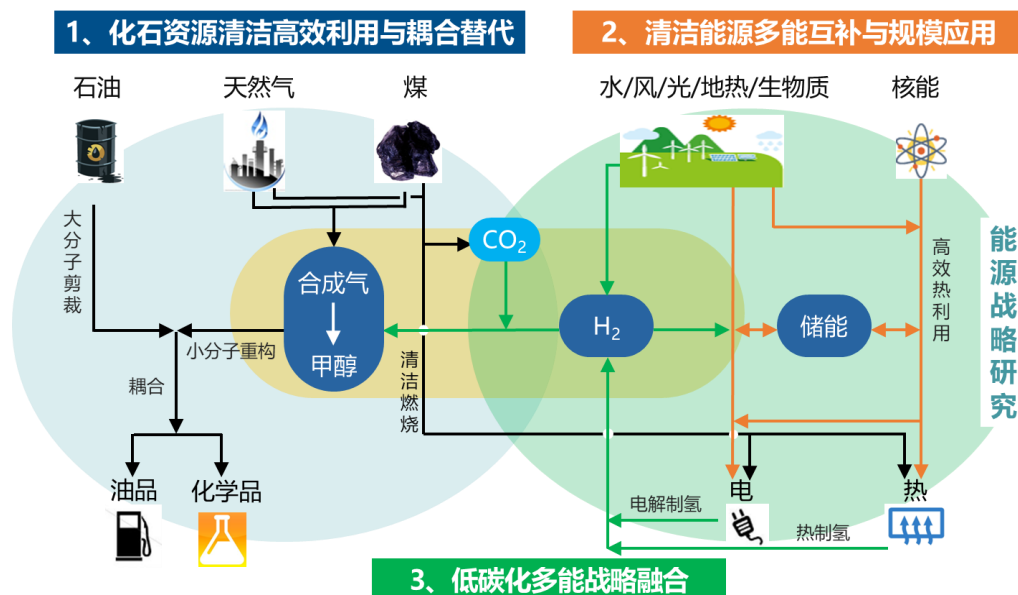




# 洁净能源科技动态监测快报

2020 年第 01 期（总第 03 期）



## 本期看点

- IEA 预测未来五年全球煤炭供需与贸易趋势
- NETL 评估先进燃煤发电和天然气发电性能及成本
- IEA 发布可再生能源中期市场展望报告
- 欧盟七国拟资助 32 亿欧元推进电池全价值链研发创新
- 美能源信息署发布报告展望至 2050 年全球能源发展趋势
- 世界能源理事会预测 2030 年全球储能发展趋势

# 目 录

2020 年第 01 期 (总第 03 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

- IEA 预测未来五年全球煤炭供需与贸易趋势 ..... 2
- NETL 评估先进燃煤发电和天然气发电性能及成本..... 5
- NETL 总结 2019 年化石燃料利用研究成果..... 10
- DOE 资助 2000 万美元支持化石燃料发电极端环境材料开发 ..... 12

## ◆ 清洁能源多能互补

- 国际能源署发布可再生能源中期市场展望报告 ..... 13
- 欧盟七国拟资助 32 亿欧元推进电池全价值链研发创新 ..... 17
- DOE 拨款 4000 万美元开展能源前沿研究中心第四轮资助 ..... 17
- DOE 资助 700 万美元支持地热开发利用技术研究..... 19
- 溶剂调谐实现室温快速制备大面积钙钛矿新工艺 ..... 19

## ◆ 低碳化多能融合

- ARPA-E 部署新项目推进数字技术在能源领域应用研究 ..... 21
- 超结构克服过渡金属氧化物正极材料首圈循环电压损失问题..... 22
- 钴基核壳结构电催化剂实现高效稳定氧催化还原 ..... 24

## ◆ 能源战略研究

- 美能源信息署发布报告展望至 2050 年全球能源发展趋势 ..... 26
- 世界能源理事会预测 2030 年全球储能发展趋势 ..... 29
- IRENA: 释放太阳能光伏潜力 助推全球能源转型 ..... 31

## 本期概要

国际能源署 (IEA) 发布煤炭中期市场报告《煤炭 2019》，分析了煤炭市场近期情况，并预测了到 2024 年全球煤炭供应、需求和贸易趋势：2018 年全球煤炭需求继续增长，但预计 2019 年需求将因燃煤发电量大幅下跌而有所下降。受到亚洲燃煤发电市场强劲增长支撑，未来五年全球煤炭需求将保持稳定缓慢增长。中国煤炭需求将在 2022 年左右达到平稳后下降。未来五年全球煤炭产量将基本保持稳定，中国仍将是煤炭最大生产国。煤炭贸易将继续向太平洋地区转移。

美国国家能源技术实验室 (NETL) 发布《化石能源发电厂成本和性能基准 (卷一)：烟煤和天然气发电》报告，分析评估了 13 种先进电厂技术配置 (7 种 IGCC 技术、4 种 PC 技术和 2 种 NGCC 技术) 的性能和成本：(1) 无碳捕集的 NGCC 发电厂净效率最高 (53.6%)，配备碳捕集的亚临界 PC 电厂净效率最低 (30.0%)；(2) IGCC 发电厂中，采用壳牌气化炉的无碳捕集发电厂净效率最高，采用西比埃公司 E-Gas™ 气化炉的平准化度电成本 (LCOE) 最低，配备碳捕集将使 IGCC 发电厂净效率降低 6%-10%，使 LCOE 平均增加 42%；(3) PC 发电厂增加碳捕集装置会导致净效率降低约 9%，使 LCOE 增加 64%-67%；(4) NGCC 发电厂安装碳捕集会导致电厂净效率降低约 6%，使 LCOE 增加 64%。

国际能源署 (IEA) 发布《2019-2024 年可再生能源市场分析及展望》报告，对未来五年电力、供暖和交通运输部门可再生能源的发展趋势做了分析预测：未来五年全球可再生能源装机容量将大幅增长 50%，其中光伏发电占到增量的 60%。可再生能源将是增长最快的发电来源，其发电量将增长 37%。分布式光伏发电将出现爆发式增长，装机容量增长一倍以上。中国将占全球分布式光伏装机增量近一半，将于 2021 年超过欧盟领先世界，还将首次引领生物燃料产量增长。

欧盟委员会近期通过一项“欧洲共同利益重要项目” (IPCEI) 提案，由比利时、芬兰、法国、德国、意大利、波兰和瑞典七国到 2031 年前共同投入 32 亿欧元公共资金，并将撬动 50 亿欧元的私人投资，推进电池全价值链的研发创新：该项目将支持开发高度创新和可持续的锂离子电池技术 (液态电解质和固态电池)，比现有技术更具耐用性、充电时间更短、更安全和环保，以实现整个电池价值链的创新。具体资助研发领域包括：原材料和先进材料；电池单元与模块；电池系统；电池再利用、回收和提炼。

美国能源部能源信息署 (EIA) 发布《国际能源展望 2019》报告，展望了世界主要国家和地区到 2050 年的能源消费、供应、结构变化趋势：未来 30 年发展中国家 (尤其是亚洲发展中国家) 经济蓬勃发展，全球经济将持续增长，推动全球能源需求将继续增加。工业仍将是最大的终端用能部门，可再生能源消费预计比化石能源增长更快，但到 2050 年化石能源依旧是能源消费结构主体。电力在能源供应体系中的地位逐渐增强，发电量增量大部分来自可再生能源和天然气。

世界能源理事会 (WEC) 发布《储能监测：2019 发展趋势》报告，分析了到 2030 年世界储能市场的发展趋势：到 2030 年全球储能装机总量将达到 250 吉瓦，电池储能系统的安装成本将下降 50%-66%，安装在用户侧的所有可再生能源发电装置中有 70% 将配备储能装置。报告还提出了推进储能的政策建议。

# 化石资源清洁高效利用

## IEA 预测未来五年全球煤炭供需与贸易趋势

12月17日，国际能源署（IEA）发布煤炭中期市场报告《煤炭2019》<sup>1</sup>，详细分析了煤炭市场近期情况，并预测了到2024年全球煤炭供应、需求和贸易趋势。报告指出，2019年全球燃煤发电量出现有史以来最大降幅（降低超过250太瓦时），其中美国和欧洲跌幅超过两位数，受此影响2019年全球煤炭需求将有所下降。IEA预测，煤电在全球电力结构中占比将从2018年的38%降至2024年的35%，但其仍将是全球最大电力来源。尽管欧美的燃煤发电量将在未来五年持续下降，但受到亚洲市场强劲增长支撑，全球煤炭需求将保持稳定缓慢增长。全球煤炭市场趋势将在很大程度上取决于中国，其煤炭生产和消费量占全球一半。报告主要内容如下：

### 一、到2024年全球煤炭需求将呈平稳趋势

2017年以前，全球煤炭需求连续三年下降，投资商和私营企业等也逐渐转向清洁技术投资，公众也越来越抵触化石燃料，尤其是煤炭。来自天然气和可再生能源的竞争，以及碳价和逐步淘汰煤炭政策的出台等诸多因素，导致燃煤发电在发达国家中的地位被削弱。但全球煤炭需求走势并未一路走跌，而是在2017年出现反弹，2018年延续这一势头增长了1.1%，其主要原因是燃煤发电量在2018年增长近2%，创历史新高。燃煤发电在总发电量中占比38%，仍为最大的电力来源。中国、印度和其他亚洲国家引领煤电增长，欧洲和北美的燃煤发电量则在下降。尽管中国大力推行煤改气，但全球非电力行业煤炭需求仍保持稳定。预计2019年全球煤炭需求将有所下降，到2024年将保持稳定缓慢增长（图1）。

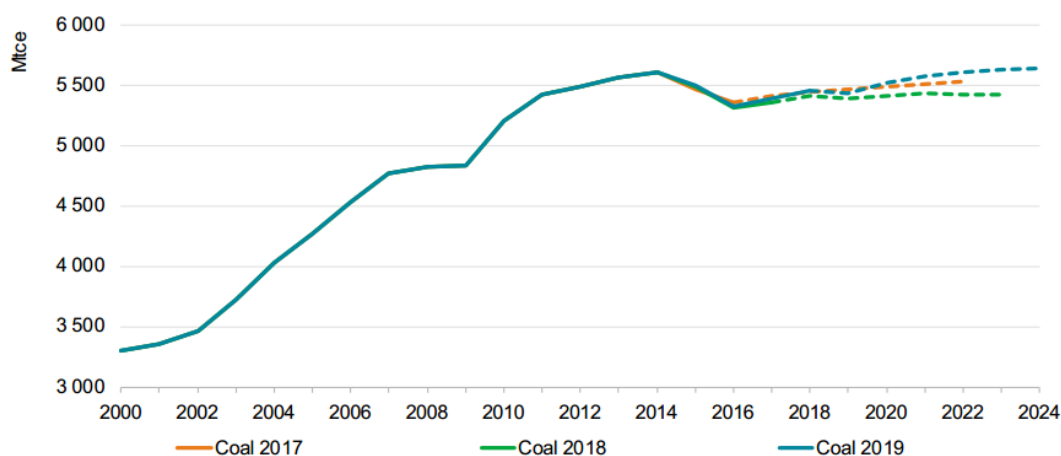


图1 2017-2019年报告对全球煤炭需求走势预测的对比（单位：百万吨煤当量）

<sup>1</sup> Coal 2019: Analysis and Forecasts to 2024. <https://www.iea.org/reports/coal-2019>

## 二、印度和东南亚的发展依赖于煤炭

**1、煤炭仍然是印度经济增长的强劲动力。**为实现经济发展目标，未来五年印度将大力投资基础设施，这将增加工业和电力部门的能源需求。目前印度的人均电力消耗仍然偏低，因此具有较大增长空间。预计 2018-2024 年印度可再生能源发电量将强劲增长，其中风力发电量将增加一倍，光伏发电量则将增长四倍。尽管如此，到 2024 年印度燃煤发电量仍将以年均 4.6% 的速度增长。总体而言，到 2024 年印度煤炭需求增量将超过其他任何国家。

**2、以印度尼西亚和越南为主导，到 2024 年东南亚煤炭需求将以每年 5% 的速度增长。**东南亚地区强劲的经济增长将导致电力和工业部门的煤炭消耗量增长。南亚国家需要为不断增长的人口提供更多电力，因此将增加煤电机组以满足电力需求。巴基斯坦目前在建燃煤电厂容量超过了 4 吉瓦，孟加拉国在建机组中 10 吉瓦机组即将投产。

## 三、中国煤炭需求将在 2022 年左右达到平稳后下降

作为世界最大煤炭生产国和消费国，中国的煤炭消费量将在 2022 年左右达到平稳。过去几年，中国电力消费和基础设施建设发展超出预期，导致煤炭消费量增加。但未来五年由于空气污染问题，住宅和小型工业部门的煤炭消费量将持续减少，受经济结构变化和宏观经济状况影响，重工业煤炭用量也将有所下降。尽管发电量增速正在放缓，预计燃煤发电量仍将保持增长，但其在总发电量中的占比将从 2018 年的 67% 下降到 2024 年的 59%。总体而言，到 2022 年中国煤炭需求将达到平稳状态，然后开始缓慢下降。此外，中国煤炭需求走势将受到政府经济增长目标及核电、风能、太阳能以及煤炭转化政策的影响。尽管减少空气污染和二氧化碳排放是中国的政策重点，煤炭仍将继续在维持经济增长和保障能源安全方面发挥重要作用。

## 四、欧洲和美国的煤炭需求将进一步下降

**1、廉价天然气削弱了煤炭在欧盟的竞争力。**减少燃煤电厂空气污染和提高碳价的相关政策以及一些国家逐步淘汰煤电的计划，对欧洲煤炭的使用形成巨大压力。风能和光伏发电在发电量中占比继续增加，极低的天然气价格挤占了煤炭的大量市场份额。未来几年煤炭将恢复部分竞争力，但到 2024 年，燃煤电厂的退役和可再生能源的进一步增长将使燃煤发电量每年减少 5% 以上。

**2、美国的页岩气繁荣正导致煤炭走向消亡。**美国联邦政府和一些产煤州仍为燃煤电厂提供支持，但页岩气革命决定着煤炭的命运。廉价而丰富的天然气，加上许多州的气候政策，将继续挤占煤炭在电力市场的份额。预计到 2024 年，美国煤炭需求每年将下降近 4%。煤炭在电力供应中的份额将从 2018 年的 28% 降至 2024 年的 21%。由于部分煤炭用于出口，美国煤炭产量下降幅度较小。但是欧洲市场对煤炭需求的大幅减少和美国西海岸缺乏出口基础设施限制了未来的出口前景。

## 五、未来五年全球煤炭产量将保持稳定

受到煤炭需求增长的带动，2018 年全球煤炭产量大幅提升 3.3%。在全球最大的 6 个煤炭生产国中有 4 个国家产量增长，其中印度、印度尼西亚和俄罗斯均达到其历史最高产量。未来五年，预计全球煤炭产量将基本保持稳定，从 2018 年的 55.7 亿吨标煤小幅增加至 2024 年的 56.24 亿吨标煤（图 2）。动力煤产量将增加 5800 万吨标煤至 43.33 亿吨标煤，炼焦煤产量将增加 1000 万吨标煤至 10.32 亿吨标煤，褐煤产量则将下降 1800 万吨标煤至 2.59 亿吨标煤。中国仍将是最大的煤炭生产国，其煤炭产量大致保持稳定，从 2018 年的 26.64 亿吨标煤下降至 2024 年的 26.53 亿吨标煤，届时全球 47% 的煤炭将由中国生产，比当前降低 1%。印度将是煤炭产量增长最快的国家，预计未来五年年均增长 4.5%，从 2018 年的 4.12 亿吨标煤增长至 2024 年的 5.37 亿吨标煤。预计澳大利亚煤炭产量将以每年 1.4% 的速度增长，从 2018 年的 4.09 亿吨标煤增长至 2024 年的 4.44 亿吨标煤。

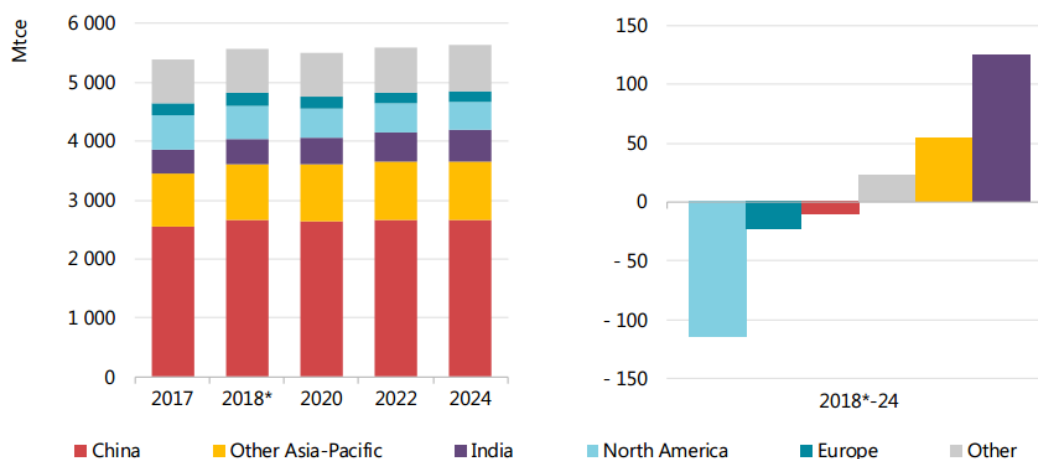


图 2 全球各地区煤炭产量预测（单位：百万吨煤当量）

## 六、煤炭贸易将继续向太平洋地区转移

1、太平洋地区煤炭出口国的处境将优于大西洋地区。2018 年煤炭国际贸易量增长了 4%，超过了 14 亿吨，印度尼西亚和俄罗斯的煤炭出口量创下新高。煤炭交易价格也比 2016 年高出 60% 以上，这使得煤炭出口利益丰厚，如澳大利亚煤炭出口收入在 2018 年再创新高，达到 670 亿美元。未来五年亚洲煤炭需求将继续保持强劲，欧洲市场需求大幅下降，美国和哥伦比亚等大西洋煤炭生产国陷入困境，而澳大利亚和南非的情况较好。俄罗斯正逐渐将重心转向亚洲市场。印度尼西亚国内煤炭需求的增加将导致其出口量下降。未来中国和印度的煤炭需求仍然强劲，但由于受到政府限制进口政策的约束，其煤炭进口需求变化仍不确定。

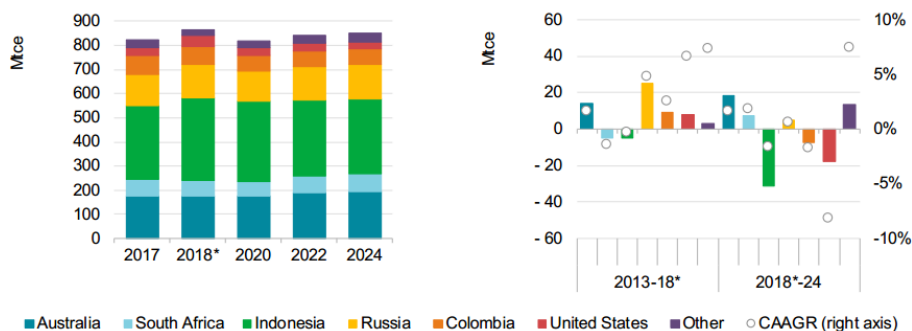


图 3 全球主要动力煤出口国煤炭出口走势预测（单位：百万吨煤当量）

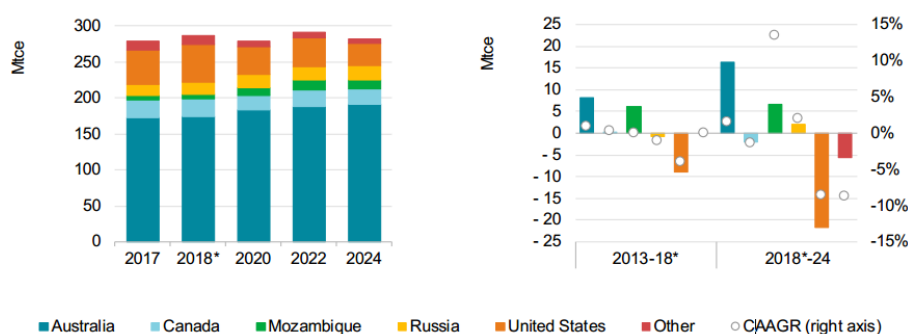


图 4 全球主要炼焦煤出口国煤炭出口走势预测（单位：百万吨煤当量）

2、煤炭投资环境将愈加艰难。新煤矿获批或融资将越来越困难，如澳大利亚昆士兰卡迈克尔煤矿经过十多年筹备才得以开工建设，相比之下，澳大利亚、美国和俄罗斯的炼焦煤项目进展较快。

3、南非煤炭发展正处于十字路口。南非政府的综合资源计划(Integrated Resource Plan)对南非能源行业的未来进行了规划，但煤炭行业仍存在其他不确定性，包括南非国家电力公司(Eskom)的财务困境、煤矿所有权的变化等。总体而言到 2040 年南非煤炭生产和出口都将保持稳定，但上述因素可能会改变这一趋势。

（岳芳）

## NETL 评估先进燃煤发电和天然气发电性能及成本

11 月 19 日，美国能源部国家能源技术实验室 (NETL) 发布《化石能源发电厂成本和性能基准（卷一）：烟煤和天然气发电》报告<sup>2</sup>，对美国整体煤气化联合循环 (IGCC) 发电厂、粉煤 (PC) 发电厂和天然气联合循环 (NGCC) 发电厂的性能和成本进行了评估。报告共分析了 13 种先进电厂技术配置 (7 种 IGCC、4 种 PC 技术和 2 种 NGCC 技术)，为化石燃料发电技术开发和决策提供了基准。NETL 将陆续发布其他三卷评估报告，包括煤合成天然气和氨、低阶煤和天然气发电、烟煤生产液

<sup>2</sup> Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants, Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity. [https://netl.doe.gov/projects/files/CostAndPerformanceBaselineForFossilEnergyPlantsVol1BitumCoalAndNGtoElectBRRRev4-1\\_092419.pdf](https://netl.doe.gov/projects/files/CostAndPerformanceBaselineForFossilEnergyPlantsVol1BitumCoalAndNGtoElectBRRRev4-1_092419.pdf)

体燃料。本次发布的评估报告主要内容如下：

## 一、评估准则

本次评估的电厂技术配置如下：（1）7种IGCC电厂配置：2种壳牌（Shell）气化炉（有碳捕集和无碳捕集）、2种西比埃公司（CB&I）E-Gas<sup>TM</sup>激冷气化炉（有碳捕集和无碳捕集）、3种通用电气电力公司（GEP）气化炉（2种辐射废锅气化[有碳捕集和无碳捕集]、1种激冷气化[有碳捕集]）；（2）4种PC电厂配置：2种亚临界发电（有碳捕集和无碳捕集）和2种超临界发电（有碳捕集和无碳捕集）；（3）2种2017年最新F级燃气轮机NGCC电厂配置（有碳捕集和无碳捕集）。所有IGCC电厂的容量因子为80%，所有PC电厂和NGCC电厂的容量因子为85%。IGCC电厂的净输出功率范围在499 MW至641 MW，NGCC电厂为646 MW（带碳捕集）至727 MW（无碳捕集），PC电厂为650 MW。所有配备碳捕集装置的碳捕集率均为90%。评估电厂成本所采用的煤炭价格以2.11美元/吉焦计，天然气价格以4.19美元/吉焦计。

新一代化石燃料发电技术的选择将取决于许多因素，包括：资金和运营成本；整体能效；运行灵活性（如爬坡率、调节比、启动时间）；燃料价格；项目财务要求；可用性、可靠性和环境效益；管理化石燃料发电厂的气体、水和固体废物排放的现行和潜在法规；特定的电厂和应用限制及要求；在美国能源部（DOE）的“洁净煤和碳管理计划”下进行的商业规模示范以使洁净煤技术商业化趋于成熟。

## 二、性能评估结果

### 1、IGCC发电厂的性能和排放评估结果

（1）无碳捕集发电厂中，采用壳牌气化炉的发电厂净效率最高（43.0%），其次是两段式E-Gas<sup>TM</sup>气化炉（41.1%）。

（2）配备碳捕集使发电厂净效率降低6-10个百分点。碳捕集装置导致的能量损失主要由于抽取蒸汽用于水煤气变换反应、CO<sub>2</sub>分离和压缩设备的负荷以及由于合成气中水分含量偏高而导致的轻微损失。在所有IGCC发电厂中：①采用GEP辐射废锅气化炉的发电厂损失最低（6%），这主要是由于气化炉采用水煤浆进料和水激冷设计，使得合成气中的水分含量很高，因此水煤气变换反应几乎不需要额外的水蒸汽；采用壳牌气化炉的发电厂损失最高（10%），由于气化炉使用干式进料系统，并且在无碳捕集的电厂中由于合成气冷却器的热回收率相对较高，因此没有采取水激冷，导致合成气中的水分含量较低，而有碳捕集的电厂增加了水激冷装置，因而增加了水煤气变换反应的合成气水分含量，但会降低合成气冷却器的热量回收。

（3）使用甲基二乙醇胺的西比埃公司E-Gas<sup>TM</sup>气化炉（无碳捕集）发电厂具有最高的SO<sub>2</sub>排放量（0.192磅/兆瓦时），因为在酸性气体去除技术中，甲基二乙醇胺的H<sub>2</sub>S去除效率最低。



(4) IGCC 电厂中采用零液体排放系统使电厂净效率下降了 0.1%-0.2%，其中有 6 个电厂下降了 0.1%左右，主要原因是零液体排放系统所需抽取的蒸汽量和附加负荷远大于 PC 电厂中喷雾干燥蒸发器所需的负荷。

(5) 汞、氯化氢、颗粒物、NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放均低于目前针对 IGCC 的监管规定要求。

## 2、PC 发电厂的性能和排放评估结果

(1) PC 发电厂增加碳捕集装置会导致净效率降低约 9 个百分点。

(2) PC 发电厂使用喷雾干燥蒸发器将使电厂净效率降低 0.25%-0.27%。原因是喷雾干燥蒸发器所需的负荷很小，因此影响较小。

(3) 汞、氯化氢、颗粒物、NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放均达到或低于目前针对 PC 的监管规定要求。

## 3、NGCC 发电厂的性能和排放评估结果

(1) NGCC 发电厂在三类电厂中净效率最高，其中无碳捕集的电厂净效率达 53.6%，有碳捕集的电厂净效率达 47.7%。无碳捕集的壳牌 IGCC 发电厂净效率居第三位（43.0%）。

(2) NGCC 电厂安装碳捕集会导致电厂净效率降低约 6 个百分点。NGCC 电厂损失小于 PC 电厂的主要原因是：①天然气含碳量低于煤炭；②无碳捕集 NGCC 发电厂效率更高，将其标准化为等效净功率输出后，可捕获和压缩的 CO<sub>2</sub> 总量更少（无碳捕集 NGCC 发电厂碳排放量比 PC 发电厂低约 54%-56%）；③但 NGCC 电厂烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度较低（4 mol%，PC 电厂为 13 mol%），需要电厂提供更多蒸汽和能量才能达到捕获目标，因而缩小了与 PC 电厂净功率损失的差距。

(3) 天然气不含汞或氯化物，颗粒物、NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 排放量均等于或低于目前针对 NGCC 的监管规定要求。

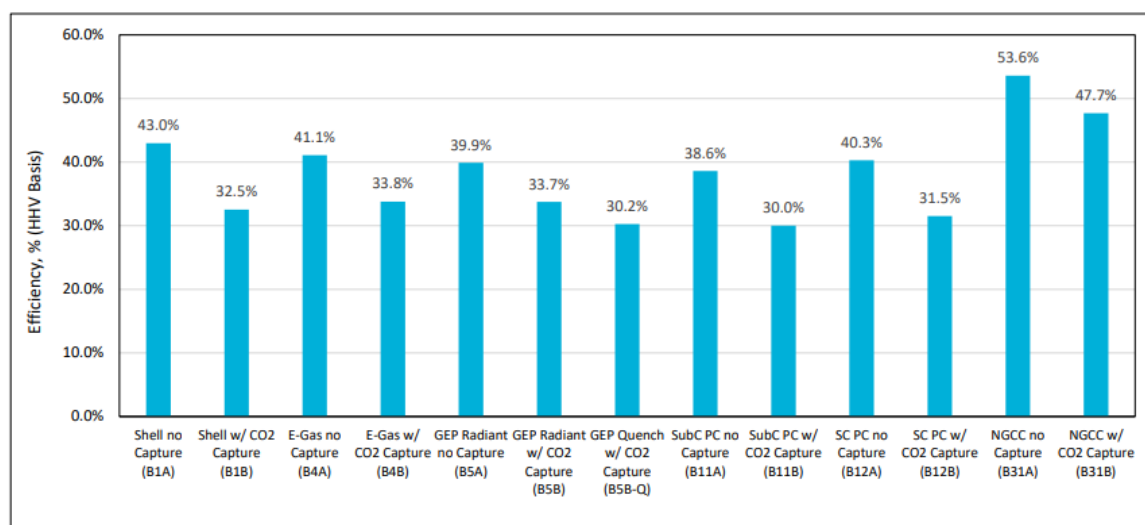


图 1 13 种先进电厂技术配置净效率对比（基于高热值）

### 三、成本评估结果

#### 1、IGCC 发电厂的成本评估结果

(1) 无碳捕集电厂中，采用西比埃公司 E-Gas<sup>TM</sup> 气化炉的总隔夜成本最低。E-Gas<sup>TM</sup> 采用了多项降低成本的技术：①E-Gas<sup>TM</sup> 气化炉的两段式设计使合成气温度降低到不需要辐射冷却器的范围，因而可以使用火管锅炉冷却，火管冷却器比辐射冷却器尺寸更小，成本更低；②火管冷却器位于气化炉旁边，而不是在其上方或下方，降低了气化炉主要结构的高度，E-Gas<sup>TM</sup> 专有的除渣系统也有助于降低结构高度。

(2) GEP 气化炉（辐射废锅）和壳牌气化炉发电厂的标准化总隔夜成本比 E-Gas<sup>TM</sup> 气化炉发电厂高约 12%。

(3) 有碳捕集装置的 IGCC 发电厂中，GEP 激冷气化炉技术成本最低（辐射废锅比激冷技术成本高 8%），比西比埃公司 E-Gas<sup>TM</sup> 气化炉发电厂的标准化总隔夜成本低 7%，比壳牌气化炉发电厂低 27%。

(4) 所有 IGCC 发电厂中空气分离装置成本均占总隔夜成本的 3%-4%。空气分离装置成本包括氧气和氮气的压缩成本，为保证最大程度分离氮气，其压缩成本非常可观。

(5) 安装碳捕集装置将使 IGCC 发电厂的标准化总隔夜成本平均增加 46%，成本增加范围为 1301-2957 美元/千瓦。

(6) 所有 IGCC 电厂的平准化度电成本（LCOE）均以资本成本为主导，至少占总成本的 50%（不包括二氧化碳运输和封存成本）。

(7) 无碳捕集装置的 IGCC 电厂中，西比埃公司 E-Gas<sup>TM</sup> 气化炉发电厂的 LCOE 最低，其与壳牌气化炉发电厂的 LCOE 成本差距（8%）比总隔夜成本差距（13%）小，主要原因是壳牌气化炉电厂的效率更高。GEP 气化炉发电厂的 LCOE 比 E-Gas<sup>TM</sup> 高约 11%。

(8) 带碳捕集的 IGCC 发电厂中，GEP 激冷气化炉发电厂的 LCOE 低于其辐射废锅气化炉。由于增加了碳捕集装置，壳牌气化炉电厂的能耗损失最大。带碳捕集的 IGCC 电厂 LCOE（不含 CO<sub>2</sub> 运输和封存成本）依次为：GEP 激冷气化炉最低（139.4 美元/兆瓦时），壳牌气化炉最高（166.5 美元/兆瓦时），E-Gas<sup>TM</sup> 和 GEP 辐射废锅气化炉居中，分别为 143.1 美元/兆瓦时和 144.2 美元/兆瓦时。配备碳捕集装置使上述电厂 LCOE 平均增加 42%（增加范围为 29%-57%）。

(9) 带碳捕集的 IGCC 发电厂中，CO<sub>2</sub> 运输和封存成本占总 LCOE 的 5%-6%。

#### 2、PC 发电厂的成本评估结果

(1) 对于恒定功率输出，亚临界电厂和超临界电厂的资本成本基本相等，其 LCOE 差异很小。

(2) 增加碳捕集装置会使 PC 发电厂的资本成本增加 80%-86%，使 LCOE 增加

64%-67%。

(3) PC 发电厂资本成本在 LCOE (不包括 CO<sub>2</sub> 运输和封存成本) 中占比最大, 占到 43%-48%, 而燃料成本占到 23%-31%, 这一比例与 IGCC 电厂相当, 并且远低于 NGCC 电厂的燃料成本占比。

(6) 二氧化碳运输和封存成本使 PC 发电厂 LCOE 增加了 9 美元/兆瓦时, 约占 LCOE 的 8%。

### 3、NGCC 发电厂的成本评估结果

(1) 安装碳捕集装置将使 NGCC 的资本成本增加 153%, LCOE 增加 64%。

(2) NGCC 电厂的资本成本占 LCOE (不含 CO<sub>2</sub> 运输和封存成本) 的 23%-35%, 比 PC 电厂或 IGCC 电厂的占比小。

(3) NGCC 电厂中, 燃料成本在 LCOE (不含 CO<sub>2</sub> 运输和封存成本) 中占比最大 (45%-65%)。

(4) CO<sub>2</sub> 运输和封存成本使 NGCC 发电厂 LCOE 增加了 4 美元/兆瓦时, 约占 LCOE 的 8%。

### 4、三种技术成本的比较

(1) 对于无碳捕集和有碳捕集的 NGCC 发电厂, 其资本成本 (以美元/千瓦计) 分别约为 PC 发电厂的 37% 和 52%; 无论是否配备碳捕集装置, NGCC 发电厂 LCOE 大约为 PC 发电厂的 67%。

(2) 尽管具备更高净效率且 LCOE 相对较低, 但 NGCC 发电厂的盈亏平衡二氧化碳销售价格和排放罚金均高于 PC 发电厂, 这是由于其 CO<sub>2</sub> 浓度和可捕获的数量较低。

(3) 如果未来立法导致碳排放发生成本, 则所有技术成本将升高, 未配备碳捕集的技术将受到更大的影响, 以煤为原料的技术将比以天然气为原料的技术受到的影响更大。

(4) 出售捕集的 CO<sub>2</sub> 用于提高采收率 (EOR) 将为带碳捕集的发电厂带来收益。对于 NGCC 电厂和 PC 电厂, 当 CO<sub>2</sub> 价格分别低于 46 美元/吨和 41 美元/吨时, 不安装碳捕集装置的 LCOE 更低。在这种情况下, 当天然气价格低于 7.5 美元/百万英热单位, NGCC 电厂将是更好的选择。对于 IGCC 电厂和 PC 电厂, 当 CO<sub>2</sub> 价格低于约 70 美元/吨时, 不安装碳捕集装置的 LCOE 更低。天然气价格高于 7 美元/百万英热单位时, 当 CO<sub>2</sub> 价格达到 88 美元/吨, 带碳捕集的 IGCC 电厂更具竞争力。

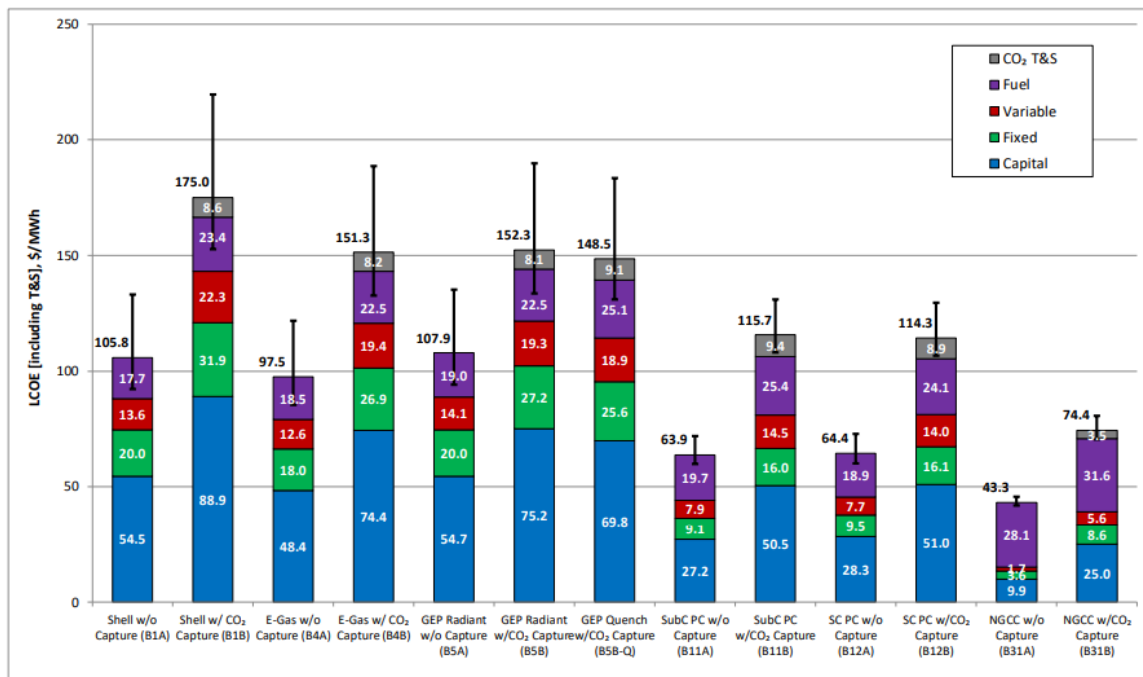


图 2 13 种先进电厂技术配置的 LCOE 组成

(王东旭 岳芳)

## NETL 总结 2019 年化石燃料利用研究成果

12月9日，美国能源部国家能源技术实验室（NETL）总结了2019年该实验室在利用化石燃料发电、生产燃料和化学品，以及开发先进能源分析模型方面的创新研究成果<sup>3</sup>。相关成果主要围绕三方面：推动先进传感器商业化；煤气化转化；能源分析。具体包括：

### 一、推动先进传感器商业化

利用拉曼激光光谱技术，通过激光与分子相互作用以提供气体的表征信息，开发出拉曼气体分析仪，可持续监测燃烧过程中的气体成分，实时控制燃烧过程，进而提高天然气发电厂的运行灵活性，以提高发电效率。同时，在测试平台上对该仪器进行了测试，推进了技术的商业化，未来将在全美天然气发电厂中推广使用。

### 二、煤气化转化

NETL 2019年启用了最先进的反应分析与化学转化平台（ReACT），研究包括微波在内的反应科学，以推进煤气化技术发展，从而提供更清洁、低成本的能源和有价值的化工产品。传统煤气化的加热工艺成本和能耗偏高，因此，NETL 正致力于研究如何使用微波在分子水平上实现快速且准确的加热，获得了如下成果：

1、微波增强合成氨。通过与 DOE 先进能源研究计划署（ARPA-E）合作，NETL

<sup>3</sup> NETL Research Successes Advance Technology Solutions to America's Energy Challenges. <https://www.netl.doe.gov/node/9369>

团队已经证实利用负载型金属催化剂体系，使用微波辐射可在较低的温度（300℃）和环境压力下实现更高的氨产量，大量节约水和能源消耗。

**2、改进载氧体提高气化炉性能。**NETL 正研究将金属氧化物用作载氧体，为气化过程提供氧气，以削减气化成本，最大限度地提高效率。为了确定合适的载氧体，研究人员设计了新的载氧体组成，可快速有效地输送氧气。通过添加化学成分，对特定属性进行微调，如工作温度和氧气的输送速度。研究人员已经确定了钙钛矿系列中的几种有前景的材料，这些材料生产成本低，不仅可用于气化系统，在其他能源技术领域也具有巨大应用潜力。

### 3、能源分析

**（1）升级炼油厂生命周期模型。**该研究升级了炼油厂生命周期清单模型（PRELIM），以提供更完整的环境生命周期清单，进而获得炼油厂对环境的影响，作为生命周期分析研究的一部分。原有 PRELIM 提供的结果仅限于能源消耗和温室气体排放信息，NETL 在模型中增加了一些评价标准，包括空气污染物、危险性空气污染物、废水和固废排放以及废物管理，其数据源于各种公开可用的数据源。这些数据的增加，能够更全面地分析与炼油作业相关的潜在环境影响。

**（2）调查天然气生产过程排液情况，通过案例分析说明甲烷定量研究对提高美国天然气生产效率的重要性。**该研究强调，在对甲烷排放进行估算时，需要考虑排放源的变化和区域差异，通过确定甲烷排放源和改进排放评估，帮助研究机构开发减少甲烷排放的清洁技术，以确保公众的健康和安全。排液是天然气生产中的重要环节，天然气生产过程中经常在井内发生积液，必须定期排液以确保气体流动和维持生产，但该过程会将甲烷释放到大气中。研究人员集中研究了美国 18 个产能最高的天然气盆地，并研究了不同的排液方式，开发了一个多参数统计评估模型，这些参数会影响排液作业的甲烷排放量。通过数千次迭代模拟发现，天然气盆地内和不同盆地之间的甲烷排放量差异很大，圣胡安盆地和落基山地区的平均甲烷排放率最高。还发现一小部分排液频率高的天然气井甲烷排放在总排放量中占极大份额，这些天然气井被称为“超级排放源”，这一计算结果与现场观测结果吻合，表明了模型的准确性。

（张凯宏 岳芳）

## DOE 资助 2000 万美元支持化石燃料发电极端环境材料开发

12 月 20 日，美国能源部（DOE）化石能源办公室宣布将资助 2000 万美元<sup>4</sup>，支持用于燃煤发电及天然气蒸汽循环发电的极端环境材料开发，以降低发电成本，提高性能和可靠性，并提高耐高温材料在全球市场的竞争力。本次资助将重点关注两个领域：解决高温蒸汽循环组件中异种金属接头处的疲劳故障；利用表面技术解决高温蒸汽循环组件中的冲刷和腐蚀。具体内容如下：

### 一、解决高温蒸汽循环组件中异种金属接头处的疲劳故障

具体包括：将开发创新型材料或材料加工技术，提高连接材料和组件的循环耐久性。项目还将开发相关的材料与技术，减少在维修和升级组件时的时间和成本，同时通过在现实环境中示范和书面化其价值等手段，解决在推广成熟连接技术时面临的障碍。燃气轮机的应用被认为是无响应的，因此任何以天然气为重点的工作都应集中在天然气联合循环的底循环上。

### 二、利用表面技术解决高温蒸汽循环组件中的冲刷和腐蚀

具体包括：将组成一个大型研究团队，以完善并验证 DOE 对现有发电机组组件故障、故障机理、材料挑战、供应链挑战以及通过材料研发示范提高机组可靠性的认知。

（万勇）

---

<sup>4</sup> Department of Energy Announces \$20 Million for Extreme Environment Materials for Power Generation.  
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-20-million-extreme-environment-materials-power-generation>

# 清洁能源多能互补

## 国际能源署发布可再生能源中期市场展望报告

10月30日，国际能源署（IEA）发布《2019-2024年可再生能源市场分析及展望》报告<sup>5</sup>，对未来五年电力、供暖和交通运输部门可再生能源的发展情况和趋势进行了分析与预测。报告指出，到2024年全球可再生能源发电装机容量将增长50%，其中光伏发电占到增量的60%，陆上风电占1/4。分布式光伏发电将出现爆发式增长，装机容量增长一倍以上。中国将占全球分布式光伏装机增量近一半，将于2021年超过欧盟领先世界，还将首次引领生物燃料产量增长。报告要点如下：

### 一、可再生能源发电

#### 1、未来五年可再生能源装机容量将大幅增长50%

2018年，可再生能源发电新增装机容量178吉瓦，与2017年相当，这是自2001年以来可再生能源发电装机增量首次没有提升，主要原因是中国政策转型导致光伏发电增长放缓，但可再生能源仍占2018年电力装机总增量的75%。预计2019年全球可再生能源装

机容量将恢复增长势头(+12%)，2020年可再生能源新增装机容量将达到创纪录的208吉瓦，然后到2021年有所下降。这一趋势的主

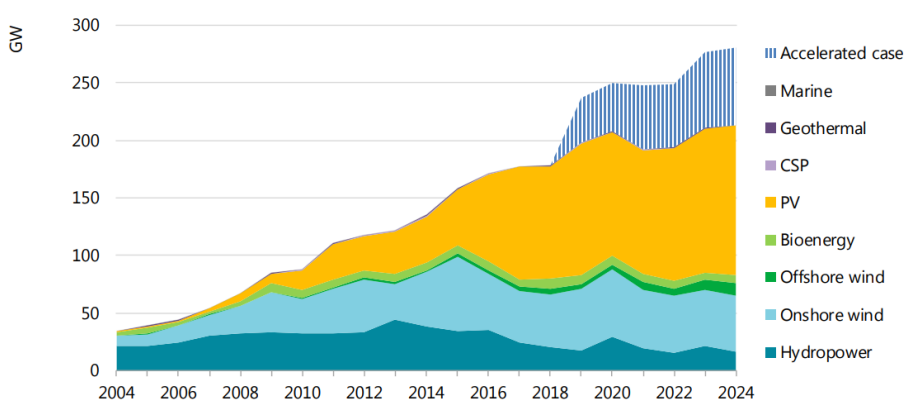


图1 可再生能源发电年度新增装机容量趋势（吉瓦）

要原因在于：（1）美国逐步取消风电生产税收抵免导致新增装机容量随之下降，其陆上风电新增装机容量到2020年达到顶峰；（2）中国几个大规模水电及抽水蓄能项目将在2020年投产。总体来看，2019-2024年，可再生能源装机容量将从2018年的2.5太瓦大幅增长近50%，其增量（1.22太瓦）占全球电力装机增量的2/3。中国仍是可再生能源发电的最大市场，其增量（489吉瓦）占到全球可再生能源装机增量的40%，其次是欧盟、美国和印度。

未来五年，太阳能光伏约占可再生能源装机增量的60%，其次是风能、水电和生物能源。光伏发电装机容量将增加2.5倍至接近1.2太瓦，公用事业规模光伏发电新增装机容量将占光伏装机增量的55%。中国将占全球光伏新增装机容量的40%以

<sup>5</sup> Renewables 2019: Market analysis and forecast from 2019 to 2024. <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>

上，其次是欧盟和美国。陆上风电装机容量将增长 57% 达到 850 吉瓦，受美国风电生产税收抵免政策取消及中国由上网电价（FIT）向竞争性拍卖的政策过渡影响，预计 2020 年全球陆上风电新增装机容量将达到近 60 吉瓦的顶峰，在其后的 2021-2024 年间年均新增装机容量将降至约 50 吉瓦。海上风电装机容量将增长近三倍（+43 吉瓦）达到 65 吉瓦，欧盟将贡献这一增量的一半，中国则是增速最为领先的国家，正在开发多个海上风电项目（总计 12.5 吉瓦）。水电仍将是重要的可再生能源，到 2024 年装机容量将增长 9%（+121 吉瓦），中国、印度和巴西将引领水电装机容量增长。生物质发电装机容量将增加 32% 达到 171 吉瓦，占可再生能源装机增量的 3%，其中中国贡献一半以上。地热发电装机容量将增加 28% 达到 18 吉瓦，亚洲占这一增量的 1/3。在中国和中东北非地区的部署推动下，全球光热发电装机容量将增长 60% 达到 9 吉瓦。海洋能发电仅在试点和小型项目的支持下略微增长 60 兆瓦。

## 2、可再生能源将是增长最快的发电来源

到 2024 年，可再生能源发电总量将超过 9000 太瓦时，其在全球发电总量中占比将从 2018 年的 25% 增长至 30%，煤炭占比将下降，天然气则将持平。可再生能源发电量年均增速达到 5.3%，超过全球电力需求增速（2.1%）的 2 倍。就增长幅度来看，2019-2024 年可再生能源发电量将增长 37%，增量（2450 太瓦时）占全球发电增量的 2/3，超过煤炭、天然气和核能之和。在所有可再生能源中，光伏发电量增量最多，其次是风电、水电和生物能源。光伏发电在 2018 年首次超过生物质发电成为第二大可再生能源。未来五年水电仍为最大的可再生能源电力来源。

到 2024 年，全球 75% 的可再生能源发电量集中在六个国家/地区，依次为：中国、美国、巴西、印度和日本。其中，可再生能源在巴西的电力结构中占比最大，将占其发电总量的 93%。欧洲的可再生能源发电占比在未来五年将增长 8%，到 2024 年将超过 40%，其主要来源于风电的增长。中国和印度可再生能源发电量的增长主要源于光伏和风能，增量超过了水电。美国的风电推动了其可再生能源发电量的增长，日本则由光伏发电引领其增长，到 2024 年两国可再生能源发电占比均超过 20%。

## 3、分布式光伏发电将成为焦点

家庭、商业建筑和工业领域的分布式光伏发电将强势增长，为电力系统带来巨大变化。到 2024 年分布式光伏发电装机容量将增长一倍以上达到 530 吉瓦，其增长与陆上风电相似，占光伏发电装机增量的一半。中国将占全球分布式光伏发电增量的一半，其装机容量将在 2021 年超过欧盟领先全球。分布式光伏发电的增长将主要由商业和工业部门主导，未来五年上述部门新增分布式光伏容量将占总增量的 3/4。到 2024 年全球约有 1 亿套家用屋顶太阳能系统投入使用，届时家用光伏系统将占分布式太阳能光伏装机总量的 1/4，家用光伏的人均容量排名前五的国家/地区将是澳大利亚、比利时、美国加利福尼亚州、荷兰和奥地利。



## 二、可再生能源供热

### 1、未来五年可再生能源供热占比仅小幅增长

2018 年供热占到全球终端能源消费量的 50%，是最大的终端能源用途，其碳排放量占全球的 40%。约有 50% 的供热需求来源于工业生产，46% 来自建筑物供热，其余用于农业（主要是温室）。化石能源仍为供热最主要的来源，可再生能源（不包括传统生物质）仅能满足全球热量需求的 10%。到 2024 年，用于供热的可再生能源消费将增长 22%，但其在供热部门的能源消费总量中占比仅将增至 12%。中国、欧盟、印度和美国将占全球可再生能源供热消费增量的 2/3。

### 2、生物能源将引领可再生能源供热增长

2018 年，现代生物能源占全球可再生能源供热消费的 2/3 以上，并将引领可再生能源供热的增长，未来五年可再生能源供热增长中近 2/3 将来源于现代生物能源。建筑供热中直接和间接消费的生物能源约占可再生能源供热消费的一半，未来五年欧盟将引领建筑供热的生物能源消费量增长，贡献超过一半的增量。2018 年太阳能热利用占可再生能源供热消费量的 7%，到 2024 年太阳能热利用的消费量将增长近 50%，其中大部分由建筑行业贡献，中国占全球增量的 40% 以上。地热能仅能满足全球 0.3% 的热量需求，预计到 2024 年其消费量将增长 40% 以上，其中近 2/3 的增长来自于中国和美国，预计欧盟在未来五年地热能供热消费量将增长近 270%。

### 3、可再生能源电力将在供热领域日益重要

到 2024 年，用于供热的可再生能源电力将增长 41%（增量相当于生物能供热），达到全球可再生能源供热消费量的 1/5。增长的主要原因是可再生能源在电力结构中占比增加，以及终端用能部门电气化程度的加深。中国、欧盟和美国将贡献近 2/3 的增长，其中中国的增长源于供热电气化和电热泵的普及，欧盟和美国则是由于可再生能源发电份额增加。可再生能源电力已成为建筑供热的第二大来源（落后于生物能源），预计未来五年可再生

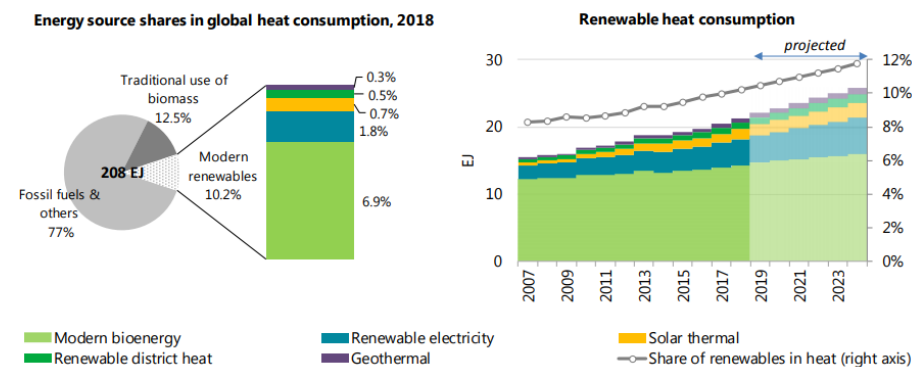


图 2 全球供热结构现状和可再生能源供热趋势预测

力最主要的工业消费国，占全球总量的 28%，在未来五年其工业供热的可再生能源电力消费将增长 60% 以上。

### 三、交通可再生能源应用

#### 1、亚洲将是可再生能源在交通领域增长的主要区域

2018 年，全球生物燃料产量增加 100 亿升达到创纪录的 1540 亿升，同比增长了 7%，是 2017 年的两倍，也是近五年来最高水平。其中，乙醇产量增加了 66 亿升（+6%），主要原因是巴西产量的显著提高，生物柴油和加氢植物油的总产量增加了 36 亿升（+9%），其中一半的增量来自美国。预计到 2024 年生物燃料产量将增长 25% 达到 1900 亿升，亚洲将占增量的一半。除生物燃料外，到 2024 年可再生能源电力将提供交通部门约 10% 的可再生能源，大部分来自中国。

#### 2、中国将首次引领生物燃料产量增长

中国将成为最大的生物燃料产量增长国，由于推行政策将汽油中乙醇掺混量提升至 10% 以及不断增加的投资，预计到 2024 年中国乙醇产量将增加两倍达到 110 亿升。巴西的增长位居第二，到 2024 年美国 and 巴西仍占生物燃料总产量的三分之二。

#### 3、加氢植物油生产提速，将增强与生物柴油的竞争

加氢植物油产量将增长一倍以上，从 2018 年的约 55 亿升增加到 2024 年的 130 亿升，其增量将占生物燃料产量增量的 1/5，将与生物柴油的贡献相当，成为先进生物燃料的最大来源。未来五年，欧盟和美国的政策驱动预计将促成 50 亿美元的新项目投资，大多数将使用废物和残渣原料，其中许多工厂还将生产航空生物燃料。

#### 4、即使快速发展，可再生能源在交通领域的应用仍极为有限

到 2024 年，可再生能源仅能满足运输燃料需求的 4.6%，因为大多数生物燃料指

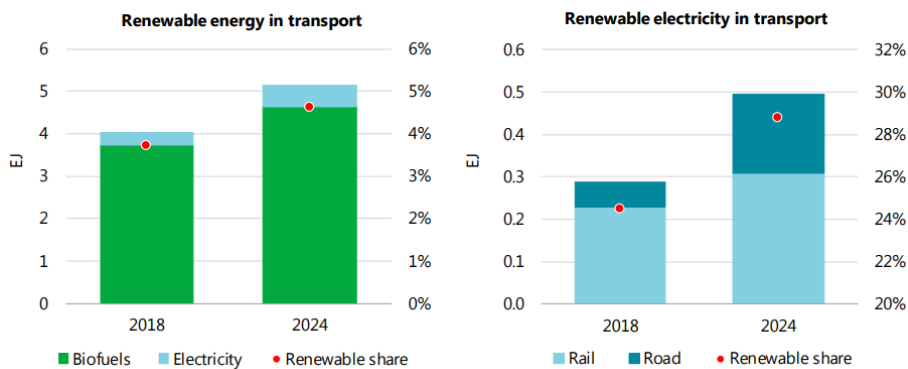


图 3 可再生能源及可再生电力在交通领域消费量的现状和预测

令要求掺混水平仅为 10% 以内。为了鼓励更高的生物燃料掺混水平，需要进行车辆测试，增加使用完全替代型燃料以及确保生物燃料可持续性的框架。电动汽车的贡献也越来越重要，到 2024 年，可再生电力将在交通运输中提供 10% 的可再生能源。

（周荷雯 岳芳）

## 欧盟七国拟资助 32 亿欧元推进电池全价值链研发创新

12月9日，欧盟委员会宣布通过一项“欧洲共同利益重要项目”（IPCEI）提案<sup>6</sup>，由比利时、芬兰、法国、德国、意大利、波兰和瑞典七国到2031年前共同投入32亿欧元公共资金，并将撬动50亿欧元的私人投资，推进电池全价值链的研发创新，以建立一个强大的泛欧电池生态系统。

该项目是2018年5月欧盟通过的《欧洲电池联盟战略行动计划》的一部分，将实施至2031年，有17个直接参与者（大多为企业，包括中小型企业）和70多个外部合作伙伴，如欧洲各地的中小企业和公共研究机构。欧盟七国将为该项目投入总计32亿欧元公共资金，包括：德国12.5亿欧元、法国9.6亿欧元、意大利5.7亿欧元、波兰2.4亿欧元、比利时8000万欧元、瑞典5000万欧元、芬兰3000万欧元。

该项目将支持开发高度创新和可持续的锂离子电池技术（液态电解质和固态电池），比现有技术更具耐用性、充电时间更短、更安全和环保，以实现整个电池价值链的创新，包括原材料开采和加工、先进化学材料生产、电池单元和模块设计、与智能系统的集成、废旧电池回收和再利用。此外，该项目还将改善电池价值链所有环节的环境可持续性。项目的具体研究领域包括：

**1、原材料和先进材料。**开发可持续的创新工艺，从矿石中提取、浓缩、精炼和提纯以生产高纯度的原料。开发电池电极和电解质先进材料，优化现有材料性能或开发新型材料，以用于创新型电池。

**2、电池单元与模块。**开发创新的电池和模块，以满足汽车和其他应用（如固定式储能、电动工具等）的安全性和性能要求。

**3、电池系统。**开发创新的电池系统，包括电池管理软件和算法，以及创新的测试方法。

**4、电池再利用、回收和提炼。**设计用于电池收集、拆卸、重新利用、回收和提炼材料的安全创新方法。

（岳芳）

## DOE 拨款 4000 万美元开展能源前沿研究中心第四轮资助

11月19日，美国能源部（DOE）宣布将在2020财年拨款4000万美元，开展能源前沿研究中心（EFRC）第四轮资助，持续支持部分现有EFRC同时停止其他EFRC的资助，并新成立若干EFRC，推进能源相关的前沿科学研究<sup>7</sup>，包括材料科学、电化学和光化学、地球科学、量子信息科学等。本次资助主要聚焦4大主题领

<sup>6</sup> State aid: Commission approves €3.2 billion public support by seven Member States for a pan-European research and innovation project in all segments of the battery value chain.

[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_19\\_6705](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_6705)

<sup>7</sup> DOE Announces \$40 Million for Energy Frontier Research Centers. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-40-million-energy-frontier-research-centers>

域，包括：聚合物材料的化学循环利用、微电子学基础研究、下一代量子系统基础研究和核废料环境管理基础研究。具体内容见表 1。

表 1 第四轮能源前沿研究中心资助研究主题具体内容

研究主题	具体内容
聚合物材料的化学循环利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>•掌握聚合物解构、重构和功能化的机制，实现将废旧聚合物（如塑料）高效转化为燃料或高价值化学品</li> <li>•众多塑料制品由多种聚合物制成，含有添加剂（如颜料和稳定剂）、填料和残留物，需要研究混合塑料高效分离、回收再利用技术</li> <li>•开发新型的下一代塑料材料，使其具有自我降解为单体结构的特性，实现材料低成本高效回收再利用</li> <li>•开发全新的原位表征方法和建模工具，探索研究聚合物大分子转化机制，实现对其转换机制的控制，为聚合物的循环再利用奠定理论基础</li> </ul>
微电子学基础研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>•重新理解和定义由应用、算法和软件驱动的材料、设备和体系结构研究需求</li> <li>•内存和数据存储技术创新，探索新型材料和物理方法，克服当下数据存储在本成本、密度和速度之间的取舍问题；探索新的体系结构，以实现计算与数据存储的三维集成</li> <li>•开发新型互连技术（如光互联），通过利用新的物理现象和新材料以及界面设计，减少信息传送信号损失和串扰影响，增加信息带宽和传输距离</li> <li>•利用新的物理现象和规律，构建全新的非冯·诺依曼架构计算机平台（如量子计算）</li> <li>•研究超宽带隙（UWBG）半导体材料，以及匹配 UWBG 半导体电路的电感和电容介质，应用于电网设施，实现电网改造升级</li> </ul>
下一代量子系统基础研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>•开展多体量子系统的动力学和量子纠缠研究，助力高效量子信息传递技术开发</li> <li>•利用量子效应，根据相应量子算法设计开发量子传感器，应用于量子控制过程中的测量</li> </ul>
核废料环境管理基础研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>•深入研究远离平衡态的异常核反应和异常能量输出现象，探索解决方法，减少核废料产生</li> <li>•深入研究核废料回收和处理过程中涉及到的一系列界面物理/化学反应，提高回收和处理效率</li> <li>•开发新型高效低成本核废料分离回收技术</li> <li>•研究极端环境下材料性能衰退机制</li> </ul>

**编者按：**美国能源部于 2009 年建立了能源前沿研究中心（EFRC）这一机制，依托大学、国家实验室等建立大量的小型研究中心，汇集了跨领域（不同学科）、跨机构（大学、国家实验室、非营利研究组织）的研究人员和资源，联合开展能源基础前沿研究。第一轮（2009-2014 年）资助的 EFRC 有 46 个，第二轮（2014-2018 年）资助的有 36 个，第三轮（2018-2022 年）资助的有 42 个，每个中心每年资助经费为 200-400 万美元，持续 4 年，到期后根据研究绩效与未来计划决定是否继续资助。

（张凯宏 郭楷模）

## DOE 资助 700 万美元支持地热开发利用技术研究

12月2日，美国能源部（DOE）宣布资助 700 万美元支持研发先进地热开发利用技术<sup>8</sup>，旨在提升地热钻井技术水平，降低地热勘探钻井过程中的风险和成本，提升地热资源开发利用效率。本次资助主要聚焦 3 大主题领域，包括：地热地质建模；地热井筒应力分析技术；地热井漏失管理。具体内容见表 1。

表 1 地热开发利用技术研发项目具体内容

研发主题	具体内容
地热地质建模	开发一个多物理场地热地质模型，能够模拟地热中应力的空间分布和时间演变，从而更好地了解地质构造应力场分布、地热流体动力学行为和热储特征，减少地热开发风险
地热井筒应力分析技术	开发一种基于定向压裂钻井技术的地热井筒应力分析测量技术，用于辅助形成高质量的地热储层
地热井漏失管理	针对在地热井施工中，钻探遇到大裂隙或溶洞时产生的钻井液严重漏失问题，开发新型的固井技术，以减少井漏、卡钻、填砾堵塞等事故的发生

（廖明月 郭楷模）

## 溶剂调谐实现室温快速制备大面积钙钛矿新工艺

有机无机杂化钙钛矿太阳能电池效率已突破 25%，接近晶硅太阳能电池，且制备工艺简单、成本低廉，被视为最有希望替代晶硅电池的新一代薄膜电池技术。然而，目前高效率钙钛矿太阳能电池器件主要局限在小面积尺寸（~0.1 cm<sup>2</sup>），且需要在惰性气氛中进行，不利于电池的规模化生产。因此，开发室温大面积钙钛矿太阳能电池制备工艺意义重大。

北卡罗来纳大学教堂山分校的 Jinsong Huang 教授课题组通过对钙钛矿前驱体溶剂的配位调谐，成功开发出了一种室温下快速制备大面积钙钛矿薄膜工艺，制备出了效率高达 16.4% 的大面积（63.7 cm<sup>2</sup>）钙钛矿太阳能电池器件，且该工艺具备良好的普适性，为钙钛矿太阳能电池商业化奠定了极为关键的技术基础。相关研究已表明，低挥发性钙钛矿前驱体溶剂（如二甲亚甲基亚砜[DMSO]等）会抑制室温下钙钛矿薄膜的快速结晶；而高挥发

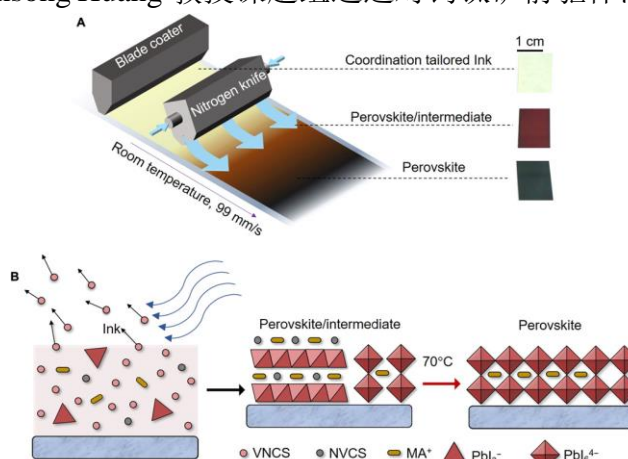


图 1 配位调谐溶剂用于室温大面积制备钙钛矿薄膜

<sup>8</sup> Department of Energy Announces \$80 Million For New Grid Modernization Lab Call Projects. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-80-million-new-grid-modernization-lab-call-projects>

性溶剂（如 2-甲氧基乙醇[2-ME]等）则相反，但会导致结晶质量偏低。为此，研究人员将上述两种高低挥发溶剂混合（其中挥发性溶剂体积占比 98%），以取长补短。随后研究人员分别以 DMSO、2-ME 和 DMSO/2-ME 溶液作为溶剂制备了钙钛矿前驱体，通过快速刮涂法制备了一系列的钙钛矿薄膜，随后置于 70℃加热台干燥结晶。扫描电镜测试发现，采用单独 DMSO 溶剂的薄膜干燥和结晶速度很慢，需要数十分钟；而采用单独的 2-ME 溶剂钙钛矿薄膜结晶速度很快，导致结晶质量不高，晶粒尺寸偏小（晶粒不大，晶粒越大缺陷越少）；而采用 DMSO/2-ME 混合溶剂钙钛矿薄膜在室温下实现了快速干燥和高质量结晶。且通过调整刮涂速度发现，单独溶剂所能承受的最快刮涂速度不超过 40 mm/s（超过这一阈值，无法形成致密薄膜），而混合溶剂刮涂速度上限可达 99 mm/s（速度快有助于节约生产时间提高经济收益）。为此，研究人员以上述 DMSO/2-ME 混合溶剂钙钛矿薄膜作为光敏层，制备了完整的电池器件，并进行了光电性能测试。结果显示，小面积（0.08cm<sup>2</sup>）器件获得了高达 21.3%的转换效率；研究人员进一步制备了 63.7 cm<sup>2</sup>的大面积器件，获得了 16.4%的高效率，经过连续 1000 小时的一个标准模拟太阳光辐照后器件仍可保持 87%的初始效率，表现出优异的稳定性。此外，为了探究器件适应真实温度环境能力，研究人员测试了工作温度从 25℃到 85℃变化过程中器件性能变化情况，结果显示器件温度系数仅为 0.13%/℃（即每升高 1℃效率仅衰减 0.13%），优于商用晶硅电池（0.44%/℃），且经过遮光后基本可以恢复初始效率。

该项研究将挥发性非配位溶剂和低挥发性配位溶剂混合使用，有效地改善了钙钛矿薄膜的结晶速度和质量，从而开发出一种室温下快速刮涂制备大面积钙钛矿的新工艺，制备的 63.7 cm<sup>2</sup>大面积器件获得了高达 16.4%的转换效率，且具备良好稳定性，为钙钛矿太阳能电池商业化奠定了关键技术基础。相关研究成果发表在《*Science Advances*》<sup>9</sup>。

（郭楷模）

---

<sup>9</sup> Yehao Deng, Charles H. Van Brackle, Xuezheng Da, et al. Tailoring solvent coordination for high-speed, room-temperature blading of perovskite photovoltaic films. *Science Advances*, 2019, DOI: 10.1126/sciadv.aax7537

# 低碳化多能融合

## ARPA-E 部署新项目推进数字技术在能源领域应用研究

11月19日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布在“智能设计促进节能减排和实现重大技术改进（DIFFERENTIATE）”主题计划框架下，资助1500万美元开展数字技术在能源领域的应用研究项目<sup>10</sup>，旨在整合公私研究力量，联合探索将人工智能、机器学习等数字技术引入到能源技术和产品设计研发当中，提升研究效率缩短研发周期，降低成本提升竞争力，维持美国在能源和数字技术的全球领先地位。本次资助项目具体内容参见表1。

表1 DIFFERENTIATE 主题计划本次资助项目具体研究内容

承担机构	研究内容	资助金额 /万美元
国家可再生能源实验室	<ul style="list-style-type: none"><li>•利用机器学习技术图像神经网络算法开发模型工具，实现电池材料和组分的快速筛选，以及性能的高精度预测，缩短研发周期</li><li>•利用深度机器学习技术开发湍流模型，用于辅助风力涡轮机的设计研发，实现对涡轮机性能的低成本高效改进</li></ul>	105
西北大学	利用机器学习开发一个混合变量概念设计框架，用于指导新型高性能低能耗微电子材料的高效合成，提升研发效率	57
爱荷华州立大学	利用机器学习开发一个逆向设计模型工具，用于光伏器件的逆向设计工程，以快速开发出新型高性能新架构太阳能电池器件	60
麻省理工学院	<ul style="list-style-type: none"><li>•基于高斯过程和卷积神经网络方法开发模型，模拟沸腾传热过程，实现对这一过程的快速优化，提高热能传输效率，用于核电和工业蒸汽发电，提升发电效率</li><li>•利用生成模型和卷积神经网络开发一种催化剂材料研发框架，该框架涵盖了实验室测试和工业生产原型过程，从而实现对非铂族过渡金属氧化物催化剂最优组分的快速甄别和筛选，加快新型低成本高性能催化剂研发</li></ul>	178
密歇根大学迪尔伯恩分校	利用决策树、监督学习和强化学习方法，开发设计工具实现电力转换器新架构的快速研发和性能评估，缩减研发周期，降低成本	66
卡内基梅隆大学	<ul style="list-style-type: none"><li>•利用深度强化学习技术预测催化剂在反应条件下的表面稳定性，克服传统方法困境和成本高昂问题</li><li>•围绕电催化系统和下一代电池系统，开发一个集成机器学习的加速设计和优化工作流程，提升候选材料筛选速度，并模拟和预测电池性能，增加研发创新效率</li></ul>	110
茱莉娅计算公司	利用机器学习开发建筑供暖、通风和空调（HVAC）系统模型，优化 HVAC 系统效能，减少能耗	112

<sup>10</sup> Department of Energy Announces \$15 Million for Development of Artificial Intelligence and Machine Learning Tools. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-15-million-development-artificial-intelligence-and-machine>

马里兰大学	利用生成对抗网络设计一种反向设计工具, 实现在给定环境和性能指标前提下, 快速反向设计出涡轮叶片材料和组件	43
洛斯阿拉莫斯国家实验室	基于物理知识和机器学习模型, 提高从非常规油气藏中开发提取石油和天然气的效率, 同时减少开发过程的环境影响	90
德克萨斯大学奥斯汀分校	创建高效、准确、可扩展的深度神经网络 (DNN) 设计优化解决方案, 用于机翼空气动力学研究, 以获得最佳的机翼设计和性能	65
IBM 研究中心	利用强化学习开发电力转换器设计工具, 实现对设计性能的仿真模拟评估, 指导实验室的设计开发, 减少开发时间和资金成本	40
斯坦福大学	利用生成神经网络算法对纳米光子器件设计架构进行全局优化, 利用机器学习来加速电磁场计算的求解过程, 以加速开发高效低能耗的基于光互联的信息处理和通信系统	40
密苏里大学	利用深度学习方法来预测蛋白质间氨基酸相互作用, 并构建蛋白质复合物三维结构, 用于生物催化反应, 助力生物能源研发创新	17
联合技术研究中心	<ul style="list-style-type: none"> <li>•利用约束规划、生成模型、降阶模型、主动学习等一系列技术来指导设计最佳的功率变换器电路拓扑结构, 加速新架构功率转换器的设计研发</li> <li>•利用机器学习技术和高仿真建模指导高效多级压缩机的设计研发, 减少研发成本和周期</li> </ul>	120
通用电气研究中心	<ul style="list-style-type: none"> <li>•将多物理拓扑优化的最新进展和机器学习训练大量数据结合, 优化涡轮机机械部件设计和增材制造工艺, 提升涡轮机热力学性能, 同时降低研发成本和时间</li> <li>•围绕工业燃气轮机、航空发动机、风力涡轮机研发, 利用机器学习技术开发一个逆向设计框架, 以性能为输入, 以最终工程设计为输出, 实现工程设计快速研发和优化</li> </ul>	136
普林斯顿大学	开发一个高度自动化、开源、基于机器学习的磁学设计平台, 加速电力电子技术中高性能磁性材料研发	29
劳伦斯伯克利国家实验室	利用机器学习工具来提高光学超材料设计研发效率, 预计比现有传统研发方法速度至少提升 1 万倍	80
西北太平洋国家实验室	开发集成物理信息的机器学习工具, 指导下一代天然气电力转换系统研发	40

(郭楷模)

## 超结构克服过渡金属氧化物正极材料首圈循环电压损失问题

富含碱金属的过渡金属 (TM) 氧化物插层正极材料可以通过发生氧阴离子 ( $O^{2-}$ ) 和过渡金属 (TM) 离子的氧化物还原, 在氧化物或过渡金属离子中储存电荷, 从而有效增加锂离子 ( $Li^+$ ) 和钠离子 ( $Na^+$ ) 电池的能量密度。然而目前研究显示电池第一圈循环中, 触发氧的氧化还原反应电压会产生较大的损失, 且无法恢复, 导致性能不断衰减。因此解决第一圈循环电压损失成为改善上述类型电池性能关键。



牛津大学 Peter G. Bruce 教授课题组通过控制电极超结构，为解决过渡金属氧化物正极材料首圈循环电压损失问题提供了全新的解决策略。研究人员首先制备了两个组成成分非常相似的插层正极材料，即钠离子掺杂的锂锰氧 ( $\text{Na}_{0.75}[\text{Li}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}]\text{O}_2$  和  $\text{Na}_{0.6}[\text{Li}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}]\text{O}_2$ )，随后将电极用于组装电池并进行电化学性能测试研究。实验发现，在第一圈充放电循环中， $\text{Na}_{0.75}[\text{Li}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}]\text{O}_2$  的电压损失与  $\text{Na}_{0.6}[\text{Li}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}]\text{O}_2$  的电压损失情况明显相反，尽管其元素成分非常相似。为了探究潜在的原因，研究人员采用扫描透射电镜 (STEM) 对电极结构进行表征，发现它们表现出不同的超结构，特别是 TM 层中 Li 和 Mn 的不同排列形式。其中  $\text{Na}_{0.75}[\text{Li}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}]\text{O}_2$  具有蜂窝状超结构，这种结构普遍存在于氧化物插层正极材料；而  $\text{Na}_{0.6}[\text{Li}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}]\text{O}_2$  则显示出完全不同的由 Mn 元素沿着 [010] 方向组成带状超结构。环形暗场扫描透射电子显微镜 (ADF-STEM) 数据表明， $\text{Na}_{0.75}[\text{Li}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}]\text{O}_2$  充电至 4.5 V 后，蜂窝状超结构几乎完全消失，也即结构有序性遭到了破坏。放电到 2 V 时有序结构完全消失。与此相反，在  $\text{Na}_{0.6}[\text{Li}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}]\text{O}_2$  中，沿着 [010] 方向，与带状超结构相关的四原子 (Mn-Mn-Mn-Mn) 构型仍然保留。上述结果表明蜂窝状超结构在充电时不稳定，核磁共振谱显示一方面一部分  $\text{O}^{2-}$  被氧化成  $\text{O}_2$ ，另外 Mn 离子不可逆面内无序迁移改变了  $\text{Na}_{0.75}[\text{Li}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}]\text{O}_2$  电极中  $\text{O}^{2-}$  周围配位环境，使得蜂窝状结构遭到破坏，进而导致放电过程中的电压下降；相反， $\text{Na}_{0.6}[\text{Li}_{0.2}\text{Mn}_{0.8}]\text{O}_2$  电极的带状超结构有效地抑制了 Mn 离子不可逆面内无序迁移，从而保持了  $\text{O}^{2-}$  周围稳定配位环境，抑制了  $\text{O}_2$  形成，保障了放电电压稳定。

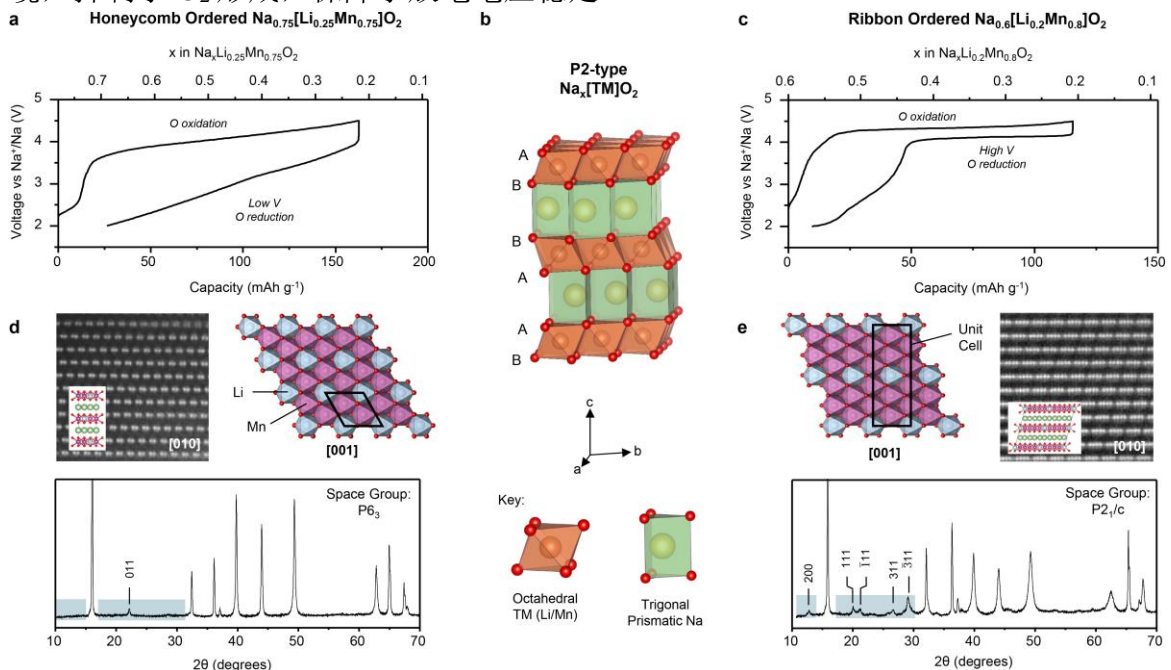


图 1 两种超结构正极材料

该项研究通过制备不同超结构过渡金属氧化物正极材料并组装成完整电池器件，结合一系列表征手段进行对比研究，揭示了上述正极材料第一圈电压损失取决于材料内部形成的超结构，为设计开发高能量密度的富锂正极材料指明了方向。相关研究成果发表在《Nature》<sup>11</sup>。

(周斌 郭楷模)

## 钴基核壳结构电催化剂实现高效稳定氧催化还原

电催化氧还原是燃料电池中的关键过程，其能否高效进行将直接影响燃料电池的能量转换效率。然而，氧还原反应（ORR）动力学过程非常迟缓，需高度依赖资源稀少和价格高昂的 Pt 系贵金属催化剂，这使得燃料电池成本一直居高不下，因此开发高效低成本的非贵金属催化剂成为该领域研究热点。

康奈尔大学 Hector D. Abruna 教授研究团队在碳载体（C）上设计制备了一种氮化钴（ $\text{Co}_x\text{N}$ , X 代表不同摩尔比）电催化剂，通过对合成元素的摩尔比调控获得了性能最优的  $\text{Co}_4\text{N}/\text{C}$  催化剂，表现了出极其优异稳定的 ORR 活性，半波电位仅为 0.875 V，媲美商用的 Pt/C 催化剂（0.89 V），且经过 10 000 余次循环后性能基本没有衰退，为开发设计高效的燃料电池指明新方向。研究人员首先将碳载体置于氨气（ $\text{NH}_3$ ）氛围中进行氮化处理，通过调节反应温度获得了沉积在碳载体上不同摩尔比  $\text{Co}_x\text{N}/\text{C}$  催化剂。通过 X 射线衍射表征，反应产物均为纯相结构，且随着温度不断升高（ $300^\circ\text{C} \rightarrow 360^\circ\text{C} \rightarrow 460^\circ\text{C}$ ），Co/N 摩尔比 X 随之增加，

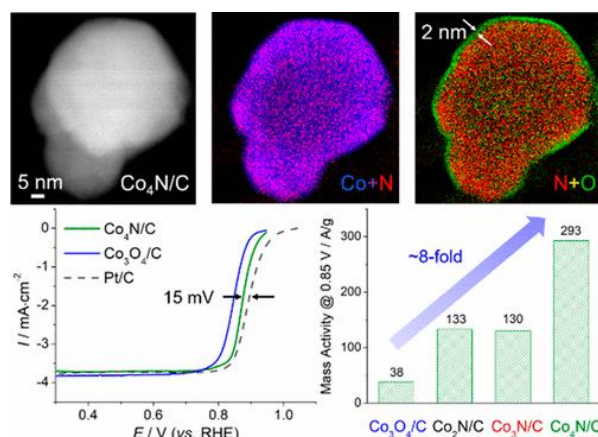


图 1  $\text{Co}_x\text{N}/\text{C}$  微结构及电化学性能表征

从 2 增加到 3 再增加到 4，表明在较高温度下氮元素会逐渐从氮化钴复合物晶体中流失。通过透射电镜-电子能量损失谱表征显示，在  $\text{Co}_x\text{N}$  晶体外围均衡包覆一层很薄（约 2 nm）的氧化钴壳层，这一薄层可以作为保护层保护内部的  $\text{Co}_x\text{N}$  催化剂保持催化活性。接着研究人员利用旋转圆盘电极（RDE）系统测试了上述不同摩尔比的  $\text{Co}_x\text{N}/\text{C}$  催化剂的 ORR 催化活性。实验结果显示，三种催化剂具有类似的扩散限制电流密度，表明了三种催化剂都呈现出典型的四电子氧化还原过程；但与  $\text{Co}_2\text{N}/\text{C}$ 、 $\text{Co}_3\text{N}/\text{C}$  相比， $\text{Co}_4\text{N}/\text{C}$  的催化活性得到显著增强，其半波电位为 0.875 V，与商用的 Pt/C（0.890 V）相当；而与实验广泛报道的氧化钴（ $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{C}$ ）相比， $\text{Co}_4\text{N}/\text{C}$  催化剂的质量催化活性增长了 8 倍，性能提高主要归因于其独特的氮化物核和氧化物壳独

<sup>11</sup> Robert A. House, Urmimala Maitra, Miguel A. Pérez-Osorio, et al. Superstructure control of first-cycle voltage hysteresis in O-redox cathodes. *Nature*, 2019, DOI: 10.1038/s41586-019-1854-3

特结构。研究人员进一步研究了催化剂的稳定性，在 0.6-0.95 V 电压窗口进行了 10 000 余次循环，Co<sub>4</sub>N/C 催化剂半波电位仅仅衰减 14 mV，甚至优于商用 Pt/C 催化剂（衰减 17 mV），表现出了极其优异的循环稳定性。

该项研究设计制备了一种新型非贵金属的钴基核壳结构电催化剂 Co<sub>4</sub>N/C，其独特的核壳结构在增强催化性能基础上有效地保护了催化剂活性和稳定性，获得了高效稳定的氧催化还原特性，为设计开发高效燃料电池催化剂提供了新思路。相关研究成果发表在《*Journal of the American Chemical Society*》<sup>12</sup>。

（郭楷模）

---

<sup>12</sup>Yao Yang, Rui Zeng, Yin Xiong, et al. Cobalt-Based Nitride-Core Oxide-Shell Oxygen Reduction Electrocatalysts, *Journal of the American Chemical Society*, 2019, DOI:10.1021/jacs.9b10809

# 能源战略研究

## 美能源信息署发布报告展望至 2050 年全球能源发展趋势

9月24日，美国能源部能源信息署（EIA）发布《国际能源展望 2019》<sup>13</sup>，采用情景模型分析方法对主要国家和地区到 2050 年的全球能源消费、供应、结构变化等因素进行系统展望。报告指出，无论何种情景，伴随发展中国家经济（尤其是亚洲发展中国家）蓬勃发展，全球经济将持续增长，推动未来 30 年全球能源需求继续增长。报告要点如下：

### 1、至 2050 年全球能源持续增长，但各地区情况不一

在参考情景中，到 2050 年世界能源消费总量预计增长近 50% 至 911 万亿英热单位，大多数增长来自非 OECD 国家，预计增长约 70% 至 624 万亿英热单位，主要原因是这些国家经济和人口增长强劲；而同期 OECD 国家预计仅增长 15% 至 287 万亿

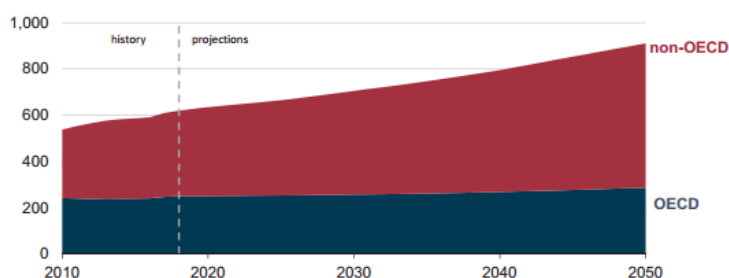


图 1 2010-2050 年 OECD 和非 OECD 国家能源消费量发展趋势（单位：万亿英热单位）

英热单位，归因于这些国家已经是成熟的市场，经济和人口增长缓慢，且能效提升显著。而就非 OECD 国家而言，主要的增长动力来自亚洲国家，展望期内（2018-2050 年）该地区的能源需求预计将增长近一倍，成为世界上能源消费增长最快、消

费规模最大的地区。就该地区国家而言，中国能源消费增速将逐步放缓，但至 2050 年中国的工业能源消费仍居世界首位。印度则出现快速增长，预计年均增幅 3.4%，从 2018 年的 16 万亿英热单位增长到 2050 年 47 万亿英热单位。

### 2、至 2050 年工业部门仍将是终端能源消费主体

<sup>13</sup> International Energy Outlook 2019 with projections to 2050. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>

展望期内，工业部门（如炼油、采矿、制造业、农业和建筑业）仍将是最大的终端用能部门，预计该部门能源消费量将增长30%以上，达到315万亿英热单位，将占到全球终端用能增量的50%以上。能源消费量增长主要原因是经济

活动强劲，展望期内各行业的总产值预计将翻一番，而其中约一大半的增长与工业活动有关。其余的增长来自服务业和非工业其他经济活动。工业部门用能增长大多发生在非OECD国家。在参考情景中，非OECD国家工业部门能源消费量的年均增幅预计超过1.0%，而同期OECD国家消费量的年均增幅预计不到0.5%。至2050年，交通部门能源需求预计增长77%，增长主要归因于非OECD国家的交通运输能源消费继续增长，预计届时上述国家将占世界交通运输能源消费总量的近65%。同期，OECD国家交通运输能源消费量预计保持稳定。建筑（住宅和商业）部门的能源消费预计以年均1.3%的增速增长，从2018年91万亿英热单位上升到2050年的139万亿英热单位，使得建筑部门在全球能源消费总量中的占比从2018年的约20%增加到2050年的22%。与其他部门类似，非OECD国家也是建筑部门能源消费增长的主要驱动力，预计以每年约2%的速度增长，约为OECD国家的5倍（0.4%），且到2025年非OECD国家建筑能耗预计就会超过OECD国家。

### 3、可再生能源快速增长，但化石能源依旧是能源消费结构的主体

就能源结构而言，展望期内可再生能源消费预计比化石能源增长更快，但到2050年化石能源依旧是能源消费结构主体，其在能源消费总量中的占比仍将超过70%。

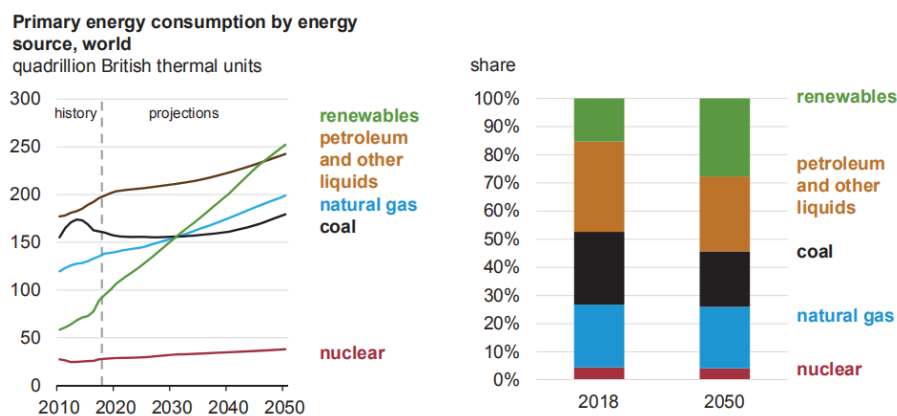


图3 2010-2050年一次能源消费中不同能源消费量和占比发展趋势（单位：万亿英热单位）

在化石燃料中天然气消费增长最快，年均增幅预计达到1.1%，高于液体燃料（0.6%）和煤炭（0.4%）；到2050年全球天然气消费量预计增长超过40%，达到近

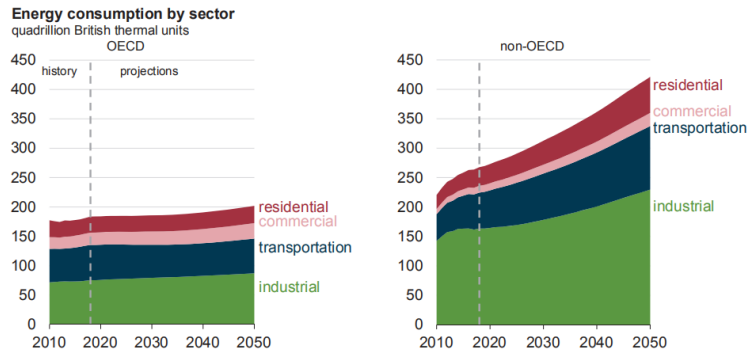


图2 2010-2050年OECD和非OECD国家不同终端用能部门能源消费量发展趋势（单位：万亿英热单位）

200 万亿英热单位。大部分增长来自非 OECD 国家，展望期内上述国家天然气消费量预计增长 70%至 120 万亿英热单位，同期 OECD 国家消费量预计增长 17%至 78 万亿英热单位。油价的上涨一定程度上会驱使能源用户从液体燃料转向其他替代燃料以及采取节能技术，但到 2050 年全球液体燃料消费仍将增长，预计增长 20%至 240 万亿英热单位。受到非 OECD 国家煤炭需求增长驱动，到 2050 年全球煤炭消费量预计增长至 90 多亿吨。展望期内，可再生能源是增长最快的能源，预计年均增幅 3%，到 2050 年将成为占比最大的一次能源（占比超过 25%）。同期，核电预计每年增长 1%，到 2050 年其在一次能源占比预计达到 5%左右。

#### 4、电气化水平不断提升，电力在能源供应体系中的地位提高

提高电气化水平是未来世界能源发展的主要趋势之一。越来越多的常规能源通过转化为电力在终端利用，风能、太阳能等也主要是通过转化为电力得到利用，因此主要用来发电的能源占一次能源消费比重将稳步提高。展望期内，非 OECD 国家的发电量预计将以年均 2.3%的增速增长，而 OECD 国家为每年 1.0%。发电量的增长大部分是由可

再生能源和天然气推动的，到 2050 年它们在总发电量中所占的比例预计上升到 70%。期间，可再生能源（包括水电）将是增长最

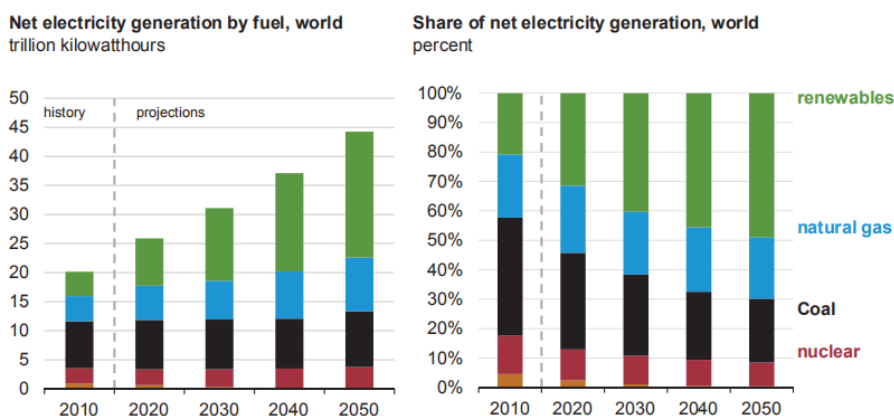


图 4 2010-2050 年不同能源发电量和占比发展趋势（单位：万亿千瓦时）

快的发电来源，平均每年增长 3.6%，主要原因是技术进步（促使成本下降）和政府政策支持。参考情景显示，到 2025 年可再生能源将超过煤炭成为主要电力来源，到 2050 年可再生能源预计占世界发电总量的一半。同期，天然气发电量预计以年均 1.5% 的增幅增长，核能发电量预计以年均 1.0% 的增幅增长。燃煤发电量预计保持相对稳定，但随着发电总量的增加，其占比预计将从 2018 年的 35% 下降到 2050 年的 22%。

（郭楷模）

## 世界能源理事会预测 2030 年全球储能发展趋势

11月15日，世界能源理事会（WEC）发布《储能监测：2019 发展趋势》报告<sup>14</sup>，从储能部署、价格、政策、监管和商业模式等方面，分析了到 2030 年世界储能市场的发展趋势。报告指出，全球储能部署规模持续快速扩大，除各种储能技术的不断发展，以及成本的不断降低外，政府支持政策也起到至关重要的推动作用。报告总结了欧盟、美国、英国的储能政策框架，为全球储能发展提出了指导性建议。具体内容如下：

### 一、全球储能市场现状及预测

#### 1、全球储能装机容量正以指数速度增长

2018 年，全球储能新增装机容量达到 8 吉瓦，较 2017 年翻了一番。抽水蓄能占

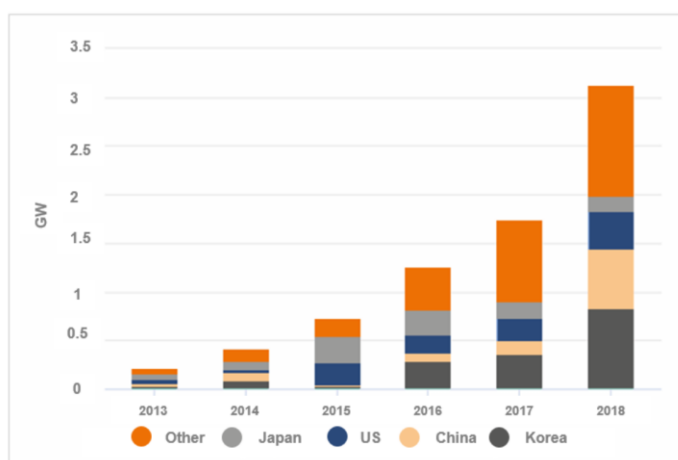


图 1 全球储能新增装机容量（单位：吉瓦）

储能装机总量的 96.2%，电化学储能（如电池）的发展潜力最大，飞轮储能等机械储能也存在巨大的发展前景。2018 年，韩国成为抽水蓄能以外其他储能技术装机容量最大的国家，对电力供应侧和需求侧的大规模监管改革和激励政策是其储能技术发展的主要推动力。到 2030 年，全球储能装机总量将达到

250 吉瓦。

#### 2、在成本下降和政府支持性政策的推动下，储能市场正在快速增长

到 2022 年，储能系统的成本将以每年 8% 的速度下降。到 2030 年，电池储能系统的安装成本将下降 50%-66%。用户侧储能已超过公用事业规模储能的装机容量，其中韩国、澳大利亚、日本和德国增长最快。预计未来十年，安装在用户侧的所有可再生能源发电装置中有 70% 将配备储能装置。

#### 3、系统平衡部件成本下降使公用事业规模储能系统成本每年下降超过 20%

在各类储能技术中，抽水储能的成本最低（21 美元/千瓦时），其次是压缩空气储能（53 美元/千瓦时）。锂离子电池等电化学储能的安装成本仍然较高，但在存储和释放能量方面效率更高，使其具有更广泛的应用潜力。锂离子电池成本也在快速下降，预计到 2030 年其安装成本将由 2016 年的 1050 美元/千瓦时降至 478 美元/千瓦时。由于锂离子电池成本下降速度超过预期，使其在多个主要能源市场成为天然

<sup>14</sup> Energy Storage Monitor Latest trends in energy storage | 2019.  
[https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM\\_Final\\_Report\\_05-Nov-2019.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM_Final_Report_05-Nov-2019.pdf)

气发电厂的有力竞争对手。预计到 2026 年，公用事业规模风能和太阳能发电相关储能设备的年收益将达到 96 亿美元，同期用户侧储能的年收益则将超过 130 亿美元。

## 二、监管框架

### 1、监管机构对于推动市场发展和促进先进能源系统的应用至关重要

电力部门向可再生能源系统转型过程中，需要以最低成本保证电力可靠性、电力资源的充足性和电力系统质量（资源的正确组合以确保供需平衡）。正确的监管对于提升电力系统的灵活性极为重要。在技术方面，可以提供更快的响应时间和爬坡时间。在经济方面，以用户为中心的解决方案，包括新业务模式和新技术，例如储能、逆变器控制和负荷控制等，可在电力供应链中获得收益。

### 2、推动储能发展的典型政策措施

(1) 欧盟消除了储能等技术提供电网灵活性的市场壁垒。欧盟委员会近期修订了电力市场指令，以应对欧盟能源市场的设计要求，并允许储能进入。该指令制定了更严格的规则，符合欧盟的供应安全和减排目标。拟议中的欧盟指令提出要求成员国制定电动汽车和储能的相关规定。新的市场设计应为储能提供技术和市场条件，包括引入智能电网和智能电表。此外，在规划电网发展时，输电系统运营商必须考虑将储能作为电网扩展的替代方案。

(2) 美国联邦能源监管委员会的 841 号指令要求区域输电组织和独立系统运营商修改现有的市场规则，允许储能全面参与电力批发市场、发电市场、辅助服务市场等。845 号指令修改了大型发电机的互连过程，要求包括储能设备和混合能源系统，允许互连的服务设备容量小于发电设备容量，以及过剩的互连服务可在现有连接点使用。

(3) 英国天然气和电力市场办公室在 2018 年 10 月更新了“智能系统和灵活性计划”，消除智能技术（如储能）的市场障碍。该计划提出将储能定义为发电资产的一部分，通过提高现金结算价格和鼓励投资灵活性产能进而促进储能技术，还提出了进行“增强频率响应”项目招标。

## 三、融资机制

### 1、绿色能源融资可以促进绿色解决方案的应用，并增强技术创新

对可再生能源的长期投资可能需要政府参与制定政策和监管框架，这将确保环境的可持续发展。政府在引导向清洁能源解决方案过渡方面发挥着最关键的作用，通过建立政策框架和必要的市场法规，为私营部门的参与者提供财政支持，或者直接投资清洁能源项目。

### 2、在向清洁能源转型过程中，国际机构和投资者的作用仍然至关重要

当前储能技术正飞速发展，国际参与者正在努力调整其倡议范围，支持将储能作为独立技术或与可再生能源发电相结合。



#### 四、政策建议

•推动建立一种伙伴关系模式，围绕储能展开讨论，以提出通过储能提升电网灵活性和稳定性的可实施、开创性的解决方案。

•通过债务和股权等方式进行融资，而非通过金融股权进行融资，同时还需探索可扩展和可复制的商业模式。

•通过可靠的授权和补贴政策直接支持储能。

•将储能作为辅助服务的一部分，以减少监管障碍。

•将储能作为电网扩展的关键组成部分。

•推动政府计划之外的储能项目。

•探索最佳的长期储能技术，并进一步开发锂离子电池以外的储能技术以提高成本竞争力。

(张凯宏 岳芳)

## IRENA：释放太阳能光伏潜力 助推全球能源转型

11月15日，国际可再生能源机构（IRENA）发布《太阳能光伏未来发展前景》<sup>15</sup>报告指出，化石燃料向可再生能源转型对于实现《巴黎气候协定》碳减排目标、构建可持续未来能源系统至关重要，而太阳能光伏发电的稳步增长将在其中发挥关键作用。报告从太阳能光伏的部署、投资、技术、电网集成和社会经济性方面进行系统分析，提出了在2050年之前充分释放全球太阳能光伏潜力的方案，以充分发挥光伏在促进能源转型和应对气候挑战方面的作用。主要内容如下：

### 一、加速太阳能光伏部署，让世界走上实现“巴黎气候协定”目标的正确道路

1、加快可再生能源部署进程，加上深度电气化发展和能效的不断提高，有望到2050年帮助全球减少90%以上的能源相关CO<sub>2</sub>排放量。在所有低碳技术方案中，仅加速太阳能光伏部署，到2050年就可以为全球减少49亿吨CO<sub>2</sub>排放，占能源行业减排潜力总量的21%。

2、要实现《巴黎气候协定》目标，就需要加速各行业和各种技术发展。到2050年，太阳能光伏发电将成为仅次于风能的第二大电力来源，并引领全球电力行业转型。届时，太阳能光伏发电将满足全球四分之一的电力需求，成为主要的发电来源之一。

3、只有在下一个三十年中显著扩大太阳能光伏部署，才能实现能源转型目标。而这意味在未来十年内，需要将太阳能光伏装机总量增加近六倍，从2018年的480吉瓦增加到2030年的2840吉瓦，到2050年则进一步增加到8519吉瓦，几乎是2018年的18倍。而从年均增幅来看，与当前的水平（2018年增加94吉瓦）相比，

<sup>15</sup> Future of Solar Photovoltaic.

<https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>

到 2030 年年均增幅需要增加近三倍达到每年 270 吉瓦，到 2050 年则需要增长四倍达到每年 372 吉瓦。由于其模块化和分布式的特点，太阳能光伏技术非常适合各种离网和分布式区域应用。在过去的十年中，离网型太阳能光伏的全球装机容量增长了十倍以上，从 2008 年的约 0.25 吉瓦增至 2018 年的近 3 吉瓦。离网型太阳能光伏发电是实现能源全面普及和可持续发展目标的关键技术。

4、就区域而言，亚洲有望成为推动太阳能光伏发电增长的核心力量，并成为全球光伏发电的领导者。就装机总量而言，亚洲（主要是中国）将继续主导太阳能光伏发电增长，到 2050 年其在全球光伏装机总量的份额将超过 50%，其次是北美（20%）和欧洲（10%）。

## 二、扩大太阳能光伏产业投资对于加速未来十年的部署增长至关重要

1、从全球来看，到 2050 年太阳能光伏年均投资增长率要达到 68%（约 1920 亿美元/年）才能实现上述部署目标，而 2018 年全球太阳能光伏投资总额为 1140 亿美元。部署规模的扩大和技术的进步将推动太阳能光伏成本不断下降。在全球范围内，太阳能光伏项目的总安装成本将在未来三十年内继续下降；这将使太阳能光伏市场竞争力不断增强，到 2030 年平均总安装成本将下降至 340-834 美元/千瓦，到 2050 年则将进一步下降至 165-481 美元/千瓦，而 2018 年该数值为 1210 美元/千瓦。与所有化石燃料发电相比，太阳能光伏发电的平准化度电成本(LCOE)已经具有竞争力，随着安装成本和性能的不断改进，该成本还将进一步下降。在全球范围内，太阳能光伏的 LCOE 将继续从 2018 年的平均 0.085 美元/千瓦时下降到 2030 年的 0.02-0.08 美元/千瓦时，到 2050 年则进一步下降至 0.014-0.05 美元/千瓦时。

2、由于整个价值链的创新和成本快速下降的可预见性，太阳能光伏产业是一个快速变化的行业。就目前而言，第一代光伏技术仍然是太阳能产业发展的主要驱动力，占据着大部分市场。尽管从长远来看，叠层太阳电池和钙钛矿太阳电池技术具有广阔的应用前景，但在实现商业化应用前仍然有许多挑战需要解决。此外，新型电池架构的出现，如双面进光太阳电池、钝化发射极背面接触电池（PERC）等，使得获得更高光电转换效率水平成为可能，给晶硅电池市场带来挑战，推动市场发生变革。

3、当前全球太阳能光伏发电装机容量处于快速增长发展态势，这种强劲需求增长有助于推动技术创新进步。其中一个典型案例是建筑集成光伏（BIPV）。BIPV 解决方案具有多项优势，如多功能性（可适应各种表面）、成本效益（节省屋顶材料、人工费用、翻新成本），以及尺寸、形状和颜色设计灵活性等。

4、在过去几十年中，太阳能电池板的效率和输出功率大幅提升。2018 年，商用多晶光伏模块的效率已达到 17%，而单晶光伏模块的效率则达到 18%，这种积极发展趋势预计将持续到 2030 年。然而，随着全球光伏市场的增长以及循环经济概念的

出现，减缓太阳能电池板性能衰退和管理大量退役太阳能电池板日益引发关注，这包括减少材料使用和防止组件性能退化的创新方法，以及太阳能电池板的回收利用。

### 三、技术进步、良好市场环境和健全政策支持有助于充分释放太阳能光伏潜力

1、技术解决方案以及良好的市场环境对于未来电网集成占比不断提高的太阳能光伏至关重要。为了有效地管理大规模波动性可再生能源并网问题，必须充分利用能源系统各个部门的灵活性，从发电到输配电系统、储能系统、以及需求侧管理和部门集成耦合。2017年，可再生能源在一些国家占比进一步增长，尤其是欧洲国家。其中，丹麦可再生能源份额达到53%，立陶宛、爱尔兰、西班牙和德国的份额均超过20%。在全球范围内，到2050年如果要实现60%的可再生能源并网集成（其中25%来自太阳能光伏），这就要求电网、发电和一些灵活性措施（储能）的年均投资要比2018年增加四分之一以上，达到3740亿美元/年。

2、太阳能光伏的创新商业模式和成本竞争力正在推动系统成本下降。近年来，屋顶太阳能光伏系统的部署规模大大增加，这要归功于净计量电价和财政激励等支持性政策，让光伏发电经济性在某些市场优于电力购买协议（PPA）的光伏电力价格。随着在巴西、中国、德国和墨西哥等大型市场中的部署不断增加，分布式太阳能光伏的竞争力得到了明显增强。然而，各国之间仍存在重大差异，这也凸显了进一步改善的潜力。

3、如果有健全的政策配合，发展太阳能光伏还能带来社会经济效益。到2050年，太阳能行业从业人员预计将超过1800万人（其中太阳能光伏占到1400万人），比2018年的440万人（太阳能光伏360万人）高出三倍以上。但是，为了使能源转型的成果最大化，需要一个全面的政策框架。在扶持性政策的保护下，需要特别关注工业、金融、教育和技术政策，以最大限度地提高转型效益。教育和技术政策可以帮助劳动力具备适当的技能，并会增加当地就业机会。同样，建立健全的产业政策，可以通过利用现有的经济活动来支持太阳能光伏产业的发展，从而实现收入和就业增长。

4、释放太阳能光伏的巨大潜力对于实现气候目标至关重要。只有通过不同维度（政策、市场、经济、技术、监管、政治等）消除目前的障碍，才能达到这一目标。并网和电网灵活性、规模经济、融资渠道、缺乏标准和质量监管，以及消费者认知预计是未来三十年太阳能光伏部署增长的主要障碍。通过一系列支持性政策和措施（包括创新的商业模式），以及金融工具的应用，对于促进未来太阳能光伏部署规模的增长至关重要，从而能够推动全球向低碳、可持续能源未来转型。

（张凯宏 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)