧凑型设计、更适合制造的设计、尽量使用商业化元件；②与工业应用结合的相关研究，包括确保工业过程与反应堆运行中的事故不会互相影响，以及通过开发负荷跟踪模式、储热技术和改变热量和电力生产比例使反应堆能够满足工业应用中波动的电力需求。

## **二、使能技术**

### **1、核电厂安全**

该领域将重点关注如下主题：开发扩展现有概率安全评估范围的方法；研究长期和多单元的安全功能丧失；开发和验证确定性和概率性安全分析的高级工具和方法；在电厂中集成新设备（变频器、真空断路器等），评估其影响并降低其可能产生的压力；设计事故和停机条件，用于欧洲其余反应堆实验装置；被动安全系统执行指定功能能力的安全性和可靠性评估；数字仪器和控制系统可靠性评估方法及其与概率安全评估的集成；容器内和容器外熔体/碎片的可冷却性；缓解安全壳内气体爆炸的风险；事故源项评估和缓解；乏燃料池事故缓解工具。

### **2、燃料开发、燃料循环和乏燃料管理**

该领域将重点关注如下主题：开发安全经济的新燃料；改进装配设计和制造；改进和验证燃料预测性能和安全工具；改进辐照后检验方法；确保关键实验设施的可用性；开式循环的乏燃料管理和处置的集成。

### **3、核电厂退役**

该领域将重点关注如下主题：通过设计、材料选择、操作措施、有效的拆除技术以及开发先进的废物处理和调节技术，最大限度地减少核废料的产生。

### **4、社会、环境及经济方面**

该领域将重点关注如下主题：通过确定性和概率性安全评估以提高可用因子并

优化安全裕度和功率提升；改进被动安全功能以提高运营经济性；通过泛欧交流使民众增进对核电的了解；分析包括电网干扰在内的间歇性外部负载对现有和新核电站安全功能的影响；分析新型危害（如无人机袭击、网络病毒等）对核电厂安全功能的影响；气候变化对核电厂运行的影响。

### 三、交叉领域技术

#### 1、数字化、建模与仿真

该领域将重点关注如下主题：开发和验证多尺度、多物理场和多阶段分析工具，包括不确定性量化方法；开发确保整个生命周期内的数字连续性的方法；数字化过程与网络安全的整合；数字化模型。

#### 2、材料

该领域将重点关注如下主题：先进制造方法的更广泛应用；物理机理研究和相关模型开发；开发辐照后具有更好的耐高温和耐腐蚀性能的材料；材料性能鉴定的相关方法，尤其是焊缝和接头、内部应力评估和在线监测；核材料测试基础设施的使用和维护。

（岳芳）

## DOE 资助近 1.3 亿美元支持先进太阳能发电技术研发

2月5日，美国能源部（DOE）宣布2020财年将资助1.255亿美元支持先进太阳能发电技术研发<sup>6</sup>，进一步推进太阳能发电、并网集成、网络安全和相关制造技术研发突破，提升效率、减少安装成本和发电成本，提升太阳能电力经济性，同时改善集成太阳能电力电网的稳定性和弹性，进而扩大太阳能电力在全美的部署规模。本次资助着重关注光伏硬件、太阳能储能一体化设备、太阳能知识流动和扩散路径研究、创新制造技术、系统集成、太阳能在农业领域应用潜力、将人工智能（AI）技术引入太阳能产业和太阳能小型创新项目八个领域，具体内容参见表1。

表 1 2020 财年先进太阳能发电技术研究具体内容

主题领域	具体内容	资助金额/ 万美元
光伏硬件研发	开发新技术延长光伏系统的寿命，并降低基于硅太阳能电池以及新的薄膜、串联结构、钙钛矿太阳能电池等新技术制备的太阳能发电系统硬件成本	1500
太阳能储能一体化设备	开发一个耦合储热系统和布雷顿循环系统的太阳能热发电示范电站，验证其技术经济性，以实现太阳能热利用的显著提升，提升太阳能热发电技术的经济性	3900
太阳能知识流动和扩散路径	研究太阳能知识是如何在整个行业流转传播，以及太阳能技术和其他新兴技术之间是如何相互作用，目的是让太阳能知	1000

<sup>6</sup> Department of Energy Announces \$125.5 Million in New Funding for Solar Technologies.  
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-1255-million-new-funding-solar-technologies>



研究	识能够高效准确传达到太阳能行业各利益相关方，以便其做出快速且准确的决策，从而降低太阳能软成本	
创新制造技术	开发先进的太阳能制造技术，完善美国太阳能产业链，降低市场风险，以加速具备商业化潜力的太阳能新技术市场化进程	1400
先进系统集成技术	开发新技术（自适应配电保护、可动态响应电气系统干扰的硬件和软件等）提升太阳能发电系统抵御自然灾害、网络攻击的能力，改善太阳能和其他分布式能源的电网协同工作效能，提升其可靠性和稳定性	3000
太阳能在农业领域应用潜力研究	研究评估在农业生产（如农作物种植场、牲畜养殖场）中引入太阳能发电设施技术和经济可行性，以降低农业生产成本	650
将 AI 技术引入太阳能产业	鼓励 AI 专家与太阳能行业利益相关者之间的合作，以开发整个太阳能行业价值链的颠覆性解决方案，帮助太阳能行业降低成本提升经济性	600
太阳能小型创新项目	鼓励研究人员围绕光伏和太阳能热发电技术进行新概念创新，为其中具备高商业应用潜力的创新提供帮助	500

（郭楷模）

## 美科学家在钙钛矿太阳能电池封装工艺领域取得重大突破

目前高性能钙钛矿太阳能电池通常基于含铅元素的钙钛矿光敏层制备，然而钙钛矿太阳能电池在使用过程中存在毒性铅元素泄漏问题（有可能泄漏到空气、地下水、土壤中等），这给人类的生存环境和公共健康带来了潜在威胁。因此如何有效解决钙钛矿太阳能电池使用过程中的铅元素泄漏问题成为了该领域的研究热点。美国北伊利诺伊大学 Tao Xu 教授研究团队联合美国国家可再生能源实验室（NREL）研究人员设计开发了一种全新的基于化学吸附的封装工艺，该封装工艺采用的聚合物膜能够通过化学键合作用有效地吸附铅离子，从而有效地克服器件使用过程中由于器件破损的铅元素泄漏问题，使得钙钛矿电池器件向商业化应用迈出了关键一步。

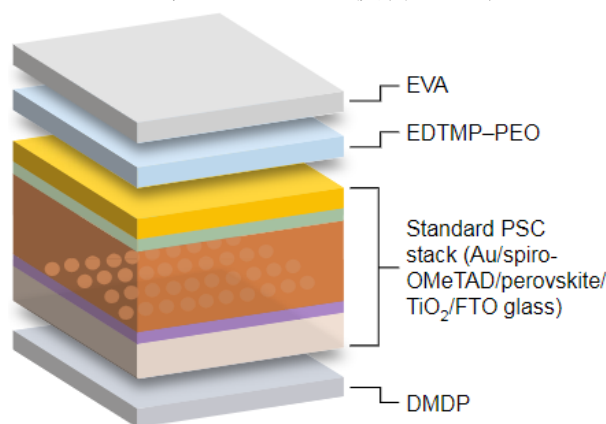


图 1 铅吸附材料示意图

含有磷酸基团的 DMDP 分子膜对透明导电玻璃（为底电极部分）进行涂覆，由于磷酸基团与铅离子之间具有很强的键合作用，因此可以有效地吸附铅元素充当封装保护膜。但是要涂覆到透明导电玻璃，必须确保该薄膜具备良好的透光性，以确保该薄膜不影响钙钛矿薄膜太阳光吸收进而影响器件性能。为此研究人员对单独的 DMDP、以及涂覆在透明导电玻璃上

的 DMDP 薄膜做了紫外可见光谱测试。实验结果显示，无论是单独的存在还是附着在导电玻璃的 DMDP 薄膜都呈现出良好的透光性能，在 350 到 1000 nm 光谱区间的透光度高达 90%。接着对涂覆 DMDP 聚合物（面积为 4 cm<sup>2</sup>）的导电玻璃铅吸附特性对比研究，将其浸润到碘化铅溶液中放置一段时间后，测试溶液中铅离子浓度变化，结果显示随着时间推移碘化铅溶液的铅离子浓度持续下降，通过计算可得 DMDP 聚合物吸附的铅离子浓度是溶液中铅离子浓度的 2.5 倍，即单位面积铅离子的吸附量远大于钙钛矿薄膜中的单位铅离子浓度，意味着 DMDP 薄膜能有效地吸附钙钛矿电池器件的铅离子。为了尽可能隔绝铅离子，只对器件一面做处理是不够的，必须对器件的顶电极也做封装处理。由于 DMDP 直接涂覆在金属顶电极会对电极造成破坏，为此研究人员换了另外一种对顶电极无损害的掺有铅螯合剂的聚合物膜 EDTMP-PEO，同样对铅离子具备优异的吸附特性。接着研究人员制备了无封装薄膜、含有 DMDP 和 EDTMP-PEO 双面聚合物封装薄膜的钙钛矿太阳能电池同时置于 40 ml 的水溶液中，在室温和 50℃ 两种温度下测试其铅元素泄漏情况。实验显示，在室温下含有双面封装聚合物膜器件能够将泄漏在水中近 97.7% 的铅离子吸附，而在 50℃ 环境同样保持了优异吸附性能（97.8%）。随后进一步测试了在 pH=4.2 酸性溶液（模拟酸雨环境）中的铅离子吸附性能，无论室温（吸附率 96.1%）还是 50℃ 环境（97.7%）依旧表现出良好的铅离子吸附特性。最后研究人员测试了双面封装薄膜对器件稳定性的影响，在 50℃ 环境下连续运行 500 小时后器件性能没有出现衰退情况，表明双面封装薄膜不会影响器件稳定性。

该项研究在钙钛矿器件的底电极和顶电极两面涂覆了具备优异铅离子吸附特性的聚合物薄膜作为封装膜，在不影响器件性能和稳定性前提下，显著改善了钙钛矿器件在使用过程中器件破损产生的铅元素泄漏问题，有效应对了铅元素的环境和健康毒性危害，为钙钛矿太阳能电池商业化应用奠定了关键技术基础。相关研究成果发表在《*Nature*》<sup>7</sup>。

（程向阳 郭楷模）

## 原位表征技术首次揭露锂硫电池硫正极以液态存在于二维衬底

锂硫（Li-S）电池具有极高的理论比容量，可达 2500 Wh/kg，近 10 余倍于锂电池，且硫元素来源丰富，成本低廉，在电网级储能领域具备广阔的应用前景，引起了研究人员的广泛关注。但该电池存在穿梭效应，导致电池性能随着循环次数增加而大幅衰减，因此亟需探明该电池工作机制以消除上述负面作用，提升电池寿命和性能。斯坦福大学 Yi Cui 教授课题组联合清华大学研究人员合作制备了光学透明电池，并利用各类原位表征技术首次揭露了硫正极在电化学循环过程中物理状态变化

<sup>7</sup> Xun Li, Fei Zhang, Haiying He, et al. On-device lead sequestration for perovskite solar cells. *Nature*, 2020, DOI: 10.1038/s41586-020-2001-x

（固态、液态）及其对电池性能的影响，证实了硫元素在二维衬底上更加倾向以液态形式存在而非先前公认的固态，打破了传统认知，为设计开发高性能锂硫电池提供了重要参考。

研究人员以高导电性的二维层状材料二硫化钼（ $\text{MoS}_2$ ）为衬底在其表面沉积一层硫薄膜形成正极，以负载在铜箔上的锂为负极，与 1,3-二氧戊环,1,2-二甲氧基乙烷电解质组装成完整的光学透明电池。随后在 2.4-3.0V 电压窗口区间进行电化学循环测试，并利用原位表征追踪电化学循环过程中硫元素物理状态的变化。明场显微镜和具有毫秒时间分辨率的快速照相机相结合，实现了硫正极电化学反应过程可视化。实验观察发现，在  $\text{MoS}_2$  衬底的平面上（不包括边缘）正极硫元素（ $\text{S}_8$ ）很快形成液态硫，而在衬底边缘则以固态形式存在，上述结果也通过拉曼光谱得到了进一步证实。为了探究潜在的作用机制，研究人员开展了密度泛函理论计算，实验结果显示， $\text{S}_8$  和  $\text{MoS}_2$  衬底基面之间的结合力低至 0.64 eV，这种弱的结合导致了难以润湿的界面，使得异相成核受到阻碍，故而  $\text{S}_8$  保持了液态。相反，在  $\text{MoS}_2$  片上施加电压时，其边缘处具有更高的电场强度，降低了异相成核的阻碍，促进了单质硫的产生和硫的局部过饱和，

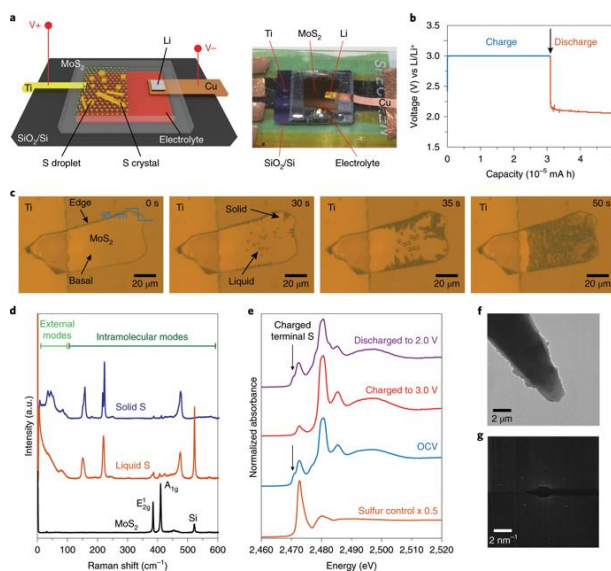


图 1  $\text{MoS}_2$  衬底上液态和固态 S 的电化学生成

进而驱动了硫在边缘处结晶形成固态。接着在 3 V 电压下对电池进行 15 分钟充电，研究  $\text{S}_8$  不同物理状态对电池性能影响，发现液态硫滴的面积比容量为  $8.0 \text{ mAh/cm}^2$ ，远高于固态硫面积比容量（ $1.9 \text{ mAh/cm}^2$ ），主要原因是液态硫具备了优异流动性和自适应的形变能力，可以和电解质充分接触，也可以让电解质充分接触电极，实现更快的离子动力学，增强了电池性能。研究人员进一步在不同二维衬底上（如  $\text{WS}_2$ 、 $\text{WSe}_2$ 、石墨烯等）开展了类似的实验，实验显示出与上述类似的实验结果，表明了上述实验现场具备了普遍性。

该项研究精心制备了一种光学透明的锂硫电池，结合先进原位表征手段，首次实验揭露了电池充放电循环过程中，硫正极在二维衬底上大面积的平面区域以液态形式存在，仅在衬底的周边才以微量的固态形式存在，且液态硫相比固态硫具备更加优异的面积比容量，颠覆了传统的认识模式，为设计开发高性能高稳定性锂硫电池积累了关键理论知识。相关研究成果发表在《*Nature Nanotechnology*》<sup>8</sup>。（郭楷模）

<sup>8</sup> Ankun Yang, Guangmin Zhou, Xian Kong, et al. Electrochemical generation of liquid and solid sulfur on two-dimensional layered materials with distinct areal capacities. *Nature Nanotechnology*, 2020, DOI: 10.1038/s41565-019-

# 低碳化多能融合

## 欧盟总结先进替代燃料技术进展及部署障碍

欧盟委员会联合研究中心近日发布了《先进替代燃料技术发展报告》<sup>9</sup>，总结了先进替代燃料全链条技术的现状、发展趋势以及部署障碍。主要内容如下：

### 一、技术现状及趋势

#### 1、电力合成燃料

电力合成燃料（Power-to-X）的主要途径是通过电解水生成 H<sub>2</sub>，随后与 CO<sub>2</sub> 合成转化为气体或液体燃料。电力合成燃料是未来能源系统中不可或缺的组成部分，能够将过剩的波动性可再生能源整合到能源系统中，还能平衡电力供需。尽管电力合成燃料所需的许多技术步骤已广泛用于工业中，但某些环节技术的成熟度较低，因此目前尚未实现完整的电力合成燃料技术链的规模化商业生产。

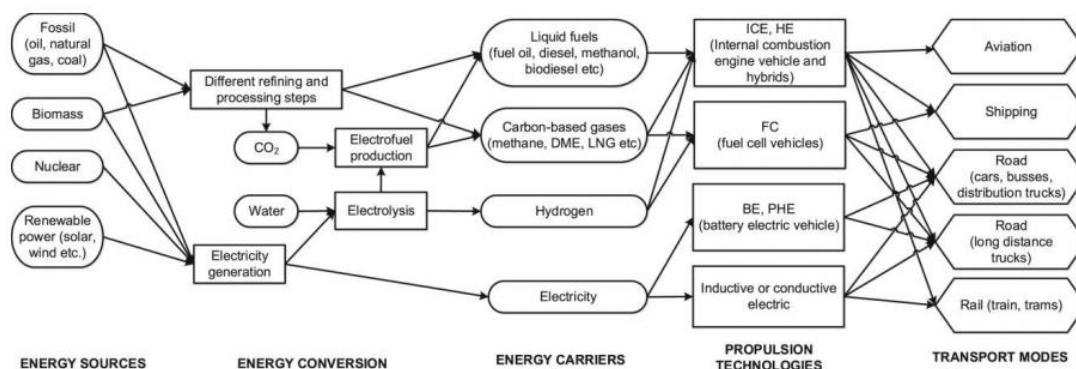


图 1 电力合成燃料的潜在技术路径

#### (1) 可再生能源电力制氢

目前，商用碱性电解堆的额定效率（低热值）和比能耗分别为 63%-71% 和 4.2-4.8 kWh/Nm<sup>3</sup>，质子交换膜电解堆分别为 60%-68% 和 4.4-5.0 kWh/Nm<sup>3</sup>，而固体氧化物电解堆则为 100%（运行于热中性点电压）和 3 kWh/Nm<sup>3</sup>。在生产能力方面，这三类电解堆的生产速率分别为 1400、400 和 <10 Nm<sup>3</sup>/h。另外，电解系统在较低氢气生产速率下（如低于 100 Nm<sup>3</sup>/h）的性能会下降。寿命是电解槽的另一个重要参数，质子交换膜电解槽寿命最长，达到 6-10 万小时，其次是碱性电解槽（5.5-12 万小时），固体氧化物电解槽尚未完全商业化，其寿命为 0.8-2 万小时。而且，由于老化带来的效率降幅约为：碱性电解槽每年降低 0.25%-1.5%；质子交换膜电解槽每年降低 0.5%-2.5%；固体氧化物电解槽不确定性较大，每年效率降低的范围在 3%-50%。而在投资

0624-6

<sup>9</sup> Advanced Alternative Fuels Technology Development Report.

[https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC118298/jrc118298\\_1.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC118298/jrc118298_1.pdf)



成本方面，碱性电解槽最低（800-1500 欧元/kW），其次是质子交换膜电解槽（1400-2100 欧元/kW），固体氧化物电解槽则超过了 2000 欧元/kW，具体范围难以确定。

总体而言，碱性电解槽是当前电解水制氢最成熟的技术，其投资和维护成本最低，已经可以生产单堆最高容量达到 6 MW 的电解槽。近年来，灵活储能的需求极大地推动了质子交换膜电解槽的发展，其容量已经进入 MW 级，6 MW 规模的试点工厂已经在运行。与碱性电解槽相比，质子交换膜电解槽在紧凑型设计（高电流密度）、加压运行和灵活性方面都具有优势。随着电解槽产量提升、供应链的发展、制造工艺的改进以及技术创新，未来的投资成本可能会下降。质子交换膜电解槽和碱性电解槽能够为电网提供非常快的负荷动态响应（响应时间低于 1 秒）。相比之下，固体氧化物电解槽具有提高制氢效率的潜力，并且可以可逆运行，但需继续进行系统开发，以及寿命、加压运行和循环稳定性的验证。除使用可再生能源电解水制氢外，还有光催化制氢和光生物水解制氢等绿色制氢方法。其中，过去十年光催化制氢的转化率（从太阳能到氢气）已经从 3% 提升至 10% 以上，但其技术成熟度仍为第 3 级。

## （2）碳捕集技术

•**高浓度排放源的碳捕集。**CO<sub>2</sub> 的大规模工业排放主要来自四个行业：钢铁、水泥、炼油和造纸，其中水泥行业由于工艺简单和单一烟道流等特点，其碳捕集率可达到最高。水泥生产中 60% 的碳排放来自煅烧含 CaCO<sub>3</sub> 原料的过程，剩余 40% 则来自供热。目前欧盟“地平线 2020”计划资助的 CEMCAP 项目已经获得了 200 kW<sub>th</sub> 规模中试实验的成功（技术成熟度达到 6 级），并且在较广工作条件下可以保持较高碳捕集率（95%）。

•**胺基溶剂燃烧后碳捕集。**目前燃烧后碳捕集是最可行的技术，可显著减少燃煤电厂的碳排放。其中最先进的技术是基于胺基溶剂的碳捕集技术，已经应用于一些燃煤电厂。

## （3）燃料合成：电力合成气体燃料

H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 合成甲烷的主要途径有以下三种：生物甲烷化、等温催化甲烷化和绝热固定床甲烷化。生物甲烷化适用于小型发电厂，因为可以使用余热来提供过程热，其主要优点是对杂质（如硫和氧）具有高度耐受性，因此可以简化原料气的清洁过程，目前生物甲烷化仍处于实验室和示范阶段。绝热固定床甲烷化适用于超过 100 MW 的规模，已经进入商业生产阶段。等温催化甲烷化是常规工厂规模的最合适技术，但其仍处于实验阶段，并正在进行大规模测试。由于效率偏低，电力合成气体燃料主要用于消耗过剩电力，而非用作满足当前天然气需求的技术。对于从可再生能源到合成天然气直至用于天然气发电的整个转换链，其能源转换效率可以达到 30%-40%，与传统火电厂相当，到 2030 年有望达到 40%-50%。此外，由于成本偏

高，电力合成气体燃料的另一发展趋势是扩大规模以实现规模经济，但其面临可再生能源电力的波动性以及 CO<sub>2</sub> 来源的规模和位置限制。

#### **(4) 燃料合成：电力合成液体燃料**

电力合成液体燃料通常指将电解水制取的 H<sub>2</sub> 与 CO<sub>2</sub> 或 CO 合成烃类燃料，主要有费托合成和甲醇路线。费托合成使用合成气生产液体烃燃料，合成气几乎可以从任何含碳原料中产生，使用煤炭或天然气为原料的大型费托合成工厂正在成功运行。利用电解水制取的 H<sub>2</sub>，通过费托合成方式与 CO<sub>2</sub> 合成汽油、柴油等液体燃料，这一新型路径与传统费托合成的区别在于规模更小，以匹配 CO<sub>2</sub> 来源。微结构化反应器设计能够增加反应表面积，从而大大增强热传递并改善温度控制。推动微通道费托合成反应器技术商业化的公司有美国 Velocys 公司和德国 Ineratec GmbH 公司。对于不同的工厂规模，采用费托合成的电力合成液体燃料技术的投资成本为 300-2100 欧元/千瓦燃料。

除费托合成外，还可将 H<sub>2</sub> 与 CO/CO<sub>2</sub> 合成为甲醇，用于生产交通燃料，或将其用作船用燃料。目前，甲醇路线的研发重点是 CO<sub>2</sub> 直接加氢转化为甲醇。公路和航空运输部门正研究将甲醇转化为液态烃，目前已部署了几家甲醇制汽油的商业工厂，此外还可将甲醇转化为柴油和煤油，收率高达 80%。对于不同的工厂规模，采用甲醇路线的投资成本为 200-1200 欧元/千瓦燃料。

### **2、微生物发酵**

微生物发酵制燃料技术主要由新西兰的朗泽公司（Lanzatech）推动，通过残留气体发酵将碳生物转化为醇类产品。该技术可以将富含碳的废气作为碳源，因而为碳利用提供了一种新的方法。工业废气微生物发酵以朗泽公司为主导，主要利用钢铁、炼油等行业产生的废气生产乙醇，进而可用于生产航空替代燃料。该技术已经到了试点/示范阶段，2018 年 10 月维珍大西洋航空公司宣布首次利用微生物发酵产生的燃料进行了飞机试飞。2018 年中已有大规模示范工厂宣布开工建设。

### **3、其他技术**

除上述技术外，还有一些其他先进燃料技术。如基于蓝细菌工艺利用可再生能源电力制取的 H<sub>2</sub> 生产氨，以用作交通替代燃料。相比 H<sub>2</sub>，氨更易于存储和运输，且已经具备成熟的生产和分配基础设施。对于氨-燃料系统的生命周期分析显示，需改进车辆技术提升经济性，以实现氨燃料在交通领域的使用。

另一种技术是使用塑料等废物生产液体燃料，主要涉及气化、费托合成和热解等过程。目前已有示范工厂，直接从垃圾场回收原料中热解塑料，无需进行任何预处理，热解油可在现有炼油厂中提炼为运输燃料。加拿大 Enerkem 公司的工艺已经实现商业化，其将固体废物转化为甲醇、乙醇或其他化学品。美国 Velocys 公司也利用城市固废生产燃料，是中小型费托反应器的供应商。美国 Fulcrum BioEnergy 公司

的首个固废生产燃料工厂已经开始了第二阶段的建设，但其塑料原料可能来自于化石燃料。

## 二、主要部署障碍

•**成本障碍**。成本是阻碍电力合成燃料进一步部署的主要障碍，尽管各个环节的技术已经存在，仍然缺乏电力合成燃料完整的大规模生产路径。电力合成燃料的成本仍然过高，难以与其他燃料竞争。

•**电网负荷障碍**。如果实现电力合成燃料的大规模生产，则将会极大增加对可再生能源电力的需求，这将会给电网增加大量负荷。

•**技术障碍**。需改进电解系统以最大限度地提高 H<sub>2</sub> 的产量，同时保持较好运行性能。将 H<sub>2</sub> 作为燃料直接使用在一定程度上受到基础设施的限制，此外，还需要普及氢燃料电池汽车。使用费托合成的电力合成液体燃料技术已被证明可以大规模使用，但需验证该技术可以在较小的规模上很好地工作，从而能够与小规模的 CO<sub>2</sub> 来源相匹配。涉及甲醇合成的电力合成液体燃料技术需要改善高工艺压力的问题。碳捕集系统的总体改进仍在继续，尤其需要减少能源消耗问题。废气发酵技术尽管仍在发展，但仍需进一步进行示范验证。

（岳芳）

## DOE 未来五年拟投入 1 亿美元推进人工光合系统研究

2月19日，美国能源部（DOE）宣布未来五年将资助1亿美元支持人工光合系统制燃料技术研发<sup>10</sup>，旨在通过组建一个或两个跨学科、多机构组成的联合研究中心，整合研究力量，联合攻关，解决人工光合系统制燃料（光催化分解水制氢、固定 CO<sub>2</sub> 制碳氢燃料或高价值化学品）面临的理论机理、应用基础、材料组件等领域一系列问题，实现太阳能到液体燃料或高价值化学品的经济高效转化。资助的项目将聚焦四大优先研究方向，具体内容如下：

### 1、探明人工光合系统工作和性能衰退机理

从原子和分子水平逐步深入认识光合系统光/电转化、传输过程、热力学、动力学和降解机理；设计、开发高性能和长寿命的人工光合系统组件，如高效、稳定、高活性的低成本催化剂，高选择性隔膜等；在材料和组分水平上进行耐久性的科学预测，以指导最佳材料和组件的制备和选择。

### 2、控制催化剂微环境提升产物选择性和太阳能到燃料转化效率

在分子水平上探测、理解和调控催化剂活性位点周围局部区域的结构、组分和动力学以调控反应过程中关键化学键生成和断裂的步骤，进而影响催化反应化学路径；如研究、探测和控制催化剂与载体、光吸收剂、电解质和其他组分的相互作用；

<sup>10</sup> Department of Energy to Provide \$100 Million for Solar Fuels Research. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-provide-100-million-solar-fuels-research>

了解催化剂活性位点微环境如何影响反应物、产物、电子和质子输运，最终如何影响产物选择性和性能降解。

### 3、在时间和空间尺度上将太阳光激发和化学反应两个过程衔接起来

目前，大多数人工光合系统制太阳能燃料的方法都将太阳光吸收激发和随后的化学转化两个过程分离开来，但实际上完整的人工光合系统工作流程是涵盖了上述两个过程。因此开展相关基础研究，如光与物质的相互作用、强电子耦合、光诱导的结构变化等，将光吸收激发和化学反应转化过程直接耦合，有助于全面理解人工光合系统的工作机理，指导人工光合系统设计开发，实现更高效的光捕集、激发和太阳能到燃料转化。

### 4、调谐复杂现象的相互作用提升多组件集成的人工光合系统性能

人工光合系统是个多组件（阴阳极、催化剂、隔膜、电解质等）集成耦合的组成，如何实现众多分子、材料和组件性能的高效集成是人工光合系统的关键挑战，因为简单地将上述单个组件叠加可能无法发挥与本身单个组件单独存在时同等的效能。因此需要多组件集成和相互作用开展基础研究，以更好地理解集成系统中单个组件多尺度过程如何相互作用和影响集成组件最终功能，用于指导预测模型的开发，并使组件的协同设计成为可能，从而助力高效、高选择性和长寿命人工光合系统开发。

编者按：美国能源部已于 2010 年资助加州理工学院和劳伦斯伯克利国家实验室牵头成立了“人工光合系统联合研究中心”（JCAP），2010-2014 年获得第一轮资助 1.2 亿美元，2015-2019 年获得第二轮资助 7500 万美元。JCAP 致力于建立一套完整的人工光合系统，利用太阳能、水和 CO<sub>2</sub> 制取燃料，能量转化效率达到 10%。

（郭楷模）

## 英国投入 9000 万英镑支持低碳排放能源技术开发与示范

2 月 18 日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布投入 9000 万英镑支持一系列低碳能源项目<sup>11</sup>，解决家庭和重工业的碳排放问题。本次资助的项目包括了氢气生产、工业燃料替代、智慧能源系统、工业脱碳前沿技术等领域，具体包括：

### 1、氢气生产示范项目

2800 万英镑支持开发 5 个低碳制氢示范项目，包括：开发利用深海区域的浮动式海上风电和海水生产氢气的 2 MW 规模原型系统，包含一个 10 MW 大型浮动式风力涡轮机以及集成了水处理装置的电解设备；开发每小时可生产 100 000 Nm<sup>3</sup> 的清洁氢气生产设备，可将绿色氢气生产成本降低 20%；吉瓦规模的质子交换膜电解槽的示范，将利用海上风电场输出的电力；评估和开发先进的重整工艺，为北海地

<sup>11</sup> £90 million UK drive to reduce carbon emissions. <https://www.gov.uk/government/news/90-million-uk-drive-to-reduce-carbon-emissions>



区利用天然气生产氢气提供一种节能且具有成本效益的工艺，同时捕集 CO<sub>2</sub>；通过中试规模的吸附增强型蒸汽重整工艺示范来开发低碳氢气供应技术。

## 2、工业燃料替代

1850 万英镑支持工业混凝土和玻璃生产用能从化石燃料转到可再生能源的技术开发和试验项目，包括：在玻璃工厂、家庭护理和美容用品工厂、炼油厂中使用氢气替代天然气用于直接燃烧、锅炉和炼油的实验开发和示范；在两个水泥生产基地进行物理试验，以用清洁燃料（生物质、氢气和可再生能源电力）代替化石能源；设计一个灵活的示范规模玻璃熔炉，以示范和评估采用电力、氢气、生物燃料和混合燃料代替化石燃料的技术，包括在大规模商业生产线上进行的生物柴油试验和大型实验室规模的氢气示范；使用氢气代替天然气替代高钙石灰，为包括钢铁制造业在内的各种市场提供服务。

## 3、智慧能源系统

2100 万英镑资助 10 个当地“智慧能源”项目，包括利用运河和旧煤矿发电，以及利用地热为房屋供暖等技术，以试验利用当地绿色能源生产的新技术。此外，还有 450 万英镑用于智慧能源系统的关键技术组件开发，包括能够通过铁路牵引电源为火车站的电动出租车和私人电动汽车充电的技术等。

## 4、工业脱碳前沿技术

2200 万英镑用于英国能源研究中心（UKERC）的第四阶段资助，以支持英国研究机构进行工业、交通、供暖行业的脱碳前沿技术研究。

（岳芳）

## 丹麦资助 1.28 亿丹麦克朗支持可再生能源电力制氢项目

12 月 18 日，丹麦气候、能源与供应部宣布拨款 1.28 亿丹麦克朗，支持 2 个大规模可再生能源电力制氢项目<sup>12</sup>，旨在发展可再生能源存储和转换技术，以发挥可再生能源的巨大潜力，推进能源系统的进一步绿色转型。

丹麦拥有欧洲最丰富的风能资源和强大的风能产业，此前曾宣布启动建造多个“能源岛”（规模至少为 10 GW）以发展海上风电。政府认为，能源转型的下一步是开发将可再生能源电力转化为其他能源载体（如交通燃料）的技术，用于航空、航运和公路交通等领域，以消纳过剩的可再生能源。本次资助的项目（GreenLab Slice PtX 和 HySynergy 项目）均为大规模可再生能源电力制氢工厂，前者获得 8000 万丹麦克朗的资助，将在丹麦日德兰半岛的 Skrive 开发；后者获得 4800 万丹麦克朗的资助，将在日德兰半岛的 Fredericia 开发，两个项目将在 2020-2025 年期间建设投运。

（岳芳）

<sup>12</sup> 128 mio. kr. til udvikling af grønne brændstoffer. <https://kefm.dk/aktuelt/nyheder/2019/dec/128-mio-kr-til-udvikling-af-groenne-braendstoffer/>

## 低成本异质复合双功能催化剂实现高效催化电解水产氢

电解水制氢被认为是最有潜力的产氢技术之一，包括两个半反应，分别是阳极析氧反应（OER）和阴极析氢反应（HER）。低成本的过渡金属镍和铁的氧化物/氢氧化物催化剂在碱性介质中可实现高效 OER，被认为是碱性析氧反应的代表性非贵金属催化剂，然而该类催化剂的 HER 反应催化性能较低，亟需改进上述缺点以提升催化电解水产氢效率。澳大利亚新南威尔士大学 Chuan Zhao 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计制备了一种低成本镍-氧化铁异质复合催化剂，得益于两种材料之间形成的异质界面，大幅提升了催化剂的 HER 催化活性，接近商业 Pt/C 催化剂水平，同时保持了优异的 OER 活性，且具备良好的物理化学稳定性，为电催化剂开发设计指明了新方向。

研究人员首先配置了硝酸镍和氯化铁混合溶液，随后进行湿化学氧化还原反应；透射电镜（TEM）显示产物为 Ni-Fe 复合纳米颗粒，平均粒径约 5-8 nm。高角环形暗场像表征显示 Ni-Fe 复合纳米颗粒界面形成了两种相结构，具备完全不同的晶体结构和电子密度（这会形成完全不同的电化学特性）。电化学元素谱分析发现，高

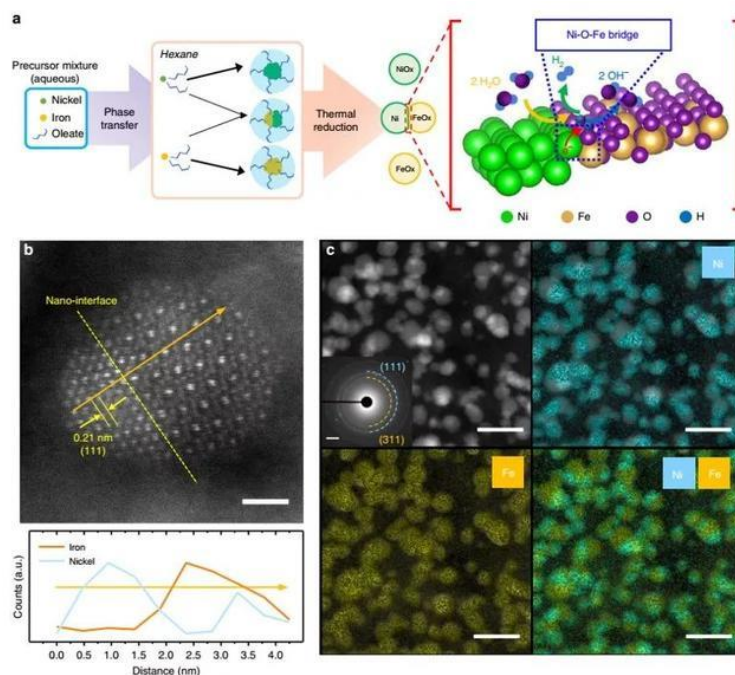


图 1 Ni-Fe 催化剂合成示意图及形貌结构表征

电子密度是 Ni 金属晶体相结构，而低电子密度为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  相结构，也即在 Ni-Fe 复合纳米颗粒的接触界面形成了 Ni-O-Fe 化学键。接着在 1 mol 氢氧化钾溶液中，以 5 mV/s 扫描速度进行线性扫描循环伏安测试 Ni-Fe 复合催化剂的 HER 性能。实验结果显示，达到  $10 \text{ mA/cm}^2$  电流密度，Ni-Fe 复合催化剂只需要 100 mV 的过电位，远低于单独的 Fe (410 mV)、Ni (260 mV) 和 Ni-Fe 合金 (307 mV)，其催化析氢翻转频率 TOF 达到了 0.056 /s。塔菲尔曲线测试结果显示，Ni-Fe 复合催化剂曲线斜率仅为 58 mV/dec，以及极高的交换电力密度  $1.58 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ，接近商业化 Pt/C 催化剂水平。且可以连续稳定运行 10 余小时，即具备了优异的碱性析氢性能和稳定性。密度泛函理论计算表明，复合催化剂两种材料的接触界面处形成的 Ni-O-Fe 键能够有效降低析氢反应中  $\text{H}^*$  吉布斯吸附自由能，即增强了氢原子的吸附能力，从而促进了 HER 反应。在具备优异析氢性能的同

时，该催化剂保持了优异的 OER 催化性能，催化剂在电流密度达到  $10 \text{ mA/cm}^2$  条件下过电位仅为  $210 \text{ mV}$ ，且仍然具备优异稳定性，因此可以作为双功能催化剂实现高效、稳定的全电解水反应。

该项研究设计制备了一种新型镍-氧化铁异质复合电催化剂，异质界面的形成增强了析氢反应活性，同时保留了优异的析氧催化活性，具备优异稳定的双功能催化活性，实现了碱性环境下高效催化分解水产氢析氧，为设计开发高性能低成本全分解水催化剂指明了新方向。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》<sup>13</sup>。

（程向阳 郭楷模）

---

<sup>13</sup> Bryan H. R. Suryanto, Yun Wang, Rosalie K. Hocking, et al. Overall electrochemical splitting of water at the heterogeneous interface of nickel and iron oxide. *Nature Communications*. 2020, DOI: 10.1038/s41467-019-13415-8

# 能源战略研究

## IEA：油气行业将为全球能源转型发挥重要作用

1月20日，国际能源署（IEA）发布《能源转型中的油气行业》报告<sup>14</sup>，分析探讨了能源转型对全球油气行业的影响，以及油气行业为加速能源转型需采取的行动。报告指出，整个油气行业都会受到能源转型的影响，油气公司应正确认识从“油气”到“能源”的转变，尽可能降低油气核心业务的碳排放，并加大对核心业务以外的低碳能源技术投资。如果采取积极措施，油气行业将在能源转型中发挥重要作用。报告关键要点如下：

•**油气行业面临着平衡短期回报与长期运营许可的战略挑战。**当今社会对能源行业的要求是在提供能源服务的同时还要降低碳排放，因此油气行业需要在获得短期汇报与长期经营许可间取得平衡。油气行业在能源供应方面已经有着成熟经验，当前面临的主要问题是能否为应对气候问题提供解决方案。IEA认为，如果油气行业采取必要措施，足以解决这一问题。需要更多油气公司参与到其中，投入力量开发低碳技术以促进企业的长期繁荣。

•**整个油气行业都要考虑如何应对清洁能源转型。**所有油气公司都会受到能源转型的影响，因此整个行业都要考虑如何应对。行业格局是多种多样的，并没有适合所有企业的通用发展战略。国际石油公司占油气储量的12%、产量的15%和运营排放量的10%，国家政府所有或控股的国有石油公司（NOC）占全球总产量的一半以上，占储量的份额更大。尽管目前有一些高效能的国有石油公司，但大部分公司都无法适应全球能源的动态变化。

•**油气公司对其核心业务以外的投资不到总资本支出的1%。**目前，几乎没有迹象表明油气公司的投资会发生重大变化。尽管其对核心业务以外的投资正逐年增长，但仍只占总投资的很小部分。对于那些寻求能源业务多样化的公司，将资金重新部署到低碳业务上需要在新能源市场获得有吸引力的投资机会，另外公司自身需要具备有竞争力的低碳技术。照目前情况来看，领先的油气公司在核心油气供应业务以外的项目支出约占总支出的5%，其中最主要的投资是光伏和风能发电。一些油气公司还通过收购现有的非核心业务（例如配电、电动汽车充电和电池）得以进入新领域，同时加快了其研发活动。为了加速能源转型，需要油气行业对资本分配进行更重大改变。

<sup>14</sup> The Oil and Gas Industry in Energy Transitions. <https://webstore.iea.org/download/direct/2935>



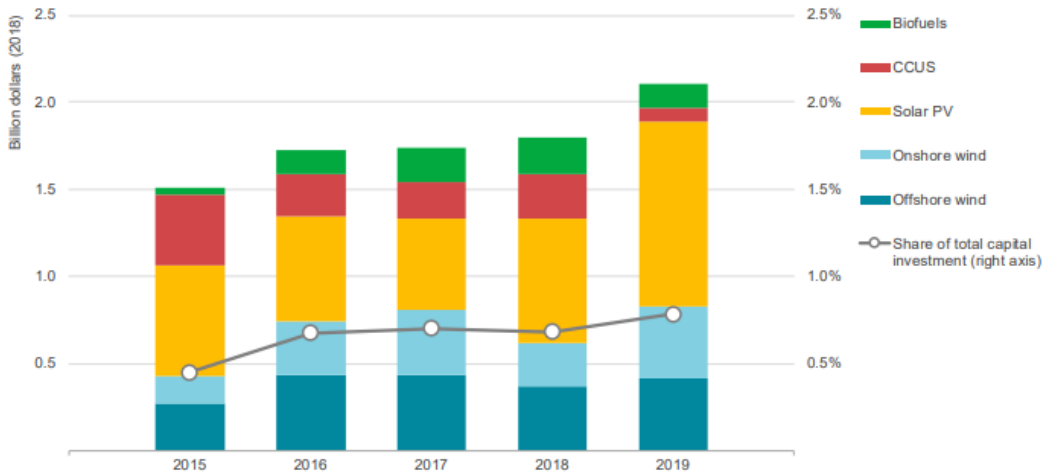


图1 大型油气公司对新业务的资本支出变化（左轴单位：十亿美元；右轴单位：%）

•有许多解决方案可以减少油气行业的碳排放。未来的不确定性是油气行业面临的主要挑战，最大限度地减少石油和天然气核心业务的排放应是最主要的优先事项。通过最大限度地减少伴生气放空和CO<sub>2</sub>排放，解决甲烷泄漏，并将可再生能源和低碳电力整合到上游天然气和液化天然气（LNG）开发中，有望经济高效地降低油气行业的排放强度。截止到今天，全球能源相关温室气体排放中有15%来自将石油和天然气从地下运至消费者的过程。减少甲烷向大气中的泄漏是该行业降低排放的最重要且最具成本效益的方法。

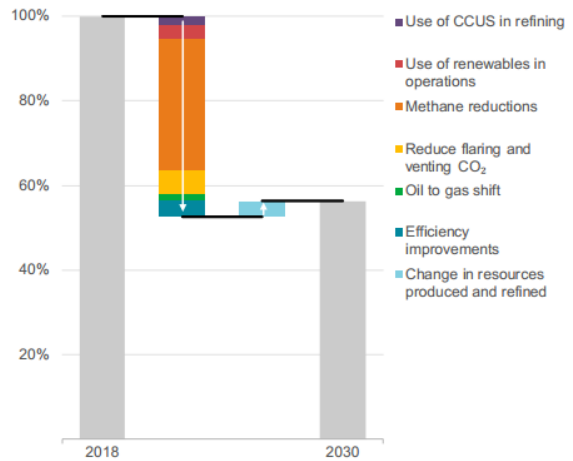


图2 石油和天然气运营全球平均排放强度变化

•电力并不是能源转型的唯一载体。油气公司向全球消费者提供清洁燃料对于降低碳排放极为重要。尽管电力占全球终端能源消费的20%，且这一份额正在增长，但在能源服务需求不断增长的背景下，电力无法独自承担能源转型任务。降低石油和天然气核心业务的排放量是帮助各国通过使用低碳排放燃料降低环境影响的关键步骤。但是，增加油气公司对低碳氢气、生物甲烷和先进生物燃料的投资也至关重要，在十年内这些低碳燃料将需要占到燃料供应总投资的15%左右。

•油气行业对于一些关键的资本密集型清洁能源技术走向成熟至关重要。油气行业的一些资源和能力可能会为解决最难以减排行业的排放问题发挥核心作用。包括碳捕集利用与封存（CCUS）、低碳氢气、生物燃料和海上风能的开发。这些技术的进一步部署以及成本降低将取决于大型工程和项目的管理能力，这正是大型油气公

司的优势所在。当前大型设施中利用 CCUS 捕集的二氧化碳有 3/4 来自石油和天然气运营，该行业占 CCUS 项目总支出的 1/3。如果油气行业可以与政府和其他利益相关者合作，为大规模投资建立可行的商业模式，则可以极大地推动这些技术的部署。

•**快速发展的能源行业将改变上游投资局面。**即使在快速转型过程中，仍然需要对上游项目进行投资，但是开发的资源类型及其生产方式将发生重大变化。在没有任何投资的情况下，现有油气田产量以每年约 8% 的速度下降，大于全球需求的下降速度。因此，对现有油气田和一些新油气田的投资仍然很重要。但是，随着总体投资的减少和市场竞争的加剧，只有那些拥有低成本资源、严格控制成本和低环境影响的企业才具有更强的竞争力。

•**从“油气”到“能源”的转变使油气公司脱离了舒适区，但提供了应对能源转型风险的方法。**一些大型油气公司将转向“能源”公司，向消费者提供各种燃料、电力和其他能源服务。这意味着油气公司将进入一些行业，尤其是电力行业，该行业已经有丰富的专业经验，而且大多数低碳投资机会（海上风能除外）的财务特征和规模与传统油气项目相距甚远。在加速的能源转型过程中，电力在终端能源消费中的占比将超过石油，进入电力行业将为更大范围和程度减少油气行业碳排放量提供机会，并缓解社会压力，但投资者需要仔细衡量行业平衡业务多样化和预期回报的能力。

•**部分国家及其国有石油公司将面临特殊挑战。**负责国家化石资源管理的国有石油公司及严重依赖石油收入的政府将面临很高的风险。动态变化的能源形势促使许多国家重新开始重视经济改革和多样化，主要资源的拥有者将根本改变其发展模式。如果国有石油公司能够有效运作并谨慎面对风险和机遇，则可借此保证经济的稳定。一些领先的国有石油公司正在加紧研究可实现深度脱碳的资源开发模型，例如通过 CCUS 进入氢能市场或专注于化石燃料的非燃烧用途。

•**能源行业的转型可以不包含油气行业，但将更加困难且付出更多成本。**油气公司需要明确能源转型对其运营和商业模式的影响，以及该行业可以为加快能源转型做出的贡献。已经有一些油气公司承诺减少排放量或排放强度，这一现象将越来越普遍。但是，油气行业可以采取更多措施以应对气候变化威胁。未来几年中，气候影响将更为明显和严重，这将迫使社会各阶层寻求应对方案。在目前的石油和天然气行业中还未出现有效的解决方案。

（岳芳）

## IEA 发布德国能源政策评估报告

2月19日，国际能源署（IEA）发布《2020 德国能源政策评估》<sup>15</sup>报告，详细介绍了德国“能源转型”战略及其进展。德国实行以能效和可再生能源为支柱的“能源转型”战略，制定了积极的能源与气候目标，在可再生能源发电方面获得了显著进展，提前达到了2020年目标，但在终端用能部门的进展差异较大，尤其是交通领域的能源转型和能效提升进展落后。在碳减排方面，2017年德国温室气体排放比1990年减少了28%，距离2020年的气候目标（降低40%）差距较大。德国能源供应结构向多元化转变，可再生能源占比逐渐增加，但石油和天然气仍是德国一次能源供应的最主要成分。关键点如下：

### 一、德国“能源转型”战略

近十年来，德国一直推行以可再生能源为主导的“能源转型”战略，把可再生能源和能效作为战略的两大支柱，推动德国到2050年实现低碳、无核的能源体系。

“能源转型”战略共包括三方面目标：一是以“效率优先”为原则，减少所有终端用能部门的能耗；二是尽可能使用可再生能源；三是通过可再生能源发电来满足剩余的能源需求。2014年至2017年间，德国发布了《国家能效行动计划》和《2050年气候行动计划》，通过了《电力市场进一步开发法案》和《能源转型数字化法案》，并两次修订了《可再生能源法案》。近十年来，德国制定了积极的能源与气候目标，比如到2030年，温室气体排放比1990年降低55%，可再生能源占终端能源消费的55%和发电量的65%；到2050年，温室气体排放比1990年降低80%-95%，可再生能源占终端能源消费的60%和发电量的80%等（详见图1）。

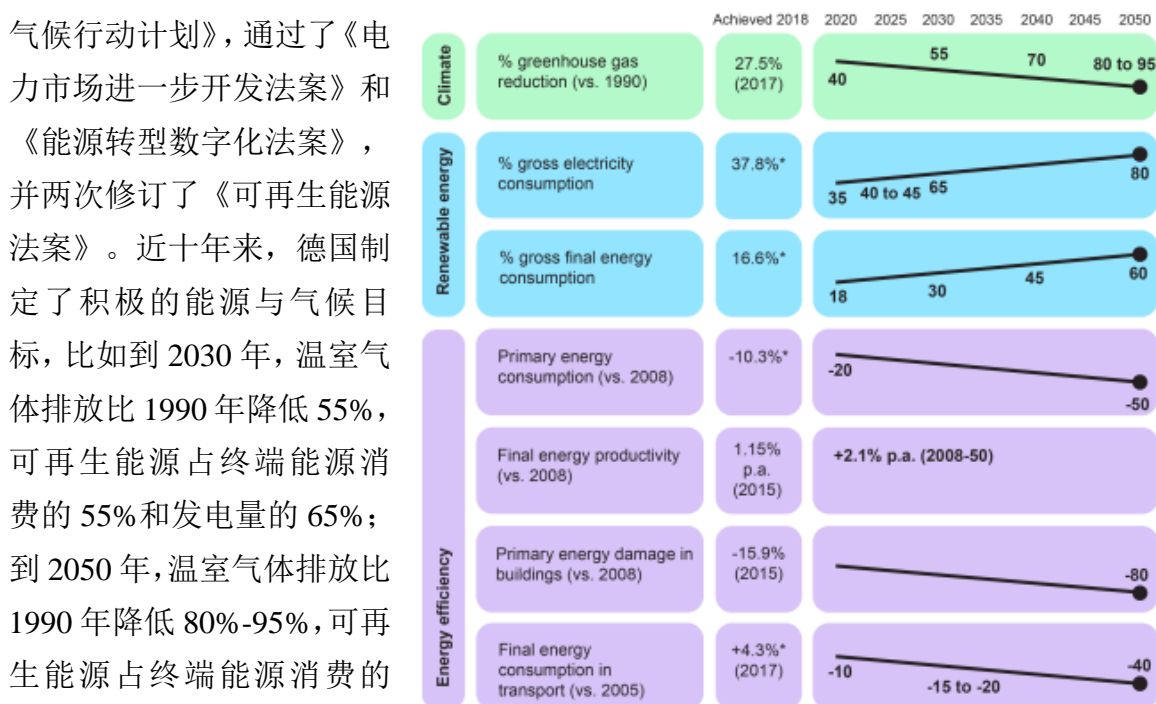


图1 德国的能源和气候目标

迄今为止，德国在可再生能源发电方面已经取得了良好进展，2018年可再生能源已占到发电量的35%。德国政府承诺到2022年全面废除核电，到2038年淘汰燃

<sup>15</sup> Germany 2020 Energy Policy Review.  
[https://webstore.iea.org/download/direct/2955?fileName=Germany\\_2020\\_Energy\\_Policy\\_Review.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2955?fileName=Germany_2020_Energy_Policy_Review.pdf)

煤发电。但在交通领域的能源转型和能效提升方面进展落后，2017 年德国交通运输部门的能源消费比 2005 年增加了 4.3%，其终端能源生产力平均每年仅提升 1.15%。另外，石油仍然是德国能源供应的最大来源，2018 年占一次能源供应的 33%。而在碳减排方面，2017 年德国的温室气体排放比 1990 年减少了 28%，距离到 2020 年的气候目标（降低 40%）差距较大。鉴于各部门实现能源和气候目标进展不均衡的情况，为了更好的跨部门协调，德国政府于 2019 年宣布成立气候保护内阁委员会，由总理默克尔直接领导，涵盖了与减缓气候变化相关的 6 个部门，将更快速直接地做出决策，以减少从发电到农业等部门的碳排放。

## 二、能源供需现状

过去几十年，德国能源供应结构逐渐从以煤和石油为主导向多元化转变，可再生能源占比逐渐增加，但石油和天然气仍是德国一次能源供应（TEPS）和终端能源消费（TFC）的最主要成分，煤电仍为德国的最大发电来源。2018 年，德国一次能源供应量为 2.98 亿吨油当量，其中石油、天然气和煤共占 80%（分别为 33%、24% 和 23%），低碳能源则占 22%。煤炭、核能和可再生能源主要被用于发电，石油和天然气则主要用于终端消费。

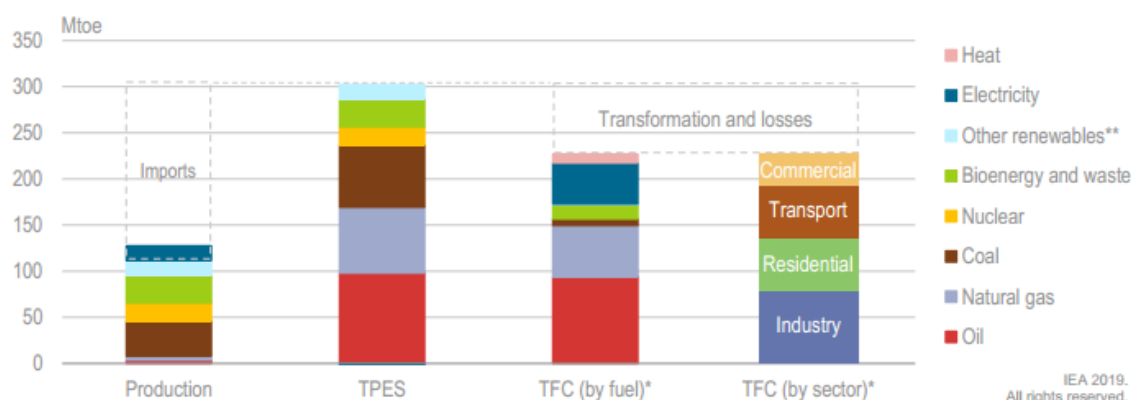


图 2 2018 年德国能源供应和消费情况（单位：百万吨油当量）

德国国内的能源供应变化体现出了德国能源转型的进展。2008-2018 年期间，化石燃料产量下降了 1/3，而核能产量几乎下降了一半，由于可再生能源产量上升，因此这期间德国国内能源总产量仅下降 16%。德国国内的石油和天然气产量很少，主要依赖进口；煤炭产量也不足以满足需求，约有近一半的煤炭需要进口。2018 年，德国国内能源总产量为 1.12 亿吨油当量，略高于一次能源供应总量的 1/3。煤炭在国内能源总产量中占比最大，生物能源和废物利用能源产量位居第二。可再生能源产量的增长使德国的能源自给率维持在 40% 左右。



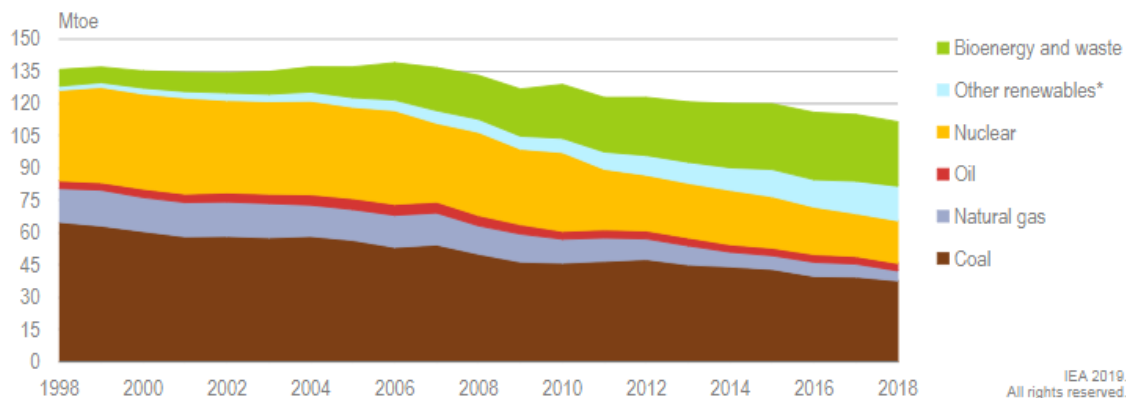


图 3 1998-2018 年德国能源生产情况 (单位: 百万吨油当量)

在能源消费方面，德国近十年的终端能源消费保持稳定，波动在 6% 以内。2017 年，德国终端能源消费量为 2.27 亿吨油当量，其中化石能源占比达到 2/3。具体而言，41% 的终端能源消费由石油供应，其次是天然气 (24%) 和电力 (20%)。在终端用能部门中，住宅和商业部门共消费 40%，工业部门消费 35%，交通运输部门消费 25%。在过去的五年中，交通运输部门的能源消费量增加了 8%，可能无法实现到 2030 年能源需求比 2005 年减少 15%-20% 的目标。

### 三、能效政策

德国一直将其能效战略与气候战略相结合，致力于降低能源强度。在“能源转型”战略中高度重视能效，设定了到 2020 年比 2008 年减少 20%，到 2050 年减少 50% 的目标。为了实现这一目标，2014 年 12 月，德国政府通过了《国家能效行动计划》(NAPE)，采取一系列措施降低能耗，重点关注三个领域：(1) 向消费者提供有关能效的信息和建议；(2) 通过激励措施促进有针对性的能效投资；(3) 采取更多行动以提升能效，包括要求大公司进行能源审计，并对家用电器和新建筑物启用新标准。根据 NAPE，德国将其 2016-2020 年期间节能措施的公共财政支持增加到了 170 亿欧元。

2000-2017 年间，德国国内生产总值 (GDP) 稳定增长，但终端能源消费总量以及人均终端能源消费均保持相对稳定，表明经济增长与能源消费之间已经脱钩。虽然 2008-2018 年德国的一次能源消费量已经减少了 10%，仍无法实现其到 2020 年的目标。由于难以实现预期目标，德国政府于 2016 年启动了《能效绿皮书》的公众咨询，将以“能效优先”为原则，计划制定涵盖所有行业的新能效战略，明确 2021-2030 年将采取的具体能效措施。此外，政府将制定路线图，以实现到 2050 年将一次能源消费减少一半的目标，尤其将关注供暖和建筑部门的能源需求。

能源和气候基金 (EKF) 是德国能效相关措施和计划的主要资金来源之一，该基金于 2010 年由联邦法律设立，由欧盟碳排放交易体系 (ETS) 的许可权拍卖收入提供资金，重点支持建筑、工业、市政、产品和家用电器以及交通运输的各种能效措

施。2018 年，ETS 拍卖收入中有 26 亿欧元投入该基金，德国联邦预算还给该基金分配了 28 亿欧元。此外，德国政府还推行能源绩效合约（EPC），建立标准化的 EPC 范本。同时通过咨询程序，对公司和市政当局进行检查以确定 EPC 是否有助于提高其能源效率。联邦政府还促进与各州之间的合作和对话，以协调和改善 EPC 的监管环境。

德国还是能源服务的主要市场之一，《能源服务法案》和其他能源效率措施要求能源供应商向用户提供有关其能效措施和服务的信息。作为这项工作的一部分，联邦能效办公室（BfEE）会跟踪和评估能源服务市场。庞大而多样化的能源服务供应商储备意味着咨询服务和分析市场规模也很大。能源合同持续增长，2016 年有 560 家公司提供能源合同服务（主要是能源供应合同以及运营和维护模式），合同总额达到了 77 亿欧元，另外有 1100 家供应商提供了 4.35 亿欧元的能源管理服务。

#### 四、可再生能源政策

可再生能源是德国能源转型的核心，根据其欧盟义务以及国家政策和立法制定了一套完善的短、中、长期可再生能源目标，包括：到 2020 年可再生能源在终端能源消费中占比 18%，在发电量中占比 35%；到 2030 年可再生能源在终端能源消费中占比 30%，在发电量中占比 65%；到 2050 年可再生能源在终端能源消费中占比 60%，在发电量中占比 80%。

德国部署可再生能源的主要政策措施和框架主要包括在电力、供热和交通运输领域推广可再生能源的具体政策，建筑部门的能效政策，以及一般性的能源和气候变化政策框架。为推广可再生能源在终端用能部门的部署，德国做出了如下举措：

（1）电力领域，在 2014-2018 年多次修订《可再生能源法案》（EEG）；（2）供热领域，2015 年修订了“市场激励计划”（MAP），推行供热市场的统一监管制度，推广热泵，建立具有季节性储热的低温热网；（3）交通领域，将温室气体配额作为减少交通部门温室气体排放的一种手段，并推行电动汽车、生物燃料、铁路运输方面的措施。

通过上述措施，德国在可再生能源方面取得了令人瞩目的进展，特别是在电力部门，可再生能源发电量的增长一直由风能主导，且屋顶太阳能光伏和沼气发电的发展也居于世界前列。2017 年，可再生能源在德国终端能源消费总量中的份额为 15.5%，实现了可再生能源发电的 2020 年目标，还有望实现其可再生能源供热目标。但是，运输部门的差距很大。因此，德国很可能无法实现其 2020 年可再生能源占终端能源消费 18% 的目标。德国需要一项明确的战略来提高交通、建筑和工业中的可再生能源占比。但是，现有的燃油和电费税收制度阻碍了可再生能源在上述部门中的发展，尤其是用于供热和制冷。随着核电和煤电的逐步淘汰，可再生能源在电力系统中占比将进一步提高，德国将需要改善电力基础设施以适应波动性可再生能源

电力的持续增长。

## 五、电力转型

德国的电力转型进展良好，尽管煤炭（主要是褐煤）仍是最大的电力来源，但在过去十年中，可再生能源已取代了大部分核能。2017年，风能超越核能和天然气成为第二大发电来源。作为“能源转型”战略的核心，德国计划进一步扩大可再生能源在发电中的占比，在2018年3月将其2030年可再生能源在发电量中占比达到50%的目标提升至65%。德国在2014年和2017年对《可再生能源法案》进行修订，对可再生能源资助进行了大刀阔斧的改革，以降低成本，提高竞争力。促进可再生能源发电的持续增长将需要采取很多措施以促进可再生能源的系统集成，包括改善税收、市场监管以及输配电基础设施。德国已采取措施改革电力市场法规，尤其是2016年通过了《电力市场进一步开发法案》，以促进波动性可再生能源发电的系统整合。然而，德国大部分风能资源位于德国北部，而大多数电力需求来自德国南部和西部的大城市和工业区。输电系统限制了电力的南北传输，北部各州面临电力过剩，而南部各州则处于电力短缺状态，随着南部和西北部最后的核电站被关闭以及北部风电并网，这种不平衡状况将进一步恶化。这种不平衡导致了南部的“重新调度”措施和北部的可再生能源发电量削减，每年要为此付出数亿欧元的成本。德国政府规划建设4条南北输电线路，但民众的反对大大减慢了新的输电线路建设，公众的反对仍然是电网基础设施选址的最主要障碍。因此，扩张电网是政府的优先事项，德国政府已经在2019年5月启动了新的计划程序，将有助于减少规划和选址流程，大大缩短工程时间。德国是欧洲电力市场的核心，过去几年中德国已经与邻国建立了互联，未来还将进一步扩充。

德国逐步废除核电举措已基本步入正轨，德国政府还制定了逐步淘汰煤电的战略。2018年，德国政府宣布成立“增长、结构变化和就业委员会”（也称“煤炭委员会”），启动了从煤炭过渡到可再生能源的议程。2019年1月，煤炭委员会提出了逐步淘汰燃煤发电的全面路线图，并明确最迟将在2038年关闭德国的燃煤电厂，具体的阶段性目标包括：到2022年至少关闭12.5 GW燃煤电厂，到2030年关闭25.6 GW的燃煤电厂。此外，委员会建议为煤矿地区提供400亿欧元的过渡期援助。由于目前发电容量过剩，而且政府有降低能源消费总量的目标，因此目前尚不清楚需要新建多少发电机组以替换将逐步淘汰的火电机组，但很可能通过增加可再生能源发电容量以及提升天然气发电利用率以替代淘汰的煤电容量，从而进一步支持输电网络和可再生能源的系统集成。德国可能会增加天然气发电量以调节峰值发电量，这将使电力安全与天然气安全越来越紧密地联系在一起。

## 六、能源安全

德国拥有多元化的石油供应来源、完善的供应基础设施、自由的市场和大量石

油紧急储备，这些都有助于保证其石油供应安全。通过实施低排放车辆和相关基础设施的补贴和税收优惠等财政激励措施，可以减少交通运输部门对石油的需求，进而支持德国的石油安全以及低碳转型。德国天然气供应严重依赖进口，进口天然气占到了供应总量的 93%。迄今为止德国最大的天然气进口来源国是俄罗斯，其次是荷兰和挪威。尽管德国政府致力于发展大规模可再生能源，但逐步淘汰核能和煤炭将增加德国对天然气发电的需求。可再生能源电力制氢是具有潜力的能源转型长期解决方案，氢气需求的增加将提升德国对天然气的需求。德国国内天然气产量较小且持续下降，未来几年从欧洲进口的天然气量也将下降，尤其是从荷兰，该国格罗宁根气田的产量正在下降，最迟将在 2022 年完全停产。天然气供应安全成为政府的头等大事，天然气供应的多元化将更加重要。另外，由于天然气在发电中的用途主要是为了满足高峰用电需求，电力安全与天然气安全也越来越相关。

### 七、能源技术创新

为了推动“能源转型”战略的发展，德国持续增加对能源技术研发的公共投入，2017 年，德国投入 10.1 亿美元用于能源相关的研究、开发和示范（RD&D），占其 GDP 的 0.031%，相比前一年增长了 14%。其中，可再生能源技术占能源 RD&D 总预算的 29%，主要用于太阳能和风能研究；其次是能效（主要用于提高工业能效）和核能（包括核聚变），分别占 22% 和 21%；其他电力和储能技术占到 13%，化石燃料仅占 5%，其中一半以上用于碳捕集和利用的研究。此外，德国各州也投入资金支持能源技术研究，2016 年德国各州的支出总额超过了 2.48 亿欧元。

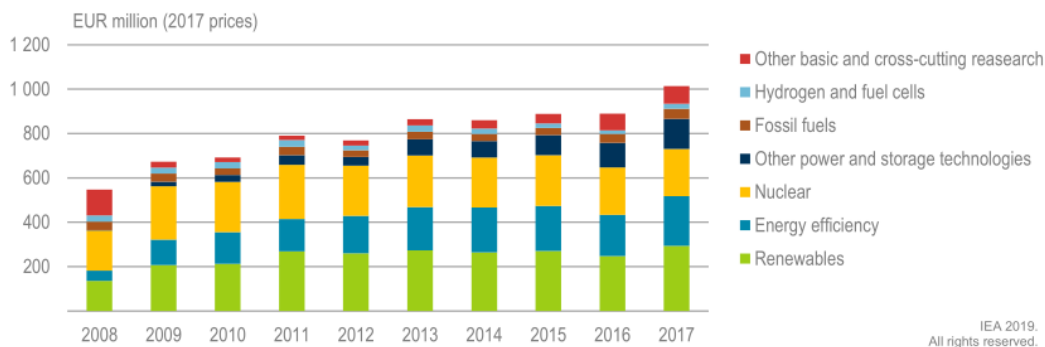


图 4 2010-2017 年德国能源技术的公共研发支出 (单位: 百万欧元)

德国政府实施长期的能源研究计划作为能源技术创新的指导原则和配套政策，2018 年公布了“第七期能源研究计划”，计划在 2018-2022 年间共投入 64 亿欧元预算支持能源研究，较第六期计划（2013-2017 年）增长 45%，预算资金主要来源于联邦预算和能源与气候基金。“第七期能源研究计划”由联邦经济与能源部（BMWi）、教育与研究部（BMBF）和食品与农业部（BMEL）共同制定，并根据研究主题与技术成熟度等级进行了实施分工：教育与研究部负责资助技术成熟度为 1-3 级的应用导向基础研究，经济与能源部负责资助 3-9 级的应用研究，食品与农业部负责资助 3-7 级的生物能源研究。



与上一期计划不同，“第七期能源研究计划”的资助重点从单项技术转向解决能源转型面临的跨部门和跨系统问题，重点关注如下领域研究：（1）终端用能部门的能源转型，如提升能效，降低能源消耗，增加可再生能源份额；（2）运输部门技术，如电池、燃料电池和生物燃料；（3）发电技术，包括各种可再生能源发电和火电技术；（4）可再生能源的系统集成，包括电网开发、储能和部门融合；（5）跨领域技术，如数字化、资源管理和碳利用技术；（6）核安全技术，重点关注到 2022 年核电厂的安全运行及其退役和放射性废物处置管理。此外，该计划还引入了“应用创新实验室”（Living lab）机制建立用户驱动创新生态系统，以加快成果转移转化。

（周荷雯 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](mailto:energy@whlib.ac.cn)