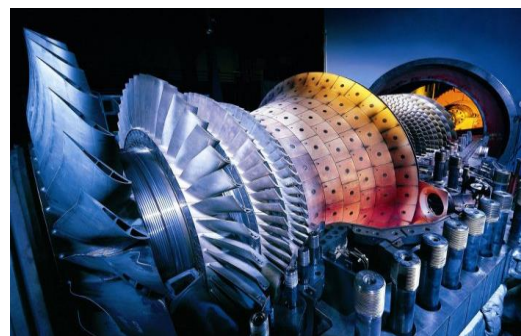


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- IEA&UNEP：建筑行业节能增效将助推全球能源低碳转型
- 世界煤炭协会呼吁各国推进 CCUS 部署以实现煤炭零排放
- 欧盟联合研究中心提出海洋能源未来十大新兴技术
- DOE 斥资 1 亿美元建立能源-海水淡化中心
- 全球铀资源储量丰富 但投资不足产能受限

主管：中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组

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

IEA&UNEP: 建筑行业节能增效将助推全球能源低碳转型	2
世界煤炭协会呼吁各国推进 CCUS 部署以实现煤炭零排放	4
欧盟联合研究中心提出海洋能源未来十大新兴技术	6

项目计划

DOE 斥资 1 亿美元建立能源-海水淡化中心	10
ARPA-E 资助 1200 万美元支持先进核能技术研发	11

前沿与装备

离子风动力推进飞机开辟飞行新篇章	12
新型压电-摩擦复合纳米发电机实现高性能输出	12
共轭聚合物界面层显著提升钙钛矿电池热稳定性	13
碳原子反向掺杂石墨相氮化碳催化剂催化性能显著提升	15

能源资源

全球铀资源储量丰富 但投资不足产能受限	16
---------------------------	----

本期概要

国际能源署（IEA）和联合国环境规划署（UNEP）联合发布《全球现状报告 2018：迈向零排放、高能效、灵活的建筑部门》报告，系统分析全球建筑行业的节能增效发展情况：2017 年，建筑行业消耗的能源占全球终端能源消费总量的 36%，产生的碳排放占到全球能源相关二氧化碳排放总量近 40%。未来，人口和建筑面积的持续增加将是建筑能源需求上升的主要因素。就能效政策而言，相比 2017 年的 132 个，目前共有 136 个国家的国家自主贡献（NDCs）方案纳入了建筑行业。在过去 10 年中，实施建筑能效法规的国家数量有所增加，当前全球已有 69 个国家已经或正在制定自愿或强制性的建筑能效法规，而 2010 年这一数字仅为 54 个。然而，尽管取得了这些进展，仍有三分之二的国家没有实施建筑能效法规，而且 2017-2018 年的大部分变化都是对现有能源法规的更新。为了持续推进建筑行业低碳转型，应对气候挑战，报告提出了一系列前瞻性建议。详见正文。

世界煤炭协会（WCA）发布《推动 CCUS 部署：通向煤炭零排放之路》报告，评述了全球碳捕集、利用和封存（CCUS）技术发展态势：CCUS 是实现《巴黎气候协定》气候目标所需的一项关键技术。国际能源署（IEA）2017 年的预测显示，要实现全球平均温升控制在工业革命前水平 2℃以内的目标，就要求到 2060 年全球所削减的温室气体中有 14%必须源自于 CCUS 的贡献。目前，全球运营（17 个）和在建的 CCUS 大型示范项目总计 21 个，分散在亚洲、欧洲、北美和澳大利亚，所有这些项目将具备 3700 万吨/年的碳捕集能力。尽管 CCUS 部署取得一定进展，但现有速度仍难以满足《巴黎气候协定》气候目标需求，为此报告提出了促进 CCUS 部署的四大战略建议。详见正文。

欧盟联合研究中心（JRC）发布《海洋能源未来新兴技术：创新和改变游戏规则》报告，总结了 30 位海洋能专家的分析和建议，提出十大促进海洋能产业发展的新兴技术，包括：（1）第一代潮流能转换器；（2）潮流能涡轮机创新转子技术；（3）漂浮式潮流能概念；（4）第三代潮流能转换器；（5）第一代波浪能概念的新方法；（6）第二代波浪能转换器；（7）创新潮流能和波浪能动力输出技术；（8）控制系统；（9）系泊和站台系统；（10）材料和部件。详见正文。

美国能源部（DOE）宣布拨款 1 亿美元建立一个能源-海水淡化中心，着重关注四大技术主题，包括：材料研发、新工艺研发、建模和仿真工具、综合数据和分析。旨在研发低能耗低成本海水淡化处理技术，实现对来源丰富的非常规水资源（如海水、微咸水、工业卤水）的高效经济淡化处理，以应对水资源缺乏挑战，满足美国对安全、经济水资源的可持续需求。

经合组织核能署（OECD-NEA）和国际原子能机构（IAEA）联合发布《铀资源、生产与需求 2018》报告指出，无论核能在满足未来电力需求和实现全球气候目标方面最终发挥何种作用，铀资源足以满足可预见未来的预计需求，未来面临的主要挑战可能是投资不足而导致的产能受限：报告对全球铀市场基本全面开展了最新评估，提供了截至 2017 年 1 月 1 日的世界铀工业统计概况，包括全球铀矿资源、勘探、生产和反应堆相关需求的数据。详见正文。

IEA&UNEP：建筑行业节能增效将助推全球能源低碳转型

12月7日，国际能源署（IEA）和联合国环境规划署（UNEP）联合发布《全球现状报告 2018：迈向零排放、高效、灵活的建筑部门》¹报告指出，建筑行业消耗能源产生的二氧化碳排放量占到了全球能源相关碳排放总量的近 40%，因此，推进建筑行业的节能增效，打造零排放的绿色建筑，对实现《巴黎气候协定》目标和全球能源清洁低碳转型意义重大。报告系统追踪全球和关键地区建筑和建筑行业的能耗、排放、政策和投资等关键指标，以此评估全球建筑行业在节能增效取得的进展和面临的挑战。报告的主要内容包括：

1、建筑能耗与排放

2017 年，建筑行业消耗的能源占全球终端能源消费总量的 36%，产生的碳排放占到全球能源相关二氧化碳排放总量的近 40%。因此，建筑行业绿色转型将在推动全球能源低碳转型中发挥着主导作用。然而尽管建筑本身不断优化，包括围护结构的改善、优化的建筑产品性能以及更多技术层面的选择，正在促进其整体能效的改善，但同时全球不断增长的人口、扩大的人均建筑面积和活动范围，又正在抵消这一成果，导致建筑能源需求不断增加。2010 到 2017 年间，建筑行业的终端能源消费量增长了近 5%，其中供暖、照明和家庭烹饪是增长最快的建筑终端用能领域。未来，人口和建筑面积的持续增加将是建筑能源需求上升的主要因素。

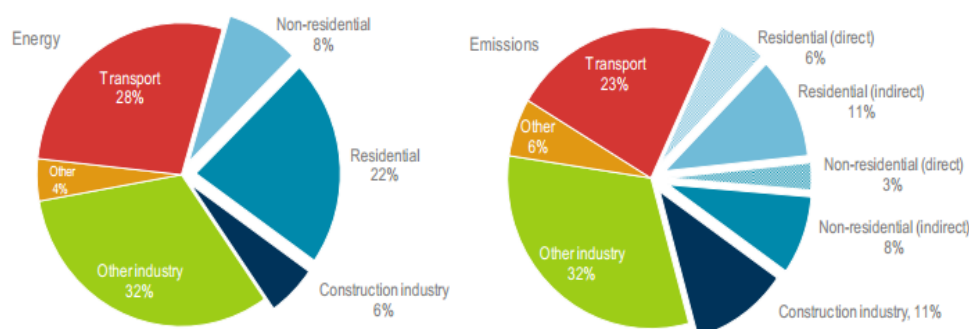


图 1 2017 年建筑终端能源消耗量和排放在全球中的占比

2017 年，建筑行业能源相关的碳排放量为 110 亿吨，占到全球能源相关碳排放总量的 39%，这一数值自 2015 年以来基本保持不变，意味着建筑行业的排放已经趋于平稳，主要原因是建筑能效改善和能源清洁化（可再生能源、天然气占比增加）。尽管排放趋稳，但维持这一排放数值是无法满足可持续发展目标的需求，需要加大力度推进建筑行业节能增效，进一步减少排放。

¹ 2018 Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector.
<https://www.unenvironment.org/resources/report/global-status-report-2018>

2、改善建筑能效的政策和投资

当前，众多国家正在积极采取一系列行政措施（如将建筑能效纳入NDCs、制定建筑能效政策和法规等），以推动本国建筑低碳转型、减少排放。例如，大多数国家已将建筑部门纳入其国家自主贡献（NDCs）方案中作为减少排放的一个领域。加拿大、法国、萨尔瓦多、莱索托和巴布亚新几内亚五个国家在 2017-2018 年更新了它们的NDCs，特别新增了建筑行业。相比 2017 年的 132 个，目前共有 136 个国家 NDCs方案纳入了建筑行业。2017-2018 年间提交的涵盖建筑的NDCs方案主要关注建筑能效指令和标准、建筑燃料转变、低能效建筑产品和设备的淘汰等几个方面。

在过去 10 年中，实施建筑能效法规的国家数量有所增加，当前全球已有 69 个国家已经或正在制定自愿或强制性的建筑能效法规，而 2010 年这一数字仅为 54 个。然而，尽管取得了这些进展，仍有三分之二的国家没有实施建筑能效法规，而且 2017-2018 年的大部分变化都是对现有能源法规的更新。同样的情况也出现在建筑认证方案当中，目前全球只有 85 个国家采用了建筑认证方案。并且 2017-2018 年间，认证方案更新主要集中在那些已经制定了建筑能效法规或认证计划的国家。虽然认证方案的使用正在增加，但在大多数国家还是采用自愿认证模式而非强制性。

许多司法机构和组织积极鼓励支持采取NDCs、建筑能效法规和认证以外的更多措施来推进建筑行业绿色转型。例如，墨西哥计划取消阻碍能源效率投资的电力补贴。2018 年，来自全球 19 个城市的市长发出了联合宣言承诺到 2030 年实现新建筑的净零排放。各城市还做出了 443 项额外承诺，承诺到 2035 年建筑实现 100%可再生能源供电。

2017 年政府在改善建筑能效方面的支出达到了 670 亿美元，主要通过管理成本、税收抵免、公共采购、贷款等形式，政府这一积极投资行动带动了建筑相关企业的投资，使得建筑能效总投资增长。2017 年用于改善建筑能效投资总额²增长 4.7%（根据通货膨胀调整为 3%）至 4230 亿美元，年增长率为 3%-4%，低于 2014 到 2016 年间增长率（6%-11%），表明了建筑能源效率投资正在放缓。

由上可知，全球改善建筑行业的努力（政策和投资）并没有提供足够动力来推动建筑行业朝向零排放、高效和灵活模式转型，需要各国加大政策支持和投资力度。

3、零排放、高能效、灵活建筑的益处

打造零排放、高能效和灵活的建筑将能够产生多重社会效益，包括改善能源获取、改善健康、创造就业机会、提高生产力、减少空气污染和减轻贫困等。例如，《WELL建筑标准》包括优化室内日照水平。在欧洲的研究已经表明，居住和工作在照明良好和条件适宜的空间中的人们出现健康问题的频率仅为一般人的一半。一些国家和城市已将创造大量就业机会视为能效行动的一部分，这直接促使 2017 年

² 改善建筑能效投资总额包括了能效相关的所有项目支出，具体包括能效直接投资、能效服务和产品支出等。

建筑能效方面投资新增了 1400 多亿美元。无电人口数量从 2000 年的 17 亿下降到 2017 年有史以来第一次不到 10 亿。

IEA 数据模拟研究表明，要实现全球温升控制在 2℃ 以内的目标，到 2030 年单位建筑面积全球平均建筑能耗强度需要至少比当前水平低 30%。为了推进建筑绿色转型，实现上述宏伟目标，报告提出了一系列的前瞻性建议，包括：

- 制定城市规划以减少能耗、增加可再生能源用量、改善建筑弹性。
- 增加净零排放建筑在新建建筑中的比例。
- 对现有的建筑进行节能改造，提升能效。
- 通过能源管理系统和工具改善建筑能源消耗，减少排放。
- 改善建筑用能终端（如家电、照明）的能效，减少能耗。
- 加大建筑能效政策和法规的制定和实施力度。
- 加大建筑能效投资。

（郭楷模）

世界煤炭协会呼吁各国推进 CCUS 部署以实现煤炭零排放

11 月 13 日，世界煤炭协会（WCA）发布《推动 CCUS 部署：通向煤炭零排放之路》报告³指出，化石燃料在未来几十年仍将占全球能源的近四分之三，而煤炭在能源结构中所扮演的重要角色不言而喻。尤其在亚洲、非洲发展中国家和新兴经济体，煤炭将在加强能源安全、保障能源获取和推动工业发展方面发挥至关重要的作用。然而气候挑战严峻，想要实现《巴黎气候协定》目标就迫切需要加大碳捕集、利用和封存（CCUS）技术发展力度，推进 CCUS 技术全球更快、更广泛的部署，促进煤炭行业的零排放、可持续发展。报告系统分析了全球 CCUS 技术的发展现状和问题，并提出了促进 CCUS 发展的一系列建议。关键点如下：

CCUS 是实现《巴黎气候协定》目标所需的一项关键技术。国际能源署（IEA）2017 年的预测显示，要实现全球平均温升控制在工业革命前水平 2℃ 以内的目标，就要求到 2060 年全球所削减的温室气体中有 14% 必须源自于 CCUS 的贡献。全球碳捕集与封存研究所（GCCSI）预测，到 2050 年全球年度碳捕集量要达到 50 亿吨，这将需要 2732 个以上的大规模 CCUS 设施，才能达到巴黎协定的目标。这相当于在 2020-2050 年间，每年要有 90 个 CCUS 设施投入运营。IEA 研究表明，与亚临界电厂相比，相同规模的 CCUS 电厂可减少约 25% 的碳排放。目前，全球运营（17 个）和在建的 CCUS 大型示范项目总计 21 个，分散在亚洲、欧洲、北美和澳大利亚，所有这些项目将具备 3700 万吨/年的碳捕集能力：

北美：加拿大的边界大坝（Boundary Dam）项目是世界上第一个成功应用燃烧

³ Driving CCUS deployment: The pathway to zero emissions from coal.
https://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=Driving%20CCUS%20Deployment.pdf

后碳捕集技术的火电站，2014 年投入运行，CO₂ 年捕集量达 100 万吨，捕获的 CO₂ 被压缩注入地下以提高附近 Weyburn 油田的采收率。美国 2017 年 1 月投入运行的佩特拉诺瓦（Petra Nova）碳捕集项目是世界上最大的燃烧后碳捕集项目，碳捕集量达 140 万吨/年，捕获的碳被运送到 West Ranch 油田用于提高石油产量，项目运行以来已使 West Ranch 的产量增加了 1300%。美国的碳捕集技术开发和商业化以公私合作模式进行，私营机构在过去十年提供了 20% 的研发资金。怀俄明州综合测试中心（ICT）是世界上少数可在燃煤电厂开展 CCUS 设施性能测试的机构。美国国会于 2018 年初通过了“未来碳捕集、利用、地下封存和减排”（FUTURE）法案，将二氧化碳地下永久封存的 45Q⁴ 税收抵免由现在的 22 美元增加至 2026 年的 50 美元，这将导致未来六年约 10 亿美元的投资。

澳大利亚：2006 年，澳大利亚煤炭生产商成立了 COAL21 倡议，筹集资金用于支持 CCUS 商业化以及推进其他低排放技术。自成立以来，COAL21 已投资 3 亿澳元用于推进二氧化碳捕集和安全长期封存。澳大利亚的碳捕集和封存研究机构 CO₂ CRC 的 Otway 研究设施是世界领先的地质封存研究和示范项目之一。

亚洲：中国一直是推动超临界和超超临界技术、部署超低排放技术的典范，工业部门通过建造先进燃煤电站及资助 CCUS 在电力、钢铁、水泥和化工行业的研究和示范。目前中国有六个在建或早期开发的燃煤 CCUS 示范项目。日本长期以来一直是清洁煤技术的领先国家之一，两个重大煤炭 CCUS 项目包括：①Osaki CoolGen 项目正在进行碳捕集和整体煤气化燃料电池联合循环试点示范；②日本环境和谐型炼钢工艺技术开发项目（COURSE50）从炼钢炉中捕集二氧化碳。印度正采取措施确保部署最低排放的燃煤电站，其最大的电力公用事业公司 NTPC 于 2009 年成立能源技术研究联盟推进 CCUS 技术。Anglo-Indian 公司的洁净碳方案在印度进行了一个小规模 CCUS 项目，将从燃煤锅炉中捕集的二氧化碳制造成产品来获利。

欧洲：1996 年以来，挪威的 Sleipner 和 Snøvit 项目已经捕获并安全地将 2000 万吨二氧化碳储存到海洋深层咸水层中。近年来，欧洲煤炭 CCUS 发展面临挑战，英国政府中止支持 CCUS 项目使该技术无法实施。

当前，CCUS 部署的速度太慢，难以满足《巴黎气候协定》承诺的减排目标，主要原因是缺乏稳定的平等政策支持。为此，报告呼吁各国采取积极的行动，推进 CCUS 更加广泛和快速的部署，并提出了四大战略性建议：

（1）通过强调 CCUS 在实现《巴黎气候协定》目标中的作用来争取国际社会更大的支持。为实现《巴黎气候协定》目标，部署 CCUS 花费的资金占到全球国内生产总值的约 2.5%。如果没有广泛部署 CCUS，该成本将呈指数级增长。然而，在最近的国际气候讨论中，只有十个国家确定了 CCUS 的重要性。未来 18 个月中，各

⁴ 45Q 税收抵免是美国“国内税收法”第 45Q 条，于 2009 年获得通过，针对将人为排放的 CO₂ 进行捕集并通过 EOR（提高石油采收率）技术将其永久封存于地下的行为给予税收抵免。

国必须提交其至 2050 年的长期气候减缓计划。将 CCUS 纳入巴黎协定基础设施将真实地表明该技术的重要性。

(2) 建立完善的法律和监管制度。需要国家、区域和国际行动来提供监管、法律和财务框架，以确保 CCUS 技术能够实现《巴黎气候协定》目标所需的速度和规模进行部署。政策设计应考虑公共/私人风险分配，减少封存负担并鼓励适当的基础设施建设，以建立封存场址集群。近期支持的活动包括：①支持政府制定 CCUS 部署的法律框架，包括封存安全要求；②探索和表征潜在封存场址；③支持政府制定政策激励措施；④支持在运行和/或关闭期间进行测量、监控和验证。

(3) 增加 CCUS 融资机会。预计将需要 50 亿美元支持在发展中国家建设和运营其他试点规模项目，这应该成为《巴黎气候协定》签署方的近期气候融资目标。目前 CCUS 可以通过绿色气候基金和全球环境基金获得资助，然而至今只有一个项目获得批准。未来这两种工具将为 CCUS 知识共享、能力开发以及最终项目开发动员提供更多层面的多边支持。另外，世界银行及其他机构也可在实现煤炭零排放方面发挥作用。

(4) 致力于研究和开发下一代 CCUS 技术。研发工作对于创新和提高 CCUS 效率至关重要，大学、工业和政府机构的广泛研究为碳捕集、运输和封存技术带来了进步。对研究的支持应优先考虑能够最大限度地降低成本和改进现有技术的领域，可能包括：①通过配备 CCS 的生物质发电实现净-负排放，包括联合燃煤发电；②下一代捕集技术；③EOR 之外的二氧化碳利用技术。此外，有可能通过项目部署实现重大突破和成本降低。

(岳芳 郭楷模)

欧盟联合研究中心提出海洋能源未来十大新兴技术

近日，欧盟联合研究中心（JRC）发布《海洋能源未来新兴技术：创新和改变游戏规则》报告⁵，指出海洋能开发利用仍处于起步阶段，发展海洋能是众多沿海国家/地区能源脱碳和发展蓝色经济的关键手段。报告总结了 30 位海洋能专家的分析和建议，提出十大促进海洋能产业发展的新兴技术，并详述了每种技术的进展情况。报告要点如下：

1、第一代潮流能转换器

(1) 技术描述：第一代潮流能转换器具备两个特征，即：①底部固定；②采用水平轴的潮流能涡轮机或管道涡轮机。该技术代表了迄今为止开发的最先进海洋能技术。然而，要在成本上具备竞争力不仅需要高效捕获和转换流体动能，还需易于在海底环境中安装、调试和维护。

⁵ New technologies in the ocean energy sector.
<https://ec.europa.eu/jrc/en/news/new-technologies-ocean-energy-sector>

(2) 技术进展：目前该技术的成熟度（TRL）达到了 7~8 级，欧洲总装机容量约为 12 MW，开发速度中等，经 10 多年研发后技术已经成熟，进入预商用阶段。第一代潮流能技术的额定功率范围为 1~2 MW，可能增长至 2~2.5 MW。功率为 100~250 kW 的小型设备已投入使用并可能实现升级。

2、潮流能轮机创新转子技术

(1) 技术描述：许多创新技术可以为潮流能轮机带来显著变化，包括：①可变桨距偏航轮机，能够改变迎角以控制吸收和发电量；②反向旋转轮机，通过在两个方向上设计具有高效率的转子来解决潮流的周期性反向；③湿式轮机，在海水浸没条件下运行；④直接驱动动力输出（PTO）系统，减少能量转换的损失。

(2) 技术进展：可变桨距和反向旋转轮机 TRL 达到了 6~7 级，湿式轮机和直接驱动 PTO 达到了 5~6 级。轮机额定功率在 100 kW~2 MW 范围，开发速度中等偏慢。

3、漂浮式潮流能概念

(1) 技术描述：漂浮式潮流能装置被称为第二代潮流能技术，在浮在水面或水中的平台上安装潮流能轮机。目前研究的设施功率范围从 100 kW 到 2 MW，将转换器组件（PTO、变频器）配置在浮动平台中便于维护。

(2) 技术进展：一些漂浮式潮流能平台已经发展至较高阶段，Scotrenewables 开发的 SR1-2000 设备已经向电网输送超过 2 GWh 的电量。Sustainable Energy Marine 公司开发的 Plat-O 和 The Plat-I 设备于 2017 年底部署在苏格兰，其 TRL 为 5~8 级，还需进一步对其半潜式结构进行研究，预计最大额定功率在 2~2.5 MW。技术开发速度为中等/快速，尤其是使用先进轮机的情况。

4、第三代潮流能转换器

(1) 技术描述：该类技术受到鱼类游泳的启发，通过翼、帆或风筝的摆动/拍打发电，有望在降低成本以及大规模阵列发电效率提升上实现突破，并可部署在潮流能资源较少的区域。

(2) 技术进展：一些概念的 TRL 已经达到 5~7 级，还有些则为 3~4 级，开发速度为中等/快，受到材料/辅助技术的影响。

5、第一代波浪能概念的新方法

(1) 技术描述：为了克服第一代波浪能技术的局限性，对波浪能转换器（WEC）的结构和设计进行创新，提高功率转换效率，减少间歇性并降低成本，尤其是在多设备新兴技术方面。

(2) 技术进展：该类技术的 TRL 在 2~5 级之间，进行了有限的全规模海上试验，开发速度中等偏慢，需优化单机组和多机组结构。

6、第二代波浪能转换器

(1) **技术描述**: 利用材料的灵活性和水流轨道速度将波浪能转化为电能。

(2) **技术进展**: 该技术处于很低的 TRL (1~3 级), 尚未在真实环境中进行测试, 尚未确定设备最大额定功率, 如果没有材料限制且 PTO 性能符合预期, 开发速度可达到中等。

7、创新潮流能和波浪能动力输出技术 (PTO)

创新潮流能和波浪能 PTO 技术类型包括: 机械式、直接驱动式、介电弹性体、液压系统、气动式、水轮机、惯性系统。七类技术详见表 1。

表 1 7 种类型 PTO 技术及其进展

技术	描述	技术进展
机械 PTO	通过机械系统转换输入能量, 通过齿轮箱驱动发电机。研究在启动发电机前将装置的非旋转振荡运动转换为旋转运动, 实现无齿轮的直接驱动	TRL: 5~7 级, 开发速度中等, 规模在 100 kW~1 MW
直接驱动系统	输入的机械能直接通过发电机转化为电能, 包括线性和旋转两种方案, 均采用永磁电机。主要技术挑战: 运行在海洋环境中、轴承、最佳结构、规模扩大和与 WEC 集成、可靠动力转换、冷却系统、集成磁性齿轮以提高效率、使用弹簧	TRL: 3~6 级, 开发速度中等, 规模在 25 kW~250 kW
介电弹性体	介电弹性体发电机 (DEG) 是高度可变形的固态电容器, 可将变形所需的机械功转换为储存的静电能	TRL: 2 级, 规模可能只有几千瓦, 开发速度快
液压系统	液压系统将波浪能转换器与发电机连接, 通过主体运动将能量输送至液压马达驱动发电机发电	TRL: 3~7 级, 开发速度中等, 功率最大达 MW 级别
气动式	气动 PTO 用于振荡水柱 (OWC) 波浪能转换器中, 将气动力转换成电力。已开发出双向径向涡轮机, 脉冲和定向涡轮机以改善 OWC 性能。陆上 OWC 系统的研究重点是将涡轮机与漂浮式 OWC 相结合	TRL: 6~8 级, 开发速度慢, 规模大于 500 kW
水轮机	通常用于船舶螺旋桨和水力发电, 已经具备成熟供应链, 运行效率超过 90%, 但在海洋能发电的应用尚不成熟	TRL: 3~4 级, 开发速度快, 规模几百千瓦到几百兆瓦
惯性系统	通过大量惯性满足 PTO 条件, 可通过优化控制调节 PTO 动态参数 (弹簧常数和阻尼) 来吸收最大能量	TRL: 6~7 级, 开发速度中等, 规模达 MW 级

8、控制系统

(1) **技术描述**: 控制系统需定期监测设备受力, 需改进当前预测短期波的方式, 目前已经开发了许多类控制策略, 包括: ①锁定控制, 用于相位控制, 需快速响应 PTO; ②被动控制, 根据海况调整阻尼; ③反应控制, 控制系统动态调整弹簧刚度、惯性和阻尼等常数。

(2) **技术进展**: 真实海洋测试的装置 TRL 在 2~7 级范围变化。

9、系泊和站台系统

(1) **技术描述：**石油&天然气、海上浮动式风电、潮流能和波浪能的系泊要求存在显著差异，海洋能转换装置需要对波浪动力做出强烈响应，松弛和绷紧式都可能缩短使用寿命或导致系泊失效。目前已提出的解决方案包括：①采用定制橡胶和/或弹簧作为系泊线以提供特殊刚度，减轻或避免碰撞；②采用可承受压缩载荷的系泊腿；③通过浮力组件保持线路松弛；④失去张力时用绞盘系统拉紧；⑤更准确的仿真工具以预估短期负载。

(2) **技术进展：**系泊系统在海洋能发电中的应用成熟度不高，TRL 在 2~7 级，其规模可扩展至多兆瓦，开发速度很快。

10、材料和部件

海洋能源的材料和部件必须新的运行条件和高性能要求下在恶劣的海洋环境中使用，用于海洋能发电的材料和部件相关技术见表 2。

表 2 海洋能发电材料和部件相关技术及其进展

技术	描述	技术进展
储能单元和功率输出平滑	目前在研究的潮流能储能是评估海上产氢。在功率平滑输出方面，应尽可能在转换环节平滑功率。也可采用飞轮储能、抽水蓄能等常规方案，但必须优化方案以适应波浪能转换器的动态变化	海洋能储能技术的 TRL 处于中等水平，开发速度将很快，规模约几兆瓦
海水密封和润滑油	对于潮流能发电，大型水平轴涡轮机在 30 米水位情况下用唇形密封，更深水位则使用机械密封。大多数 WEC 依赖运动部件之间的密封连接件，但易导致大量摩擦损失。需开发满足海洋能转换器要求的密封件和润滑油	通过技术转移可达到很快的开发速度
弹性体	通过使用可变形织物/弹性体结构进行波浪能转换有可能在不影响性能的情况下提高生存能力并降低成本	TRL: 3 级，开发速度中等
先进混凝土	混凝土适合 WEC 结构制造，成本低且具有高刚度和良好疲劳特性，通过形状设计以适应最佳流体动力学形式	TRL: 3 级，开发速度快，规模：兆瓦级
充气结构材料	正在研究可充气结构材料，以降低技术成本并提高设备生存能力。可充气材料提供了减轻重量和优化安装的解决方案，在 TRL 非常低的情况下，需要进行重点研发以评估应用于海洋能的潜力和可扩展性	TRL: 1~5 级（与气罐测试有关），规模：可扩展至兆瓦级，开发速度快
柔性叶片材料	柔性叶片可调节和减少潮流能涡轮机负荷，减轻潮流剪切层、湍流的影响，降低结构疲劳，减少过度设计，降低故障和成本，提高寿命、效率和可靠性	TRL: 1~3 级（与概念设计有关），规模：可扩展至兆瓦级，开发速度快
混合旋转模塑	旋转模塑制造工艺可极大降低成本，聚合物具有抗疲劳和耐腐蚀特点，混合旋转模塑结构的混凝土压载材料有助于结构强度和点载荷设计	TRL: 1~2 级（与概念设计有关），规模：可扩展至兆瓦级，开发速度快
动态电力电缆	目前正用于漂浮式海上风电的稳定电力传输，需向进行海洋能发电的技术转移。已有 Hydro Group 等公司在生产商	漂浮式风电的 TRL 为 7 级，潮流能和波

业柔性电缆，但需要低成本的高功率连接/断开系统从阵列中移除设备	浪能应与其相似，规模可扩展至多兆瓦，开发速度快
---------------------------------	-------------------------

（岳芳 郭楷模）

项目计划

DOE 斥资 1 亿美元建立能源-海水淡化中心

12 月 13 日，美国能源部（DOE）宣布拨款 1 亿美元建立一个能源-海水淡化中心⁶，旨在研发低能耗低成本海水淡化处理技术，实现对来源丰富的非常规水资源（如海水、微咸水、工业卤水）的高效经济淡化处理，以应对水资源缺乏挑战，满足美国对安全、经济水资源的可持续需求。能源和水是相互关联的系统。一方面，提取、处理和输送水资源需要能量。另一方面，水用于能源生产和发电的多个阶段，从为生物燃料作物灌溉到为热电发电厂提供冷却水。在全球范围内，淡水和能源短缺是一个重大的人文和经济挑战，并影响到社会所有部门。因此需要开发相关技术实现高效经济海水淡化。能源-海水淡化中心着重关注四大技术主题，包括：材料研发、新工艺研发、建模和仿真工具、综合数据和分析。具体参见表 1。

表 1 能源-海水淡化中心四大技术主题具体内容

技术主题	项目描述
材料研发	• 高性能海水淡化反渗透膜、抗污染的改良膜，用于管道、储罐和泵的无腐蚀、能够承受更高压力并提供更低摩擦系数的新材料 • 开发下一代低成本的热交换器材料，以及能够减少热交换器表面化学结垢的新材料 • 立体卷对卷加工、智能制造、电镀技术、3D 制造等技术来开发更轻、更坚固、更持久材料，减少腐蚀和结垢的产生
新工艺研发	• 从分子水平了解非传统水源的结构和组分的复杂性，为通过物理、化学或生物过程处理非传统水源提供理论依据 • 净水系统中使用的传感器和控制器所需的先进技术，实现对净化处理过程的污染物水平和类型、温度、压力和其他操作参数进行实时监测收集
模拟和仿真工具	• 开发用于模拟淡化处理过程的多尺度模型来预测处理技术的性能并提出优化技术方法 • 开发多尺度水淡化处理系统模型，获得相关海水淡化处理系统的模拟实验参数，用以理解和描述复杂处理系统的特性和行为，为下一步的系统优化提供指导

⁶ Department of Energy Announces \$100 Million Energy-Water Desalination Hub to Provide Secure and Affordable Water.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-100-million-energy-water-desalination-hub-provide-secure-and>

综合数据和分析	•开发必要的实验数据信息收集、研究和分析工具
	•通过数据分析跟踪技术性能指标(能效、水淡化效率、成本等),并识别分析新材料、新技术存在的性能差距,指导下一步的研发

(于小燕 郭楷模)

ARPA-E 资助 1200 万美元支持先进核能技术研发

12月6日,美国能源部先进能源研究计划署(ARPA-E)公布了“OPEN+”开放式招标群组资助子计划的首批资助项目⁷,即资助1200万美元支持核用高性能材料研究,以推进先进核能技术研究突破。本次资助项目着重关注五大主题领域,具体内容参见表1。

表1 “OPEN+”计划首批资助项目的具体内容

项目名称	具体内容	资助金额/ 万美元
核反应堆栅格增材制造工艺	为核反应堆栅格开发一种新型设计和增材制造(AM)工艺,如利用非标准粉末材料优化栅格性能并降低成本,从而为利用AM制造气体反应堆组件提供经验,优化反应堆制造工艺	100
微电子机械系统(MEMS)射频加速器	采用先进的微加工技术制造和扩展低成本、高功率的多离子束离子加速器,以更好地模拟实际反应堆中的辐照环境,以为研究核材料在实际反应堆的中子辐照行为提供参考	360
嵌入热管核反应堆的先进制造	开发先进的制造技术以减少高温核材料成本,从而开发一个可扩展的含有紧凑型高温热管的反应堆为偏远地区供电供热,并实现不到一个月即可完成一个15 MWth反应堆的现场建造、调试并接入微电网	355
用于先进反应堆快速、经济部署的多金属层状复合材料	将为先进核反应堆设计开发特定的多金属层状复合材料(MMLC),并通过辐射实验进行测试,同时结合辐照性能预测模型模拟结果,以评估其对反应堆性能影响,加快新材料的研发和部署	169
创新高通量方法加速熔盐技术材料设计	结合增材制造、材料/盐相容性原位测试、新耐熔盐微型电极设计、机器学习和算法,以优化和加速熔盐耐腐蚀材料开发,将开发能够抵抗熔盐腐蚀的新材料,用于先进核反应堆、太阳能热发电和热存储	186

编者按:基于开放式招标计划(OPEN⁸)成功实施的基础上,ARPA-E创建了“OPEN+”群组资助子计划,旨在从大量的OPEN项目申请中择优遴选出一批具有共同目标和技术主题的研究项目予以资助,2018年底至2019年初计划选择9批项目进行资助。

(岳芳 郭楷模)

⁷ ARPA-E ANNOUNCES \$12 MILLION FOR FIVE PROJECTS IN NUCLEAR MATERIALS SCIENCE.
<https://arpa-e.energy.gov/?q=news-item/arpa-e-announces-12-million-five-projects-nuclear-materials-science>

⁸ 详情参见本刊2018年度第22期内容。

离子风动力推进飞机开辟飞行新篇章

自 1903 年莱特兄弟发明飞机 100 多年以来，世界上出现了各式各样的飞机，他们无一例外都是由机械活动部件构成的动力推进系统（螺旋桨、涡轮机等）驱动飞行的，产生持续不断的噪音，或者还需要燃烧化石燃料。这似乎已经成为人类对飞机的固有印象。麻省理工学院 Steven Barrett 教授研究团队设计开发了一种无须消耗燃料、无须任何机械活动部件构成推进系统的全新离子风推进飞机，并成功进行了 60 米试飞，成为有史以来首架没有机械活动部件动力推进系统的飞机，颠覆了传统，开辟了飞机发展的新篇章。离子风推进系统原理与传统的燃料动力飞机一样，都是基于牛顿力学第三定律——力的作用是相互的。具体而言就是，在两个一薄一厚的电极之间加上电压，就会使得电极间空气电离，从而产生离子风；而当电压足够大，空气电离程度就足够高，产生的离子风就足以驱动飞行器飞行。基于上述原理，研究人员设计了一架机翼长达 5 米的飞机，随后在机翼下方两侧配备类似栅栏一样直径不同的电极，即一边为小直径的正极栅栏，一边为大直径的负极栅栏；随后在机翼上配备一个配有轻质电源转换器（能够把电能转换为高电压）的聚合物电池，从而实现两个正负极栅栏间产生高达 4 万伏的高压电场，高压电场会吸引自由电子，自由电子在向正极移动过程中会与周围空气中的空气分子碰撞使其电离产生正离子，这些正离子则会在高压电场作用下加速冲向飞机机翼尾部，并在此处与数百万电中性的空气分子碰撞，产生离子风，进而产生离子风反作用力，从而会驱动飞机飞行。研究人员将飞机至于一个无风体育馆内，成功实现了长达 60 米、持续时间 12 秒的飞行。该项研究设计研发了全新的无螺旋桨、无涡轮机、无燃料、无排放的离子风推进飞机，可以悄无声息地在空中飞行，为飞机设计制造开辟了崭新道路。相关研究成果发表在《Nature》⁹。

（郭楷模）

新型压电-摩擦复合纳米发电机实现高性能输出

纳米发电机是一种将微小机械能转换为电能的新能源技术，具有广阔的应用前景。目前，纳米发电机实现从机械能到电能转换利用的策略主要包括热电效应、静电效应、电磁效应、压电效应以及摩擦电效应等。但基于单一策略的发电机性能输出较低，因此开发多种策略集成的复合发电机有助于性能的提升。韩国成均馆大学 Dae Joon Kang 教授研究团队制备了氧化锌（ZnO）纳米片与聚二甲基硅氧烷（PDMS）

⁹ Haofeng Xu, Yiou He, Kieran L. Strobel, et al. Flight of an aeroplane with solid-state propulsion. *Nature*, 2018, 563, 532-535.

聚合物复合的弹性复合体，构筑了同时具有压电效应和摩擦电效应的新型压电-摩擦复合纳米发电机（PTNG），展现出优异的机械性能和高性能输出。研究人员首先利用水热法在金纳米颗粒修饰的聚对苯二甲酸乙二醇酯（Au-PET）衬底上生长了一层 ZnO 纳米片，接着通过旋涂法在 ZnO 上面生长一层 PDMS，经过 80℃ 的退火处理后便形成了 ZnO/PDMS 复合电极，其中 ZnO 具有压电效率、PDMS 具备了摩擦电效应。XRD 衍射峰测试结果显示，ZnO 纳米片具有择优 c-轴取向，意味着其具备了最佳的压电系数。随后研究人员分别基于 ZnO/PDMS、ZnO 和 PDMS 电极制备了 PTNG、压电纳米发电机（PENG）和摩擦纳米发电机（TENG），进行了性能对比研究。在恒定 10 Hz 频率、不同压力（1-7 N）作用下产生的峰间开路输出电压和短路电流密度进行了系统测试。测试结果显示，基于 ZnO/PDMS 电极的 PTNG 器件最大输出电压达~470 V、电流密度~60 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、平均功率密度~28.2 mW/cm^2 ；而基于 ZnO 的 PENG 和 PDMS 的 TENG 峰间输出电压分别只有 200 V 和 130 V；峰间短路电流密度分别只有 22 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 和 37 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ；综合性能明显低于 PTNG 器件。随后研究人员将 PTNG 作为电源用于驱动商用的 LED 灯泡，结果发现在周期性的压力条件下，面积为 $1\times 1\text{ cm}^2$ 的 PTNG 器件产生 220 V 的输出电压和 15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 的电流密度，能够驱动 70 只商用 LED 灯泡发光，而当增大器件面积到 $3\times 3\text{ cm}^2$ 后，驱动 LED 发光的数量翻了一倍多达到了 180 只。该项研究设计了复合电极将压电效应和摩擦电效应有机整合，成功制备了具备高电压、高电流输出的压电-摩擦复合纳米发电机，实现了机械能高效收集利用，在便携式自供能器件领域具备广阔应用前景。相关研究成果发表在《ACS Applied Materials & Interfaces》¹⁰。

（郭楷模）

共轭聚合物界面层显著提升钙钛矿电池热稳定性

短短数年，钙钛矿太阳电池的转换效率从 3.8% 蹿升到 23% 以上，且具备成本低廉、工艺简单等优点，成为近年来光伏研究领域的热点。然而当前常规高效钙钛矿电池主要采用非稳定的有机阳离子（如甲基胺离子 $[\text{CH}_3\text{NH}_3]^+$ ）在退火的过程中容易发生富集析出，即阳离子偏析）导致了薄膜的化学成分变化引起降解，导致电池不稳定，影响了电池寿命阻碍了电池的商业化发展。由加利福尼亚大学洛杉矶分校 Yang Yang 教授课题组牵头的国际联合研究团队，通过在平面型钙钛矿电池的钙钛矿和空穴传输层之间引入具备良好空穴传输和抑制阳离子析出功能的共轭聚合物插层薄膜，有效抑制了阳离子的逃逸，保障了钙钛矿薄膜化学成分稳定，从而增强了电池的稳定性和寿命，实现了高达 21.2% 的稳态效率。研究人员首先采用传统的两步法制备

¹⁰ Wen He, Yongteng Qian, Byeok Song Lee, et al. Ultrahigh Output Piezoelectric and Triboelectric Hybrid Nanogenerators Based on ZnO Nanoflakes/Polydimethylsiloxane Composite Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, DOI: 10.1021/acsami.8b15410

了双阳离子双卤素的混合钙钛矿薄膜 $(\text{FAPbI}_3)_{1-x}(\text{MAPbBr}_3)_x$ (FA^+ 、 MA^+ 依次为甲脒、甲胺离子)，同时还在另外一个 $(\text{FAPbI}_3)_{1-x}(\text{MAPbBr}_3)_x$ 薄膜表面生长一层具有良好导电性的共轭聚合物薄膜 PTQ10，随后将两者置于 150℃加热台退火处理。扫描电镜 (SEM) 和 X 射线表征显示，未覆盖和覆盖 PTQ10 聚合物膜的钙钛矿表面形貌呈现出显著差异性，前者的薄膜表面出现了大量分散白色碘化铅 (PbI_2) 晶粒 (X 射线中明显存在 PbI_2 对应的 001 衍射峰)，意味在加热退火的过程中有一部分的钙钛矿分解了，主要是 FA^+ 阳离子遇热偏析逸出导致薄膜组分平衡打破；而覆盖了 PTQ10 聚合物钙钛矿薄膜则基本没有观察到 PbI_2 晶粒成分 (X 射线中 PbI_2 对应的 001 衍射峰较为微弱)，表明 PTQ10 聚合物膜有效地抑制了阳离子的偏析逸出，保障了薄膜组分的稳定，避免了薄膜降解，提升了热稳定性。通过傅里叶变换红外光谱测试发现 PTQ10 聚合物能够与 FA^+ 阳离子形成强的分子相互作用，从而将其“锁住”避免其逃逸。掠入射广角 X 射线 (GIWAXS) 表征则发现，相比未覆盖 PTQ10 钙钛矿，覆盖了 PTQ10 的钙钛矿薄膜呈现出择优的钙钛矿衍射峰取向，意味着其具备了更加优异的载流子传输能力。随后将制备的钙钛矿薄膜组装成电池器件进行光伏性能测试，含有 PTQ10 聚合物薄膜的钙钛矿电池光电转换效率达到了 21.2%，显著高于无 PTQ10 薄膜电池器件 (18.9%)，主要是前者的开路电压显著提升所致，主要原因是 PTQ10 聚合物插层薄膜处理后的钙钛矿薄膜带隙缩小与空穴材料的带隙匹配更好，从而实现了空穴更加高效的抽取，此外 PTQ10 良好的空穴传输特性增强了空穴的传输，从而减少了复合。随后在室温、40% 的空气湿度环境下测试器件稳定性，结果显示连续光照 1480 小时后含有 PTQ10 未封装器件仍可保持初始效率的 86%，相反无 PTQ10 未封装电池器件性能则出现了显著的衰退，效率仅为初始值的 40%，主要是 PTQ10 薄膜疏水性有效隔绝了空气水分对钙钛矿薄膜的侵蚀。随后提高测试温度到 85℃在手套箱内开展热稳定性测试，PTQ10 电池器件在上述高温下连续运行 430 小时后依旧保持 85% 初始效率值，而无 PTQ10 电池器件则只能稳定运行 200 小时，表明了 PTQ10 薄膜显著改善了钙钛矿薄膜的热稳定性。该项研究将热稳定性良好、空穴传输性能优异的聚合物薄膜覆盖于钙钛矿薄膜之上，在增强空穴抽取和传输的同时有效抑制阳离子的偏析，从而增强了电池的性能和稳定性，为钙钛矿电池商业应用奠定了关键技术基础。相关研究成果发表在《*Journal of the American Chemical Society*》¹¹。

(刘竞 郭楷模)

¹¹ Lei Meng, Chenkai Sun, Rui Wang,, et al. Tailored Phase Conversion under Conjugated Polymer Enables Thermally Stable Perovskite Solar Cells with Efficiency Exceeding 21%. *Journal of the American Chemical Society*. 2018, DOI: 10.1021/jacs.8b10520

碳原子反向掺杂石墨相氮化碳催化剂催化性能显著提升

石墨相氮化碳 ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) 是由氮原子 (N) 桥连七嗪环 (C_6N_7) 结构单元构成的二维层状材料, 具有化学稳定性好、热稳定性高及成本低廉等突出优点, 成为近年来备受关注的聚合物光催化材料。但其原始带隙仅为 2.7eV , 仅能吸收波长短于 460 nm 的波段, 因此需要设法拓宽其光响应范围增强催化能力。由美国佐治亚理工学院 Zhiqun Lin 教授牵头的国际联合研究团队采用微波辅助加热共聚反应方法成功实现在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 体系中高效引入碳原子 (C), 实现了 C 对 N 的反向替代掺杂, 提高了 π 电子的数量, 增强了 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 光响应范围和光生载流子输运性能, 从而增强了催化活性。由于 C 的价电子大于 N 的价电子, C 对 N 的反向取代可以极大地将 π 电子引入 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 网络中。为此研究人员选择富含 π 电子的芳族单体巴比妥酸 (为 THD) 与制备 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 材料的前驱体三聚氰胺通过微波辅助加热进行共聚。相比传统的电炉加热, 微波辅助加热提供了快速的加热速率, 可使温度快速达到芳香环单体与三聚氰胺的共聚温度, 显著抑制芳香环单体在加热过程中的挥发问题, 实现在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 催化材料中高效引入 C 原子。X 射线衍射分析显示, 相比传统的电炉加热, 微波辅助加热制备的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 材料结晶性更好, 这主要是由于微波与极性分子间的强烈相互转动等效应, 加速芳香环与三聚氰胺的共聚反应提升了结晶性。紫外可见光谱和电子输运性能表征显示, 微波辅助加热制备的 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 材料的光响应范围和载流子输运特性得到了显著改善。在 $0.5\text{wt\%}$ 的 Pt 助催化剂的辅助下, 在三乙醇胺 (TEOA) 溶液中对不同方法制备 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 材料进行催化产氢性能测试。微波加热制备的碳掺杂 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的光催化制氢生成速率为 $25\text{ }\mu\text{mol h}^{-1}$, 20 倍于传统的电炉加热制备的催化剂 (仅为 $1.3\text{ }\mu\text{mol h}^{-1}$)。密度泛函理论研究表明, 引入 π 电子促使 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 材料的导带 (HOMO) 降低从而带隙缩小, 光吸收范围拓宽。此外 C 的引入增强了电子、空穴的有效分离。该项研究采用微波辅助加热共聚物的方法, 抑制芳香环单体在加热过程中的挥发问题, 成功实现在 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 体系中高效引入 C, 提高了 π 电子的数量, 增强产氢催化活性, 为设计开发高效低成本的非金属催化剂提供了新路径。相关工作发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》¹²。

(郭楷模)

¹² Jing Li, Dandan Wu, James Iocozzia, et al. Achieving efficient incorporation of π -electrons into graphitic carbon nitride for markedly improved hydrogen generation. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, DOI: 10.1002/anie.201813117

全球铀资源储量丰富 但投资不足产能受限

12月13日，经合组织核能署（OECD-NEA）和国际原子能机构（IAEA）联合发布了《铀资源、生产与需求 2018》报告¹³，对全球铀市场的基本面进行了最新分析，提供了截至2017年1月1日世界铀工业的统计概况。报告包含36个国家官方数据以及5份OECD-NEA和IAEA科学秘书编写的关于铀矿勘探、资源、生产和反应堆相关需求的国家报告数据，对到2035年核电装机容量和反应堆相关铀需求进行了预测。报告主要内容如下：

1、铀资源

总体而言，全球已探明的铀资源有所增加。虽然这些增量中的一部分与新发现有关，但大部分来自对先前探明的铀资源的重新评估。尽管资源增加，但需要额外投资以确保这些资源能够变成产量。

截至2017年1月1日，已探明的常规铀资源（包括可靠资源和推断资源）中，回收成本低于130美元/kgU资源量为614.2万吨，比2015年增加7.4%。高回收成本（回收成本低于260美元/kgU）的铀资源估计有798.8万吨，比前一报告增加了4.5%。所有回收成本类别的可靠资源量都有所增加。相比之下，推断资源则下降了，总体上从2015年的325.5万吨下降到2017年的317.3万吨，哈萨克斯坦和俄罗斯报告的降幅最大。最显著的变化在回收成本低于40美元/kgU类别，与2015年报告的数值相比，可靠资源量增加了49.1%，推断资源增加了104.5%，这主要归因于哈萨克斯坦的货币贬值，从而拉低了铀资源回收成本。按照2016年的铀需求水平，已探明的可回收资源足以满足全球核电机组130多年的铀资源供应。此外，NEA和IAEA还确定了额外的7.3万吨已探明的铀资源量，但这些尚未列入相关国家的铀资源总量的数据中。

截至2017年1月1日，未探明的常规铀资源总量为753万吨，比2016年报告中的742.2万吨增加了1.5%。非常规铀资源是未来潜在供应的另一个来源，目前已经超过2850万吨。值得注意的是，在某些情况下，包括拥有大量探明铀资源的主要生产国（例如澳大利亚、加拿大和美国），未探明的铀资源的估计数量并没有报告，或估计数量已经几年没有更新。

2、铀矿勘探

铀勘探和矿山开发支出从2014年的20多亿美元下降到2016年的7亿美元左右。自2011年年中以来，由于铀市场持续低迷，铀市场价格走低，导致总支出持续下降。

¹³ Uranium 2018: Resources, Production and Demand.
<https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>

截至 2017 年 1 月 1 日，全球铀矿勘探和开采支出总额为 6.6 亿美元，比 2014 年大幅减少了 59%。勘探和开发支出的下降反映了该行业为应对供应过剩而进行的调整，供应过剩始于 2011 年年中铀市场低迷。超过 38% 的支出总额用于非国内活动，而中国占了开支的大部分。

非国内勘探和开发支出是全球勘探和开发支出的一部分。只有四个国家——中国、法国、日本和俄罗斯——报告了它们的国外（非国内）支出，从 2014 年的 8 亿美元降至 2016 年的 4.1 亿美元。这主要是由于纳米比亚哈萨博铀矿矿山的主要开发和投资完成后，中国的非国内开发费用减少。2016-2017 年，加拿大的铀勘探开发支出最高，其次是中国和印度。

3、生产

总体而言，世界铀产量从 2015 年的 6 万吨增加到 2017 年 1 月 1 日的 6.2 万吨，增加了 3%。这些变化主要是由于澳大利亚、加拿大和哈萨克斯坦的产量增加，以及中国和纳米比亚报告的其他增幅较小。然而，2017 年产量已下降至 5.9 万吨，由于主要生产商正在限制生产以应对萧条市场。预计 2018 年产量将进一步下降，因为包括加拿大和哈萨克斯坦在内的主要生产国由于铀价格持续偏低，限制了总产量。在经合组织国家内，由于澳大利亚和加拿大的产量增加，促使产量从 2014 年的 1.6 万吨增加到 2016 年的 2.1 万吨。

2016 年，共有 19 个国家生产铀，比上一个报告期少两个。在 19 个生产国中，16 个是初级资源开发国，因为法国、德国和匈牙利仅在矿山修复活动中生产铀。哈萨克斯坦的产量继续增长，但速度要慢得多，而且它仍然是世界上最大的生产国，2015 年产量为 2.3 万吨，2016 年产量为 2.4 万吨。哈萨克斯坦的产量超过 2016 年报告的加拿大和澳大利亚产量之和，后两个国家分别是第二和第三大铀生产国。加拿大和哈萨克斯坦将在 2018 年减产，因为两国均宣布计划限制生产以应对萧条的铀市场。

从 2017 年 1 月 1 日起，原位浸出（ISL，有时称为原位回收或 ISR）生产继续主导铀生产，占世界产量的 50%，主要是由于哈萨克斯坦和其他 ISL 项目在澳大利亚、中国的持续增产。其余的铀生产份额为地下采矿（31%）、露天开采（13%）、以及铜和黄金开采的副产品和副产品回收（6%）、堆浸（<1%）和其他方法（<1%）。

4、铀需求预测

自 2016 年报告以来，核电发展势头有所下降。然而，随着电力需求的增加和对低碳发电需求的增长，核发电量将大幅增长，从而促使铀的需求增长。促进各类低碳电力生产的激励措施是核电容量增长的关键条件。

截至 2017 年 1 月 1 日，共有 449 个商业核反应堆并网，净发电量为 391 GWe，每年需要消耗 6.2 万吨铀。考虑到若干国家宣布的政策变化和修订的核发展计划，

报告预计到 2035 年，在低需求量情景下世界核电装机容量将增加到 331 GWe，在高需求量情景下则增加到 568 GWe，分别较 2016 年预测下降 15%和增长 45%。因此，到 2035 年世界年度核反应堆相关铀需求（不包括混合氧化物燃料[MOX]）预计将上升到 5.3-9.1 万吨之间。

不同地区的核电装机容量预测存在很大差异。东亚地区预计将经历最大的增长，到 2035 年可能在低和高需求量情景下分别新增 30 GWe 和 120 GWe 核电装机容量，相比 2016 年产能分别增加超过 30%和 122%。预计欧洲大陆非欧盟成员国的核电装机容量也将大幅增加，到 2035 年预计将增加到 47.5-67.8 GWe（分别增加约 9%和 56%）。其他预计经历重大核电装机容量增长的地区包括中东、中亚和南亚，预计非洲、中南美洲和东南亚地区的增长将较为温和。对于北美洲，预计到 2035 年核电发电能力在低需求情景和高需求情景下都将下降，这主要取决于未来的电力需求、现有核反应堆的寿命和政府关于温室气体排放的政策。美国几个反应堆的经济损失事实导致了大量的过早停工。在欧盟，到 2035 年低需求情景下核电装机容量预计下降 48%，在高需求情景下下降 3%。

6、供需关系

目前确定的资源基础足以满足到 2035 年高需求情景下的全球铀需求，但需要及时的投资将资源转化为用于核燃料生产的精炼铀。全球铀市场仍然面临挑战，供应过剩和库存量高导致持续的定价压力。矿业开采中还存在一些其他问题，例如地缘政治因素、技术挑战以及法律及监管框架。

截至 2017 年 1 月 1 日，世界铀产量（6.2 万吨）提供了世界反应堆需求量的约 99.9%，而 2017 年全球初级铀产量提供了约 95%的需求，其余需求则是由二次铀资源提供，包括过剩的政府和商业库存、乏燃料后处理、供料不足贫铀尾矿再富集产生的铀，以及通过混合高浓缩铀（HEU）生产的低浓铀（LEU）。

目前全球铀市场供应充足，如果按计划进行，预计原铀生产能力（包括现有、承诺、计划和前瞻性生产）将满足到 2035 年的需求。满足到 2035 年高需求的消耗量将不到 2017 年已探明铀资源总量的 25%（回收成本低于 130 美元/ kgU）。尽管如此，仍然需要大量的投资和技术专长才能将这些资源投入市场。

报告最后总结，尽管最近一些发达国家的电力需求下降，但全球需求预计在未来几十年内将继续增长，以满足不断增长的人口需求，特别是在发展中国家。由于核电厂具有价格竞争优势，发电基本上没有温室气体排放，并且核电的部署增强了能源供应的安全性，因此预计它仍然是能源供应的重要组成部分。而且，无论核能在满足未来电力需求和实现全球气候目标方面最终发挥何种作用，铀资源足以满足可预见未来的需求。

（于小燕 郭楷模）

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

