

# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- 埃克森美孚发布《世界能源展望 2040》报告
- 德国专家建议建立专用电信基础设施推动能源数字化转型
- DOE 资助核聚变基础研究和科学中心建设
- 英国政企联合投资超 3 亿英镑支持绿色交通
- Pt-O-Pt 原子体系将 Pt 单原子的 CO 催化活性提升百倍以上

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

- 埃克森美孚发布《世界能源展望 2040》报告 .....2  
德国专家建议建立专用电信基础设施推动能源数字化转型 .....5  
DOE: 2018年美国风电装机强劲增长 成本持续下降 .....7

### 项目计划

- 英国政企联合投资超3亿英镑支持绿色交通 .....11  
DOE 资助核聚变基础研究和科学中心建设 .....12  
DOE 资助5900万美元支持先进车辆技术研发 .....13  
DOE 部署新项目推进先进氢能技术研发 .....14

### 前沿与装备

- Pt-O-Pt 原子体系将 Pt 单原子的 CO 催化活性提升百倍以上 .....15  
多孔电子传输层显著提升有机太阳能电池稳定性 .....16  
新型隔膜/电解质体系大幅提升锂离子电池耐高温特性 .....17  
新型硫氮共掺杂复合电极有效抑制穿梭效应 .....18

## 本期概要

**埃克森美孚公司 (ExxonMobil) 发布《世界能源展望 2040》报告，分析预测了至 2040 年全球能源需求、供应和碳排放的趋势：**在经济增长的推动下，2040 年全球一次能源需求将比 2017 年增长 20%，中国和印度将占需求增量的一半；改进能效将在降低能源需求和碳排放方面发挥重要作用；石油仍居一次能源首位，天然气将超越煤炭成为第二大能源；电力部门能源需求增速最快，到 2030 年将增加 60%；液体燃料品种将更加多样，常规原油和凝析油占比将从 2017 年的约 2/3 降至 2040 年的约 1/2；天然气产量增长将主要来自非常规天然气；全球能源相关碳排放将在 2035 年达峰，然后到 2040 年较峰值下降 15% 以上；转向使用低碳燃料将使 2040 年工业部门碳排放量与 2017 年几乎持平。详见正文。

**德国联邦经济事务和能源部 (BMWi) 发布了一份关于专用电信基础设施推动能源数字化转型的专家意见，评估了各种电信技术对能源系统数字化转型的利弊：**未来能源系统对电信服务和基础设施提出了新的要求，需考虑电信网络运营商的现有产品是否满足需求并可支持系统协同运行的数字化。基于模型计算结果，对不同移动解决方案所需的基础设施进行量化分析表明，建立 450 MHz 频段关键基础设施的专用移动网络可以全面、低成本地满足能源转型的要求。监管机构需制定新的频率分配方案，并与能源转型同步建立相关电信基础设施。

**英国政府宣布公私部门将联合投资超过 3 亿英镑，用于发展更清洁、环保的交通方式：**其中政企联合投资 3 亿英镑支持更清洁的航空货运/客运解决方案，包括城市飞行出租车、电动客运飞机以及货运无人机。此外，英国工程和物理科学研究委员会将为氢燃料交通、减少货运碳排放、电气化实现交通脱碳、新型航空燃料和脱碳交通综合研究 5 个低碳交通研究网络项目各资助 100 万英镑，用于开发更清洁燃料和其他创新技术。

**美国能源部 (DOE) 宣布将资助 5000 万美元，用于支持核聚变基础研究和科学中心建设：**本次资助主要涵盖两大主题，一是资助 3000 万美元支持国际托卡马克磁约束核聚变协同研究项目，关注重点是在超导托卡马克装置里维持高温等离子体的长时间稳定运行；二是资助 2020 万美元支持低温等离子体科学中心和设施建设，以为等离子体研究提供诊断工具、仪器和设备。

**密歇根大学 Bryan R. Goldsmith 教授课题组牵头的国际联合研究团队成功设计制备了出了一种基于 Pt-O-Pt 原子体系的 Pt 单原子催化剂，可在低温下将 CO 催化氧化活性提升百倍以上：**该项研究精心设计制备了以铂-氧-铂 (Pt-O-Pt) 原子体系形式呈现的 Pt 单原子催化剂，得益于其独特的 Pt-O-Pt 原子体系，使得 O 能够快速有效地在 Pt 单原子间迁移，从而将 Pt 单原子的低温 CO 催化活性提升了百倍以上，更为关键的是该改进方法具有普适性，可以很容易的沿用到不同载体上，为 CO 低成本高效还原开辟了全新技术路径。

# 埃克森美孚发布《世界能源展望 2040》报告

8月28日，埃克森美孚公司（ExxonMobil）发布《世界能源展望 2040》<sup>1</sup>报告指出，由于人口和经济的增长，到2040年全球能源需求将增长约20%，发展中国家将是增长的主要来源。石油仍然是第一大能源，天然气将超越煤炭成为第二大能源。能源相关CO<sub>2</sub>排放将在2035年达到峰值，在2017年基础上增加5%。改进能效将为降低能源需求和碳排放发挥重要作用。主要内容如下：

## 一、全球能源需求

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

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

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

---

<sup>1</sup> Outlook for Energy: A perspective to 2040.

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

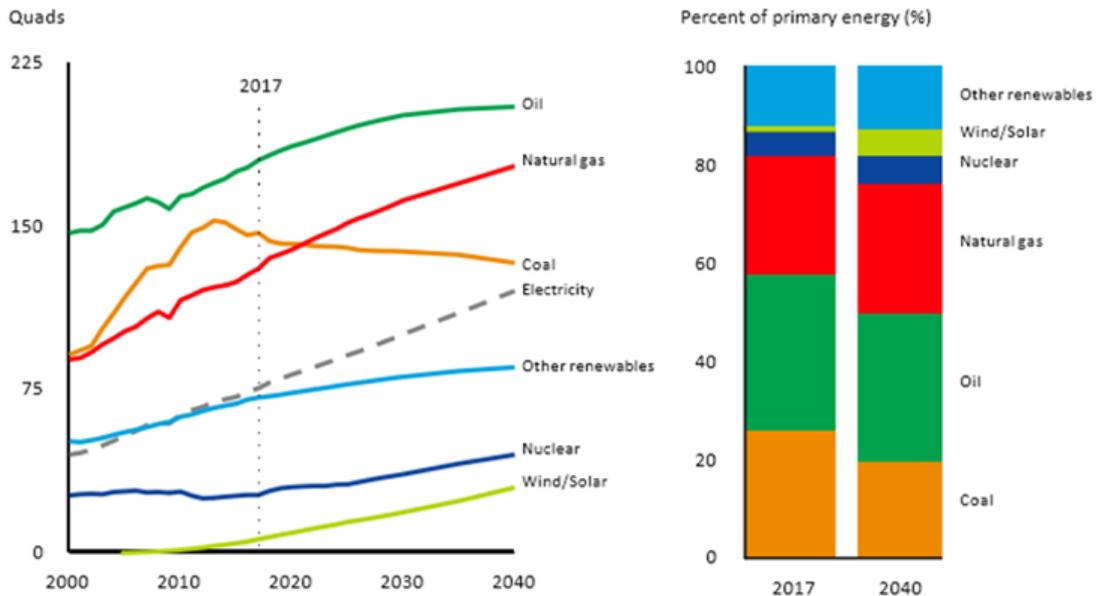


图 1 全球能源结构变化

4、**电力部门能源需求将增长 60%，可再生能源将成为主要电力来源。**电力需求增速约为一次能源需求增速的 3 倍，在技术支持和政策引导作用下，风力发电、太阳能发电增速最快，到 2040 年其在发电量中占比将从 2017 年的 6% 提升至 20%，欧洲和北美的风电和太阳能发电将提供超过 25% 的电力。OECD 国家的煤改气措施使天然气发电大幅增长，非 OECD 国家天然气发电的一半增长位于非洲和中东等产地。中国将占全球核电增量的 70%，OECD 国家则基本不增长。亚太地区煤炭资源丰富、经济不断发展的国家煤电仍会继续增长。

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

6、**2040 年住宅和商业部门的能源需求预计增加 20%，主要由于非 OECD 国家的经济增长导致用电需求增加。**随着经济发展，中产阶级人数增多，到 2040 年住宅

用电将增加 2/3。中国和印度的家庭用电量将接近欧洲水平，非 OECD 地区能源需求将增加 35% 以上，而 OECD 国家由于能效的提高，能源需求仅增长 4%。

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

## 二、全球能源供应

**1、液体燃料仍将是主要能源，其供应品种将更加多样化。**到 2040 年，全球液体燃料（石油、凝析油、致密油和生物燃料等）产量将比 2017 年增长约 17%，常规原油和凝析油产量将减少，供应增量主要来源于致密油、深水油和天然气凝析液（NGL）。因此，液体燃料供应愈加多样化，常规原油和凝析油占比将从 2017 年的约 2/3 降至 2040 年的约 1/2。在 2017 至 2025 年，北美致密油和 NGL 产量将翻倍，成为液体燃料净出口地区；2025 年后，拉丁美洲新开采的深水油和中东地区的常规原油将满足全球需求增长。中东以及俄罗斯/里海将继续作为常规石油的主要出口地区，亚太地区仍将是液体燃料需求最大和增速最快的地区，将继续增加进口以满足需求。

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

## 三、能源相关碳排放

2000 年至 2017 年，由于全球 GDP 增长了 60%，导致碳排放量大幅增加。预计到 2035 年，全球二氧化碳年排放量将达到峰值，比 2017 年增长约 5%。预计全球轻

型汽车的碳排放将在 2020 年代达到高峰，然后到 2040 年较峰值下降 15% 以上。全球 GDP 在 2040 年近乎翻番，技术的提升对于减缓排放至关重要。使用低排放能源发电将使 2040 年电力碳排放强度比 2017 年降低 35%，降低碳排放强度和  
提高能效将使工业部门的单位 GDP 碳排放降低约 50%，使全球单位 GDP 碳排放下降近 45%。

（张凯宏 岳芳）

## 德国专家建议建立专用电信基础设施推动能源数字化转型

8 月 20 日，德国联邦经济事务和能源部（BMWi）发布了一份专家意见，评估了各种电信技术对能源系统数字化转型的利弊<sup>2</sup>。该意见由德国基础设施和通信服务科学研究院（WIK）的专家出具，详细评估了能源供应系统对电信基础设施和条例的要求，以及如何改造现有基础设施以满足这些要求。专家认为，建立 450 MHz 频段关键基础设施的专用移动网络可以全面、低成本地满足能源转型的要求。该意见的主要内容如下：

### 一、未来能源系统对电信服务和基础设施提出了新的要求

随着能源转型的进行，可再生能源的扩张正在稳步推进。目前，大多数可再生能源发电厂都与配电网连接，其发电的分散化、小规模和波动性增加了能源供应的复杂性，对配电系统运营商的要求也相应提高。配电系统运营商必须双向连接设备、可再生能源系统、热电联产、储能设施和新用电负荷（特别是电动汽车的充电基础设施），同时还必须符合应急管理的通信技术要求。根据德国 2016 年修订的《能源转型数字化法案》，电表运营商必须为全国范围内的电网和市场参与者的双向通信提供基础设施，将智能电表网关作为安全和标准化的平台。针对不同用户，需确保能够通过优先级划分保障数据传输的“服务质量”，还需提供应急通信服务，包括语音通信。因此，需要考虑电信网络运营商的现有产品是否满足需求并可支持系统协同运行的数字化。系统协同的基本先决条件是确保配电网的弹性，即在电压下降或电源故障的情况下保证通信服务。

### 二、移动通信基础设施需求的评估结果

WIK 的专家基于系统模型进行计算，量化了不同移动解决方案所需的基础设施，并与现有移动通信基础设施比较，确定了建造和/或扩展的要求。

1、在中期和长期内，有线宽带基础设施需要与其他电信基础设施结合使用，但无法发挥协同作用。宽带、光纤和数字用户线路（DSL）在技术上都非常适合，但需确保管理员在任何时间对智能电表网关的访问。德国目前缺乏将宽带和 DSL 用作

<sup>2</sup> 450 MHz as an opportunity for the energy transition: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy publishes expert opinion on telecommunications infrastructure for the digitisation of the energy transition.  
<https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2019/20190820-450-mhz-as-an-opportunity-for-the-energy-transition.html>

专有通信设施的必要技术框架条件，而光纤尚处于普及阶段。因此，在中期和长期内有有线宽带基础设施需要与其他电信基础设施结合使用，但这些技术无法协同用于智能电表网关互连、配电网（如设备的控制和监控）以及语音通信（如紧急通信）。

**2、宽带电力线通信技术具备连接智能电表网关的潜力，但其发挥的作用取决于使用的标准。**在各种限定条件下，特定的电力线通信基础设施是整体综合解决方案的一部分，即可与其他无线或无线电通信基础设施组合使用，但无法支持应急通信。

**3、非专用无线电频段通信无法满足智能能源网络的要求。**近年来，越来越多的无线电技术被用于使用非授权频率的机器对机器通信（物联网）。由于没有专有频率，无法保证服务质量，因此不能支持智能能源网络中的关键和安全相关应用需求，而且其传输容量无法满足覆盖 95% 的智能电表网关的要求。

**4、现有 1 GHz 以下的公共 LTE<sup>3</sup>移动通信基础设施用于能源系统需进行大规模扩容。**当前 LTE 移动通信基础设施已经具有大量的基站，但要覆盖 95% 的智能电表网关需大规模扩容移动通信网络，即 1 GHz 以下频率的基站需增加 10000 个以上。即使达到了 95% 的覆盖目标，也不能保证任何智能电表网关都可以使用移动技术连接。因此，必须提供补充技术解决方案以满足特定要求，但各移动通信网络的协同作用实际上无法实现。

**5、450 MHz 专用 LTE 移动网络是用于能源系统首选方案。**由于所使用的频率的传播特性，450 MHz 专用 LTE 移动通信网络所需站点的数量比使用公共移动网络所需站点少 1/3。通过明确定义专用网络的用户组可以实现优先级的划分，因此在技术上可以满足智能电表网关相关通信要求。

### **三、监管机构需制定新的频率分配方案，并与能源转型同步建立相关电信基础设施**

德国电信监管机构必须确定 2021 年起无线频率的使用权分配方案。如果 450 MHz 网络支持的电信服务可用于能源领域，德国电信监管机构应确保在新的分配方案中，使用条款和条件的设计能够鼓励在全国范围内建立关键基础设施移动网络。此外，对电信市场的行业特定监管的分析表明，如果间接地促进对此类网络的投资，则可以推动通过光纤网络连接智能电表网关。该研究表明，应与能源转型同步建立电信基础设施，以支持发展智能电表网关通信网络和配电网中其他特定的联网能源设施，但这都取决于无线电频率的相关法规规定。

（岳芳）

---

<sup>3</sup> LTE：通用移动通信系统技术标准的长期演进（Long Term Evolution），是 3G 与 4G 技术之间的过渡，是 3.9G 的全球标准。

## DOE：2018 年美国风电装机强劲增长 成本持续下降

8 月 23 日，美国能源部（DOE）发布《2018 年风电市场报告》<sup>4</sup>，公布了至 2018 年底美国风力发电装机、技术、成本、价格的情况，主要涉及陆上风电、海上风电和分布式风电。报告指出，2018 年美国陆上风电强势扩张，新增装机容量 7588 MW，成本和价格均创下历史新低。为了提高性能、降低成本，风电项目向大尺寸、多涡轮机配置转变。由于税收抵免政策即将到期，风电新增装机容量将在未来两年逐渐上升后转向下降趋势。在分布式发电方面，2018 年美国新增分布式风电装机容量 50.5 MW，其中 1 MW 以上大型风力涡轮机占据主导（新增装机 47.4 MW），小型风力涡轮机出口量从 2017 年的 5.5 MW 显著下降至不足 1 MW。2018 年全球海上风电新增装机容量增长 50% 达到了创纪录的 5652 MW，美国也正加快推进海上风电项目部署，计划到 2035 年部署 19968 MW 项目。报告要点如下：

### 一、风能技术市场报告

#### 1、装机趋势

2018 年美国风电持续强劲增长，投资 110 亿美元新增装机 7588 MW，占所有新增电力装机容量的 21%，增长仅次于太阳能和天然气发电。在税收政策等有利因素支持下，风电累计装机容量达到了 96433 MW。此外，2018 年还完成了 1312 MW 的风电设施改造，主要是升级现有风机的转子直径和主要机舱部件。2018 年全球风电装机容量增加 50 GW 达到 590 GW，美国风电新增装机和总装机均居世界第二，但仍远落后居于首位的中国。在美国各州中，德克萨斯州 2018 年新增风电装机容量最大，为 2.36 GW，其装机总量也为全国第一（25 GW）。2018 年美国有 14 个州的风电占比超过 10%，而全国风力发电量占发电总量的 6.5%。

#### 2、产业趋势

2018 年，通用电气占美国风力涡轮机市场的 40%，维斯塔斯（38%）和诺维尔斯（8%）分列第二、三名。美国风电行业供应链较为稳定，但也存在强大竞争压力，以及由于生产税收抵免逐步取消导致的中期内需求下降。2018 年美国风电行业就业人数达到 11.4 万人的新高，三家主要的风力涡轮机供应商都在国内有生产设施。美国的机舱装配能力达到了创纪录的 15 GW，并具备年生产 9.2 GW 的叶片和 8.9 GW 的风机塔架的能力。尽管如此，美国风电行业仍主要依赖进口。2018 年美国风电融资环境保持良好状态，未来两年将保持向好态势，这是由于大量积压的涡轮机符合安全港要求，有资格获得 100% 的生产税收抵免。2018 年新建的风电资产中 80% 由独立电力生产商拥有，剩余属于公用事业公司（19.9%）和其他实体（0.1%）。公用事业公司仍为风电的最大承购商，除拥有近 20% 的新增风电资产外，还从 27% 的新

---

<sup>4</sup>Department of Energy Releases Annual Wind Market Reports, Finding Robust Wind Power Installations and Falling Prices.  
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-releases-annual-wind-market-reports-finding-robust-wind-power>

增风电容量中购买电力，零售商（包括企业承购商）则占据 24%。

### 3、技术趋势

2018 年新增装机中，平均涡轮机容量、转子直径和轮毂高度均有所增加，以优化风电的成本和性能。涡轮机规模不断扩大，新建风力发电机的平均额定容量为 2.43 MW，同比增加 5%，平均转子直径增加 2% 至 115.6 米，平均轮毂高度也同比增加 2% 至 88.1 米。转子直径增长尤为显著，2018 年 87% 的新装涡轮机转子直径超过 110 米，30% 的涡轮机转子直径超过 120 米。随着转子面积增速超过涡轮机额定功率增速，涡轮机平均比功率从 1998-1999 年的 395 W/m<sup>2</sup> 降至 2018 年的 230 W/m<sup>2</sup>，但这一趋势在 2018 年变缓。近期风力涡轮机高度将继续增加，2019 年初获得许可的项目中有 44% 的机组超过 152 米，而 2018 年新建机组的平均高度为 146 米。采用多涡轮机配置的风电项目将持续增多，2018 年超过 1/3 的大型风电机组采用了此类方案。2018 年有 23 个风电改造项目，其平均转子直径增加了 8.1 米，比功率从 357 W/m<sup>2</sup> 降至 301 W/m<sup>2</sup>，目的是重新获得生产税收抵免资格，提高性能并延长机组寿命。

### 4、性能趋势

2018 年美国风电机组的平均容量系数为 35%，其中 2014-2017 年建成的项目平均容量系数达到了 41.9%。涡轮机的设计是影响容量系数变化的重要因素，比功率下降可导致容量系数大幅增加。此外，风力资源强度变化、风力设备的老化也影响了容量系数。

### 5、成本趋势

风力涡轮机价格在 2000-2002 年达到 800 美元/kW 的低点后，到 2008 年价格翻了一番。此后，尽管尺寸增加，风力涡轮机价格却持续下降，到 2018 年底价格降至 700-900 美元/kW 的范围。风力涡轮机的低价导致风电项目成本降低至 2000 年初的水平，当前在建项目成本则将降至 1100-1250 美元/kW，且风电项目建造成本随项目规模增大而下降。十年前投运的早期项目运行和维护成本随运行时间增加而增多，而十年内投运的项目其运行和维护成本保持稳定。

### 6、风电价格趋势

风电购买协议（PPA）价格处于历史低位，美国风电平均 PPA 价格在 2018 年降至 20 美元/MWh（历史峰值价格超过了 70 美元/MWh），这主要是由于近年来在风电价格较低的内陆地区建造大量机组，以及风电产能提升和安装运营成本降低等因素。尽管如此，风电仍受到太阳能和天然气的激烈竞争，太阳能发电的成本比风电下降速度更快，在税收优惠政策支持下，风电和太阳能的 PPA 价格都低于天然气联合循环发电。风电的平准化度电成本（LCOE）变化趋势与 PPA 价格相同，2018 年建成项目的平均 LCOE 最低，为 36 美元/MWh。

### 7、政策和市场驱动

生产税收抵免（PTC）仍是风电项目部署的主要驱动力之一，但政策规定对于 2016 年以后开始建设的项目逐步降低 PTC。国家政策有助于引导风电开发的位置和数量，但风电的增长已经超过了国家目标。电力系统运营商正实施各种方法以消纳更多风电，但仍存在输电和其他障碍。2018 年有约 1300 英里的输电线路投运，并确定有 27 个输电项目将在近几年完成。

## 8、前景展望

在 PTC 分五年到期的情况下，几年后风电新增装机容量将迅速下降，风电技术成本降低和性能提高导致的售电价格下降也会起到一定的影响。因此，预计 2019 年和 2020 年风电新增装机容量将分别上升至 9-12 GW 和 11-15 GW，然后在 2021-2028 年期间下降。输电线路限制、天然气和太阳能的竞争，以及电力需求缓慢增长也对风电的增长起到抑制作用。然而，风电成本持续降低、企业对风电需求的迅速增加、美国 29 个州实行的可再生能源配额制标准、某些地区的新型输电技术将成为长期内推动风电发展的潜在因素。

### 二、分布式风电市场报告

2003 至 2018 年，美国分布式风电累计装机容量 1127 MW。其中，2018 年美国新增分布式风电装机容量 50.5 MW，集中在 12 个州。在新增机组中，大型风力涡轮机（大于 1 MW）装机总量为 47.4 MW，中型风力涡轮机（101 kW-1 MW 级）为 1.6 MW，小型风力涡轮机（100 kW 以下）为 1.5 MW。大型风力涡轮机装机容量比 2017 年的 78 MW 下降了 39%，中型风力涡轮机则比 2017 年（4 MW）下降了 60%。分布式风电设备规模逐渐增长，中、大型风力涡轮机的平均铭牌容量逐渐增加，从 2003 年的 1.1 MW 增至 2018 年的 2.1 MW。2018 年用于公用事业的分布式风电仍占最大份额（47%），相比 2017 年（78%）有所下降，而用于商业和工业的分布式风电则由 2017 年的 9% 提升至 29%，用于农业和住宅的分布式风电占比也有所下降，由 2017 年的近 3% 降至 1%。1 kW 以下风电设备在小型分布式发电项目中占比逐渐增加，占 2018 年新增小型风电涡轮机数量的 99%，占容量的 47%。2018 年，美国小型风力涡轮机出口量显著下降，从 2017 年的 5.5 MW 降至不到 1 MW，而 2015 年的峰值出口容量为 21.5 MW。2018 年新增分布式风电项目中，采用大于 100 kW 涡轮机的项目平均成本为 4437 美元/kW，相比 2017 年的 3014 美元/kW 有所增加。考虑美国政策激励的分布式风电项目的平均 LCOE 随风力涡轮机容量系数增加而降低，小型风力涡轮机的平均 LCOE 为 23 美分/kWh，容量系数为 17%，而中型和大型风力涡轮机则分别为 14 美分/kWh、25% 和 5 美分/kWh、31%。

### 三、海上风电技术市场报告

#### 1、全球海上风电市场进展

2018 年全球海上风电新增装机容量达到了创纪录的 5652 MW，比 2017 年增加

了 50%，其最大贡献来源于中国（2652 MW），其次是英国（2120 MW）和德国（835 MW）。到 2018 年底，全球累计海上风电装机容量达到 22592 MW，根据目前在建项目，预计 2019 年新增装机容量将更高，而全球正在开发及计划开发的海上风电总容量达到了约 272000 MW。欧洲 2018 年下半年海上风电开发步伐有所放缓，但在长期内其海上风电行业发展保持上升势头。到 2030 年，全球海上风电装机容量预计将达到 154-193 GW，其中超过 50% 位于欧洲，剩余大部分部署在中国。

## 2、美国海上风电市场进展

2018 年，美国正开发及潜在可供开发的海上风电总容量增加了 1.4% 达到 25824 MW，其中有 21225 MW 是开发商通过拍卖获取了专有开发权。美国州政府政策强调加快海上风电项目部署，2017 年底，美国海上风电采购政策的总目标是到 2030 年部署超过 5300 MW 的海上风电项目。到 2019 年初，各州政府承诺的海上风电开发总目标是到 2035 年部署 19968 MW 项目。美国海上风电市场的活跃刺激了海上风电租赁拍卖的激烈竞争，2018 年美国海洋能源管理局（BOEM）的三场拍卖共成交 1573 平方公里的海上风能租赁区，每个区块成交价格均为 1.35 亿美元，是 2016 年单个租赁区成交价格（4200 万美元）的三倍多。拍卖价格的增长主要基于以下因素：国家政策推动使市场对海上风能增长的信心增强；监管机构和金融机构对海上风能项目开发的信心；成本的降低；美国东北部对海上风电的需求增加。根据业内预测，到 2030 年美国海上风电装机总量将达到 16 GW。加利福尼亚州更为关注海上风电，2018 年通过了《参议院法案 100》和《100% 清洁能源法案》，计划成为 100% 使用可再生能源的最大州。为支持海上风电技术创新，美国能源部宣布为纽约州能源研究和开发管理局提供 2050 万美元，建立国家海上风能研发联盟。

## 3、海上风电技术和价格趋势

行业内正通过使用超过 10 MW 的大型风力涡轮机降低成本，并进一步实现 12 MW 风力涡轮机的市场应用。风力涡轮机转子直径的增长速度比铭牌容量的提升速度慢。下一代风力涡轮机将采用更低比功率和更大转子直径，代表机型有西门子-歌美飒（Siemens Gamesa）公司的 SG 10.0-193DD 型 10 MW 风力涡轮机（转子直径 193 米，2022 年上市）和 GE 公司的 Haliade-X 型 12 MW 风力涡轮机（转子直径 220 米，2021 年上市）。市场上越来越多地采用 66 kV 阵列电缆降低电力基础设施成本，在更高电压下运行可减少海上变电站数量、电缆总长度和电力损耗。2018 年耐克森公司（Nexans）在三个海上风电试点项目中示范了其 66 kV 电缆技术。多个浮动式海上风电试点项目正在稳步推进，2018 年全球浮动式海上风电的产能潜力达到了 4888 MW，包括了 38 个已宣布项目，其中有 46 MW 已经开始运行。浮动式海上风电市场已进入采用第二代、多涡轮机项目的商业前示范阶段，在建项目有 14 个（共约 200 MW），半潜式结构占据了浮动式海上风电的主导。由于成本降低，海上风电

价格持续下降，调整履约价格<sup>5</sup>从 2017-2019 年投运项目的约 200 美元/MWh 下降至 2024-2025 年投运项目的约 75 美元/MWh。

#### 4、前景展望

未来十年海上风电市场将加速增长，到 2030 年累计装机容量将达到 154-193 GW，到 2050 年将超过 500 GW。就技术、供应链和基础设施而言，海上风电尚处于早期阶段。海上风力涡轮机功率持续增加，未来将达到 15 MW。尽管大型风力涡轮机可降低成本，但制造、安装和维护所需的相应工业设备和基础设施的完善可能还需要几年时间，进而延迟行业的成熟期。美国一些州可能会继续推动海上风电发展，但由于投资税收抵免将在 2020 年到期，短期内海上风电承购协议价格是否会下降尚不确定。

(许丹霞 岳芳)

## 项目计划

### 英国政企联合投资超 3 亿英镑支持绿色交通

8 月 24 日，英国政府宣布公私部门将联合投资超过 3 亿英镑，用于发展更清洁、环保的交通方式<sup>6</sup>。其中政企联合投资 3 亿英镑支持更清洁的航空货运/客运解决方案，另外投入 500 万英镑用于电动飞机和洁净航空燃料解决方案的开发，以促进清洁交通运输技术的发展，确保英国在交通技术创新方面的国际领先地位。主要内容如下：

#### 一、航空货运/客运新技术

英国政府将出资 1.25 亿英镑，行业联合投资 1.75 亿英镑，支持人员和货物航空运输的清洁新技术，包括城市飞行出租车、电动客运飞机以及货运无人机。上述投资将有助于开发更环保的航运，并促进在线购物的新方式。

#### 二、低碳交通研究网络项目

英国工程和物理科学研究委员会（EPSRC）将为 5 个低碳交通研究网络项目各资助 100 万英镑<sup>7</sup>，用于开发更清洁燃料和其他创新技术。具体包括：

**1、氢燃料交通研究网络：**由杜伦大学主导，汇集了航空、铁路、公路和海上运输模式的专家，研究通过利用氢能支持各交通领域的脱碳。项目将综合考虑技术、社会经济、行为科学和政策，促进知识共享。

**2、减少英国货运碳排放研究网络：**由伦敦大学学院主导，将探索如何利用清洁

<sup>5</sup>考虑不同项目在不同国家将获得的补贴和收益等进行调整后的履约价格

<sup>6</sup> PM accelerates towards greener travel with new £300 million investment.

<https://www.gov.uk/government/news/pm-accelerates-towards-greener-travel-with-new-300-million-investment>

<sup>7</sup> Networks to prepare UK transport for a low carbon future.

<https://epsrc.ukri.org/newsevents/news/networks-to-prepare-uk-transport-for-a-low-carbon-future/>

技术和燃料降低重型货车和其他货运车辆的碳排放，通过试运行低碳项目研究使货运脱离化石能源依赖的途径。

**3、通过电气化实现交通脱碳研究网络：**由卡迪夫大学主导，将研究跨部门电气化综合交通运输系统面临的挑战，着重关注能源网络、电动汽车充电基础设施、电动和混合动力飞机、铁路网络电气化。

**4、新型航空燃料研究网络：**由伯明翰大学主导，将探讨使用低碳合成燃料所面临的障碍，以及为商业航空带来的除降低碳排放以外的益处。

**5、通向脱碳交通的综合研究网络：**由利兹大学主导，该研究网络将与工业界和政府密切合作，设计不同地区交通行业迅速脱碳的解决方案，并探索相应的管理方法。

（岳芳）

## DOE 资助核聚变基础研究和科学中心建设

8月28日，美国能源部（DOE）宣布资助5000万美元，支持大学、国家实验室和私营企业联合开展聚变能和等离子体科学研究项目<sup>8</sup>，以加速聚变能源关键技术突破，为核聚变未来商用奠定基础。本次资助主要涵盖两大主题：一是国际托卡马克磁约束核聚变协同研究；二是低温等离子体科学中心和设施建设。具体内容如下：

### 1、国际托卡马克磁约束核聚变协同研究（3000万美元）

边缘局域模控制实验研究；直接接触刮削层（SOL）的面向等离子体材料；聚变堆偏滤器靶板的设计研究；托卡马克装置电子回旋辐射诊断设计和开发；长脉冲托卡马克干扰缓解滤波器（IMF）解决方案；高 $\beta$ 长脉冲等离子体电磁辐射干扰预测和避免；面向等离子体材料钨涂层的设计、制备和评价；聚变等离子体非线性波-粒子相互作用和强撕裂模条件下的比压阿尔文本征模实验；长脉冲高性能放电试验；利用电子回旋辐射成像和中子诊断系统开展托卡马克等离子体湍流和输运的实验研究；聚变等离子体三维物理及磁场边界主动控制技术；均匀晕等离子体区中性粒子输运的两能群模型。

### 2、低温等离子体科学中心和设施建设（2020万美元）

在普林斯顿等离子体物理实验室、桑迪亚国家实验室分别建造一个聚变研究设施用于支持低温等离子体科学和技术研究；在密歇根大学建立一个复杂表面低温等离子体研究中心；在俄亥俄州立大学建立一个等离子体辅助燃烧和等离子体催化联合研究中心。

（郭楷模）

<sup>8</sup>Department of Energy to Provide \$50 Million for Fusion Energy and Plasma Science Research.  
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-provide-50-million-fusion-energy-and-plasma-science-research>

## DOE 资助 5900 万美元支持先进车辆技术研发

8 月 16 日，DOE 宣布向 43 个项目提供 5900 万美元支持先进车辆技术研发<sup>9</sup>，旨在加速开发锂金属固态电池和先进电动机的新材料和设计，重点关注先进电池和驱动电机系统、发动机和燃料的协同优化、高效动力系统材料、替代燃料和新型节能交通系统，具体内容如下：

### 1、固态电池技术（1500 万美元）

**（1）开发固态电池先进材料（1122 万美元）：**无锂枝晶固体电解质；多功能电解质材料；坚固、锂无法穿透、高导电率、电化学稳定、可扩展且低成本的玻璃态固体电解质；薄膜锂-陶瓷电解质构造的物理和力学-电化学现象研究；高能量密度固态电池的低阻抗正极/电解质界面；用于固态锂电池和高压锂电池的分子离子复合材料新型聚合物电解质；采用硫化物玻璃电解质的热压增强全固态电池；单离子导体电解质研究以消除全固态锂离子电池电极极化产生的自放电负影响；开发高能量密度固态锂硫电池材料；开发原位生成电极保护层以防止锂枝晶形成，促进锂固态电池的长循环寿命；复合固体离子导体材料。

**（2）固态电池诊断工具开发（200 万美元）：**固态电池界面问题研究；固态锂电池界面演变的多维诊断。

**（3）固态电池建模开发（179 万美元）：**基于团簇的固体电解质第一性原理建模；高性能全固态锂硫电池界面问题研究。

### 2、高功率密度电机研究（340 万美元）

电磁同步电机系统集成以提高功率密度和促进商业化；具备高功率密度和集成冷却系统的高效先进电机；超高速、高温电机；经济高效的无稀土磁通倍增、扭矩倍增、功率密度增加的牵引电机；利用非晶态金属和金属非晶纳米复合材料开发高功率密度电机。

### 3、节能交通系统（670 万美元）

在拉格朗日能量平滑中通过在车流环中的联网自动驾驶车辆(CAV)减轻拥堵；具有道路交叉口情境感知的节能 CAV。

### 4、燃料和发动机协同优化的预测建模（330 万美元）

通过预测仿真工具开发经过验证的高保真低温等离子体（LTP）模型，实现多模式发动机的 LTP 点火技术；高保真和高效建模以实现燃料和多模式发动机的协同优化；预燃室湍流射流点火过程的湍流预混火焰传播预测建模。

---

<sup>9</sup> DOE Announces \$59 Million and 43 projects to Accelerate Advanced Vehicle Technologies Research.  
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-59-million-and-43-projects-accelerate-advanced-vehicle-technologies-research>

### 5、高效动力传动系统的新材料和发动机技术（1456 万美元）

开发用于中型卡车的低重量高效发动机；开发下一代高效增压发动机。

### 6、替代燃料和公路交通网等（1687 万美元）

开发替代燃料汽车（AFV）和基础设施；发展乡村新交通运输服务；新型社区和车队替代燃料的概念验证；电动汽车数据收集；开放主题。

（岳芳）

## DOE 部署新项目推进先进氢能技术研发

8 月 15 日，美国能源部（DOE）宣布在“H<sub>2</sub>@Scale”计划框架下资助 4000 万美元氢能技术研发<sup>10</sup>，旨在通过技术的早期应用研发来推进氢能和燃料电池技术突破，涉及内容包括氢气生产、基础设施建设（氢气储存和运输）以及燃料电池，实现经济、安全可靠的大规模氢气生产、运输、存储和利用。本次资助着重关注六个主题：

#### 1、新型储氢载体材料开发

开发高吸附容量的沸石型咪唑框架氢气吸附材料；开发包含咪喃和吡咯镁基硼烷可逆储氢材料；开发具备氢气释放功能的可重复使用的新型催化剂；开发新型可逆的氨基化合物液态储氢材料。

#### 2、避免氢腐蚀新材料开发

开发自修复的共聚物用于氢气输送软管以减轻氢腐蚀，延长软管寿命；通过微结构工程和加速试验方法来开发低成本高性能的氢气存储和运输材料；开发新型的疲劳试验系统，降低不锈钢储氢罐疲劳裂纹测试成本；合金储氢材料的氢脆腐蚀分析研究；调控不锈钢中碳化物成分增强其抗氢脆性能；通过组分调控开发下一代低成本高抗氢脆特性的奥氏体不锈钢。

#### 3、新型水解产氢材料开发

面向碱性燃料电池应用的阴离子交换膜设计和制备；新型涂层材料改善固体氧化物电解槽的化学稳定性；开发高氢气通量的薄膜固体氧化物电解槽；用于水裂解产氢电解槽的质子交换膜性能和耐久性研究；开发用于光电化学电池的钙钛矿/钙钛矿串联的光电极；开发复合催化剂材料构建 Z-scheme 催化体系并进行性能评估；新型高熵钙钛矿氧化物提升热解产氢稳定性；针对低温热解产氢，探索和开发新材料；开发能够催化裂解污水产氢的非贵金属催化剂；开发多功能氧电极用于长寿命的电解水制氢；采用 3D/2D 复合疏水性钙钛矿催化剂实现高效的太阳光驱动电解水制氢。

#### 4、生物质制氢联产副产品

开发高效的微藻电化学反应器利用木质纤维素产氢；开发二氯盐催化剂用于甲

<sup>10</sup>Department of Energy Announces \$40 Million in Funding for 29 Projects to Advance H2@Scale.  
<https://www.gov.uk/government/news/supplying-parts-for-the-electric-revolution-apply-for-funding>

烷制氢；使用甲烷脱碳纳米纤维与氢气反应来制备高耐久性的混凝土。

### 5、可逆燃料电池开发和验证

开发可逆的固体氧化物燃料电池系统；针对质子交换膜燃料电池，开发新型的堆栈方法获得高能量效率。

### 6、H<sub>2</sub>@Scale 试点项目

示范一个与核电反应堆相连接的电解槽，利用高温进行热解水产氢；在德克萨斯州建立一个集成氢气生产、存储、运输和使用的试点场址。

(郭楷模)

## 前沿与装备

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

金属单原子催化剂因其具有原子级分散的金属活性中心，表现出极其优异的催化活性和最大的原子使用效率，在催化领域（如水煤气变换、甲醇蒸汽重整、一氧化碳[CO]催化氧化等）展现出广阔的应用前景，引起了国内外研究学者的广泛关注。由密歇根大学 Bryan R. Goldsmith 教授课题组牵头的国际联合研究团队成功设计制备了出了一种基于 Pt-O-Pt 原子体系的 Pt 单原子催化剂，Pt 单原子具备了 100% 分散特性，其低温下 CO 催化氧化活性提升了百倍以上，最高可达 1000 倍。为高效低成本处理汽车尾气，减少排放改善环境提供了良好地催化剂选择。研究人员以氧化铈（CeO<sub>2</sub>）为载体制备了负载型的 Pt 单原子催化剂 Pt/CeO<sub>2</sub>，接着以 Pt/CeO<sub>2</sub> 催化剂为“种子”将其依次置于氢气、以及 CO 和氧气混合气体的氛围中进行化学反应处理。高角环形暗场像-扫描投射电镜表征显示，未经过和经过气体氛围处理后的 Pt/CeO<sub>2</sub> 中的 Pt 单原子都呈现出高度分散状态，分散度接近 100%，这有助于将 Pt 的催化位点最大暴露出来，进而增强催化活性；但是两者 Pt 的分散形式略有不同，未经过气氛处理的 Pt 单原子是直接嵌入在载体 CeO<sub>2</sub> 薄膜表面以 Pt-O-Ce 形式呈现，而经过处理的 Pt 单原子则是以 Pt-O-Pt 原子体系形成存在因此命名为 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub>。随后研究人员对比研究了 Pt/CeO<sub>2</sub> 和 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 两种催化剂的低温（80℃和 150℃）CO 催化活性，结果显示在 50℃和 150℃下，Pt/CeO<sub>2</sub> 的 CO 催化效率分别为  $1.7 \times 10^{-9}$  和  $2.2 \times 10^{-7}$  mol CO<sub>2</sub>/(g·s)，而 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化效率分别增加到  $2.6 \times 10^{-6}$  和  $2.5 \times 10^{-5}$  mol CO<sub>2</sub>/(g·s)，即在同样反应条件下，Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化活性较 Pt/CeO<sub>2</sub> 高出了 2-3 个数量级，即 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化活性提升了百倍以上，最高可达千倍。实验和理论模拟的的动力学研究揭露 Pt-O-Pt/CeO<sub>2</sub> 催化剂的活化能仅为 Pt/CeO<sub>2</sub> 一半水平（活化能越低催化反应越容易进行），而这主要是来自 Pt-O-Pt 原子排列体系，使得 O 能够快速在整个 Pt-O-Pt 原子体系迁移，提升了 CO 的氧化还原效率。该项研

究精心设计制备了以铂-氧-铂 (Pt-O-Pt) 原子体系形式呈现的 Pt 单原子催化剂, 得益于其独特的 Pt-O-Pt 原子体系, 使得 O 能够快速有效地在 Pt 单原子间迁移, 从而将 Pt 单原子的低温 CO 催化活性提升了百倍以上, 更为关键的是该改进方法具有普适性, 可以很容易地沿用到不同载体上, 为 CO 低成本高效还原开辟了全新技术路径。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》<sup>11</sup>。

(郭楷模)

## 多孔电子传输层显著提升有机太阳电池稳定性

有机太阳电池具有成本低、厚度薄、质量轻、制造工艺简单、柔韧性优异等诸多优点, 在可穿戴和便携式电子设备等领域具备广阔的应用前景。然而稳定性不佳限制了有机太阳电池的实际应用, 因此提升器件稳定性是当前科研人员重点关注的研究领域之一。加州大学洛杉矶分校 Yang Yang 教授研究团队设计制备了一种新型的多孔电子传输层替代传统平面型结构电子传输层, 有效抑制了富勒烯受体分子的扩散和聚集, 不仅提升了光生载流子的抽取效率, 还显著改善了器件的热稳定性。研究人员采用溶液加工方法在不同导电玻璃基底旋涂了三种不同的电子传输层薄膜, 分别为多孔二氧化钛 (mp-TiO<sub>2</sub>)、致密二氧化钛 (c-TiO<sub>2</sub>) 和致密氧化锌 (ZnO)。扫描电镜和原子力显微镜表征结果显示, c-TiO<sub>2</sub> 和 ZnO 电子传输层薄膜表面均为平整光滑形貌, 且两者的表面粗糙度均在 1 nm (粗糙度越高, 表面起伏越大; 相反则表明越平整光滑); 相反, mp-TiO<sub>2</sub> 薄膜表面呈现类似海绵的多孔结构, 含有均匀分布的纳米颗粒, 整个表面呈现山峦起伏形貌特征, 表面粗糙度达到了 27.2 nm, 这种形貌有助于增加电子传输层与活性层的接触面积, 从而提高光生电荷的收集效率。接着在上述的电子传输层分别旋涂活性层, 由中间带隙的聚合物 PffBT<sub>4</sub>T-C<sub>9</sub>C<sub>13</sub> 受体、富勒烯衍生物 PC<sub>71</sub>BM 给体组成; 然后旋涂空穴传输层并镀上对电极形成完整的电池器件。电化学性能测试显示, 基于 mp-TiO<sub>2</sub> 多孔层的电池器件的短路电流密度为 20.1 mA/cm<sup>2</sup>, 比 c-TiO<sub>2</sub> (17.7 mA/cm<sup>2</sup>) 和 ZnO (18.4 mA/cm<sup>2</sup>) 电子传输层电池都高; 从而获得了最高的光电转换效率 10.6%。对引入不同电子传输层的器件进行了载流子抽取和载流子收集的修正光电流测试, 测试结果显示基于 mp-TiO<sub>2</sub> 多孔电子传输层的有机太阳电池的修正电流优先饱和, 显示出了更强的载流子抽取和收集能力。这主要是由于 mp-TiO<sub>2</sub> 多孔结构使得电子传输层与活性层之间的界面面积增加, 从而提高了电荷的抽取与收集效率, 这与之前的原子力显微镜以及扫描电子显微镜所观察到的形貌结果一致。接着在 120°C 高温下进行 60 分钟老化测试, 结果显示采用平面型电子传输层 ZnO 电池器件效率从最初的 10.1% 大幅降至 4.7%, c-TiO<sub>2</sub> 电池器件效率从 9.4% 降至 4.3%; 即采用传统平面结构器件只能保持 40% 左右的初始效

<sup>11</sup> Hui Wang, Jin-Xun Liu, Lawrence F. Allard, et al. Surpassing the single-atom catalytic activity limit through paired Pt-O-Pt ensemble built from isolated Pt atoms. *Nature Communications*, 2019, DOI: 10.1038/s41467-019-11856-9

率。而采用新型 mp-TiO<sub>2</sub> 多孔结构电子传输层电池器件经过 60 分钟老化测试后仍可保持 69% 的初始效率（从 10.6% 降到 7.3%）。基于不同电子传输层的有机薄膜热退化过程前后的微观结构研究发现，在热退化测试前，基于所有不同传输层的活性层薄膜上面都表现出了垂直表面和平行表面的混合晶体取向；在热退化测试之后，基于 ZnO 和 c-TiO<sub>2</sub> 平面传输层的活性层薄膜变成了随机排列的取向，而基于 m-TiO<sub>2</sub> 多孔膜仍保持原有的垂直表面和平行表面混合取向，表明 m-TiO<sub>2</sub> 能够很好地控制活性层形貌避免团聚。该项研究设计制备了多孔电子传输层替代传统的平面型电子传输层，一方面增加了电子传输层和活性层的接触面积，从而增加了短路电流密度；另一方面抑制了高温下聚合物活性层的形貌变化，提高了热稳定性，为设计开发高效长寿命有机太阳电池提供了全新的技术方案。相关研究成果发表在《Matter》<sup>12</sup>。

（郭楷模）

## 新型隔膜/电解质体系大幅提升锂离子电池耐高温特性

锂离子电池是目前最为成熟的储能技术之一，已经被广泛应用于各种移动电子产品、电动汽车等领域，是重要的储能器件。然而当前锂离子电池由于材料问题导致其存在工作温度限制，即电池工作温度上限在 60°C 左右，难以承受高温；但目前越来越多的电池应用场景都是高温环境（如发动机周边电子器件、电动汽车等），因此开发耐高温的锂离子电池意义重大。美国空军实验室的 Michael F. Durstock 教授课题组制备了一种新型的耐高温（高沸点）的有机电解液，结合热稳定性良好的柔性隔膜，应用于锂离子电池，获得了 20-120°C 工作温度区间，展现出优异的耐高温特性。研究人员将聚偏氟乙烯（PVDF）溶于 N-甲基吡咯烷酮和甘油溶剂中形成混合溶液，接着加入氧化铝（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）纳米颗粒形成喷墨浆料，利用丝网印刷将喷墨浆料制备成薄膜 Pyrolux，扫描电镜显示薄膜呈现分层级、多孔结构。与传统锂离子电池使用的 Celgard 2325 隔膜进行热稳定性对比试验，结果显示快速燃烧下 Pyrolux 隔膜只有轻微的收缩，而 Celgard 2325 隔膜架构则完全损坏；接着同时将上述两种隔膜进行热重测试（即加热到 800°C），发现在这一过程中 Pyrolux 隔膜损失的质量比 Celgard 2325 少得多。而在 200°C 的环境中加热 20 小时，Celgard 2325 隔膜的质量降到了初始质量的 50%，而 Pyrolux 隔膜的质量几乎保持不变。Pyrolux 隔膜良好的热稳定性归因于其高含量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 PVDF 的热性能比 Celgard 2325 优异。为了匹配新制备的 Pyrolux 隔膜，研究人员精心制备了由二草酸硼酸锂（LiBOB）、碳酸乙烯酯（EC）和碳酸丙烯酯（PC）混合而成的电解质。随后将其与 Pyrolux 隔膜配合使用，与传统的 Celgard 2325 隔膜/六氟磷酸锂（LiPF<sub>6</sub>）电解质体系进行对比研究。电导率测试显示，当温度逐步从室温升高到 120°C 时，Celgard 2325 隔膜/LiPF<sub>6</sub>

<sup>12</sup> Rui Wang, Sheng-Yung Chang, Lei Meng, et al. Design of a Rigid Scaffold Structure toward Efficient and Stable Organic Photovoltaics. *Matter*, 2019, DOI: 10.1016/j.matt.2019.03.006

电解质体系的导电率逐步下降，而 Pyrolux 隔膜/碳酸酯电解质体系导电率没有变化，表现出良好的热稳定性。进一步电化学循环测试显示，在 0.33C 放电电流密度下，基于 Pyrolux 隔膜/碳酸酯电解质体系的锂电池在 90°C 和 120°C 高温下分别循环 45 次后，放电比容量分别只衰减 27% 和 35%，库伦效率稳定在 98.9% 和 98.3%；而采用 Celgard 2325 薄膜/LiPF<sub>6</sub> 电解质体系的锂离子电池在 90°C 循环 5 次后，放电比容量就大幅衰减 50% 以上，库伦效率急剧下降，而温度升高到 120°C 时，电池甚至无法完成 1 个循环。上述结果表明了新的 Pyrolux 隔膜/碳酸酯电解质体系显著改善了电池的热稳定性，提升了电池的工作温度上限。随后研究人员将电池保持在 120°C，将放电电流增大到 1C，Pyrolux 隔膜/碳酸酯电解质体系电池依旧获得了高达 324 mAh/g 的初始比容量，且循环 107 次后仍保持 77% 初始容量，意味着单次循环容量衰减率仅为 0.21%，展现出极其优异的高倍率性能。该项研究一方面设计制备了一种新型的耐高温隔膜，另一方面研发了与之匹配的高沸点有机电解液，将两者应用于锂离子电池，在保持电池高电化学性能前提下，电池的工作温度提升到了 120°C 水平，显著提高了电池的温度极限，为研发高温锂电池提供了新思路。相关研究成果发表在《*Nano Energy*》<sup>13</sup>。

(郭楷模)

## 新型硫氮共掺杂复合电极有效抑制穿梭效应

锂硫电池具有极高的理论能量密度 (2600 Wh/kg)，且因材料成本低廉、对环境友好而备受关注。但硫正极导电性差，而且充放电循环过程中发生多硫化锂溶解引起穿梭效应导致电池性能不断衰退，严重限制了电池技术的实际应用。因此，改善硫正极导电性，解决锂硫电池穿梭效应成为了该电池技术的热点研究领域。澳大利亚昆士兰大学 Lianzhou Wang 教授研究团队以聚多巴胺 (PDA) 为氮源和碳源与 MXene (二维层状结构的金属碳化物和金属氮化物材料) 材料 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>Tx 进行反应，制备出了三明治结构的超薄碳、氮共掺杂的硫化钛 (TiS<sub>2</sub>) 纳米片 TiS<sub>2</sub>@NSC，作为硫宿主材料和硫结合形成复合正极用于锂硫电池，有效地抑制了穿梭效应，显著提升了电池的性能和循环稳定性。研究人员将 PDA 与 MXene 材料 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>Tx 进行混合搅拌形成前驱体，随后将其置于硫化氢的气氛中进行退火处理实现原位硫化，产物的 X 射线衍射和拉曼光谱表征显示产物为氮、碳共掺杂的多孔碳修饰的 TiS<sub>2</sub> (iS<sub>2</sub>@NSC)。扫描电镜和透射电镜联合表征进一步揭示 TiS<sub>2</sub>@NSC 产物呈现纳米片形貌。氮气的脱吸附测试曲线计算得出 TiS<sub>2</sub>@NSC 纳米片材料的比表面积为 267.3 m<sup>2</sup>/g，远大于同样反应条件但无 PDA 参与反应制备的无多孔碳 NSC-TiS<sub>2</sub> 纳米片。随后以上述制备的 TiS<sub>2</sub>@NSC、NSC-TiS<sub>2</sub> 作为集流体和硫正极结合形成复合电极

<sup>13</sup> Ryan R. Kohlmeier, Gregory A. Horrocks, Aaron J. Blake, et al. Pushing the thermal limits of Li-ion batteries, *Energy Environ. Sci.* 2019, DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.103927

S/TiS<sub>2</sub>@NSC、S/NSC-TiS<sub>2</sub>，分别组装成完整的锂硫电池并进行电化学性能测试。实验结果显示在 0.2 C 和 1C 的（1C=1675 mA/g）电流密度下，基于 S/TiS<sub>2</sub>@NSC 正极的电池初始放电比容量分别为 1261 mAh/g 和 793 mAh/g，与 S/NSC-TiS<sub>2</sub> 电极电池基本相同。循环稳定性测试显示，0.2 C 电流密度下进行 120 次充放电循环后，S/TiS<sub>2</sub>@NSC 正极的电池放电比容量为 920 mAh/g，显著高于 S/NSC-TiS<sub>2</sub> 电极电池（750 mAh/g），即前者展现出更加优异的循环稳定性，具备更长的电池寿命。为了探究电池性能改善的潜在原因，研究人员开展了电化学阻抗测试，结果显示 S/TiS<sub>2</sub>@NSC 正极电池的电荷传输阻抗 R<sub>ct</sub> 显著小于 S/NSC-TiS<sub>2</sub>，表明 PDA 中的氮和碳共掺杂改善了电极的导电性；高低电压放电平台测试显示，S/NSC/TiS<sub>2</sub>-C 的高电压平台和低电压平台硫的利用率具有相似的趋势，然而在低电压平台效率较低；相反 S/TiS<sub>2</sub>@NSC 无论在高电压平台和低电压平台都具有更高的硫利用率，表明它是一种高效的聚硫化物吸附剂，即具备良好的抑制多硫聚物穿梭功能，主要原因是多孔结构实现了对多硫聚物的限域。该项研究采用新颖的方法合成了 TiS<sub>2</sub>@NSC 电极材料，一方面氮、碳掺杂改善了电极的导电性，另一方面多孔结构增强了对多硫聚物的吸附和限域，从而增强了电池的循环寿命，为设计开发高效长寿命锂硫电池指明了新方向。相关研究成果发表在《*Advanced Energy Materials*》<sup>14</sup>。

（郭楷模）

---

<sup>14</sup> Xia Huang, Jiayong Tang, Bin Luo, et al. Sandwich-Like Ultrathin TiS<sub>2</sub>Nanosheets Confined within N, S Codoped Porous Carbon as an Effective Polysulfide Promoter in Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Energy Materials*. 2019, DOI: 10.1002/aenm.201901872

## 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

