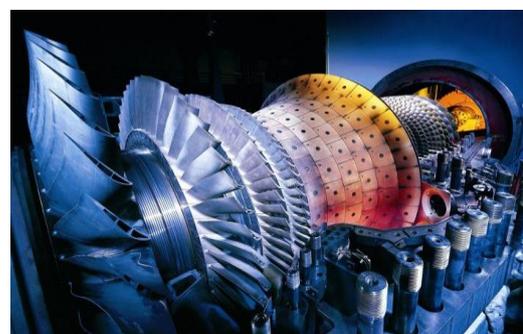


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- BP：能源和电力需求持续增长 能源结构愈加绿色多元
- 2018年欧洲新增风电项目融资达创纪录的267亿欧元
- 美国国家能源技术实验室总结碳捕集技术十项研发重点
- DOE 资助5150万美元推进先进车辆技术及替代燃料研发
- 基于新型复合氢化锂超离子导体制备高能全固态锂硫电池

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

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

BP: 能源和电力需求持续增长 能源结构愈加绿色多元2
2018年欧洲新增风电项目融资达创纪录的267亿欧元6
美国国家能源技术实验室总结碳捕集技术十项研发重点8

项目计划

DOE 资助 5150 万美元推进先进车辆技术及替代燃料研发11
DOE 资助 3100 万美元推进氢能规模化应用11
DOE 资助 2400 万美元支持先进碳捕集技术研发12

前沿与装备

基于新型复合氢化锂超离子导体制备高能全固态锂硫电池13
退火气氛显著影响氧化镍基空穴倒置钙钛矿太阳电池性能14
催化剂和电解质设计合理性是影响 CO₂ 催化还原的关键15
新型袋式封装摩擦纳米发电机展现优异抗湿度特性16

本期概要

英国石油公司 (BP) 发布《能源展望 2019》报告，采用情景分析法展望了到 2040 年全球能源系统发展态势：无论何种情景，以中国和印度为首的发展中国家经济持续蓬勃发展，推动全球经济增长，促使全球能源需求不断增加。在“不断发展的转型”情景中，到 2040 年预计全球能源需求增长 30%。社会经济各个产业的能源需求都将出现不同程度增长，但其中大部分来自于工业和建筑部门。在此期间，世界的电气化水平将不断提高，全球能源增长的 3/4 将用于发电，到 2040 年电力将占一次能源消耗的一半。与此同时，在可再生能源和天然气的带动下，能源系统持续向绿色低碳结构转型。到 2040 年，天然气需求增长接近 50%，主要来源于发展中国家的工业部门。同期，可再生能源将以年均 7.6% 的增速增长，成为增长最快的能源，占全球发电增量的 2/3，成为主要电力来源。

欧洲风能协会 (Wind Europe) 发布《欧洲风能统计数据 2018》报告，详细分析了 2018 年度欧洲风电产业的发展概况：2018 年，欧洲风电持续保持良好发展态势，新增装机总量 11.7 GW，其中陆上风电新增 9 GW、海上风电 2.7 GW，使得累计装机总量达到了 189 GW。新增装机主要集中在德国、英国和法国三个国家。其中德国以 29% 新增装机占比一马当先，英国以 16% 占比位居次席，法国以 13% 位列第三。就累计装机容量而言，德国也是累计装机最多的国家，为 59.3GW；西班牙和英国分别以 23.5 GW 和 21 GW 紧随其后。2018 年是新增风电项目融资创纪录的一年，总共吸引投资 267 亿欧元，项目装机总计 16.7 GW，其中 4.2 GW 陆上风电，12.5 GW 海上风电。

美国国家能源技术实验室 (NETL) 发布《2018 年碳捕集技术汇编》报告，总结碳捕集技术十项研发重点，包括：开发先进的燃烧前和燃烧后捕集新型溶剂；开发化学稳定、成本低、合成简单且具有高二氧化碳容量的新型吸附剂；开发用于燃烧后碳捕集的新型膜；开发高通量筛选工具用于设计先进材料和工艺；利用碳捕集模拟计划开发的计算工具和模型与行业合作，推进创新的碳捕集技术研发等。详见正文。

美国能源部 (DOE) 宣布资助 5150 万美元用于支持卡车、越野车及新型替代燃料研究创新项目，主要聚焦五大主题，包括：中型和重型车辆的新型气体燃料研究、电动重型货车、用于中型和重型运输车辆的高通量氢燃料技术、用于中型和重型卡车的高耐久性、低铂族金属含量的膜电极组件和节能型商用越野车。

日本东北大学合成了全新复合氢化锂超离子导体固态电解质，制备高能全固态锂硫电池：该全固态电解质在室温下具有了同类型电解质迄今为止最高的导电率，同时对锂金属具有优异稳定性和良好的界面相容性，从而获得了能量密度高达 2500 Wh/kg 的全固态锂硫电池，为全固态锂金属电池提供了全新体系固态电解质选择。

BP：能源和电力需求持续增长 能源结构愈加绿色多元

2月14日，英国石油公司（BP）发布《能源展望 2019》报告¹指出，无论何种情景，到2040年，伴随发展中国家经济蓬勃发展，全球经济将持续增长，促使能源需求不断增加，其中大部分来自于工业和建筑部门。在此期间，世界电气化水平将不断提高，能源结构变得更加绿色低碳，可再生能源将成为增长最快的能源，并成为最主要电力来源；天然气强势增长，增速远超石油和煤炭，将超越煤炭并逼近石油成为全球第二大能源；碳排放量持续上升，需要采取全面措施以降低排放。报告采用情景分析法，系统探讨了到2040年驱动世界能源转型的主要力量及关键不确定型因素。主要内容如下：

1、发展中国家快速发展的经济驱动全球能源需求不断增长

•以中国和印度为首的发展中国家经济日益繁荣，推动全球经济增长。在“不断发展的转型（ET）”情景中，到2040年，预计全球GDP平均增长率为每年3.75%，略低于过去20年的平均水平。生产力的提升引发的经济增长占总增量的80%，并使超过25亿人脱离低收入人群，发展中国家不断壮大的中产阶级是促使全球经济和能源增长的关键力量。发展中国家经济增量将占世界经济增量的80%以上，其中中国和印度两个国家就占到一半。人口增长也是全球经济增长的原因之一，到2040年全球人口约增加17亿，达到近92亿。

•生活水平提高促使能源需求增长，但部分被能源强度下降所节约的能源抵消。在ET情景中，到2040年全球GDP增长了一倍以上，但由于能源强度（单位GDP消耗能源）下降，能源消耗仅增加了1/3。尽管未来20年全球经济和能源消耗显著增长，到2040年世界大部分人口的人均能耗水平仍然相对较低。

•全球能源系统面临“更多能源”和“更少排放”的双重挑战，提高能效将是解决问题的关键。联合国人类发展指数（HDI）表明，人均能耗增加与人类繁荣发展有关，这种关系在人均能耗超过100 GJ以后趋于平缓。目前，世界上大约80%的人口生活在人均能耗低于100 GJ的国家。在ET情景中，到2040年这一比例仍然在2/3左右。如果全球能源需求能够比ET情景需求增量再多25%，则可将该比例降至1/3。如果人均能耗远大于100 GJ的国家将能耗降至欧盟平均水平（约120 GJ/人），将足以提供所需全部能源。根据ET情景，到2040年能源导致的碳排放将增加近10%。提高能效将是解决“更多能源”和“更少排放”双重挑战的关键。

2、主要经济部门的能源需求普遍增加，尤其是建筑和工业部门

¹ BP Energy Outlook 2019.

<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>

•**工业部门能源消耗增长的主要地区将由中国转移至其他发展中国家。**中国工业能源需求在过去 20 年中增长了两倍，但随着中国向低能源密集型经济转型，其能源需求将在 2020 年代中期触顶随后逐渐下降，印度及其他亚洲国家和非洲的工业能源需求增量将占总增量的 2/3 左右。工业能源需求的增量将通过天然气和电力来满足，到 2040 年，天然气和电力将占工业能源的 2/3 左右。由于中国、欧盟和北美转向更清洁、低碳的燃料，工业煤炭消耗量下降，部分抵消了印度和其他亚洲国家的增长。

•**尽管对塑料的监管越来越严，但对石油、天然气和煤炭的非燃料用途需求仍强劲增长。**将石油、天然气和煤炭作为生产石化产品、润滑剂和沥青的原料等非燃料用途的需求年均增速将达 1.7%，占能源总需求增长的 10% 左右，其中石油约占 60%，其次是天然气（30%）和煤炭（10%）。由于塑料监管法规将越来越严格，将化石燃料作为化工原料的需求增速比过去慢，但石油作为化工原料仍是石油需求增长的最主要原因。

•**由于发展中国家电力需求大幅增长，建筑部门将占全球能源增量的 1/3 以上。**在 ET 情景中，建筑能耗增速（年均增长 1.5%）高于工业或交通部门，到 2040 年在总体能耗占比约为 1/3。发展中国家蓬勃发展的经济和不断壮大的中产阶级增加了照明、家用电器和制冷的电力需求，推动了建筑能源消耗增长。大多数发达国家和独联体国家的建筑能源消耗基本持平，因为增长量被效率提升所节约的能源抵消。

•**提升能耗和发展循环经济能够减少工业和建筑能耗。**通过提升工业能效，扩大循环经济减少对新材料和新产品的需求，改造现有建筑物并对新建筑物和电器实行更严格标准，能够显著减缓工业和建筑能耗增速。

•**交通需求强劲增长，但能效提高限制了最终能耗增长。**在 ET 情景中，对运输服务的需求几乎翻了一番，但发动机能耗效率的快速提升使能源消耗仅增加了 20%。由于经济不断增长增加了对运输服务数量和质量的需求，亚洲占交通能耗增长的 80%。不同运输方式能耗的增加受到能效提升情况的影响，内燃机汽车的效率提高了近 50%，卡车效率也取得了实质性进展，促使公路运输的能源需求增长率显著下降。航空和航海能效进一步提升的幅度相对较小，2030 至 2040 年期间，其能耗增长占交通能耗增长的近一半。

•**电动汽车继续快速增长，尽管交通部门增加了天然气、电力和生物燃料的使用，交通需求仍以石油为主。**电动汽车继续快速增长，主要是乘用车、轻型卡车和公共汽车，到 2040 年全球电动汽车数量将达到约 3.5 亿辆，其中约 3 亿辆是乘用车，相当于汽车总数的 15%。自动驾驶汽车预计在 2020 年代初期开始逐步上市销售，将提供低成本共享交通服务，主要采用电动汽车，因此将进一步扩大电动汽车的影响。到 2040 年，生物燃料消耗将增加近 200 万桶/天，交通部门的电力和天然气消耗均增加约 1.2 亿吨油当量，天然气、电力和生物燃料占交通运输能源消耗增量的一半

以上。尽管如此，交通能源需求仍以石油为主，石油占比从目前的 94% 下降至 85%。

•在发展中国家的带领下，世界电气化水平逐步提升，可再生能源发挥着越来越大的作用。在 ET 情景中，全球能源增长的 3/4 用于发电，到 2040 年，电力将占一次能源消耗的一半，世界电气化程度持续加深。几乎所有电力需求增长都来自以中国和印度为主的发展中国家。可再生能源约占电力增长的 2/3，到 2040 年将超越煤炭成为最大电力来源（约 30%），煤炭占比则显著下降。发展中国家电力需求的强劲增长有助于提高可再生能源份额，但其增速不足以满足电力需求增长，因此煤炭消耗量也会增加，将影响电力部门的脱碳进展。技术进步推动可再生能源增长，但也受现有电厂退役速度的限制。

3、全球能源格局正发生转变，发展中国家影响力日益增加

•全球能源需求模式正发生转型。需求增量集中在印度、中国和亚洲其他发展中国家，印度将在 2020 年代中期成为能源需求增长最快的国家（增长 1/4 以上），到 2040 年中国仍将保持全球最大能源市场的地位，非经合组织国家将占能源需求的 2/3 以上。

•各地区能源结构差异将对能源转型有重要影响。中国能源消耗中煤炭占比大幅下降，从 2017 年的 60% 降至 2040 年的 35%，可再生能源、核能和水力发电增量超过其能源需求总增量；印度由于煤炭消耗增加，其煤炭份额略有下降；美国和欧盟通过增加天然气和可再生能源以减少煤炭和石油使用。

•全球能源生产模式正在随着美国供应的强劲增长和中国经济增长的放缓而转变。到 2020 年代中期，美国的能源生产增量占全球最大份额，随后由于致密油产量下降而增速放缓，欧佩克（OPEC）国家则在其后将增加石油产量。随着中国经济进入可持续增长轨迹，其能源生产增速明显放缓，但是由于可再生能源和核电的快速增长，至 2040 年中国仍是能源供应增长的最大来源。由于天然气生产占比下降，俄罗斯在全球能源生产中占比略有下降，但仍将是全球最大石油和天然气出口国。

•不同区域能源生产和消费的不同变化趋势导致全球能源贸易格局发生重大变化。美国致密页岩油和页岩气的快速增长使其能源出口大幅增加，到 2040 年美国成为主要能源出口国；印度、中国为首的亚洲则由于能源需求的快速增长而成为最大能源进口市场。

4、在可再生能源和天然气的带动下，能源系统持续向绿色低碳结构转型

•石油等液体燃料需求增长主要来源于发展中国家，美国和 OPEC 国家则先后成为主要供应来源。未来十年，由于发展中国家经济的蓬勃发展，原油、凝析油和液化天然气（LNG）等液体燃料需求预计增加 100 万桶/天，需求总量在 2030 年代稳定在 1.08 亿桶/天。交通部门将是液体燃料需求增长的主要驱动力，始终占消耗总量的 55% 左右。将石油用于石化产品原料等非燃烧用途是其需求增长的最主要来源，

到 2040 年将增加 700 万桶/天至 2200 万桶/天。美国页岩油产量在前十年显著上升，成为液体燃料供应增长的主力，随后由于产量下降，OPEC 国家成为供应增长的主要来源，其产量增长集中在 2030 年代，到 2040 年将增加 400 万桶/天。

•**天然气需求和产量强势增长，成为第二大能源。**工业和电力部门推动了天然气需求的增长，LNG 供应量增加使天然气产量也大幅增加。到 2040 年，天然气需求和产量增长接近 50%，需求增长主要来源于发展中国家的工业部门，产量增长约有一半由美国和中东贡献。美国和卡塔尔将成为 LNG 主要出口国，LNG 贸易增长将超过一倍，达到近 9000 亿立方米，形成更具竞争力和全球一体化的市场。天然气出口日益多样化将导致 LNG 和管道天然气的竞争更加激烈。天然气的增长速度（年均 1.7%）远远超过石油或煤炭，将超过煤炭成为全球能源的第二大来源，并在 2040 年接近石油份额。

•**全球煤炭需求基本持平，中国和经合组织的需求下滑被印度和其他新兴亚洲国家的增长所抵消。**煤炭消费增长快速减缓，煤炭消费将维持在当前水平附近，中国和经合组织的煤炭消费都在下降，印度和亚洲其他新兴经济体煤炭需求则增加，大部分用于满足电力需求的强劲增长。

•**可再生能源成为增长最快的能源，将成为主要电力来源。**到 2040 年，可再生能源年均增速达到 7.6%，占全球发电增量的 2/3，届时其在电力结构中占比近 30%，成为最大的电力来源。主要贡献来自风能和太阳能，两者在电力结构中占比分别增长到 13.7% 和 11.9%。欧盟在普及可再生能源方面处于领先地位，到 2040 年可再生能源在欧洲电力市场份额将增加到 50% 以上，可再生能源的增长则主要来自发展中国家，中国、印度及其他亚洲国家约占世界可再生能源发电增量的一半。

•**核电和水电继续增长，增速低于其他电力类型。**核电将保持过去增长水平（每年增长 1.1%），由于现役电厂老化关闭和新产能投资有限，经合组织国家核电大幅下降，中国核电发电增长强劲，到 2040 年将增长 1000 TWh，发电水平接近整个经合组织。由于中国水电扩张期已经结束，水电增速低于过去，但中国仍为世界水电增长的最主要地区。

4、世界碳排放持续增加，电力部门是最大排放源

尽管碳排放增速已经大幅减缓，到 2040 年能源仍将导致碳排放增加 7%，难以满足《巴黎气候协定》气候目标要求。用电量的快速增长是碳排放增加的主要原因，2040 年电力部门碳排放占总排放量的 40%，远高于工业和交通（约 25%）。通过提高能效、使用低碳燃料和普及碳捕集、利用和封存（CCUS）技术能够有效降低碳排放。

（岳芳 郭楷模）

2018 年欧洲新增风电项目融资达创纪录的 267 亿欧元

2月21日，欧洲风能协会（Wind Europe）发布《欧洲风能统计数据 2018》报告²指出，2018 年欧洲风电新增装机 11.7 GW，使得欧洲风电累计装机容量达到了 189 GW，风能在电力结构中的占比提升至 14%。尽管风电装机持续增加，但 2018 年新增装机容量较 2017 年的水平（17.1 GW）大幅下滑了近三分之一，创下了七年来新增装机最少的年份。不过，2018 年欧洲新增风电项目融资创下了 267 亿欧元历史新高，新项目装机总计 16.7 GW。报告系统概述了欧洲风电年度发展情况，主要内容如下：

1、总体概况

2018 年，欧洲风电持续保持良好发展态势，其中陆上风电新增 9 GW，海上风电 2.7 GW，新增装机总量 11.7 GW（图 1），累计装机达 189 GW。新增装机主要来自欧盟 28 个成员国，其新增装机 10.1 GW，累计装机总量达到 178.7 GW，其中陆上累计 160 GW，海上累计 18.7 GW，继续保持欧盟第二大电力来源的地位，并有望在今年超过天然气，成为欧盟最大的电力来源。



图 1 2008-2018 年欧洲风电年度新增装机容量变化态势（单位：GW）

2、主要国家情况

就新增装机而言，2018 年风电新增装机主要集中在德国、英国和法国三个国家（图 2）。其中德国依旧一马当先，新增装机占到了欧洲新增装机总量的近三成（29%），为 3.37 GW，但较 2017 年水平则大幅下滑近一半（2017 年新增 6.6 GW），主要是陆上风电装机大幅下滑所致，根本原因在于冗长繁琐的招标设计机制和审批问题。英国以 16% 占比位居次席，然而由于可再生能源义务证书政策的终结，英国 2018 年风电的新增情况也不甚乐观，只有 1.9 GW，其中大部分来自于海上风电（1.3 GW）。法国是欧洲第三大风电市场，2018 年新增装机占比 13%，为 1.56 GW，几乎全部来自陆上风电，迄今为此法国仍然没有一座商用的海上风电场，主要归咎于法国冗长繁

² Wind energy in Europe in 2018 Trends and Statistics.
<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>

琐的风电项目审批程序（以陆上风电场为例，整个审批流程需要花费 8 年时间）。其余新增装机主要分布在瑞典、比利时、土耳其、挪威等国家。截至 2018 年底，欧洲还有 14 个国家没有部署风电，其中 12 个属于欧盟成员国。

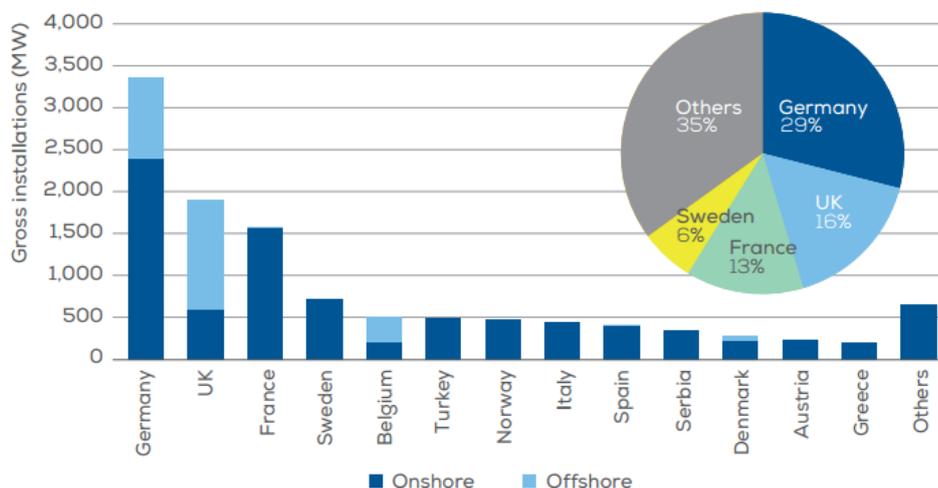


图 2 2018 年欧洲主要国家风电年度新增装机容量情况（单位：MW）

就累计装机容量而言，截至 2018 年底，欧洲累计装机容量达 189 GW（大部分来自欧盟 28 国，为 178.8 GW），同比增加 6%。与新增装机情况类似，德国也是累计装机最多的国家，达到 59.3 GW。西班牙（23.5 GW）、英国（21 GW）、法国（15.3 GW）和意大利（10 GW）四个国家累计装机均超过 10 GW。而瑞典、波兰、葡萄牙、丹麦则分别超过 5 GW。荷兰、爱尔兰、比利时、奥地利和罗马尼亚五个国家则分别超过 3 GW（图 3）。

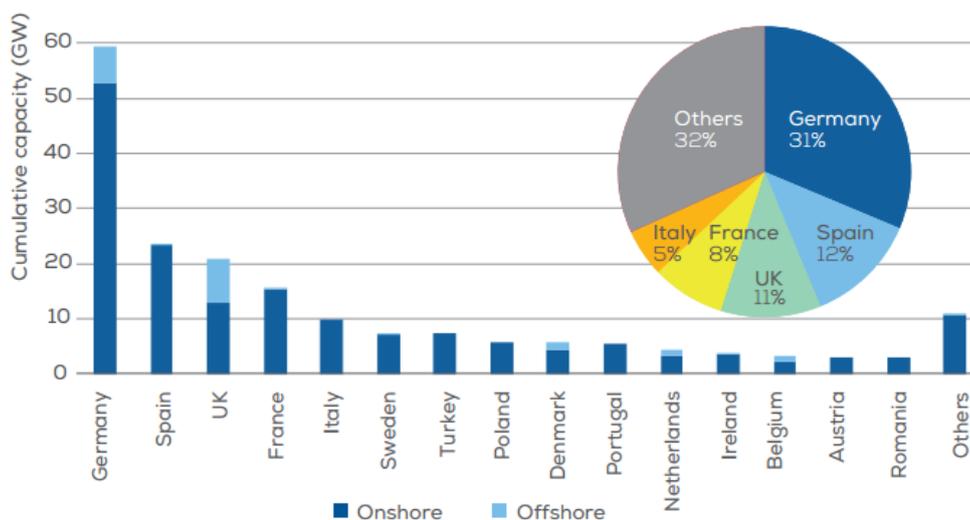


图 3 截至 2018 年底欧洲主要国家风电累计装机容量情况（单位：MW）

就发电量而言，2018 年风电占欧盟电力结构的份额增加到了 14%，较 2017 年水平（12%）提高 2 个百分点，继续保持上升的势头。其中，丹麦风电在其国家电力结构中的占比最高，达到 41%；爱尔兰和葡萄牙分别以 28% 和 24% 紧随其后；德国（21%）、西班牙（19%）、英国（18%）分列四到六位。

3、投融资情况

就投融资而言，2018年是欧洲新增风电项目融资创纪录的一年，总计16.7 GW（2017年为11.5 GW）的项目通过了最终投资决策（FID），其中陆上风电4.2 GW，海上风电12.5 GW。新增风电融资项目总计获得了267亿欧元资金，较2017年增长近一倍，其中陆上风电吸引了创纪录的164亿欧元投资，海上风电则吸引了103亿欧元（图4）。融资上涨的主要因素是风电产业价值链成本下降，投资商可以以更少的投资获得更多的装机从而谋取更多利润。大部分的新增项目集中分布在英国、瑞典、西班牙、法国和俄罗斯五个国家。英国以59亿欧元成为获得投资最多的国家，项目容量总计2.2 GW；其次是瑞典（37亿，3.2GW）、西班牙（14亿，1.4 GW）、法国（17亿，1.4 GW）、俄罗斯（16亿，1.4 GW）。

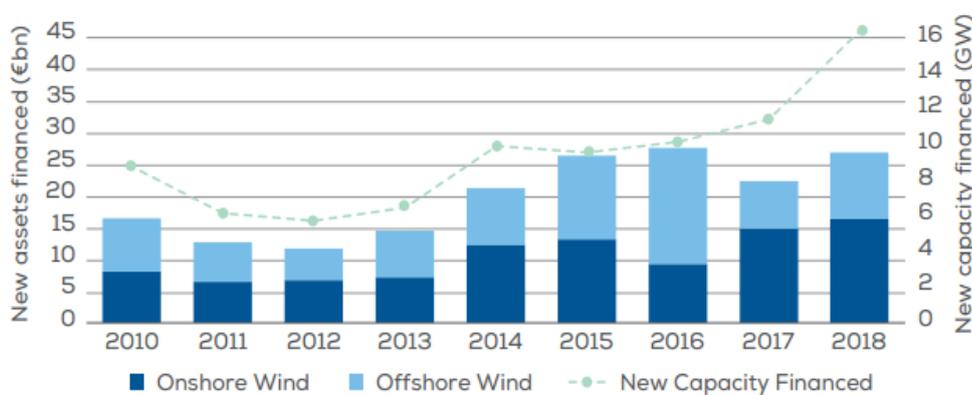


图4 2010-2018年欧洲风电新增投资及其装机容量变化情况（单位：左/右纵坐标分别为10亿欧元/GW）

（郭楷模）

美国国家能源技术实验室总结碳捕集技术十项研发重点

2月6日，美国国家能源技术实验室（NETL）发布《2018年碳捕集技术汇编》报告³，总结了美国能源部（DOE）“洁净煤及碳管理研究计划”（CCCMRP）框架下“碳捕集研发计划”资助的项目进展。“碳捕集研发计划”以燃烧前和燃烧后捕集为核心研究领域，开发基于溶剂、吸附剂和膜的碳捕集新技术，其技术成熟度（TRL）范围从概念工程和材料设计阶段（TRL为2级）到25兆瓦级中试阶段（TRL为5-7级）。报告总结的碳捕集技术十项研发重点如下：

1、NETL 研究与创新中心进行的碳捕集技术开发

NETL 研究与创新中心进行的研发工作主要包括：开发先进的燃烧前和燃烧后捕集新型溶剂，减少能量损失和二氧化碳分离成本；开发化学稳定、成本低、合成简单且具有高二氧化碳容量的新型吸附剂；开发用于燃烧后碳捕集的新型膜；开发

³ NETL RELEASES 2018 COMPENDIUM OF CARBON CAPTURE TECHNOLOGY.
<https://www.netl.doe.gov/node/8223>

高通量筛选工具用于设计先进材料和工艺；利用碳捕集模拟计划开发的计算工具和模型与行业合作，推进创新的碳捕集技术研发。

2、基于溶剂的燃烧后碳捕集技术

(1) 溶剂再生，包括胺溶剂的新型电化学再生，以及浓缩哌嗪溶剂的高温闪蒸再生。

(2) 新型溶剂，包括双液相溶剂，离子液体和相变离子液体混合溶剂，非水溶剂，非水可转换有机溶剂，新型相变氨基硅氧烷溶剂，基于氨和碳酸钾的混合盐溶剂，封装碳酸酐酶生物催化剂，结合酶催化剂和真空再生开发碳捕集低能耗溶剂，浓缩哌嗪溶剂，混合胺基、钾基、氨基溶剂的新型溶剂系统，自浓缩胺吸收剂，可逆离子液体。

(3) 先进技术，包括稀薄二氧化碳的直接空气捕集技术和相变溶剂吸收技术。

(4) 工艺优化，包括：热集成法改进现有碳捕集系统，以提高能效；集成溶剂吸收器和汽提塔，使用高表面积陶瓷泡沫气液接触器增强传质过程；加压汽提工艺优化溶剂碳捕集技术；结晶高压汽提优化热碳酸盐吸收过程；新型集成真空碳酸盐吸收工艺。

(5) 测试评估，包括：Abbott 火电厂林德/巴斯夫溶剂碳捕集的大规模中试；先进离子溶剂碳捕集的 0.6 兆瓦级实验室测试和 12 兆瓦级中试；新型氨基硅氧烷溶剂碳捕集的 10 兆瓦级中试；在 Barry 电厂 25 兆瓦碳捕集系统中增加一体化汽提塔/再沸器、颗粒物管理和新溶剂的可行性评估；巴斯夫新型胺基溶剂碳捕集的 1 兆瓦级中试；利用膜技术改进 GE 冷冻氨工艺的大规模中试；新型 0.5 兆瓦 NeuStream® 吸收器在现有碳捕集系统的试运行；氨基酸水溶液碳捕集技术的 550 兆瓦级示范。

3、基于吸附剂的燃烧后碳捕集技术

(1) 先进吸附剂，包括：嵌入金属有机框架吸附剂的聚合物纤维，用于快速循环变压吸附工艺；结合胺的多孔聚合物吸附剂；第三代流化固体吸附剂；用于流化床的低成本分子筛吸附剂；结合胺接枝多孔二氧化硅的金属箔吸附剂；多孔金属有机框架吸附剂；干燥钠吸附剂。

(2) 先进技术，包括：使用旋转床吸附器的结构化吸附剂进行快速循环变温吸附；使用结构化吸附剂进行快速变压吸附；基于聚合物/支撑胺中空纤维材料的快速变温吸附；基于新型微孔材料和工艺循环的吸附碳捕集技术；基于固体吸附剂的混合吸附技术。

(3) 工艺优化，包括热集成法降低固体吸附剂碳捕集成本，以及碳捕集吸附剂的优化。

(4) 测试评估，包括：基于先进碳微球吸附剂的 0.5 兆瓦级中试；②碱性氧化铝吸附剂的 0.5 兆瓦级中试；③气凝胶吸附剂。

4、基于膜的燃烧后碳捕集技术

(1) 新型膜，包括：新型二氧化碳选择性透过膜，用于在二氧化碳浓度低于1%的环境中进行碳捕集；下一代中空纤维膜；新型无机/聚合物复合膜；薄膜复合中空纤维膜；中空纤维聚合物膜；新型双功能氧化硅膜；酶基仿生封闭液膜；新型低压膜接触器。

(2) 验证测试及评估：基于新型 Polaris™膜的 1 兆瓦级中试。

5、燃烧后捕集新概念

(1) 先进技术，包括：低温碳捕集；新型节能氧化石墨烯-聚醚醚酮混合膜；膜/溶剂混合碳捕集系统；集成变温和变压吸附的碳捕集系统；基于超声技术的先进二氧化碳压缩；基于超声速膨胀和惯性分离的燃烧后二氧化碳萃取系统；基于半等温压缩的新型二氧化碳压缩技术。

(2) 工艺优化：采用先进制造技术增强碳捕集工艺和使用新溶剂。

(3) 测试评估：发电厂新型电化学膜碳捕集系统的 3 兆瓦级中试。

6、基于溶剂的燃烧前碳捕集技术

将碳酸铵-碳酸氢铵工艺用于整体煤气化联合循环 (IGCC) 电厂的碳捕集系统，进行概念验证和中试试验。

7、基于吸附剂的燃烧前碳捕集技术

主要包括用于 IGCC 电厂基于新型吸附剂的燃烧前碳捕集技术中试研究，以及开发干式吸附剂。

8、基于膜的燃烧前碳捕集技术

(1) 新型膜，包括：将交联聚合物和钪基纳米材料相结合，开发用于氢气净化和二氧化碳捕获的吸附增强型混合基质膜；高温聚苯并咪唑中空纤维膜；氢气选择性沸石膜；纳米多孔超疏水膜接触器；用于 IGCC 电厂的新型聚合物膜；用于 IGCC 电厂的双相陶瓷-碳酸盐膜反应器。

(2) 先进技术，包括：沸石膜反应器；用于 IGCC 电厂碳捕集的新型双级膜工艺；基于三元钪合金的氢气/二氧化碳膜分离系统；氢气选择性沸石膜；用于 IGCC 电厂的变压膜吸附装置。

9、燃烧前捕集新概念研究

主要包括：基于氧化镁吸附剂/水煤气变换反应器的碳捕集技术，并结合先进集成热管理技术，用于 IGCC 电厂的碳捕集；基于碳分子筛膜和吸附增强水煤气变换的新工艺，用于 IGCC 电厂的碳捕集。

10、开展研发合作

主要包括成立国家碳捕集中心；建立碳捕集合作伙伴关系；开展 CCS 在电厂应用的影响因素分析。

(岳芳 郭楷模)

项目计划

DOE 资助 5150 万美元推进先进车辆技术及替代燃料研发

3月1日，美国能源部（DOE）宣布资助 5150 万美元用于支持卡车、越野车及新型替代燃料研究创新项目⁴，旨在加速先进高效车辆技术和新型替代燃料研发，提升卡车和越野车的能效，减少化石燃料用量和排放。本次资助着重关注五大技术主题，具体内容参见表 1。

表 1 先进车辆技术及替代燃料研发项目具体目标

技术主题	具体内容	资助金额/ 万美元
中型和重型车辆的新型气体燃料研究	研发储存和运输高密度气体燃料的新材料，先进的生物质废物转化为能源的技术，破除气体燃料部署的技术障碍，以降低中型和重型天然气和氢气燃料卡车的成本	1650
电动重型货车	根据 2007 年《能源独立和安全法案》的要求，继续开发先进高能量密度电池、高效的电力驱动系统和充电系统，解决电动重型货车研发部署的技术障碍	1800
用于中型和重型运输车辆的高通量氢燃料技术	开发高效安全的储氢技术和氢气燃料的快速加注技术	600
用于中型和重型卡车的高耐久性、低铂族金属含量的膜电极组件	开发新型高效经济的燃料电池隔膜、催化剂和电极结构，以提高燃料电池的耐用性	600
节能型商用越野车	开展流体动力系统、高效发动机、连接和自动化控制等技术概念研究，以提高越野车能源效率，降低能耗	500

（郭楷模）

DOE 资助 3100 万美元推进氢能规模化应用

3月4日，美国能源部（DOE）宣布资助 3100 万美元用于推进“H₂@Scale”概念计划的研究项目⁵，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（利用可再生能源、化石能源和核能等多种国内资源）、基础设施建设（氢气储存和输运）以及燃料电池（固定式和移动式应用），实现经济、安全可靠的大规模氢气生产、运输、存储和利用。本次资助着重关注三大主题，具体内容参见表 1。

⁴ Department of Energy Announces \$50 Million for Commercial Truck, Off-road Vehicle, and Gaseous Fuels Research. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-50-million-commercial-truck-road-vehicle-and-gaseous-fuels>

⁵ Department of Energy Announces \$31 Million in Funding To Advance H₂@Scale. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-31-million-funding-advance-h2scale>

表 1 氢能和燃料电池研发项目具体内容

主题	具体内容	资助金额 /万美元
先进的储氢材料和基础设施	研发新型的储氢材料，实现更加安全和更高容量的氢气存储和运输，即将当前的 200-500Pa 高压氢气压缩和存储技术提升至 700Pa，存储容量达到 4000 千克（当前是 1000 千克），储氢成本降至 5-7 美元/每加仑汽油当量	900
氢气生产利用方式的创新	<ul style="list-style-type: none"> •开发更加经济高效的裂解水产氢（电解、光催化、电催化等）的催化剂，将产氢的成本降至小于 2 美元/每加仑汽油当量，以实现车载氢能燃料电池成本降至小于 4 美元/每加仑汽油当量的目标 •开发更加经济高效的生物质制氢技术，以将生物制氢的成本从当前的 50 美元/每加仑汽油当量降至 6 美元/每加仑汽油当量 •开发能量效率大于 50%、功率大于 1 kW 的燃料电池电堆原型 	1200
集成氢气生产、存储和加注一体化试点系统	开发一个集成氢气生产、运输、存储、加注和使用的一体化试点系统	1000

编者按：“H₂@Scale”概念计划于 2016 年 11 月提出，旨在整合政府、国家实验室、企业的研究力量，共同探索解决氢能规模化应用面临的技术和设施挑战，从而在美国多个行业实现价格合理、可靠的大规模氢气生产、运输、储存以及利用，有效解决如电网弹性、能量安全存储及创造就业岗位等一系列关键问题。

（郭楷模）

DOE 资助 2400 万美元支持先进碳捕集技术研发

2 月 28 日，美国能源部（DOE）宣布资助 2400 万美元用于开展先进碳捕集技术研发项目⁶，着重关注吸收法、吸附法、膜分离法等碳捕集技术主题，旨在开发更加高效经济的碳捕集分离溶剂、吸附剂和薄膜，以进一步降低碳捕集技术的成本。具体内容参见表 1。

表 1 先进碳捕集技术研发具体内容

主题领域	具体内容	资助金额 /万美元
先进的 CO ₂ 吸收溶剂	<ul style="list-style-type: none"> •ION Engineering 公司开展新型溶剂的实验室测试，将确定其关键性能指标，进行 0.6 MWe 级吸收法碳捕集的溶剂性能验证，并验证工艺模拟模型 •研发具有集成雾和泡沫形成区的紧凑型吸收器，用于燃烧后碳捕集 	600

⁶ Secretary Perry Announces \$24 Million in New Projects to Advance Transformational Carbon Capture Technologies. <https://www.energy.gov/articles/secretary-perry-announces-24-million-new-projects-advance-transformational-carbon-capture>

先进的 CO ₂ 吸附剂	<ul style="list-style-type: none"> •开发先进进行双层结构吸附剂设计，比传统变温吸附快 40 至 100 倍，将进行实验室测试 •基于低吸附热量的物理吸附剂的碳捕获工艺的示范，可在叫低温度下进行，降低碳捕集成本 •开发基于特定变压吸附循环的先进吸附剂，用于燃烧后碳捕集过程，可安装在现有电厂进行低成本碳捕集 •开发新一代燃烧后碳捕集吸附剂系统，采用高容量吸附剂和真空浓缩变吸附工艺 	1200
先进 CO ₂ 分离膜	<ul style="list-style-type: none"> •为螺旋缠绕聚合物膜及其组件开发经济高效的设计和制造工艺，该类分离膜具有高 CO₂ 渗透性和高 CO₂/N₂ 选择性 •开发基于金属有机多面体和橡胶状聚合物材料复合的新型混合膜，可在 60℃ 下实现高 CO₂ 渗透性、高 CO₂/N₂ 和高 CO₂/O₂ 选择性 	600

(岳芳 郭楷模)

前沿与装备

基于新型复合氢化锂超离子导体制备高能全固态锂硫电池

复合氢化物具备较高的还原能力、良好的可变形性和电化学稳定性，是一类新兴的固态电解质。然而，离子电导率低 ($\sim 10^{-5}$ S/cm)，以及较低的相变温度 (90℃) 引发的不稳定性，限制了该类固态电解质的实际应用。因此，制备出在室温下表现出高离子电导率的稳定复合氢化物固态电解质成为了研究的热点。日本东北大学 Shin-ichi Orimo 研究团队用 $(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})^-$ 部分代替 $(\text{CB}_9\text{H}_{10})^-$ 以稳定无序高温相 $\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})$ ，合成了复合氢化锂固态电解质 $0.7\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})-0.3\text{Li}(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ ，室温下便具有了同类型电解质迄今为止最高的导电率，同时对锂金属具有优异稳定性和良好的界面相容性，从而获得了高达 2500 Wh/kg 能量密度的全固态锂硫电池。研究人员选择复合氢化物 $\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})$ 为主体材料，因为其具备了良好的室温离子导电率，达到了 3.6×10^{-6} S/cm；但其相变温度较低为 90℃。为了解决该复合氢化物低相变温度引发的不稳定性问题，研究人员使用机械球磨法对两种复合氢化物 ($\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})$ 和 $\text{Li}(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$)，前者为主体材料，摩尔比为 7:3) 进行球磨处理，用 $(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})^-$ 部分代替 $(\text{CB}_9\text{H}_{10})^-$ 合成了新型的复合氢化物 $0.7\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})-0.3\text{Li}(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ ，实现高温相稳定化。X 射线衍射分析结果显示 $0.7\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})-0.3\text{Li}(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ 没有出现新的衍射峰，均是 $\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})$ 和 $\text{Li}(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ 特征峰。进一步通过差热分析，拉曼光谱和扫描电镜表征可以看出，上述新型复合氢化物制是以共容形式存在，且具备了良好的可形变性。电化学阻抗谱测试结果显示 $0.7\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})-0.3\text{Li}(\text{CB}_{11}\text{H}_{12})$ 室温下 (25℃) 的离子导电率较 $\text{Li}(\text{CB}_9\text{H}_{10})$ 大幅提升了三个数量级，达到了 6.7×10^{-3} S/cm，是迄今为止文献报道的复合氢化物固态电解质的最高值。利用电化学阻抗谱来测试

0.7Li(CB₉H₁₀)-0.3Li(CB₁₁H₁₂) 和 Li 金属电极的界面接触电阻，结果显示 0.7Li(CB₉H₁₀)-0.3Li(CB₁₁H₁₂)/Li 之间的界面阻抗仅为 0.78 Ω/cm²，显著低于已报道的其他固态电解质/Li 界面电阻，即 0.7Li(CB₉H₁₀)-0.3Li(CB₁₁H₁₂)/Li 之间具备良好的界面相容性，主要原因是新型的复合氢化锂固态电解质具备良好的化学稳定性和可塑性形变。随后研究人员以上述复合氢化锂为电解质、硫为正极、Li 负极组装了一个完整的电池器件，并在室温、1-2.5 V 的工作电压窗口进行电化学性能测试，在 0.1C 和 1C 倍率下电池初始的放电比容量分别达到了 1431 和 1239 mAh/g，且 20 余次循环后容量保持率均可维持在 84% 水平，表现出良好的循环稳定性。随后提高工作温度到 50℃、放电倍率提高到 3C，循环 20 次后电池获得了 1469 mAh/g 放电比容量，容量保持率高达 95%，能量密度高达 2578 Wh/kg，比先前报道的其他类型全固态锂金属电池能量密度都要高。该项研究利用离子部分替代方法制备了全新的复合氢化锂全固态电解质，具备了极其优异的室温离子导电率和化学稳定性，从而显著提升了锂金属电极电池性能和循环寿命，为全固态锂金属电池提供了全新体系固态电解质选择。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》⁷。

(周斌 郭楷模)

退火气氛显著影响氧化镍基空穴倒置钙钛矿太阳电池性能

在倒置结构的钙钛矿电池中，通常采用宽带隙和热稳定性良好的氧化镍 (NiO) 作为空穴传输层。然而，NiO 导电性和空穴迁移率较低限制了器件性能，相关研究报道表明，通过调节退火过程中的氧含量是一种改善 NiO 电化学性能的简便方法。但目前对氧含量如何影响薄膜及器件性能的作用机理尚不明了。韩国成均馆大学 Nam-Gyu Park 教授研究团队系统研究了退火气氛和氧分压对 NiO 空穴传输层电化学特性和电池器件性能影响，揭示了潜在的作用机理。研究人员采用溶胶凝胶旋涂法在透明导电玻璃上沉积一层 NiO 薄膜，接着分别在氧气 (O₂)、空气 (air)、氮气 (N₂) 和氩气 (Ar) 四种氛围中进行退火处理并进行薄膜导电性测试。结果显示，NiO 薄膜的电阻按 O₂、air、N₂ 和 Ar 气氛依次增大，即在纯 O₂ 气氛退火导电性最好。利用空间电荷限制电流法表征空穴迁移特性发现，在 O₂、air 气氛退火的 NiO 薄膜的空穴迁移率比在 N₂ 和 Ar 气氛中处理的薄膜高出了一个数量级。随后以上述不同气氛中制备的 NiO 薄膜作为空穴传输层制备钙钛矿电池并进行电化学性能测试，结果显示基于惰性气氛 N₂ (15.55 mA/cm²) 和 Ar (14.84 mA/cm²) 中退火处理的 NiO 空穴电池器件的短路电流显著低于氧含量丰富的 O₂ (19.45 mA/cm²)、air (19.76 mA/cm²) 气氛中退火处理的 NiO 基器件，其中基于 air 气氛中退火处理 NiO 空穴电

⁷Sangryun Kim, Hiroyuki Oguchi, Naoki Toyama, et al. A complex hydride lithium super ionic conductor for high-energy-density all-solid-state lithium metal batteries. *Nature Communications*, 2019, DOI:10.1038/s41467-019-09061-9

池器件的光电转换效率最优，达到了 15.68%，其次是 O₂ 气氛电池（14.93%），远高于 N₂（11.11%）和 Ar（10.53%）气氛电池器件效率。上述结果表明，退火气氛的确可以显著改变 NiO 薄膜的电化学特性（更好的空穴迁移率、更好导电性），进而影响器件性能。但研究人员还发现一个较为反常现象，即 air 气氛退火的 NiO 薄膜制备的电池效率比 O₂ 退火条件下的电池效率要高，这与空穴迁移率和导电性测试结果不吻合。进一步开展荧光测试分析发现，纯 O₂ 退火条件下制备的 NiO 薄膜的空穴抽取能力较差，导致空穴和电子不能高效分离和充分收集，表明了氧分压也是影响薄膜性质关键因素。为此研究人员仔细调控 NiO 退火氧分压，当气氛中氧含量接近 30%（O₂/（O₂+N₂））时，钙钛矿电池获得了最优光电性能，转换效率达到了 16.32%。该项研究在不同的气氛下对 NiO 薄膜进行退火处理，系统研究了不同退火气氛及氧含量对 NiO 薄膜和器件性能的影响和作用机理，为提高 NiO 空穴倒置钙钛矿电池效率提供了科学理论依据。相关研究成果发表在《*Solar RRL*》⁸。

（郭楷模）

催化剂和电解质设计合理性是影响 CO₂ 催化还原的关键

利用可再生能源进行电催化还原 CO₂ 为碳氢燃料（如高能量密度的多碳产物，如 C₂₊）或者高价值化学品，不仅有助于减少温室气体排放，还有利于应对不断增长的能源需求和工业需求，可谓一举多得。然而，当前的催化剂和电解质普遍存在过电位过高、反应速率和选择性低等问题，因此亟需开发高效催化剂和电解质。德国马普学会 Beatriz Roldan Cuenya 教授研究团队利用原位表征手段，探究了 Cu 基催化剂结构和电解质对 CO₂ 催化还原到多碳产物反应的潜在作用机理。一系列的研究表明，电催化 CO₂ 还原多碳产物反应中最关键的是 C-C 偶联步骤，它涉及两步反应，包括：（1）在低过电位处 *CO 中间体二聚化形成 *OCCO 物质；（2）在高过电位处 *CO 被氢化形成 *CHO 物种。与块体催化剂相比，纳米颗粒（NPs）的特殊形态以及它们独特的电子和化学表面性质能够显著提升催化活性。研究人员制备了一系列不同尺寸的 Cu NPs，实验研究表明，小尺寸的 NPs 对 H₂ 和 CO 产物形成强选择性，且随着尺寸从 15 nm 减小到 2 nm 时，选择性逐步增加。大尺寸的 NPs（25 nm）则会倾向催化 CO₂ 还原获得乙烯同时抑制催化产氢副反应，产率可达 1148 μmolm⁻² s⁻¹，且具有极高的法拉第效率（FE），达到 92.8%。调节催化剂在载体上的分布是进一步改变产物选择性的一种策略。随着纳米颗粒间距离的减小，具有小的 NPs 尺寸和分布均匀的 Cu NPs 增加了甲烷和乙烯的选择性，这源于 NPs 邻域上增强了反应物扩散和中间物质的再吸附。密集堆积的 Cu NPs 在 CO₂ 还原过程中经历结构转变，形成电催化更活跃的立方体状颗粒，能够形成乙烯、乙醇和正丙醇。对 Cu 晶面研

⁸ Xing Zhao, Jiangzhao Chen, Nam-Gyu Park. Importance of Oxygen Partial Pressure in Annealing NiO Film for High Efficiency Inverted Perovskite Solar Cells. *Solar RRL*, 2019, Doi:10.1002/solr.201800339

究表明，在 Cu (100) 面上选择性地形成乙烯，而 Cu (111) 有利于形成甲烷。接着研究人员制备了 PdCu 合金催化剂，实验发现 CO₂ 还原的反应选择性依赖于双金属系统的组成，发现具有 Pd₇Cu₃ 成分的 PdCu，对 CO 具有高选择性，且超过 80% 的 FE。基于密度泛函理论 (DFT) 计算，发现 Pd 原子充当反应中心并通过改变邻近 Pd 位点处 Cu 的电子结构来促进 CO 解吸，从而提高 CO₂ 对 CO 的选择性。无序分散的 PdCu NPs 对 C₂₊ 产物表现出高选择性 (> 60% FE)，而有序的 PdCu 催化剂催化形成 C₁ 产物 (> 80% FE)，表明了双金属催化剂中金属成分的原子排序在催化选择性中起着重要作用。除了催化剂结构对 CO₂ 催化还原有着明显影响外，电解质也起着重要作用。以 Cu 为电极、浓 KOH 为电解质，浓度从 1 M 增加到 10 M 时，乙烯在 Cu 电极上形成，同时还产生 CO。但是在水中有限的 CO₂ 溶解度导致 CO₂ 催化还原受限。该项研究系统探索了 Cu 单质、Cu 基双金属以及催化剂对 CO₂ 催化还原反应的作用机理，揭示了电催化反应是否能够通过 C-C 偶联高效产生烃和含氧碳氢化合物，主要取决于催化剂结构组分和催化剂，为设计开发高效、高选择性的 CO₂ 催化还原剂指明了思路。相关研究工作发表在《*Nature Catalysis*》⁹。

(刘竞 郭楷模)

新型袋式封装摩擦纳米发电机展现优异抗湿度特性

摩擦纳米发电机 (TENG) 能够将人们生活中广泛存在的机械能转化为电能，是一种成本低廉、绿色环保的能量收集方法，在可穿戴设备领域展现出广阔的应用前景。然而，耐湿性问题一直是影响 TENG 器件性能的关键因素之一，如何改善器件的耐湿度特性成为了该领域的热点。韩国庆熙大学 Jae Su Yu 教授领导的研究团队开发出一种全新的基于介电材料的袋式封装 TENG 器件，得益于其独特的材料和结构，获得了优异的输出性能，且器件的抗湿度特性显著提升。研究人员利用纳米压印光刻技术制备了纳米结构的聚二甲基硅氧烷 (NA-PDMS)，接着将多壁碳纳米管 (MWCNTs) 嵌入尼龙聚合物中制成复合材料，引入 MWCNTs 目的在于提升材料的介电常数从而提升后续器件的电输出性能。扫描电镜显示，NA-PDMS 呈现出典型的纳米结构，有助于增加发电机的表面接触面积，从而增强发电机输出性能。作为对比，研究人员也通过传统方法制备了平面结构的 PDMS，扫描电镜显示其表面光滑平整。随后以 NA-PDMS 和 MWCNTs-尼龙复合材料作为电极组装成完整的 TENG 器件，随后将其置于聚乙烯塑料袋中并进行密封以保护器件免受外界空气湿度影响。器件的电化学性能测试结果显示 (测试环境湿度为 35%)，基于 NA-PDMS/尼龙材料的 TENG 电压和电流分别达到 300 V 和 15 μA，而采用 NA-PDMS/MWCNTs

⁹ Dufeng Gao, Rosa M. Arán-Ais, Hyo Sang Jeon, et al. Rational catalyst and electrolyte design for CO₂ electroreduction towards multicarbon products. *Nature Catalysis*, 2019, DOI: 10.1038/s41929-019-0235-5

-尼龙复合材料组成的发电机性能进一步改善，最优性能可达 400 V，22 μ A，有效输出功率密度为 25.35 W/m²。紧接着测试了在 47%、51%、63%、71% 和 81% 不同空气湿度环境下器件电输出性能，结果显示没有乙烯塑料袋保护的器件其输出电压随着湿度增加逐步下降，从 400 减少到了 105 V；相反，有聚乙烯塑料袋保护的器件电输出性能保持稳定，展现出优异的抗湿度特性。最后研究人员将其器件应用于实际环境中研究其捕获机械能和转化为电能的能力，一个手指、两个手指和一个手掌摩擦器件均能够产生电性能输出，分别为 60 V/4.5 μ A、130 V/6.5 μ A 和 270 V/15 μ A，表现出优秀的机械能捕获和转化为电力的能力。该项研究设计开发了以纳米结构聚二甲基硅氧烷和多壁碳纳米管/尼龙复合材料作为面电极的 TENG，材料独特的结构和组成增加介质/摩擦电材料的表面接触面积、表面电荷密度，增强了器件的电输出性能，同时独特的袋式保护设计则显著增强了器件的抗湿度特性，为设计开发高效稳定的自供电、免维护可穿戴电子设备的电源提供了新思路。相关研究成果发表在《*Advanced Functional Materials*》¹⁰。

(郭楷模)

¹⁰ Anki Reddy Mule, Bhaskar Dudem, Sontyana Adonijah Graham, et al. Humidity Sustained Wearable Pouch-Type Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy from Human Activities. *Advanced Functional Materials*, 2019, DOI: 10.1002/adfm.201807779

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

微信公众号：CASEnergy

