

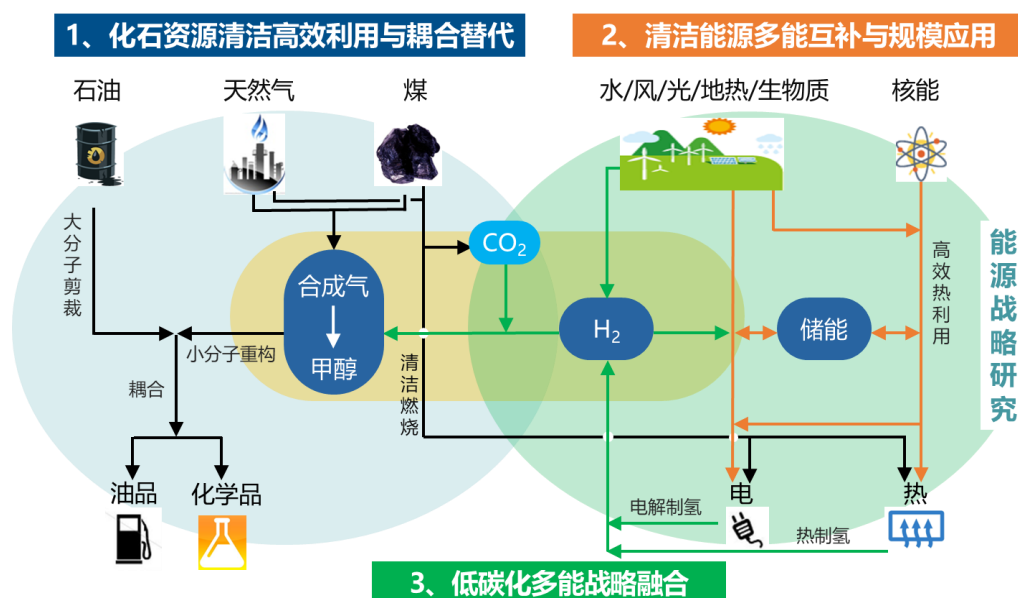
“变革性洁净能源关键技术与示范” A 类先导专项

“面向国家能源结构变革战略研究” 课题



# 洁净能源科技动态监测快报

2019 年第 01 期（总第 01 期）



## 本期看点

- 美 NETL 评估高性能材料在发电和航空航天领域的出口潜力
- 国际原子能机构预测 2050 年全球核电发展趋势
- 欧洲能源研究联盟发布至 2030 年氢能与燃料电池研究规划
- 国际能源署发布《美国能源政策评估》报告
- 美信息技术与创新基金会发布全球能源创新指数报告
- 澳大利亚可再生能源署资助电网消纳、氢能和工业脱碳研究

中国科学院洁净能源创新研究院  
中国科学院武汉文献情报中心

# 目 录

2019 年第 01 期 (总第 01 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

- 美 NETL 评估高性能材料在火力发电和航空航天领域出口潜力 · 2
- DOE 资助 1.1 亿美元推进 CCUS 项目研发和部署 ..... 4
- DOE 资助 5600 万美元推进洁净煤技术研发与示范 ..... 5
- NETL 化学链燃烧载氧体耐久性研究取得突破性进展 ..... 7

## ◆ 清洁能源多能互补

- 国际原子能机构预测 2050 年全球核电发展趋势 ..... 8
- 英国法拉第研究院资助 5500 万英镑研发先进储能技术 ..... 11
- 全球首个基于全柔性组件的柔性可伸缩全固态锂电池 ..... 11
- 新工艺有机太阳电池理论寿命超过两万年 ..... 13

## ◆ 低碳化多能融合

- 欧洲能源研究联盟发布至 2030 年氢能与燃料电池研究规划 .... 15
- 澳大利亚可再生能源署资助电网消纳、氢能和工业脱碳研究... 16
- 铜锌双金属催化剂实现二氧化碳到液态燃料高效催化转化 ..... 18
- Pt-O-Pt 原子体系将 Pt 单原子的 CO 催化活性提升百倍以上 .... 19

## ◆ 能源战略研究

- 国际能源署发布《美国能源政策评估》报告 ..... 21
- 美信息技术与创新基金会发布全球能源创新指数报告 ..... 26
- 埃克森美孚发布《世界能源展望 2040》报告 ..... 28
- 《Science》：太瓦级光伏将改变全球能源格局 ..... 31

## 本期概要

**美国 NETL 发布《高性能材料的出口潜力评估》报告，评估了高性能能源材料在发电和航空航天行业的出口潜力和对美国的经济影响：**2026-2040 年美国高性能材料在先进超超临界发电和天然气联合循环发电市场的累计出口总额将超过 32 亿美元，在航空航天市场的出口总额将超过 18 亿美元，还将分别提供大量工作岗位和收入。

**美国能源部 (DOE) 相继资助了碳捕集、利用与封存 (CCUS) 和洁净煤技术研发项目：**资助 1.1 亿美元用于煤炭和天然气电厂碳捕集系统的前端工程设计研究，加速 CCUS 区域部署以及碳封存保障设施事业；资助 5600 万美元关注 6 个洁净煤技术主题：煤制高价值产品、先进蒸汽轮机、先进材料、煤基资源回收稀土元素和关键材料、碳封存、交叉领域研究。

**国际原子能机构 (IAEA) 发布了新版《至 2050 年能源、电力和核电预测》报告，分析预测了到 2050 年全球以及各地区核能的发展趋势：**到 2050 年全球终端能源消费总量将以约 1% 的增速增长 28%，而电力消耗则将增长 91%，其在全球终端能源消费占比将从 18.8% 提升至 26.1%。保守情景假设维持当前的政策、技术、市场趋势不变，并按期淘汰现有核电站，预计到 2050 年全球核电装机容量将比 2018 年减少 6% 至 371 GW；乐观情景假设延长现有核电站运行寿命，且对各国政策、技术和市场发展有更乐观的估计，到 2050 年全球核电装机容量则将增长 81% 至 715 GW。

**英国法拉第研究院资助 5500 万英镑支持储能电池 4 个领域研究，以期推动新电池技术及工艺的商业化：**下一代电极制造；下一代锂离子正极材料；下一代钠离子电池；超越锂离子的替代电池化学。

**欧洲能源研究联盟 (EERA) 发布了新版《氢能与燃料电池联合研究计划实施规划》，确定了欧盟到 2030 年的研究目标、行动计划和优先事项：**本次更新的实施规划提出了 7 个子领域的研究重点和关键项目，并明确了实施优先级和预算：电解质；催化剂与电极；燃料电池电堆材料与设计；燃料电池系统；建模、验证与诊断；氢气生产与处理；氢气储存。

**国际能源署 (IEA) 发布《美国能源政策评估》报告，系统评述了页岩革命后美国能源政策调整变化情况：**页岩革命使美国油气产量大幅度增长，美国从能源进口国转变为能源出口国。基于这一情况，美国政府将能源战略整体思路由“能源独立”调整为“能源主导”，即将能源作为一种重要的国家战略资源，利用能源出口扩大美国在国际能源市场影响，以加强美国全球领导力。

**美国信息技术与创新基金会 (ITIF) 发布《全球能源创新指数：各国对全球清洁能源创新系统的贡献》报告，系统评估了 23 个加入“创新使命” (Mission Innovation) 行动的成员国对全球能源创新的贡献：**相较于自身的经济规模，挪威、芬兰和日本对全球清洁能源创新做出了最重要的贡献。尽管宣布退出巴黎协定，2018 年美国对清洁能源技术和能源基础科学的公共经费投入总额均远超其他国家。中国对清洁能源技术研发示范的公共经费投入总额居世界第二，但综合排名靠后，在推动清洁能源技术的规模化应用维度表现较好。

# 化石资源清洁高效利用

## 美 NETL 评估高性能材料在火力发电和航空航天领域出口潜力

10月10日，美国国家能源技术实验室（NETL）发布《高性能材料的出口潜力评估》报告<sup>1</sup>，分析了 NETL 开发的高性能材料在先进超超临界（A-USC）发电、天然气联合循环发电和航空航天领域的潜在国际需求，评估了高性能材料的出口潜力和对美国的经济影响。报告认为，2026-2040 年美国高性能材料在先进超超临界发电和天然气联合循环发电市场的累计出口总额将超过 32 亿美元，在航空航天市场的出口总额将超过 18 亿美元，还将分别提供大量工作岗位和收入。报告要点如下：

### 一、NETL 高性能材料研究情况

NETL 在其“先进能源材料”跨领域研究计划<sup>2</sup>资助下，进行高性能材料研究，包括高温合金、更耐腐蚀以及高温蠕变强度更好的材料，以降低化石燃料发电系统成本并提高性能。这些材料可承受极高的温度和压力，并可在各种腐蚀性炉渣和气体环境中运行，许多材料还可抵抗压力、温度变化引起的疲劳以及长时间暴露于高温环境引起的蠕变，上述属性使其具备在航空航天、采矿、电子和医疗设备领域的应用潜力。NETL 对高性能材料的开发主要集中在先进制造、计算材料、结构研究以及结构合金开发四个主题领域，具体研究内容如表 1 所示。

表 1 NETL 高性能材料研发具体内容

主题领域	具体内容
先进制造	<ul style="list-style-type: none"><li>• 大型零件增材制造</li><li>• 化石燃料发电系统组件使用高镍合金增材制造的可行性验证</li><li>• 化石燃料电厂中梯度结构合金增材制造的计算材料和力学模型集成</li><li>• 集成计算材料工程用于超临界 CO<sub>2</sub> 系统中具有抗高温蠕变和抗氧化性的镍高温合金热交换器的先进制造</li><li>• <math>\gamma'</math> 相强化合金的增材制造</li></ul>
计算材料研究	<ul style="list-style-type: none"><li>• 化石能源发电系统高性能结构合金设计的新型混合模型</li><li>• 镍基高温合金蠕变变形的多模态方法</li><li>• 极端环境下材料特性的高通量计算框架</li><li>• 镍基高温合金的先进计算方法</li><li>• 结合 <math>\eta</math> 相变的镍基高温合金蠕变物理模型的开发</li><li>• 用于高温化石能源发电的先进抗蠕变合金的加速蠕变测试程序</li><li>• 单轴蠕变和蠕变疲劳数据与模型的评估指南</li><li>• 先进超超临界零件设计和制造过程中大型 H282 锻件和铸件以及 H282 和</li></ul>

<sup>1</sup> NETL Analysis Projects Global Demand for High-Performance Materials. <https://netl.doe.gov/node/9266>

<sup>2</sup> Advanced Energy Materials. [https://netl.doe.gov/sites/default/files/2019-03/Program-124\\_0.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/2019-03/Program-124_0.pdf)

	Inc740 焊件的长期蠕变和疲劳数据，并为机械性能预测计算模型提供数据
	<ul style="list-style-type: none"> <li>•先进燃煤锅炉中极端环境材料的腐蚀研究</li> <li>•先进发电厂耐蠕变合金的焊接性能研究</li> <li>•基于计算模型揭示氧化和热腐蚀降解的复杂耦合机理</li> <li>•化石燃料发电厂转子组件锻造缺陷损伤成核的基于粒子系统高性能建模</li> </ul>
结构研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>•先进超超临界系统组件测试</li> <li>•先进超超临界汽轮机中先进镍基合金的性能研究</li> </ul>
结构合金开发	•镍基合金的先进制造建模

## 二、高性能材料的出口潜力

### 1、火力发电领域

#### (1) 先进超超临界发电

美国目前没有新建燃煤发电的计划，但正在开发高性能材料用于先进发电系统，如先进超超临界电厂。欧盟、中国、印度等国家或地区正进行先进超超临界发电系统的研究、开发和示范，国际能源署（IEA）预测的先进超超临界发电技术开发和部署时间如图 1 所示。在先进超超临界商业化阶段（2026-2040 年），美国以外地区将新建 397 GW 的燃煤发电容量，参照当前全球燃煤发电机组中约 20% 是超临界或超超临界机组，2026-2040 年间预计将新建 84 GW 先进超超临界机组。



图 1 IEA 预测的先进超超临界发电技术开发和部署时间

除美国外，全球目前正在进行的先进超超临界研发活动包括：①欧盟通过 AD700 计划和 COMTES700 计划，进行高性能材料开发以及先进超超临界锅炉、汽轮机和其他组件的设计、制造和评估，目前示范装置已投入运营，可用于评估新材料和组件；②中美两国成立中美清洁能源联合研究中心—清洁煤技术联盟，共同进行大容量先进超超临界锅炉的燃烧、传热和灰分沉积特性等研究，预期成果是获得高性能材料和先进超超临界电力系统组件相关的计算模型；③日本通过经济产业省（METI）的“凉爽地球”（Cool Earth）创新能源技术计划，支持高性能材料开发以及先进超超临界锅炉、汽轮机和阀门组件的评估，2015 年 5 月开始对锅炉部件进行长时间的现场测试，预计 2020 年左右实现效率为 48%（以低位发热量为基准）的发电系统商业化；④印度的公共事业机构和研究中心已经开始进行先进超超临界发电技术的开发和示范，目标是到 2020 年建成 A-USC 示范设施。上述国家/地区的相关研究可能会与美国的高性能材料技术在国际市场形成竞争，NETL 综合考虑全球的研究计划和政策环境后认为，美国将可能占有全球先进超超临界发电领域 50% 的市场。

#### (2) 天然气联合循环发电

根据 IEA 的预测，2030-2040 年是天然气联合循环发电的商业化阶段，美国以

外地区将新建 589-649 GW 的天然气发电机组，而且该阶段新建的所有天然气发电机组都将采用包含高性能材料的燃气轮机。

## 2、航空航天领域

航空航天有可能成为高性能材料在发电领域以外的最大市场，该领域对高温合金的需求主要是为了提高发动机效率和减少排放。高温合金每年约占飞机材料成本的 20%，大部分用在飞机发动机中，在航空航天的其他应用还包括涡轮叶片、叶轮、燃烧室、涡轮盘、飞机紧固件、机身组件、火箭发动机等，主要涉及三个航空航天工业领域：飞机发动机和发动机零件制造；航天器和导弹的推进装置和零件；其他飞机零件和辅助设备制造。NETL 估计，如果 2025 年实现高性能材料市场化，将使上述行业的出口增长率从每年 3.5% 提升至 10%，2026-2040 年航空航天业累计潜在出口将超过 1420 亿美元（以 2018 年美元计），其中 35 亿美元将归因于 NETL 的研发和示范。

## 三、高性能材料出口对美国的经济影响

按照 NETL 的高性能材料研究计划目标，假设到 2026 年实现高性能材料在先进超超临界发电和航空航天领域的商业应用，到 2030 年实现其在天然气联合循环发电领域的商业应用，以 550 MW 先进超超临界发电厂和 350 MW 天然气联合循环发电厂为代表，预计先进超超临界发电厂和天然气联合循环发电厂中高性能材料的成本分别为 1380 万美元和 761 万美元，分别占电厂成本的 4% 和 10%。以此为基准，以 2026-2040 年美国占据海外先进超超临界发电和天然气联合循环发电市场的 50% 计，其中高性能材料的累计出口总价值将超过 32 亿美元，创造工作岗位超过 28000 个岗位，产生 18 亿美元以上的收入，以及超过 45 亿美元的 GDP。另外，考虑美国航空航天工业高性能材料相关的出口增长和美国在全球市场的占有率，2026-2040 年航空航天业出口产品中高性能材料的总价值将超过 18 亿美元，创造工作岗位超过 17000 个，产生 12 亿美元以上的收入，以及超过 29 亿美元的 GDP。

（李鑫 岳芳）

## DOE 资助 1.1 亿美元推进 CCUS 项目研发和部署

9 月 13 日，DOE 宣布资助 1.1 亿美元支持先进碳捕集、利用与封存（CCUS）技术的研发、设计与试验<sup>3</sup>，以大力推动 CCUS 技术进一步发展、应用与大规模商业化部署。本次资助着重关注三大主题，包括煤炭和天然气电厂碳捕集系统的前端工程设计（FEED）研究，加速 CCUS 区域部署以及碳封存保障设施事业（CarbonSAFE），具体内容如下：

<sup>3</sup> U.S. Department of Energy Announces \$110M for Carbon Capture, Utilization, and Storage.  
<https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-110m-carbon-capture-utilization-and-storage>

### **1、煤炭和天然气电厂碳捕集系统的前端工程设计（FEED）研究（资助金额：5540 万美元）**

在德克萨斯、伊利诺伊、加利福尼亚、北达科他和阿拉巴马州多家燃煤电厂和燃气联合循环发电厂完成基于胺基碳捕集工艺的燃烧后碳捕集系统前端工程设计研究，评估技术和经济可行性；对内布拉斯加州一座燃煤电厂改造加装基于新型化学溶剂吸收的先进碳捕集系统，并开展前端工程设计和成本核算研究，为后续的 CCUS 部署提供经济数据参考；在怀俄明州一座燃煤电厂完成基于膜法碳捕集技术的 CCUS 系统的前端工程设计研究，为大规模商业部署积累实践经验；在德克萨斯州一座燃气联合循环发电厂开展基于哌嗪（PZ）及其混合胺溶液 CO<sub>2</sub> 吸附新工艺的 CCUS 系统性能验证试验，评估 CO<sub>2</sub> 捕集效能和经济性。

### **2、加速 CCUS 区域部署（资助金额：2000 万美元）**

巴特尔研究所和伊利诺伊州地质调查局领导下的美国中西部地区地质封存合作伙伴联盟合作，共同评估美国中西部和东北部三个盆地地区碳捕集和地质封存的潜力以及存在的技术挑战；新墨西哥州矿业技术学院将组建西部地区碳利用和封存合作伙伴联盟，对西部地区现有 CCUS 数据进行分类建库，并利用这些数据进行建模分析，为美国西部地区部署 CCUS 创建一系列成熟度指标；南部各州能源委员会将组建东南地区碳利用和封存合作伙伴联盟，旨在该地区确定至少 50 个合适的碳封存地点，同时解决该地区碳封存技术面临的关键技术挑战；北达科他大学将组建平原地区二氧化碳减排合作伙伴联盟，评估美国西北地区和加拿大各省的沉积盆地 CO<sub>2</sub> 地质封存潜力，加速上述地区的 CCUS 商业化部署进程。

### **3、碳封存保障设施事业（资助金额：3500 万美元）**

完成一个 30 年内能够捕获 5000 万公吨 CO<sub>2</sub> 的商业规模二氧化碳地质封存场址的详细物理表征；申请并获得地下注入井六类井许可证，以建造注入井；完成二氧化碳捕集性能评估；并严格按照《国家环境政策法案》要求，开展封存场址的各项环境指标评估工作。

（郭楷模）

## **DOE 资助 5600 万美元推进洁净煤技术研发与示范**

9 月 20 日，DOE 宣布将投入 5600 万美元支持 32 个先进煤炭研发项目<sup>4</sup>，旨在通过新技术的研发和示范推进洁净煤技术的发展。本次资助着重关注六个主题：煤制高价值产品；先进蒸汽轮机；先进材料；煤基资源回收稀土元素和关键材料；碳封存；交叉领域研究。具体研究内容如下：

<sup>4</sup> U.S. Department of Energy Invests \$56 Million in Coal Technology Projects.  
<https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-invests-56-million-coal-technology-projects>

## **1、煤制高价值产品（资助金额：1000 万美元）**

**（1）改进煤炭原料用于发电和炼钢。**开发和测试煤炭提质/热解技术，以生产低排放、高热值燃料用于发电和炼钢，并从低阶煤中回收高价值煤产品的前驱体。

**（2）煤制高价值固体产品。**将烟煤和次烟煤转化为高价值聚氨酯泡沫产品和低硫燃料油副产品的新工艺；将低成本煤（如褐煤）转化为高性能、高价值的锂离子电池石墨的新方法；煤制高价值碳纳米材料和吸附剂的经济高效技术；煤制碳纤维的新工艺；利用煤制造高价值煤塑复合材料以开发煤塑复合地板；煤制碳纤维生产高价值复合材料的连续加工技术；利用直接液化技术使用煤生产碳纤维前驱体。

**（3）利用微波或等离子体技术将煤转化为高性能碳材料。**使用低温微波等离子体煤热解技术将煤转化为工业电极用碳和石墨材料，以及 3D 打印复合材料；将煤低成本转化为优质石墨烯的技术。

## **2、燃煤电厂先进蒸汽轮机（资助金额：1190 万美元）**

开发用于燃煤电厂蒸汽轮机的增材制造解决方案，以降低常规维护、维修和大修成本，提高蒸汽轮机运行效率；利用增材制造加快蒸汽轮机的设计和制造过程。

## **3、高效、灵活、可靠的燃煤电厂先进材料（资助金额：500 万美元）**

开发用于先进超超临界锅炉的耐腐蚀和耐侵蚀涂层；大面积电弧增材制造用于低成本生产先进超超临界锅炉组件；基于增材制造开发和示范用于先进超超临界发电厂的异种金属焊接的复合过渡接头；开发先进发电循环组件的低成本热等静压制造工艺和焊接工艺；将新型镍基高温合金 Haynes 282 焊接到用于蒸汽轮机转子的几种常用钢材上，从而为先进超超临界蒸汽轮机提供模块化转子。

## **4、煤基材料回收稀土元素和关键材料（资助金额：1500 万美元）**

利用创新低成本工艺和电路利用煤基原料大规模生产稀土氧化物和关键材料（钴和锰）的示范；从褐煤及其相关原料中回收稀土的中试示范；开发能够高效从酸性矿山废水中回收稀土元素和关键材料的连续工艺，并进行中试示范。

## **5、CO<sub>2</sub> 地下封存的传感器开发（资助金额：530 万美元）**

开发、制造和示范基于无线微传感器的集成井下传感系统，以监测 CO<sub>2</sub> 地下封存区的 CO<sub>2</sub> 羽流流动。开发和验证一种新型传感器系统，将集成无线自主微传感器、传感器封装、定位技术及智能完井技术，以提高监测地下流体运动的能力。

## **6、交叉领域研究（资助金额：930 万美元）**

**（1）嵌入式传感器的先进制造。**通过增材制造方法，开发用于监测蒸汽轮机运行的嵌入式传感器，以及开发用于监测燃煤锅炉运行的内置传感器的陶瓷锚固件。

**（2）燃煤电厂冷却技术。**开发并示范全天候亚露点冷却塔原型，以提高火电厂效率和运行灵活性；构建、优化和测试冷却塔羽流收集系统；通过吸湿冷却系统回收发电厂废水。



(3) **燃煤电厂的建模及预测。**对当前和下一代锅炉组件中使用的镍基高温合金材料的行为和老化进行建模和预测；通过模型研究现有火电厂循环运行对其关键组件的影响，提出经济高效的运行解决方案以延长电厂寿命；开发基于组件老化的建模工具包以优化电厂运行；电厂蒸汽循环关键组件的寿命建模研究。

(岳芳)

## NETL 化学链燃烧载氧体耐久性研究取得突破性进展

载氧体是化学链燃烧中氧和热量的载体，其耐久性直接影响反应性能，阻碍了化学链燃烧的商业化应用。美国国家能源技术实验室 (NETL)<sup>5</sup> 基于低成本矿物质，对化学链燃烧载氧体进行了改进，其耐久性比以往提升了十倍，意味着化学链燃烧的商业化迈出了重要的一步。NETL 的研究人员使用成本低廉的天然矿物原料制备了载氧体，通过增强对颗粒摩擦损失的抵抗来提升耐久性，并在实验室的 50 kW 化学链反应器中成功进行了长达 54 小时的测试，其最低损耗约合 1 美元/MWh。载氧体耐久性的提升有助于提高化石燃料发电效率，减少碳排放，相比传统技术可降低约 25% 的成本。



图 1 西弗吉尼亚州摩根敦实验室的 50 kW 化学链反应器

(岳芳)

<sup>5</sup> NETL-DEVELOPED OXYGEN CARRIER EXHIBIT S UNPARALLELED DURABILITY IN TEST.  
<https://netl.doe.gov/node/9220>

# 清洁能源多能互补

## 国际原子能机构预测 2050 年全球核电发展趋势

9月10日，国际原子能机构（IAEA）发布了新版《至2050年能源、电力和核电预估》报告<sup>6</sup>，详细分析了到2050年全球以及各地区核能的发展趋势。报告指出，到2050年全球终端能源消费总量将以约1%的增速增长28%，而电力消耗则将增长91%，其在全球终端能源消费占比将从18.8%提升至26.1%。假设维持当前的政策、技术、市场趋势不变，并按期淘汰现有核电站（即“保守情景”），预计到2050年全球核电装机容量将比2018年减少6%至371 GW；假设延长现有核电站运行寿命，且对各国政策、技术和市场发展有更乐观的估计（即“乐观情景”），到2050年全球核电装机容量则将增长81%至715 GW。具体内容如下：

### 一、2018 年全球能源消费及电力生产情况

2018年，电力在全球终端能源消费中占比达19%排名第二，居于石油（40%）和天然气（15%）之间（图1）。预计未来几年电力消耗增速将超过终端能源消费增速，电力在终端能源消费总量中的占比将上升。北美地区2018年终端能源消费的主要来源是石油，其次是天然气（23%）和电力（21%）。北欧、西欧和南欧地区的终端能源消费仍以化石燃料为主，电力占22%。东欧地区终端能源消费较为多样化，石油占30%，天然气占26%，电力和煤炭分别占14%和10%。化石燃料占了中、东亚地区终端能源消费的2/3，电力则占23%。

2018年世界总发电量增长了3.9%，核能发电量则增长了2.4%。在各种发电来源中，尽管可再生能源和天然气发电量有显著的增长，但燃煤发电依旧占主导地位。天然气发电量约占总发电量的23%，水电和可再生能源发电的贡献率继续大幅提高，2018年其占比达到了25.8%，核电占比则保持在10.2%左右。北美地区天然气发电（31%）在总发电量占比超过燃煤发电（26%），水电和其他可再生能源占25%，核

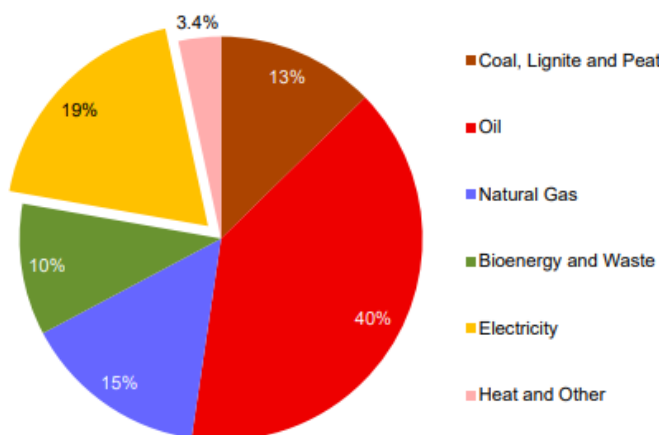


图1 2018 年全球终端能源消费情况

<sup>6</sup>Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/19-00521\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/19-00521_web.pdf)

电则占 25%。北欧、西欧和南欧地区核能发电量占总发电量的 1/4。东欧地区核电在总发电量占比较高，为 21%，但化石能源发电占比仍超过 60%。中、东亚地区的发电量主要由煤电（60%）贡献，其次是水电（15%）和天然气（10%），核电仅占约 5%。

## 二、2018 年全球核电开发情况

截至 2018 年底，全球正在运行的核反应堆总计有 450 座，总净装机容量为 396 GW。此外还有 55 台机组正在建设中，装机总量为 57 GW。2018 年有总量 10.36 GW 的 9 台新机组接入电网，同时有 7 台机组退役（总装机容量 5.42 GW），另外有 5 台新机组开工建设，将增加 6.34 GW 的发电容量。2018 年，在运核电站发电量增长约 2.4% 达到了 2563 TWh，约占总发电量的 10%。

## 三、能源及电力发展趋势预测

到 2030 年，预计全球能源消费总量将增长 16%，到 2050 年将增长 38% 至 585.1 亿焦，年均增速约为 1%。2030 年前，总用电量将以每年约 2.2% 的速度增长，其后年均增速约为 2%。到 2030 年，电力在终端能源消费总量占比将从 2018 年的 18.8% 增加到 21%，到 2050 年则将增加到 26%。由于能效提高和经济结构变化，到 2050 年北美地区终端能源消费将比 2018 年（74 亿焦）下降约 6%，用电量将以每年 0.5% 的速度缓慢增长，因此到 2050 年电力在终端能源消费中占比将逐渐增加到 26%；北欧、西欧和南欧地区的终端能源消费将比 2018 年的 45 亿焦下降约 15%，电力在终端能源消费占比则将从 2018 年的 21.9% 增加至 30.5%；东欧地区终端能源消费将以年均 0.4% 的速度增长至 34.5 亿焦，电力消费增速较快，到 2050 年将比 2018 年增长 80% 至 8.1 亿焦，在终端能源消费中占比将从 14.4% 增至 23.5%；中、东亚地区终端能源消费将显著增加 23%，用电量则将近乎翻番，从 2018 年的 28.9 亿焦增至 2050 年的 55.2 亿焦，其在终端能源消费占比将从 23.1% 增至 35.1%。

## 四、核电装机容量及预测

全球发电装机总量将从 2018 年的 7188 GW 增加到 2030 年的 9782 GW，到 2050 年则将增至 13633 GW。现有一半以上的核反应堆运行时间已超过 30 年，按计划将在未来几年内淘汰。在保守情景下，到 2030 年将淘汰约 117 GW 的核电机组，另外新增 85 GW 的核电机组；2030-2050 年，将再淘汰 173 GW 的核电机组，同时新增 179 GW 的机组。因此 2040 年前全球核电装机容量将逐年减少，然后到 2050 年回升至 371 GW，约占全球发电装机总量的 3%。在乐观情景下，假设计划淘汰的几个核反应堆的运行时间延长，到 2030 年将仅淘汰 49 GW 的核电机组，新增 148 GW 的核电机组；2030-2050 年将再淘汰 137 GW 的核电容量，并新增约 356 GW 的核电机组。因此，预计到 2030 年全球核电装机总量将比 2018 年增加 25% 达到 496 GW，到 2050 年则将增加 80% 至 715 GW，约占全球发电装机总量的 5%。

在保守情景下，北美地区到 2050 年将淘汰约 77 GW 的核电机组，而新增核电机组只有 4 GW，核电装机容量将从 2018 年的 113 GW 大幅下降至 2050 年的 40 GW，在电力总装机的占比将从 8.2% 降至 3%；北欧、西欧和南欧地区已宣布将逐步淘汰核电，其核电装机将从 2018 年的 111 GW 降至 2050 年的 42 GW，在电力装机中占比将从 11.2% 降至 3.2%；东欧地区核电装机将缓慢增长 7.8% 至 55 GW，在电力装机中占比将从 11.2% 降至 9%；假设日本福岛核电站将不会重新启用，加上到 2050 年将淘汰 61 GW 的核电机组，中、东亚地区核电装机容量将从 2018 年的 106 GW 增至 2050 年的 149 GW，增速将低于电力装机容量增速，因此核电装机占比将从 2018 年的 4.2% 降至 2030 年的 3% 后保持平稳。

在乐观情景下，大多数核电设备运行寿命都将延长，北美地区核电装机容量将基本保持稳定，但到 2050 年这些核电站仍然接近退役的状态；北欧、西欧和南欧地区 2050 年核电装机将降至 67 GW，其在电力装机中占比则降至 5.2%；东欧地区核电装机增速较快，将增加 55% 至 79 GW；假设福岛事故核电机组恢复运行，到 2050 年将仅淘汰 33GW 的核电机组，而新建机组则将达到 231 GW，因此中、东亚地区核电装机将大幅提升 187% 至 304 GW，其在发电装机总量中占比也将增至 6.1%。

## 五、核能发电量预测

到 2050 年，世界核能发电量将增加。在保守情景下，尽管核电装机容量持续下降到 2040 年然后回升，但到 2030 年核能发电量将增长约 11%，到 2050 年则将增长约 16%，核电在全球总发电量中占比将从 2018 年的约 10.2% 下降到 2030 年的 8.5%，到 2050 年则将下降到约 6.1%。但在乐观情景下，2030 年世界核能发电量将比 2018 年水平（2563 TWh）提高 50%，并在其后 20 年进一步提高 50%。到 2050 年，预计核能发电量将比当前提高 2.2 倍。到 2030 年核电在全球总发电量中占比将增加到 11.5%，到 2050 年则将增加到 11.7%。

在保守情景下，北美地区核能发电量将显著下降，从 2018 年的 902 TWh 降至 2050 年的 324 TWh，其在发电总量占比将从 18.5% 降至 6% 左右；北欧、西欧和南欧地区核能发电量则将从 2018 年的 729 TWh 降至 2050 年的 335 TWh；东欧地区核能发电量将从 2018 年的 354 TWh 适度增至 2050 年的 442 TWh；中、东亚地区核能发电量将增长 1.5 倍至 1202 TWh，占其总发电量的 7% 左右。

在乐观情景下，北美地区核能发电量将降至 2030 年的 868 TWh 后上升至 2050 年的 909 TWh，其在发电总量占比则将持续下降至约 16%；北欧、西欧和南欧地区到 2030 年核能发电量将增加约 1.5% 至 740 TWh，然后到 2050 年下降 27% 至 538 TWh；东欧地区核能发电量将增长 79% 至 636 TWh，其在总发电量中占比则将先升后降至 22.2%，接近 2018 年水平（21.6%）；中、东亚地区核能发电量将增加超过 4 倍至 2453 TWh，其在总发电量占比也将从 5.5% 飙升至 14.6%。

（李权 岳芳）

## 英国法拉第研究院资助 5500 万英镑研发先进储能技术

9月4日，英国法拉第研究院宣布将提供 5500 万英镑的资助<sup>7</sup>，用于开展储能电池 4 个领域的 5 个项目，预计将持续四年，新项目与法拉第研究院的既有项目进行整合，将加快能源储存技术的突破，除了改进当前一代锂离子电池，还将进行新材料的开发与优化，以解决工业界面临的电池挑战，并利用英国的世界级研究能力推进科学知识发现，从而实现新电池技术及工艺的商业化。

**(1) 下一代电极制造。**牛津大学将联合其他五所大学和六个行业合作伙伴组成联盟，变革锂离子电池电极的制造方式。通过了解材料如何组装成电极，以及开发新的制造工具，该联盟将开发新一代智能、高性能电极，使电动汽车拥有更长的续航里程和更耐用的电池。

**(2) 下一代锂离子正极材料。**锂离子电池的最大性能提升可能来自正极化学的变化。法拉第研究院正在资助两个联盟项目。一个项目由谢菲尔德大学领衔，将通过协调的方法进行正极化学设计、开发及发现（包括定制的保护涂层和设计界面），使得正极能够容纳更多的电荷，更适应长时间循环并促进离子迁移（提高电池耐用性和续航里程，以及电动汽车提速），同时降低对钴的依赖性。另一个项目由巴斯大学领衔，将重点关注对富镍正极（钴含量较低，甚至无钴）和富锂正极等新型正极材料基本机理的理解，助力开发具有更强特性的新型正极材料。

**(3) 下一代钠离子电池。**该项目由圣安德鲁斯大学领衔，通过多学科方法，将基础化学与扩大规模和电池制造相结合，从而加速钠离子电池技术的开发。目标是使得具有高性能、低成本和长循环寿命的安全钠离子电池实现商业化。钠离子电池的成本相对较低，使其成为具有吸引力的下一代技术，特别是对于固定式储能应用和低成本车辆而言。

**(4) 超越锂离子的替代电池化学。**由伦敦大学学院领衔，将通过新的知识、材料和工程解决方案，实现锂硫技术的快速改进，这得益于其重点关注材料和电池两个层面的基础研究，以及改进的系统工程方法。如果锂硫的潜力得以实现，将使得汽车和其他应用的电池超越锂离子化学的固有限制。

（万勇）

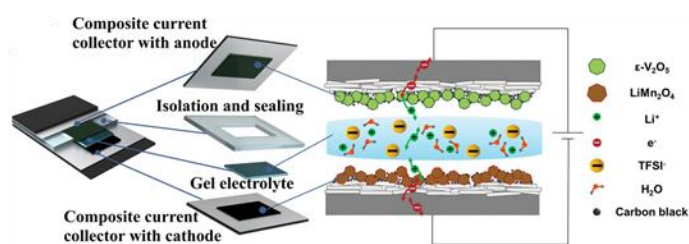
## 全球首个基于全柔性组件的柔性可伸缩全固态锂电池

伴随着柔性便携式、可穿戴电子设备的快速发展，高性能柔性储能器件的开发成为近期研究的热点。但当前消费电子领域常用的锂离子电池通常都是刚性的。为了跟上柔性电子器件的发展速度，亟需开发高性能长寿命的柔性电池技术。瑞士苏

<sup>7</sup> The Faraday Institution Announces a Further £55 Million for Energy Storage Research. <https://faraday.ac.uk/sept-2019-project-announcement/>

黎世联邦理工学院 Markus Niederberger 教授课题组制备出了全球首个全组件(电极、电解质、集流体等)具备柔性可伸缩特性的柔性全固态锂电池,在 50% (相比原始长度而言)的拉伸状态下,电池循环 50 次后可以获得 20 Wh/kg 能量密度,呈现出优异的抗形变能力。

研究人员将炭黑 (CB) 和碳纳米管 (CNT) 作为溶质置于甲苯、四氢呋喃、正己烷和苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS) 等混合溶剂中形成前驱体,随后利用旋涂法将其沉积在涂覆有银纳米片的玻璃衬底上,通过干燥处理后获得了 SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜,扫描电镜表征显示该复合薄膜呈现多孔形貌,Ag 微米片连续均匀覆盖在多孔薄膜上。这种复合结构具有多重优点,一方面由于 Ag 微米片的引入导电性极大改善,另一方面导电聚合物基底 SEBS/CNT/CB 具备良好的柔韧性,使得复合物具备了良好的抗拉伸特性,即当复合薄膜 SEBS/CNT/CB/Ag 受到拉伸应力作用时,具备可伸缩特性的导电



柔性可伸缩全固态锂电池示意图

聚合物基底 SEBS/CNT/CB 能够有效地缓解刚性 Ag 微米片脆裂带来的导电性下降。在不同拉伸应力 (0%, 50%, 100%) 作用下测试复合薄膜方块电阻  $R_s$  的变化情况,实验结果显示 50%、100% 拉伸应力作用下, SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜  $R_s$  与原始状态的复合薄膜没有太大变化,表明了 SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜确实具备良好的抗拉伸特性。接着以 SEBS/CNT/CB/Ag 复合薄膜为集流体,通过喷涂法分别将正极锂锰氧 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) 和负极氧化钒 ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) 材料涂覆在集流体上,形成柔性可伸缩的正负极;同时制备与之相匹配的柔性全固态凝胶电解质。接着将上述柔性可伸缩的组件正负电极、电解质组装成全电池进行电化学性能测试,这是目前文献报道的首个基于全柔性组件的柔性全固态锂电池。在 120 mA/g 放电电流密度下循环 50 次,未拉伸处理的柔性全固态电池获得了 43 mAh/g 可逆放电比容量, 35 Wh/kg 能量密度;而经过 50% 拉伸应力作用后,电池可以获得 28 mAh/g 可逆放电比容量, 17 Wh/kg 能量密度,表现出良好的抗拉伸形变能力。

该项研究设计制备出了一种全新的柔性可伸缩锂电池,其电池所有组件均具备可伸缩的机械柔韧性,使得电池器件具备了良好的可伸缩特性,为柔性可穿戴电子设备电池电源研发设计提供了新思路。相关研究成果发表在《Advanced Materials》<sup>8</sup>。  
(郭楷模)

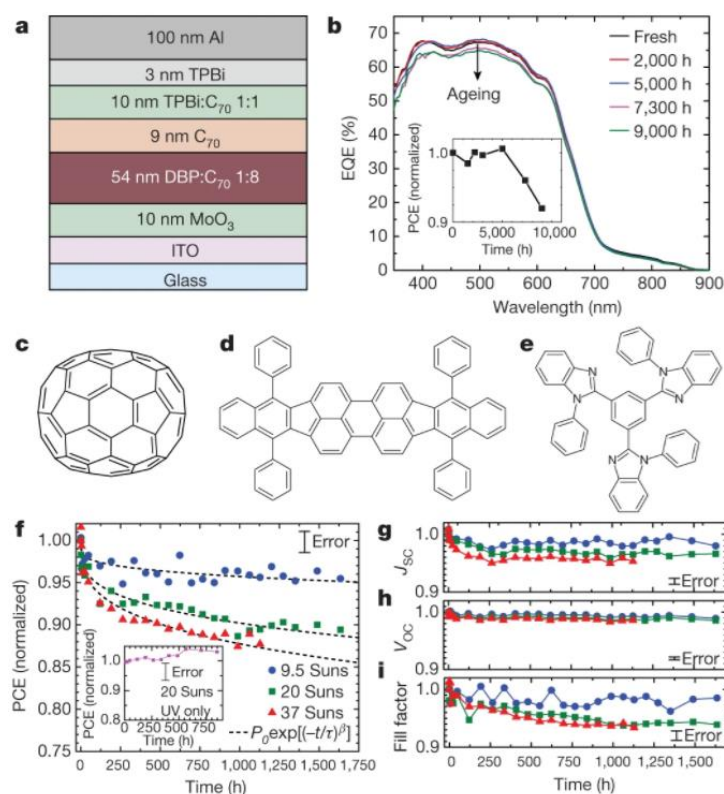
<sup>8</sup> Xi Chen, Haijian Huang, Long Pan, et al, Fully Integrated Design of a Stretchable Solid-State Lithium-Ion Full Battery. *Advanced Materials.*, 2019, DOI:10.1002/adma.201904648

## 新工艺有机太阳能电池理论寿命超过两万年

有机太阳能电池光电转换效率已经突破 15%，达到了商业化应用的标准，且具有制备成本低廉、工艺简单、机械柔韧性良好等诸多优点，在便携式可穿戴领域具备了广阔的应用前景。然而目前有机太阳能电池稳定性仍然较差，难以满足户外真实环境使用的需求，亟待改善。密歇根大学 Stephen R. Forrest 教授研究团队利用热蒸发方法制备了基于邻苯二甲酸二丁酯 (DBP)/富勒烯衍生物 (C<sub>70</sub>) 活性层的有机太阳能电池，并引入了 n-型有机小分子 TPBi:C<sub>70</sub> 作为正极缓冲层，大幅提升了器件的稳定性，获得了超长寿命的电池器件。该器件在一个标准模拟太阳光辐照下连续运行 9000 余小时（相当于一整年）后转换效率依旧维持初始效率的 90% 以上，由此推算出理论寿命可以长达 27000 余年，表现出惊人的长程稳定性。

研究人员首先利用热蒸发方法在透明导电薄玻璃 ITO 上逐层沉积氧化钼 (MoO<sub>3</sub>)、DBP/C<sub>70</sub> 活性层，以及正极缓冲层 TPBi:C<sub>70</sub>，以及铝对电极薄膜，形成完整的有机太阳能电池器件并进行电池封装保护。接着将封装好的电池器件置于一个标准的模拟太阳光辐照下（光强度为 1 kW/m<sup>2</sup>）进行电流电压测试，电池器件获得了 12.45

mA/cm<sup>2</sup> 短路电流密度，0.91 V 开路电压，60% 的填充因子，从而取得了 6.7% 的光电转换效率。随后开展器件的老化测试，发现电池经过 5000 小时运行后，性能没有出现任何的衰退；运行 7300 小时后仅仅衰减 3%，9000 小时后衰减依旧不超过 10%，表现出了惊人的稳定性。由于在标准太阳光下器件稳定性极佳，老化速率极慢。为此研究人员提升了测试的苛刻条件，将模拟光源的辐照强度进行提高（10 个、20 个到 37 个标准的模拟太阳光辐照强度）



太阳光辐照下的器件结构、分子结构和老化数据

结果显示电池的降解速率随光照强度呈超线性增加。在最大的 37 个标准模拟太阳光辐照下，电池运行 68 天后仍可保留初始效率的 87%，依旧表现出优秀的稳定性。依据上述实验结果，研究人员据此模拟推算出该有机太阳能电池器件其固有寿命 T<sub>80</sub>

( $T_{80}$  是电池光电转换效率降低至其初始值 80%所需的时间) 超过  $4.9 \times 10^7$  小时, 相当于可以在户外真实环境运行 27000 余年。最后研究人员将制备的同批次不同电池器件置于辐照条件更加苛刻的环境, 即 20 个标准太阳光辐照强度的纯紫外线照射 (中心波长为 365 纳米) 下辐照 848 小时, 实验结果显示器件效率基本没有损失, 这相当于在室外环境运行 9.3 年而没有出现性能衰退。综合上述实验结果, 新架构的有机太阳电池器件展现出了前所未有的长程稳定性。相关研究成果 9 月 9 日发表在《*Nature*》<sup>9</sup>。

(郭楷模)

---

<sup>9</sup> Quinn Burlingame, Xiaheng Huang, Xiao Liu, et al. Intrinsically stable organic solar cells under high-intensity illumination. *Nature*, 2019, DOI: 10.1016/j.joule.2019.07.015



# 低碳化多能融合

## 欧洲能源研究联盟发布至 2030 年氢能与燃料电池研究规划

9月4日，欧洲能源研究联盟（EERA）发布了新版《氢能与燃料电池联合研究计划实施规划》<sup>10</sup>，确定了欧盟到2030年在氢能与燃料电池技术领域的研究目标、行动计划和优先事项，以促进氢能与燃料电池技术的大规模部署和商业化。EERA是欧洲最大的低碳能源研究非营利性国际协会，由超过250家公共科研机构 and 高校组成，是欧盟战略能源技术规划（SET-Plan）的研究支柱，目前共开展了17个低碳能源技术领域的联合研究计划，氢能与燃料电池是其中之一。本次更新的实施规划提出了7个子领域的研究重点和关键项目，并明确了实施优先级和预算。具体如下：

**（1）电解质。**计划投入1.22亿欧元进行如下方向研究：燃料电池和电解质隔膜中输运过程；电解质材料降解过程及其缓解方法；新型膜材料和薄膜电解质沉积方法；膜电极界面电解质研究；在实际运行条件下膜电极组件电解质的性能和耐久性验证。

**（2）催化剂与电极。**计划投入1.85亿欧元进行如下方向研究：燃料电池和电解槽电化学过程和材料基础研究；电极、催化剂和载体的设计和开发策略；改进催化剂性能；材料集成、电极设计与制造。

**（3）燃料电池电堆材料与结构。**计划投入1.46亿欧元进行如下方向研究：连接件和双极板；接触和气体分布研究；电堆密封；传感器新型设计；电堆和辅助系统（BoP）组件。

**（4）燃料电池系统。**计划投入7200万欧元进行如下方向研究：系统组件材料开发；组件/功能开发；新系统概念开发；燃料电池和电解槽传感器及诊断工具；系统控制。

**（5）建模、验证与诊断。**计划投入5200万欧元进行如下方向研究：燃料电池组件建模；燃料电池单元、双极板建模及实验验证；燃料电池电堆建模；系统建模与控制；开发表征工具。

**（6）氢气生产与处理。**计划投入9600万欧元进行如下方向研究：生物质/生物废物制氢；藻类制氢；水热分解制氢；水热分解制氢；更高效的光催化制氢；氢气压缩、液化和净化；其他制氢方法的安全、规范和标准。

**（7）氢气储存。**计划投入3900万欧元进行如下方向研究：压缩储氢和液态储氢；氢气载体；储氢系统。

（岳芳）

<sup>10</sup> EERA JP Fuel Cells and Hydrogen publishes its Implementation Plan up to 2030.  
<https://www.eera-set.eu/eera-jp-fuel-cells-and-hydrogen-publishes-its-implementation-plan-up-to-2030/>

## 澳大利亚可再生能源署资助电网消纳、氢能和工业脱碳研究

9月11日，澳大利亚可再生能源署（ARENA）公布了新的可再生能源资助计划<sup>11</sup>，提出了三个新的研究优先领域，即电网消纳、氢能和减少工业碳排放，旨在进一步提高澳大利亚可再生能源技术的竞争力，促进澳大利亚能源系统向可再生能源顺利过渡。该计划面向澳大利亚的未来能源系统，提出克服可再生能源并网挑战，加速氢能产业发展以占据氢气出口的主导地位，并通过促进可再生能源在工业中的应用来降低排放，使澳大利亚成为可再生能源超级大国。计划提出的优先研究事项如下：

### 1、电网消纳可再生能源

**（1）提高电网安全性和可靠性的新方法。**主要包括：电网稳定性服务；新软件、算法和提高逆变器性能以增强系统稳健性；系统建模、预测和数据可视化工具以改善电力系统规划及为投资和运营决策提供依据；政策、监管框架或市场开发方案的研究；协调发电和输电投资的研究，输电和系统安全通用基础设施开发研究。

**（2）电网灵活性和储能解决方案。**主要包括：需求响应、抽水蓄能、电池、带储能装置的聚光式太阳能热发电、电制气（power-to-gas）和生物能等低排放灵活性技术的低成本高性能示范，或先进运行能力示范；上述灵活性技术商业部署途径的可行性研究。

**（3）分布式能源。**主要包括：新的商业模式或方法以发挥分布式能源的潜在价值，降低电力系统总成本或提高稳定性；应用分布式能源背景下增强系统网络安全的技术和方法；用户体验和行为研究；基于数据的消费产品和服务；利用分布式能源优化配电网容量的技术；灵活负荷和分布式能源的集成与协调示范，如虚拟电厂模型、储热、建筑物作为分布式能源、电动汽车为电网提供服务等；改进监管框架以支持更多分布式能源。

**（4）电动汽车。**主要包括：电动汽车可控充电、车辆到电网等技术的研究和示范，以验证技术、经济和监管方案；电动汽车充电数据收集。

**（5）光伏发电。**主要包括：部署新的光伏发电商业应用；降低光伏成本，提高效率并开发报废设备的处理方案。

### 2、加速氢能发展

**（1）促进氢气出口。**主要包括：促进澳大利亚氢气出口行业发展的可行性研究；降低液化成本或将氢气转化为其他出口产品的技术试点和示范。

**（2）氢气作为工业原料。**主要包括：可再生能源电力制氢的商业部署可行性研究；可再生能源电力制氢的新型商业模式研究；将氢气用于新的工业过程的试点

<sup>11</sup> ARENA prioritises grid integration, hydrogen and reducing industrial emissions under new renewable energy plan. <https://arena.gov.au/news/arena-investment-priorities/>

和示范。

**(3) 将氢气注入天然气网络。**主要包括：通过试点和示范获得将氢气加入天然气网络的实际应用成本和性能数据；通过首次示范解决天然气网络中加大氢气混合量的问题。

**(4) 纯氢气网络。**主要包括：通过试验和研究提供纯氢气网络的物流和经济数据；进行首次工业和家用纯氢气网络的示范；从混合氢气网络过渡到纯氢气网络的相关基础设施问题解决方案的首次示范。

**(5) 交通运输。**主要包括：氢动力汽车的示范；氢动力长途运输工具、重型车辆等试验和研究；通过多部门的示范提高氢气在交通运输领域的竞争力；降低加氢基础设施成本的技术首次示范。

**(6) 将氢气用于电力部门。**主要包括：将氢气用于偏远地区的电力系统；氢气支持可再生能源并网的研究和示范。

**(7) 氢气新技术。**主要包括：降低氢气供应链成本的技术首次示范；开发降低氢气供应链成本的变革性技术。

### 3、支持工业脱碳

**(1) 重工业，如金属冶炼、合成氨、化学制药和水泥行业。**重点关注将可再生能源及相关技术应用到能源密集型工业过程的可行性研究、示范和商业前部署。

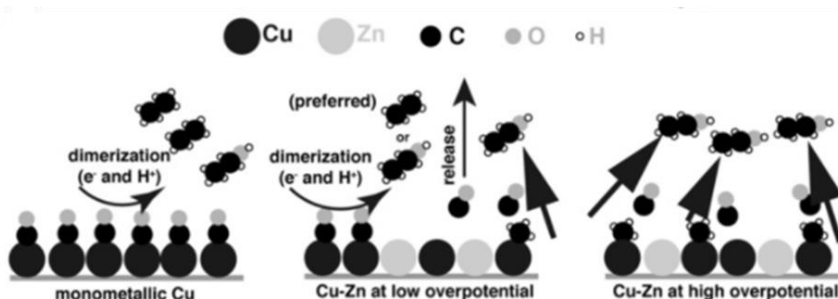
**(2) 其他工业，如食品、饮料、造纸、砖和陶瓷、木材和木制品、采矿等。**重点关注：将可再生能源及相关技术应用到制造过程或现场的可行性研究、示范和商业前部署；将可再生能源及相关使能技术应用到绿地项目或棕地项目的示范，以实现 100% 使用可再生能源的工业；信息和知识共享；模块化、分布式可再生能源技术的示范。

**(3) 跨部门应用。**在低温工业过程应用如下技术：生物质或沼气锅炉；太阳能热利用技术，如平板集热器、真空管集热器、抛物线槽集热器、线性菲涅尔集热器等；机械式蒸汽再压缩技术；热泵或其他电气化技术；可再生能源制氢。在高温工业过程中应用如下技术：太阳能热利用技术，如定日镜、碟式集热器；电磁、电阻、电弧等电加热技术；可再生能源制氢。通过工业生态园示范余热或其他能源的协同利用。

(岳芳)

## 铜锌双金属催化剂实现二氧化碳到液态燃料高效催化转化

利用可再生能源电力催化还原二氧化碳（CO<sub>2</sub>）为碳氢液态燃料，是一种绿色的能量转化存储和碳循环技术，吸引了全球科研人员的广泛关注。而在众多液体燃料中，乙醇是极具应用价值的一类。铜催化剂是目前能够实现 CO<sub>2</sub> 到乙醇催化转化的唯一金属，然而目前报道的铜催化剂法拉第效率较低（仅为 10%~20%），亟需优化改进提升转化率和产物选择效率。瑞士洛桑联邦理工学院 Michael Grätzel 教授课题组牵头的国际联合研究团队成功设计制备了铜锌双金属（CuZn）催化剂，实现了 CO<sub>2</sub> 到乙醇的高效催化转化，获得了高达 41% 的法拉第效率。



乙醇生成机理

研究人员首先通过阳极氧化方法制备出了氧化铜（CuO）纳米线，接着利用原子沉积方法在 CuO 纳米线外面沉积一层氧化锌（ZnO）薄膜，X 射线电子谱表征显示

沉积完 ZnO 薄膜后，电子谱没有探测到 Cu 信号，意味着 ZnO 薄膜完全覆盖了 CuO 纳米线，即形成了 CuO@ZnO 核壳纳米线。透射电镜测试结果显示，CuO@ZnO 纳米线的平均直径是 100 nm，ZnO 外壳层厚度约 30 nm。进一步采用电化学对 CuO@ZnO 纳米线进行还原处理，透射电镜显示 CuO@ZnO 纳米线在还原之前的 CuO 和 ZnO 之间清晰的分界线逐步消失了，主要原因是 Cu 元素发生迁移进入到外层最终形成了 CuZn 合金。采用同样方法研究人员制备了 Cu 单质催化剂。接着将上述两种催化剂置于 CO<sub>2</sub> 饱和电解液中进行催化活性测试，在 -7.5 mA/cm<sup>2</sup> 工作电流密度下，发现在所有的工作电位，Cu 催化剂的 CO<sub>2</sub> 到乙醇法拉第效率都小于 20%；而 CuZn 双金属催化剂的 CO<sub>2</sub> 到乙醇法拉第效率都在 32% 以上，而计入异丙醇的时候，法拉第效率进一步增大到了 41%。此外还发现，随着 CuZn 中 Cu 的比例适当提高，产物中乙醇的占比也会逐步增长。原位的拉曼光谱测试揭示，相比单纯的 Cu 催化剂，CuZn 双金属催化剂活性位点更容易催化还原 CO<sub>2</sub> 到 CO 并吸附 CO，且甲烷（CH<sub>4</sub>）的产量也被显著抑制了，意味着形成 CH<sub>4</sub> 的中间产物 \*CH<sub>3</sub> 被 CO 消耗，两者反应产生了乙醇的中间产物 \*COCH<sub>3</sub>，因此促进了 CO<sub>2</sub> 到乙醇转化。最后研究人员测试了在 -200 mA/cm<sup>2</sup> 高电流密度下 CuZn 催化剂的催化活性，实验显示其法拉第效率（乙醇和异丙醇）达到了 48.6%，这是目前报道的 CO<sub>2</sub> 催化转化液体燃料最优值，且该催化剂可以连续稳定运行 10 余小时。

该项研究设计制备了 CuZn 双金属催化剂，Zn 的引入增强了催化剂对 CO 的吸

附，从而促进了 CO 与\*CH<sub>3</sub> 结合，更容易产生乙醇的中间产物\*COCH<sub>3</sub> 提升了 CO<sub>2</sub> 到乙醇燃料转化率和产物选择率，为 CO<sub>2</sub> 低成本高效还原为液体燃料开辟了新思路。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》<sup>12</sup>。

(郭楷模)

## Pt-O-Pt 原子体系将 Pt 单原子的 CO 催化活性提升百倍以上

金属单原子催化剂因其具有原子级分散的金属活性中心，表现出极其优异的催化活性和最大的原子使用效率，在催化领域（如水煤气变换、甲醇蒸汽重整、一氧化碳[CO]催化氧化等）展现出广阔的应用前景，引起了国内外研究学者的广泛关注。由密歇根大学 Bryan R. Goldsmith 教授课题组牵头的国际联合研究团队成功设计制备了一种基于 Pt-O-Pt 原子体系的 Pt 单原子催化剂，Pt 单原子具备了 100% 分散特性，其低温下 CO 催化氧化活性提升了百倍以上，最高可达 1000 倍。为高效低成本处理汽车尾气，减少排放改善环境提供了良好地催化剂选择。

研究人员以氧化铈（CeO<sub>2</sub>）为载体制备了负载型的 Pt 单原子催化剂 Pt/CeO<sub>2</sub>，接着以 Pt/CeO<sub>2</sub> 催化剂为“种子”将其依次置于氢气、以及 CO 和氧气混合气体的氛围中进行化学反应处理。高角环形暗场像-扫描投射电镜表征显示，未经过和经过气体氛围处理后的 Pt/CeO<sub>2</sub> 中的 Pt 单原子都呈现出高度分散状态，分散度接近 100%，这有助于将 Pt 的催化位点最大暴露出来，进而增强催化活性；但是两者 Pt 的分散形式略有不同，未经过气氛处理的 Pt 单原子是直接嵌入在载体 CeO<sub>2</sub> 薄膜表面以 Pt-O-Ce 形式呈现，而经过处理的 Pt 单原子则是以 Pt-O-Pt 原子体系形成存在，因此命名为 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub>。随后研究人员对比研究了 Pt/CeO<sub>2</sub> 和 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 两种催化剂的低温（80℃和 150℃）CO 催化活性，结果显示在 50℃和 150℃下，Pt/CeO<sub>2</sub> 的 CO 催化效率分别为  $1.7 \times 10^{-9}$  和  $2.2 \times 10^{-7}$  mol CO<sub>2</sub>/(g·s)，而 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化效率分别增加到  $2.6 \times 10^{-6}$  和  $2.5 \times 10^{-5}$  mol CO<sub>2</sub>/(g·s)，即在同样反应条件下，Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化活性较 Pt/CeO<sub>2</sub> 高出了 2-3 个数量级，即 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化活性提升了百倍以上，最高可达千倍。实验和理论模拟的的动力学研究揭露 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化剂的活化能仅为 Pt/CeO<sub>2</sub> 一半水平（活化能越低催化反应越容易进行），而这主要是来自 Pt-O-Pt 原子排列体系，使得 O 能够快速在整个 Pt-O-Pt 原子体系迁移，提升了 CO 的氧化还原效率。

<sup>12</sup> Dan Ren, Jing Gao, Linfeng Pan, et al. Atomic Layer Deposition of ZnO on CuO Enables Selective and Efficient Electroreduction of Carbon Dioxide to Liquid Fuels. *Angewandte Chemie International Edition*. 2019, DOI: 10.1002/anie.201909610

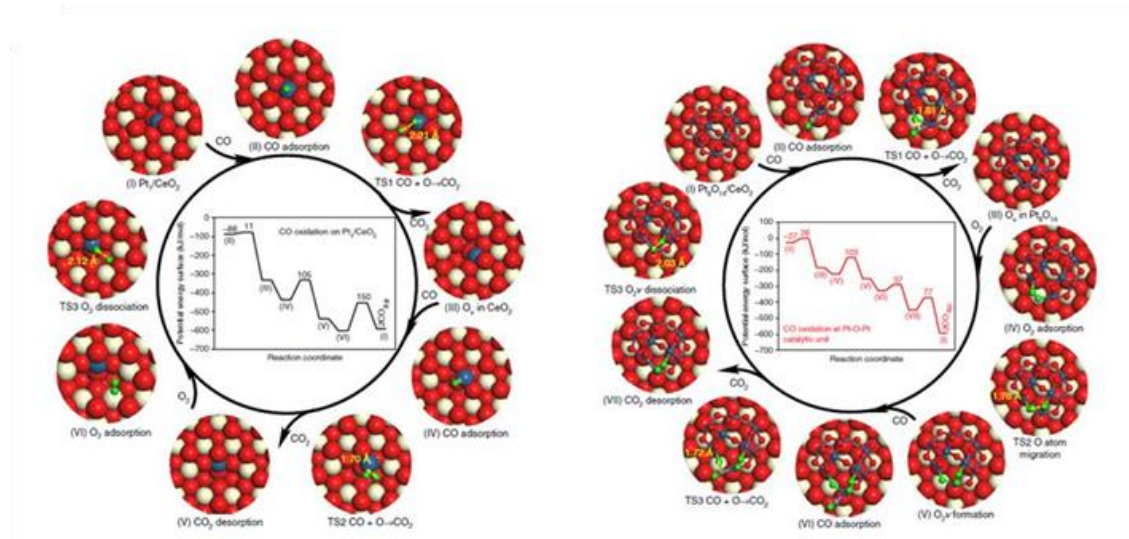


图 1 CO 氧化过程循环示意图与势能分配

该项研究精心设计制备了以铂-氧-铂（Pt-O-Pt）原子体系形式呈现的 Pt 单原子催化剂，得益于其独特的 Pt-O-Pt 原子体系，使得 O 能够快速有效地在 Pt 单原子间迁移，从而将 Pt 单原子的低温 CO 催化活性提升了百倍以上，更为关键的是该改进方法具有普适性，可以很容易地沿用到不同载体上，为 CO 低成本高效还原开辟了全新技术路径。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》<sup>13</sup>。

（郭楷模）

<sup>13</sup> Hui Wang, Jin-Xun Liu, Lawrence F. Allard, et al. Surpassing the single-atom catalytic activity limit through paired Pt-O-Pt ensemble built from isolated Pt atoms. *Nature Communications*, 2019, DOI: 10.1038/s41467-019-11856-9

## 国际能源署发布《美国能源政策评估》报告

9月13日，国际能源署（IEA）发布《2019美国能源政策评估》<sup>14</sup>报告指出，得益于页岩革命，美国国内的油气产量大规模增长，其中原油产量自2008年以来大幅飙涨了124%，到2018年达到1550万桶/日，同期天然气产量也显著增长40%达到7604亿立方米/日；这一显著变化使得美国逐步从能源进口国转变成出口国。在此背景下，美国政府顺势调整了能源政策，从谋求“能源独立”转向“能源主导”，即将能源作为一种重要的国家战略资源，意在扩大能源出口，在实现能源独立的过程中谋求世界能源霸主的发展之路，以加强美国全球领导力。毫无疑问，页岩革命成功地让美国在全球能源市场上的角色发生了转变，而这必将对全球的能源版图和地缘政治带来深远影响。报告对美国当前的能源政策进行了系统评述，关键要点如下：

### 一、美国能源战略整体思路：从能源独立转向能源主导

页岩气革命不仅让美国成功转变成为世界上最大油气生产国，同时也成为了主要的油气出口国。IEA数据显示，2017年美国原油产量占全世界原油总产量的13%，天然气占20%。同期，国内能源产量满足了全美98%的一次能源消费。显而易见，页岩革命正逐步将美国从能源进口国转变为强势的出口国，实现能源独立。在这种转变之下，美国顺势调整了其能源政策，从最初的追求“能源独立”转向了谋求“能源主导”，即成为全球油气供应增长中心，最大限度地利用能源出口，扩大美国在国际能源市场影响力，从而维持和强化美国在全球的霸权。

“能源主导”战略的核心内容之一就是减少美国扩大能源生产和提高能源行业竞争力的监管障碍。2017年，美国宣布退出《巴黎气候协定》，解除奥巴马总统制定的限制传统能源发展的各类环保规章制度。其二是扩大能源出口，2014年美国能源部（DOE）简化了液化天然气（LNG）的出口监管审批，促使美国成为全球主要的LNG供应商，以及天然气净出口国；2015年美国正式解除了实施长达40年的原油出口禁令。展望未来，出口增长将取决于油气管道的互补建设。尽管联邦政府已努力简化能源基础设施的建设许可制度，但基础设施仍难以跟上页岩产量增长，需要及时铺设天然气管道。能源技术创新是推动页岩革命成功的关键因素。因此联邦政府高度重视能源技术研发，投入大量研发资金，维持其全球能源技术领先地位。2017年，美国联邦政府投入73亿美元支持能源研究、开发和示范（RD&D），较前

<sup>14</sup> Energy Policies of IEA Countries: United States 2019 Review.  
[https://webstore.iea.org/download/direct/2829?fileName=United\\_States\\_2019\\_Review.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2829?fileName=United_States_2019_Review.pdf)

一年增长 9%。

## 二、美国国内能源生产消费现状

### 1、寻求能源和气候发展平衡点

美国正在探索在实现经济不断增长的同时缓解气候变化的策略。2017 年，美国 GHG 排放总量达到 64.57 亿吨二氧化碳当量，占全球排放总量的 12%，仅次于中国。国家安全战略强调美国正在寻求一种兼顾能源发展和气候保护的方法，在经济不断增长的同时减少 GHG 等传统污染物排放。美国的环境和气候政策仍然面临着缺少两党支持和政策不稳定的挑战。2017 年，美国政府决定退出巴黎协定，但对于针对美国改进条款，以及重新加入《巴黎气候协定》仍然保持开放态度。同时美国也已制定国家自主贡献计划（NDC），计划到 2025 年 GHG 排放相对于 2005 年水平减少 26%-28%。

### 2、能耗和经济脱钩

过去几十年，美国能源强度在降低。1990 到 2017 年，美国人口增长约 30%，同时 GDP 几乎翻倍，而终端能源消费（TFC）总量仅增长 18%。尤其在 2008-2009 年经济危机后，经济增长放缓和能源消费降低导致 TFC 总量进一步减少，使得经济增长和能源消费逐步脱钩。在 IEA 成员国中，美国是能效改善速度较为突出的国家。尽管如此，美国仍是能源强度较高的国家。2017 年，美国单位 GDP 能耗居第四位，高出 IEA 平均水平 19%；人均能耗排第三，高于 IEA 成员国平均水平 61%。

### 3、传统能源资源

自 2014 年起，得益于水平钻井、水力压裂等开采技术的进步，美国国内页岩油的产量急剧增加，推动石油供应大幅增加，过去十年美国石油对外依存度（石油进口量占石油总需求份额）减少了一半以上，目前为 25%（图 1），促使美国解除了长达 40 年之久的原油出口禁令。美国已经成为全球第一大石油产出国，并有望在 2021 年成为石油净出口国。

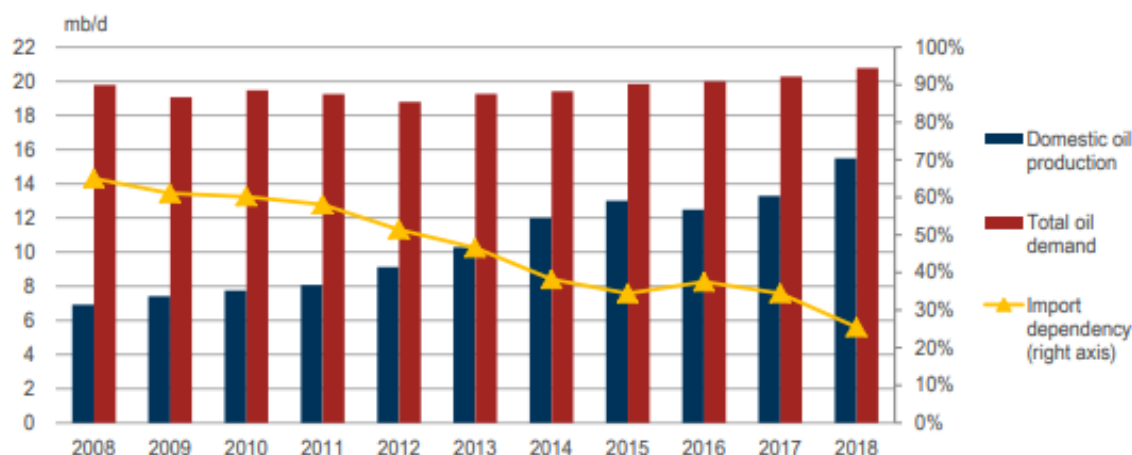


图 1 美国石油对外依存度降至 25%



页岩革命使美国天然气产量急剧增加，从而改变了天然气在美国国家能源结构中的比重。2009 年之后，美国成为世界上最大的天然气生产国，同时天然气也成为国内第二大能源资源。2018 年，天然气在美国一次能源供应总量中占比已从 2008 年的 24% 增长到了 32%。美国在 2017 年已经成为天然气净出口国（图 2）。美国天然气市场已经高度成熟，但随着美国成为世界上最大的天然气出口国之一，如何改善大量的天然气供应和出口设施成为当下的问题所在。为了解决天然气管道的运输能力和运输终端问题，美国政府已经开始采取措施消除行政障碍，尤其是在小型 LNG 终端方面。

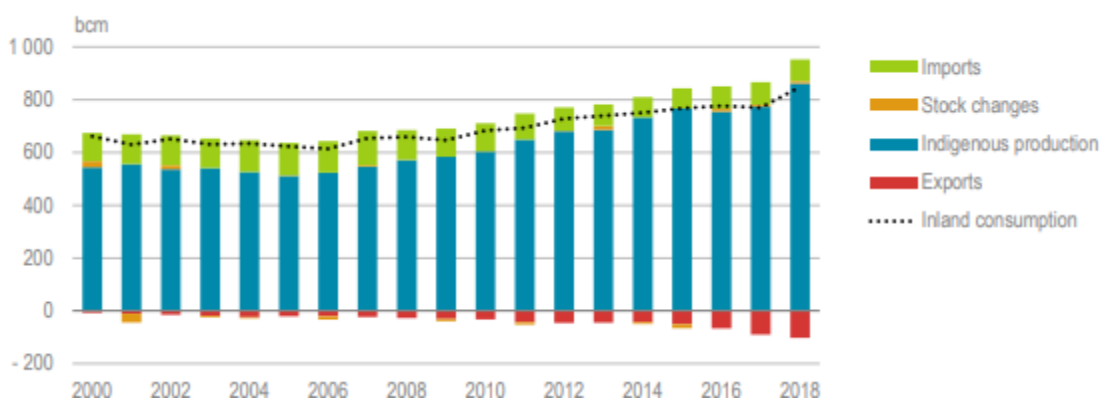


图 2 美国已成为天然气净出口国

美国是主要的煤炭生产和消费国，其煤炭产量全球第二（中国第一），煤炭消耗全球第三（中国、印度前二）。美国国内的煤炭产量主要用于发电领域，在过去 10 年中，由于页岩革命、环境保护政策、可再生能源增长等影响，煤炭需求逐渐减少。2008 年，发电领域煤炭占比近 50%，而到了 2018 年这一比例已经降到 30% 以下。随着国内需求减少，美国开始增加煤炭出口，这需要加大基础设施建设投资。

#### 4、可再生能源

在美国能源系统中，可再生能源扮演着日益重要的角色，尤其是在发电领域。2018 年，由于低成本和政府政策支持，风能和太阳能发电在美国有了空前的增长，可再生能源发电占到全美发电总量的 17%。可再生能源在一次能源供应总量（TPES）中的占比达到了 8%，占到终端能源消费总量的 9%（包括可再生电力的使用）；其中燃料乙醇在交通运输领域发展迅猛，其在美国交通能源消耗中的比重占到了 5.2%，远高于 IEA 其他成员国。可再生能源的持续增长对美国既是机遇也是挑战。随着可再生能源快速发展，如何在保障电网稳定性前提下实现可再生能源的高比例并网成为了关键挑战。如果有正确的部门政策和技术发展的支持，可再生能源将在促进交通领域脱碳起到更重要的作用。

#### 5、核能

美国是全球最大的核电生产国，占全球核能发电总量近 1/3。核电也是美国国内占比最大的低碳电力，发电量在国内电力结构中排第四位。美国在 30 个州内有 59

座商业化运营核电站，包含了 98 个轻水反应堆（LWR）（65 个压水反应堆和 33 个沸水反应堆），大多建于 1967-1990 年间。美国商业化运营核电站的特点是功率高，核能发电从 1970 到 1990 年一直处于快速增长态势，而且一直维持每年增长 800 TWh。

过去 6 年，由于经济原因，几个反应堆在运行许可到期前就已经关闭。而随着其他能源（尤其是天然气和可再生能源）的持续增长，核电占比将继续下降，这对于美国电力系统的灵活性和稳定性将产生一定影响。同时核电为美国提供 50 万个工作岗位，联邦政府也极力恢复和扩大核电行业，核电在美国电力系统中仍然占据着重要位置，其技术和市场/政策发展都不可或缺。最后，美国也在极力寻求核废料的安全处置和存储方法。

## 6、电力

美国的电力资源正在发生显著变化。2008 年，燃煤发电几乎占电力结构的一半，但到 2018 年这一数值已经减少至三分之一。其中主要原因就是页岩气比例激增，资源丰富、低成本天然气使得天然气发电在电力部门的占比超过了燃煤发电。过去 10 年天然气发电量增长了 60% 以上，超过了燃煤发电的份额。与此同时，不断下降的成本和对可再生能源的政策支持促使风能和太阳能发电量激增。天然气和可再生能源的蓬勃发展使得长期以来一直为美国电力市场提供支持的核电站面临严峻挑战。IEA 建议采取政策和监管措施，以确保电力部门的平稳过渡，充分利用波动性可再生能源的增长，同时确保整个电力系统的可靠性和灵活性。

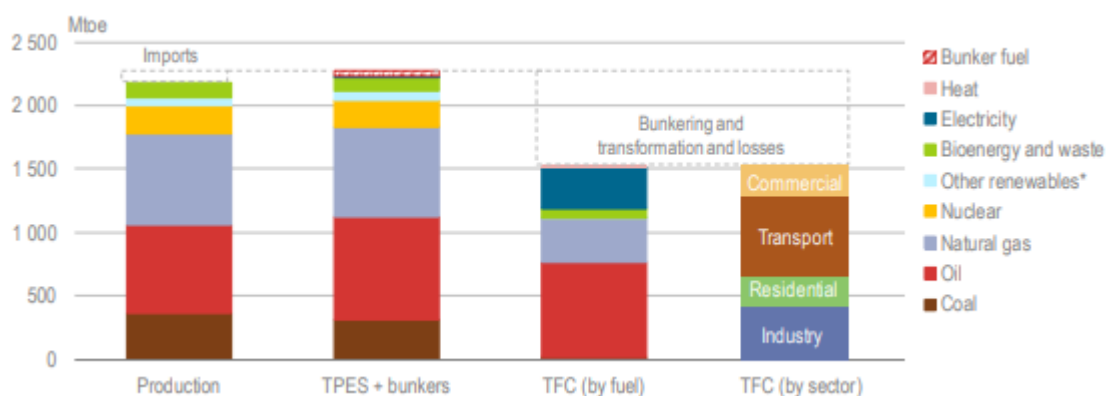


图 3 2018 年美国能源结构现状

## 三、能源安全

能源系统恢复力不仅需要增强能源系统抵御能力，更强调在面临无法避免的故障时，能有效利用各种资源灵活应对风险，适应变化的环境，维持尽可能高的运行功能，并能迅速、高效恢复能源系统性能。美国政府已经通过一系列政策强化能源系统应对风险的能力。2018 年，DOE 成立网络、能源安全和应急响应部门（CESER），致力于打造能源系统应对网络风险能力。电力部门在和工业界、学术界、国家实验室以及其他政府机构的协作过程中，引领下一代技术和方法的发展，不断改善国家

重要能源基础设施的安全性和恢复力。

美国是全球战略石油储备最多的国家，但随着美国已成为世界最大的石油生产国，石油进口量逐年下降，已接近实现能源独立。因此美国政府宣布自 2018 年 10 月开始到 2028 年，将出售 40% 的战略石油储备，使战略石油储备从目前的约 7 亿桶减少到 4.1 亿桶。由于页岩革命，天然气在能源领域的重要性日益增加（尤其是发电部门），因此美国政府制定天然气应急供应条令，包括购买、分配以及优先使用权。美国政府花费多年维护电网的稳定性，避免电力短缺。如今面对极端天气、新型网络攻击、多元化能源资源的发电系统，以及传统基荷电力（燃煤发电、核电）减少等情况，美国面临着电力系统稳定性和恢复力的双重挑战。

#### 四、能源技术创新

美国是能源技术创新的全球领导者。联邦政府在能源 RD&D 上的工作主要是由 DOE 牵头开展，核心力量是 DOE 下辖的国家实验室，它们拥有世界级的先进能源研究设施。2017 年，美国投入 73 亿美元用于推动能源的 RD&D 工作（图 4），相较于前一年增长了 9%。大部分 RD&D 资金用于清洁能源技术研究，包括核能（尤其是小型核反应堆），碳捕集、利用和封存（CCUS），能效等。随着可再生能源发电量的增长和电动汽车的发展，以及极端天气和网络攻击的发生频率增加，电网现代化研究成为重要的环节。

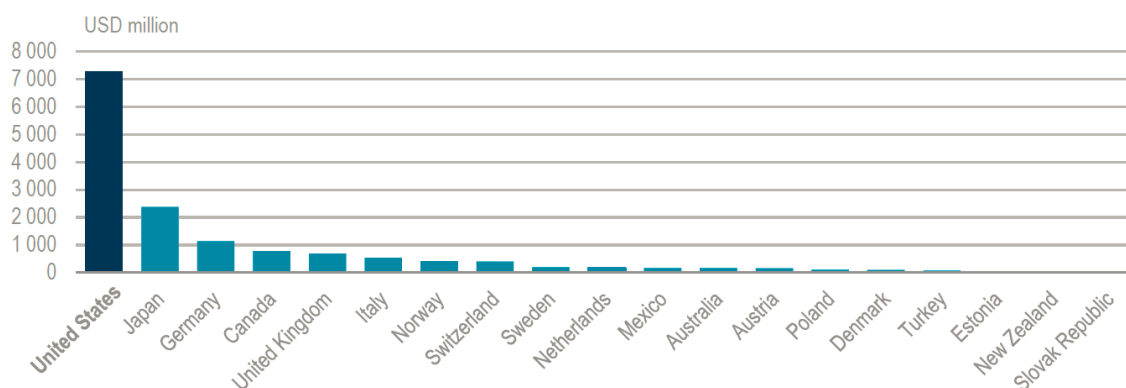


图 4 2018 年美国能源 RD&D 公共经费投入远超过其他 OECD 国家（单位：百万美元）

此外，美国还积极参与众多的国际性能源研发创新合作项目，IEA 组织协调的能源技术合作研究项目大部分都有美国的参与。美国倡议并创立了清洁能源部长级会议（CEM），以促进全球在能源领域的合作，推动全球向清洁能源经济过渡。美国要保持其在清洁能源技术创新方面的全球领导地位，就必须继续支持和参与国际能源合作。

（张凯宏 郭楷模）

## 美信息技术与创新基金会发布全球能源创新指数报告

8月26日，美国信息技术与创新基金会（ITIF）发布了《全球能源创新指数：各国对全球清洁能源创新系统的贡献》报告<sup>15</sup>，基于技术研发、规模化应用和社会接纳三种维度14项评价指标，计算了23个加入“创新使命”（Mission Innovation）行动的成员国<sup>16</sup>能源创新指数，以评估各国对全球能源创新的贡献。报告指出，各国的贡献差异很大，相较于自身的经济规模，挪威、芬兰和日本对全球清洁能源创新做出了最重要的贡献。尽管美国宣布退出巴黎气候协定，但2018年其对清洁能源研发的公共经费投入总额居首位，超过了其后的中国和日本之和，在基础能源科学方面的公共经费投入总额也远超其他国家的总和。碳捕集与封存（CCS）、先进核电等资本密集型清洁能源技术示范规模不足是清洁能源创新体系中亟待改善的一个薄弱环节。报告主要内容如下：

### 一、全球能源创新指数评价指标体系

（1）“技术研发”维度（权重50%）包含4个评价指标：①清洁能源技术研发示范（RD&D）公共经费投入强度（每千美元GDP），②基础能源科学研究公共经费投入强度（每千美元GDP），③清洁能源技术RD&D公共经费投入增幅（每千美元GDP，以2015年为起点），④RD&D技术多样性（用Shannon-Wiener多样性指数表征）；

（2）“规模化应用”维度（权重25%）包含6个指标：①缓解气候变化技术高价值专利（专利族数量大于等于2）申请量（每10亿美元GDP，取2013-2015年平均值），②清洁能源示范项目公共经费投入强度（每千美元GDP，2015-2018年投入之和），③CCS示范项目（二元变量“有、无”），④先进核电产业（二元变量“有、无”），⑤高影响力清洁技术初创企业数量（每万亿美元GDP，来自美国Cleantech集团评选的全球清洁技术百强企业），⑥安永可再生能源国家吸引力指数（RECAI）；

（3）“社会接纳”维度（权重25%）包含4个指标：①碳价格（化石燃料补贴计算为碳价格负值），②燃料税，③清洁能源技术RD&D公共经费投入占比（占能源技术RD&D公共经费总额的比例），④清洁能源技术RD&D国际合作参与度（作为创新使命挑战计划的牵头国或成员国）。

### 二、全球能源创新指数总体评价结果

1、从全球能源创新指数总得分来看，挪威居于首位，且在三个维度方面都位于前四名以内。在清洁能源技术RD&D方面，挪威和芬兰的每千美元GDP公共经费

<sup>15</sup> The Global Energy Innovation Index: National Contributions to the Global Clean Energy Innovation System. <http://www2.itif.org/2019-global-energy-innovation-index.pdf>

<sup>16</sup> 阿联酋、澳大利亚、奥地利、巴西、丹麦、德国、法国、芬兰、韩国、荷兰、加拿大、美国、墨西哥、挪威、日本、瑞典、沙特阿拉伯、意大利、印度、印度尼西亚、英国、智利、中国

投入最多，且是仅有的两个投入强度水平达到专家建议的国家，日本位居第三且在规模化应用维度表现突出。相较于其经济规模，上述三国为全球清洁能源创新做出了最大贡献。

2、美国在总得分中排名第四，但其对清洁能源技术 RD&D 的公共经费投入绝对值最高，超过了排名第二、三位的中国和日本总和。而且，美国在基础能源科学研究的公共经费投入比其他国家高出一个数量级，高于其他所有国家的总和。然而，由于缺少碳价方面的措施，且燃料税较低，其社会接纳方面仅排第 15 位。

3、澳大利亚、意大利和荷兰在发达国家中总排名最低，主要原因是其在技术研发维度的贡献较低。

4、中国在总得分中排名靠后，位于第 15 位。中国在“规模化应用”维度表现相对较好（第 9），主要原因是在 CCS 和先进核能技术示范、吸引可再生能源投资方面均位居榜首。2018 年，中国对清洁能源技术 RD&D 的公共经费投入总额位居第二（38 亿美元），但是由于其对未配备 CCS 的化石燃料 RD&D 的投入抵消了对清洁能源技术创新的部分贡献，且排名基于公共经费投入强度来衡量，因此其“技术研发”维度排名第 15。过高的化石燃料消费补贴和化石燃料 RD&D 公共经费也使得中国在“社会接纳”维度的排名落后（第 19）。

表 1 全球能源创新指数排名

Rank	Country	Total Score	Option Generation		Scale-Up		Social Legitimation	
			Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score
1	Norway	15.5	2	14.1	4	11.8	4	13.0
2	Finland	14.8	1	15.1	14	9.2	5	12.9
3	Japan	13.7	4	12.6	2	12.1	12	10.1
4	United States	13.3	3	13.5	8	10.8	15	9.1
5	France	13.2	5	12.2	10	10.1	2	13.3
6	Canada	12.7	6	11.7	3	12.0	13	9.2
7	Germany	12.5	10	10.7	6	11.5	6	12.0
8	South Korea	12.3	9	10.8	5	11.6	10	11.1
9	United Kingdom	12.2	7	11.2	13	9.6	3	13.2
10	Denmark	12.1	11	9.5	1	12.6	7	11.9
11	Sweden	12.0	13	9.2	7	11.4	1	14.4
12	Austria	10.7	8	11.0	15	8.7	11	10.6
13	Netherlands	10.3	14	9.0	11	10.1	8	11.7
14	Italy	9.2	12	9.2	19	8.1	9	11.3
15	China	9.0	15	8.7	9	10.3	19	7.8
16	Australia	8.3	17	7.6	12	9.9	14	9.2
17	Brazil	7.0	18	7.3	16	8.6	18	8.2
18	Mexico	6.6	16	8.6	21	7.3	20	5.9
19	India	6.5	21	6.4	18	8.4	16	9.1
20	Chile	5.1	20	6.4	23	6.3	17	8.4
21	United Arab Emirates	5.0	23	5.9	17	8.6	21	5.0
22	Indonesia	4.3	22	6.1	20	8.0	22	3.3
23	Saudi Arabia	3.7	19	6.7	22	6.9	23	2.1

### 三、不同维度指标评价得出的主要结论

1、各国在不同维度下的表现差异较大。芬兰在清洁能源技术研发投入方面表现

最好，但其技术示范和专利申请的得分偏低，导致在规模化应用维度排名靠后。与之相反，中国由于支持 CCS 和先进核能技术的应用，并促进可再生能源的部署，因此在规模化应用维度居第九位，但其对化石燃料消费补贴使其在社会接纳维度排名倒数第五。

2、尽管各国加入“创新使命”行动均承诺在五年内将清洁能源 RD&D 的公共经费投入较 2015 年翻一番，但韩国、法国、意大利、荷兰、澳大利亚、瑞典、丹麦、挪威和芬兰等九国和欧盟目前的投入绝对值均低于 2015 年水平。大多数国家履行“创新使命”行动承诺的程度都有不足，只有沙特阿拉伯的清洁能源研发经费投入增长趋势有望实现翻一番至 1.5 亿美元，但与其 2018 年高达 447 亿美元的化石燃料消费补贴相比不值一提。

3、CCS 和先进核电等资本密集型清洁能源技术示范部署规模不足是全球能源创新体系中亟待改善的薄弱环节。尽管绝大多数国家正在或计划实施 CCS 示范项目，但其部署进展未达到实现 2050 年能源系统深度脱碳所需的规模。只有略超过一半的国家拥有先进核电产业，有 10 个国家不支持该技术，包括德国、挪威和荷兰等技术领先的国家，部分正使用该技术的国家（如韩国）也在考虑淘汰核电。高影响力初创企业对于推广清洁能源技术至关重要，然而公共政策能起到的促进作用有限，各国此类企业的数量差异很大，美国拥有全球近一半的高影响力初创企业，韩国、日本则远低于平均水平。

4、2018 年，中国、沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国、印度尼西亚、印度、墨西哥和韩国等 7 个国家为化石燃料消费提供了 1710 亿美元的补贴，远远超过 23 个国家和欧盟在清洁能源 RD&D 方面的投入总和（227 亿美元）。大多数国家能源 RD&D 公共经费投入都以清洁能源为目标，但墨西哥、中国、澳大利亚、挪威、意大利和加拿大等 6 国仍将至少六分之一的经费用于传统化石燃料 RD&D 项目，其中中国将其能源 RD&D 预算的 40% 用于化石燃料。14 个国家在国家或省/州层面实施碳定价，或是参与欧盟碳排放交易系统。尽管如此，一些高排放国家的化石燃料补贴超过了上述国家的碳价水平，因此所有“创新使命”成员国的加权平均有效碳价为-3.44 美元/吨 CO<sub>2</sub>。

（岳芳）

## 埃克森美孚发布《世界能源展望 2040》报告

8 月 28 日，埃克森美孚公司（ExxonMobil）发布《世界能源展望 2040》<sup>17</sup>报告指出，由于人口和经济的增长，到 2040 年全球能源需求将增长约 20%，发展中国家

<sup>17</sup> Outlook for Energy: A perspective to 2040.

<https://corporate.exxonmobil.com/Energy-and-environment/Energy-resources/Outlook-for-Energy/Outlook-for-Energy-A-perspective-to-2040#exxonMobilSupportsTheParisAgreement>

将是增长的主要来源。石油仍然是第一大能源，天然气将超越煤炭成为第二大能源。能源相关 CO<sub>2</sub> 排放将在 2035 年达到峰值，在 2017 年基础上增加 5%。改进能效将为降低能源需求和碳排放发挥重要作用。主要内容如下：

### 一、全球能源需求

1、在全球人口增长和人民生活水平提高的推动下，到 2040 年全球一次能源需求将比 2017 年增长 20%，主要来自发展中国家。到 2040 年，全球人口将增长至 92 亿，印度超越中国成为第一人口大国。全球 GDP 将翻一番，其中非经合组织(OECD)国家的经济增速为 OECD 国家的两倍。到 2040 年全球一次能源需求将增至 6.75×10<sup>5</sup> 万亿英热单位，非 OECD 国家的能源需求将占 70%，中国和印度占需求增量的 50%。由于能效提升，美洲和欧洲 OECD 国家的能源需求占比将从 2017 年的 30% 降至 2040 年的 25%。

2、改进能效将在降低能源需求和碳排放方面发挥重要作用。技术的进步使能效随之提升，预计 2017 年至 2040 年全球能源强度（单位 GDP 能耗）每年将降低 2%，这一期间全球能源需求仅增长 20%。能源相关的单位能耗碳排放也随能效提升而下降，结合能源强度的降低，将使全球能源相关碳排放强度（单位 GDP 碳排放）降低近 45%。

3、石油仍居一次能源首位，天然气超越煤炭成为第二大能源。由于运输和化工原料需求，石油仍将在一次能源中居主导地位，天然气将成为增长最多的能源，2040 年将达能源需求的 1/4，超越煤炭成为第二大能源。可再生能源和核能将强劲增长，贡献超过 40% 的能源需求增量。由于中国和 OECD 国家向低碳能源转型，2040 年煤炭在能源需求中占比将降至 20% 以下。

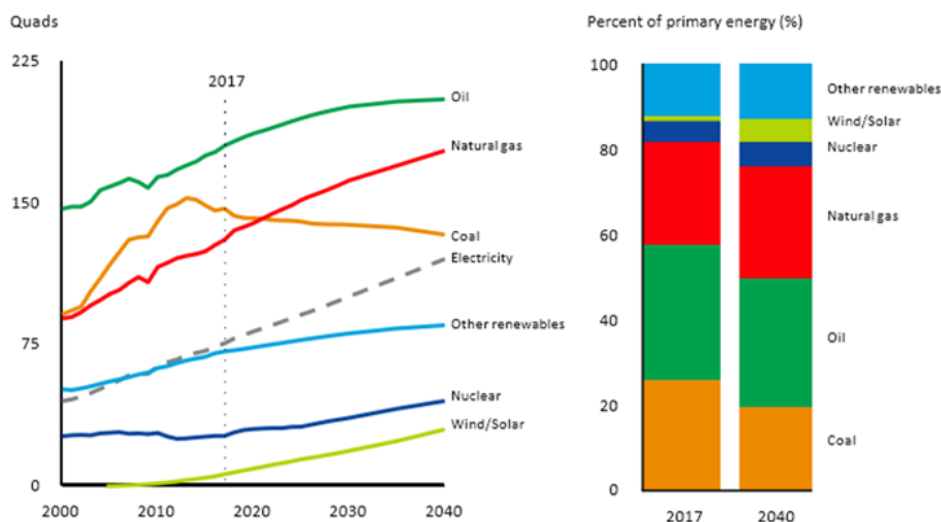


图 1 全球能源结构变化

4、电力部门能源需求将增长 60%，可再生能源将成为主要电力来源。电力需求增速约为一次能源需求增速的 3 倍，在技术支持和政策引导作用下，风力发电、

太阳能发电增速最快,到 2040 年其在发电量中占比将从 2017 年的 6%提升至 20%,欧洲和北美的风电和太阳能发电将提供超过 25%的电力。OECD 国家的煤改气措施使天然气发电大幅增长,非 OECD 国家天然气发电的一半增长位于非洲和中东等产地。中国将占全球核电增量的 70%, OECD 国家则基本不增长。亚太地区煤炭资源丰富、经济不断发展的国家煤电仍会继续增长。

**5、交通运输部门能源需求增长将超过 25%，新能源汽车占比大幅提升。**随着购买力的提高,私人汽车保有量持续增加。由于电池成本降低、汽车尾气排放标准日趋严格、能效逐渐提升和政策的推动,到 2040 年全球插电式混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车等新能源汽车的保有量将从 2017 年的 300 万辆增长至 4.2 亿辆,其在所有车辆中占比将从 0.3%提升至 20%以上,在新车销售占比将接近 30%。因此,轻型汽车的能源需求将在 2020 年代中期达到高峰后下降。尽管 OECD 国家的汽车保有量将增加约 10%,但由于能效提升和汽车动力方式的多样化,乘用车燃料需求平均下降 30%。商业运输服务的需求受到经济增长的推动,尤其是在非 OECD 国家,2040 年将占商业运输服务能源需求的 40%。所有商业运输方式的能源需求都将增加,2040 年重型卡车将占需求增量的 50%以上。由于前期成本高、行驶里程短、有效载荷低以及基础设施部署缓慢等因素,电力在商业运输动力系统中应用进展缓慢。

**6、2040 年住宅和商业部门的能源需求预计增加 20%，主要由于非 OECD 国家的经济增长导致用电需求增加。**随着经济发展,中产阶级人数增多,到 2040 年住宅用电将增加 2/3。中国和印度的家庭用电量将接近欧洲水平,非 OECD 地区能源需求将增加 35%以上,而 OECD 国家由于能效的提高,能源需求仅增长 4%。

**7、全球近 50%的能源用于工业生产，面对气候变化，转向更清洁能源（电力、天然气）势在必行。**到 2040 年,工业部门能源需求将增长约 17%,其中有 85%的增长来自重工业和化工行业,石油、天然气、电力各占能源需求增量的 1/3。由于环境污染,需要大量削减煤炭的使用,通过提升技术提高能效也十分重要。到 2040 年,在 OECD 国家和中国,煤炭的使用将大幅减少,但在印度、非洲,由于产量丰富且廉价,煤炭的消耗会加倍。转向使用低碳燃料将使 2040 年工业部门碳排放量与 2017 年几乎持平。

## 二、全球能源供应

**1、液体燃料仍将是最主要能源，其供应品种将更加多样化。**到 2040 年,全球液体燃料(石油、凝析油、致密油和生物燃料等)产量将比 2017 年增长约 17%,常规原油和凝析油产量将减少,供应增量主要来源于致密油、深水油和天然气凝析液(NGL)。因此,液体燃料供应愈加多样化,常规原油和凝析油占比将从 2017 年的约 2/3 降至 2040 年的约 1/2。在 2017 至 2025 年,北美致密油和 NGL 产量将翻倍,



成为液体燃料净出口地区；2025年后，拉丁美洲新开采的深水油和中东地区的常规原油将满足全球需求增长。中东以及俄罗斯/里海将继续作为常规石油的主要出口地区，亚太地区仍将是液体燃料需求最大和增速最快的地区，将继续增加进口以满足需求。

**2、天然气产量的增长主要来源于非常规天然气，液化天然气出口将使天然气市场更加多样化。**天然气在全球能源供应中占比将从2017年的24%提升至2040年的26%，除欧洲以外的所有地区天然气产量都会增长。技术的进步使天然气可采资源不断增多，当前已开采资源不到可采资源量的15%，以当前的需求水平，剩余天然气资源可供全球使用200年。未开采的天然气资源中，约45%是非常规天然气资源，如页岩气、致密气和煤层气。中国及其他亚太地区非OECD国家天然气需求将增加一倍以上，到2025年亚太地区天然气需求将超过北美。灵活、高效的天然气发电取代效率低下的老式燃煤发电，可将碳排放降低60%。天然气贸易是资源丰富的地区与亚太和欧洲地区之间的重要纽带，预计新的液化天然气（LNG）出口项目将满足到2040年天然气需求增量的40%，LNG出口将满足全球近20%的天然气需求。北美地区丰富的非常规天然气供应有望满足新的LNG需求，北美的LNG出口增长速度最快。

### 三、能源相关碳排放

2000年至2017年，由于全球GDP增长了60%，导致碳排放量大幅增加。预计到2035年，全球二氧化碳年排放量将达到峰值，比2017年增长约5%。预计全球轻型汽车的碳排放将在2020年代达到高峰，然后到2040年较峰值下降15%以上。全球GDP在2040年近乎翻番，技术的提升对于减缓排放至关重要。使用低排放能源发电将使2040年电力碳排放强度比2017年降低35%，降低碳排放强度和提提高能效将使工业部门的单位GDP碳排放降低约50%，使全球单位GDP碳排放下降近45%。

（张凯宏 岳芳）

## 《Science》：太瓦级光伏将改变全球能源格局

近日，《Science》杂志刊发了美国国家可再生能源实验室 Nancy M. Haegel 等科学家联合撰写的《太瓦级光伏：改变全球能源格局》<sup>18</sup>综述文章指出，截至2018年底全球太阳能光伏装机容量已达到500GW，预计到2022-2023年间全球光伏装机容量将再增加500GW，意味光伏产业将进入全新的太瓦（TW）时代。此外鉴于太阳能资源丰富性、分布广泛性和可预测性等特点，预计太阳能将成为未来全球能源系统中关键组成部分，成为改变全球能源格局关键力量。文章系统阐述了未来光伏产业发展现状、未来发展潜力和面临挑战，关键点如下：

<sup>18</sup> Nancy M Haegel, Harry Atwater Jr, Teresa Barnes, et al. Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. *Science*, 2019, 364(643): 836-838.

## 1、成本加速下滑推动光伏电力增长

过去 40 年间，全球光伏模块平均销售价格下降了 2 个数量级。两年前的预测显示，如果光伏能够继续沿着历史学习曲线发展，预计当装机规模达到 1 TW 的时候光伏模块价格会下降到 0.5 美元/W，而部署规模达到 8 TW 时则会进一步下降至 0.25 美元/W（如图 1 所示）。但事实情况是光伏模块的平均价格在 2018 年底已经下降到 0.25 美元/W 以下，呈现出惊人的发展速度。光伏器件成本下滑带来了光伏电力成本的下降，使得光伏电力价格竞争力日益凸显，从而在全球掀起了光伏发展热潮，如美国加州光伏电力占比从 2010 不到 1% 增长到 2018 年的约 18%。但是这种快速增长也带了一些问题，如光伏的间歇性对电网稳定性的冲击。因此如何在保障电网稳定性前提下进一步提高光伏并网比例成为了光伏产业发展的面临的挑战。而解决挑战的主要途径一方面开发更加高效灵活的电力运营策略，另一方面则是发展相关使能技术，如储能技术、光伏电力制气、制燃料等。

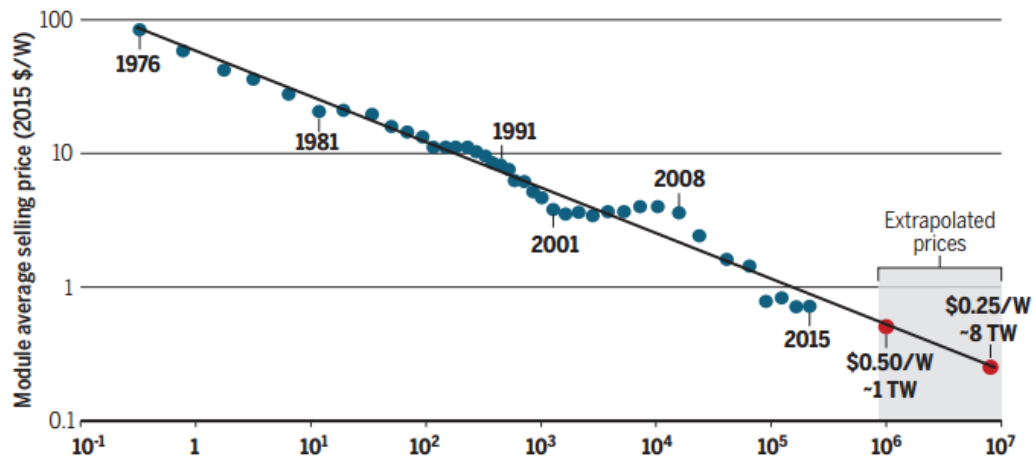


图 1 基于历史学习曲线的光伏模块平均价格变化态势

## 2、提升光伏并网比例的技术挑战

光伏系统通过逆变器达到与电网通用的频率从而连接到电网，但它们通常只产生实际电能，不提供确保电网稳定性所需的额外电网服务，因此随着接入电网的光伏比例越大，电网稳定性面临的挑战愈加严峻。而通过恰当的技术引入（电力集成系统、储能技术等）和需求侧响应，能够有效平抑大规模高比例光伏接入电网的输出波动性。例如可以利用电力集成系统，开展风光互补发电。此外，还可以引入储能系统（如锂电池、抽水蓄能等）来改善光伏发电的灵活性，因为储能系统可以在光伏电站遇到弃光限制发电时将多余电能存入储能电池内，在电网需要或用电高峰时通过储能逆变器将电池内电能送入电网。

## 3、光伏在非电力领域的发展潜力

交通运输消耗的能源占到全球终端能源消费（TFC）总量的 39%，是排放的主要来源。因此推进交通电气化发展意义重大。全球电动汽车的销售数量在 2018 年大

幅增长 63%，首次突破 200 万辆大关。因此光伏在交通电气化中具备广阔的应用潜力。供暖制冷行业消耗的能源占到 TFC 总量的 17%，且主要采用传统化石燃料。因此采用光伏电力热泵能够减少该行业化石能源消耗，从而促进该行业的减排。工业生产（炼钢、水泥生产、氨生产等）的能源消耗占到 TFC 总量的 27%，也是主要的耗能大户和排放来源。同样可以通过引入光伏等可再生能源替代化石能源减少排放。此外，还可以采用电力转换为其他能源载体（Power-to-X）解决方案制取燃料或化学品，即应用光伏电力进行电解水制氢、制甲烷或其他碳氢燃料/化学品，实现对太阳能大规模跨季节的存储。但目前 Power-to-X 效率较低、成本较高，有待进一步的改善。

#### 4、光伏技术研发

太阳能电池效率始终是决定该技术发展前景的关键因素之一。经过科学家的努力，各类型的太阳能电池研发都取得了显著的进展，效率得到了显著提升：如作为最成熟的太阳能电池技术，晶硅太阳能电池目前占据了全球太阳能电池市场近 95% 的份额。目前基于背面接触钝化的单晶硅太阳能电池光电转换效率已经达到了 26.7%，是单晶硅太阳能电池中效率的最高值。此外，新兴太阳能电池技术也取得了一系列研究成果，如 1 cm<sup>2</sup> 钙钛矿太阳能电池创下了 20.9% 的效率纪录，铜铟镓硒（CIGS）单结太阳能电池最高效率已经上升到了 23.4%，砷化镓（GaAs）太阳能电池的效率纪录达到了 29.1%，而钙钛矿/晶硅、GaInP/GaAs/Si 叠层太阳能电池效率更是分别达到了 28% 和 35.9%。此外，电池的稳定性也是太阳能电池研究需要考虑的另一关键因素。如通过开发新材料、新的电池架构等方法可以有效地改善电池器件的环境稳定性，延长器件寿命。目前，美国、中国、德国、日本、澳大利亚等几个国家是全球太阳能电池主要研发力量，也是全球主要的光伏市场。在上述几个国家的大力推动下，全球光伏产业蓬勃发展，目前全球光伏市场的年利润已经超过了 1000 亿美元。

（郭楷模）



## 《洁净能源科技动态监测快报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号（430071）

联系人：陈伟 郭楷模 岳芳

联系电话：（027）87199180

电子邮件：[energy@whlib.ac.cn](mailto:energy@whlib.ac.cn)