

先进能源科技动态监测快报



本期重点

- 国际能源署发布《世界能源展望 2019》报告
- OPEC 展望至 2040 年全球石油供需市场发展走势
- 欧洲发布 2050 年 100% 可再生能源供暖制冷技术发展战略框架
- DOE 资助上亿美元推进太阳能发电技术研发和部署
- DOE 资助 8000 万美元支持电网现代化计划

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

国际能源署发布《世界能源展望2019》报告	2
OPEC展望至2040年全球石油供需市场发展走势	6
欧洲发布2050年100%可再生能源供暖制冷技术发展战略框架 ...	10

项目计划

DOE资助上亿美元推进太阳能发电技术研发和部署	15
DOE资助8000万美元支持电网现代化计划	18
ARPA-E资助4300万美元支持碳捕集和封存技术研发	19

前沿与装备

微量添加剂有效抑制相转变提升钙钛矿太阳能电池器件稳定性	20
混合受体有机太阳能电池展现优异性能和超强机械柔韧性	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	23

本期概要

国际能源署 (IEA) 发布《世界能源展望 2019》报告，采用情景分析法展望了至 2040 年全球能源发展趋势：碳排放强烈反弹、化石能源依赖度高居不下和地缘政治持续动荡等多种因素作用使得全球能源系统转型面临严峻挑战。展望未来，能源安全至关重要，而石油则是焦点所在。美国页岩油气产量预计长期保持在较高水平，这会直接挤占 OPEC 国家和俄罗斯在全球石油供应中的份额，后两者的占比将从 2005 年前后的 55% 下降到 2030 年的 47%，使得全球石油供应更加多元化。但无论全球能源如何发展，世界仍然严重依赖中东的石油供应。而就能源需求方而言，非洲对全球能源发展趋势的影响越来越大。到 2040 年，非洲石油需求增长幅度会大于中国，同时受近年来该地区一系列重大气田的发现等因素影响，其天然气需求量也将大幅增长。全球将进一步迈向电气化，展望期内，电力将是需求增速最快的终端能源品种。

石油输出国组织 (OPEC) 发布《全球石油展望 2019》报告，对全球石油供需现状和未来发展走势进行了系统的展望分析：至 2040 年，石油仍将是能源结构主体，在能源结构中的占比仍将保持最高份额，份额预计将超过 28%。届时，全球石油需求预计增长约 1200 万桶/日，即从 2018 年的 9870 万桶/日增至 2040 年的 1.106 亿桶/日。从区域角度看，OECD 国家的需求预计下降，从当前的 4800 万桶/日左右减少到 2040 年的 3800 万桶/日左右；而非 OECD 国家需求将进一步扩大，到 2040 年预计增长 2140 万桶/日。

欧盟可再生能源供热制冷技术创新平台 (RHC-ETIP) 发布《欧洲 100% 可再生能源供热制冷 2050 年愿景》报告，提出了至 2050 年实现 100% 可再生能源供热制冷的技术发展策略框架：太阳能区域供热是一种创新的解决方案，比基于燃气的区域供热成本更低。生物质能在供热市场的发展潜力巨大，预计 2050 年以后欧洲利用生物质进行能源生产的潜力为 7-30 艾焦。地热区域供热将越来越多地应用于现有建筑物和旧城区，地热能 and 小型供热网可能是单个建筑物的最佳选择。预计到 2050 年，地热供热制冷系统将在欧洲随处可见。用热泵代替化石燃料锅炉可以节省约 50% 的一次能源，用热泵替换电加热系统则可节省 2/3-3/4 的终端或一次能源。预计到 2050 年，区域热网可以满足欧洲近一半的供热需求。

DOE 宣布资助 1.28 亿美元用于支持太阳能发电技术研发，开展五大主题研究项目，包括：(1) 光伏发电技术；(2) 聚光太阳能热发电技术；(3) 系统软成本削减；(4) 太阳能制造业创新；(5) 先进的太阳能并网集成技术；旨在进一步推进太阳能发电、并网集成和相关制造技术研发突破，提升效率减少安装成本和发电成本，提升太阳能电力经济性。详见正文。

美国能源部 (DOE) 宣布在“电网现代化”计划框架下投入 8000 万美元，支持未来电网技术（如新型的电网预测、控制技术）的开发、测试和评估，聚焦 6 大主题领域，包括：(1) 灵活性建模；(2) 储能与系统灵活性；(3) 先进传感器和数据分析；(4) 机构支持与分析；(5) 网络安全与物理安全；(6) 发电技术。旨在加强和提高能源系统可靠性，确保国家能源安全。详见正文。

国际能源署发布《世界能源展望 2019》报告

11月13日，国际能源署（IEA）发布《世界能源展望 2019》报告¹，采用情景分析法展望了至2040年全球能源发展趋势：碳排放强烈反弹、化石能源依赖度高居不下、能效改善速度缓慢和地缘政治持续动荡等多种因素作用使得全球能源系统转型面临严峻挑战。展望未来，能源安全至关重要，而石油仍是焦点所在。无论全球能源如何发展，世界仍然严重依赖中东的石油供应。而就能源需求而言，电力需求增速将是全球能源增速的2倍多，太阳能光伏成为全球电力装机中占比最大的发电类型，海上风电到2040年有望吸引万亿美元投资。就区域而言，非洲对全球能源发展趋势的影响越来越大。报告要点如下：

1、能源安全至关重要，石油依旧是焦点所在

快速发展的能源行业凸显了对能源安全问题采取全面综合、动态追踪应对思路的重要性。2019年9月发生在沙特阿拉伯的袭击事件表明，传统的能源安全风险并未消失。与此同时，从网络安全到极端天气等一系列新型能源安全风险也需要各国保持警惕。在既定政策情景中，到2040年将有近2600万桶/日的石油通过马六甲海峡，约2000万桶/日的石油通过霍尔木兹海峡。石油船运的任何事件都可能严重影响市场，应急石油储备可以继续在对石油安全威胁方面发挥作用。

美国页岩油气产量长期保持在较高水平，重塑了全球能源市场、贸易流向和能源安全形势。在既定政策情景中，到2030年预计美国石油产量增量将占到全球增量的85%，其天然气产量增量占全球增量的30%；致密油产量将在2035年达到峰值，将从2018年的600万桶/日增至1100万桶/日。美国作为油气出口国的地位将进一步巩固，到2025年美国页岩油气总产量将会超过俄罗斯的油气总产量。

美国石油产量增加将挤占OPEC国家和俄罗斯在全球石油供应中的份额。后两者的占比将从2005年前后的55%下降到2030年的47%，全球石油供应更加多元化，这意味着单一组织控制国际石油市场将更加困难。部分主要生产国在油气收入方面将面临较大压力，进一步凸显了这些国家努力实现经济多样化的重要性。

无论全球能源如何发展，世界仍然严重依赖中东的石油供应。到目前为止，中东地区仍然是国际石油市场最大的净供应方，也是液化天然气的重要出口地区。在既定政策情景中，到2040年在印度进口需求翻番带动下，80%的国际石油贸易目的地在亚洲。

电力成为现代能源安全的核心。可再生能源成本降低和数字技术进步为能源转型带来了巨大的机遇，同时也带来了一些新型能源安全风险。政策制定者和监管者

¹ World Energy Outlook 2019. <https://www.iea.org/weo2019/>.

必须迅速采取行动，以跟上技术变革的步伐并满足电力系统灵活运行的需求。储能市场的设计、电动汽车与电网的双向互动、数据隐私等问题都有可能使消费者面临新的风险。

2、世界能源可实现快速转型，但发展方向和速度需要政策引导

页岩革命以及上游和中游超过 1 万亿美元的投资正在使美国成为石油和天然气净出口国。页岩革命始于 20 世纪 70 年代美国政府开始资助一系列研究和开发项目，之后政府继续提供税收优惠政策、市场改革措施和合作计划，为私营企业自主创新发展，参与项目投资和快速降低成本提供了平台。

太阳能光伏和其他一些可再生能源技术（主要在电力行业）同样正经历着从最初靠政策和财政支持转向大规模商业开发。实现能源系统整体转型需要在更广泛的能源技术领域取得进展，包括能效、二氧化碳捕集利用和封存、氢能、核能和其他方面。同时，还需要所有相关行业采取行动，而不仅仅是电力行业。

只有政府能够营造决定能源创新和投资的环境，向业界传递关于能源行业未来发展道路的明确信号和清晰方向。既要满足包括能源普及性在内日益增长的能源需求，同时又要减少排放，是一项艰巨的任务，需要各界广泛参与，但各国政府必须发挥引领作用。来自个人、民间组织、企业和投资者的倡议可以产生重大影响，但各国政府才是重塑能源体系、推动全球能源变革的最重要力量。

3、石油需求增速将趋于平稳，各类能源竞争激烈

2025 年后全球石油需求增长将明显放缓，2030-2040 年将趋于平稳。在既定政策情景中，未来一段时期长途货运、水运、航空以及石化行业对石油的需求将继续增长。但由于燃油经济性提高和燃料替代（主要由电能替代），乘用车石油需求在 2030 年前达到峰值。因此，2018-2025 年期间，全球石油需求将从 9700 万桶/日年均增加 100 万桶/日。2025 年后全球石油需求增速将放缓，2030-2040 年期间年均增加 10 万桶/日，到 2040 年达到 1.06 亿桶/日。而在可持续发展情景中，石油需求将很快达峰后到 2040 年回落至 6700 万桶/日，相当于 1997 年水平。

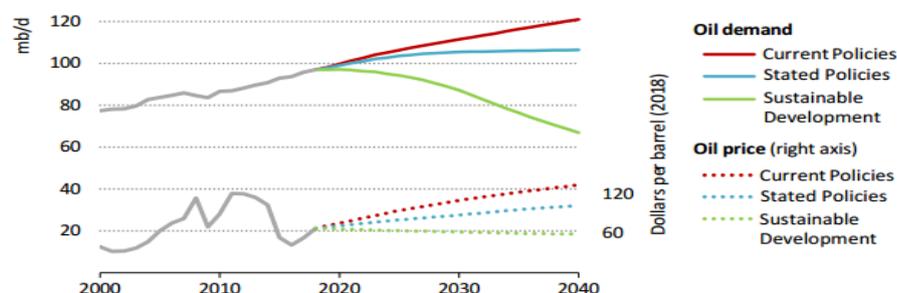


图 1 2018-2040 年不同情景下全球石油需求和价格变化态势（左轴单位：百万桶/日，右轴单位：美元/桶）

煤炭、天然气和可再生能源三者正激烈争夺亚洲快速增长经济体中电力和供暖部门的份额。煤炭是大多数亚洲发展中国家目前使用的主要能源。在以中国和印度

为代表的国家中，可再生能源是煤炭在电力行业的主要挑战者。亚洲发展中国家占全球可再生能源发电量增量的一半以上。工业和居民天然气需求（尤其是中国）的持续快速增长，激发了全球范围内对新建液化天然气供应和天然气管网的投资浪潮。

非洲对全球能源发展趋势的影响越来越大。到 2040 年，非洲石油需求增长幅度会大于中国，同时受近年来该地区一系列重大气田的发现等因素影响，其天然气需求量也将大幅增长。对非洲而言，最大的变数是未来其太阳能光伏的增长速度。作为太阳能资源最丰富的大陆，太阳能光伏可以为其中许多人提供最经济的电力。

4、不论全球能源需求总量增速如何，电力需求都将以更快速度增长

在既定政策情景中，到 2040 年之前全球能源需求年均增速为 1%。其中一半以上由低碳能源提供，光伏的贡献最大。同时，得益于液化天然气贸易的增加，天然气提供了未来三分之一的能源需求增量。2030-2040 年，石油需求会趋于平稳，而煤炭需求量则将有所下降。以电力为代表的一些能源部门将经历快速变革。

电力是现代经济的核心，在既定政策情景中，电力需求的增长速度是能源需求总量增速的两倍多。在既定政策情景中，到 2040 年全球电力需求年均增速将达到 2.1%。工业（特别是中国的工业）是电力需求增长的最主要部门，其次是家用电器、制冷设备和电动汽车。在可持续发展情景中，电力是除了可再生能源直接利用和氢能外，到 2040 年需求还在不断增长的少数能源品种之一，其增长主要来自电动汽车。到 2040 年，电力在终端能源需求中占比将超过石油，而目前其占比不到石油的一半。

在既定政策情景中，太阳能光伏成为全球电力装机中占比最大的发电类型。2025 年左右，可再生能源在发电结构中占比将超过煤炭，这主要得益于风能和太阳能光伏发电的持续增加。可再生能源在总发电量中占比将从 2018 年的 26% 增长至 2040 年的 44%。风能和太阳能光伏发电增速最为抢眼，但水力发电仍占据可再生能源发电的主要份额，2040 年占全球总发电量的 15%。

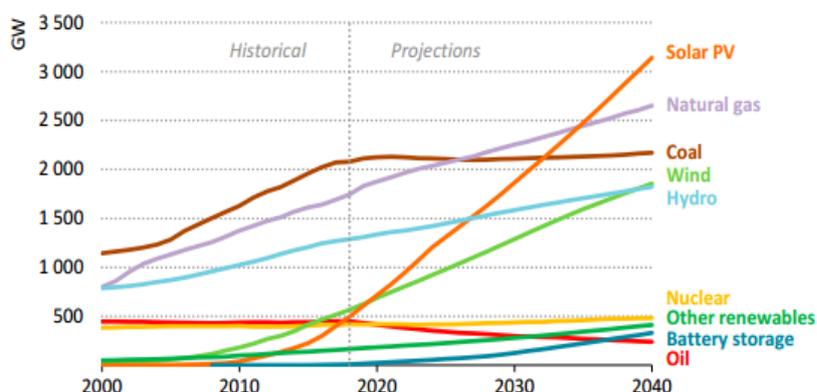


图 2 2018-2040 年不同能源资源电力装机容量变化态势（单位：GW）

海上风电将加速发展，到 2040 年有望吸引万亿美元投资。海上风电资源开发潜力巨大，可以满足数倍于当前的全球电力需求。尽管海上风电具有波动性，但由于

其采用更大的风力机组，可以在远离海岸的地方获得更强更稳的风力，因此其运行小时数比太阳能光伏和陆上风电更高。此外，还有更多的新技术即将涌现，包括可以开辟新资源和新市场的浮动式风力发电机。到 2040 年，海上风电项目越来越具有成本竞争力，有望吸引万亿美元投资，装机容量将增加 15 倍。欧洲在海上风电领域取得的成功激发了中国、美国和其他国家的兴趣。在可持续发展情景中，海上风电与陆上风电联合发力，成为欧盟的主要发电来源，为欧洲电力行业的全面脱碳铺平了道路。如果海上风电成为制氢的主要能源，其推广速度甚至会更快。

电池成本是影响电力市场和电动汽车发展的关键因素。在既定政策情景中，到 2040 年全球电池容量将增加 40 倍。电力系统对灵活性的需求不断增加，尤其是在印度。印度将是能源需求总量增长最多的国家，在既定政策情景中，随着电池成本的大幅降低，到 2040 年印度将安装约 120 吉瓦的储能设备。当规模效应进一步凸显或电池技术取得重大突破时，到 2040 年电池成本可以进一步降低 40%。太阳能和电池储能结合的发电站将成为非常有吸引力的经济和环境方案，大大削减印度对新建燃煤电厂的投资预算。

5、大幅提高能效是向可持续能源系统转型的主要推动力

全球能源效率改善进展缓慢。在供暖、制冷、照明、出行和其他能源需求不断增加的背景下，全球能源强度（单位产值所消耗的能源）下降速度正在放缓。2018 年，全球能源强度仅降低了 1.2%，约为 2010 年以来平均水平的一半。这一结果从侧面反映出新的能效政策和已有能效措施的作用出现弱化。

加速提高能效是使世界迈向可持续发展情景最重要的决定性因素。充分利用所有经济可行的能效提升技术和方法，每年可使全球能源强度降低 3% 以上。包括努力提高钢铁、铝、水泥和塑料等材料的高效设计、使用和回收。提高“材料效率”足以降低这些行业排放量的增长。同时也包括使用数字化、智能化的创新工具，如将电力需求调整到一天当中成本更低、排放强度更低的时段，降低消费者的电费支出，维护电力系统平衡，同时也有助于减少排放。

6、现有燃煤电厂需要解决与煤炭相关的排放

若要改变当前的全球排放趋势，不仅要关注新的能源基础设施，还要关注现有能源系统“锁定效应”带来的排放。这意味着要解决现有发电厂、工厂、货船和其他资本密集型基础设施的排放。尽管电力行业变化迅速，但在既定政策情景中，与电力相关的二氧化碳年排放量并未下降。一个重要的原因是，存量燃煤机组还有很长的服役期，而它们占到当前能源相关排放总量的 30%。

在过去的 20 年里，亚洲占全球新建燃煤发电装机容量的 90%，这些发电机组未来的服役期可能会很长。亚洲发展中经济体现有燃煤机组平均只有 12 年的运行年限。报告提出了三种可以减少存量燃煤电厂排放量的方案：一是增加二氧化碳捕集、

利用和封存（CCUS）装置，或对现有燃煤电厂进行耦合生物质发电技术改造；二是调整燃煤电厂定位，在降低运行小时数的同时，为电力系统提供可靠容量和灵活性；三是让燃煤机组提前退役。在可持续发展情景中，2080 吉瓦存量燃煤机组中的大部分将采用上述三个方案中的某一个。

7、天然气将在未来能源系统中发挥关键作用

天然气管网是将能源输送到消费者的重要通道，通常情况下其比电网输送的能源更多，并且其输送的能源品种不局限于天然气，具有很好的灵活性。从能源安全的角度来看，并行的天然气管网和电网可以成为互补。从能源转型的角度来看，天然气可以替代污染更严重的燃料，快速实现短期环境效益。从长远来看，天然气管网能否输送真正的低碳或零碳能源，如低碳的氢能和生物甲烷，是一个更重要的议题。

尽管氢能目前生产成本相对较高，但已经引起各界的关注。将其掺入天然气管网提供了一种扩大供应和降低成本的新方案。报告对生物甲烷供应（利用有机废物和残渣进行生产）可持续发展潜力的评估表明，生物甲烷可以满足目前约 20% 的天然气需求。随着对减少二氧化碳和甲烷排放的价值认识的提高，以上两种方案的成本竞争力将进一步提高。

（张凯宏 岳芳）

OPEC 展望至 2040 年全球石油供需市场发展走势

11 月 5 日，石油输出国组织（OPEC）发布《全球石油展望 2019》报告²，对全球石油供需现状及其影响因素（包括人口、经济、技术等）进行了系统深入分析，进而对全球石油供需市场中长期发展走势进行了展望，报告关键点如下：

•到 2040 年，全球一次能源需求预计增加 7200 万桶/日（油当量，下同）。全球能源需求预计将从近 2.86 亿桶/日增长到 2040 年超过 3.57 亿桶/日，即年均增长率约 1%。展望期内，非 OECD 国家的能源需求预计将增加近 7500 万桶/日，而 OECD 国家的需求估计下降约 300 万桶/日。由于不同国家/地区人口结构、能效水平、气候变化政策等存在差异性导致了能源需求各有不同。非 OECD 国家的能源需求增长动力主要来自亚洲地区，其中仅印度和中国两个国家的能源需求增量预计将占非 OECD 国家能源需求增长总量的近 50%。

² World Oil Outlook 2040.https://www.opec.org/opec_web/en/press_room/5731.htm

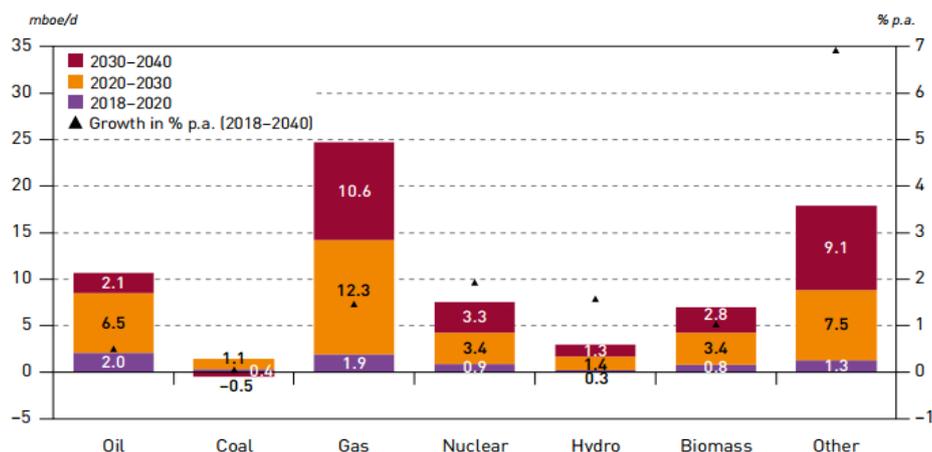


图 1 2018-2040 年全球一次能源来源需求变化态势（左轴单位：百万桶/日，右轴单位：年均增长率百分比）

•到 2040 年石油仍将是能源结构主体，在能源结构中占比仍将保持最高份额。2018 年，石油占全球能源需求的 31% 以上，超过煤炭（27%）和天然气（23%）。预计到 2040 年，石油仍将是能源结构中占比最高的能源来源，份额预计将超过 28%。2018-2040 年期间，全球天然气需求预计将从 6550 万桶/日升至 9000 万桶/日以上，届时天然气将成为第二大能源来源，占一次能源总量的 25%。天然气需求的增长将主要来自亚洲，以中国、印度和 OPEC 成员国为主。

•尽管 2030 年后煤炭需求将出现下降的趋势，但至 2040 年煤炭仍将是 CO₂ 排放的最大来源。据估算，2040 年煤炭产生 CO₂ 排放将占到能源相关 CO₂ 排放总量的 40%，即 149 亿吨。到 2040 年，与能源相关的排放总量将增加到 380 亿吨以上，比 2018 年的观测水平高出 40 亿吨以上。但展望期内 CO₂ 排放增长的速度将显著放缓。

•相较而言，可再生能源将成为增长最快的能源；但就绝对值而言，天然气预计增量最大。展望期内，可再生能源（包括太阳能、风能和地热能）年均增速预计达到 6.9%，即从 2018 年到 2040 年，可再生能源需求预计将增长近 1800 万桶/日。同期，核能和生物质能的需求预计将均增长约 700 万桶/日，而水电的需求将增长约 300 万桶/日。

•展望中期（至 2024 年），全球石油年均供应增量将在 100 万桶/日左右，从 2019 年的 110 万桶/日下降到 2024 年的 90 万桶/日。预计新增需求将主要来自非 OECD 国家，年均石油需求增量将保持在 100-120 万桶/日。OECD 国家的石油需求预计将逐步从中期最初几年的微量增长转向 2020 年以后需求的下降，部分抵消非 OECD 国家的增长。

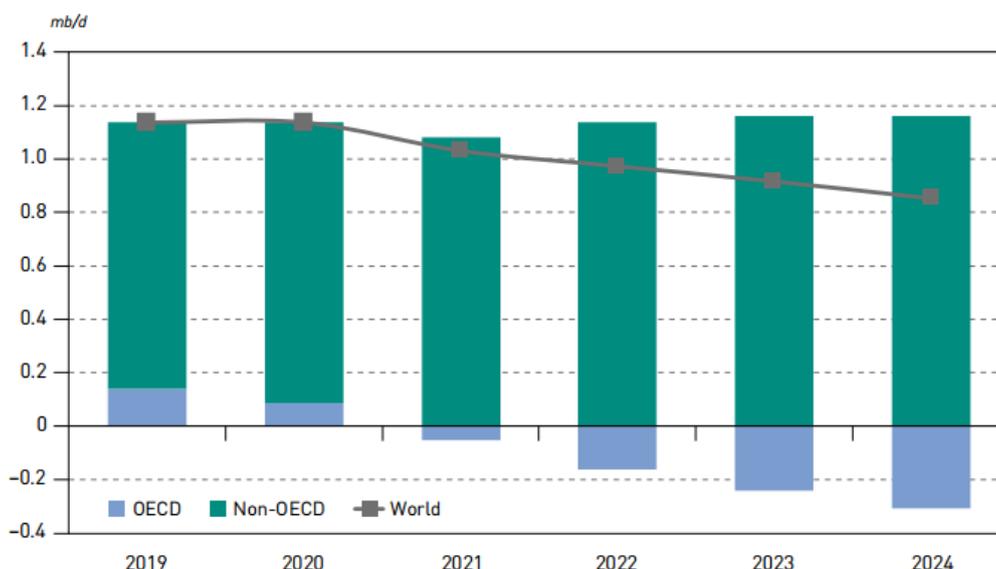


图2 2019-2024年全球不同地区石油消费需求年增量变化态势（单位：百万桶/日）

•**国际海事组织(IMO)关于燃烧排放标准的监管条例影响预计会弱于预期。**2020年1月1日起生效的IMO将船舶燃料油的含硫量限制在0.5%的新规定不仅对航运行业构成挑战，而且对全球炼油系统和相关成品油供应都将是一个颠覆性事件。然而，不断变化的市场环境以及航运行业的发展，会导致先前与IMO条例相关的预测（石油需求、石油供应和炼油方面）发生变动。最近的评估表明，全球炼油系统将有足够的灵活性来应对IMO新条例对燃料结构变化要求。尽管如此，新规定对高硫燃料油(HSFO)价格、汽油价格以及富含硫的石油价格仍将产生显著影响。

•**展望长期（至2040年），全球石油需求预计增长约1200万桶/日，即从2018年的9870万桶/日增至2040年的1.106亿桶/日。**从区域角度看，OECD国家的需求预计下降，而非OECD国家需求进一步扩大。在中产阶级不断壮大、人口高速增长和经济增长潜力增强等多种因素推动下，展望期内非OECD国家的石油需求预计增长2140万桶/日。预计OECD国家未来几年的石油需求将稳定在4800万桶/日左右，到2040年将降至3800万桶/日左右。就全球范围来看，石油需求年均增量预计将从2018年的140万桶/日降至2028年底的50万桶/日左右。

•**就部门而言，石化行业将是全球石油需求增量的最大来源（+410万桶/日），并将引领石油需求长期增长，但交通运输业仍将是需求总量最大的行业。**在交通运输行业，尽管总体增长接近300万桶/日，但需求占比预计将下降2%；航空业的需求预计也将大幅增长，将成为增长最快的部门，石油需求年均增长率预计为1.5%；海洋运输、铁路和国内水路需求也将出现一定增长。预计到2040年，交通运输行业将占石油需求总量的43%。但根据预测，这一行业将出现石油需求、运输服务和交通工具数量之间的强烈脱钩，主要原因包括技术不断发展所推动的燃料效率提高、能源政策的收紧以及清洁能源汽车的日益普及（电动汽车、氢燃料电池汽车）。2018-2040年间，车辆总数将增长逾10亿辆，达到24亿辆。这一增长的大部分（9.53

亿辆)来自非 OECD 国家。预计到 2040 年,电动汽车(包括纯电动和插电式混合动力汽车)保有量将达到约 3.2 亿辆,相当于全球汽车保有量的 13%。预计大多数电动汽车将是乘用车(3.05 亿辆),将占 2040 年乘用车总量的 15%。

•**美国页岩油将主导非 OPEC 国家石油中期供应增长。**从 2018-2024 年,非 OPEC 国家的石油供应总量预计将增加 990 万桶/日,达到 7220 万桶/日,主要归因于上游投资的增长恢复和需求前景乐观。预计美国页岩油供应将继续强劲增长,将占到非 OPEC 国家中期供应增长的 60%。此外,在其它地区的周期性复苏中,除了圭亚那外,巴西、挪威和加拿大也将贡献可观的供应增长。非 OPEC 国家的长期供应增长预计较为温和。就中期而言,美国页岩油供应预计大幅增加 670 万桶/日,此后增速将放缓呈现温和增长态势。美国页岩油供应预计在 2029 年达到 1740 万桶/日的峰值。其它地方的页岩油产量也有增长潜力,但估计产量仍相对较小。预计到本世纪 20 年代中期,美国的石油供应总量将达到 2280 万桶/日的峰值。非 OPEC 国家的石油供应总量预计在 2026 年达到 7260 万桶/日,但此后逐渐下降,到 2040 年将降至 6640 万桶/日。在本世纪 20 年代中期以后,预计只有巴西和哈萨克斯坦这两个非 OPEC 国家的石油产量将出现显著增长,几乎所有其他非 OPEC 产油国的长期石油产量都将下降。

•**到 2024 年,馏分油产能增量预计约为 800 万桶/日,集中在中东和亚太地区。**预计近 70%的馏分油产能增长将发生在展望期的前三年(2019-2021 年),年均增量预计约为 180 万桶/日。然而,此后几年的产能增量预计将趋于平稳,降至 40 万桶/日。大多数增长来自亚太地区和中东地区(+570 万桶/日,占全球新增产能的 70%以上),主要是受石油需求增长的推动,同时也有中东地区炼油出口增加的影响。预计非洲也将有明显增长(+80 万桶/日),其中尼日利亚的一个大型项目所占份额最大。

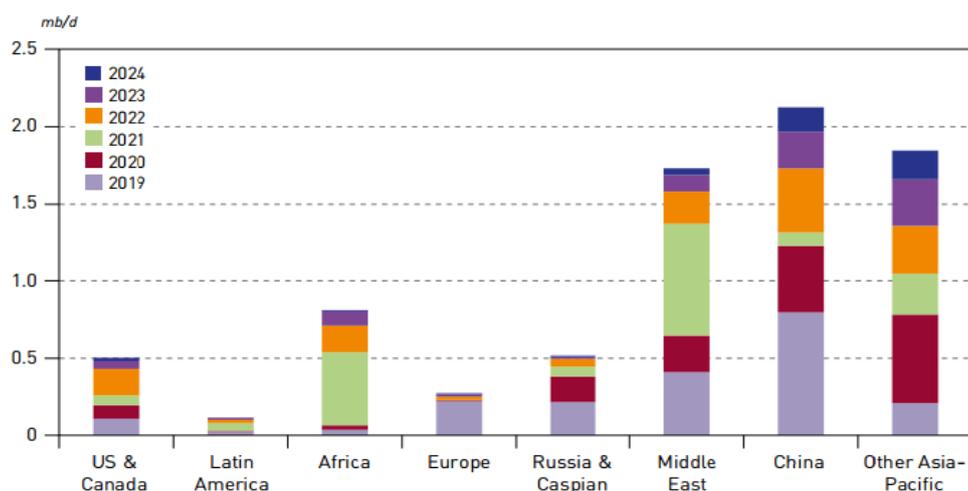


图 3 2019-2024 年全球不同地区馏分油产能增量变化态势 (单位: 百万桶/日)

•**到 2024 年全球馏分油预计出现 400 万桶/日过剩产能。**虽然 2019 年的馏分油

供需差额仍然不大，但从 2020 年开始，供过于求的态势逐步加强，即全球馏分油产能盈余不断增加。预计中东、美国、加拿大、欧洲和中国将出现最大顺差。这可能导致 2020 年后下游竞争加剧，并可能导致部分炼油厂关闭。由于几个地区的需求下降，以及极具竞争力的新炼油厂的增加，预计中期内炼油厂产能退出量将达到 210 万桶/日。预计大部分出现在美国、加拿大和欧洲。预计拉丁美洲将是唯一一个出现产能不足的地区。

•到 2040 年，全球馏分油产能预计增长 1650 万桶/日，主要集中在发展中国家（亚太、中东、非洲和拉丁美洲）。产品产能增长在前期会对现有的炼油厂带来一定的负荷压力，这将对中期过后项目和投资的放缓产生重大影响。对次级产能的预测表明，到 2040 年，需要增加大约 880 万桶/日的转换装置、180 万桶/日的脱硫装置和 500 万桶/日的辛烷生产装置。随着需求的增长和更严格产品规范的实施，预计这些新增项目中的大部分将在 2030 年之前投产。2019-2040 年间，预计维持生产所需的全球上游投资为 8.1 万亿美元，中游行业需要 1 万亿美元，下游投资估计在 1.4 万亿美元左右。综合来看，这意味着全球将需要近 10.6 万亿美元的长期投资来维持上述预期的石油供需。

•在经历了中期的下滑之后，受中东对亚太地区中期出口增加的推动，全球石油出口长期看涨。中期来看，全球石油贸易量预计将相对稳定在近 3800 万桶/日。在区域出口方面，最大的变化是美国和加拿大石油出口会出现显著增加，预计到 2025 年将攀升至接近 500 万桶/日的水平，较 2018 年增加约 300 万桶/日。从长期来看，石油贸易前景将发生根本性的变化，2025-2040 年预计石油出口将增加 450 万桶/日达到近 4200 万桶/日。预计到 2040 年，来自美国和加拿大的出口量将降至 300 万桶/日左右。从 2025 年到 2040 年，中东地区的出口总量将增加约 700 万桶/日，达到约 2300 万桶/日的水平。

（郭楷模）

欧洲发布 2050 年 100%可再生能源供暖制冷技术发展战略框架

10 月 24 日，欧洲可再生能源供热制冷技术创新平台（RHC-ETIP）发布了《欧洲 100%可再生能源供热与制冷 2050 年愿景》³报告，提出到 2050 年实现欧洲供热和制冷完全使用可再生能源的发展目标。该愿景从城市、区域能源网络、建筑、工业等不同应用领域，确定了到 2050 年实现完全可再生能源供热和制冷的技术发展战略框架，总结了欧盟用于供热和制冷的各种可再生能源技术最新现状及开发潜力。欧盟委员会于 2016 年在“战略能源技术规划”（SET-Plan）框架下建立了 RHC-ETIP，汇集了生物质、地热、太阳能热利用和热泵等行业的利益相关方，涉及区域供热和

³ The RHC ETIP publication ‘2050 Vision for 100% Renewable Heating and Cooling in Europe’ is ONLINE!. <https://www.rhc-platform.org/2050-vision-for-100-renewable-heating-and-cooling-in-europe-is-online/>

制冷、储热及混合系统等技术领域，旨在加强可再生能源在供热和制冷领域的应用。报告要点如下：

一、实现 100% 可再生能源供热和制冷的技术发展战略框架

1、城市可再生能源供热和制冷

为了实现城市的 100% 可再生能源供热和制冷，需要整合当地能源系统的不同组成部分和参与者并建立协同效应，具体的技术目标是：①改善建筑物和区域的智能电器和能量管理系统，将其完全整合至整个能源系统中，实现以智能方式管理供热和制冷的供应、储热、可再生能源电力及其输送；②开发接口技术以连接（近）零能耗建筑，以建立零能耗建筑群和负能耗区域；③向城市提供可满足所有供热、制冷和热水需求的可再生能源供热和制冷技术及系统的相关信息。

2、区域可再生能源供热和制冷

（1）发展目标。通过使用生物质、太阳能、地热能、余热和环境热以及非化石燃料发电，区域可再生能源供热和制冷可实现完全脱碳。将可再生能源集成到区域供热和制冷系统需要开发和示范以下解决方案：①将系统与当地无碳和低碳能源相匹配，建立具有较低和极低供应温度的新型区域供热和制冷网络，降低现有网络的温度，系统设计和运行应适应更低温度，并集成热泵、制冷设备和储能设备；②从能源系统整体角度，在不同规模上与不同终端用能部门（电力、热/冷、燃气、交通）相关联，有效供应、管理和利用高比例可再生能源。

（2）数字化技术将起到关键作用。数字化技术对于实现 100% 区域可再生能源供热和制冷起关键作用，需从 4 个方面发挥其作用：①供应，通过数字化技术获得更低成本、更高效和使用更多可再生能源的系统，如通过智能网络控制器等先进解决方案集成波动性可再生能源，通过削峰等智能控制手段提高可再生能源系统的运行效率；②区域，通过低成本、可靠且可扩展的数据收集和通信系统管理实时能源数据，通过机器学习和数据挖掘优化能量分配，最大限度提升系统与温度、流量、压力、热需求和电网损失相关的性能；③用户，数字化技术可帮助用户了解其用能情况，调整用能需求以提高区域供热和制冷系统的效率，智能电表和远程控制可以细化数据的时间颗粒度，供需双向数据流将有助于改善系统运营；④设计与规划，通过开发和应用数字解决方案优化市政规划，如大数据分析、映射算法、过程计划工具、复杂优化和仿真方法等，开发和测试技术和运行模型对多能源系统进行仿真和优化。

3、100% 可再生能源建筑

（1）发展目标。在建筑物中使用可再生能源供热和制冷将最终实现如下目标：①通过能效措施将所需设备的尺寸/功率/容量降至最低；②尽可能使用太阳能或被动地热供热及制冷；③必要时使用生物能或可再生能源电力补充供热和制冷需求。

(2) 储能和部门协同是关键因素。储热技术可优化不同可再生能源的组合，显著改善与可再生能源间歇性相关的问题。集成现场供热和制冷、储能、可再生能源电力和燃气网的解决方案将提供更优质的能源服务，使用热泵进行空间供热和制冷，并将其与太阳能热利用结合用于生活热水和空间供热将是一种选择。

(3) 系统化方案 and 用户参与将越来越重要。建筑物供热和制冷将向系统化方案演变，根据建筑的设计标准进行优化。系统将变得更智能和用户友好，可进行远程操作或控制。物联网技术、智能电表和建筑能量智能管理系统将使用户更深入参与到能源系统中，成为产消合一者。

4、100%使用可再生能源供热和制冷的工业

在工业领域实现完全使用可再生能源供热和制冷需要设计新的工艺，以及对现有设备进行改造。通过创新过程技术实现持续的过程管理，可实现在 120℃ 以下使用可再生能源，并能极大降低能源需求。储热对于整合不同的供热和电气至关重要，可应对价格波动和季节性变化。到 2050 年，可再生能源可以完全满足工业的供热和制冷需求，太阳能、地热能等将用于低温过程热，可再生能源电力则将主要用于高温过程热，通过可再生能源生产的氢气和氨可用于生产钢铁、水泥等高温过程。用于制造的工业能量管理系统主要针对单一供应，只能在有限范围内对需求和供应（热、电）的波动做出响应，因此需利用数字化技术优化工业能量管理系统的设计和运行，利用基于过程需求和供应的（近似）实际生产数据、历史数据和预测数据，开发整体优化方法。将利用数字化模型，针对实例开发和验证高效过程的解决方案，并在制造行业（如印刷电路板行业）中实施。

二、用于供热和制冷的可再生能源技术发展现状及开发潜力

1、太阳能热利用

(1) 技术现状。太阳能热利用技术具有极强的可扩展性，目前用于供热和制冷主要提供 40-70℃ 范围的生活热水和空间供热，太阳能区域供热系统功率可超过 100 兆瓦（热）。光热发电已经在工业过程供热方面有了大规模的应用，其成本低于燃气锅炉且在整个生命周期中基本恒定，因此可避免燃油价格波动的风险。主动式太阳能房屋将太阳能用于生活热水，可实现 70%-80% 的能源需求由太阳能供应。工业过程太阳能供热可满足 150℃ 要求的供热，需要进一步示范和可行性验证。

(2) 开发潜力。太阳能区域供热是一种创新的解决方案，比基于燃气的区域供热成本更低。太阳能热利用可实现夏季的需求削峰和补充冬季热量供应，与季节性储热和其他低温热源集成能够发挥良好的效果。工业过程太阳能供热将需要解决标准化、系统验证和风险评估等问题以实现规模化应用。数字化将有助于不同技术和设备间的集成，物联网、工业 4.0、智能家居及电力和热力设备的整体集成将使太阳能热利用解决方案更为智能。

2、生物质能

(1) 技术现状。目前生物质占欧盟终端用能的 10.5%，占可再生能源消耗量的 59%，75% 的生物质被用于供热。生物质用于空间供热的典型规模是千瓦级，而几十兆瓦的生物质锅炉则用于集中供热，并且用来供应热水。沼气和生物燃料可在锅炉中直接燃烧供热也可用于热电联产，生物甲烷则可注入天然气网中。生物能可提供工业过程所需低温热、蒸汽和高温热，是最便捷的解决方案之一。燃烧木柴、木片或生物质颗粒的小型加热系统易于使用、成本低，正取代欧洲许多地区的燃油取暖。生物质既可用于区域供热又可用在热电联产系统中发电，能源利用效率高达 85%-90%。用于家庭的微型热电联产尚处于起步阶段，但具备增加使用生物质的潜力。

(2) 开发潜力。除立法、监管和产业等因素，生物质能在供热市场的发展潜力取决于：开发高品质生物燃料；发展技术以降低成本；智能系统集成，通过数字和人工智能技术降低规划、安装和运行的复杂性。预计 2050 年以后欧洲利用生物质进行能源生产的潜力为 7-30 艾焦。

3、地热能

(1) 技术现状。目前地热能用于供热和制冷主要用在从几千瓦级的家庭热水到 500 千瓦以上的大型热水供应，以及区域供热。一些创新的应用如地热制冷、融化冰雪以及海水淡化已经得到验证。地源热泵和地热区域供热系统可提供住宅所需的低温热。地热区域供热将越来越多地应用于现有建筑物和旧城区，地热能和小型热网可能是单个建筑物的最佳选择。

(2) 开发潜力。未来几十年的关键挑战是地热区域供热和地源热泵的可靠设计、工程和控制能力，以保持全年将地热可持续地用于供热和制冷。对热电联产地热系统和新一代地热系统（如增强型地热系统）的进一步开发也将发挥关键作用。地热将与其他可再生能源整合用于建筑的能源系统，地热能存储（如地下储热、埋管储热、含水层储能）将被用于季节性储能，并可用于工业余热和太阳能的存储。还将进一步发展地热供热用于农业。增强型地热系统作为一项突破性技术将大规模发展，通过热电联产可同时提供电力和热量。预计到 2050 年，地热供热和制冷系统将在欧洲随处可见。

4、热泵

(1) 技术现状。随着部署的增加，热泵技术正成为使供热和制冷脱碳的能源组合的基石。同时，热泵也是提高白色家电甚至电动汽车能效的首选技术。除了利用可再生能源，当前的热泵技术可以利用工业余热、建筑和工业过程中的废气等。将储热集成到热泵系统中可以弥补能源生产和消费的时间差。热泵系统可实现 50-70℃ 的温差，将多个压缩机组合则将克服更大的温度差，从而将源头温度提升至需要的

水平。压缩循环热泵（电驱动）将低温可再生热能转化为高温热能。热驱动热泵（如吸附式冷却器）基于热吸附循环，利用废热或可再生热能进行制冷，其性能提升可实现驱动温度高达 250℃。工业热泵通常供应温度水平在 30-50℃或 55-65℃的热量，当前研究目标是提供温度为 200-250℃的热量。热泵技术的创新和研究正专注于改进组件、产品和系统，而新技术（如磁热泵）尚处于概念/实验阶段。

(2) 开发潜力。用热泵代替化石燃料锅炉可以节省约 50%的一次能源，用热泵替换电加热系统则可节省 2/3-3/4 的终端或一次能源。从系统角度来看，热泵的节能潜力更大，将高效热电联产系统中的锅炉替换为热泵，还可使废热能够用于区域供热系统，将地热或太阳能用于热泵则可为热泵创造更好的部署机会。

5、储热

(1) 技术现状。在目前各种储热技术中，采用水作为储热介质的显热存储技术最简单、成本最低，广泛用于住宅、区域供热和工业，采用液体和固体介质的地下显热存储也是常用的大规模储热方式。潜热存储方式能量密度更高，存储温度范围更广且可用于制冷。热化学存储基于放热和吸热的可逆化学反应，理论存储密度比水基储热系统高十倍，且没有热量损失，但该技术较新，尚需开发各种适用于市场的产品。地下储热主要用于平衡季节性供需，还可储存中温余热，提高可再生能源和废热的利用率以及能源系统的灵活性。

(2) 开发潜力。未来将进一步开发或改进大规模储热技术，包括：长寿命、低成本的耐高温衬里材料；不同地质环境下大容量、深坑或储罐存储的施工技术；可降低热损失并提高存储性能的隔热材料和技术；浮式或自带盖子的结构，可有效利用储罐的顶部空间；改进系统集成、液压和控制，以优化系统性能；开发工作温度在 5-15℃的相变材料，将冷库集成到冷却系统中；开发集成热交换器的储罐，缩小储罐体积并提高能量传输率，如使用纳米相变材料；通过材料开发（如中孔材料和复合材料）和组件优化等，降低技术成熟度达到 5-6 级的紧凑型储热技术的成本；开发测试和评估方法，并将材料整合到反应器组件中；开发新型传感器技术以优化控制；进行下一代紧凑型储热技术的示范；开发新型相变材料和钛复合材料、反应器和系统集成技术，用于工业中、高温储热。

6、区域热网

(1) 技术现状。目前欧盟已部署了 6000 多个区域热网，满足欧盟 11%-12%的供热需求，北欧、东欧等气候较冷国家对区域热网的应用较多。第四代区域热网正开始取代第三代技术，这是一种低温区域热网，其在热量分配过程中可减少热损失，改善热量供应和需求的热品质匹配，降低热应力和烫伤风险。低温区域热网还有助于提高热电联产电厂的电热比，并通过烟气冷凝回收废热，提高热泵效率，增强对低温余热和可再生能源的利用。

(2) **开发潜力**。预计到 2050 年，区域热网可以满足欧洲近一半的供热需求。城市将是区域热网的最佳应用地区，可收集城市景观中的低等级废热作为区域热网的热源。区域制冷是技术成熟的新兴行业，具备强劲的增长潜力。可再生能源电力驱动的大型热泵将越来越多用于区域热网。工业和商业产生的大量余热也可作为区域热网的热源，提高能源利用率。区域热网还可作为一种有效的储能方案，吸收过剩的可再生能源电力以平衡电网。

(岳芳)

项目计划

DOE 资助上亿美元推进太阳能发电技术研发和部署

11 月 6 日，DOE 宣布资助 1.28 亿美元用于支持太阳能发电技术研发项目⁴，以进一步推进太阳能发电、并网集成和相关制造技术研发突破，提升效率减少安装成本和发电成本，提升太阳能电力经济性，同时改善集成太阳能电力电网的稳定性和弹性，进而扩大太阳能电力在全美的部署规模。本次资助重点聚焦五大主题，包括：

(1) 光伏发电技术；(2) 聚光太阳能热发电技术；(3) 系统软成本削减；(4) 太阳能制造业创新；(5) 先进的太阳能并网集成技术。具体内容如下：

1、光伏发电技术研发 (21 个项目，总额 2360 万美元)

•**光伏联合研发项目**：研发并验证使用低温和超声波加工 III-V 族化合物晶圆工艺的可行性，以代替金属切割减少材料浪费、降低制备成本并提高晶圆基板的使用寿命；利用先进电池模块原型制造设施，来提高发射极和背面钝化电池 (PERC) 制造工艺水平，降低生产成本；针对背接触的 CdTe 太阳电池开发高性能背接触材料和工艺，以在减少功率损失前提下将该电池效率提升到 25% 水平；利用机器学习、大数据等数字技术开发光伏电站的故障自动监测和诊断系统，以减少意外事故发生频率，同时减少人工成本进而降低发电成本；开发低成本、高效规模化生产稳定钙钛矿太阳电池的沉积技术；开发高效、低成本、稳定的双面钙钛矿太阳电池卷对卷生产工艺；开发新型的封装密封剂，能够有效吸收钙钛矿中泄漏出的铅元素；对暴露在高温、强光和其他潜在损害因素的环境下钙钛矿太阳电池进行电池结构的原位表征，研究其降解衰退机制；开发浮法硅晶片的制作工艺替代传统的线锯切割工艺，减少制备过程的材料浪费。

•**小型创新项目**：开发新型的超声波表征手段用于表征太阳电池封装模块中的 EVA (乙烯-醋酸乙烯共聚物) 交联度，来减少层压缺陷产生；开发新型低成本长寿命 (25 年) 的空穴材料，以将钙钛矿太阳电池效率提升到超过 30% 水平；探索 PERC

⁴Department of Energy Announces \$128 Million in New Projects to Advance Solar Technologies.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-128-million-new-projects-advance-solar-technologies>

结构 P 型硅基电池光、高温诱导的性能衰退机理；开发横截面原位表征工具来观测光伏器件中载流子的迁移情况，探明载流子的动力学机理；利用机器学习、大数据来收集和分析光伏电站运行数据，指导优化光伏电站设计，并对新电站进行技术经济评估，减少电站成本；搭建一个利用太阳能作为供能系统的兔子饲养房，评估其技术、经济、环境的可行性；通过模拟和实验探索异质结硅基电池和 PERC 硅基电池的性能衰退机制；利用纳米粒子电喷雾激光沉积技术（NELD）制备 PERC 电池的银接触点，以提升电池性能；III-V 族太阳电池衬底的回收再利用技术研发，降低制造成本；开发高性能的发射极和背面钝化 CdTe 电池，并研究其局域的载流子动力学行为；开发新型、低成本、环保型的天然石英石转变高纯硅的生产技术。

2、聚光太阳能发电技术研发（13 个项目，总额 3000 万美元）

•**热能存储技术**：研发高效经济的长时（周或者季节性）储能系统与聚光太阳能热发电（CSP）结合，实现能量的全年度合理分配；开展高温太阳能热化学储能技术研究，以提高太阳能热发电的经济效益；开发一种新的复合陶瓷热能存储材料替代金属材料以提高存储罐的隔热性和机械强度；验证使用存储液化石油气的大型储罐来收集并存储太阳能产生的热蒸汽技术经济可行性。

•**材料和制造研究**：用于集中式 CSP 发电厂的超临界 CO₂ 循环系统换热器中镍合金的蠕变和疲劳特性研究；开发新型的压缩机用于超临界 CO₂ 动力循环系统，集成到 CSP 电站改善发电性能；开发利用金属粉末压制方法制备超临界 CO₂ 动力循环系统组件的工艺，以降低制造成本；碳化硅接收器替代金属合金用于 CSP 电厂存储高温熔融氯化物盐，增加接收器耐热性和耐腐蚀性，延长寿命；研究第三代 CSP 发电系统中各组件、焊接件的热机械行为，探索优化工艺延长组件寿命；针对以超临界 CO₂ 作为工质的 CSP 电站开发新型的自润滑、高效碳纳米管阵列刷式密封，提升涡轮机效率同时减少成本；开发抗氧化、热机械性能优异（能够承受超临界 CO₂、熔融盐腐蚀和 800℃ 高温）的陶瓷复合换热器；开发一款耐高温、抗冻的熔融盐阀，可减轻 CSP 高温工作环境下的泄漏和冻结，减少因冻结和停机而造成的运行和管理负担；开发基于偏振技术的成像系统，提高光线测量的灵敏度，用于评估 CSP 集热器系统的性能。

3、系统软成本削减（19 个项目，总额 1760 万美元）

•**构建合作伙伴解决监管问题**：成立区域太阳能项目管理协会，召集公共部门和私营部门的利益相关方，为地方政府、特区和其他有权安装大型太阳能项目的当局确定最佳实践，将开发相关工具包用于太阳能项目的审批、许可和法规流程制定；组建可再生能源协会，汇聚智慧达成共识，提出太阳能和“太阳能+储能”项目许可审批流程和监管框架相关建议；开发一个在线网络安全工具包，以帮助太阳能行业的决策者、监管机构、公用事业单位以及州和地方政府在其辖区内制定有关太阳能基

基础设施的网络安全政策；将与美洲原住民部落合作制定相关监管方案，解决部落部署光伏发电和“太阳能+储能”系统的障碍；通过确定太阳能设施共同受益权人，共同开展太阳能系统安装地点的雨水渗透和径流现场研究；开发一种用于绘制二次低压的电路新方法，加速公用事业单位批准太阳能连接到电网的互连过程；培训城镇居民有效参与太阳能电力批发市场和公用事业规划过程，帮助城镇评估太阳能发展潜力。

•**通过数据采集和分析评估太阳能基础设施对禽类生活环境影响：**开发深度学习计算机视觉框架以监视禽类与太阳能基础设施的交互作用，通过收集和分析数据有效减少太阳能设施对禽类生活环境影响；使用两种互补的遥感技术（无人机和 3D 成像）开发用于机器学习模型来监控生活在太阳能设施附近的鸟类；建立一个框架用以指导鸟类“羽毛斑”基因表征，并了解太阳能设施对候鸟种群的影响。

•**太阳能融资方法创新：**针对低收入社区，研究和开发全新的太阳能产业融资模式和所有权结构，以拓宽融资渠道，推动太阳能产业在低收入社区的发展；利用联邦低收入家庭能源援助计划（LIHEAP）、州和地方激励措施以及其他资金来源促进中低收入社区太阳能设施部署；为公用事业单位、太阳能开发商以及社区和地区金融机构提供一系列太阳能发展的成功案例和最佳实践，以提升中低收入社区使用太阳能的经济承受能力；设计和实施灵活的金融信贷协议，以增加中低收入社区的选择和提高太阳能经济承受能力，解决太阳能部署障碍；与社区金融机构合作，创建培训计划和共享资本平台，从而扩大信用合作社、社区银行和社区发展金融机构在低收入社区中太阳能融资的参与度。

•**太阳能软件开发：**开发简化的太阳能电力上网评估软件，以帮助农村社区和小型公用事业单位更加轻松快捷地部署太阳能电力系统；开放一个小型、经济的光伏系统模拟和分析平台，以从数据系统获取真实数据进行模拟计算，获得最佳运行模式，提升发电效率，降低太阳能光伏服务商运维成本；开展太阳能电力高比例并网电网的长期模拟仿真。

4、太阳能制造业（7 个项目，总额 680 万美元）

开发并测试模块化的单源气相沉积（SSVD）电池制造平台，以实现下一代薄膜太阳电池（钙钛矿太阳电池）高通量低成本规模化制造；开发一种机械破碎碳化硅晶圆制造技术，减少制造过程的材料浪费，提高产率降低成本；开发一种具有成本效益的金属浆料，以增强太阳电池中的金属连接，提高其抗断裂性，并最大程度地减少由降解和封装处理引起的裂纹，延长电池寿命；开发用于高效制造透明导电薄膜的单束离子源沉积技术，降低导电薄膜制造成本；先进的分布式电网基础设施，减少分布式太阳能系统的安装和材料成本；新型的太阳能玻璃的减反射和防污涂层技术；发展光伏电站现场安装工厂，以缩减时间和经济成本。

5、先进并网集成技术（15 个项目，总额 5000 万美元）

•**配电网自适应保护**：开发和测试稳定可靠的太阳能光伏设施模型，以使电力系统工程师能够计划、操作和保护输配电系统；开发一个匹配太阳能光伏系统的自适应配电保护系统，该系统使用动态模型来确定电网运行状态是否健康；开发大型光伏系统高级模型套件，用以捕获不同条件下系统运行的动态信息，以减少瞬时停电，提高系统稳定性；高比例太阳能并网电网的自适应保护和控制系统，提高保护系统的选择性和灵敏度；开发具有高级量测体系（AMI）数据集成功能的分布式能源的风险信息分层控制系统，以提高太阳能占比的电网系统可靠性；通过储能技术、人工智能和区块链技术实现对富余太阳能的优化利用。

•**先进光伏控制技术和网络安全技术**：开发基于逆变器的电网建模和自动化分析工具系统，研究太阳能并网对大电网稳定性影响；开发和部署适用于分布式能源系统的安全通信技术，提高分布式能源网络安全性；研究和验证 100% 可再生能源的微电网技术，能够在变化的条件下保持电压和频率稳定来改善电网的稳定性和弹性；开发一种不依赖通信网络的防黑客逆变器，即使出现电网故障也可以避免连锁停电，并且无需借助传统发电机的帮助即可启动电网；开发并示范一种具有网络弹性的光伏配电系统的主动防御机制，防范网络攻击，解决光伏系统的逆变器和系统级网络安全问题。

（程向阳 郭楷模）

DOE 资助 8000 万美元支持电网现代化计划

11 月 6 日，美国能源部（DOE）宣布在“电网现代化”计划框架下投入 8000 万美元⁵，支持开发未来电网技术（如新型的电网预测、控制技术）的开发、测试和评估，旨在加强和提高能源系统可靠性，确保国家能源安全。本次资助主要聚焦 6 大主题领域，包括：灵活性建模；储能与系统灵活性；先进传感器和数据分析；机构支持与分析；网络安全与物理安全；发电技术。具体内容见表 1。

表 1 电网现代化项目具体内容

主题	具体内容
灵活性建模	开发和计算国防关键基础设施弹性指标；全面分析和评估关键基础设施间的相互依赖性；分析电网可靠性及断电恢复性能
储能与系统灵活性	开发安全的主动分布式能源管理解决方案的联合架构；微电网及其分布式能源在开放式现场总线（OpenFMB）架构中实现协作自治运行；普拉姆岛分布式能源、传感器、控制系统的验证、恢复和黑启动测试；开发与示范直连电网的中压（最高 13.8 kV）先进智能电力电子硬件和多接口软件；定义电网服务通用框架，并开发标准化能源服务接口规范以简化分布式能源

⁵ 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>

集成并网

先进传感器和数据分析	常见电网设备的早期故障识别，将采用多变量、多模式方法，对电网常用设备中出现的短期严重故障及初期集中出现的问题进行诊断并确定修复途径；开发新型测量工具，以超高精度分析大型电网对微小信号的动态响应
机构支持与分析	开发先进方法、工具、数据库和资源，提供强大的分析支持，以应对电力市场转型挑战；在 1-2 年内为 10-20 个州的公用事业委员会提供深入技术援助，以支持电网现代化或能源基础设施计划的实施；为决策者提供高质量的科学分析、案例研究和决策支持工具；针对综合配电系统规划和电网现代化战略中的最佳实践，向国家公用事业委员会、国家公用事业消费者代表、区域实体和其他决策者提供教育、培训和直接技术支持，以提高整个电力系统的可靠性、弹性和电力负担能力；向州能源局和公用事业委员会提供直接技术援助，以推进采用分布式能源供电的高能效建筑物部署，可与大规模电力系统和配电网一起动态运行
网络安全与物理安全	开发灵活的嵌入式响应功能以增强能源安全；将多点二进制文件传输（MBFT）与人工智能和机器学习相结合，以确保大容量电力系统（包括保护继电器和相关变电站及控制中心系统）能够容侵运行；开发新的人工智能深度强化学习方法，通过运营技术/分布式能源网络和物理过程数据来检测复杂的、以前未知的威胁，并部署适当的响应措施；开发跨部门指南、标准化指标和测试环境，以推进区块链技术在设备安全、安全通信和电网弹性等方面的成熟应用；通过定向学习和强化训练技术，对逆向工程恶意软件进行深入分析，重点关注防御行动行为模型开发，对下一次恶意软件演变进行相似分析和预测
发电技术	灵活的光伏-风电-储能混合发电系统的开发与示范；对发电基础设施中的物理安全性进行实验评估，以应对大规模、局部性的电磁威胁或攻击；创建分析平台以评估大规模电力系统的风险，以提高电力系统可靠性和弹性

（岳芳）

ARPA-E 资助 4300 万美元支持碳捕集和封存技术研发

11 月 14 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布新设立“灵活碳捕集和封存（FLECCS）”主题研究计划，资助 4300 万美元用于推进碳捕集和封存（CCS）技术研发⁶，着重解决 CCS 设计、运营和商业化部署面临的一系列技术挑战，促进电力系统脱碳化。本次资助研究课题将分两个阶段开展，第一阶段将侧重于 CCS 概念原型的设计和优化工作。第二阶段将开展 CCS 实物组件、小型原型系统开发，以减少 CCS 系统商业化部署面临的技术风险和成本。具体内容如下：

⁶ Department of Energy Announces \$43 Million to Develop Carbon Capture and Storage Technology
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-43-million-develop-carbon-capture-and-storage-technology>

表 1 碳捕集和封存 (CCS) 主题研发计划具体内容

阶段	具体研究内容
阶段一	<ul style="list-style-type: none"> •开发一个配备 CCS 系统的燃煤电厂仿真模型, 开展整个系统模拟运行试验, 以评估该系统的技术经济特性 •采用节点边际电价 (LMP) 数据 (由 ARPA-E 提供), 来实现对配备 CCS 系统发电站电力的优化调度, 如当 LMP 大于整个电厂的运行边际成本时开始进行工作调度, 而当 LMP 低于整个电厂的边际成本时则降低电力功率输出或关闭 •详细研究配备 CCS 系统发电厂的工作过程动态和物理机制。因为 CO₂ 注入过程中可能导致注入井的压力、温度和密度的突变, 导致干冰和 CO₂ 水合物的形成, 可能导致注入井出口堵塞和管道套管破裂 •开展配备 CCS 系统电站的现场验证试验, 以验证其真实的技术和经济性能, 来支持 CCS 系统设计和制造优化工作 (如需要开发新材料) •综合考量配备 CCS 系统电厂的全部工厂成本、LMP 数据等信息来优化电厂的设计和运营, 实现净现值 (NPV) 最大化
阶段二	<ul style="list-style-type: none"> •开发基于第一阶段确定的配备 CCS 系统发电站的最佳设计方案 •构建一个配备 CCS 系统发电站原型系统, 开展现场运行试验, 验证技术经济性

(张凯宏 郭楷模)

前沿与装备

微量添加剂有效抑制相转变提升钙钛矿太阳能电池器件稳定性

目前高效率的有机无机杂化钙钛矿太阳能电池主要是基于混合阳离子阴离子钙钛矿吸光材料 (如同时含有甲胺 MA⁺和甲脒 FA⁺两种阳离子), 然而含有 FA 钙钛矿材料稳定较差, 非常容易发生相变。如当环境潮湿时, 黑色的 α 相甲脒碘化铅 (FAPbI₃) 钙钛矿很容易转化为黄色的 δ 相 (一种六角形的非钙钛矿晶相), 从而导致器件性能衰退。因此如何抑制上述材料的相转变对改善器件稳定性和推动钙钛矿太阳能电池商业化意义重大。韩国国立蔚山科学技术院的 Sang Il Seok 教授课题组利用二氯亚甲基联胺 (MDACl₂) 作为添加剂对混合阳离子钙钛矿进行掺杂改性, 在保持 FAPbI₃ 禁带宽度 (即保持光吸收特性) 前提下, 有效地抑制了上述材料的相转变, 从而显著改善了电池器件稳定性, 其在高达 85% 湿度环境下存放 70 小时后仍可维持 90% 以上的初始转换效率, 且在 150°C 高温环境下加热 20 小时依旧可以保持 90% 的初始效率。相比 FA⁺, 二氯亚甲基联胺离子 (MDA²⁺) 含有更多的氢原子, 因此 MDA²⁺ 可以形成更多的氢碘键 (H-I), 从而有效地稳定住 FAPbI₃ 钙钛矿 α 相结构。为此研究人员在 FAPbI₃ 前驱体中加入微量的 MDACl₂ 并通过旋涂和退火处理制备了

MDACl₂ 掺杂改性的钙钛矿薄膜 FAPbI₃-MDACl₂, 同时制备纯相的 FAPbI₃ 用于对比研究。紫外可见光谱显示, 掺杂改性的 FAPbI₃-MDACl₂ 薄膜带隙宽度为 1.47 eV, 与原始的 FAPbI₃ 带隙宽度 (1.45 eV) 基本一致, 这能够保证材料的光吸收特性不发生变化。X 射线衍射测试结果显示, FAPbI₃-MDACl₂ 和 FAPbI₃ 均是单一的 α 相结构。电化学性能表征结果显示, 基于 FAPbI₃-MDACl₂ 薄膜钙钛矿太阳能电池获得了 24.66% 转换效率 (权威机构认证效率为 23.7%), 高于没有 MDACl₂ 掺杂的薄膜电池效率 23.05%, 主要原因是 MDACl₂ 引入拓宽了钙钛矿光谱响应范围。该项研究通过在甲脒碘化铅钙钛矿前驱体中加入微量的二氯亚甲基联胺, 在保障初始光吸收特性前提下, 有效地稳定甲脒碘化铅 α 相结构, 避免其向 δ 相发生转变导致光敏特性消失, 从而显著改善了薄膜及其器件环境稳定性, 在高达 85% 湿度环境下存放 70 小时后仍可维持 90% 以上的初始转换效率, 且在 150°C 高温环境下加热 20 小时依旧可以保持 90% 的初始效率, 表现出优异的抗热、湿度稳定性, 让钙钛矿太阳能电池更接近商业化。相关研究成果发表在《Science》⁷。

(郭楷模)

混合受体有机太阳能电池展现优异性能和超强机械柔韧性

相比晶硅太阳能电池, 有机太阳能电池具有制备成本低、工艺简单、良好的机械柔韧性等诸多优点, 在便携式可穿戴领域具备广阔的应用前景。然而目前高效率的有机太阳能电池主要采用刚性导电玻璃衬底, 使得该电池的柔韧性受到了一定限制, 导致其在柔性可穿戴设备领域的应用潜力受限, 因此开发出基于柔性衬底的高性能有机太阳能电池成为了研究热点。日本东京大学 Takao Someya 教授课题组在柔性聚对二甲苯衬底上设计制备了一种基于富勒烯/非富勒烯混合受体的有机太阳能电池器件, 获得了高达 13% 的转换效率, 认证效率为 12.3%, 且器件经过 1000 余次反复弯曲后仍可保持 97% 的初始效率, 表现出了超强的机械柔韧性, 展现出可穿戴设备领域巨大应用潜力。研究人员首先通过湿化学法在柔性的聚对二甲苯衬底上制备了基于宽带系聚合物给体 PBDTTT-OFT 和窄带隙聚合物受体 IEICO-4F 二元体系活性层材料 PBDTTT-OFT:IEICO-4F, 通过紫外可见光谱测试可以发现上述两种材料光响应范围互相补充, 但两者在紫外波段吸收较弱。为此研究人员引入具有良好紫外-可见光响应和高导电性的富勒烯受体 PC₇₁BM 第三组分, 形成了三元活性层的活性层 PBDTTT-OFT:IEICO-4F:PC₇₁BM。原子力显微镜表征显示, 三元活性层具有更小的表面粗糙度和相分离; 掠入射 X 射线散射谱测试显示, 二元活性层中聚合物给体 PBDTTT-OFT 和三元活性层薄膜中非富勒烯受体 IEICO-4F 都呈现垂直于薄膜表面的择优取向, 这有利于活性层中载流子的快速传输。然而仔细观察发现, 在引入

⁷ Hanul Min, Maengsuk Kim, Seung-Un Le, et al. Efficient, stable solar cells by using inherent bandgap of α -phase formamidinium lead iodide. *Science*, 2019, DOI: 10.1126/science.aay7044.

第三组分 PC₇₁BM 后，非富勒烯受体 IEICO-4F 结晶受到了抑制，从而增强了给受体之间的混合程度，这有利于提高激子分离效率，增强电池性能；与此同时，由于结晶受到抑制使得更多无定形态 IEICO-4F 的形成，这有助于提高活性层薄膜的机械延展性，意味其柔韧性会增强。电导率表征显示，三元活性层的电子迁移率为 $5.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，高于二元活性层 ($3.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)，主要归因于 PC₇₁BM 的高导电性。随后，基于上述两种活性层制备了柔性的有机太阳能电池器件进行对比研究。电化学性能表征显示，基于二元活性层 PBDTTT-OFT:IEICO-4F 电池器件获得了 11.9% 的转换效率，而三元活性层器件效率提升到高达 13%，经过权威机构认证效率为 12.3%。进一步对三元电池器件的机械柔韧性开展测试，实验显示经过 1000 余次连续弯曲（弯曲半径为 5 mm）后该电池保持了初始效率的 97%；而在 1000 次压缩-拉伸后，该电池保持了其初始效率的 89%，展现出了超强的机械柔韧性，表现出极大的柔性器件电源的潜力。该项研究精心设计制备了三元活性层材料，在此基础上制备了基于柔性衬底的有机太阳能电池器件，得益于高电子迁移率的富勒烯受体引入，活性层激子分离、电子传输效率和薄膜延展性得到显著改善，进而提升了器件的性能，获得了高达 13% 的转换效率，增强了器件柔韧性，实现千余次弯曲后仍然保持高达 97% 的初始效率性能。相关研究成果发表在《*Joule*》⁸。

（程向阳 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(O²⁻)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(Na_{0.75}[Li_{0.25}Mn_{0.75}]O₂和 Na_{0.6}[Li_{0.2}Mn_{0.8}]O₂)，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，Na_{0.75}[Li_{0.25}Mn_{0.75}]O₂ 的电压损失与 Na_{0.6}[Li_{0.2}Mn_{0.8}]O₂ 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 Na_{0.75}[Li_{0.25}Mn_{0.75}]O₂ 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 Na_{0.6}[Li_{0.2}Mn_{0.8}]O₂ 则显

⁸ Quinn Burlingame, Xiaheng Huang, Xiao Liu, et al. Efficient and Mechanically Robust Ultraflexible Organic Solar Cells Based on Mixed Acceptors. *Joule*, 2019, DOI: 10.1016/j.joule.2019.07.015

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 O^{2-} 被氧化成 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 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 O^{2-} 周围稳定配位环境, 抑制了 O_2 形成, 从而保障了放电电压稳定。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》⁹。

(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 (Co_xN , 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 (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, 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 Co_xN 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 Co_xN 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

⁹ 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

化还原过程；但与 $\text{Co}_2\text{N/C}$ ， $\text{Co}_3\text{N/C}$ 相比， $\text{Co}_4\text{N/C}$ 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， $\text{Co}_4\text{N/C}$ 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， $\text{Co}_4\text{N/C}$ 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 $\text{Co}_4\text{N/C}$ ，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稳定性，获得了高效稳定氧催化还原特性，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*》¹⁰。

（郭楷模）

¹⁰Yao 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

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

