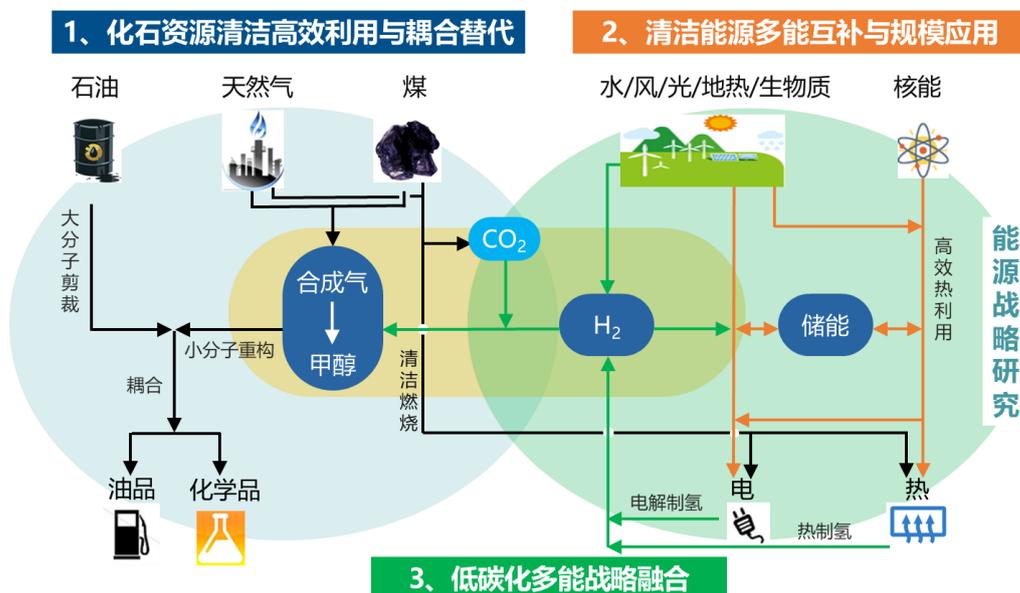




洁净能源科技动态监测快报

2020 年第 06 期（总第 08 期）



本期看点

- IEA: 2020 年全球石油供需双降 未来发展仍存不确定性
- DOE 资助 8100 万美元支持未来燃煤电厂技术概念研发
- 欧盟发布 2021-2024 年综合能源系统研发实施计划
- 美国核燃料工作组提出恢复美国核能领导地位战略
- IRENA: 2019 年全球可再生能源累计装机突破 2500 GW
- WIPO: 绿色能源技术创新乏力 各国需加大支持力度

目 录

2020 年第 06 期 (总第 08 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

- IEA: 2020 年全球石油供需双降 未来发展仍存不确定性 2
- DOE 资助 8100 万美元支持未来燃煤电厂技术概念研发..... 5
- ARPA-E 资助 2800 万美元支持燃气轮机超高温材料研究..... 7

◆ 清洁能源多能互补

- 欧盟发布 2021-2024 年综合能源系统研发实施计划 9
- 美国核燃料工作组提出恢复美国核能领导地位战略..... 15
- ARPA-E 资助 2700 万美元支持先进反应堆运营技术开发..... 18
- 新型自然-人工杂合的人造叶绿体展现出工业化应用潜力 19

◆ 低碳化多能融合

- 欧盟发布综合能源系统灵活发电技术白皮书 20
- 新型催化剂通过水界面促进作用实现甲烷高选择性制甲醇..... 23
- 光伏-气体扩散电极装置实现太阳能驱动高效催化还原 CO₂..... 24

◆ 能源战略研究

- IEA: 2019 年成员国能源技术研发示范公共经费达 209 亿美元 27
- IRENA: 2019 年全球可再生能源累计装机突破 2500 GW 30
- WIPO: 绿色能源技术创新乏力 各国需加大支持力度 32

本期概要

国际能源署 (IEA) 发布最新《石油市场月度报告》，分析预测了 2020 年全球石油市场走势：随着疫情形势逐步得到控制，各国政府逐步重新放开经济活动，全球石油需求预计在 2020 年下半年回升，但需求量难以恢复到疫情前水平，预计 2020 年全年全球石油需求将下降 860 万桶/日。5 月石油供应量将降至近 9 年来最低水平，全年供应量将减少 330 万桶/日；全球炼油产量下降峰值推迟到 5 月，全年成品油平均产量将下降 620 万桶/日。

欧洲能源转型智能网络技术与创新平台 (ETIPSNET) 发布《2021-2024 年综合能源系统研发实施计划》，确定了未来四年将资助 9.55 亿欧元支持优先开展的关键研究创新事项，涵盖了 6 大主题领域，包括：消费者、产消合一者和能源社区；系统经济性；数字化；系统设计和规划；灵活性技术和系统灵活性；系统运行。旨在打造未来的欧盟综合能源系统，助力实现欧盟碳中和经济体目标。

美国国务卿公布了美国核燃料工作组提出的《恢复美国核能竞争优势：确保美国国家安全的战略》四大建议，包括：(1) 美国需要振兴核工业以确保国家安全，近几十年来美国对核能的忽视已经导致其核能领先地位被俄罗斯和中国超越，整个核能产业面临破产的高风险。(2) 恢复美国核能领导地位战略方针，政府将采取行动振兴和加强铀矿开采业，强化技术创新和研发投入，与俄罗斯和中国开展国际市场竞争。(3) 恢复美国核能领导地位战略目标，振兴和加强核燃料循环前端和国内核工业，重新树立美国在下一代核技术领域的领导地位。(4) 恢复美国核能领导地位战略措施，如恢复核燃料循环前端整体供应能力、增强美国出口竞争力等。

欧洲能源转型智能网络技术与创新平台日前发布了《脱碳欧洲灵活发电白皮书》，基于当前技术发展水平描绘了欧盟灵活发电技术的发展路线，推进实现欧洲综合能源系统 2050 年愿景：白皮书分析了欧洲电力系统使用低碳/无碳替代燃料的挑战以及灵活性技术要求，描述了系统转型过程中增强发电灵活性需要开发的相关技术，包括：生物质发电和天然气发电；燃料灵活性、负荷灵活性与储能技术；氢能、跨部门融合、电力转换为其他能源载体 (Power-to-X)。

国际能源署 (IEA) 发布了《IEA 成员国能源技术研发示范公共经费投入简析 2020》报告：30 个成员国能源技术研究、开发和示范 (RD&D) 的公共经费投入连续第三年增长，能源技术 RD&D 投入领域日益多样化，美日两国在能源技术 RD&D 公共经费投入处于领先地位，低碳能源技术成为能源技术 RD&D 公共投入主要领域。

国际可再生能源机构 (IRENA) 发布《可再生能源装机容量统计数据 2020》报告，回溯了 2019 年可再生能源的发展情况：2019 年全球可再生能源发电装机容量增长了 176 GW，同比增长 7.4%，延续了过去十年来的强劲增长态势。截至 2019 年底，全球可再生能源累计装机容量突破 2500 GW，达到 2537 GW。太阳能和风能继续引领可再生能源增长，两者新增装机容量之和占到全部新增装机容量的近 90%。尽管全球各地区增幅不同，但可再生能源电力装机容量在全球各地区都有所增长，其中亚洲地区新增装机容量最多，占全球新增总量一半以上。

化石资源清洁高效利用

IEA：2020 年全球石油供需双降 未来发展仍存不确定性

5月14日，国际能源署（IEA）发布最新《石油市场月度报告》¹，分析预测了2020年全球石油市场走势。报告下调了下半年全球石油需求预期，但将全年石油需求下降幅度从930万桶/日调整为860万桶/日；5月石油供应量将降至近9年来最低水平，全年供应量将减少330万桶/日；全球炼油产量下降峰值将推迟到5月，全年成品油平均产量将下降620万桶/日；经合组织（OECD）3月份库存增加至29.61亿桶，比近5年平均水平高4670万桶，可满足未来90天需求；受疫情防控措施减弱、非欧佩克国家产量急剧下降及OPEC+减产协议影响，石油价格已从4月的低谷反弹，但仍远低于疫情前水平。报告关键点如下：

1、IEA 向上修正了全年石油需求预期，预计 2020 年全球石油需求将减少 860 万桶/日

受疫情管控措施影响，4月全球石油需求同比下降2520万桶/日。随着各国政府逐步重新放开经济活动，预计5月需求下降幅度将收窄至约2150万桶/日，6月需求则将同比下降1300万桶/日。由于OECD国家流动性好于预期，逐步放松疫情防控措施将使2020年第二季度全球石油需求有所好转，IEA将预测值上调了320万桶/日，但仍比去年大幅下降1990万桶/日。报告称下调下半年预期，主要是由于中国经济复苏速度略低于预期，以及航空等行业将在整个下半年甚至更长时间内继续受到冲击，IEA将下半年需求预期下调30万桶/日，预计将同比下降460万桶/日，全年需求则将下降860万桶/日，比上月报告预测值上调70万桶/日（表1）。然而，新冠肺炎疫情反弹仍将是影响需求的主要风险因素。

表1 2019-2020年不同地区石油需求（单位：百万桶/日）

地区	2019					2020				
	1季度	2季度	3季度	4季度	全年	1季度	2季度	3季度	4季度	全年
非洲	4.3	4.3	4.1	4.3	4.2	4.2	3.3	4.0	4.2	3.9
美洲	31.5	31.6	32.2	31.9	31.8	30.3	24.1	30.6	30.8	28.9
亚太地区	35.8	35.6	35.2	36.5	35.8	33.0	30.5	33.7	35.2	33.1
欧洲	14.7	14.9	15.3	14.8	14.9	13.8	10.9	13.9	14.2	13.2
前苏联地区	4.5	4.6	4.9	4.8	4.7	4.6	3.7	4.6	4.7	4.4
中东	8.1	8.2	8.8	8.4	8.4	7.8	6.8	8.4	7.9	7.7

¹ Oil Market Report - May 2020. <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-may-2020>

世界	98.9	99.2	100.5	100.7	99.9	93.5	79.3	95.1	96.9	91.2
年度变化 (%)	0.4	0.6	0.8	1.5	0.8	-5.4	-20.1	-5.4	-3.8	-8.6
年度变化 (百万桶/日)	0.4	0.5	0.8	1.5	8.8	-5.4	-19.9	-5.5	-3.8	-8.6
比上月预测 (百万桶/日)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	3.2	0.1	-0.7	0.7

2、大部分国家第二季度石油需求都将急剧下降，汽油将受到最大影响

预计 2020 年 OECD 国家石油需求将下降 450 万桶/日，非 OECD 国家则将下降 410 万桶/日。第二季度将出现最大降幅，OECD 国家和非 OECD 国家需求分别下降 1080 万桶/日和 910 万桶/日。预计 2020 年美国石油需求将下降 190 万桶/日，第二季度将下降 490 万桶/日；OECD 欧洲国家全年需求将下降 170 万桶/日，第二季度则将下降 385 万桶/日。中国一季度石油需求下降 135 万桶/日，预计二季度将下降 1.05 万桶/日，由于经济增长仍将放缓，预计 2020 年下半年需求仍将同比下降 71 万桶/日。由于交通运输受疫情管控较大，预计第二季度 OECD 国家汽油需求将下降 410 万桶/日，非 OECD 国家则将下降 300 万桶/日，全年需求则将分别下降 130 万桶/日和 110 万桶/日。

3、全球石油供应将在 5 月降至近 9 年最低水平

需求和价格的下跌正迫使世界各地的生产商以超预期速度降低供应，到今年 4 月，由于美国和加拿大的大规模停产，非 OPEC 国家的石油产量已经比年初减少了 300 万桶/日。与此同时，沙特阿拉伯、阿联酋和科威特的石油产量也达到了创纪录的水平，导致 4 月份全球石油供应量达到 1.0005 亿桶/日，环比增加 26 万桶/日。随着 OPEC+ 减产协议生效，预计 5 月沙特阿拉伯原油产量将大幅削减 340 万桶/天，美国、加拿大等国产量也将进一步下降，全球石油供应将大幅下降 1200 万桶/日，降至 9 年来最低点（8800 万桶/日）。到第四季度，美国产量降幅将超过其他主要产油国，预计同比下降 280 万桶/日，沙特产量将下降 90 万桶/日，俄罗斯将下降 130 万桶/日（图 1）。据报道，一些生产商倾向于将 5 月至 6 月更大幅度的减产延长至今年年底，如果实现则沙特第四季度产量可能会同比下降 250 万桶/日。3 月至 6 月，非 OPEC 国家石油产量将以 670 万桶/日的速度下降，然后在今年剩余时间里小幅上升，全年供应量则可能创纪录地减少 330 万桶/日。

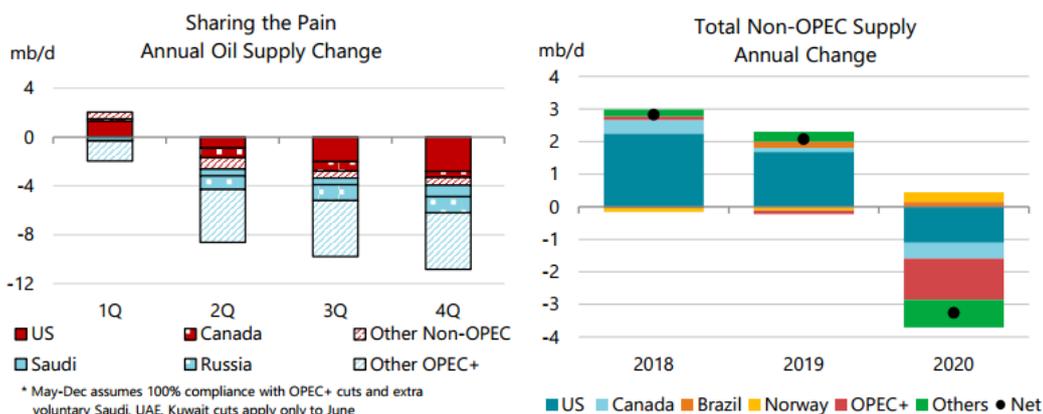


图 1 2020 年全球石油供应预测（左图，单位：百万桶/日）及非 OPEC 国家石油供应年度变化（右图，单位：百万桶/日）

4、5 月初库存瓶颈迹象倍增，第二季度全球炼油厂产量将同比大幅减少 1340 万桶/日

由于 IEA 根据新数据和更高的需求向上修正了 4 月份的产量预测，全球炼油活动的下降峰值已经转移到 5 月份。宏观经济因素加上新冠肺炎的不可预测性，未来市场预测将存在很大的不确定性，而炼油行业前景则受到供应和需求预测双重不确定性的影响。5 月初，炼油厂库存瓶颈的迹象凸显，欧洲、亚洲和非洲的数家炼油厂出现了不定期关闭。欧洲和美国的炼油利润率仍相对强劲。如果原油供应比预期更快地调整，这将支撑原油价格并压低炼油利润率，导致炼油产量低于预期。另一方面，需求加速恢复可能提振利润率，并促进炼油活动的复苏。预计 2020 年第二季度全球炼油厂产量将同比减少 1340 万桶/日，全年平均产量将同比下降 620 万桶/日。

5、OECD 国家 3 月份石油库存高出 5 年平均水平 4670 万桶，可覆盖未来 90 天需求

随着石油需求的暴跌和供应水平的提高，石油库存在年初迅速增加。3 月份 OECD 国家原油库存以超过正常水平四倍的速度增长，上涨 6820 万桶（日增 220 万桶）达到 29.61 亿桶，比近 5 年平均水平高出 4670 万桶。由于需求前景黯淡，这一库存水平能够满足未来 90 天的需求。初步数据显示，美国 4 月份原油库存增加了 5370 万桶，欧洲和日本的原油库存也分别增加了 310 万桶和 300 万桶，4 月份全球原油浮动库存量增加 990 万桶至 1.238 亿桶。截至 4 月底，全球原油库存达到 46 亿桶，原油库容利用率达到 69%。基于当前数据，预计全球原油库存将在第二季度加速增长。

6、原油期货价格首现负值，油品运输成本上升

由于新冠肺炎疫情导致需求疲软和中东创纪录的出口量，4 月份油价大幅下跌，在 5 月合约到期的前一天，西德克萨斯轻质中级（WTI）原油期货合约结算价跌至 -37 美元/桶，首次出现负油价。5 月初，随着越来越多的国家开始放松管控措施，以

及 OPEC+减产协议生效，加上其他产油国出于经济或物流原因停止供应，油价小幅上涨。尽管一些国家放松管控措施为汽油市场提供了支持，然而由于航空活动依然低迷，航空燃料裂解价差降至创纪录的低位。此外，由于浮动仓储需求增加，以及中东地区的高出口量，4 月份原油和成品油油轮运输成本环比上涨，预计未来产量下降将导致发货量下降，原油运价在 5 月初将有所下降。

（郑超 岳芳）

DOE 资助 8100 万美元支持未来燃煤电厂技术概念研发

5 月 18 日，美国能源部（DOE）宣布在“Coal FIRST”计划下投入 8100 万美元²，支持未来先进燃煤电厂概念的设计开发和系统集成研究，以开发适用于未来能源系统的小型灵活先进燃煤电厂。本次资助将针对四类先进燃煤电厂概念进行设计开发、主场地评估和环境信息数据、投资案例分析以及工程规模原型的系统集成设计，具体内容如下：

1、灵活的超临界燃煤发电厂

此类燃煤电厂设计必须包含如下特征：（1）通过材料提高灵活性，在关键组件中使用高镍基合金，可在快速爬坡期间将这些限制机组寿命的组件热应力降至最低，从而实现发电灵活性；（2）空气质量控制系统的模块化组件，通过使用并行模块化组件，可关停单个设备以部分容量运行，以适应低负荷要求；（3）紧凑型锅炉布置，水平高温对流表面在前壁而非锅炉顶部布置过热器和再热器集箱出口，与典型布置相比，高温管道的运行时间缩短了 25%-30%，缩小了锅炉占地面积。需进行的设计开发包括：

（1）超临界锅炉岛。①重新设计锅炉概念以降低容量并支持灵活低负荷运行，并考虑集箱、管道、膜式水冷壁、过热器、再热器等的设计；②使用先进合金材料以在 650℃蒸汽循环条件下运行；③结构材料需考虑在主蒸汽温度接近 650℃下长期使用，尤其要注意温度最高的区域，例如管道和集箱；④650℃蒸汽条件下的阀门设计。

（2）集成与控制系统。集成与控制系统必须设计为集成所有系统和组件，以实现灵活运行。

（3）汽轮机。需重新设计汽轮机以适合 650℃蒸汽循环条件，以及该概念对尺寸、灵活性和低负荷的要求。应考虑最佳的涡轮膨胀机设计、转子动力学、热膨胀、轴承、使用先进材料的小型阀门、叶片通流设计、先进密封件以及适应工作温度的构造材料。

（4）排放控制设备。排放控制设备应设计为灵活运行，包括在低负荷下运行，

² DOE Announces Intent to Commit \$81 Million for Coal FIRST Design Development.
<https://www.energy.gov/fe/articles/doe-announces-intent-commit-81-million-coal-first-design-development>

以满足该系统的排放要求。

(5) 燃烧后碳捕集。燃烧后碳捕集系统应设计为灵活运行，包括在低负荷下运行，必须与电厂概念集成以达到系统性能和成本要求。

2、超临界蒸汽循环增压流化床发电厂

此类燃煤电厂设计必须包含如下特征：（1）增压流化床燃烧，由于反应物分压升高，可增强流化床中的燃烧和固硫反应，将配备返料系统，并可与天然气共燃以提高爬坡率；（2）使用模块化单元，可在部分负荷下运行部分模块单元，以提升运行灵活性和负荷跟踪能力。需进行的设计开发包括：

(1) 增压流化床燃烧器系统。①设计和优化增压流化床燃烧器系统，以与燃气/蒸汽循环共同运行，通过小型模块化系统实现灵活性和低负荷运行；②返料系统针对储能进行设计和验证，以满足运行要求。

(2) 蒸汽发电循环。需重新设计汽轮机以适合 24.13 兆帕、593℃的蒸汽循环条件，以及更小尺寸、更高灵活性和低负荷要求。

(3) 集成与控制系统。集成与控制系统必须设计为集成所有系统和组件，以实现灵活运行。

(4) 燃气轮机。需设计一种新的气体膨胀-压缩机组，以满足增压流化床燃烧器和碳捕集要求。

(5) 排放控制设备。排放控制设备应设计为灵活运行，包括在低负荷下运行，以满足该系统的排放要求。

(6) 燃烧后碳捕集。燃烧后碳捕集系统应设计为灵活运行，包括在低负荷下运行，必须与电厂概念集成以达到系统性能和成本要求。另外还需进行碳捕集上游的脱硫设计。

3、燃气轮机-超临界燃煤锅炉混合电厂

此类燃煤电厂设计必须包含如下特征：（1）独立的制煤和燃烧系统，将使煤粉制备和存储独立于锅炉/汽轮机系统，避免因磨煤机投用/停用而造成的爬坡限制；（2）纳入储能系统，在需求低于最低负荷的时段将多余的电量存储在储能系统中，有助于在需求增加的时段（例如早晚高峰）进行初始爬坡；（3）利用燃气轮机，燃气轮机将占直接功率输出近 1/4，并且具有快速启动和爬坡的功能。需进行的设计开发包括：

(1) 超临界锅炉岛。①将燃气轮机与锅炉集成，需进行燃烧和流动的建模/模拟及测试，以评估设计以及火焰稳定性，还需重新优化风机、燃烧器、燃尽风系统以确保完全燃烧；②烟气/空气再热器重新设计，以解决烟气和助燃空气的流量平衡问题；③设计和优化传热表面，以在较高的超临界燃烧温度下运行，同时需考虑材料选择、系统温度以及最佳的清洁策略，以去除表面积灰结渣，还需评估锅炉整体传

热特性，重新设计集箱、水冷壁和过热器等锅炉组件以实现灵活的低负荷运行。

(2) **汽轮机**。需重新设计汽轮机，以满足该概念对更小尺寸、低负载和灵活性要求。

(3) **集成与控制系统**。集成与控制系统必须设计为集成所有系统和组件，以实现灵活运行。

(4) **排放控制设备**。排放控制设备应设计为灵活运行，包括在低负荷下运行，以满足该系统的排放要求。

(5) **电池储能系统**。基于现有电池技术，开发新型设计以集成至汽轮机/锅炉系统中，需要进行研发以减少资本和运维成本并提高效率和寿命。

(6) **燃烧后碳捕集**。燃烧后碳捕集系统应设计为灵活运行，包括在低负荷下运行，必须与电厂概念集成以达到系统性能和成本要求。

4、灵活的煤-生物质气化，用于发电和生产无碳氢气

该系统将煤、生物质和其他原料气化，用于发电或生产近零/零碳排放的副产品，如氢气、氨或其他燃料及化学品。此类设计必须包含如下特征：(1) 灵活的煤气化炉，能够与生物质共燃，以实现净负碳排放，还将（可选地）设计为利用其他原料，如石油基合成材料（如塑料）产生的废物等；(2) 合成气处理和碳捕集系统，此类系统必须与煤气化炉合成气中的成分兼容。需进行的设计开发包括：

(1) **灵活的煤气化炉**。煤气化炉将设计为与生物质共燃，需确保整体负碳排放，可能还需要引入其他原料。

(2) **合成气处理和碳捕集系统**。在系统设计时需评估生物质和/或其他原料导致合成气成分对环境过程的影响。

(3) **集成与控制系统**。集成与控制系统必须设计为集成所有系统和组件，以实现灵活运行。

（岳芳）

ARPA-E 资助 2800 万美元支持燃气轮机超高温材料研究

近日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布设立“提高涡轮效率的超高温防渗材料（ULTIMATE）”主题研究计划³，将提供 2800 万美元资助开发和示范可在燃气轮机高温高压环境下运行的超高温叶片材料。项目将专门针对用于发电和航空工业的燃气轮机。

过去几十年以来，通过不断的微观结构和化学改进，当前先进的叶片材料一般是由单晶镍(Ni)或钴(Co)基高温合金制成，可承受的温度已稳步提升到了 1100℃。

³ Department of Energy Announces \$28 Million to Develop Ultrahigh Temperature Materials for Gas Turbine Applications
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-28-million-develop-ultrahigh-temperature-materials-gas-turbine>

然而，仍需进一步开发新的材料，可在显著高于工业标准高温合金的温度下进行工作，以进一步提高效率和经济收益。该项目将通过开发集成先进制造工艺的新型超高温金属合金和涂层来满足这一需求，使燃气轮机叶片可在 1300℃ 的测试环境中（或者带有涂层的新材料使入口温度可达 1800℃ 甚至更高）连续运行。

本次资助项目拟分为两个阶段推进，最长分别为 18 个月和 24 个月。在第一阶段，研究团队将通过对基本特性的建模和实验室拉伸试样测试，对合金成分、涂层和制造工艺进行概念验证。在第二阶段，团队将研究选定的合金成分和涂层，全面评估物理、化学和机械性能，并生产出通用的小型涡轮机叶片，以验证可制造性。

（万勇 郭楷模）

清洁能源多能互补

欧盟发布 2021-2024 年综合能源系统研发实施计划

5月14日，欧洲能源转型智能网络技术与创新平台（ETIP SNET）发布《2021-2024年综合能源系统研发实施计划》⁴，明确了未来四年将实施的关键研究创新优先事项及相应预算（总预算约为9.55亿欧元）。此次实施计划主要基于2月份发布的《综合能源系统2020-2030研发路线图》⁵框架提出的6个研究领域，即：消费者、产消合一者和能源社区；系统经济性；数字化；系统设计和规划；灵活性技术和系统灵活性；系统运行，确定了24个研发示范主题。具体内容如下：

一、消费者、产消合一者和能源社区

主题 1：能源基础设施的社会接纳和可持续性。将投入360万欧元用于研发，投入1140万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①开发利益相关方参与的有效方法和工具，以提高公众对新建输电线路、变电站、储能设施、发电站、天然气基础设施的接受度；②提高消费者对新型电力/能源系统的理解和认识，尤其是作为消费者/产消合一者积极参与电网运营，研究公民参与能源社区的社会和经济影响，包括提高系统灵活性和可持续性；③减少或消除能源基础设施对环境的影响，如水电站（水力调峰、沉积物管理、鱼类迁徙和保护、水质保护）、变压器和输电线路噪声、更美观输电线路塔架设计等。

主题 2：调节消费者/用户行为，包括能源社区。将投入2900万欧元用于示范，主要示范任务包括：①开发用于消费者和产消合一者调整能源行为的方法和工具，包括在线测量用电量和发电量、动态分时电价和全环境效益（包括舒适性和安全性等）的行为研究；②开发方法和工具以支持提升行业能源消费适应性的活动。

主题 3：消费者和产消合一者设备控制。将投入3300万欧元用于示范，主要示范任务包括：①智能手机等低成本技术实现产消合一者电力消费/生产的直接无线控制；②通过用于智能家电的家用信息通信技术（ICT）实现对消费者需求的直接控制。

二、系统经济性

主题 1：商业模式。将投入2200万欧元用于研发，主要研发任务包括：①产消合一者提供辅助服务的商业模式；②零售商和聚合商、能源服务公司和能源社区的商业模式；③能源数据分析服务供应商的商业模式；④电动交通网络储能商业模式；

⁴ ETIP SNET R&I Implementation Plan 2021 – 2024. https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2020/05/Implementation-Plan-2021-2024_WEB_Single-Page.pdf

⁵ 参见本刊今年第5期报道。

⑤利用天然气/生物质热电联产在低剩余负荷时供热、高剩余负荷或储热时发电的商业模式。

主题 2：市场设计与治理（包括零售、批发、跨境、辅助服务、灵活性等市场）。

将投入 4560 万欧元用于研发，投入 1840 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：
①泛欧市场设计，促进大规模波动性可再生能源、储能、需求响应、电动汽车等集成；②跨境输电系统运营商市场设计（涉及多个配电系统运营商、聚合商和运行区域），跨境辅助服务市场设计（包括储备联合采购，储备共享，针对频率响应、惯性响应、无功功率、电压控制和潮流控制的快速爬坡服务）；③集中式储能和虚拟电厂提供辅助服务的市场规则和协调机制，包括可再生能源、灵活热力发电（小型和微型热电联产）、热泵、电动汽车等；④协调通信、智能电表和平台并考虑物理电网约束，进行输配电系统运营商辅助服务的市场设计和成本效益分析；⑤本地能源市场设计，开发本地能源社区的零售（点对点）市场，具有电力平衡和低压/中压电网控制能力；⑥大规模需求响应市场设计，通过智能电表等技术获得需求负荷价格敏感特性的市场模型；⑦针对储能设备所有者和运营商（包括电动汽车）的市场设计，以及储热市场设计；⑧在低剩余负荷或负荷不足情况下，通过天然气网提供系统服务（平衡）的市场规则；⑨水循环管理运营商系统服务（平衡）市场设计。

三、数字化

主题 1：协议、标准化和互操作性。将投入 6100 万欧元用于研发，主要研发任务包括：①数据交换协议/接口，开发基于随机模型的不同时间尺度市场运行处理协议，以及加密和认证市场订单的通用标准化模型；②开发设备和电网间以及设备和远程管理平台间的标准化通信协议和 ICT 基础设施；③开发智能变电站通信接口；④开发支持输/配电系统运营商信息交换的通用设备接口和协议。

主题 2：数据通信。将投入 2370 万欧元用于研发，投入 1130 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①支持需求聚合与控制的通信基础设施，通过机器到机器（M2M）或人工智能到人工智能为能源网络服务提供电信解决方案（包括用于设备、多址边缘计算或云级决策的人工智能算法）；②用于监测和控制分布式发电的 ICT 基础设施，包括标准和协议；③智能电表数据通信基础设施，可进行近实时监测，包括用于时间同步和时间戳的非全球导航卫星系统，考虑端到端通信的延迟、数据包丢失和抖动；④优化 ICT 基础设施安装，包括成本、准确性、冗余性等，以用于针对性风险维护的数据收集和处理。

主题 3：数据和信息管理。将投入 6600 万欧元用于研发，主要研发任务包括：①不同来源数据的大数据管理，包括：智能仪表、智能传感器、社交媒体、管理工具、市场平台、数据分析支持的数据驱动工具、人工智能和数字孪生；②调查物联网技术在输/配电系统运营商规划、资产管理、运营和市场活动中的使用情况。

主题 4：网络安全与隐私。将投入 2400 万欧元用于研发，主要研发任务包括：①电网基础设施网络安全保护的方法和工具，可避免通过物理安装（如主变电站和辅助变电站、中压和低压线路、输/配电系统运营商的网络安全策略）注入虚假数据；②分布式能源管理的数据保护，包括分散式存储；③研究并行使用传统数据采集与监视控制系统作为远程监控手段的风险和漏洞；④研究使用公共 ICT 和无线基础设施实现智能电网的风险和漏洞，如与智能电表等相连。

主题 5：端到端架构。将投入 3530 万欧元用于研发，投入 1970 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①输配电网数字化，创建互操作电网和通信网络的数字化模型；②增强架构设计，在不同电压水平、不同时间段进行数据交换，具有增强的输/配电系统运营商通信接口；③在新的软硬件架构方案上应用基于 ICT 的先进方法（物联网、边缘计算、云计算、网络安全、区块链等）进行数据存储和计算。

四、系统设计和规划

主题 1：综合能源系统架构。将投入 3450 万欧元用于研发，投入 3750 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①开发包括所有主要能源载体的能源系统模型，涵盖产消合一者、能源社区、电动交通、输配电网（低、中、高压）、国家/区域电力和天然气交换的整个能源链；②协调高压（超高压）和中压配电系统，开发包括储能基础设施以及天然气和供热基础设施的输电系统；③开发能源社区，具有用于本地多能流运行的能源管理系统，包括储电、电力转换为其他能源载体（P2X）的发电和存储，以及其他能源载体转换为电力（X2P），包括基于氢能和燃料电池的热电联产；④多载体复合储能系统研究，包括与单独储能设备的经济效益比较、通过电制热平衡供需和储能、热力和电力之间的动态交互、建筑应用、考虑热负荷惯性的耦合能源系统动力学；⑤在电力系统不同电压水平下，优化协调电力存储的位置和规模，用于快速和慢速功率响应，以及未来储能设施辅助补充服务；⑥优化协调抽水蓄能、天然气、热化学和化学储能的分布及规模，以满足季节性需求；⑦利用所有能源载体系统的灵活性，用于实时电压和频率控制（包括交流、交流/直流混合和直流微电网、本地存储、智能变压器）的分布式模块化控制结构微元网；⑧交直流综合配电网，包括大规模供暖、家用和商用热泵、电动汽车充电站等，通过交流配电系统、智能变压器、中/低压直流、交直流混合电网、直流微电网及本地储能等提供灵活性；⑨开发基于不同优化准则的高压直流电网设计优化算法，以及在同一塔架或平行线路上使用现有基础设施的直流和交流线路的并行布线。

主题 2：长期规划（系统开发）。将投入 2320 万欧元用于研发，投入 2480 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①综合能源系统规划，包括热、冷、气、电网络，并扩展至城市废水、饮用水和公共交通网络；②进行欧盟层面的低成本可再生能源投资规划，并考虑替代市场设计影响和基础设施发展要求以及所有灵活性手段；

③电力系统灵活性规划，包括电网设计，应对自然灾害和人为攻击的储能和需求灵活性，基于随机方法的灵活运行规划；④开发分布式能源以处理规划中的网络约束，进行高、中、低压电网加固和低、中压电网扩建规划，并使用智能仪表、各级监控系统、故障检测等的的数据；⑤考虑分布式能源随机性的概率规划，包括可再生能源、需求响应、储能、供暖/制冷以及移动需求的不确定性；⑥配电系统规划和资产管理，以适应电动汽车与快充、超快充和感应充电的大规模集成；⑦低、中压直流工业和住宅电网规划，降低辅助系统成本并提升家庭供电安全。

主题 3：资产管理与维护。将投入 1790 万欧元用于研发，投入 1110 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①开发老化和故障模型用于低/中压电网维护规划，考虑极端事件、电力系统部件的不同时间阶段、ICT 基础设施和智能电表；②开发输电系统部件状况健康状态评估模型，如与部件磨损、变压器油池油位、开关柜六氟化硫液位和故障概率有关的健康状况，研究影响高压输电系统元件寿命的参数；③基于模型的组件故障检测和状态监测，开发适用于高压系统有害环境作业的机器人、现场维护无人机，改善由于环境（树木生长、风力）和运营影响资产寿命的高压系统部件维护；④通过数字通信和监控设备进行远程低/中压维护操作；⑤高、中压资产管理，考虑对自然灾害、恐怖主义、网络攻击等罕见、严重事件的恢复能力；⑥培训维修操作员适应数字环境（即人机界面）和新机器人解决方案，优化用于收集和处理数据的 ICT 基础设施的维护成本；⑦优化储能系统寿命和失效模式，包括随机循环曲线、资本支出、运营成本、效率；⑧优化水电和抽水蓄能机组维护的智能传感器及在线监测与诊断系统；⑨利用快速循环能力和燃料灵活性提高火电机组寿命。

主题 4：系统稳定性分析。将投入 1060 万欧元用于研发，投入 2740 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①通过分布式发电、储能和需求灵活性以及配电网连接的微电网和纳米电网支持电网稳定，以稳定和控制大容量输电网；②开发电力电子变换器提供合成惯性控制以及附加振荡阻尼控制等概念；③孤岛模式下交直流混合微电网的稳定性与控制；④开发基于换流器的稳定性模型和工具；⑤高比例波动性可再生能源输电系统转子角、电压和频率稳定性模型和技术；⑥开发和验证不同环境下多种技术和能源载体组成的综合网络和系统组件的等效模型，保证能源系统的稳定性；⑦大规模区域间振荡的分析方法和工具，研究具有多控制系统电网的动态稳定性。

五、灵活性技术和系统灵活性

主题 1：需求灵活性。将投入 950 万欧元用于研发，投入 1850 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①优化输配电系统运营商对需求侧响应的利用；②与电信运营商紧密合作进行直接负荷控制；③将主动需求管理纳入输电系统运营商的规划

和运营中，以满足最终用户和聚合商的需求，并推迟电网投资；④综合能源密集型产业（如钢铁生产）和大容量储能的需求灵活性模型。

主题 2：发电灵活性。将投入 3970 万欧元用于研发，投入 1330 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①开发用于风力涡轮机和太阳能光伏最大功率点追踪的有效控件，以考虑灵活性和储备共享；②增加水力发电和抽水蓄能电站运行灵活性，减少突然断电对寿命和安全的负面影响；③提高火电灵活性，在不影响废热回收情况下提高效率并降低温室气体排放；④使用碳中性燃料（氢、生物燃料）提高火电燃料灵活性；⑤开发和测试集成灵活中小型火电、供热和制冷、储能的解决方案，并进行影响研究和示范；⑥开发各种规模的高效集成热电联产机组，并以氢、生物燃料为动力，将供热和发电分开使用；⑦建立基于水力发电数据的水电系统模型，开发基于最新气候模拟的水库和河流来水量数据集。

主题 3：储能灵活性及能量转换灵活性。将投入 4000 万欧元用于研发，主要研发任务包括：①电网（包括微电网）运行的储能灵活性；②集成储能系统与常规发电机（例如热电联产、水电和火电），以提高灵活性并改善运行；③利用储能灵活性为家庭/建筑物/工业级集中供热（和制冷）系统提供平衡服务；④电力转化为天然气的大规模应用；⑤由可再生能源发电、部门融合和储能组成的独立建筑、居住区以及中小企业和工业电力系统，涉及电力与氢气、燃料、天然气、热量、化学品之间的转换。

主题 4：网络灵活性。将投入 2400 万欧元用于研发，主要研发任务包括：①通过灵活的交流输电系统、移相变压器和高压直流输电、智能变压器、柔性软开关点、灵活的交流配电系统和故障限流器，提高输配电网灵活性；②配电网重构的灵活性；③标准化高压直流多终端网络，协调不同地区之间的电力流，并连接海上和陆上风电厂；④用于输配电网容量计算的动态线路容量解决方案。

主题 5：交通灵活性。将投入 1800 万欧元用于研发，主要研发任务包括：①开发集中和分布式算法以有效管理电动汽车充电；②交通运输供电网的能源管理，通过公共连接点变电站的储能设施向配电系统运营商提供辅助服务；③交通电气化提供灵活性服务，尤其是在配电网运营中应用电网到车辆（G2V）和车辆到电网（V2G）技术，提供负荷平抑、系统平衡和电压支持等服务。

六、系统运行

主题 1：状态评估和监控。将投入 1920 万欧元用于研发，投入 680 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①智能监控设备进行输电系统的稳态和动态状态评估；②智能电表用户数据增强低中压配电系统的可观察性和状态评估；③通过算法和工具提升可再生能源资源的实时可观察性，并改进预测用于运行规划。

主题 2：短期控制。将投入 600 万欧元用于研发，投入 1400 万欧元用于示范，

主要研发示范任务包括：①优化负荷频率控制，考虑电信基础设施、延迟和可靠性要求；②研究可再生能源对电网初级电压和频率控制的作用，重点针对孤岛等系统；③通过分布式能源、本地储能和负荷以及虚拟电厂，以极低或无惯性控制配电网（互连或孤岛）的初级电压和频率控制。

主题 3：中长期控制。将投入 810 万欧元用于研发，投入 2890 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①先进的可再生能源预测，考虑天气预测、历史数据和在线测量等；②基于天气、降水模型和实时传感器的水电预测；③通过发电量和负荷短期预测，并利用用户行为和灵活负荷免受电网的位置约束；④优化高度不确定条件下的发电机组调度、储备分配和最优潮流；⑤优化配电网配置，包括增强配电网监控能力、自动中低压系统拓扑识别以及日前预测；⑥控制技术在二次变电站中的大量使用。

主题 4：预防性控制/恢复。将投入 2260 万欧元用于研发，投入 3140 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①通过以电力电子为接口的分布式能源的高渗透率，保护具有低故障电流的配电网；②直流电网保护，继电器和断路器保护，兼顾互操作性和标准化的多供应商解决方案；③配电网运营措施，如拓扑优化和分布式能源运营规划，以提高抵御自然灾害、恐怖主义和网络攻击的能力；④通过分布式能源和储能实现自下而上的恢复，包括通过微电网和微元网的计划性孤岛技术；⑤电力系统自动恢复的配电层故障自动清除自愈技术；⑥考虑无功功率和电压控制的高效减负荷技术和工具；⑦配电网中多能源载体的安全支持；⑧基于联络线和/或黑启动装置协调的泛欧或多区域系统恢复。

主题 5：控制中心技术。将投入 3290 万欧元用于研发，投入 3110 万欧元用于示范，主要研发示范任务包括：①输电系统的广域监控架构，高性能和高速通信基础架构，结合传感技术、自动化和控制方法；②输电系统运营商能源管理平台以及相关监控系统，能够与本地市场互动，并具有故障管理自愈功能等；③配电系统运营商能源管理平台，使用户能够主动参与能源市场和电网运行优化，与其他参与者（零售商、聚合商、输电系统运营商）进行互操作，以实现电网状态和数据以及智能电表数据处理；④分布式网络控制的控制中心体系结构；⑤防孤岛保护，计划性孤岛的控制；⑥为适应新的网络能源管理平台（包括多能源载体系统），通过数字化模型为配输电系统运营商开发先进培训模拟器；⑦能源管理系统控制室的先进人机接口，协助运营商的预防和纠正决策。

（刘杨 李由姿 岳芳）

美国核燃料工作组提出恢复美国核能领导地位战略

4月23日，美国国务卿公布了美国核燃料工作组⁶提出的《恢复美国核能竞争优势：确保美国国家安全的战略》⁷，该战略提出了美国应采取的行动建议，以提升美国核电竞争力，恢复铀矿开采、选冶和转化的工业能力，增强美国技术优势并推动出口，确保与美国防核扩散目标保持一致并支持国家安全。本战略共提出四方面的建议，包括：恢复核燃料循环前端整体供应能力；通过技术创新和研发投入增强下一代核能技术的领导地位；确保一个健康和不断增长的核能部门；支持美国核能工业出口民用核技术。要点如下：

一、美国已失去全球核能领导者地位，迫切需要振兴核工业以确保国家安全

近几十年来美国对核能的忽视已经导致其核能领先地位被俄罗斯和中国超越，整个核能产业（从采矿到发电）都面临破产的高风险。美国即将失去生产核燃料的能力，威胁到美国的国家安全和利益。据美国商务部估计，未来10年全球新建核电市场将达到5000-7000亿美元。因此，迫切需要展开行动以振兴美国核工业，恢复在全球核能市场的领导地位。

二、恢复美国核能领导地位战略方针

美国核能领导地位战略将扭转这一现状，以恢复美国的核能优势。首先，政府将采取行动振兴和加强铀矿开采业，支持铀转化服务，并维持现有事业，消除整个核燃料循环中的薄弱环节，恢复世界一流的劳动力队伍，使美国能够在国际市场上竞争。其次，政府将通过技术创新和研发投入来加快进步，重新赢得核能领导地位。最后，美国将进入目前以俄罗斯和中国国企为主导的国际市场，恢复在出口领先核能技术方面的领导地位，并由此达到核不扩散目标。

三、恢复美国核能领导地位战略目标

该战略的目标包括：①分担损失：立即采取行动，支持国内铀矿开采商并恢复整个核燃料循环前端的生存能力；②振兴和加强核燃料循环前端和国内核工业：减轻行业不必要的许可和监管负担，以平衡美国商业核电的国内竞争环境和价值属性；③在技术和标准方面达到世界领先：重新树立美国在下一代核技术领域的领导地位；④增强美国出口竞争力：与国外竞争者建立公平的竞争环境，扩大竞争空间，挑战竞争者。

四、恢复美国核能领导地位战略措施

1、恢复核燃料循环前端整体供应能力

近期美国面临失去铀矿冶能力的威胁，美国唯一的铀转化设施可能永久关闭，

⁶ 美国核燃料工作组是在美国总统特朗普指令下于2019年7月成立的跨部门工作组，旨在从国家安全角度对美国整个核燃料供应链进行全面分析，并向总统汇报，提出政策建议以振兴美国核能工业。

⁷ Restoring America's Competitive Nuclear Advantage: A Strategy to Assure U.S. National Security.
<https://www.energy.gov/downloads/restoring-americas-competitive-nuclear-energy-advantage>

目前该设施正处于冷备用状态，但由于技术和市场原因，无法无限期地维持现状。DOE 计划从 2021 年起花费 10 年时间恢复整个核燃料循环前端供应能力。短期内，将为铀开采和转化提供资金支持（已体现在 2021 年财政预算中），并随后考虑铀浓缩需求。预计 2021 年美国的铀储备需求将直接支持至少两座铀矿运营并促进重建国内铀转化能力，以解决国内铀矿冶的近期挑战。

政府将评估铀储备和其他政策措施的影响，包括核燃料供应前端其他部门（如铀浓缩）的状况和条件，以及对核工业其他部门的影响，以确定下一步行动。例如，扩大现有的美国自主燃料供应(AAFS)，并将其与新的铀储备合并以建立统一储备。AAFIS 目前可供六个反应堆堆芯再装料，改进后的 AAFS 可大幅增加浓缩铀的反应堆燃料装料数，并可能要求其中含有一定比例的未指定用途的铀，即不受国际协议的和平利用使用限制。还将根据成本、影响、需求和地面条件等因素决定扩大的铀储量，预计将采购足以支持另外 24 个大型轻水反应堆再装料的浓缩铀，具体为：①从 2020 年起，以八氧化三铀 (U_3O_8) 形式开采加工的铀达到 1700-1900 万磅；②最迟从 2022 年起，国内铀转化服务将生产约 6000-7500 吨六氟化铀 (UF_6)；③国内铀浓缩服务将会在 2023 年开始，其中 25% 未指定用途。

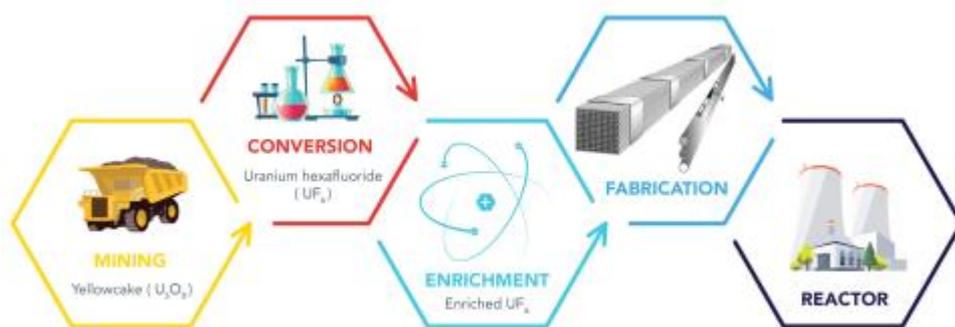


图 1 铀燃料制备流程示意图

2、振兴和加强核燃料循环前端和国内核工业

政府将适当减轻核工业不必要的许可和监管负担，以平衡美国商业核电的国内竞争环境和价值属性。具体措施包括：①结束 DOE 对过剩铀库存的市场转让，并重新评估《过剩铀库存管理计划》，2020 年 DOE 已经停止交易铀库存，2021 年预算也未要求进行铀库存交易；②创造公平的电力市场竞争环境，并鼓励联邦能源监管委员会 (FERC) 采取行动提高能源批发市场的竞争力，以确保核电在国内市场的公平竞争；③简化铀开采的监管改革和土地准入，以提高所有新建铀生产设施的竞争力；④美国商务部应扩大《俄罗斯暂停协议》(RSA)，该协议规定从俄罗斯铀进口量上限为美国市场的 20%，以防止未来发生铀倾销，该协议将于 2020 年到期，工作组建议商务部延长 RSA 期限并考虑未来进一步降低铀进口上限；⑤允许核监管委员会出于国家安全目的禁止进口俄罗斯和中国生产的核燃料，俄罗斯国有企业 TVEL

公司于 2008 年启动一个项目为美国国产反应堆开发替代燃料，尽管目前尚未被采用，但未来可能开发出替代燃料。如果出现这种情况，只要燃料进口对美国国家安全产生不利影响，应通过行政命令限制或禁止进口俄罗斯或中国制造的核燃料。

3、在核能技术和标准方面领先世界

美国的核技术已丧失了全球领导地位，在下一代技术示范方面也落后于中国和俄罗斯，应采取措施重建美国下一代核技术的领导地位，具体措施包括：①资助耐事故核燃料、高纯度低浓铀(HALEU)研发，完成 HALEU 浓缩示范项目，支持 HALEU 基础设施的研发以确保 HALEU 设施和设备尽快获得许可，启动新项目资助用于铀矿开采和原地采铀的先进水处理技术；②继续支持国家反应堆创新中心（NRIC）和多用途试验堆（VTR）建设，DOE 已指定爱达荷国家实验室为 NRIC 牵头单位，并确定了 VTR 的任务需求，DOE 的 2021 财年预算提议投入 2.95 亿美元用于支持设施设计和建设；③资助美国先进核反应堆技术的研发，并支持与私营部门合作示范先进核反应堆；④下一代核反应堆可能是直接向军事设施和其他国家安全基础设施提供灵活可靠的离网电力的理想选择，建议进行小型模块化反应堆（SMRs）和微型反应堆发电示范，以为美国各部门和机构（尤其是国防部）供电。

4、增强美国出口竞争力

美国核工业在全球市场的竞争力对其健康发展以及可带来的经济利益至关重要，同时也是美国实现防核扩散目标和国家安全的基础，应采取措施增强美国的出口竞争力，具体措施包括：①指定一个高级管理职位，负责与私营部门和所有相关联邦机构合作，领导核出口的协调和实施工作；②建立类似国防工业基地的核工业基地，建议设立一个核工业基地咨询委员会，负责就与该战略中涉及的国家安全相关公私投资的融合与核供应商面临的挑战提出建议；③资助国内商用替代核燃料研发（包括耐事故燃料），并参与国际市场竞争，将根据“耐事故燃料计划”的研发成果推出“外国燃料替代计划”，以为国际市场提供世界领先的耐事故燃料；④提高出口流程效率，并根据修订的《美国原子能法》第 123 条⁸，为美国民用核技术、设备和燃料出口开辟新市场；⑤将民用核能纳入商务部每年的“选择美国”投资峰会，以展现政府振兴民用核工业的承诺；⑥扩大民用核能国际合作计划，包括监管技术交流和协助其他国家制定核监管框架，以利用现有的核监管委员会许可证加快外国对美国核技术的许可；⑦确保美国金融机构支持民用核工业与外国融资竞争；⑧促进美国供应商重新进入研究堆供应市场，通过向国外销售研究堆和促使其与美国教育计划建立伙伴关系，在新兴核国家培养劳动力和专业技术人员，并探索核项目的创新概念。

（岳芳）

⁸ 经修订的《美国原子能法》第 123 条规定了美国与外国进行核能重大合作的框架，代表了美国对与外国涉及材料或设备出口的重大民用核能合作的法定要求。

ARPA-E 资助 2700 万美元支持先进反应堆运营技术开发

5月13日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布在“核能发电智能管理（GEMINA）”主题框架下资助 2700 万美元支持 9 个新项目的研发⁹，致力利用人工智能、数字孪生、先进预测和控制、以及基于模型的故障检测技术，将下一代核电站的运行和维护成本降低 10 倍，提升核电站的运行效率、经济性和灵活性。

表 1 GEMINA 主题计划资助项目研究内容

承担机构	研究内容	资助金额/ 万美元
通用电气研究所	<ul style="list-style-type: none"> •基于通用电气-日立核能公司的 BWRX-300 沸水反应堆，设计由基于时间转向基于条件的核电站运行预测维护框架，从而降低运营和维护成本 •开发具有控制核电站运行和决策的数字孪生系统，以实现核电站系统的持续监测、早期预警、诊断和预测 •开发人工智能系统，在算法无法识别发生事件的情况下，通过机器学习模型让核电站在默认安全作业模式继续运行 	541.3
电力科学研究院	改变核电站组件设计思路，探索从传统的维护和维修方法转变为更换和翻新的方法，以更加经济方式实现对核电站组件的运维	99.9
X-能源有限责任公司	<ul style="list-style-type: none"> •通过人因工程学、概率风险评估、危害分析、安全和维护评估等技术手段，将先进核反应堆的固定运营成本降低到 2 美元/兆瓦时 •利用先进技术，包括自动化、机器人、远程监控和维护，结合多学科的 3D 模型，以优化核电站管理人员配置计划，同时确保核电站最佳运行 	600
阿贡国家实验室	<ul style="list-style-type: none"> •通过先进的传感器和自动化，降低 Kairos 氟盐冷却高温堆的运行和维护成本 •利用先进的分布式传感和数据生成技术、基于机器学习的信号处理算法，减少先进反应堆工作人员的人数以及维修和更换费用，从而实现降低运行和维护成本的目标 	220
法玛通公司	开发新的数字孪生技术，模拟具有内部热液压故障的无源冷却系统，以及具有不同工作模式和控制状态的典型冷却电路，并与蒸汽循环高温气冷堆系统配对，用于探测故障	80.9
麻省理工学院	组装、验证 BW RX-300 系统的高保真数字孪生技术，推进并演示预测维护方法和基于模型的故障系统检测技术	118.7
美国莫尔特能源有限责任公司	开发一种多物理工厂数字孪生环境，通过对核电站运行状态模拟，优化运维，将核电站运维成本从目前的 11 美元/兆瓦时降至 1.75 美元/兆瓦时	350
密歇根大学	开发基于物理、以模型为中心和可扩展的核电站运行态势感	519.5

⁹ DOE ANNOUNCES \$27 MILLION FOR ADVANCED NUCLEAR REACTOR SYSTEMS OPERATIONAL TECHNOLOGY
<https://arpa-e.energy.gov/?q=news-item/doe-announces-27-million-advanced-nuclear-reactor-systems-operational-technology>

知系统,应用于密歇根大学熔盐回路进行态势感知系统性能验证,最终应用于 Kairos 氟盐冷却高温堆

麻省理工学院 基于熔盐反应堆的辐照数据开发数字孪生技术,以模拟研究和确定放射性物质产生和运输机理,优化反应堆的设计,减少辐照损伤,降低运维成本

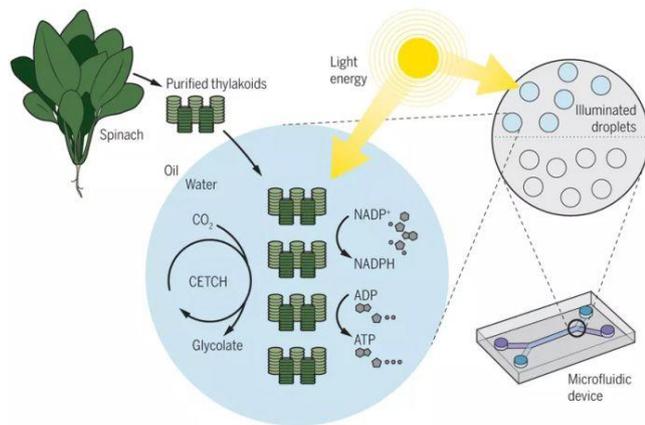
90

(李岚春 郭楷模)

新型自然-人工杂合的人造叶绿体展现出工业化应用潜力

人工光合系统可以模仿植物光合作用,实现对太阳能的转化、存储和利用,克服太阳能的低能量密度和波动性问题,被视为是应对全球能源挑战的重要途径。由德国马克斯·普朗克学会陆地微生物研究所 Tobias J. Erb 教授课题组牵头的国际联合研究团队利用微流控技术,将菠菜

的类囊体膜和具有固定二氧化碳功能的酶结合置于细胞尺寸的油包水液滴中,制备出了人造“叶绿体”,实现了光驱动下 CO_2 的高效固定,且该细胞尺寸的制备工艺容易实现比例规模放大,具备了大规模工业化应用潜力,让人工光合系统向商业化应用迈进一步。植物



叶绿体是发生光合作用的场所,主要包括光反应和暗反应两个步骤,前者负责将光能转化为三磷酸腺苷(ATP)和还原态的烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)两种高能分子,后者负责利用产生的能量将 CO_2 催化转化为有机物实现 CO_2 固定。为此,研究人员从菠菜叶绿体中分离了类囊体膜(负责光反应部分),并将其与具备 CO_2 催化转化功能的酶一起包裹置于细胞尺寸大小的油包水液滴中,制备出一个由半人工半自然部件组成的人造“叶绿体”。随后将其置于光照和暗场下研究其光合作用特性,通过对产物的追踪发现,在光照下,该人造“叶绿体”成功将 CO_2 转化为乙醇酸,同时还将二磷酸腺苷(ADP)磷酸化为 ATP,从而成功地重建了重要光合作用的代谢途径,表明了该人造“叶绿体”的确具备了 CO_2 的固定功能。更为关键的是,研究人员进一步利用微流控技术以自动化的方式创建了成千上万的类似尺寸的油包水液滴作为单个“细胞”工作室,即成功按比例放大的液滴生产方法,表现出良好的工业化应用潜力。相关研究成果 5 月 8 日发表在《Science》¹⁰。

(汤匀 郭楷模)

¹⁰ Tarryn E. Miller¹, Thomas Beneyton, Thomas Schwander, et al. Light-powered CO_2 fixation in a chloroplast mimic with natural and synthetic parts. *Science*, 2020, 368, 649–654.

低碳化多能融合

欧盟发布综合能源系统灵活发电技术白皮书

欧洲能源转型智能网络技术与创新平台（ETIP SNET）日前发布了《脱碳欧洲灵活发电白皮书》¹¹，基于当前技术发展水平描绘了欧盟灵活发电技术的发展路线，推进实现欧洲综合能源系统 2050 年愿景。白皮书分析了欧洲电力系统使用低碳/无碳替代燃料的挑战以及灵活性技术要求，描述了系统转型过程中增强发电灵活性需要开发的相关技术，包括：生物质发电和天然气发电；燃料灵活性、负荷灵活性与储能技术；氢能、跨部门融合、电力转换为其他能源载体（Power-to-X）。具体内容如下：

一、低碳/无碳替代燃料发电的关键技术现状

1、蒸汽发电厂和燃气轮机。燃气轮机联合循环发电（CCPP）的最高效率已接近 65%，热电联产（CHP）的燃料利用率已达到 85%。新型燃烧器技术使燃气轮机具有燃料灵活性，能够有效燃烧天然气/氢气混合燃料（包括纯氢气）、天然气/生物基合成气混合燃料、富含氢气的燃料气（如合成气、炼油气和焦炉煤气）、液化天然气/液化石油气、非常规天然气、基于合成气的液体燃料甚至无碳燃料（如氨）。以超临界 CO₂ 为工作流体的高效循环技术正处于开发阶段。未来发电厂可采用燃料电池作为主发电装置，并在 CCPP 后燃烧剩余可燃物，形成“三重燃烧”技术，这一技术可能还需十年才能大规模示范。

2、燃料电池。燃料电池具有高效、低污染和低噪声等优点，固体氧化物燃料电池（SOFC）通过集成重整还具有很高的燃料灵活性。一些燃料电池系统正处于商业化阶段，单堆功率输出达 1 兆瓦，有望在兆瓦级范围内替代固定式热电联产中的内燃机。

3、内燃机。天然气热电联产系统已经安装了数千台燃气内燃机，实现了 90% 以上的燃料利用率，其中许多发动机使用的是原沼气。10 兆瓦级最新一代燃气内燃机已实现商业化，发电厂将其作为发电单元总输出功率可高达 200 兆瓦。德国 Kustenkraftwerk Kiel 项目安装了 20 台 9.5 兆瓦燃气内燃机，总输出功率为 190 兆瓦，燃料利用率达 91%；还正在开发使用 100% 氢气的兆瓦级燃气内燃机，将在几年内投入使用。200 千瓦级卡车用发动机原型机已经成功安装使用，可以使用纯氢气为燃料，此类小型发动机的效率可达到 40% 以上。使用氢燃料的燃气内燃机将有望用于中型规模分布式热电联产，天然气发动机还可作为其他可再生燃料（如生物甲烷、

¹¹ FLEXIBLE POWER GENERATION IN A DECARBONISED EUROPE. https://www.etip-snet.eu/wp-content/uploads/2020/03/WG3_WhitePaper_Flexible-Power-Generation-in-a-Decarbonised-Europe.pdf

碳中性甲醇甚至无碳氨)的解决方案。

4、氨和合成碳基燃料。氨可通过在燃烧前催化分解成氮气和氢气用于燃烧设备，且其燃烧无需对燃料提纯。甲烷、甲醇、二甲醚等合成燃料以及其他甲烷或甲醇衍生品也可直接使用，无需对现有的热力和电力应用基础设施做出重大改动。对于甲醇，还可通过商用工艺（如甲醇制汽油）生产往复式发动机的燃油。通过优化合成替代燃料可以降低碳排放和提高发动机效率。

二、电力系统灵活性技术要求

电力系统灵活性根据具体技术和应用有着不同组合，灵活性相关技术要求包括：**①运行灵活性**，需解决火力发电和水力发电循环导致的材料应力和设备磨损，以及当电厂以灵活模式运行时，通过创新进一步提高部分负荷下的效率；**②燃料灵活性**，氢气燃烧需解决火焰温度过高和火焰回火问题以确保安全运行，还需改进烟气净化系统以及安全相关系统的材料和密封，以及需开发适合各种燃料的设备，可在不更改硬件的情况下任意混合燃料；**③减排技术**，灵活运行通常会增加燃烧系统的排放，需通过进一步的系统优化和开发新方法以降低排放；**④燃料和电力输出产品灵活性**，需通过在热电联产系统中使用电加热器或配备热泵以有效利用多余可再生能源电力；**⑤集成储能的发电灵活性**，需将波动性可再生能源发电与电池或氢气生产、储存和再转换相结合，以及在技术和环境可行的情况下增加水坝和水库，并与电池相结合以增强短期储能和灵活性；**⑥新技术改进**，包括扩大燃料电池和电解槽生产规模，改进氧化还原液流电池、液态空气储能、压缩空气储能等进入示范阶段的储能技术，解决海洋能开发和测试中的环境影响。

三、燃料转换及灵活性技术发展路线

欧洲国家的能源转型正快速发展，且大多以太阳能发电为基础。由于国家政策和经济能力的原因，各国转型路径并不统一。大多数欧盟成员国认为有必要放弃煤炭，但对核能和生物能等替代技术的发展思路有所不同，影响到可再生能源发电的部署。

1、短期开发：转向生物质和天然气发电

(1) 生物质发电。欧盟北部国家 20 年前开始增加使用生物质发电，包括将燃煤电厂改造为使用生物质以及新建生物质电厂。到目前为止，全球几家针对使用木屑颗粒或废木屑发电进行调试或改造的吉瓦级电厂主要集中在欧洲。如果废弃生物质的水热处理或气化新技术得到推广，将增加进一步利用生物质的潜力。由于建立新的生物质价值链需要较大投资和较长时间，中期内仍应以电厂改造和新建生物质电厂为主。

(2) 天然气发电。德国等拥有庞大工业部门的国家需要选择天然气作为过渡方案，对现有发电厂的燃气（联合）燃烧改造和新建天然气发电项目正在进行，短期

内应重点进行如下开发：①用于城市供热的较小型热电联产装置新结构开发，以及改造燃煤锅炉同时安装顶循环燃气轮机；②用于中小型城市的紧凑型燃气轮机联合发电或燃气内燃机发电厂；③高热量需求行业的蒸汽发生器；④高效燃气联合循环发电厂，具备在电力市场与补贴后备发电厂（开式循环燃气轮机）竞争的能力；⑤东欧地区将最早通过建设新的天然气管道和液化天然气终端，实现从煤炭向天然气的过渡。

2、燃料灵活性、负荷灵活性和储能

随着供电、供热系统越来越复杂，为了确保燃料和负荷灵活性，应重点开发和部署如下技术：①在区域供热电厂配备吉瓦规模的储热装置；②探索在蒸汽发电厂配备顶循环燃气轮机，以及 CCPP 在无燃气轮机运行、仅产生蒸汽模式下运行余热回收蒸汽发生器的可行性，以实现快速响应正负负荷需求；③开发锅炉中燃烧煤、生物质和天然气混合物技术，从而最大程度实现燃料灵活性并保证供应安全。

3、氢作为能源载体、跨部门融合以及 Power-to-X

该领域将重点开发和部署如下技术：①进一步开发生物质与氢气的混合燃烧；将顶循环氢气燃气轮机集成到现有蒸汽循环中；③集成电解槽、储氢、加氢站和小型燃气轮机的示范发电厂，以实现高峰期供电，争取在未来几年实现经济运行；④在区域供热的热电联产电厂集成蒸汽/热水发电机，以及安装大型热泵；⑤压缩空气储能与氢气的结合使用；⑥部署使用“绿色”氢气的 CCPP 和 CHP 电厂。

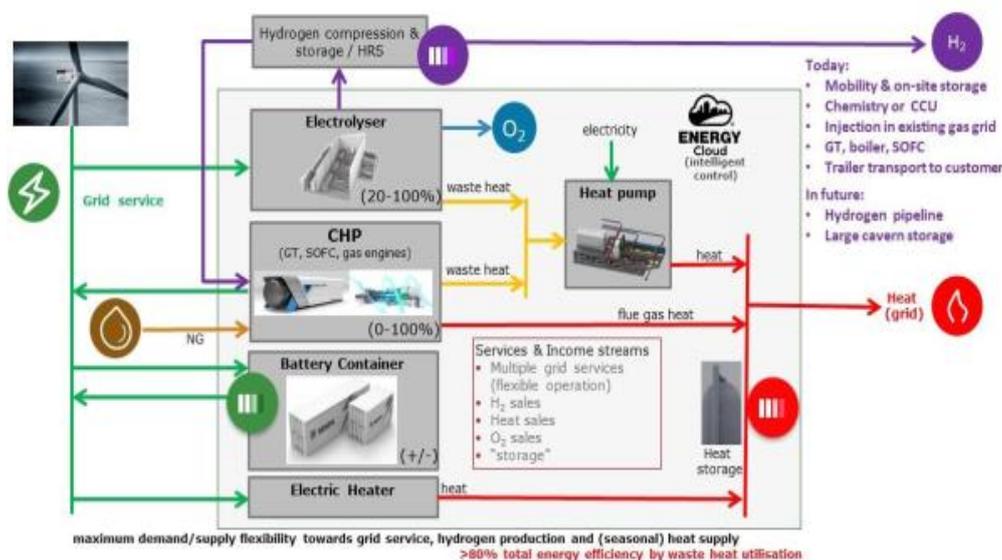


图 1 集成制氢设施、储能设施、CHP 等不同技术的灵活发电系统

(岳芳)

新型催化剂通过水界面促进作用实现甲烷高选择性制甲醇

将甲烷(CH_4)转化为甲醇(CH_3OH)等液体燃料可以大幅降低运输成本,而且 CH_3OH 作为基本化工原料还可用于农药、医药以及精细化学品制备。然而, CH_4 的化学性质相对稳定(具有很强的C-H键),工业生产中主要采用高能耗高成本的间接氧化法。而利用仿生策略可以实现 CH_4 到 CH_3OH 直接转化,但目前选择性较差,因此开发新型催化剂、优化反应条件实现温和条件下 CH_4 到 CH_3OH 高选择性的直接转化是该领域的研究热点。

由美国布鲁克海文国家实验室 Sanjaya D. Senanayake 教授牵头的国际联合团队研究设计开发出了一种新型的氧化铈/氧化铜($\text{CeO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$)复合催化剂,并在水的促进作用下,实现了 CH_4 高选择性氧化制 CH_3OH 。相关研究表明, Cu_2O 或者 CeO_2 催化剂能够在高温、含氧条件下将 CH_4 转化为 CH_3OH ,但总体选择性较低。研究人员利用密度泛函理论(DFT)计算和动力学蒙特卡罗(KMC)模拟相结合,发现当合成 $\text{CeO}_2/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}(111)$ 催化剂时,且在氧气氛下将 CH_4 、 H_2O 暴露在上述催化剂上时,能够实现 CH_4 到 CH_3OH 的高效转化,且选择性会大幅提升,主要原因是 H_2O 的加入阻断了金属=O介导的机制,阻止了 CH_4 完全解离形成CO或 CO_2 ,开辟了一条之前未被探索的*OH介导的途径,从而使活化 CH_4 能够在 $\text{CeO}_2/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}(111)$ 界面上直接生成 CH_3OH 。随后研究人员在Cu的(111)晶面衬底上依次沉积了 Cu_2O 和 Ce_2O_3 ,制备了 $\text{CeO}_2/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}(111)$ 催化剂薄膜。将其置于 CH_4 气氛中,发现与普通的 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}(111)$ 催化剂相比, $\text{CeO}_2/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}(111)$ 表面对 CH_4 表现出明显的反应活性,但选择性依旧不高。环境压力X射线光电子能谱表征显示,尽管 $\text{CeO}_2/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}(111)$ 可以促进 CH_4 形成* CH_3O 中间体(CH_3OH 的中间体),但它可能会在表面一些活性位点上迅速分解生成CO和 CO_2 ,从而影响转化效率和选择性。而当在上述反应过程中加入 H_2O 后,整个反应转化率(提高93.7%)和选择性(提高4%)显著提升,主要原因是 H_2O 的存在阻止了甲醇中间体* CH_3O 的分解,从而阻止了 CO_2 的形成。而且 H_2O 除了阻止 O_2 吸附和活化 CH_4 外,还可以从* CH_3O 中提取 CH_3OH ,促进了转化。环境压力X射线光电子能谱结合理论模拟对上述反应过程进行研究发现,促进转化和选择性提升的关键在于引入了反应物质 H_2O ,主要发挥三个关键作用:一是充当位阻剂: H_2O 分子优先占据了 $\text{CeO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ 界面上的活性Ce位点,阻碍了 O_2 的活化,从而阻碍了 CH_4 向CO或 CO_2 的转化。二是充当活性中心:界面Ce位点的易解离 H_2O 产生了活性甲氧基中间体*OH,可促进 CH_4 到 CH_3OH 的直接转化。 H_2O 作为实际的O供体参与了反应。三是作为萃取剂:防止* CH_3O 脱氢形成 CO_2 ,同时促进氢化并因此促进 CH_3OH 的形成并将其置换到气相。

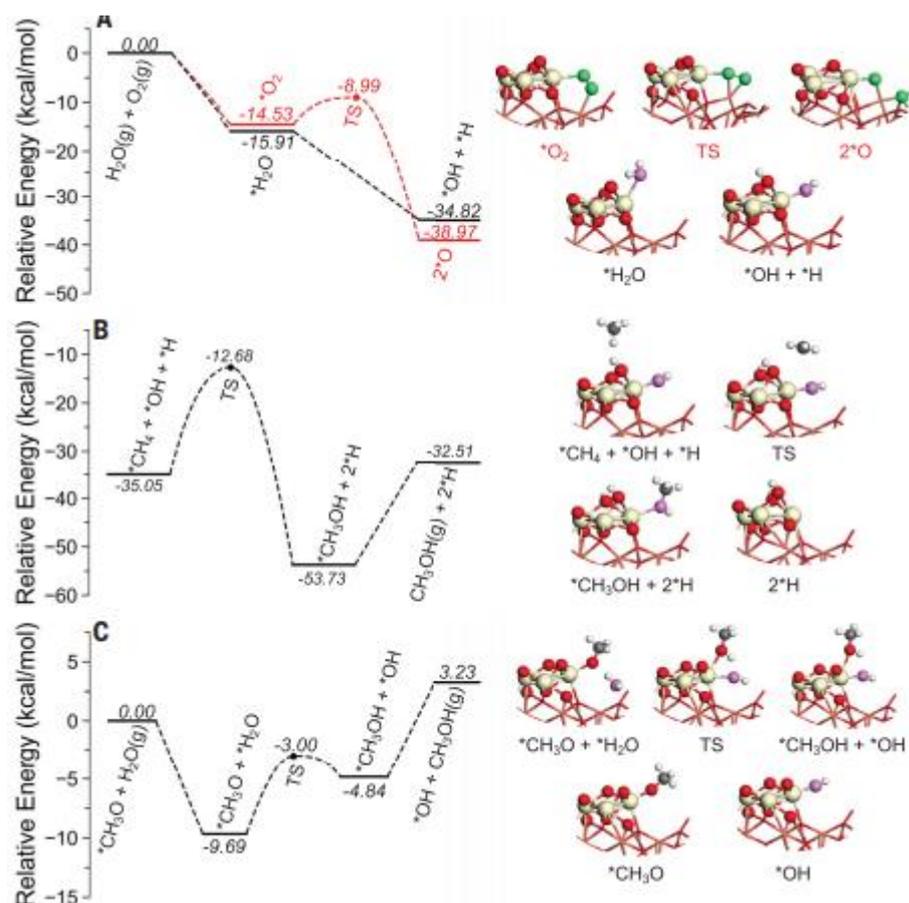


图 1 密度泛函理论计算出的 CH₄ 转化为 CH₃OH 过程中能带变化

该项研究通过实验和理论模拟研究揭示了当 CH₄、O₂ 暴露在催化剂 CeO₂/Cu₂O/Cu (111) 上时，通过引入 H₂O 分子显著提升了 CH₄ 到 CH₃OH 的转化和选择性，H₂O 的加入阻断了金属=O 介导的机制，阻止了 CH₄ 的完全解离形成 CO 或 CO₂，开辟了一条之前未被探索的 *OH 介导的途径，为 CH₄ 到 CH₃OH 高效转化提供了新路径。相关研究成果发表在《Science》¹²。

(汤匀 郭楷模)

光伏-气体扩散电极装置实现太阳能驱动高效催化还原 CO₂

利用太阳能驱动电催化 CO₂ 还原成燃料或高价值化学品技术得到了全球广泛关注。然而由于 CO₂ 在水性电解质中的溶解度有限，并且在溶液中的离子迁移速度较慢，使用水性电解质的电化学池将 CO₂ 转化为 CO 可能会出现较高的催化剂过电位。相反，气体扩散电极 (GDE) 则不受上述问题限制，具备更加良好的性能，成为了该领域的研究热点之一。

¹² Zongyuan Liu, Erwei Huang, Ivan Orozco, et al. Water-promoted interfacial pathways in methane oxidation to methanol on a CeO₂-Cu₂O catalyst. Science, 2020, DOI: 10.1126/science.aba5005

加州理工学院 Harry A. Atwater 研究团队设计开发出了一种由太阳能电池 (PV) 和气体扩散电极 (GDE) 组成的太阳能驱动 CO₂ 还原制 CO 装置 (PV-GDE), 得益于 GDE 反向组装结构使得催化剂层直接面向 CO₂ 气源, 最大程度地减少 CO₂ 损失, 同

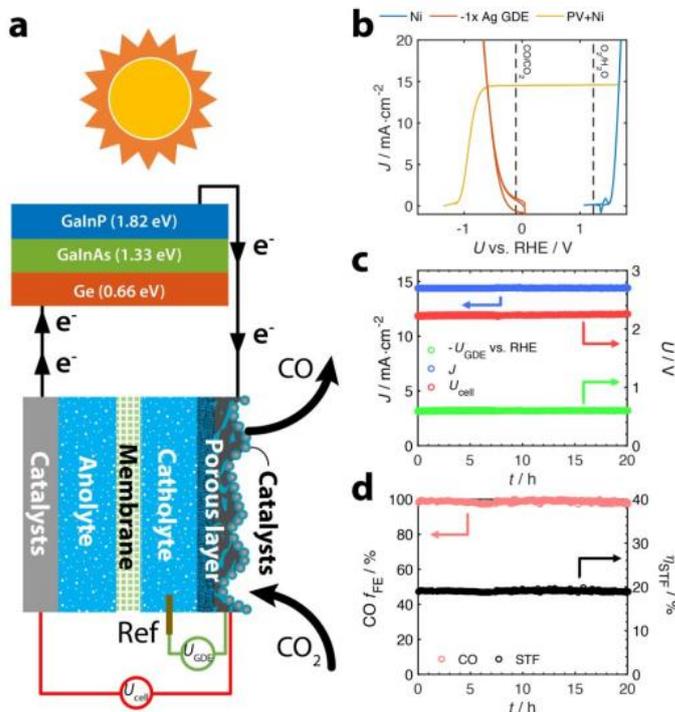


图 1 PV-GDE 装置结构示意图和电化学性能表征 模拟太阳光条件下, 该装置“太阳能至 CO”的转换效率高达 19.1%, 且在 3.25 个模拟太阳光辐照强度下可稳定运行超过 150 h, 无论在模拟太阳光还是室外自然太阳光辐照下, 该装置性能都优于目前报道的最先进太阳能电池耦合电解装置。通常情况下, 相关研究都是将催化剂沉积在 GDE 电极上, 但这不利于反应气体和催化剂的相互作用, 抑制了反应发生。为此研究人员反向组装 GDE 电极, 即直接将 50 nm 的银纳米颗粒 (Ag-NPs) 沉积到 GDE 基板的微孔侧面, 使得电极的 Ag-NPs 催化剂层背向电解质并面向 CO₂ 气体通道, 一方面增强了气体与催化剂之间的相互作用以提高 CO₂ 利用率; 另一方面使 Ag-NPs 催化剂层保持在湿润但不饱和的状态, 以最大程度地减少电解质中 CO₂ 的损失并延长使用寿命。为了对比, 研究人员同时制备了正向结构的 GDE 催化电极, 接着在三电极体系中进行对比测试。结果显示, 在 1 mol 的氢氧化钾 (KOH) 中, 两种结构的 GDE 具有类似的初始反应电流密度和法拉第效率, 但随着时间推移, 正向组装的 GDE 法拉第效率在 1 h 后降到 75% 左右, 2 h 后降至 50%; 而反向结构 GDE 电极在 3 h 后法拉第效率仍然高达 97%。主要原因就是正向结构电极中的 Ag-NPs 催化剂层面向电解质, 故在运行的 1 h 内就被饱和, 导致了法拉第效率的降低, 而反向结构则不存在上述问题。随后研究人员制备了 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳能电池, 并将其与上述制备的反向结构电极组装成完整的 PV-GDE 装置进行电化学性能测试。实验发现, 在一个模拟太阳光辐照下, 1 mol KOH 电解质环境中, 装置可以连续稳定运行 20 h 而不出现性能下降, 且 CO 的平均法拉第效率约为 99%, 20 h 的“太阳能至 CO”的平均转换效率约为 19.1%, 单位面积平均产率为 7.4 mg/h¹·cm², 比目前报到的最先进 PV 电解槽装置的 CO 生产率高约 50 倍 (0.145 mg·h¹·cm²), 且稳定性大大提高。当将辐照强度上升到 3.25 个模拟太阳光时候, 该装置依旧可以稳定运行超过 150 h, 平均法拉第效率约为 96%, 平均“太

“太阳能至 CO” 能量转换效率约为 18.9%。最后研究人员测试了真实室外辐照环境下装置性能，发现以 2.2 V 的电池电压和 -0.57 V 可逆氢电极电位运行时，全天平均“太阳能至 CO” 转换效率为 5.8%，CO 的日均产率约为 $15 \text{ mg} \cdot \text{day}^{-1}$ 。

该项研究精心设计制备了一种反向组装的气体扩散电极，随后将其与太阳电池组成的太阳能驱动 CO₂ 还原制 CO 装置，实现了对 CO₂ 最大程度利用以及催化电极稳定性提升，进而显著提升了催化还原 CO₂ 效率和稳定性。相关研究成果发表在《*ACS Energy Letter*》¹³。

(程向阳 郭楷模)

¹³ Wen-Hui Cheng, Matthias H. Richter, Ian Sullivan, et al. CO₂ Reduction to CO with 19% Efficiency in a Solar-Driven Gas Diffusion Electrode Flow Cell under Outdoor Solar Illumination. *ACS Energy Letter*; 2020, 5, 470-476.

能源战略研究

IEA：2019 年成员国能源技术研发示范公共经费达 209 亿美元

4 月 15 日，国际能源署（IEA）发布了《IEA 成员国能源技术研发示范公共经费投入简析 2020》报告¹⁴，对 30 个成员国¹⁵能源技术研究、开发和示范（RD&D）的公共经费投入变化及结构调整态势进行了系统分析，主要内容如下：

1、IEA 成员国能源技术 RD&D 公共经费投入连续第三年增长

2019 年，IEA 成员国能源技术 RD&D 公共经费投入总额达到 209 亿美元（不包括欧盟 2019 年在“地平线 2020”框架计划下能源领域投入的 23 亿美元），较 2018 年上涨了 4%，是 2017 年以来连续第三年增长，尽管低于 2009 年历史峰值，但与 2012 年水平相当，比 2008 年高出了三分之一（图 1）。

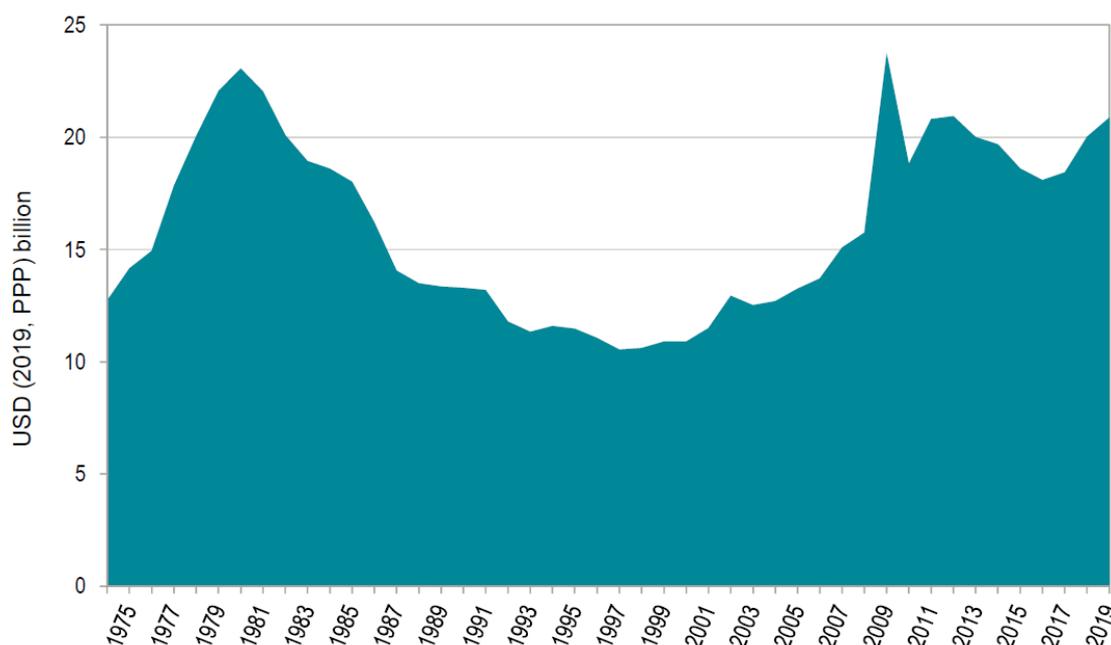


图 1 1974-2019 年 IEA 成员国能源技术 RD&D 公共经费变化情况（单位：十亿美元）

2、能源技术 RD&D 投入领域日益多样化

在过去 40 年里，IEA 成员国能源技术 RD&D 投入领域变得日益多样化（图 2）。1974 年，核能在能源技术投入总额中占比最高，达到 75%，此后逐年下降，在 2019 年已降至 21%，与能源效率（21%）、可再生能源技术（15%）和交叉技术（23%）的 RD&D 投入相当。能源效率和可再生能源技术 RD&D 投入在 20 世纪 90 年代和

¹⁴ Energy Technology RD&D Budgets 2020. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-2020>

¹⁵ IEA 成员国合计 30 个，包括：澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、捷克、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、日本、韩国、卢森堡、墨西哥、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、斯洛伐克、西班牙、瑞典、瑞士、荷兰、土耳其、英国和美国。

21 世纪头十年两个时间段出现了显著增长，从 1990 年的 7% 分别增加到 2010 年的 21% 和 23%。自此以后，能源效率份额保持稳定，几乎没有变化，而可再生能源的份额则下降到了 15%。此外，交叉技术（23%）的 RD&D 投入在 21 世纪头十年持续增长，从 2010 年的 3% 增加到了 2019 年的 23%，超过了可再生能源。另一方面，化石燃料投入占比在 20 世纪 80 年代到 90 年代之间达到顶峰，但在 2013 年之后逐步下滑至当前的 9%。

2019 年，除化石燃料下降 4% 外，所有技术 RD&D 投入均有所增加，其中氢能和燃料电池技术领域增幅最大（为 18%），是有史以来的第二高值（2018 年增幅 25%）；紧随其后的是可再生能源技术，2019 年显著增长 14%，超过了核能，主要归功于挪威增加了可再生能源投入。

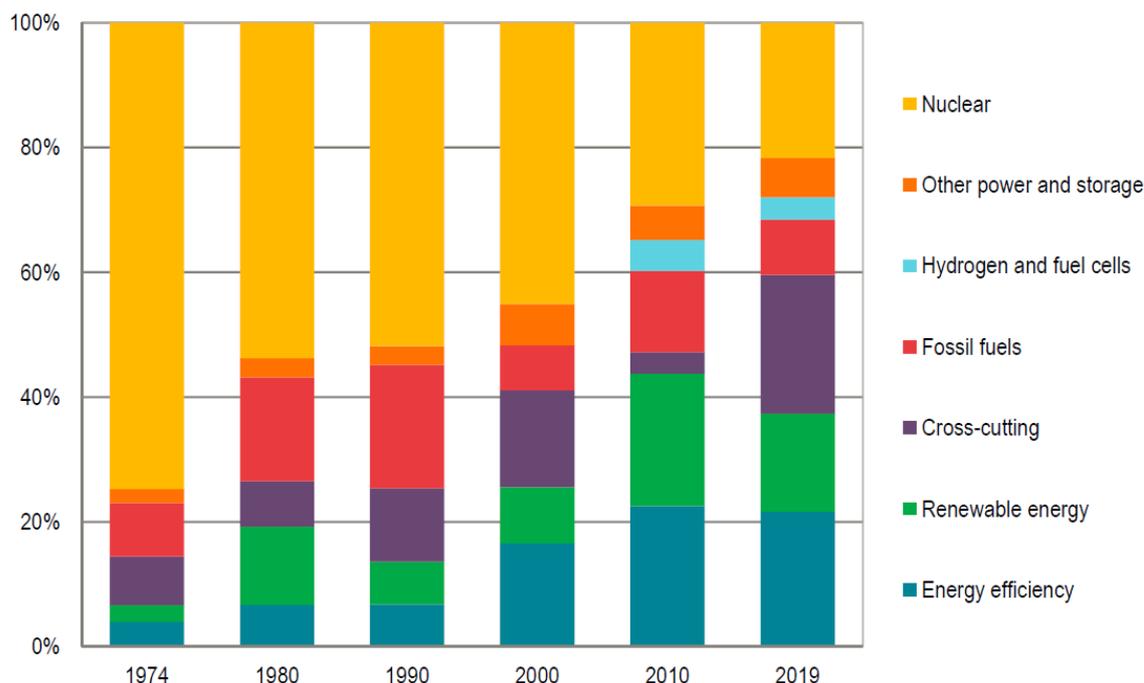


图 2 1974-2019 年 IEA 成员国不同能源技术 RD&D 公共经费投入占比变化情况

3、美日能源技术 RD&D 公共投入处于领先地位

美国和日本能源技术 RD&D 公共投入仍是 IEA 所有成员国中最多的两个国家，两个国家合计超过 100 亿美元（以 2019 年购买力平价计算），占到成员国总投入的一半（47%，图 3）。紧随其后的是德国、法国、英国、加拿大、韩国、意大利和挪威。2019 年，除了日本外（投入下滑 2%），其他成员国 RD&D 公共投入都显著增加。得益于“地平线 2020”研发创新框架计划，2019 年欧盟能源技术 RD&D 公共投入总额位列全球第三，仅次于美国和日本。

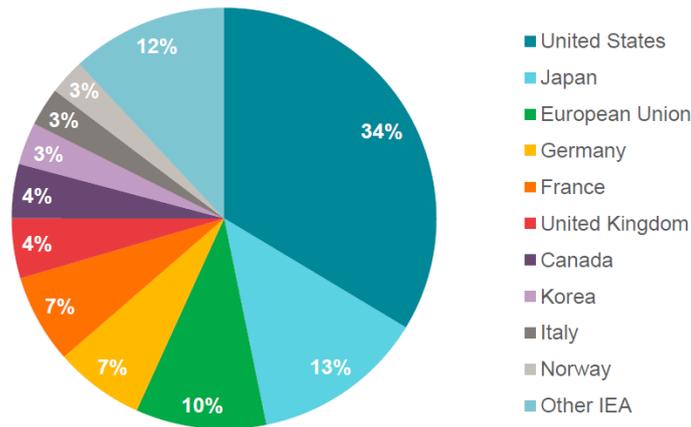


图 3 2019 年 IEA 各成员国能源技术 RD&D 公共经费投入占比情况

美国 2019 年核能技术 RD&D 公共投入达到 13.14 亿美元（以 2019 年购买力平价计算），超过日本，成为成员国中核能技术研发投入最多的国家。日本则是成员国中氢能和燃料电池研发领域投入最多的国家，2019 年该领域投入达到 2.97 亿美元。欧盟是电力和储能技术领域公共投入最多的经济体，达到 4.61 亿美元。在除上述之外的其他技术领域，美国都是投入最多的国家（图 4）。

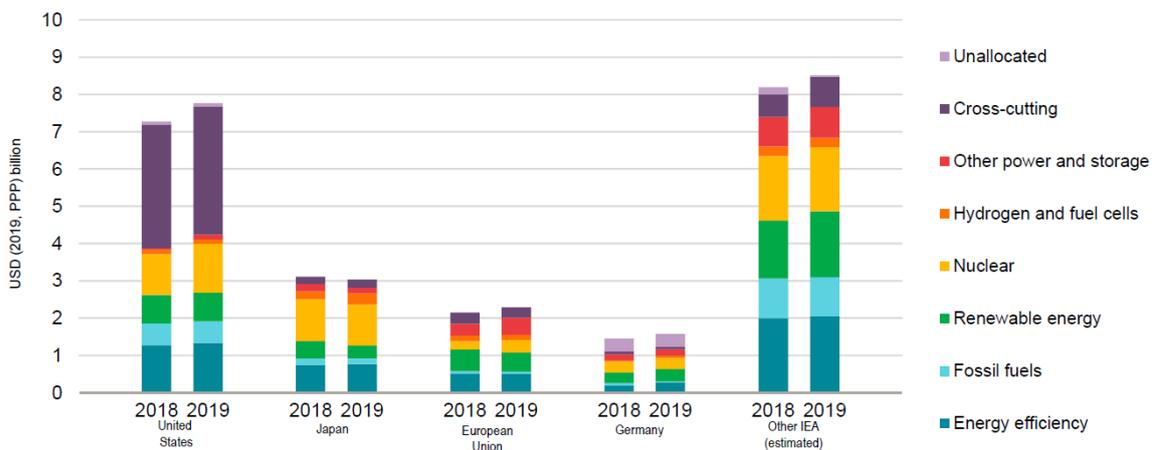


图 4 2018-2019 年 IEA 成员国不同能源技术 RD&D 公共经费投入情况（单位：十亿美元）

4、低碳能源技术成为能源技术 RD&D 公共投入主要领域

2019 年，IEA 成员国在低碳能源技术 RD&D 公共投入显著增加，总额达到了 197 亿美元，占能源技术 RD&D 公共投入总额的 94%，自 2017 年以来连续第三年增长；与此同时，非低碳能源技术 RD&D 公共投入与 2018 年基本持平，略高于 10 亿美元。与大趋势类似，大多数国家在 2019 年增加了低碳研发投入。其中增量最大是美国，低碳能源 RD&D 公共投入增加 4.79 亿美元，同比增长 7%。其次是挪威，增加了 2.42 亿美元。然而与大多数国家情况相反，日本的低碳能源技术投入减少了 2%。

（郭楷模）

IRENA：2019 年全球可再生能源累计装机突破 2500 GW

4月28日，国际可再生能源机构（IRENA）发布《可再生能源装机容量统计数据 2020》报告¹⁶指出，2019 年全球可再生能源发电装机容量增长了 176 GW，同比增长 7.4%，延续了过去十年来的强劲增长态势。截至 2019 年底，全球可再生能源累计装机容量突破 2500 GW，达到 2537 GW，其在全球发电装机总量中的占比超过三成（34.7%）。其中，水电¹⁷依旧是累计装机容量最多的可再生能源电力资源，达到 1190 GW，占比接近 50%；风能和太阳能占据其余主要份额，装机容量分别为 623 GW（占比 25%）和 586 GW（23%）；剩余 5% 份额的可再生能源主要包括：生物质能 124 GW、地热能 14 GW 和海洋能（潮汐、波浪能等）500 MW。

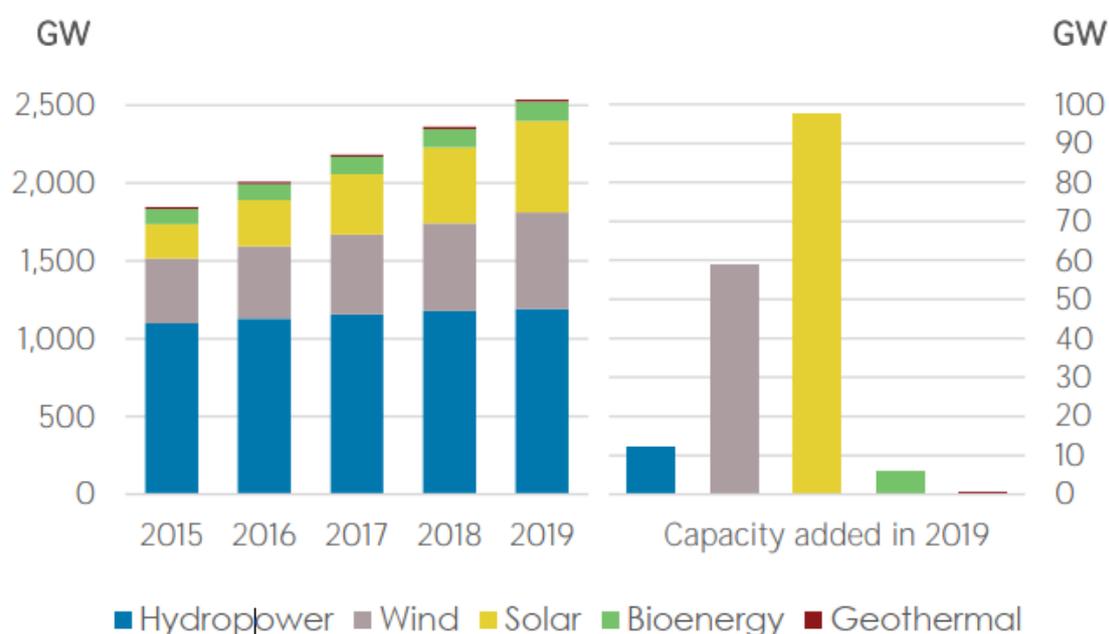


图 1 2015-2019 年全球可再生能源装机量变化态势（单位：GW）

¹⁶ Renewable Capacity Statistics 2020. <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>

¹⁷ 不包括抽水蓄能，如计入则数值为 1310 GW。

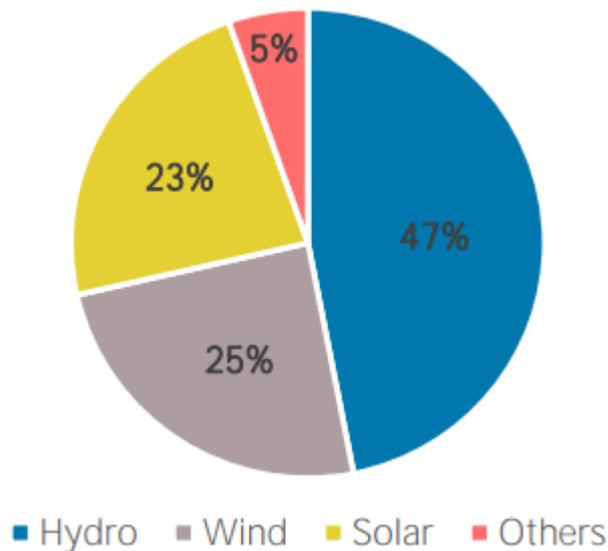


图 2 截至 2019 年底全球不同可再生能源装机量占比

2019 年，太阳能和风能继续引领可再生能源增长，两者新增装机容量之和占到全部新增装机容量的近 90%。其中，太阳能新增装机容量最多，为 98 GW（同比增长 20%），继续领跑新增装机容量排行榜。其次为风能，新增装机容量 59 GW，同比增长 10%。水电和生物质能装机容量分别增长 12 GW（+2%）和 6 GW（+5%）。但地热能增长依旧缓慢，同期新增装机容量不到 700 MW（682 MW）。

统计数据显示，2019 年尽管全球各地区增幅不同，但可再生能源电力装机容量在全球各地区都有所增长。亚洲地区可再生能源新增装机容量最多，为 95.5 GW，占全球新增总量一半以上（54%），增幅达 9.3%。欧洲紧随其后，新增装机 35.3 GW，同比增长 6.6%。北美和南美地区分别以 22.3 GW（+6%）和 8.4 GW（+4%）位列三、四位。同期，大洋洲、欧亚大陆、中东、中美洲及加勒比海地区的可再生能源也取得良好发展，分别新增装机容量 6.2 GW（+18.4%）、3.1 GW（+3%）、2.5 GW（+12.6%）和 0.6 GW（+4.1%）。总体而言，2019 年近四分之三（72%）的新增装机容量来自于可再生能源，这一强劲的增长趋势再次印证了可再生能源作为全球能源转型的关键驱动力。2019 年主要的可再生能源发电情况如下：

1、水电

2019 年由于众多项目未能如期完工，导致水电增长异常乏力，新增装机容量仅为 12 GW，远低于 2018 年的增幅（21 GW）。与往年一样，主要的增长来自中国和巴西，两国合计新增 8.7 GW，占有新增水电装机容量的近四分之三。

2、风电

2019 年全球风电新增装机超过 59 GW，使得全球累计风电装机达 623 GW。其中主要的增长动力来自中国（26 GW）和美国（9 GW），两国合计贡献了 60% 的风电新增装机。

3、生物质发电

2019年，生物质发电温和增长，新增装机6GW，主要由中国（+3.3GW）增长驱动。此外，土耳其（+411MW）、日本（+404MW）、意大利（+400MW）和德国（+324MW）也出现了一定的增长。

4、太阳能发电

2019年全球太阳能发电装机容量增加了98GW，同比增长20%。其中近60%的新增装机来自亚洲地区（56GW），强劲的增长让该地区继续领跑全球太阳能新增装机容量排行榜。该地区强劲的增长主要由五个国家引领：中国新增30GW、印度7.7GW、日本6.3GW、韩国3.3GW和越南5.5GW，五个国家新增装机之和占亚洲整体新增装机量的94%。

5、地热发电

2019年地热发电新增装机容量682MW，略高于2018年的增幅（549MW），主要的增长动力来自土耳其（+232MW）、印度尼西亚（+185MW）和肯尼亚（+160MW）。

（程向阳 郭楷模）

WIPO：绿色能源技术创新乏力 各国需加大支持力度

4月23日，世界知识产权组织（WIPO）发布绿色能源领域最新国际专利数据¹⁸，分析了绿色能源技术创新情况。WIPO重点针对替代能源生产（尤其是可再生能源）、节能技术、绿色交通、核电四类绿色技术进行了分析，指出2019年全球绿色能源技术的国际专利申请几乎没有增长，呼吁应掀起绿色能源技术创新浪潮以应对全球气候变化。关键要点如下：

1、绿色能源技术创新动力不足

绿色能源技术领域的国际专利申请量在2019年几乎没有增长，符合国际分类标准的绿色能源技术专利合作条约（PCT）申请量为16940件，较2018年仅增加1.3%（图1），低于2016年的峰值（17880件）。此外，绿色能源技术PCT申请量在2019年专利申请总量的占比刚刚超过6%。

¹⁸ World Intellectual Property Day 2020: Green Innovation Surge Needed to Address Climate Change, New WIPO Figures Show. https://www.wipo.int/pressroom/en/articles/2020/article_0007.html

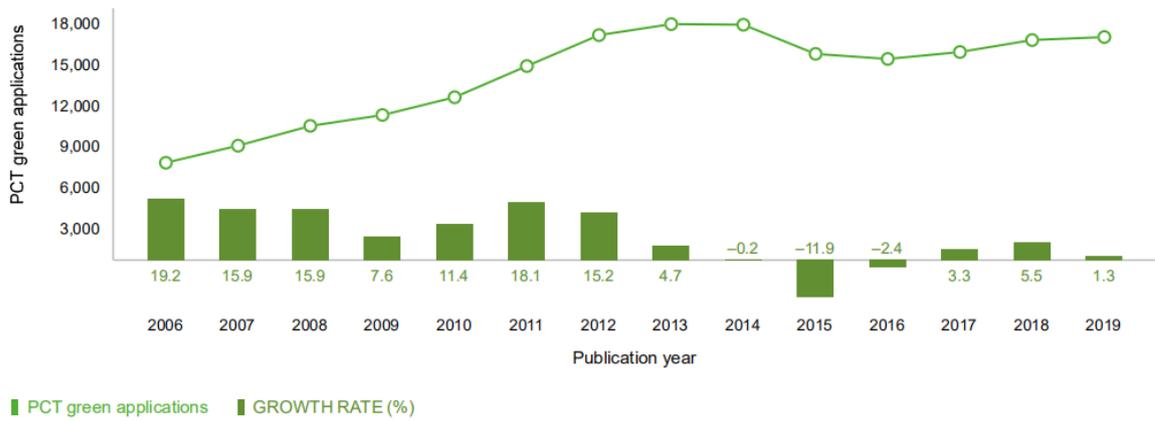


图 1 绿色能源技术 PCT 专利申请趋势

2、绿色创新正在全球范围内兴起，但仍集中于少数国家

数据显示，最早进行绿色能源技术国际专利申请的国家占 2019 年全球绿色能源技术专利申请总量的 76% 以上，申请量排名前五的国家分别为日本、中国、美国、德国和韩国（图 2）。在前十名国家中，除中国、韩国外，其他国家的申请量均出现下降（图 3）。在大多数绿色能源技术领域，中国 PCT 专利申请量增速惊人。值得注意的是，近年来中国已成为绿色交通技术专利申请的全球引领者。

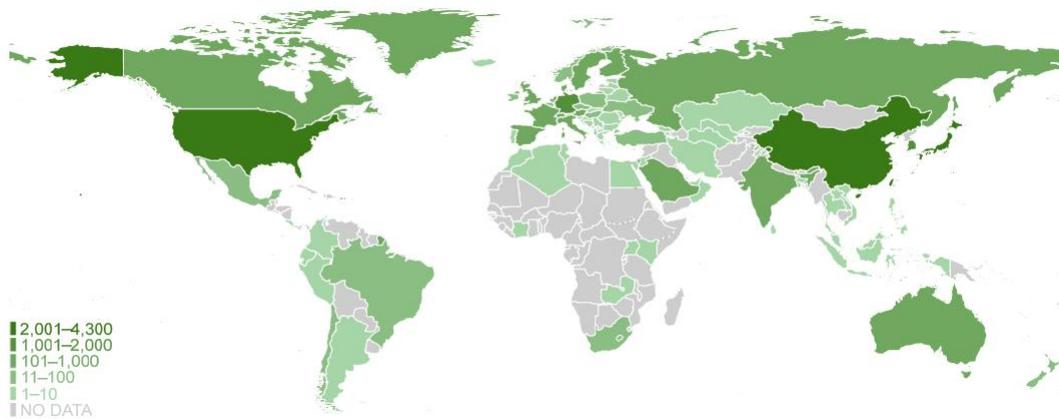


图 2 2019 年绿色技术 PCT 专利申请国别分布

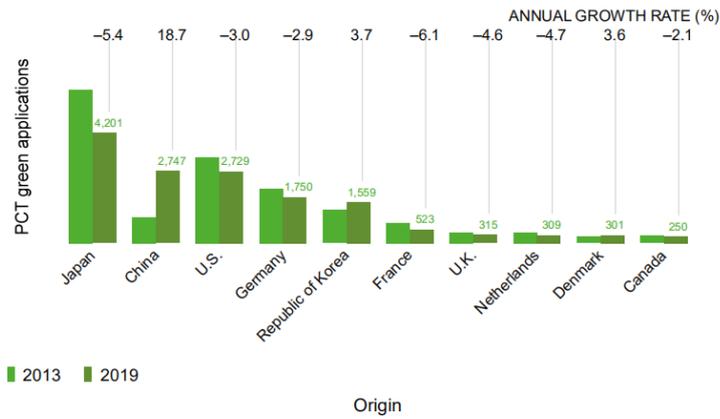


图3 绿色技术 PCT 专利主要申请国的申请量变化（2013 和 2019 对比）

3、各国亟需加快开展绿色技术创新

绿色能源技术 PCT 专利可以分为两大类：可替代能源生产技术和高效用能技术（表 1）。可替代能源生产技术包括生产能源的所有绿色技术，如太阳能光伏发电或余热发电。高效用能技术包括应用于终端能源消费的所有技术，如高效照明或减少火车阻力的空气动力板。

表 1 2013-2019 年绿色能源技术 PCT 申请（按细分类别）

绿色技术	2013 /件	2016 /件	2019 /件	2013-2019 年均增长/%	2013-2019 总增长/%	2013 年申请量 占比/%	2019 年申请量 占比/%
替代能源生产技术	9322	7099	7646	-3	-18	52	45
生物燃料	2088	1852	1866	-2	-11	12	11
太阳能	2842	1604	1766	-8	-38	16	10
燃料电池	1241	1021	1105	-2	-11	7	7
风能	820	522	859	1	5	5	5
废物	761	680	716	-1	-6	4	4
核能	543	510	468	-2	-14	3	3
水能	344	289	300	-2	-13	2	2
地热能	285	255	282	0	-1	2	2
余热	253	260	203	-4	-20	1	1
高效用能技术	8558	8238	9294	1	9	48	55
节能技术小计	6210	6101	6800	2	10	35	40
电力供应电路	3290	3351	3511	1	7	18	21
高效照明	2175	2073	2383	2	10	12	14
电力存储	444	395	547	4	23	2	3
建筑保温	300	282	360	3	20	2	2
交通技术小计	2260	2066	2321	0	3	13	14
轨道交通	523	518	734	6	40	3	4
充电站	268	283	383	6	43	1	2
人力车	193	285	324	9	68	1	2
混合动力	613	385	304	-11	-50	3	2
电动车	456	313	285	-8	-38	3	2
氢	74	125	105	6	42	0	1
常规车辆	69	70	99	6	45	0	1
热泵	60	47	131	14	120	0	1
总计	17880	15347	16940	-1	-5	100	100

2019 年绿色技术 PCT 专利申请总量比 2013 年有所下降，主要是由于替代能源技术申请量下降了 18%，拉低了绿色创新的整体增长。而在节能和交通相关领域技术创新的推动下，高效用能技术的专利申请量增长 9%，其中节能、交通领域技术分别增长 10% 和 3%。由于能源和大宗商品价格在 2014 年后大幅下跌，可能抑制了开发可持续绿色能源的积极性。高效用能技术专利也受能源价格影响略有下降，但趋势并不一致（图 4）。

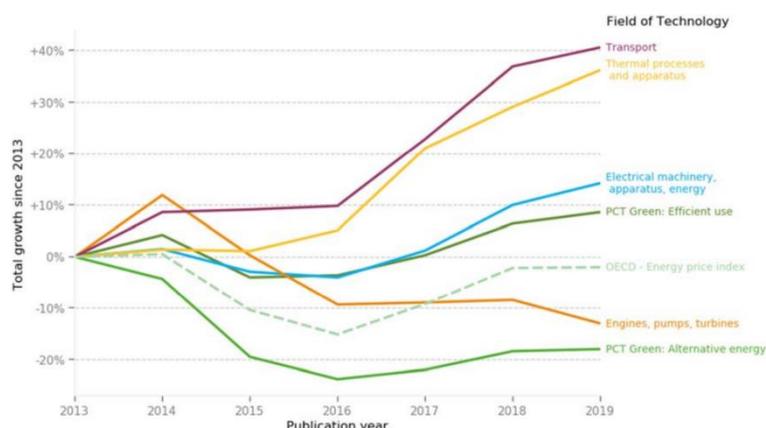


图 4 2013-2019 年绿色技术不同领域专利申请变化趋势

绿色能源技术专利申请没有跟上相关领域的创新步伐。许多主要申请国的可替代能源专利申请占比均有所下降，即使韩国和中国的绿色能源技术专利申请总量增长，但其替代能源技术申请占比却分别下降了 0.9 和 2.5 个百分点。高效用能技术专利申请情况表现相对较好，前十大绿色能源技术专利申请国中，有五个国家的高效用能技术专利申请占比有所上升（图 5）。

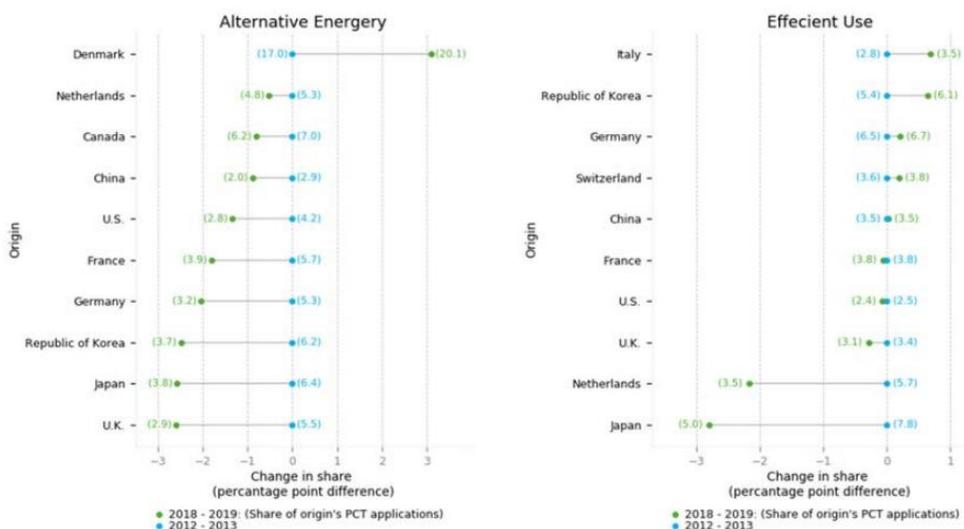


图 5 绿色技术 PCT 专利申请来源国替代能源技术和高效用能技术申请占比变化情况

(李岚春 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