

# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- IEA 和 OECD-NEA 联合发布电力成本估算报告
- NETL 总结先进能量转换系统关键技术 2020 年研发进展
- 牛津能源研究所：碳中和承诺下中国天然气发电的挑战与趋势
- DOE 资助近 1.3 亿美元支持先进可持续交通能源技术研发
- 双面进光钙钛矿-晶硅叠层太阳能电池展现出实际应用潜力

主管：中国科学院文献情报系统战略情报服务协调组

主办：中国科学院武汉文献情报中心



**中国科学院武汉文献情报中心**  
Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences  
**湖北省科学图书馆**  
Hubei Sciences Library



**《先进能源科技动态监测快报》**

中国科学院武汉文献情报中心

湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

**网址:**

<http://www.whlib.ac.cn>

**联系人:**

郭楷模

[guokm@whlib.ac.cn](mailto:guokm@whlib.ac.cn)

**电话:**

027-87199180



先进能源情报网

<http://energy.whlib.ac.cn>



先进能源科技战略情报研究中心

微信公众号



先进能源情报网微信公众号

**中国科学院文献情报系统先进能源情报网简介**

中国科学院文献情报系统先进能源情报网是在中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组的整体组织和指导下,由中国科学院武汉文献情报中心牵头组建,联合中国科学院文献情报系统能源领域相关研究所,共同搭建的情报研究资源共享及协同服务的非营利性情报研究及服务团体。先进能源情报网将汇聚中科院文献情报系统内与领域相关的战略情报研究人员、学科情报人员、研究所科研管理人员、研究所文献情报人员,以及相关的管理和学科专家,通过“协同开展情报研究服务、组合共建情报产品体系、促进情报资源交流共享、提升整体情报保障能力”的工作方式,创新院所协同的情报研究和服务保障模式,促进情报资源的共享、情报需求和情报供给的对接、情报技术方法的合作开发,实现情报能力的扩散和提升,进而对中国科学院各个层面(院层面、所层面、项目团队层面及科研人员层面)的重要情报需求提供坚实保障。

**先进能源情报网成员单位**

成员单位	单位名称
组长单位	武汉文献情报中心
副组长单位 (排名不分先后)	合肥物质科学研究院 大连化学物理研究所 青岛生物能源与过程研究所 广州能源研究所
成员单位 (排名不分先后)	上海高等研究院 山西煤炭化学研究所 上海应用物理研究所 兰州近代物理研究所 广州地球化学研究所 过程工程研究所 电工研究所 工程热物理研究所 武汉岩土力学研究所 武汉物理与数学研究所 苏州纳米技术与纳米仿生研究所 福建物质结构研究所

## 目 录

### 决策参考

IEA 和 OECD-NEA 联合发布电力成本估算报告.....	2
NETL 总结先进能量转换系统关键技术 2020 年研发进展.....	6
牛津能源研究所：碳中和承诺下中国天然气发电的挑战与趋势....	8

### 项目计划

DOE 资助近 1.3 亿美元支持先进可持续交通能源技术研发 .....	11
DOE 资助 3500 万美元支持生物能技术研发 .....	12
DOE 投入 1570 万美元开发煤炭新用途 .....	13

### 前沿与装备

双面进光钙钛矿-晶硅叠层太阳电池展现出实际应用潜力.....	14
多核铈络合物催化剂实现温和条件下 CO <sub>2</sub> 加氢制甲醇 .....	16
抗溶剂增强水系锌离子电池性能和循环稳定性.....	17

## 本期概要

国际能源署 (IEA) 和经合组织核能署 (OECD-NEA) 联合发布《电力成本估算报告 2020》，指出**低碳技术发电成本正在持续下降，且日益低于传统化石燃料**：近年来，可再生能源平准化发电成本 (LCOE) 具有较强竞争力；新建核电站发电成本保持稳定，但长期运行核电站是发电成本最低的低碳发电技术选择；以目前碳价 30 美元/吨 CO<sub>2</sub> 计算，且碳捕集与封存技术迟迟未取得突破，燃煤发电成本优势已逐渐不再；燃气发电成本在不断下滑，更具市场竞争力。

美国能源部国家能源技术实验室 (NETL) 总结了**该机构 2020 年在先进能量转换系统关键技术方面的研发进展**：NETL 一直致力于开发利用化石燃料、可再生能源生产电力、燃料和化学品的先进能量转换系统技术，目前进行的相关研究包括：(1) 高效热电联产系统的先进涡轮机翼型，已完成的工作集中在通过开发翼型冷却设计提高其耐用性，使涡轮机点火温度达到 1300 摄氏度；(2) 旋转爆震发动机，2020 年进行了优化 RDE 与燃气轮机集成的设计、开发可延长运行时间的水冷式装置、氮氧化物排放的实时测量等；(3) 磁流体动力发电，2020 年 NETL 在超高温磁流体动力发电机的研究方面取得了新突破，将新型陶瓷设计用于发动机中，使运行温度高于钾盐沸点；(4) 先进诊断技术，能够提供准确、真实的数据，以验证下一代化石燃料和可再生燃料（如氢）燃烧发电模型。

牛津能源研究所发布观点文章《中国电力行业的天然气：挑战与前进道路》，分析了“十四五”规划和 2060 年碳中和目标背景下中国天然气发电现状、**面临挑战和未来趋势**：预计“十四五”期间中国天然气发电将加快增长，到 2025 年将新增 40-50 吉瓦发电机组，电力行业天然气消费量将翻一番达到 750-800 亿立方米。但中国政府的 2030 年碳达峰及 2060 年碳中和承诺将限制所有化石燃料消费，长期内天然气发电不可能显著发展。

美国能源部 (DOE) 宣布**资助 1.28 亿美元支持先进可持续交通技术研发，重点关注 3 个领域主题，包括**：生物能源技术，氢能与燃料电池技术和先进车辆技术，旨在推进先进低碳交通能源技术研发突破和部署，实现美国交通能源可持续发展。

美国能源部 (DOE) 宣布**资助 3500 万美元支持生物能原料及藻类技术研发，聚焦 2 大主题领域，包括**：(1) 城市固体废弃物原料表征，开展研究工作包括检测特定城市固体废弃物的关键特性及其变化以及开发快速/实时检测的新方法；(2) 提高藻类产量的技术，研究内容包括通过供应 CO<sub>2</sub> 提高藻类产量和通过直接空气碳捕集提高藻类产量。旨在提升生物燃料生产、生物能发电及生物产品生产相关技术水平，降低其风险和成本，以推进美国的生物经济发展。

由阿卜杜拉国王科技大学 Stefaan De Wolf 教授课题组牵头的**国际联合研发团队设计开发了全球首个双面进光钙钛矿-晶硅叠层太阳电池**：得益于背面进光实现了对太阳光光谱增强的吸收利用，获得了优于传统单面进光器件的性能，在一个标准的模拟太阳光辐照下获得了高达 25.2% 的认证光电转换效率，且在室外环境测试下可获得 26 mW/cm<sup>2</sup> 输出功率密度，研究人员下一步将进一步提升性能和致力于新技术的市场化，加速钙钛矿太阳电池商业应用步伐。

# IEA 和 OECD-NEA 联合发布电力成本估算报告

12月10日，国际能源署（IEA）和经合组织核能署（OECD-NEA）联合发布《电力成本估算报告 2020》<sup>1</sup>，指出低碳发电技术的发电成本正在持续下降，且日益低于传统化石燃料发电成本。近年来，在许多国家可再生能源平准化发电成本（LCOE）相比于可调度的化石燃料发电已具有较强的竞争力；新建核电站的发电成本保持稳定，但长期运行（LTO）核电站是发电成本最低的低碳发电技术选择；以目前碳价 30 美元/吨 CO<sub>2</sub> 计算，且碳捕集与封存技术迟迟未取得突破，燃煤发电成本优势已逐渐不再；基于较低的天然气价格和能源转型中的作用日益明确，燃气发电成本在不断下滑，更具市场竞争力。

这是自 1981 年以来发布的第 9 版《电力成本估算报告》。这项前瞻性研究基于经合组织和非经合组织 24 个国家 243 个发电厂提供的 2025 年电力机组投产情况进行发电成本估算，包括化石燃料和核电基荷发电，以及一系列可再生能源发电，还首次将储能技术、氢能、长期运行核电站的电力成本数据纳入估算。由于 LCOE 指标只包括单个发电厂单项发电技术的发电成本、维护成本和燃料成本，并不涉及该项发电技术在整个电力系统中的附加价值，为开展更具体的系统成本比较，国际能源署（IEA）设置了“价值调整后的平准化发电成本”（VALCOE）这一指标，将不同发电技术的系统价值（容量价值、灵活性价值等）和系统成本均纳入考量，对选定地区和发电技术进行了估算比较。

## 一、低碳发电技术成本竞争力越来越强

低碳发电技术平均发电成本正在下降，并且日益低于传统化石燃料发电成本。如果在有利的气候条件下大规模部署太阳能光伏发电，其成本竞争力将非常高。此外，统计 14 个国家陆上风电平均发电成本，显示其中 10 个国家到 2025 年陆上风电将成为 LCOE 最低的发电技术。与上一版的数据相比，海上风电发电成本大幅下降，五年前其 LCOE 中位数超过 150 美元/兆瓦时，而目前则远低于 100 美元/兆瓦时。两种水力发电技术（径流式和调节式）都可以在合适的地点提供有竞争力的替代电力方案，但成本将极大依赖于建设地点。然而，IEA 的 VALCOE 指标结果显示，风能和太阳能等间歇性可再生能源的系统价值将随着其在电力供应中所占份额的增加而降低，因此，需设置合理的并网比例以实现电力系统价值最大化。

新版报告中新建核电站的电力成本估算值低于上一个版本，但地区差异仍然显著。归功于学习效应，一些经合组织国家的核电站平均隔夜建设成本反映出下降趋

<sup>1</sup> Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition.  
<https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

势。核电到 2025 年仍将是成本最低的可调度低碳发电技术，只有大型水电可以做出类似的贡献，但后者高度依赖于自然资源禀赋。与化石燃料发电相比，核电站预计比燃煤电厂成本更低。虽然燃气-蒸汽联合循环发电（CCGT）在一些地区具有竞争力，但其 LCOE 在很大程度上取决于各个地区的天然气价格和碳排放价格。长期运行核电站的电力成本极具竞争力，不仅是成本最低的低碳发电技术选择，也是所有发电方式中成本最低的一种。

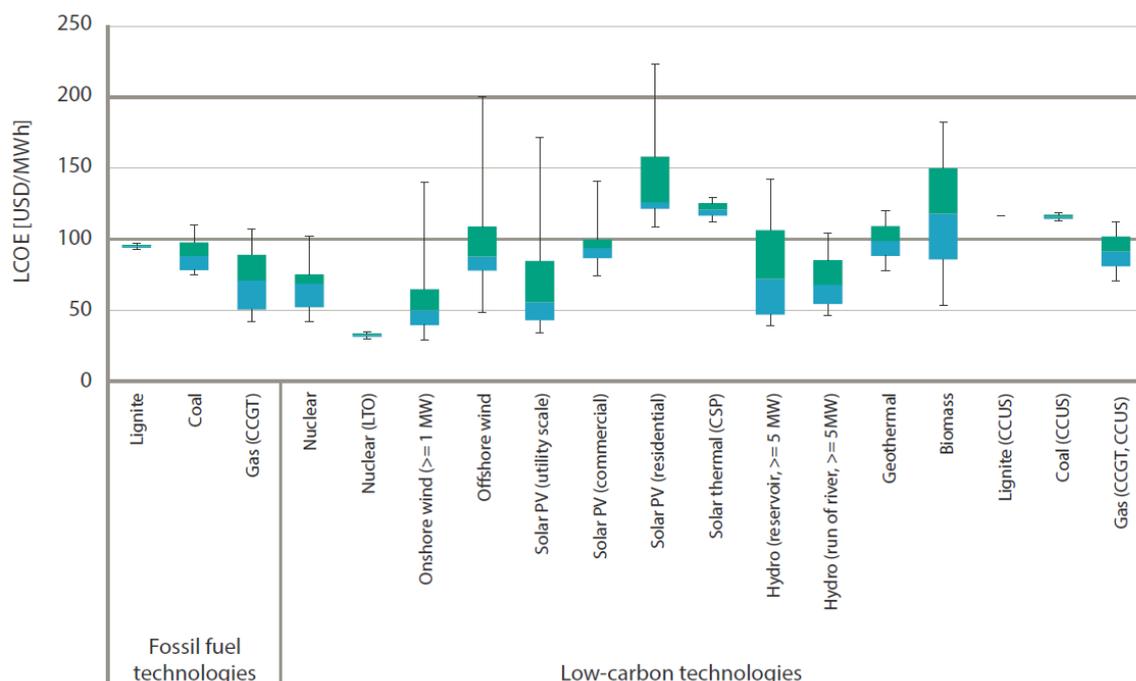


图 1 不同技术平准化发电成本区间 (单位: 美元/兆瓦时)

注: 图中数值按折现率 7% 计算; 箱线图表示最大值、中位数和最小值; CCGT: 燃气-蒸汽联合循环发电技术; CCUS: 碳捕集、利用和封存技术。

## 二、发电成本竞争力取决于国家和地方条件

由于有利于可再生能源发电的地址条件不同、燃料成本差异以及技术成熟度有别，所有发电技术的成本都因各国和地区而大相径庭。此外，一项发电技术在电力系统发电总量中的占比对其价值、负荷因子和平均成本也有影响。虽然在本报告中大多数国家的可再生能源发电技术都有很强竞争力，但数据显示，在一些国家（如日本、韩国和俄罗斯）的可再生能源成本仍高于化石燃料发电或核能发电。即使在同一国家，不同区域的条件不同也会造成地方一级的发电成本差异。在欧洲，陆上风电和海上风电以及公用事业规模太阳能发电都能够与天然气和新建核电相竞争。在美国，燃气发电受益于预期较低的天然气价格，但从电厂 LCOE 中位数来看，陆上风电和公用事业规模光伏是成本最低的发电技术（碳价 30 美元/吨 CO<sub>2</sub>），比燃气发电成本更高的是海上风电、新建核电和燃煤发电。在中国和印度，预期间歇性可再生能源 LCOE 将达到最低，公用事业规模太阳能光伏和陆上风电是成本最低的发

电技术，核电也具有一定的竞争力，为两国目前碳密集型发电结构的转型提供了有前景的技术选择方案。

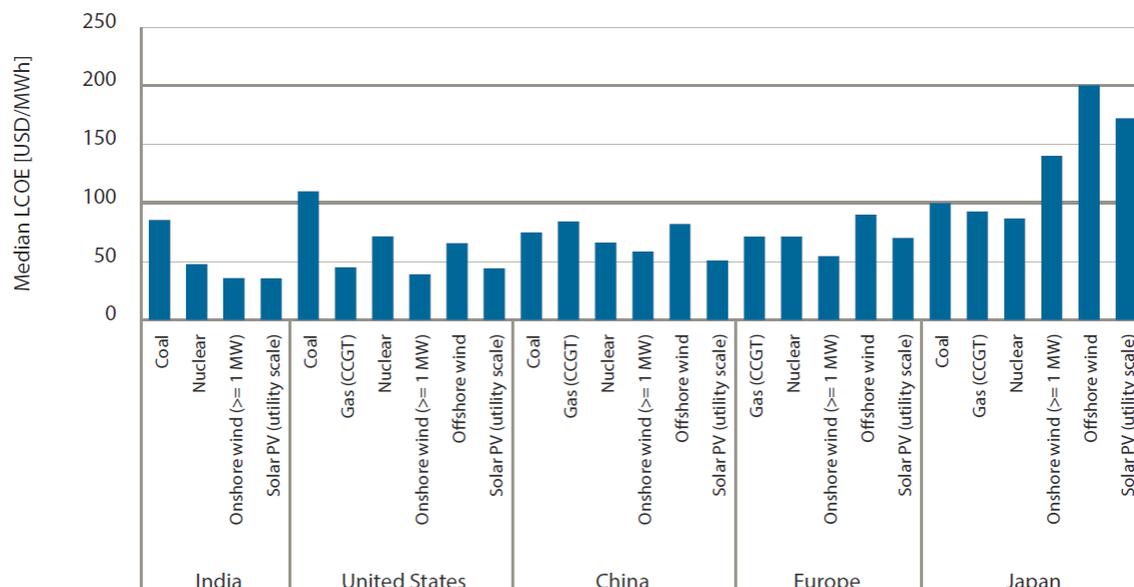


图 2 主要地区不同发电技术平准化发电成本中位数比较（单位：美元/兆瓦时）

注：图中数值按折现率 7% 计算。

### 三、延长核电站服役年限具有较好的成本效益

相较于投资新建核电站，对现有核电站设施进行大规模翻修，安全延长旧核电站原定服役年限，其发电成本大大降低。即使延寿后核电站利用率有所下降，但在高比例可再生能源系统中，现有核电延寿这一潜在的低碳发电方案，其成本也低于重新投资其他低碳技术。此外，从财政角度来看，核电站服役年限的延长，能大大减少核电站退役基金经费的使用。

### 四、碳捕集技术虽会提高发电成本，但仍将是较为可行的减排方案

在碳排放成本为 30 美元/吨 CO<sub>2</sub> 的情况下，由于配备 CCUS 设备的投资成本较高，并且会降低热效率，因此为燃煤和燃气电厂配备 CCUS 比纯化石燃料发电更昂贵。但随着碳排放成本的提高，对于燃煤电厂而言，配备 CCUS 的发电机组在每吨 CO<sub>2</sub> 50-60 美元的价格下具有成本竞争力。对于燃气发电而言，只有碳价格高于 100 美元/吨 CO<sub>2</sub> 情况下 CCUS 技术才具有竞争力。而在这么高的碳价下，间歇性可再生能源、水电或核电可能将成为成本最低的发电技术选择。尽管未来碳价预测具有较大不确定性，但在未来全球碳价超过 100 美元/吨 CO<sub>2</sub> 的情景下，如果需要灵活的低碳发电但缺乏有竞争力的替代发电技术，同时拥有经济可用的化石燃料资源，CCUS 仍可能成为某些低碳发电组合的一种补充。

### 五、低碳发电技术需与市场相适应

为了增强不同区域和市场之间发电成本的可比性，有必要统一某些假设条件，报告在基础情景中假设核电、煤电和气电的容量因子为 85%、折现率 7%。基于现

有技术组合以及市场环境，这些参数可能会因单一市场情况有很大差异。例如随着可再生能源发电占比日益增加，基荷电厂市场份额会降低。报告因此还估算可调度的基荷发电技术（如气电、煤电和核电）负荷因子为 50%。取决于调度的优先顺序不同，不同技术也会受到不同程度的影响。在美国，由于其气价较低，煤电机组通常最后调度，因此负荷因子也更低。CCGT 技术由于投资成本相对较低，且在许多地区可变成本适中，非常适合在不同环境和不同地区发电。而核电机组由于投资成本高，需要具备较高的利用率，核电才具有成本竞争力。

竞争力的一个关键决定因素是折现率，折现率反映了投资的机会成本以及各种风险和不确定性，例如与政策法规发展、市场设计、系统开发以及未来投资和燃料成本有关的风险和不确定性。在 LCOE 计算方法学中，折现率与资本成本相对应。一项技术资本密集程度越高，其 LCOE 对折现率变化越敏感。在基荷核电站中，这意味着新建核电站成本尤其取决于折现率。折现率较低（3%）时，反映市场环境稳定，投资保障高，新建核电站的 LCOE 低于新燃煤电厂和燃气电厂。如果折现率在 7%或 10%（这意味着面临风险较高的经济环境），新建核电站的成本将超过化石燃料发电厂。

## 六、系统成本计算对呈现能源整体价值具有重要作用

由于 LCOE 指标只包括单个发电厂单项发电技术的发电成本、维护成本和燃料成本，并不涉及该项发电技术在整个电力系统中的附加价值。而某一特定类型的可再生能源发电技术与整个能源系统是相互关联的，并不具有随时稳定可靠的发电能力。发电量的大小并非受到电力需求的调控，因此降低了发电的价值。电力可靠性保障需要可调度的电力容量，如储能和需求响应，以确保供应的安全性。此外，间歇性可再生能源发电的潜在快速变化需要进行平衡。为了涵盖上述不确定因素的影响，并保障低碳电力以低成本的价格满足市场特定需求，需要进行整个电力系统级的分析。因此，国际能源署开发了 VALCOE 的系统价值模型，对发电成本进行估算。这种新计算模型是根据电力系统中单项技术对实现整个电力系统安全运行的所有方面的贡献价值进行调整，其计算结果反映了现有技术在整个电力系统中的价值。结果显示，太阳能光伏发电机组在单个发电厂产量中显示出高度相关性，随着其在电力系统中占比增加，发电价值显著降低，在系统分析中将考虑这一现象。相比之下，风电产量在每个风力发电厂之间的相关性较小。即使其占比增加，其价值损失也较小。虽然目前可再生能源发电量在整个能源系统中占比较低，相关性对能源市场的影响较小，但随着可再生能源发电量占比的不断增加，相关性影响可能会上升。具有高可变成本技术（如高灵活性的开式循环燃气轮机）的燃气发电在电力系统中具有更高的系统价值。

VALCOE 度量标准提供了一种从单个发电技术出发，考察其在整个电力系统中

系统价值的创新方法。其系统价值不仅取决于间歇性可再生能源在整个能源系统中所占的比例，还取决于互补资源的成本，如储能或移动互联技术，以及竞争技术的成本。与许多其他假定长期运行成本最优情景模拟未来系统发展的分析方法不同，VALCOE 计算场景试图复制真实的现实世界系统，未来还将不断进行系统化分析并完善当前的数据结果。评估不同发电技术的系统价值，可以更全面地了解其经济成本。但为了衡量发电技术对整个社会的全部成本，还需考虑人类健康影响（空气污染和重大事故）、环境、就业、自然资源可获得性和供应安全性等因素。

### 七、储能在能源系统中变得尤为重要

间歇性可再生能源发电与天气的相关性，将导致瞬时电力需求与供应之间的不匹配，某些时刻会导致供应过剩，而在其他时候又会导致供应不足。因此，不同电力储能技术在各种应用和服务中显得至关重要。储能可以改善风能和太阳能光伏发电等间歇性可再生能源发电与电力需求的稳定性。在未来的低碳系统中，多种灵活性方案（例如储能、需求灵活性以及核电、水电等灵活低碳发电）的组合可能将提供成本最低的解决方案。

### 八、未来氢能的发展潜力在很大程度上取决于制氢成本

自 20 世纪 70 年代以来，全球对纯氢的需求量增长了三倍多，目前每年需求约为 7500 万吨。需求主要来自炼油和合成氨（占纯氢需求量的 95%左右）。此外，某些工业还使用氢化气体作为气体混合物的一部分，目前每年混合氢需求约为 4500 万吨，主要用于化学生产和钢铁部门。氢的生产成本受到若干因素的影响，最终成本取决于所使用的燃料（天然气、煤炭或电力）和技术（天然气制氢和煤制氢中有没有利用碳捕集与封存技术、不同类型的电解技术等）。目前，天然气制氢成本在 0.7-1.6 美元/千克 H<sub>2</sub> 之间，配备 CCUS 的天然气重整制氢成本高达 1.2-2.0 美元/千克 H<sub>2</sub>。在石油和化工领域，低碳氢要取代目前的化石燃料制氢，面临的障碍是成本，只有当电价低于 20 美元/兆瓦时，电解制氢才能与传统技术竞争；而在钢铁生产中，只有当电价非常低（低于 10 美元/兆瓦时）时，电解制氢才能与传统方式竞争；对于乘用车，必须降低燃料电池和车载储氢的成本，以使其在长距离里程（400 - 500 公里）应用上能与电动汽车竞争。

（汤匀）

## NETL 总结先进能量转换系统关键技术 2020 年研发进展

12 月 14 日，美国能源部国家能源技术实验室（NETL）发布文章<sup>2</sup>，总结了该机构 2020 年在先进能量转换系统关键技术方面的研发进展。NETL 一直致力于开发利用化石燃料、可再生能源生产电力、燃料和化学品的先进能量转换系统技术，目前

<sup>2</sup> NETL ADVANCES PIVOTAL ENERGY CONVERSION ENGINEERING TECHNOLOGIES IN 2020.  
<https://netl.doe.gov/node/10394>

进行的相关研究包括：高效热电联产系统的先进涡轮机翼型；旋转爆震发动机；磁流体动力发电；先进诊断技术。主要进展如下：

### **1、高效热电联产系统的先进涡轮机翼型**

NETL 热科学团队正在开发高度可靠的热电联产系统，为该系统的燃气轮机研究先进翼型。该项研究的目的是通过新翼型的冷却设计、新型材料开发和 3D 打印技术以提高燃气轮机效率。该项目已完成的工作集中在通过开发翼型冷却设计提高其耐用性，使涡轮机点火温度达到 1300 摄氏度。研究团队正在确定最有前景的翼型结构用增材制造材料，预计将在 2021 年重点进行该项工作，并对翼型初步设计进行测试。

### **2、旋转爆震发动机**

NETL 研究团队正与其他美国联邦机构合作开发旋转爆震发动机 (RDE) 技术，该技术可产生可控的连续爆震波，用于改进的涡轮机，可避免常规涡轮机的压力损失和效率下降，减少燃料消耗，降低碳足迹和环境影响。该项技术既可用于陆地发电，也可用于船舶、飞机、航天器等推进装置。NETL 的研究主要针对发电系统，2020 年进行了优化 RDE 与燃气轮机集成的设计、开发可延长运行时间的水冷式装置、氮氧化物排放的实时测量等。

### **3、磁流体动力发电**

磁流体动力发电技术能够提高化石燃料发电厂效率并降低碳捕集成本，其原理是从高速流动的高温电离气体中获取动能并转换为电能。2020 年 NETL 在超高温磁流体动力发电机的研究方面取得了新突破，将新型陶瓷设计用于发动机中，使运行温度高于钾盐沸点，后者为磁流体发电系统常用的电离助剂。

### **4、先进诊断技术**

高效的先进能量转换系统往往需要高温、高压运行环境，难以应用常规诊断技术。NETL 基础燃烧实验室研究团队在 2020 年开发了先进的诊断技术，能够提供准确、真实的数据，以验证下一代化石燃料和可再生燃料（如氢）燃烧发电模型，如直接发电 (DPE) 系统和 RDE 系统。其主要的诊断研究包括：将激光诊断技术用于 DPE 系统的超高温环境中测量温度；使用激光探针、光谱等技术测量磁流体发电系统的流体导电率；将高速摄像技术用于捕捉 RDE 研究中超音速爆震波与进气道相互作用的过程。

(岳芳)

## 牛津能源研究所：碳中和承诺下中国天然气发电的挑战与趋势

12月14日，牛津能源研究所发布观点文章《中国电力行业的天然气：挑战与前进道路》<sup>3</sup>，分析了“十四五”规划和2060年碳中和目标背景下中国天然气发电现状、面临挑战和未来趋势。报告指出，昂贵的天然气进口成本和燃气轮机技术以及缺乏充分竞争的电力市场，是中国天然气发电面临的主要障碍。尽管如此，预计“十四五”期间天然气发电仍将加快增长，到2025年将新增40-50吉瓦发电机组，电力行业天然气消费量将翻一番达到750-800亿立方米。中国政府提出的2030年碳达峰及2060年碳中和承诺将限制煤炭消费，加上集成可再生能源对电力系统的灵活性要求，未来政策框架对天然气发电将更为支持，但碳中和目标将限制所有化石燃料（包括天然气）消费，天然气发电不可能在长期内显著发展。主要内容如下：

### 1、中国天然气发电发展缓慢

目前，天然气在中国电力行业中占比较小。尽管中国天然气发电装机容量从2010年的26吉瓦增至2019年的90吉瓦，但仍仅占发电机组总容量的4.5%，在火电机组中不到10%。在发电量方面，2019年中国天然气发电量为236太瓦时，仅占全国总发电量的3.2%，而燃煤发电占比则达到62%。从增长速度来看，风电和太阳能发电的增速快于天然气发电。此外，天然气发电的平均运行时间仍较低，2019年约为2500小时，煤电则达到了4000小时。

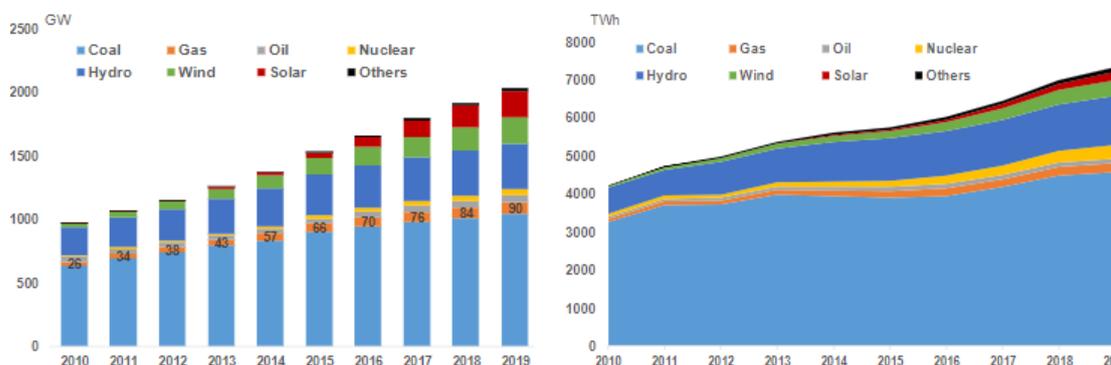


图1 2010-2019年中国电力装机容量（左图，单位：吉瓦）和发电量（右图，单位：太瓦时）

### 2、“十三五”期间天然气发电机组建设未达到规划目标

尽管政府已经认识到天然气作为“清洁能源”的优势，并实施政策促进其在电力及其他部门的发展，但截至2020年9月，中国天然气发电装机容量为97吉瓦，未达到“十三五”规划中设定的110吉瓦目标。虽然“十三五”规划制定了天然气发电目标，但缺乏具体的实施政策。另外，2017年冬季北方地区煤改气导致的严重天然气供应短缺使中国天然气政策发生重大转变，从推广天然气发电厂转变为有序发展天然气调峰电厂并限制新建热电联产电厂。政策变化加上天然气的高昂成本，

<sup>3</sup> Natural gas in China's power sector: Challenges and the road ahead.  
<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2020/12/Insight-80-Natural-gas-in-Chinas-power-sector.pdf>

使天然气在中国电力系统中的作用一直极为有限。

### **3、过高的天然气成本是中国天然气发电的主要障碍**

燃料成本占天然气发电成本的七成以上，中国近一半的天然气需求通过进口 LNG 或管道天然气满足，其成本远大于国内资源丰富的煤炭，因此天然气发电难以与煤电竞争，收回投资成本极大依赖于补贴。即使 2020 年由于充足的供应和新冠疫情影响，全球天然气价格大幅下跌，中国天然气发电成本仍高于煤电成本。另外，中国缺乏完善的碳排放交易市场，试点市场的碳价也持续较低水平，因而难以体现天然气发电相对于燃煤发电的低排放优势。短期内，由于严格监管的电力市场结构及煤电的优势地位，天然气发电仍将面临较大挑战。

### **4、昂贵的燃气轮机技术是中国天然气发电的另一个障碍**

昂贵的燃气轮机技术及对国外制造商的依赖是另一个发展障碍。当前中国燃气轮机技术落后于国际水平，目前约能实现 70% 的组件国产化，但核心组件制造、某些特定技术、定期检查和维护仍由外国厂家掌握，设备成本占前期投资成本的 50%。中国大多数天然气发电厂都采用 9E 和 9F 级燃气轮机，但国际领先厂商如西门子和通用电气已经开发了更先进的 9H 级燃气轮机，在效率、启动时间、排放量和灵活性方面均有改善，其热效率可达 64%，比超超临界燃煤电厂高近 20%，但设备价格也比同级别燃煤电厂高出 30%。而且，中国大多数天然气发电厂的维护都依赖与国外供应商的服务协议，中型电厂一个大型维护周期的成本可能高达 6000 万美元。尽管天然气发电在降低污染物排放方面有优势，但对燃煤电厂改造以实现超低排放的成本仍低于“煤改气”。中国正努力缩小与国外的技术差距，国家电力投资集团成立了中国联合重型燃气轮机技术公司，计划到 2023 年完成 300 兆瓦 F 级重型燃气轮机的设计和开发，到 2030 年完成 400 兆瓦 G/H 级燃气轮机的开发。哈尔滨电气集团和上海电气集团也通过组建合资公司实现一些零部件国产化以提供本地维护服务。因此，国内燃气轮机技术发展将有助于降低天然气电厂的成本。

### **5、缺乏竞争性的电力市场难以实现天然气发电盈利**

在完全竞争性电力市场中，用电高峰期和非高峰期之间的价格差异可能会使灵活的天然气发电获利。尽管中国进行了新一轮电力市场改革，超过 70% 的发电仍低于基准价，辅助服务市场也处于起步阶段，天然气发电难以收回投资成本。监管机构对放开市场、提高电价持谨慎态度。尽管地方政府可在基准价格范围内调整天然气发电价格，但不足以支撑燃料和运营成本，仍需依靠政府支持。此外，发电厂的运行主要由安全调度而非经济调度决定。为保证电力供应，通常保持燃煤电厂 50%-60% 的负荷运行水平，以将储备电量维持在较高水平，多余电量也会被用于调峰，压缩了天然气发电厂的运行时间。目前中国正进行电力现货市场试点，但现货价格仍然偏低，其主要原因是超过 90% 的发电量受限于长期合同或基准价格，无法

将天然气发电的灵活性充分变现。而且，疫情危机导致经济增长放缓，政府调低电价以降低企业成本，短期内基准电价不太可能上调，这使得天然气发电市场前景黯淡。

#### **6、过高的天然气进口依存度将影响政策制定**

2019年，中国天然气消费同比增长8.6%达到3064亿立方米，占一次能源消费的8.1%。天然气进口依存度达43%，略低于2018年（44%）。天然气进口依存度从2005年开始迅速增长，尽管受到疫情影响，预计2020年仍将达到42.6%。中国已成为仅次于日本的全球第二大LNG进口国。鉴于中国巨大的能源需求，专家估计，当中国天然气占能源消费15%时，天然气消费量将占全球天然气贸易量的50%。因此，天然气进口依赖可能威胁中国能源安全，进而影响未来的政策制定。

#### **7、“十四五”期间中国新建天然气发电机组将达40-50吉瓦**

尽管受到上述阻碍，但天然气发电的灵活性、低排放等优点仍有利于其发展。为实现碳中和目标，中国最迟要在2050年前淘汰燃煤发电并实现电力净零排放。这需要尽快集成间歇性可再生能源，提高电力系统灵活性成为优先事项之一。由于储能技术仍无法实现大规模商业部署，平衡电力系统要求部署包括天然气发电的灵活性技术。因此，预计“十四五”规划将实施更强有力的政策支持建设天然气发电机组。迄今为止，政策重点仍放在燃煤电厂技术升级，“十三五”规划提出到2020年完成220吉瓦燃煤电厂灵活性改造，但过高成本和缺乏激励措施，仅完成了计划的25%。预计到2025年，天然气发电装机容量将新增40-50吉瓦，达到140-150吉瓦，比当前水平增加50%；电力部门天然气消费量将增长40%-50%，达到750-800亿立方米。未来十年，中国天然气需求将翻一番达到5500-6000亿立方米。

#### **8、2060年碳中和目标下，天然气发电不可能显著扩张**

中国要实现到2060年净零排放目标，需要彻底改变能源结构，化石燃料在能源消费中占比需从当前的85%大幅减少。这将限制煤炭消费，为低碳能源增长提供了空间。然而，由于净零排放电力将主要依靠可再生能源，限制化石燃料消费也将影响天然气发电的部署。清华大学气候变化与可持续发展研究院（ICCS）在2020年10月发布的“中国长期低碳发展战略与转型路径研究”项目成果指出，中国最早应在2025年之前限制煤炭消费，天然气在能源结构中占比预计从当前的8.5%升至2025年的11%，到2030年达到13%。根据ICCS的1.5°C情景，到2050年中国天然气发电装机容量达到200吉瓦，天然气发电（配备碳捕集系统）仅占总发电量的3%。

（岳芳）

## 项目计划

### DOE 资助近 1.3 亿美元支持先进可持续交通能源技术研发

12 月 10 日，美国能源部（DOE）宣布资助 1.28 亿美元资助先进可持续交通技术研发<sup>4</sup>，旨在推进先进低碳交通能源技术研发突破和部署，包括生物能源、氢燃料电池、电驱动等能源动力技术，以实现美国交通能源可持续发展。本次资助由 3 个办公室提供，包括生物能源技术办公室、氢能与燃料电池技术办公室和先进车辆技术办公室，具体内容如下：

#### 一、生物能源技术办公室（资助金额：3500 万美元）

借助人工智能技术开发城市固体废弃物的高效识别表征处理技术，提升固体废弃物到生物燃料、生物基产品转化效率，降低转化经济成本，实现 2030 年 2.5 美元/加仑油当量成本目标；开发和测试先进的藻类菌株和栽培技术，提高单位面积藻类产率并开展工业规模的示范，以实现 2030 年单位面积日均 25 克的产量。

#### 二、氢能与燃料电池技术办公室（资助金额：3300 万美元）

针对重型卡车用的质子交换膜燃料电池，开发新型高性能双极板，以进一步增强电池性能和寿命（寿命要达到 25 000 小时），降低成本；针对重型卡车开展高性能、低成本的大型电解槽研发，以实现高效低成本产氢，降低氢气成本，使燃料电池卡车具备与传统燃油卡车相当的成本竞争力；针对重型卡车用的氢能加注站开发一系列低成本高性能组件，包括软管、接头、喷嘴、冷却器、压缩机、高精度流量计和控制阀等，实现氢燃料的高流量快速加注。

#### 三、先进车辆技术办公室（资助金额：6000 万美元）

开发能够在极端环境下（如超过 4.5V 工作电压，工作电压范围在-40℃~40℃，15 分钟快充充满等）运行的下一代液态电解质锂电池；开发性能与锂电池相当甚至更优但成本更加低廉的新概念电池，如锂硫电池、锂空气电池，其比容量要达到 1000 毫安时/克；借助人工智能和机器学习技术来优化逆变器架构，开发出性能更佳成本更低的逆变器，以在 2025 年将逆变器的功率在 2015 年水平上增大 10 倍达到 100 千瓦/升，成本下降 50%至 2.7 美元/千瓦，寿命翻倍达到 30 万英里以上；开发燃烧系统模拟仿真技术和先进低成本的后处理技术（减少铂族贵金属使用量），借此研发出燃烧效率更高、排放更低的燃烧系统，以实现到 2025 年将 NO<sub>x</sub> 排放减少 80%、PM 颗粒物减少 70%目标；利用轻量化材料设计开发新型的汽车传动系统，以实现到 2025 年将其质量减少 25%目标，提升车辆的燃油经济性；借助大数据和人工智能

<sup>4</sup> Department of Energy Announces \$128 Million for Sustainable Transportation Research  
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-128-million-sustainable-transportation-research>

技术,利用海量数据建模对燃料电池汽车技术的性能开展分析评估,考察其节能性、经济性和环保性;依托大数据、人工智能技术、传感技术、互联网技术、高速摄像技术等来发展先进的网联自动驾驶车辆技术,并对现有的公路基础设施进行更新升级(如加装先进的传感器、实时的道路通讯系统等)以满足未来网联自动驾驶汽车的发展需求;利用先进的能源、环境、经济评估模型来评价新开发的先进车辆技术经济、环境效益,研究探索新技术规模化应用面临的机遇和挑战。

(郭楷模)

## DOE 资助 3500 万美元支持生物能技术研发

12月10日,美国能源部(DOE)宣布资助3500万美元支持生物能原料及藻类技术研发<sup>5</sup>,旨在提升生物燃料生产、生物能发电及生物产品生产相关技术水平,降低其风险和成本,以推进美国的生物经济发展。本次资助重点关注两大主题:城市固体废弃物原料表征;先进藻类生产技术。主要内容如下:

### 1、城市固体废弃物原料表征(1500万美元)

(1) **检测特定城市固体废弃物的关键特性及其变化。**主要包括:建立城市固体废物资源库地图,涵盖所有关键特性值,并记录其地理和/或季节变化;对于城市固体废物混合流,针对每种有机组分(如纸张、纸板、木材、纺织品、塑料等)进行含量表征;使用化学、生物、物理等标准方法,以及流变测量和宏观、微观、分子尺度的检测、识别和评估技术,进行城市固体废弃物的空间及时间表征。

(2) **开发快速/实时检测的新方法。**主要包括:快速/实时传感器的应用和集成,包括气体传感器、比色传感器和/或光谱仪(如近红外光谱、拉曼光谱、核磁共振、傅里叶变换红外光谱);人工智能或其他数据处理/分析/策略/过程控制技术的应用;开发新型、快速的化学、生物和物理分析方法;开发宏观、微观和/或分子尺度的快速检测和识别关键特性的技术。

### 2、提高藻类产量的技术(2000万美元)

(1) **通过供应 CO<sub>2</sub> 提高藻类产量。**该主题下的研究主要通过改良菌株或改进种植方法,同时利用传统方法供应 CO<sub>2</sub> 以促进藻类生长。①在改良菌株方面,包括:通过定向进化试验改善相关菌株的抗逆性;通过基因工程改良菌株以提高产量;开发育种策略提高藻类产量。②在改良种植方面,包括:开发用于作物保护的物理、机械、化学和生物方法;确定和引进新的菌株或藻类以提高抗逆性和/或抵抗害虫;改变培养方法(如在高盐度下培养)以减少病虫害和其他藻类的竞争。

(2) **通过直接空气碳捕集提高藻类产量。**该主题下的研究主要通过改良菌株或

<sup>5</sup>Department of Energy Announces \$35 Million for Bioenergy Research and Development.  
<https://www.energy.gov/eere/articles/department-energy-announces-35-million-bioenergy-research-and-development>

改进种植方法，同时利用直接空气碳捕集技术供应 CO<sub>2</sub> 以促进藻类生长。①在改良菌株方面，包括：通过基因工程工具增加细胞表面运输 CO<sub>2</sub> 的数量；评估类胡萝卜素的基因和结构成分，并使用合成生物学工具改进固定，调控中心碳代谢酶的表达以提高整体光合效率；进行光照和黑暗条件代谢 CO<sub>2</sub> 通量建模，以识别增加白天净碳同化并减少夜间由于黑暗呼吸而导致 CO<sub>2</sub> 释放的方法。②在改良种植方面，包括：在碱性条件下培养高产菌株；利用生物学机制或作物保护策略以保持培养基中高含量溶解性无机碳；通过工程化藻类和菌群减少溶解性有机碳损失；进行生物体和系统级的夜间培养能量损失建模，改变培养操作以减少损失。

（岳芳）

## DOE 投入 1570 万美元开发煤炭新用途

近期，美国能源部（DOE）陆续投入 1570 万美元，支持开发高性能煤基材料，以扩展煤炭作为碳基材料来源在建筑、基础设施等方面的新用途。具体内容如下：

### 一、用于建筑、基础设施等煤基新材料开发

12 月 10 日，DOE 宣布在“先进煤炭加工”计划下，投入 870 万美元支持 14 个煤基新材料开发项目，以应用于建筑、基础设施等领域<sup>6</sup>：

**1、用于住宅/商业建筑的煤基新材料。**包括：①开发轻质、高性能和可扩展的煤基建筑复合材料，含煤量高达 95%（质量分数），物理、化学和热性能超过普通硅酸盐水泥，整体加工成本低于 10 美元/吨；②开发煤基纤维水泥板替代新材料，进行实验室规模挤压试验以评估材料性能和技术可行性，并开发分子动力学模拟以预测材料特性；③开发煤基砖块，将使用无烟煤和塑料废料粘合剂制造煤基砖块，并分析技术经济性和进行市场调查；④开发高性能煤基商用新型复合建筑面板材料，将以煤为主要原料开发原型刚性板，进行性能测试并制定扩大生产规模的计划，同时验证制造成本；⑤开发高性能环保煤基建筑材料，将利用煤热解产物开发建筑材料，包括混凝土砖和碳基结构件，含碳量低于 70%（质量分数），以生产具有低成本和低碳足迹的建筑材料。

**2、用于基础设施的煤基组件。**包括：①开发煤塑复合材料管道基础设施组件，含碳量为 70%、含煤量为 51%，比现有塑料管道具有更佳的成本、性能和环境效益；②开发用于基础设施产品的轻质高强度煤基建筑材料，比同类商业产品更轻、更结实耐用和耐磨，可实现更大的建筑设计自由度；③利用煤基固体碳材料开发下一代多功能智能路面，将开发和示范可用于野外的多功能智能路面，通过煤基固体碳材料建造和改善沥青路面。

**3、煤基高价值碳产品。**包括：①开发煤转化为石墨烯的低成本技术，将应用过

<sup>6</sup> DOE Invests \$8.7 Million to Foster New Uses for Domestic Coal Resources.  
<https://www.energy.gov/fe/articles/doe-invests-87-million-foster-new-uses-domestic-coal-resources>

程工程、在线监测、人工智能和模块化工业设计，示范将煤转化为高质量石墨烯生产设备（250 吨/天）的技术经济可行性；②开发将煤转化为石墨烯的简易技术，尝试采用一种突破性的闪光焦耳加热（FJH）工艺，将不同类型的煤转化为高质量石墨烯，并利用人工智能技术进行优化，评估其技术经济性，以促进该技术的商业化；③利用褐煤生产锂离子电池负极碳材料，将以褐煤制备的沥青为主要原料，生产用于锂离子电池的高性能硅碳（Si-C）复合材料，评估基于该材料的电极性能并与商用电极比较，研究小试规模生产的可行性；④利用煤炭生产高质量多功能碳量子点，将开发一种新型、边界、低温、经济高效且环保的技术，以生产高价值煤基量子点，进行两个应用样例的评估，如用于太阳电池和光催化。

**4、煤基碳泡沫的连续不间断生产。**包括：①开发大气压环境下煤基碳泡沫产品的连续加工工艺，显著降低生产成本，为建立大规模生产平台奠定基础。

**5、碳基建筑原型的设计、研究、开发、验证和制造。**包括：①开发使用碳基建筑材料的模块化房屋，将使用含碳量至少 71%的碳基材料，具备轻质、安装快、设计灵活等优点。

## 二、碳基建筑原型设计、验证和制造

12 月 14 日，DOE 宣布投入 700 万美元<sup>7</sup>，支持设计、开发、验证和制造碳基建筑原型。本次招标重点针对一个技术主题：利用碳基材料设计和建造部分建筑结构。将通过原型设计，最大限度利用新型碳基产品。建筑原型将使用含碳量至少 70%的建筑材料，其中一半以上必须由煤炭生产。将通过原型设计和制造，示范碳基建筑材料的技术和经济可行性，包括抗弯强度、浸出和氧化行为、热稳定性、水吸附性等。

（岳芳）

## 前沿与装备

### 双面进光钙钛矿-晶硅叠层太阳能电池展现出实际应用潜力

单结太阳能电池由于受到半导体固有带隙的限制，其转换效率存在一个极限值，即肖克利-奎伊瑟效率极限（S-Q 极限，约 32%）。而构建基于不同带隙（光谱响应范围不同）光敏材料的叠层太阳能电池是实现突破 S-Q 极限潜在技术路径。此外，目前主流太阳能电池器件都是单面进光，这导致了器件背面无法吸收利用辐照在其表面的太阳光（包括直接辐照和间接漫反射），存在一定的光谱损失。因此，如果能够同时解决上述两个问题对提升电池性能有一定促进作用。

由阿卜杜拉国王科技大学 Stefaan De Wolf 教授课题组牵头的国际联合研究团队

<sup>7</sup> DOE Announces More Than \$7 Million for Carbon-Based Building Projects.  
<https://www.energy.gov/fe/articles/doe-announces-more-7-million-carbon-based-building-projects>

设计开发了全球首个双面进光钙钛矿-晶硅叠层太阳电池，在一个标准的模拟太阳光辐照下获得了高达 25.2% 的认证光电转换效率，且在室外环境测试下可获得 26  $\text{mW}/\text{cm}^2$  输出功率密度，展现出在真实环境中的应用潜力。相关研究表明，相比单面进光，双面进光的钙钛矿-晶硅叠层太阳能电池能够吸收利用来自环境的漫反射光来提高其性能。为此研究人员设计制备了以钙钛矿太阳电池为顶电池，背面透光的晶硅太阳电池为底电池的叠层串联双面进光器件。为了让上述两个子电池能够具备良好的匹配性（主要是电流匹配性），研究人员通过对钙钛矿组分比例调控实现了对其带隙调谐，制备了一系列不同带隙（1.59、1.62、1.65、1.68 和 1.7 eV）钙钛矿电池，实验结果显示在 1.68 eV 时候叠层电池的电流密度最佳，为此选定该带隙结构钙钛矿太阳电池进行后续一系列研究。为了探究双面进光对电池性能影响，研究人员同步制备了传统的单面进光钙钛矿-晶硅叠层器件，并开展了对比研究。为了模拟真实室外环境，研究人员对电池器件加以正面的标准太阳光辐照和背面辐照（辐照强度为 $\sim 30 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ，真实环境达到的水平），相比单面进光器件，双面进光器件短路电流密度、开路电压数值都更大，主要原因是双面进光的器件可以进一步将辐照到器件背面的光谱（直接辐照或者漫反射）吸收利用。在一个标准的模拟太阳光辐照下，双面进光叠层器件获得了高达 25.2% 光电转换效率，且通过了权威机构认证。为了进一步证实双面进光器件具有实际应用潜力，研究人员在混凝土、人造草皮和白色背景三种不同反射率条件下比较了单面和双面串联器件的室外性能。实验结果显示，无论何种反射率，双面进光器件均优于单面器件；且在混凝土用作地面时，性能的提升尤为显著，双面器件实现了  $25.9 \text{ mW}/\text{cm}^2$  的功率密度输出，主要归因于在双面器件中产生的较高电流。最后，研究人员在两个场地开展了单面和双面器件性能现场测试：一个场地代号为 Jeddah，代表炎热和晴朗的环境；另外一个产地代号 Karlsruhe，代表典型的温和气候。在两个测试站点中，双面器件性能均明显优于单面，表现出了强劲的实际应用潜力。

该项研究精心设计制备了双面进光的钙钛矿-晶硅叠层电池，得益于背面进光实现了对太阳光光谱增强的吸收利用，获得了优于传统单面进光器件的性能，认证光电转换效率高达 25.2%，更为关键的器件在真实环境中通过了相关测试，表现出强劲的实际应用潜力，研究人员下一步将进一步提升性能和致力于新技术的市场化，加速钙钛矿太阳电池商业应用步伐。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》<sup>8</sup>。

（程向阳 郭楷模）

---

<sup>8</sup> Michele De Bastiani, Alessandro J. Mirabelli, Yi Hou, et al. Efficient bifacial monolithic perovskite/silicon tandem solar cells via bandgap engineering. *Nature Energy*, 2021, DOI:10.1038/s41560-020-00756-8

## 多核铱络合物催化剂实现温和条件下 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇

二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 加氢制甲醇一方面有助于减少二氧化碳排放, 同时还能生产重要的化工原料, 具有重要的环境和经济效益, 因此受到科学界和工业界的广泛关注。然而由于 CO<sub>2</sub> 的高热力学稳定性和低反应性, 使得上述反应需要在较为苛刻的条件 (反应温度通常为 220°C 以上) 下才能进行。因此开发温和条件下高效催化 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇的新型催化剂是该研究领域的热点之一。

日本产业技术综合研究所 Yuichiro Himeda 教授课题组设计开发了一种多核铱络合物催化剂, 能够在温和条件 (反应温度在 100°C 以下) 下的气-固相反应中高效催化 CO<sub>2</sub> 加氢转化成甲醇, 为发展甲醇经济提供了潜在的低成本技术路线。研究人员首先制备了单核、双核和多核的铱络合物催化剂, 然后在传统的溶液环境、60°C 温度下进行 CO<sub>2</sub> 催化加氢反应。实验结果显示, 单核催化剂反应体系中没有甲醇生成, 连中间产物甲酸也没有; 双核催化剂反应溶液中探测到了甲酸和微量的甲醇; 表明了增加催化剂的核数有利于 CO<sub>2</sub> 到甲醇的转化。为了增加产量, 研究人员进一步设计了多核铱络合物催化剂, 实验结果证实了多核催化剂的确可以增加产量, 但是在传统的溶液环境中产量不是很高, 有甲酸副产品存在。为了避免溶液介质环境的负面影响 (氢难溶于水不利于反应进行, 且产物从水溶液中分离也比较困难), 研究人员构建了气-固相的反应环境, 在 60°C、4 MPa 氢压条件下, 对不同体系的催化剂开展测试。结果显示, 单核体系可以产生微量的甲醇, 双核产量显著提升, 到了多核体系后产物中只检测到了甲醇, 表明了多核体系在低温气-固相中具有高效催化 CO<sub>2</sub> 加氢转化成甲醇的催化活性。通过对反应中间过程的追踪研究, 研究人员发现了多核体系在反应中间产生氢化物络合物, 其在气-固相反应条件下能够抑制甲酸的释放, 以及多核催化剂下分子内的多氢化物快速转移到 CO<sub>2</sub> 促进其转化为甲醇。

该项研究设计制备了多核铱络合物催化剂, 并构建了与传统液相不同的气-固相的反应环境, 实现了在温和条件下高效催化 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇, 对发展甲烷经济提供了新的技术方案。相关研究成果发表在《*Journal of the American Chemical Society*》<sup>9</sup>。

(郭楷模)

<sup>9</sup> Ryoichi Kanega, Naoya Onishi, Shinji Tanaka, et al. Catalytic Hydrogenation of CO<sub>2</sub> to Methanol Using Multinuclear Iridium Complexes in a Gas-Solid Phase Reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, DOI: 10.1021/jacs.0c11927

## 抗溶剂增强水系锌离子电池性能和循环稳定性

水系锌离子电池具有较高比容量、良好安全性和环境友好等优点，是一种十分具有前景的电化学储能技术。但由于水系电解质中水分子活性较高，会与锌离子反应，即溶剂化作用使得锌离子利用率下降；此外锌离子不均匀沉积诱发形成枝晶导致性能和循环稳定性衰退。因此开发新型电解质是该研究领域的热点方向之一。

由澳大利亚阿德莱德大学的 Shizhang Qiao 教授课题组牵头的联合研究团队通过在水系硫酸锌 ( $\text{ZnSO}_4$ ) 电解液中加入低成本的抗溶剂，抑制了水分子活性和锌电极副反应，避免了枝晶生成提升锌电极可逆性，进而显著改善了电池性能和循环稳定性，经过 900 余次循环后电池库伦效率依旧高达 99.7%。相关研究发现通过向原生电解质中加入抗溶剂能够打破原有溶液中的溶剂化平衡从而改变原有电解质的分子水平。由于醇类可以与水互溶，但是并不能溶解  $\text{ZnSO}_4$ ，因此醇类可以作为  $\text{ZnSO}_4$  水溶液的抗溶剂，即醇类溶液能够与水分子作用降低水分子活性，进而抑制  $\text{Zn}^{2+}$  的溶剂化。为此，研究人员向 2 摩尔浓度的  $\text{ZnSO}_4$  水溶液加入 50% 体积比例的甲醇（甲醇与水的体积比为 1:1）。实验发现，原来透明均一的电极质出现了沉淀，通过微观结构表征显示该沉淀物为  $\text{ZnSO}_4$ （ $\text{ZnSO}_4$  重结晶），推测甲醇的确与水分子相互作用，破坏了  $\text{Zn}^{2+}$  的溶剂化，即起到了抗溶剂作用。而进一步的傅里叶红外光谱表征证实了上述推测，因为  $\text{SO}_4^{2-}$  离子的伸缩共振峰从  $1073.2 \text{ cm}^{-1}$  移动到了  $1088.5 \text{ cm}^{-1}$ ，该振动峰与  $\text{ZnSO}_4$  固态粉末类似。而对含有甲醇和无甲醇  $\text{ZnSO}_4$  溶液开展电解产物分析发现，甲醇加入后无气体产生，而无甲醇溶液中探测到了氢气，表明了甲醇加入抑制了析氢副反应，主要原因是甲醇抑制了水分子活性。再则，研究人员探究了甲醇加入后对锌电极可逆性的影响：通过组装 Zn/Cu 硬币电池开展锌沉积/剥离实验，结果显示无甲醇电解质锌电极表面出现了枝晶且电极本身也被严重腐蚀，而含有甲醇的电解质中则没有观察到枝晶和腐蚀现象，表明了锌的沉积/剥离是高度可逆的，这有助于提升电池的循环稳定性。最后对电池开展了电化学性能测试，在室温、 $100 \text{ mA g}^{-1}$  放电电流密度下，含有甲醇的电池获得了  $219 \text{ mAh g}^{-1}$  比容量，稳定循环 2000 余次后，容量保持率高达 85.5%；同样测试条件下无甲醇电池获得了  $213 \text{ mAh g}^{-1}$  比容量，但 2000 次循环容量保持率不到 50%；上述结果表明了抗溶剂甲醇的加入确实改善了电池的循环稳定性。

该项研究创新性地在水系电解质中加入抗溶剂，实现了对水分子活性和锌离子溶剂化作用的抑制，改善了锌电极可逆性，进而增强了电池循环稳定性，为设计开发高性能高安全性长寿命的可充电锌离子电池提供了新思路。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》<sup>10</sup>。 (郭楷模)

<sup>10</sup> Junnan Hao, Libei Yuan, Chao Ye, et al. Boosting Zn electrode reversibility in aqueous electrolyte using low cost antisolvents. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, DOI:10.1002/anie.202016531

## 中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心是服务国家和中科院能源决策管理、科技创新、产业发展的专业情报研究机构，历年来承担和参与了多项国家级、中科院、省部级能源科技战略规划和重要科技计划研究。中心的主要产品包括《先进能源发展报告》、《先进能源动态监测快报》（半月刊）、《能源与科技参考》及各类深度能源情报研究分析报告，主要研究方向包括能源科技领域的国际科技战略与规划、科技计划与预算、科技进展与动态、科技前沿与热点、重大成果工程应用、重要科技政策与管理研究。

	研究内容	特色产品
战略规划研究	开展科技政策与科研管理、发展战略与规划研究等相关服务，为科技决策机构和管理部门提供信息支撑。	先进能源发展报告：科技引领能源 国际能源战略与新能源技术进展 金融危机背景下的能源战略 世界能源强国能源科技创新体系分析报告 美国能源科技计划管理机制及启示 .....
领域态势分析	开展特定领域或专题的发展动态调研与跟踪、发展趋势研究与分析，为研究机构、企业的科研项目提供情报服务。	核电技术国际发展态势分析报告 太阳能热发电技术国际发展态势分析报告 智能电网国际发展态势分析报告 规模化电力储能技术国际发展态势分析报告 高端洁净煤发电技术国际发展态势分析报告 .....
技术路线研究	开展产品、成果、专利或标准的情报研究，分析相关行业的现状及发展趋势，为企业发展与决策提供参考。	国际能源领域技术路线图解析 低阶煤热解/气化/循环流化床专利态势分析 新型煤气化技术发展报告 太阳能技术新突破：钙钛矿太阳电池 我国能源互联网发展重要战略问题研究 .....

编辑出版：中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

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

电话：（027）87199180

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

微信公众号：CASEnergy

