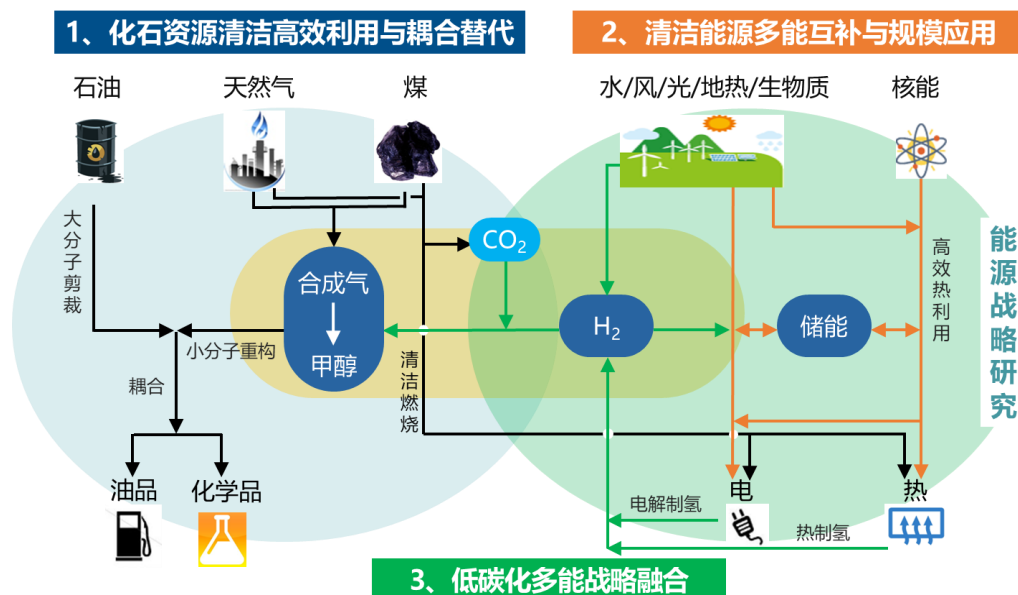




洁净能源科技动态监测快报

2020 年第 04 期（总第 06 期）



本期看点

- 美国国家科学院提出先进燃气轮机技术十大优先研究领域
- NETL 总结“天然气水合物计划”二十年研发进展
- 日本建成全球最大的可再生能源电力制氢示范厂
- 特朗普政府公布 2021 财年预算纲要 能源部预算 354 亿美元
- IEA: 新冠肺炎疫情短期内将影响全球石油需求

◆ 化石资源清洁高效利用

- 美国国家科学院提出先进燃气轮机十大优先研究领域..... 2
- NETL 总结“天然气水合物计划”二十年研发进展 6
- ARPA-E 资助 3850 万美元支持天然气管道修复新技术研究..... 9
- DOE 支持开发燃煤电厂近零水耗技术..... 10

◆ 清洁能源多能互补

- DOE 资助 7400 万美元支持建筑节能前沿技术研发.....11
- 英国资助近 3700 万英镑推进交通电气化..... 13
- 钙钛矿材料助力量子点太阳电池创下 16.6%世界纪录 14

◆ 低碳化多能融合

- IRENA 提出电力储能技术经济价值评估框架促进规模化部署 16
- 日本建成全球最大的可再生能源电力制氢示范厂 23
- 具备亲水和疏水双通道异质催化剂实现高效 CO₂ 催化还原 24
- 低成本无隔膜锌锰液流电池展现出规模化储能应用潜力..... 25

◆ 能源战略研究

- 特朗普政府公布 2021 财年预算纲要 能源部预算 354 亿美元 28
- IEA: 新冠肺炎疫情短期内将影响全球石油需求 30
- GWEC: 到 2024 年全球风电累计装机有望突破 1000 GW 34

本期概要

美国国家科学院发布《先进燃气轮机技术》报告，分析了燃气轮机市场发展前景并提出了到 2030 年美国需要优先开展的十大研究领域：未来数十年全球燃气轮机市场将保持强劲增长态势，预计到 2032 年其市场规模有望达到 1100 亿美元，主要的增长驱动力来自发电、油气和航空三大应用领域。为了保持和强化美国燃气轮机在全球市场的领先地位，面向 2030 年的十大优先研发领域是：燃烧，结构材料和涂层，燃气轮机增材制造工艺，热管理技术，高保真集成模拟和验证实验，非常规热力学循环，系统集成，基于状态的运维技术，数字孪生及其支撑基础设施，以及燃气轮机在天然气管道应用等。详见正文。

美国能源部（DOE）国家能源技术实验室（NETL）发布《“天然气水合物计划”重要进展：2000-2020 年》报告，总结了计划执行 20 年所取得的重要进展：（1）在墨西哥湾成功开展了资源特性研究，建立可靠的勘探、钻探和采样方法。（2）开展了中大西洋资源成像实验（MATRIX），进行了多通道地震数据收集与分析。（3）在阿拉斯加北坡成功开展了天然气水合物试采活动，验证了技术可行性。（4）研究了天然气水合物与环境的相互作用。（5）广泛开展国际合作试验，推进新兴的科学概念和测试新的水合物专用现场技术。（6）开展了天然气水合物储层模拟器代码的国际比较研究，促进储层模拟器开发。

日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布由其牵头、多个企业共同参与开发的全球最大规模（10 MW）可再生能源电解水制氢示范厂（FH2R）在福岛顺利竣工：该示范厂由 20 MW 光伏电站和 10 MW 级别电解水制氢系统组成，在额定功率下运行该厂每小时产氢量可达 1200 Nm³。示范电厂将通过调整制氢设备产生的氢气量来调节电力系统的供需平衡，以及如何实现在不使用蓄电池的情况下最大限度地利用波动性可再生能源，并建立清洁、低成本的制氢技术。

美国总统特朗普公布 2021 财年联邦政府 4.8 万亿美元的预算纲要，其中提议的美国能源部（DOE）经费预算总额为 354 亿美元：DOE 基础科学研究预算为 58 亿美元，将专注于开展前沿研究，包括百亿亿次超级计算机和量子计算机、下一代科学设施和工具的升级建造、人工智能（AI）和机器学习研究等；能源技术创新研发相关计划的预算为 36 亿美元，重点开展先进储能新技术、先进燃煤系统和碳捕集、利用和封存（CCUS）技术研发、网络安全技术研究和新建一个铀储备区等研究工作；国家核安全相关技术研发的预算为 269 亿美元，聚焦核武库现代化、防核扩散和强化核反恐与应急响应能力等。

国际能源署（IEA）发布《2020 年石油市场分析及到 2025 年展望》报告，对到 2025 年全球石油市场走势进行了展望分析：新冠肺炎疫情将在短期内影响全球石油需求前景，预计 2020 年全球石油需求将出现自 2009 年以来的首次下降。但长期而言，随着疫情逐步控制和消失，社会经济活动逐步返回正轨，全球的石油需求将会反弹。预计 2021 年全球石油需求将增长 210 万桶/天，随后因运输燃料需求增长停滞而降低增长速度，2025 年的年增量仅为 80 万桶/天。总体而言，2019 年至 2025 年全球石油需求预计将以 95 万桶/天的年均增速增长 570 万桶/天。

化石资源清洁高效利用

美国国家科学院提出先进燃气轮机十大优先研究领域

2月5日，美国国家科学院发布了受美国能源部委托完成的《先进燃气轮机技术》报告¹指出，未来数十年全球燃气轮机市场将保持强劲增长态势，预计到2032年其市场规模有望达到1100亿美元（当前市场规模为900亿美元），主要的增长驱动力来自发电、油气和航空三大应用领域。为了保持和强化美国燃气轮机在全球市场的领先地位，该报告确定了面向2030年燃气轮机技术在上述三大应用领域的研究目标，以及实现目标需要优先开展的十大研发领域，关键要点如下：

一、燃料轮机在三大应用领域的研究目标

1、发电领域

(1) 提升燃气轮机效率：将燃气轮机联合循环的发电效率提高到70%，单循环效率提高到50%以上。

(2) 提升燃气轮机与可再生能源发电集成的兼容性：减少燃气轮机的启动时间，提高燃气轮机以简单和组合循环运行的能力，使其能够适应灵活的电力需求，满足与可再生能源和储能系统集成在一起的运行要求。

(3) 减少 CO₂ 排放量：在保持性能前提下，将碳排放量减少到“尽可能接近零”，同时仍满足氮氧化物（NO_x）排放标准。

(4) 提高燃料灵活性：能够使用高比例（甚至100%）的氢气和含各种成分的其他可再生气体混合燃料。

(5) 降低电力成本：降低长周期平均发电成本，以确保在长期内可以拥有与太阳能和风力发电系统相当的成本竞争力。

2、航空领域

提升燃烧效率：开发先进技术，提高燃烧效率，使窄体和宽体飞机的燃油消耗量比目前同类最佳的涡轮风扇发动机减少25%，同时减少军用飞机的燃油消耗。

3、油气领域

(1) 提升燃料灵活性：能够使用高比例（甚至100%）的氢气和含各种成分的其他可再生气体混合燃料。

(2) 基于状态的运维：利用数字化技术提高设备实时运行故障预测和维护能力，在不降低可用性或可靠性的情况下，将天然气管道压缩站的不间断运行时间延长至3年或更长。

¹ Advanced Technologies for Gas Turbines. <https://www.nae.edu/224104.aspx>

(3) 灵活的电力需求和效率：为管道压缩机站（以及其他石油和天然气应用）设计一种燃气轮机，能够处理大载荷波动，并在部分载荷下运行，其效率超过使用电动压缩机站的效率。

二、燃料轮机十大优先研究领域

为了确保能够实现上述发展目标，报告提出了未来十年燃气轮机十大优先研究领域，每个领域包含 1-3 个研究主题。前 5 个研究领域集中在基础科学知识和技术研究，剩下 5 个主要关注系统层面开发：

1、燃烧。进一步完善低排放燃烧系统所需的基础理论知识，包括：可以满足更高联合循环效率所需的更高温和高压环境，包括恒压和增压燃烧系统；具有 unlimited 燃气轮机的瞬态响应或调节能力的运行特性（即一种宽功率范围运行的能力），以及多燃料运行特性。包括 3 个优先研究主题：

(1) 基础燃烧性能。针对恒压和增压燃烧室，研究基本燃烧特性，实现对宏观系统排放和运行性能的有效控制。

(2) 在高温高压下减少有害排放的燃烧概念。明确在高效循环中可接受的有害排放水平的燃烧概念。

(3) 燃烧室的运行和性能限制。发展更好地理解 and 预测燃烧运行极限的能力，这些性能极限限制了燃气轮机的整体瞬态响应（例如，快速改变负荷以支持间歇性可再生能源并网）、降低转速以及适应可变燃料成分的能力。

2、结构材料和涂层。包括：开发生产陶瓷基复合材料所需的技术；先进的计算模型；先进的金属材料 and 部件制造技术，以提高燃气轮机的效率，减少其开发时间和生命周期成本。包括 3 个优先研究主题：

(1) 陶瓷基复合材料的性能和应用性。开发一种新的加工方法，能以比目前更低的成本制造更高质量的碳化硅（SiC）纤维，从而支持陶瓷基复合材料（CMCs）在燃气轮机热气路径中的广泛应用。

(2) 基于物理的寿命模型。建立基于物理的寿命计算模型，解决热段涡轮材料的环境老化问题。

(3) 先进的合金技术。开发先进的高温合金和这些合金的部件设计概念。

3、燃气轮机增材制造工艺。将基于模型的燃气轮机材料（已经使用的以及正在开发的先进材料）、材料工艺、制造机器、设计工具和车间设备集成在一起，以加快设计进程并提高部件良品率。包括 3 个优先研究主题：

(1) 将设计流程和增材制造工程集成耦合。开发一种先进的方法，将材料、工艺、机械和成本模型与计算机辅助设计（CAD）软件相结合，创建一个完整的数字工程框架，以满足燃气轮机设计人员在增材制造方面的特殊需求。

(2) 高温结构材料增材制造。开发新型高温结构材料，以及先进的增材制造设

备及工艺，提高增材制造的燃气轮机部件的热效率和工作温度极限，提高部件的耐久性。

(3) 传感器、机器学习和过程分析的集成。将基于物理的成分、加工、微观结构和机械行为的模型与人工智能分析和基于信号决策过程整合到制造基础设施中，以增强燃气轮机部件工艺控制和首次良品率。

4、热管理技术。制定先进的冷却策略，可以快速、经济地将其整合到燃气轮机中，并实现更高的透平进口温度，更高的增压比以及更少的燃烧室和透平冷却空气流量，从而在满足燃气轮机寿命要求的同时提高热力循环效率。包括 3 个优先研究主题：

(1) 创新冷却技术。通过创新的冷却技术和策略来提高涡轮部件的效率。

(2) 全耦合传热模型。开发先进的全耦合传热模型，指导燃烧室和涡轮冷却配置的优化设计，实现部件冷却气流最小化，提高涡轮透平进口温度，获得更高的循环压缩比。

(3) 粒子流的基本物理与建模。理解燃气轮机中粒子流的物理行为并开发相关模型。

5、高保真集成模拟和验证实验。开发和验证基于物理的高保真计算预测模型，以便在设计早期进行详细的工程分析，包括对燃气轮机模块相互作用和非设计运行条件的虚拟模拟。包括 3 个优先研究主题：

(1) 子系统和系统集成的数值模拟。开发先进的、高保真度、可预测的数值模拟系统，进而扩展设计空间，并增强系统级优化，以支持开发效率更高、可靠性更强、耐久性更好、成本更低的燃气轮机

(2) 协同实验研究。进行实验研究，验证单个和集成燃气轮机模块的数值模拟系统效果。

(3) 计算机科学与仿真数据的应用。开发高保真数值工具映射的先进方法，包括预处理和后处理算法、新兴的计算机架构，以方便没有计算机专业背景知识的燃气轮机设计人员快速便捷地使用高保真仿真工具。

6、非常规热力学循环。针对单循环和联合循环燃气轮机开发非常规热力循环，以提高热效率，同时确保其与燃气轮机性能的其他要素（如生命周期成本）之间的取舍在可接受范围内。包括 3 个优先研究主题：

(1) 压力增益燃烧。发展一种能结合非常规热力循环的燃气轮机技术，实现压力增益燃烧，以最大限度地提高热效率。

(2) 使用无碳燃料的燃气轮机循环。开发一种能结合非常规布雷顿循环的燃气轮机技术，从而能实现从燃烧无碳燃料（如氢）中获得高热效率。

(3) 具有碳捕集能力的燃气轮机循环。发展一种燃气轮机技术，能结合非常规

循环或对具有碳捕集能力的现有循环进行改进（不需要昂贵而复杂的附加装置来从废气中捕集二氧化碳）。

7、系统集成。改进、修改和/或扩展传统燃气轮机的结构（如压气机、燃烧室、透平），从而能够开发具有更高性能和/或更大应用范围的燃气轮机。包括 3 个优先研究主题：

（1）带增压燃烧的燃气轮机系统布局。发展带增压燃烧的燃气轮机优化布局，进一步提升燃烧效率。

（2）闭式循环燃气轮机。开发闭式循环燃气轮机系统，最大限度地提高可靠性、可用性、可维护性和使用外部热源（如太阳能和模块化核电站）时的热效率，以消除碳排放。

（3）混合燃气轮机系统。开发一种架构能够将布雷顿循环燃气轮机与其他技术（如燃料电池）经济有效地集成耦合，以获得高热效率。

8、基于状态的运维技术。开发一种通过减少计划内和计划外维护量来改善燃气轮机运行的技术，减少计划外停机。包括 3 个优先研究主题：

（1）传感器。开发高可靠、高性能、低成本的传感器，能提高燃气轮机运行过程中获得信息的准确性，确保其处于安全运行状态。

（2）检查和维修技术。开发现场检查和维修技术，以评估燃气轮机的老化状态，最大限度地延长运行时间，降低长期维护成本。

（3）先进控制元件。开发先进的控制元件，以满足与现有电网和可再生能源与储能系统日益增强的集成耦合运营的要求。

9、数字孪生及其支撑基础设施。开发生成增强型数字孪生的能力，以及支持其应用的数字线程基础设施。包括 1 个优先研究主题：

（1）开发数字孪生和支撑数字线程基础设施，满足燃气轮机设计开发需求。

10、燃气轮机在天然气管道中的应用。探索长时间在部分载荷下运行的燃气轮机效率提升机遇，以及燃料中含大量氢气的燃气轮机安全隐患。包括 2 个优先研究主题：

（1）部分载荷下天然气管道中燃气轮机的效率。提高天然气管道压缩站燃气轮机在部分载荷下运行的效率，以及在峰值载荷下保持高效率。

（2）氢燃料管道中燃气轮机的安全运行。发展氢燃气轮机安全运行技术，使其能够在不同的氢气含量水平下安全运行（最高可达 100%）。

（于小燕 郭楷模）

NETL 总结“天然气水合物计划”二十年研发进展

3月3日，美国能源部（DOE）国家能源技术实验室（NETL）发布《“天然气水合物计划”重要进展：2000-2020年》²报告，总结了由NETL牵头的DOE“天然气水合物计划”执行20年所取得的重要进展和正在进行的工作。“天然气水合物计划”于2000年启动，重点关注天然气水合物的三大研究领域：资源潜力、开发方法和对环境的影响。报告主要内容如下：

一、重点研究领域

1、资源表征。确定美国及世界范围内天然气水合物的特性、数量和资源潜力，涉及开发识别和表征陆地和海域天然气水合物资源的技术。该领域的关键是现场采集天然气水合物沉积物的数据和样本。对天然气水合物资源的评估基于有限的数据库，因此具有很大的不确定性，尤其是缺乏海域数据。需要进行更多记录、采样、勘测和分析，以更好地评估天然气水合物资源。

2、开采技术。开发安全、经济地从水合物储层中开采天然气的技术。降压开采是最具可行性的技术，但注入CO₂和热激发等技术也有助于提升开采率。通过将测试结果用于先进数值模型，研究人员正开发从储层中开采天然气经济可行的方法。近年来，国际上已经完成了几项开采测试，目前需要延长试验时间以更好地控制天然气水合物开采速度及可采量。

3、天然气水合物与环境的关系。天然气水合物主要存在于北极多年冻土地区的沉积地层和地球大陆边缘的深水区域。全球地表温度升高可能会引发天然气水合物的离解并向大气中释放大量甲烷，进而影响气候变化。但最近的研究表明，天然气水合物离解过程中释放的大量甲烷会被捕获在沉积物和水体中，而不会传输到大气中。需要收集高质量的观测数据、进行严格的实验室试验以及仿真建模，以进一步探索天然气水合物在环境中的作用。

二、重要进展

1、墨西哥湾资源特性研究，以建立可靠的勘探、钻探和采样方法。2009年，NETL与雪佛龙公司牵头的国际行业联盟共同开展墨西哥湾联合工业项目，在墨西哥湾进行了随钻测井，以测试地质和地球物理数据分析方法，用于识别海湾砂岩储层中的天然气水合物。项目结果表明了下列勘探方法的有效性：使用地震数据和测井数据直接探测天然气水合物；利用温度和压力估计值绘制水合物稳定带边界；经典石油系统分析，包括天然气源、运移路径和储层沉积相的识别。另外，钻探结果还有效绘制出了高饱和、含水合物砂岩储层的地点，以用于以后的工程和特性研究。2017年，NETL和德克萨斯大学奥斯汀分校在上述地点成功进行了钻井和取芯，验

² NETL Methane Hydrate R&D Program: PROGRAM HIGHLIGHTS 2000-2020.
<https://netl.doe.gov/sites/default/files/2020-02/NETL-Methane-Hydrate-Program-2000-2020.pdf>

证了两个压力取芯设备的有效性，并成功获得了高质量含天然气水合物岩心样品用于实验室分析。

2、中大西洋资源成像实验 (MATRIX)，进行多通道地震数据收集与分析。2018年8月，美国地质调查局在 NETL 和美国海洋能源管理局 (BOEM) 的支持下完成了中大西洋资源成像实验，获取了 2000 多公里的多通道地震数据，以表征纽约和北卡罗来纳州之间美国大西洋边缘的天然气水合物和浅层气藏，并用于完善 BOEM 的天然气水合物分布图。此次实验使用了 4 把气枪和 1 个 1.2 公里长的拖缆，具有 112-160 个记录通道；部署了 60 个深水声纳浮标以更好地限制水柱声速；对水体进行连续成像以定位从已知场地散发出来的天然气羽流，并绘制了海底渗漏图。数据初步分析证实了哈德逊峡谷大面积海底下方的强底部模拟反射 (BSR)，美国地质调查局正使用传统方法和机器学习来描述底部模拟反射，此次获取的数据可以更详细、可靠地估算天然气水合物的储量。

3、阿拉斯加北坡天然气水合物试采。2011 年和 2012 年，NETL、USGS、康菲石油公司和日本石油天然气、金属矿物资源机构 (JOGMEC) 合作在阿拉斯加北坡进行了 IgnikSikumi 现场试验，以测试使用 $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 置换法开采天然气水合物的技术可行性。该项目是同类研究中首个获得成功的项目，产生了大量的钻井、测井和生产测试数据，可为将来的生产提供依据。IgnikSikumi 井证实了目标区域存在多个含天然气水合物的砂岩储层，天然气水合物最多占储层孔隙体积的 80%。更重要的是，该项目证实了经过测试的水合物储层对井下压力变化具有快速响应，并且不容易失控失稳。测试结果还表明，未来需要在生产井中管理出水和出砂，而且可能需要配备加热设备和/或抑制剂，以防止井中水合物的形成。

4、天然气水合物与环境的相互作用。NETL 将天然气水合物纳入全球碳循环模型以研究这一问题，还资助了对海洋和冻土的现场调查，包括阿拉斯加北坡和美国大西洋、太平洋和墨西哥湾边缘。根据现有文献和数据，NETL 认为天然气水合物可能仅在地球上的少数地方离解，例如水深在 500-700 米的上陆坡，然而并没有证据表明这些地方水合物离解释放的甲烷进入了大气中。相反，甲烷溶解在海水中，被细菌消耗转化为 CO_2 。在海洋深处和多年冻土地区，水合物也可能离解，但是甲烷可能仍被困在沉积物中，因为缺乏到达海底或地表的途径而无法进入大气中。NETL 已资助了几个现场项目，以调查在接近天然气水合物可能离解深度的海底天然气渗漏中释放的甲烷轨迹。2017 年，研究人员在美国中大西洋边缘发现了数百个甲烷渗漏点，收集了地球化学和地球物理数据。利用这些数据来确定水体中的甲烷是源自渗漏还是海洋浅层浮游生物的活动，并量化从海面向大气排放的甲烷量，以及评估从渗漏的甲烷产生的 CO_2 是否会在大西洋中部边缘的深海水域积聚。

5、国际合作试验。NETL 已与国际天然气水合物研发计划进行了广泛的合作，

以规划和执行全球主要的野外考察活动。这些合作为推进新兴的科学概念和测试新的水合物专用现场技术创造了机会，推进了对各种地质环境中天然水合物矿床的进一步认识。一些野外研究专注于北极多年冻土环境中的陆上水合物积累，另一些则测试了深海环境中的水合物沉积物。与日本的持续合作对开发先进的天然气水合物压力取芯技术和数值模拟方案至关重要，最近的合作专注于阿拉斯加北坡的天然气水合物生产测试。与韩国和印度的合作主要围绕深海钻探和测试考察，美国根据在墨西哥湾的选址和钻探经验提供了钻探选址的专业知识。

6、天然气水合物储层模拟器代码的国际比较研究。NETL 为促进研究人员在天然气水合物储层模拟器开发和测试方面开展国际合作和共享发挥了积极作用。近年来，西北太平洋国家实验室、劳伦斯伯克利国家实验室和 NETL 共同主导了一个合作项目，组织全球 21 个机构建立了一个社区，使用一组定义明确的基准问题来测试和比较不同的储层模拟器代码。NETL 和美国地质调查局主导的 IGHCCS 项目结果表明，基准问题对于解决建模结果之间的差异至关重要。要克服实现天然气水合物大规模商业生产所面临的技术障碍，需要复杂的模拟代码，这些代码通过对热、热力学、水文和地质力学过程进行严格的处理来解决天然气水合物系统的复杂性。

三、当前正在进行的项目

1、建立世界一流的水合物研究设施。NETL 已开发出对加压的天然和人工合成天然气水合物样品进行实验室测试的设施，包括：①多特性表征室（MPCC）和微型 MPCC，使用 CT 扫描仪实时观察样品；②多组分保压岩芯表征和 X 射线计算机断层扫描（CT）可视化工具包（PCXT）。MPCC 能够测量 2.5 英寸直径岩芯样本的渗透率、水合物饱和度、声速和机械性能。微型 MPCC 专为孔尺度测试设计，使用从较大岩芯切出的 0.375 英寸直径样本。两者都可以传输到 CT 扫描仪进行实时三维成像。在两个尺度上对含水合物样品进行测试和成像有助于缩小孔隙尺度和岩芯尺度表征之间的差距。PCXT 是 NETL 设计的在原位储层压力和温度条件下取回、运送、切割、分割岩芯和表征自然岩芯的装置。最近的实验研究专注于孔尺度在一定压力和温度条件下水合物形成和离解的过程。结果证实，将游离甲烷注入水饱和的沉积物中是形成高饱和度合成天然气水合物标本的有效方法。此外，实验表明在降压过程中高饱和储层容易发生堵塞，而通过热激发可以缓解这一问题。

2、在阿拉斯加北坡建立一个长期的生产测试场址。英国石油公司阿拉斯加石油勘探公司在 2018 年底与阿拉斯加石油技术资源公司签订合同，成功钻获了地层测试井 Hydrate-01，在该井中采集的随钻测井数据证实了两个高饱和天然气水合物储层的存在，其中较深的储层被认为是长期生产测试的极佳选择。Hydrate-01 将用作长期生产测试的监测井，未来将开发多个钻井以探索天然气水合物储层对降压的响应。

（岳芳）

ARPA-E 资助 3850 万美元支持天然气管道修复新技术研究

2月18日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布设立“快速封装天然气管道免密集更换”（REPAIR）主题研究计划，资助3850万美元开展天然气管道修复的新技术研究³，即通过开发智能涂层、管道内衬机器人工具等新技术，以修复老化的铸铁和裸钢天然气管道，确保天然气基础设施的安全性和先进性。本次资助项目具体内容参见表1。

表1 REPAIR 本次资助项目具体研究内容

技术主题	研究内容
“管中管”检测和分析技术	<ul style="list-style-type: none">•定义铸铁和钢管道故障模式并确定使用内层管道（“管中管”）的性能标准•对故障模式进行建模，并识别关键物理特性，开发测试方法•开发管道测试设备，并确定测试结果和故障机理之间的关系
智能涂层材料	<ul style="list-style-type: none">•开发智能涂层材料以修复天然气管道，包括：自修复材料，如嵌入式微胶囊；主动或被动式状态监控工具，将传感器技术集成到涂层结构中
涂层沉积工具	<ul style="list-style-type: none">•开发在管道内沉积涂层的工具，应最大限度减少对天然气管道运行的影响
管道完整性检查工具	<ul style="list-style-type: none">•开发预涂检查技术评估管道原始状态，包括确定可能阻碍管道修复的主要特征（如碎屑、液体、管道接头、弯头、变径管、阀门等）；确定会限制涂层沉积工具操作的管道缺陷（如裂纹、过度腐蚀、凹痕等）；通过数据可视化为操作员提供实时信息•开发涂层后检查工具，包括超声波测试（UT），用于测量涂层厚度并检测裂纹、分层、缩孔、孔隙和脱胶；声发射技术（AET），用于检测复合材料中的基体开裂、分层、剥离和纤维断裂；热成像技术；核磁共振（NMR），用于检测聚合物和复合材料中的缺陷、脱胶和固化程度
涂层及其沉积工具和完整性检查的集成	<ul style="list-style-type: none">•开发涂层材料、涂层沉积工具及完整性检查工具的集成系统，并对该系统进行示范试验
管道测绘、涂层/完整性/泄漏检测数据集成及数据管理/可视化	<ul style="list-style-type: none">•开发管道内测绘工具，理想状况下能部署在涂层工具或检查工具上•开发管道表面测绘工具，应具备检测金属和非金属物质的能力、对物体方向的敏感性以及可排除表面材料（如沥青和混凝土）的干扰•涂层/完整性/泄漏检测数据的集成以及数据管理/可视化，建立一个数据管理工具，确保涂层/完整性/泄漏检测数据能够与天然气公用事业公司的数据系统兼容，并可在管道修复过程中实时可视化

（岳芳）

³ Department of Energy Announces \$38.5 Million to Develop Technology to Rehabilitate Natural Gas Distribution Pipelines. <https://arpa-e.energy.gov/?q=news-item/department-energy-announces-385-million-develop-technology-rehabilitate-natural-gas>

DOE 支持开发燃煤电厂近零水耗技术

3月8日，美国能源部（DOE）宣布在化石能源办公室的“交叉研究计划”框架下资助150万美元⁴，支持开发燃煤发电的低水耗技术，以在循环运行条件下最大程度降低运行复杂性和发电成本，以加强燃煤电厂在干旱条件或农业用水需求较大情况下的竞争能力。

本次资助主要关注燃煤电厂的冷却技术，将开发先进干式冷却技术。北卡罗来纳大学夏洛特分校将负责开发、设计和评估一种坚固耐用的低成本系统，该系统可利用嵌入式、封装相变材料概念的透水混凝土改善燃煤电厂机械通风干式冷却塔或风冷冷凝器（ACC）的性能。该系统基于“储冷”概念，可在夜间环境温度较低（约15°C）时存储低温热量，并在白天高温时段（约40°C）使用其对进入干燥冷却塔/ACC的空气进行预冷却，可以改善冷却性能并降低冷凝器背压。

（岳芳）

⁴ U.S. Department of Energy Selects Technology Project to Receive \$1.5M for Near-Zero Water Consumption at Power Plants. <https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-selects-technology-project-receive-15m-near-zero-water-consumption>

清洁能源多能互补

DOE 资助 7400 万美元支持建筑节能前沿技术研发

2月10日，美国能源部（DOE）宣布资助7400万美元支持先进建筑节能技术研发⁵，旨在整合国家实验室、大学和企业研究力量来共同研究、开发和测试灵活高效的节能建筑和建筑系统技术，提高建筑物和电网能效，减少全美的建筑能耗。其中4770万美元用于开展“建筑能效前沿技术创新”主题项目研究，2630万美元用于支持“先进节能建筑技术和实践”主题研究项目。具体内容如下：

一、建筑能效前沿技术创新

1、弹性建筑技术

在确定的网络故障场景下，将通过采用基于强化学习的自适应模型预测控制体系结构，以确保在所有情况下安全且接近最优的闭环运行，提高建筑控制系统的自适应网络物理弹性。开发新型网络防御系统（具有网络攻击免疫功能的实时建筑平台）以通过多层预防、检测和自适应来确保与网络互联的能效建筑（GEB）的安全。利用安全约束优化和安全风险检测（BUILD-SOS）技术为建筑能源管理系统开发综合的网络威胁感知、分层防御以及抵抗攻击的控制解决方案。生成可公开获取的高保真数据集，这些数据集可用于衡量一组常用的商用建筑暖通与空调系统（HVAC）和蓄热设备的整体负载灵活性性能。使用基于尖端建模工具的先进测试技术来测量建筑设备的性能及其对建筑能效影响。使用新的以顾客为中心的控制算法创建与电网、网络互联的高效建筑设备性能数据集。将开发一种紧凑的能够独立运行的热能存储系统用于建筑的供暖，该系统使用热化学盐水化合物作为存储热能介质。探索一种低成本、可扩展的新技术来封装储热功能的新颖盐水化合物相变材料。采用低成本、高能量密度的盐水化合物和各种添加剂来提高这种储热材料的性能和可靠性，用于存储和调节建筑物中的热能。使用基于无机盐水化合物的相变材料和封装技术来开发用于建筑的多功能热能存储系统。开发基于生物的热能相变材料，这些材料能够从鱿鱼齿蛋白（PCM）中提取，可生产新型的热能存储材料。开发一种固态储能复合相变材料和热交换器。

2、节能暖通和空调技术

开发基于静电的水蒸气分离系统，用于分离空调系统中的潜冷和显冷。开发一种基于纳米结构的静电技术，通过在纳米级设备上分选分子来改善冷凝，从而克服静电除湿短板。开发基于热弹性理论的主动蓄热器，以推动热弹性冷却技术的发展。

⁵ Department of Energy Invests \$74 Million in Building and Construction Technologies and Innovations.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-invests-74-million-building-and-construction-technologies-and-0>

将二元流体喷射器和吸附技术进行集成耦合以开发天然气和丙烷双燃料热泵。天然气驱动的热泵和热电联产应用的换热器设计。开发一种高效的基于膜的离子液体吸收系统，以实现超高效的除湿和加热。

3、节能固态照明技术

将为固态照明应用开发效率更高的黄绿光 LED，相比以往的 LED 其正向电压和功率转换效率将得到改善。为固态照明应用开发稳定的无镉 InP 量子点变频器，以承受 LED 的高通量要求。开发用于高效和稳定的白色 OLED 的多功能光学输出耦合器，有望通过减少激子寿命来提高 OLED 的稳定性和寿命。开发创新的高效、长寿命和灵活的白色 OLED 制造工艺。通过使用全面的增强现实/虚拟现实 (AR/VR) 工具开发一种空间自适应且可调的照明控制系统。

二、先进的节能建筑技术和实践

1、综合性建筑翻新改造技术

将开发一种新型建筑外面板节能改造技术，该新面板技术集成了供暖和制冷功能，能够为家庭提供集中供暖、制冷服务。使用除湿膜来创造新颖的建筑幕墙一体化改造技术，以减少建筑的冷却和通风能耗。通过承包商和居民合作，对多住户的公共住房进行高效节能改造。使用集成真空隔热板技术开发下一代镶板类墙面改造。将设计和制造一个集成的机械系统吊舱，用于多住户建筑的全家庭镶板墙面改造。提出一个高效、弹性的改造解决方案，该方案能够集成太阳能以满足空间供暖制冷的需求。开发可定制的隔热板块，以降低低温、严寒等气候条件下低层住宅高性能外墙翻新改造的现场劳动力和安装成本。简化建筑模型、计算机辅助设计、计算机辅助制造转换，以及建筑围护结构改造的镶板类墙面改造生产流程。整合区域热泵的家庭面板改造技术。设计面板翻新的计算机工作流程，包括翻新前的数据收集、面板设计、异地制造和现场安装等内容。通过剪裁设计来优化纤维增强材料性能，设计节能、防潮的复合外包板，用于围栏改造；使用回收材料；开发能够实现模块化、数字化制造和快速装配的设计，以实现快速定制。开发一种嵌入墙壁的多功能热泵，带有用于电网响应和气候交互控制的能量存储系统。在自动化辅助下使用可充气的隔热材料创建建筑物围护结构，包括机器人塑料焊接机和三维重建，实现建筑围护结构改造。使用先进的增材制造技术来定制和生产节能、防潮的外面板，用于建筑改造。

2、创新的建筑技术

开发新的密封剂配方，该配方可集成并预安装到预制组件中，以减少现场面板和模块之间的接缝密封时间。开发一种新的集成工艺，用于非现场的基于镶板类墙面建筑系统的设计、制造和组装，以降低成本和施工时间，并提高零能耗单户住宅的性能。将增强的工厂自动化和集成信息技术系统应用于家庭生产设施模块化制造。

开发集成绝缘材料的钢筋混凝土结构的增材制造工艺，以提高能源效率。开发高性能真空隔热板模块化建筑系统。开发一个先进的零能耗模块化（ZEM）住宅建造系统，包括一个 ZEM 工厂和一个 ZEM 多家庭经济适用房单元的设计。评估并现场测试在住宅中提供空间供暖和制冷的新方法，以在确保不增加成本前提下，提高能效、耐用性和室内空气质量。

3、先进技术的集成耦合

建立一个由建筑商和施工团队等利益相关方组成的全国性协作机构，以加快创新高性能施工技术的开发、示范和标准化，重点关注模块化、场外和预制技术，以提高能源效率。在寒冷气候下对可变制冷剂流量（VRF）系统的能效性能和制冷剂泄漏进行现场验证。为现有的处于冷气候家庭中的混合热泵和熔炉系统开发并验证高级控件，提高能源效率和电网效益。提供先进的交互式劳动力培训计划，重点是先进技术、建筑科学以及设计和施工知识。在芝加哥单户住宅中进行先进节能技术的存量分析和技术的验证。针对大型商业建筑和复杂机械系统中的能源数据进行现场验证。在家庭能源改造计划中越来越多地采用无管式空气源热泵技术情况下，验证气候边界及其对电网的影响。在多住户家庭中对超高效（VHE）热泵 HVAC 系统和家用热水技术进行现场测试，以验证其主要性能指标和探索降低风险的方法。商业和多住户模块化建造技术与传统建造技术进行对比，并进行现场评估。对集成互联照明、自动遮阳和智能储能的建筑开展技术分析和现场验证。制定协议，以进行虚拟能源评估并为预制和模块化施工方法提供技术援助。制定一个互动式职业地图，用于追踪建筑工人的职业生涯，以培养建筑节能行业的人才。创建一个建筑节能与控制学徒计划，以提高建筑节能与控制技术的毕业生数量。开发一个可在全国访问的在线平台，可以为建筑工人提供终身指导的劳动力学习机会，以确保劳动力资源的可持续发展。为高中学生开发建筑科学课程，为退伍军人提供“新技能培训所”，针对房屋建筑工人开设两年制社区建设管理项目以及以节能为重点的继续教育计划。智能能源援助中心将为社区大学的讲师配备设备，以教育下一代劳动力了解最新的建筑能效技术和相关行业标准。

（廖明月 于小燕 郭楷模）

英国资助近 3700 万英镑推进交通电气化

3月4日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布投入 3670 万英镑支持一系列交通电气化项目⁶，以推进英国到 2050 年实现净零排放。本次资助一方面将投入 3000 万英镑用于建立 4 个新的尖端工业中心，以研发用于飞机、轮船和汽车的电动机，另外将投入 670 万英镑资助 14 个项目以确保汽车生产商等供应链终端买家获

⁶ Government backs cleaner planes, ships and automobiles with £37 million boost.

<https://www.gov.uk/government/news/government-backs-cleaner-planes-ships-and-automobiles-with-37-million-boost>

得开发电动机所需的零部件。项目具体包括：

1、尖端工业中心

3000 万英镑支持在纽波特、诺丁汉、斯特拉斯克莱德和桑德兰建立 4 个新的尖端工业中心，形成交通电气化尖端研究网络，将由纽卡斯尔大学牵头，汇集了英国的 21 所大学和 13 家研究机构，共同研发用于飞机、轮船和汽车的电动机。上述尖端工业中心将使用最先进的设备，通过虚拟产品开发、数字化制造和先进组装技术，推动开发全球领先的电动机测试和制造技术，研发的设备将涵盖电力电子设备、电动机和驱动器等。

2、推动电力革命挑战项目

670 万英镑支持 14 个“推动电力革命挑战”项目，以提升交通电气化供应链效率。这 14 个项目由 38 个企业承担，包括吉凯恩、捷豹路虎和劳斯莱斯等。其中一些代表性项目有：Belcan Engineering Services 公司主导的电动机项目，将开发飞机和汽车用电动机的制造技术；卡迪夫的化合物半导体中心主导的电力电子项目，将开发用于电力电子设备的半导体材料；驱动器项目，将使项目合作伙伴能够提高其制造驱动器的生产率，并使主要合作伙伴 Magtec 公司能够增加其对大型电动汽车（例如垃圾箱卡车）的电力传动系统的供应。

（岳芳）

钙钛矿材料助力量子点太阳能电池创下 16.6%世界纪录

当前有机无机杂化钙钛矿太阳能电池转换效率已超越多晶硅逼近单晶硅，然而高效钙钛矿太阳能电池的钙钛矿材料存在相分离不稳定问题，阻碍其商业化进程。因此，

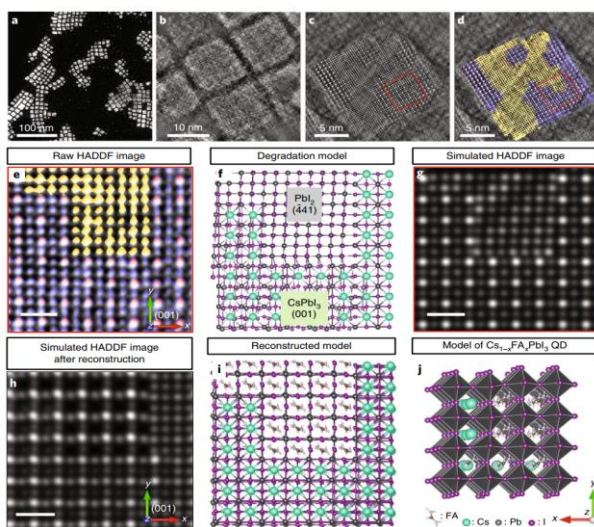


图 1 $Cs_{1-x}FA_xPbI_3$ 钙钛矿量子点微观表征图片

制备成分稳定的钙钛矿材料显得尤为关键。而胶体量子点形态的钙钛矿材料，相比于相同成分下的块体或薄膜形态材料，具有卓越的物相稳定性，但由于制备过程会产生大量缺陷抑制了电池性能，因此如何有效克服上述问题提升电池性能成为研究热点领域。

由澳大利亚昆士兰大学 Lianzhou Wang 教授研究团队牵头的国际联合研究团队利用配体辅助阳离子交换法快速制备甲脒（ FA^+ ）与铯（ Cs^+ ）混合阳离子钙钛矿量子点，有效控制了缺陷密度和相分离，获得了高质量稳定量子点，从而获得了高效太阳能电池器件，其认证光

电转换效率高达 16.6%，刷新了量子点太阳能电池世界记录（此前是 13.4%）。研究人员首先利用热注入法分别制备了铯铅碘（ CsPbI_3 ）和甲脒碘化铅（ FAPbI_3 ）量子点胶体。随后将上述配置好的胶体分别取出一部分与油酸（OA）混合反应并提纯，X 射线衍射测试显示，与 OA 混合反应后的产物仍然保留了钙钛矿相结构。光致发光光谱测试则显示，混合反应产物光致发光量子产率较单纯的 CsPbI_3 和 FAPbI_3 量子点都高，意味着通过 OA 混合反应有效抑制了表面缺陷。且随着 OA 浓度增加反应过程更短，量子产率越高。高角环形暗场像和计算模拟联合研究发现，混合反应的产物为 FA^+ 和 Cs^+ 混合阳离子钙钛矿量子点 $\text{Cs}_{1-x}\text{FA}_x\text{PbI}_3$ 。研究人员分析之所以出现上述现象，一方面 OA 作为 A 位阳离子的载体，可以实现 A 位阳离子在晶体与非极性溶剂环境中的交换和传输，另一方面 OA 与 A 位阳离子协同作用，填补晶体表面缺陷，保持晶体完整不被破坏。相比之下，在较高配体浓度下的阳离子交换反应所需时间有效缩短，所得量子点产物荧光量子效率大大提升。随后分别基于 CsPbI_3 、 FAPbI_3 和 $\text{Cs}_{1-x}\text{FA}_x\text{PbI}_3$ 量子点制备了钙钛矿太阳能电池器件并开展对比研究。光电化学性能测试显示，基于 CsPbI_3 和 FAPbI_3 量子点钙钛矿太阳能电池器件的效率分别为 9.6% 和 10.1%，而基于 $\text{Cs}_{1-x}\text{FA}_x\text{PbI}_3$ 钙钛矿量子点光电转换效率突破了 15%，达到了 16.6%，且通过了权威机构 Newport 认证，创造了全新的世界纪录。最关键的是，器件在模拟光源辐照下连续运行 600 余小时后仍可维持 90% 以上的初始效率，展现出了优异的稳定性。

该项研究通过油酸配体辅助阳离子交换反应制备了 FA^+ 与 Cs^+ 混合阳离子钙钛矿量子点，得益于油酸配体存在，一方面钙钛矿量子点能够快速形成，另一方面由于配体对晶体表面的钝化作用减少了表面缺陷抑制了非辐射复合，获得了高效稳定量子点，从而获得了创纪录的量子点太阳能电池。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》⁷。

（郭楷模）

⁷ Mengmeng Hao1, Yang Bai, Stefan Zeiske, et al. Ligand-assisted cation-exchange engineering for high-efficiency colloidal $\text{Cs}_{1-x}\text{FA}_x\text{PbI}_3$ quantum dot solar cells with reduced phase segregation. *Nature Energy*, 2020, 5, 79–88.

低碳化多能融合

IRENA 提出电力储能技术经济价值评估框架促进规模化部署

3月8日，国际可再生能源机构（IRENA）发布《电力储能价值评估框架》⁸报告，提出了电力储能技术经济价值的评估框架，以指导部署储能从而更有效集成波动性可再生能源。报告提出了五阶段的电力储能评估框架，选取了现实中的8种储能案例进行评估，确定了不同类型储能系统的技术和经济价值，为电力系统决策者、电网运营商和监管机构等各利益相关方提供了电力储能大规模部署的重要参考。主要内容如下：

一、电力储能的價值及部署障碍

1、电力储能将在能源转型过程中发挥关键作用

电力储能可以促进波动性可再生能源的集成，加速离网电气化并间接促进交通运输部门脱碳。不同的电力储能技术能够在不同时间尺度上提升能源系统灵活性，以容纳更多波动性可再生能源。在亚秒级尺度，抽水蓄能、压缩空气储能等技术可以为系统提供灵活的响应，并可减少系统对火力发电的依赖。从亚秒级到数秒，电池储能可以提供快速的频率响应，目前已部署在某些电力系统中。在数秒到数分钟级，电池、飞轮储能及抽水蓄能可为系统提供运行储备。在数分钟到数小时内，抽水蓄能、压缩空气储能和液流电池可用于负荷跟踪。在更长的时间尺度内，抽水蓄能和压缩空气储能可提供电力的长期存储，这对于集成高比例波动性可再生能源尤为重要。

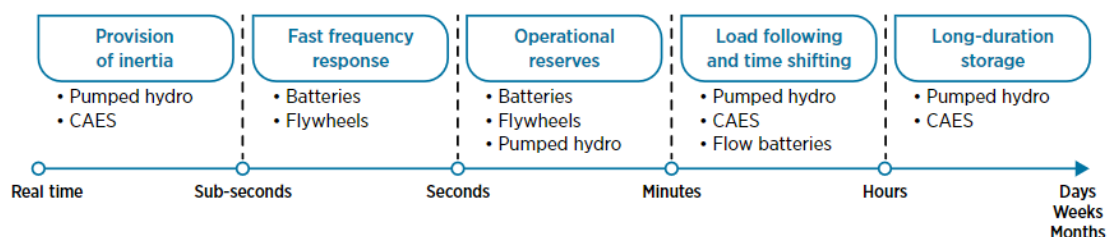


图1 电力储能在不同时间尺度提供的系统服务

电力储能能够提供的服务取决于其与电力系统的连接点。当与发电设施连接时，可实现在电价较高时售电，提供电网服务同时降低连接成本。当在输电网中连接时，电力储能可支持高比例波动性可再生能源并网，参与电力市场招投标，并在各种技术相应的时间尺度上提供辅助服务。当在配电网中连接时，电力储能除了可提供上述所有服务外，还可在低变电站中提供电力质量和可靠性服务，推迟对配电容量扩

⁸ Electricity Storage Valuation Framework. <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Electricity-Storage-Valuation-Framework-2020>

张的投资，并支持分布式可再生能源的集成。当连接电表后时，可支持用户使用其光伏设备的发电量，从而减少电费，提高电力质量和可靠性，并有可能通过聚合商参与能源管理、电力批发市场和辅助服务市场。

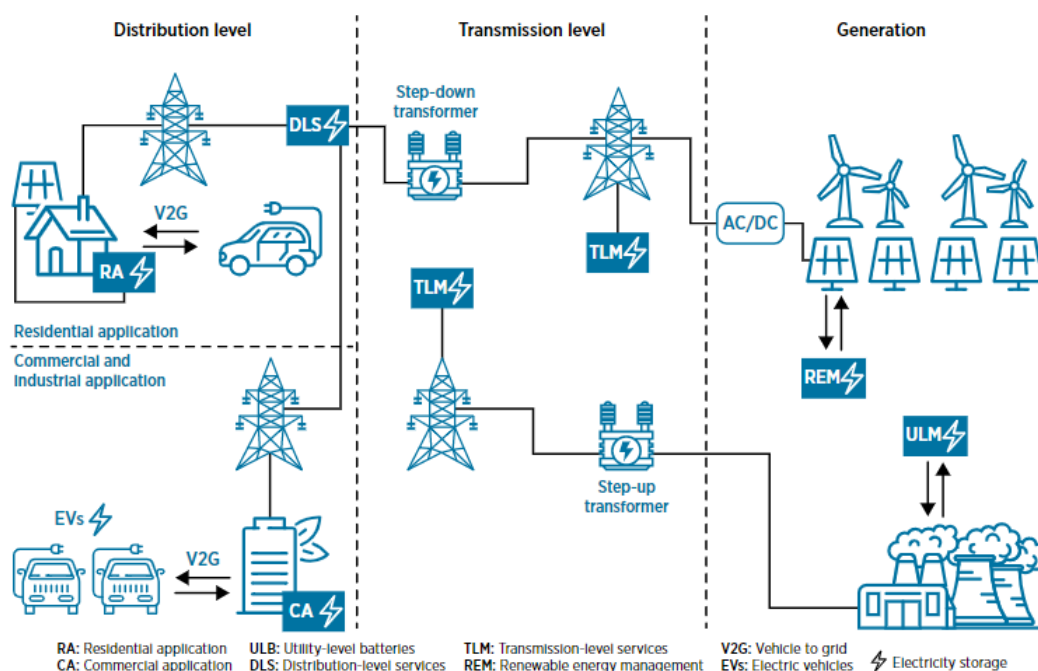


图 2 电力储能提供的电力系统服务

2、大规模部署电力储能的障碍

(1) **成本和技术成熟度**。当前电池成本正快速下降，其使用寿命和能量密度等技术参数正不断提高。目前抽水蓄能仍是部署规模最大的电力储能技术，但随着成本和技术成熟度的改善，电池有望在提高能源系统灵活性方面发挥关键作用。

(2) **电力储能的难以变现**。由于电网复杂性以及系统元素之间的动态交互，电力储能价值的公平分配和变现仍难以实现。需要使用先进的工具并开发适当的方法，以有效地指导决策者如何制定最佳政策，支持将储能设备所有者和利益相关方的储能收益变现。

二、电力储能价值评估框架

电力储能价值评估框架将采用五阶段方法，具体包括：

(1) **阶段 1**：确定储能可以为提高波动性可再生能源的集成比例提供何种服务。电力储能可直接或间接做出如下贡献：批发能源时移、能源供应容量、快速频率响应、一次和二次储备、频率调节、延迟输配电网升级、延迟扩容投资、零售能源时移和功率可靠性。

(2) **阶段 2**：对各种电力储能的技术和经济特性进行评分，以对其与阶段 1 中确定的服务适用性进行排名，为项目开发人员的技术选择提供参考。关键的技术、经济指标如表 1 所示。

表 1 电力储能价值评估的技术、经济指标

Technical
Efficiency (AC-to-AC) (%)
C-rate minimum
C-rate maximum
Maximum depth of discharge (%)
Maximum operating temperature
Safety (thermal stability)
Economic
Storage CAPEX (USD/kWh)
Power converter CAPEX (USD/kW)
Development and construction lead time
Operating cost (USD/kWh)
Energy density (Wh/kg)
Energy density (Wh/L)

(3)阶段 3: 将电力储能与能效、需求响应和新型化石燃料发电等技术相比较, 确定其为系统提供服务的价值。这一过程主要包括如下步骤: ①进行生产成本模拟, 以准确估算其价值和最佳储能容量, 以及研究期间(一年或多年)内系统的储能成本; ②重复上述步骤, 不采用储能技术, 系统将需要扩容以满足需求, 进行生产成本模拟以准确估算运营成本; ③比较前两步的系统总成本, 以确定电力储能对系统的总体价值。

(4)阶段 4: 假设阶段 3 模拟的市场价格被接受, 分析储能项目的实际运营, 该阶段通过组合不同的服务使项目的收益最大化。利用阶段 3 的系统边际价格, 可以优化电力储能项目可以提供的各种服务, 以最大程度地提高收益。

(5)阶段 5: 考虑电力储能项目在整个生命周期中的收益, 确定其在经济上的可行性, 如果不能则确定可能的补救措施。该阶段将对储能项目进行成本和收益分析。成本是指构建和运行电力储能项目的成本。收益是指系统级(不可货币化)和项目级(可货币化)收益。如果总收益超过成本, 但货币化收益小于成本, 则意味着项目开发商没有足够的经济动力建设该项目。在这种情况下, 需要政府采取政策干预措施以促进储能项目部署。

三、实际储能案例

报告选取了现实中的 8 种储能案例进行评估, 包括 7 种大型电力储能项目和 1 种小型用户侧储能项目, 主要类型如下: ①运行储备; ②灵活爬坡; ③能源套利; ④平滑波动性可再生能源; ⑤延缓输配电投资; ⑥降低高峰期电厂成本; ⑦实现离网高比例波动性可再生能源; ⑧用户侧储能。

1、运行储备

对于具有高比例非同步发电(例如波动性可再生能源)的电力系统, 其具有较低的惯性, 因此需要更快响应以防止由于功率不平衡产生的频率变化。在这种情况

下，电力储能是非常合适的技术，可以对任何功率不平衡提供快速响应。但是，可能需要开发能够提供这种快速响应的市场产品来激励其部署。英国已经实施了增强频率响应服务，在电力系统中部署了 201 MW 的储能设施以提供频率响应。南澳大利亚已部署了 100 MW/129 MWh 的特斯拉电池来提供频率控制辅助服务和能源套利服务。特斯拉称，该储能设施提供的频率控制辅助服务在 2018 年为系统节省了约 4000 万澳元，并避免了系统潜在的停电风险。澳大利亚能源市场运营商计划很快推出快速频率响应服务，特斯拉的电池可能也适合提供这一服务。德克萨斯电力可靠性委员会也在 2019 年 2 月批准了快速频率响应服务，将在 2020 年实施，其将在 0.25 秒内完全响应，并持续 15 分钟。

2、灵活爬坡

在具有高比例波动性可再生能源的电力系统中，这些资源的波动性和不确定性对负荷变化有极大影响。特别是当太阳能光伏的占比很高时，负荷曲线将按照所谓的“鸭形曲线”变化，这首次出现在加利福尼亚州的电力系统中。该曲线的特点是系统中的其他资源需要满足很高的爬坡要求。电力储能等灵活技术能够满足这类爬坡要求，从而使负荷曲线变平坦。加州独立系统运营商已开发出一种产品，旨在寻求必要的灵活爬坡以实时满足系统要求。其所部署的电力储能设施持续增加，到 2020 年总安装容量将达到 1.3 GW。目前很难确定电力储能是否提供了灵活爬坡服务，但是，一旦部署规模达到足够高的水平，就可以起到很好的效果，如图 3 所示。

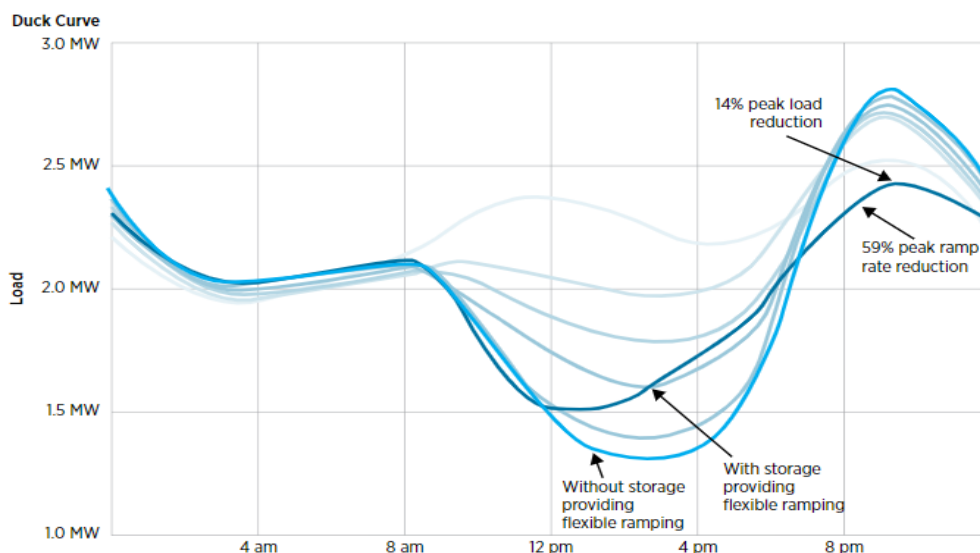


图 3 电力储能导致的灵活爬坡对鸭形曲线的影响：以部署 3 MW 储能为例

3、能源套利

随着波动性可再生能源占比提升到一定水平，电力市场迫切需要匹配实时供需。考虑到太阳能和风能的高度不可预测性，这非常具有挑战性。一种可行的解决方案是使用储能系统来提供灵活性并提高电网效率。储能系统提供了几种收益方式，其

其中之一就是能源套利，如在电价便宜时用波动性可再生能源向储能系统充电，而在电价昂贵时储能系统将再向电网供电。储能运营商面临的主要挑战是对发电量的预测误差。由于太阳能比风能具有更高的可预测性，因此可以将其与储能系统集成，并将太阳能电力从一天的高峰时段转移到其他时段，以平抑价格曲线。但是，单独使用能源套利可能不够，因为在一天、一周或一个月的较长时间内，高峰和非高峰差异之间需要较大的价格差，并且由于套利增加，价格差的幅度会减小。鉴于套利可能会随着储能部署规模的增长而饱和，因此需要通过提供电网服务来积累套利收入。将电动汽车连接到电网，可以充当并网储能设备，从而为电力系统提供更多服务。通过“车辆到电网”（V2G）技术，不仅可以提供能源套利，还可提供辅助服务。

当前世界最大的锂离子电池储能项目是南澳大利亚的霍恩斯代尔储能系统，部署于霍恩斯代尔风电场。电池设备由特斯拉公司生产，并由可再生能源公司 Neoen 管理，总资本成本为 9000 万澳元，存储容量为 129 MWh，额定放电量为 100 MW，充电量为 80 MW。在电池容量中有 119 MWh 用于能源套利，Neoen 将 30 MW 的放电容量用于商业运营。自 2017 年部署以来，该系统一直在提供各种服务，例如能源套利和监管以及应急频率控制辅助服务。该电池系统在 2018 年创造了约 2900 万澳元的收入，超出了预期。霍恩斯代尔电力储能系统已经在南澳大利亚的频率控制辅助服务市场中占据了 55% 的份额，并将辅助服务价格降低了 90%。

4、平滑波动性可再生能源

大多数储能项目的部署目的并非为了平滑波动性可再生能源，但可成为附加功能。对于公用事业规模电力系统，由于发电资源的地理位置分散，输电网中波动性可再生能源发电和需求的聚集能够形成平滑的净负载曲线。在配电层面，通过配电网的部署也会产生平滑的净负荷曲线。但是，如果在一年中的某些时刻，单个风电场或光伏发电场在区域或孤岛电力系统中提供了很大一部分电力，则可能需要进行平滑处理。由于净负载变化很大，如果不对波动性可再生能源的电力输出进行平滑处理，可能会使电力系统运行面临挑战。因此，波动性可再生能源平滑处理仅在特定情况下才有意义，储能装置不应仅用于这一目的，而是将平滑视为储能系统提供的多个服务之一。平滑波动性可再生能源输出对于孤岛电网尤其重要，运营商通常需要使柴油发电机保持在线运行状态，以缓解可再生能源发电中无法预料的增长。如果可以通过储能来管理此类爬坡，运营商就可以更好地管理柴油发电机，从而大大减少燃料消耗和温室气体排放。

当前已有一些用于平滑波动性可再生能源发电的储能项目。新墨西哥州的公共服务公司安装了 Prosperity 储能项目，该项目有两个目标：平滑太阳能光伏发电和提供能量转移。该项目由 500 kW 的太阳能电池板和两种类型的储能电池组成：用于能量转移的 0.25 MW/1 MWh 先进铅酸电池系统，以及用于功率平滑的集成电容器的

0.5 MW/0.35 MWh 先进铅酸电池系统。同时，使用了桑迪亚国家实验室开发的平滑算法，可以自动响应太阳能输出的变化。夏威夷部署了用于平滑风电的储能电池：NEC 能源解决方案公司在毛伊岛的 Auwahi 风电场（21 MW）附近安装了磷酸铁锂电池，容量为 11 MW/4.3 MWh；Kaheawa 风电场（51 MW）也部署了 11.5 MW/21 MWh 的先进铅酸电池。2015 年，法国启动了 CRE3 RFP 项目的招标，以在法国的岛屿上部署带储能的光伏发电设备。

5、延缓输配电投资

波动性可再生能源占比增加的主要影响之一是造成输配电网拥堵，电力系统需要提前进行规划，以避免这一现象发生。输配电网扩容是目前最直接、最常见的选择，但往往成本高昂，对环境造成破坏，有时甚至无法获得社会的认可。电力储能可以作为避免拥堵并延缓对输配电网的投资，一些项目已经安装并成功测试。例如，意大利国有电网公司 Terna 安装了 38.4 MW/240 MWh 的钠硫电池，用于延缓输电网投资。美国已经安装了一些项目以避免配电网升级（如缅因州的 Boothbay 项目）。法国传输系统运营商 RTE 正考虑在 RINGO 项目下于 2020 年调试一条“虚拟电力线”。RTE 公司会将三个 12 MW/24 MWh 电池系统放置在电网拥堵的三个站点，以吸收过量的波动性可再生能源发电量。前三年储能电池装置只能作为“虚拟电力线”运行，此后它们还将提供其他服务。德国系统运营商 TenneT 与电池制造商 Sonnen 和 IBM 于 2017 年启动了一个试点项目，他们使用区块链和家用电池系统吸纳了德国北部的部分过剩风能。Sonnen 使用其 Sonnen Community 设备和 IBM 的区块链技术构建了“虚拟电力线”，使系统运营商和电网用户都从中受益。美国加利福尼亚州的一家公用事业公司与格林史密斯（Greensmith）一起安装了 2 MW/6MWh 的电池储能系统，以应对高峰需求避免进行配电网升级投资，此外，其配备的控制系统使得该电池系统还可以参与其他辅助服务。美国缅因州通过安装 500 kW 的 6 小时储能电池系统避免了输电系统升级，节省了 1200 万美元资金。亚利桑那州安装了两个 1 MW/4 MWh 电池模块，以避免对庞金森特偏远社区的 20 英里配电线路的投资。研究机构 Navigant Research 称，为避免输配电网拥堵，截至 2017 年，全球已投运了约 331.7 MW 的储能项目，预计到 2026 年将达到 14 324 MW。需要注意的是，在某些情况下，储能可以避免对输配电系统进行投资；但是，根据系统需求，可能仍然需要建立新的输配电线路。

6、降低高峰期电厂成本

系统运营商必须确保电力系统具有足够的容量来始终满足峰值需求，但集成高比例波动性可再生能源可能导致系统发电容量过剩。对电网供应安全性的投资可能是部署储能的动力之一。英国已经通过容量机制安装了储能系统，意大利和加拿大已经建立了容量机制，但尚未启动拍卖。可以使用储能来满足高峰需求，并避免对

发电厂进行投资。据美国马萨诸塞州估计，1766 MW 的储能设备将产生 23 亿美元的收益，其中 10.93 亿美元与降低峰值容量有关。这将延缓对应对高峰期发电厂的资本投入，并降低产能市场的成本。与太阳能光伏相结合可以使储能有效地替代高峰期发电厂，减少对高峰期发电厂的投资。美国佛罗里达电力和照明公司将在 2021 年之前安装 409 MW/900 MWh 电池系统以取代两家天然气发电厂，预计将成为世界上最大的电池装置。通过避免燃料成本，该电池储能系统有望为客户节省 1 亿美元，并且还将避免 100 万吨的碳排放。在这种情况下，储能可以使太阳能光伏的发电容量最大化，并将其转变为可调度的能源，以保障供应安全。

7、实现离网高比例波动性可再生能源

许多乡村地区和岛屿仍然严重依赖化石燃料，例如柴油发电。由于电力系统可靠性不足，居民只能在一天中的某些时段使用电力，而有经济能力的人则依靠柴油发电作为后备电源。根据当前太阳能光伏和储能电池系统的成本（并有望进一步降低成本），在偏远乡村和岛屿可再生能源是化石燃料的可行替代品，并且已成为成本最低的解决方案。对于在离网地区部署小型电网，电池储能系统可能尤为关键，该系统可以平衡风能和太阳能光伏等资源的波动性，以及将供应过剩时的发电量转移到供应不足时段。这是此类情况下电力储能最关键的价值，即通过将电力需求与波动性可再生能源电力供应分离，促进微型电网中的波动性可再生能源占比。其他好处包括：降低环境影响、减少对进口燃料的依赖以及增强能源独立性。此外，带有逆变器的电池系统可以为电网提供所有必要的服务，包括黑启动、频率和电压控制，以及提供电力储备应对太阳能光伏发电的不确定性和风能的预报误差。现有的水平技术及具有竞争力的成本将有助于在离网地区从 100% 柴油发电过渡到 100% 可再生能源发电。特斯拉子公司太阳城（SolarCity）在美属萨摩亚的 Ta'u 岛上安装了 1.4 MW 光伏微电网以及 6 MWh 特斯拉锂离子电池。该项目在一年内完成，可提供三天的电力自主供应，因此大大减少了柴油发电机的使用。美属萨摩亚以及太平洋、加勒比海和印度洋的许多岛屿，正在从基于化石燃料的电力系统过渡到基于可再生能源的电力系统，电池储能系统成为关键技术推动力。

8、用户侧储能

近年来，传统电网模式已经向智能电网转型，在智能电网中，消费者能够使用自己的可再生能源并直接与电网互动。在这种情况下，为了最大程度地实现自我消费，并使消费者和电网受益，电池等用户侧电力储能可能是至关重要的资源。用户侧电力储能可减少消费者的用电成本并提供备用电源，还可以为电网提供灵活性并推迟对电网和高峰期发电厂的投资。目前，用户侧电力储能已经在德国等地部署：到 2018 年夏季德国已经部署了超过 10 万个家用储能设备，预计到 2020 年还将翻一番；澳大利亚在 2017 年安装了 21 000 个家用电池，其目标是到 2025 年安装 100 万

个家用电池系统。也有一些电力储能项目能够同时使用户和系统运营商受益。需要制定监管框架以激励用户侧储能的部署，包括：①聚合商的参与，可以通过向虚拟电厂提供服务以增加用户侧储能的价值；②分时电价，将确定储能系统从电网充电的最经济时间；③净计费方案，将增加用户侧储能向电网充放电获得的收益。

（章奇 岳芳）

日本建成全球最大的可再生能源电力制氢示范厂

3月7日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布由其牵头，东芝能源系统与解决方案公司、东北电力株式会社和岩谷产业株式会社共同参与的全球最大规模（10 MW）可再生能源电解水制氢示范厂（FH2R）在福岛顺利竣工⁹，该示范厂由20 MW光伏电站和10 MW级别电解水制氢系统组成，在额定功率下运行该厂每小时产氢量可达1200 Nm³。示范电厂将通过调整制氢设备产生的氢气量来调整电力系统的供需平衡，以及如何实现在不使用蓄电池的情况下最大限度地利用波动性可再生能源，并建立清洁、低成本的制氢技术，也即探索将电力系统的需求响应和氢气供需与具有不同运行周期的设备相结合的最佳运行控制技术。制备的氢气将主要使用压缩氢气拖车和可搬式超低温容器进行运输，提供给福岛县和东京等地区的客户，用于固定燃料电池的发电、以及燃料电池汽车和燃料电池公共汽车等领域。

编者按：日本政府于2017年12月颁布《氢能基本战略》指出，随着可再生能源的引入和输出量的增加，利用可再生能源电力制备氢气（Power-to-Gas）是进行过剩能源储存的关键手段。因此，对于氢气的能量存储和利用，不仅要利用电力系统的供需平衡调节功能（需求响应）来最大化利用可再生能源，而且还要根据氢气的供需预测来优化系统的运行。为了探索制氢/储氢与电源需求平衡调整的最佳组合，日本NEDO联合东芝能源系统与解决方案公司、东北电力株式会社和岩谷产业株式会社于2018年在福岛县浪江町开建了世界最大规模的可再生能源电力制氢示范厂（FH2R）。其中东芝负责监督整个项目和整个氢能管理系统，东北电力株式会社负责电网能量管理系统（EMS）和数据采集与监视控制系统（SCADA）相关事宜，岩谷产业株式会社负责氢气需求、供应预测系统搭建，以及氢气的运输和存储事务。

（郭楷模）

⁹ The world's largest-class hydrogen production, Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) now is completed at Namie town in Fukushima. https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html

具备亲水和疏水双通道异质催化剂实现高效 CO₂ 催化还原

利用可再生能源电催化 CO₂ 还原成燃料或高价值化学品一方面能够减少温室气体，同时又可以解决能源问题，可谓一举两得，因此该转化技术得到了全球广泛关注。然而由于受到气体（如 CO₂、CO 都是疏水性）在电解液中传输扩散到催化剂表面速度缓慢的影响，整个催化转化反应的产率不高。因此亟需解决上述问题，提升转化效率从而推进该技术的商业化。

由多伦多大学 Edward H. Sargent 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计开发出了一种金属催化剂-离子聚合物体异质结（CIPH），得益于离子聚合物疏水和亲水功能以及离子传输特性，这种新型结构的复合催化剂能够实现气体、离子、电子高效分离运输，可将气体和离子的传输范围从传统的数十纳米扩展到微米级，从而实现了在极高电流密度下 CO₂ 高效电催化还原为多碳产物。研究人员从燃料电池的隔膜全氟磺酸离子聚合物（PFSA）获得启发，由于 PFSA 既含有亲水基团（-SO³⁻），又含有疏水基团（-CF²）。因此如果将这种离子聚合物溶液涂覆在 Cu 催化剂表面，就可以通过其疏水结构运输气体，同时通过亲水结构运输水和离子。为此研究人员制备了含有 PFSA 的极性溶剂，随后通过旋涂方法将其沉积在负载于多孔聚四氟乙烯（PTFE）骨架上的 Cu 催化剂薄膜表面，形成复合的 CIPH。冷冻电镜表征显示离子聚合物 PFSA 均匀地沉积在了 Cu 催化剂薄膜表面，且厚度在 5-10 nm 之间。接着采用拉曼光谱测试显示，CIPH 分别在 733、1005 和 1130/cm 出现了吸收峰，分别对应于 -CF² 和 -SO³⁻ 两种官能团，前者属于疏水基团，后者属于亲水基团。为了探究离子聚合物 PFSA 对催化剂性能影响，研究人员制备系统基于不同金属催化剂的 CIPH。首先制备了基于 Ag 金属的 CIPH 将其置于反应溶剂中，发现其催化还原 CO₂ 电流密度高达 400 mA/cm²，远远高于无离子聚合物的纯 Ag 催化剂（54 mA/cm²）。随后研究了基于 Cu 金属的 CIPH，实验出现了类似 Ag 金属的情况，基于 Cu 金属的 CIPH 催化还原 CO₂ 电流密度较无离子聚合物的 Cu 催化剂也显著提升，从 50 mA/cm² 增加到 510 mA/cm²。原位拉曼光谱显示，催化电流显著增长的主要原因是 CO₂ 气体通过离子聚合物异质结的疏水区域扩散，速率相对于电解液扩散大幅提高近 400 倍，扩散范围从以往实验的数十个纳米延长到了数个微米。为了进一步提升催化剂性能，研究人员进一步对催化剂结构进行改进设计出了三维结构的复合催化剂，即先将 Cu 纳米颗粒沉积到多孔的 PFSA 薄膜上，随后将该薄膜沉积在 PTFE/Cu/离子聚合物催化剂表面。随后在 7 摩尔的氢氧化钾溶液中进行 CO₂ 催化还原，结果显示催化电流密度高达 1.3 A/cm²，催化还原产物主要为乙烯和乙醇，且乙烯的法拉第效率在 65%~75% 之间，产氢副反应效率低于 10%，表现出了优异的 CO₂ 催化还原为多碳产物特性。

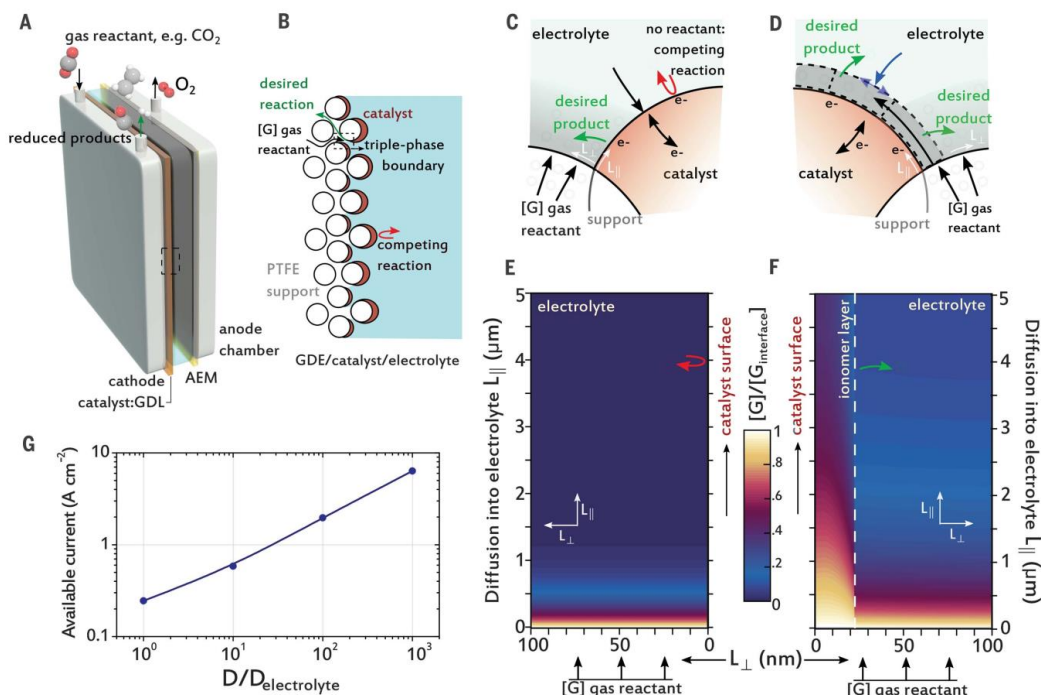


图 1 金属催化剂-离子聚合物体异质结 (CIPH) 气相催化和气体解耦传输机制示意图

该项研究精心设计制备了一种金属催化剂-离子聚合物体异质结材料，受益于离子聚合物的疏水和亲水基团，使得金属催化剂-离子聚合物体异质结复合催化剂具备气体、离子、电子高效分离运输，进而显著提升了电催化 CO_2 还原到多碳产物产率，为设计开发高效稳定的 CO_2 电催化剂指明了新方向。相关研究成果发表在《*Science*》¹⁰。

(郭楷模)

低成本无隔膜锌锰液流电池展现出规模化储能应用潜力

液流电池在大规模储能应用领域具有广阔应用前景。但该类电池目前存在诸如活性物质浓度低、能量密度低、离子选择性膜和电池系统成本高等问题，急需开发低成本、高安全性、可大规模应用的新型液流电池。而锌锰液流电池就是极具发展前景的低成本高性能新型液流电池，但由于其循环过程中正极的氧化还原反应可逆性差，导致容量衰减严重，因此亟需解决上述问题开发出可充电的锌锰液流电池。

¹⁰ Arquer F. P. G, Dinh C.-T., Ozden A, Wicks J, et al. CO_2 electrolysis to multicarbon products at activities greater than 1 A cm^{-2} . *Science*, 2020, 367, 661-666. DOI: 10.1126/science.aay4217

由斯坦福大学 Yi Cui 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计出了一种新型锌氧化锰 (Zn/MoO_2) 液流电池, 通过正极 ($\text{Mn}^{2+}/\text{MnO}_2$) 和 (Zn^{2+}/Zn) 溶解/沉积反应

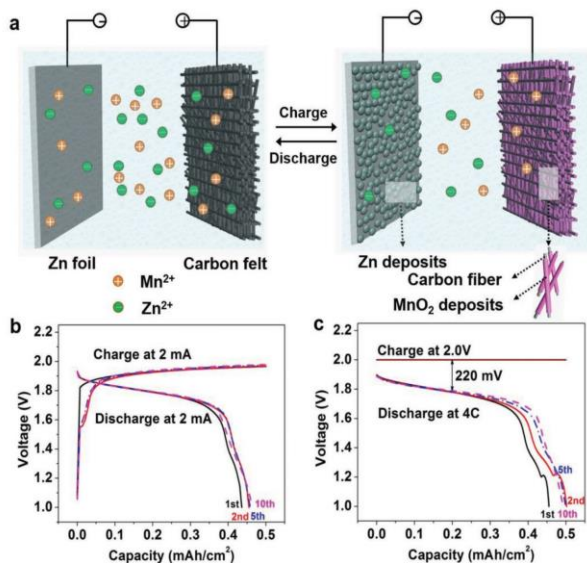


图 1 Zn/MoO_2 液流电池机构示意图及电化学性能表征

进行储能, 且该电池体系能够将正极电解液与负极电解液混合无需隔膜, 可有效降低电池成本。电池放电电压可高达 1.78 V, 且具备了优异的倍率性能 (10C) 和循环稳定性 (1000 次循环无衰减), 最关键是该电池体系可以很容易放大到电网规模的堆栈电池 (1.2 Ah), 且循环 500 圈后仍可保持近 90% 的初始容量, 展现出强劲的大规模储能应用潜力。研究人员以碳毡、锌箔分别作为正负极集流体, 分别以硫酸锰 (MnSO_4)、硫酸锌 (ZnSO_4) 溶液作为正、负极电极液,

且直接将两种电解液混合而无需在两极之间添加任何隔膜, 由此构建出一种无隔膜的新型 Zn/MoO_2 液流电池。该电池的工作机理是正极 ($\text{Mn}^{2+}/\text{MnO}_2$) 和负极 (Zn^{2+}/Zn) 溶解/沉积反应: 充电时, Mn^{2+} 离子扩散并氧化为固态 MnO_2 沉积在正极上, 而 Zn^{2+} 离子则在负极上被还原成 Zn。在充电状态下, 正负极均为固态, 彼此之间不发生物理接触, 无需离子选择性隔膜, 可以显著降低电池成本。放电时, 正极形成的 MnO_2 可逆地溶解为 Mn^{2+} 离子、负极沉积的 Zn 溶解为 Zn^{2+} 离子返回到电解液中。随后研究人员分别在恒电流和恒电压两种模式下对电池进行充放电以测试其电化学性能。在 2.0 mA 下恒流充电时, 在 0.5 mAh/cm^2 的比容量下, 相应的放电平台约为 1.78 V。随后在 2.0 V 恒电压进行循环测试, 实验结果显示该液流电池具有良好的循环稳定性, 4C (2 mA) 倍率下循环 1000 余次后, 容量基本无衰减。电池能否满足规模化储能需求的一个关键因素是其是否具备高的单位面积比容量, 为此研究人员将比容量从 0.5 mAh/cm^2 分别提升到 1 mAh/cm^2 , 测试其电化学性能, 实验显示首次循环库伦效率约为 87%。随着充放电的进行库伦效率逐渐提高, 最终稳定在 97%, 且循环 500 次后容量无明显衰减。为了探究其大规模储能应用潜力, 研究人员将该 Zn/MoO_2 液流电池进行放大, 组建成一个 1.2 Ah 的堆栈电池测试电化学性能, 发现当电池充电到 1.2 Ah, 再以 500 mA 的电流放电时, 其放电比容量可达到 1.1 Ah, 库伦效率为 92%。且该堆栈电池充电到 1.2 Ah 后以 1 A 的电流放电时, 循环 500 圈后其库伦效率为 89.7%, 表现出优异稳定性。

该项研究设计开发了一种全新的无隔膜锌锰液流电池, 得益于正极 ($\text{Mn}^{2+}/\text{MnO}_2$)

和负极 (Zn^{2+}/Zn) 溶解/沉积反应, 实现了稳定可逆循环, 且其很容易放大到电网规模的堆栈电池, 具备了商业潜力, 有望替代全钒液流电池降低电网储能成本。相关研究成果发表在《*Advanced Energy Materials*》¹¹。

(郭楷模)

¹¹ Guodong Li, Wei Chen, Hao Zhan, et al. Membrane-Free Zn/MnO₂ Flow Battery for Large-Scale Energy Storage. *Advanced Energy Materials*. 2020, DOI: 10.1002/aenm.201902085

能源战略研究

特朗普政府公布 2021 财年预算纲要 能源部预算 354 亿美元

2月10日,美国总统特朗普公布了2021财年联邦政府4.8万亿美元的预算纲要¹²,其中提议美国能源部(DOE)预算总额为354亿美元,较2020年实际经费下降了8.1%,旨在通过对能源科技创新投资,强化美国能源技术的全球领先地位,促进美国能源独立,保障国家安全和经济持续增长;以及更好地应对国家安全和核环境管理保护方面的挑战,履行核安保和网络安全方面的国家责任,推进核安全事业现代化以及加强能源基础设施的网络安全;大力支持DOE开展支撑美国未来工业发展需求的前沿技术交叉研究(如AI、大数据、量子信息科学等)。具体内容如下¹³:

1、能源技术创新研发相关计划的预算为36亿美元,用于支持DOE各国家实验室开展跨部门合作,开展颠覆性能源技术研发,以实现新一代能源技术的突破和部署,助力美国构建一个更加弹性、安全的现代化能源系统,推进美国能源独立。主要包括:

(1)总计为能源效率和可再生能源办公室(7.2亿)、化石能源办公室(7.31亿)和核能办公室(13亿)三大业务部门提供超过27亿美元资金,重点资助早期的新型能源技术研发,主要包括:“先进储能大挑战计划”推进先进储能新技术研究,以提升电网灵活性和保障电网运行稳定性;先进燃煤系统和碳捕集、利用和封存(CCUS)技术研发;开展多功能先进实验堆建设,新建一个铀储备区,以保证国内核反应堆燃料稳定供应。

(2)电力办公室预算1.95亿美元,推进电网现代化技术研究,其中4000万美元用于电力储能技术开发。

(3)网络、能源安全和应急响应办公室预算1.85亿美元,开展先进的网络安全技术研究,提升美国能源系统抵御网络攻击和自然灾害侵袭的能力。

2、DOE基础科学研究和大型科技基础设施建设运维的预算为58亿美元,持续推进能源基础前沿研究、国家实验室基础设施完善和大型科技基础设施的建造和运维工作。预算的重点包括:

(1)2.37亿美元用于量子信息科学研究,探究量子计算机的工作原理,开发出超越经典计算机的量子计算机,支持量子互联网的早期研究。

(2)4.75亿美元用于建造百亿亿次超级计算机,计划于2021完成建造并部署

¹² A BUDGET FOR AMERICA'S FUTURE FISCAL YEAR 2021. https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2020/02/budget_fy21.pdf

¹³ President Trump Releases FY 2021 Budget Request. <https://www.energy.gov/articles/president-trump-releases-fy-2021-budget-request>

一台，2022年再部署一台，以确保美国在超级计算领域的全球领导地位。

(3) 1.25 亿美元用于人工智能 (AI) 和机器学习研究，较 2020 年预算大幅增长 5400 万美元，以提高 AI 和大数据技术的安全性、可靠性，开发相关的软件、工具，推动其在 DOE 实验室的部署和应用。

(4) 4500 万美元用于加强材料和化学基础研究，以支持美国下一代微电子领域研究，确保获取可信可靠微电子产品用于未来的计算和存储。

(5) 其余资金将用于大型科技基础设施平台的升级和建造工作，包括阿贡国家实验室先进光源 (APS) 设施、劳伦斯伯克利国家实验室先进光源 (ALS) 设施、斯坦福大学“飞秒硬 X 射线激光装置” (LCLS-II-HE)、橡树岭国家实验室散裂中子源 (SNS) 改造升级，以及布鲁克海文国家实验室第二代电子同步辐射加速器 (NEXT-II) 建造和纳米科学研究中心重组项目。

3、国家核安全相关技术研发的预算为 269 亿美元，主要用于 DOE 下辖的国家核安全管理局 (NNSA)、环境管理办公室和核遗产管理办公室开展相关研究活动。主要包括：

(1) NNSA 获得 198 亿美元预算，较 2020 年上涨了 20%，占 DOE 预算总额一半以上 (55%)。主要预算内容包括：95 亿美元用于推进美国核武库现代化事业：其中 43 亿美元用于维持库存，以确保所有武器均能达到作战标准，以及拆除和处置从武器库中退役的武器及其部件；25 亿美元支持核部件和战略材料的制造现代化活动，包括在洛斯阿拉莫斯国家实验室 (到 2026 年每年生产 30 个) 和萨凡纳河国家实验室 (到 2030 年每年生产 50 个) 场址进行钚弹芯生产，以满足国防部需求；44 亿美元用于改造升级老化核武库基础设施，改善恶化的工作条件、设备和设施，继续推进基础设施的现代化；17 亿美元用于国家核安全局旗下核安全企业的人身安全、信息技术、网络安全以及其他对 NNSA 核安全事业有支持作用的一系列技术研发工作；20 亿美元用于防止核扩散事业，包括核反恐与应急响应，防止有人非法获得核武器或核武材料而带来的核威胁，应对核泄露事件；17 亿美元用于支持海军核动力反应堆研究，为美国海军提供安全、高效与一体化的核动力推进系统，继续为哥伦比亚级潜艇装备反应堆芯提供资金，为 S8G 原型反应堆补充资金。

(2) 环境管理办公室获得 61 亿美元预算，主要用于 DOE 下属的分布在 11 个州 16 个场地的核废料清理工作：其中 50 亿美元用于国防环境清理，包括 17 亿美元支持萨凡纳河场地的液体废物处理，用玻璃化高放射性残液让其在容器内稳定不流动的方法以减少这些废物的危害，这些容器现存放在国防废物处理设施内；河流保护办公室 13 亿美元，以安全管理和处理现贮存于汉福特 (Hanford) 地下存储罐内大约 5600 万加仑的放射性废液与化学废液；2.76 亿美元用于非国防环境清理；8.06 亿美元用于铀浓缩去污与退役。

(3) 核遗产管理办公室预算 3.17 亿美元，其中 1.5 亿美元用于将场址使用补救方案的管理权限从美国陆军工程兵团转移的改革事业。

此外，在美国能源部 2021 年财政预算提案中，针对支撑美国未来产业发展的技术研发也提出了预算要求，因为这些技术是确保美国未来持续保持繁荣与本土安全关键技术。预算支持的重点研究领域主要包括：量子信息科学、含量子互联网的早期研究；人工智能与机器学习；先进制造技术；生物技术。

(于小燕 郭楷模)

IEA：新冠肺炎疫情短期内将影响全球石油需求

3 月 9 日，国际能源署（IEA）发布《2020 年石油市场分析及到 2025 年展望》报告¹⁴，分析预测了到 2025 年全球石油市场走势。报告指出，由于新冠肺炎疫情在全球蔓延影响了全球的经济活动，预计 2020 年全球石油需求将同比下降约 9 万桶/天，2019-2025 年全球石油需求将以年均 95 万桶/天的速度缓慢增长，比前十年水平大幅降低。报告还结合能源转型影响，分析预测了全球石油供应、炼油产品产量及交易情况，要点如下：

一、新冠肺炎疫情将在短期内影响全球石油需求前景

1、受新冠肺炎疫情影响，预计 2020 年全球石油需求将出现自 2009 年以来的首次下降。尽管中国的疫情将在第一季度得到控制，但许多其他国家的病例数还在上升。由于管控措施的严格程度不同，预计北美、欧洲等地区石油需求受疫情影响将小于中国。第一季度中国石油需求将受到极大打击，同比降低 180 万桶/天，全球石油需求则将下降 250 万桶/天。2020 年第二季度，中国经济形势的好转使得石油需求上升，将抵消其他地区石油需求降低，而 2020 年下半年全球经济将逐步复苏。整体而言，预计 2020 年全年全球石油需求将同比降低约 9 万桶/天。

2、预计到 2025 年全球石油需求增速将比前十年水平大幅降低。经历了 2020 年的艰难开局后，2021 年全球石油需求将出现反弹（增长 210 万桶/天），随后因运输燃料需求增长停滞而降低增长速度，2025 年的年增量仅为 80 万桶/天。总体而言，2019 年至 2025 年，全球石油需求将以 95 万桶/天的年均增速增长 570 万桶/天，远低于前 10 年的增长水平（年均增长 150 万桶/天）。

3、相比其他原油产品，预计到 2025 年汽油需求增长最少。2019-2025 年，预计全球汽油需求平均每年仅增长 9 万桶/天，由于汽车燃效标准提高和电动汽车的日益普及，2025 年汽油需求增速将放缓至 5 万桶/天。车辆效率的提高也将影响柴油需求，其在预测期内将以平均每年 11 万桶/天的速度增长。由于对其他产品的需求增长停滞不前，石化原料如石脑油、液化石油气（LPG）和乙烷将占石油产品需求增长

¹⁴ Oil 2020. <https://www.iea.org/reports/oil-2020>

的一半，平均每年增长 50 万桶/天。一次性塑料禁令和机械回收对石油需求影响很小，各国政府实施的措施将使 2019-2025 年石油需求减少 31.5 万桶/天，相当于减少了石油需求增量的 5%。

表 1 2019-2025 年不同石油产品需求预测（单位：百万桶/天）

产品	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	年均增速	年均增量
LPG/乙烷	12.6	13.0	13.3	13.6	13.9	14.1	14.4	2.2%	0.3
石脑油	6.5	6.6	6.8	7.0	7.3	7.5	7.6	2.8%	0.2
汽油	26.4	26.2	26.6	26.7	26.8	26.9	26.9	0.3%	0.1
航空燃油/ 煤油	8.0	7.9	8.1	8.3	8.4	8.4	8.5	1.1%	0.1
柴油	28.9	29.2	29.5	29.6	29.8	29.9	30.0	0.6%	0.2
残渣燃料	6.3	5.7	6.2	6.4	6.4	6.4	6.4	0.3%	0.0
其他产品	11.3	11.4	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7	0.7%	0.1
共计	100.0	99.9	102.0	103.1	104.0	104.9	105.7	0.9%	1.0

4、国际海事组织（IMO）关于燃烧排放标准的监管条例对石油需求的影响将增强。2020 年 1 月 1 日起生效的 IMO 新规定将船舶燃料油的含硫量限制在 0.5% 以内，根据实施至今的情况，IEA 将 2020 年和 2021 年超低硫燃料油的需求预测分别提升至 130 万桶/天和 210 万桶/天，而 2020 年高硫燃料油的需求将同比下降 180 万桶/天至 120 万桶/天，其后将由于许多船舶安装洗涤器而保持这一稳定需求。

5、亚洲地区将在全球石油需求增长中扮演更重要角色。2019-2025 年期间，由于 2020 年的新冠肺炎疫情以及车辆效率和电动汽车普及率提高，亚太地区的石油需求增长速度将放缓至平均每年 70 万桶/天。尽管如此，亚太地区对于全球石油需求增长的重要性将增强，其在全球石油需求增长中的占比将从 2010-2019 年间的 2/3 提升至近 3/4。非洲的石油需求年均增速最快（2.0%），但到 2025 年其石油需求仅为 480 万桶/天，相当于中国的 1/3。欧洲和北美的需求可能停滞，这意味着经合组织（OECD）的需求已经停滞不前。

6、新冠肺炎疫情导致中国石油需求增速放缓，将影响非 OECD 国家的总体增长。由于疫情的影响，预计 2020 年中国石油需求增量将急剧下降至 27 万桶/天，随后增长量在 2021 年由于经济复苏而出现反弹。然而，由于燃油效率提高、大城市对汽车保有量的限制，以及电动汽车数量的增加，中国的汽油需求增量将显著降低，到 2025 年仅为 6 万桶/天。加上卡车和客车替代燃料的开发影响柴油需求增长，到 2025 年中国石油需求增量将缩减至 23 万桶/天，年均增量为 30 万桶/天，为前十年（2010-2019 年）年均增量的一半。受到中国需求增长变缓的影响，2019-2025 年非 OECD 国家的石油需求增量将降至 94 万桶/天，相较于前十年水平（130 万桶/天）

显著降低。由于经济增长放缓和电力行业天然气竞争加剧，中东地区的石油需求在 2019-2025 年期间每年将以 5 万桶/天的速度增长，远低于前十年水平（12 万桶/天）。非洲和拉丁美洲的石油需求增长将保持强劲态势。

表 2 2019-2025 年不同地区石油需求预测（单位：百万桶/天）

地区	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	年均增速	年均增量
北美	25.2	25.3	25.4	25.4	25.5	25.4	25.4	0.1%	0.0
拉丁美洲	6.7	6.7	6.7	6.8	6.9	7.0	7.0	0.8%	0.1
欧洲	15.6	15.4	15.5	15.6	15.6	15.6	15.6	0.0%	0.0
非洲	4.3	4.3	4.4	4.5	4.7	4.8	4.8	2.0%	0.1
中东	8.4	8.4	8.6	8.6	8.6	8.6	8.7	0.6%	0.0
欧亚大陆	4.3	4.4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6	0.9%	0.0
亚太地区	35.6	35.4	36.8	37.7	38.4	39.1	39.8	1.9%	0.7
世界	100.0	99.9	102.0	103.1	104.0	104.9	105.7	0.9%	1.0

二、到 2025 年全球石油供应将与需求同步增长

1、美国仍将引领全球石油供应增长。2019-2025 年全球石油生产能力将增长 590 万桶/天，可满足石油需求增长。到 2025 年，美国仍将是石油供应增长的最大来源，占到全球石油供应增量的 55%，比 2019 年增长 250 万桶/天，达到近 2000 万桶/天。

2、随着油价下跌，美国的石油供应将趋于稳定并有下降风险。继 2018 年石油产量创纪录增长超过 220 万桶/天后，石油生产商削减支出并减少了钻探活动，使得 2019 年美国石油生产量增速降至 160 万桶/天。预计 2020 年石油生产商仍将继续削减开支。另外，相比其他供应来源，美国轻质油生产对油价变化更为敏感，近期原油价格下跌将对其轻质油生产产生重大影响。因此，美国石油产量将从 2022 年开始失去增长动力，非欧佩克国家的石油产量也将因此而减少。

3、中东仍将是全球石油市场的重要供应国。随着美国预计在 2022 年石油产量增长停滞，中东国家由于成本相对较低将增加产量以维持市场平衡。预计到 2025 年，非欧佩克国家的石油总产量将增长 450 万桶/天，欧佩克国家产能则将增长 120 万桶/天。到 2025 年，对欧佩克原油的需求预计将达到 3060 万桶/天，比 2020 年初的产量高 200 万桶/天。然而，即使伊朗仍处于制裁中，欧佩克的闲置产能仍高于 300 万桶/天。

4、到 2025 年，上游资本投资将温和增长至 4910 亿美元。由于油价低迷，独立运营商的投资低于预期。2019 年，占上游投资 70% 的陆上石油投资继两年的增长后首次出现下降，美国页岩油投资则下降了 4%。与之相反，2019 年海上石油项目资本投资增加了 3%，获批项目数量也有所增加。大型油气公司中，只有埃克森美孚（ExxonMobil）宣布将大幅增加 2020 年的投资预算。总体而言，预计到 2025 年海

上石油投资增长将抵消页岩气投资的减少，使得石油行业上游投资缓慢增长 1.5%。

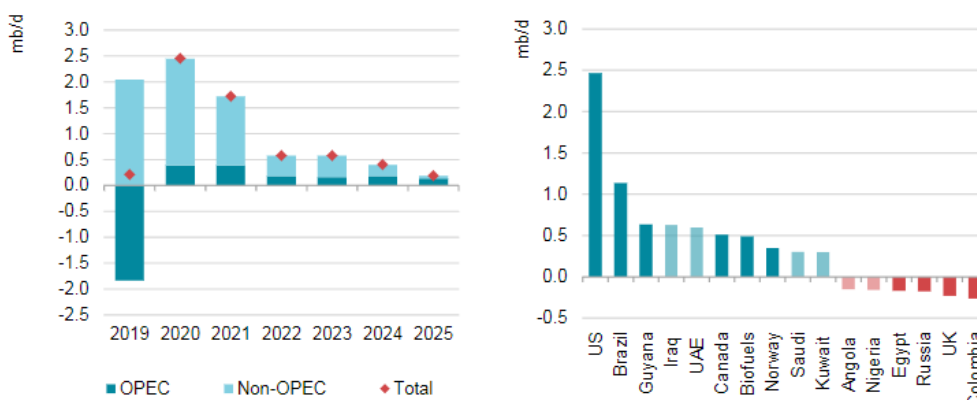


图 1 2019-2025 年全球石油供应走势预测 (单位: 百万桶/天)

5、石油行业将面临清洁能源转型挑战。2019 年至 2025 年，由于各国实施提高能效和减少碳排放的政策，以及电动汽车的普及，汽油和柴油需求增长将因之而减缓。清洁能源转型对于石油供应的影响仍不明朗，许多石油公司未来几年的投资策略侧重于短周期项目，并正在增加对生物燃料和可再生能源的投资。至今为止，大型石油公司往往只宣布了碳减排的长期目标。然而，投资者对降低碳排放的投资要求以及环保维权人士对新石油项目的阻碍，将使石油公司面临更大压力。需求、供应、投资策略和商业模式的不确定性将使全球石油行业面临重大挑战。在确保满足石油需求增长的同时，还必须解决降低排放和加强可持续性的问题。

三、到 2025 年亚洲地区石油进口依存度将增至 81%

1、2019 年全球炼油产品产量首次出现下降。尽管石油需求持续增长且产能增量接近创纪录水平，但由于较高的维护费用和更频繁的计划外停机，2019 年全球炼油产品产量出现近几十年来的首次下降。另外，即使原油价格偏低，炼油产品利润仍低于 2018 年水平。这表明，在经历 2017-2018 年产能过剩后 2019 年出现了去库存化。

2、全球炼油产品产量将随石油需求趋势变化。2019-2025 年，全球石油需求预计将增加 570 万桶/天，比前六年的增量少 230 万桶/天。因此，炼油产品产量增长速度也有所放缓，从前六年的近 480 万桶/天降至 440 万桶/天。天然气液体、生物燃料、煤基和天然气基替代燃料以及石化原料的供应将增加 150 万桶/天，而原油直接使用的供应量则将减少 20 万桶/天。

3、尽管能源转型日益影响炼油产品需求，炼油行业仍将继续提高产能。能源转型对于成品油需求增长模式的影响日益明显，预计到 2025 年炼油厂的主要产品—运输燃料的需求增速将急剧下降，轻质油产品需求增长最快，与轻质原油供应增长保持平衡。尽管如此，炼油厂仍在扩大产能，到 2025 年新增产能将达 620 万桶/天，高于精炼产品需求增长（440 万桶/天），超过 70% 的新增产能位于成品油净出口国

4、亚洲所有经济体的石油供应都将严重依赖进口。全球石油需求将在 2021 年

反弹，亚洲将占到 2025 年全球石油需求增量的 77%。与此同时，亚洲地区的石油产量将下降。因此，2025 年亚洲石油进口需求将超过 3100 万桶/天，石油进口依存度将增至 81%。亚洲国家将需要从更远的地区进口石油，从而增加了航行时间，并限制了应对紧急情况的灵活性，因此需要采取措施以增强石油供应安全。

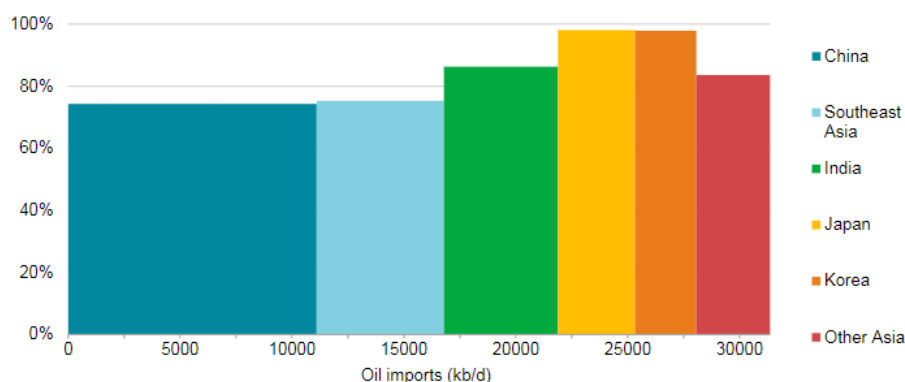


图 2 2025 年亚洲国家石油净进口量及对外依存度（左轴单位：%；右轴单位：千桶/天）

5、美国将成为海上原油净出口国，并超过俄罗斯成为最大石油产品出口国。美国原油出口增长将主导全球原油贸易发展，并将在 2023 年成为海上原油净出口国，墨西哥湾沿岸地区将扩大其作为中东以外第二大原油出口枢纽的作用。随后，由于美国原油产量增长趋于稳定，对中东原油出口的需求将增加。欧洲和南半球所有地区仍然依赖从美国、俄罗斯、中东和中国进口石油产品。美国将超过俄罗斯成为最大的石油产品出口国，中国则将超过印度成为亚洲最大的石油产品供应国。

（岳芳）

GWEC：到 2024 年全球风电累计装机有望突破 1000 GW

3 月 25 日，全球风能理事会（GWEC）发布《全球风能报告 2019》¹⁵指出，得益于技术进步和商业模式创新，风能行业正在快速发展，2019 年全球新增风电装机容量 60.4 GW，较 2018 年增长了 19%，是风电历史上增幅第二高的年份。其中陆上风电新增装机容量 54.3 GW，海上风电为 6.1 GW。截至 2019 年底，全球风电累计装机容量达到 651 GW。未来五年（2020-2024 年），随着全球越来越多的国家开拓风电事业以及风电成本持续下滑，全球风能产业将保持快速发展态势，预计到 2024 年全球风电装机容量再增长 54%，届时全球风电累计装机容量有望突破 1000 GW。

¹⁵ Global Wind Report 2019.

<https://gwec.net/gwec-over-60gw-of-wind-energy-capacity-installed-in-2019-the-second-biggest-year-in-history/>

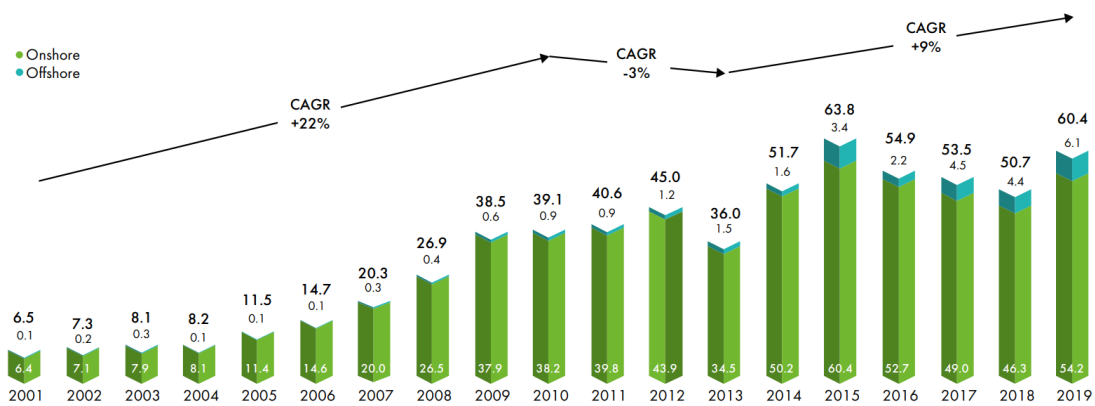


图 1 2001-2019 年全球风电新增装机容量发展态势 (单位: GW)

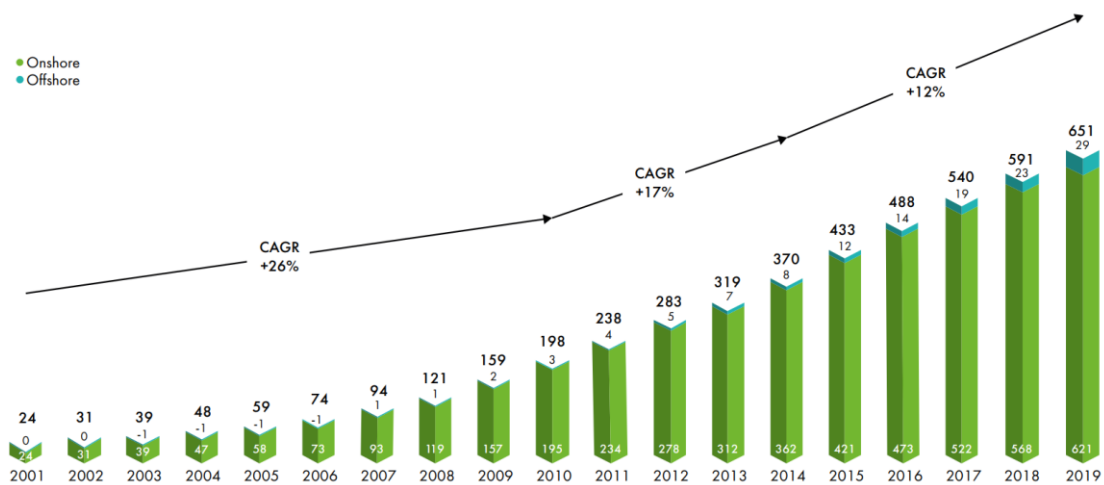
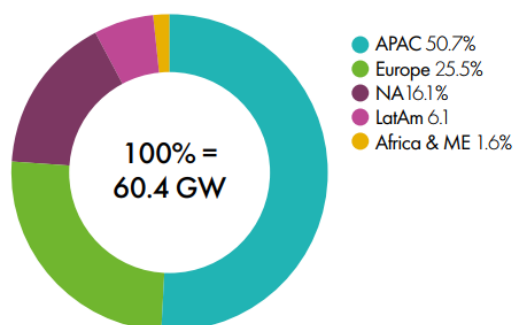


图 2 2001-2019 年全球风电累计装机容量发展态势 (单位: GW)

2019 年全球各地区风电装机容量都取得了不同程度的增长。其中亚太地区新增风电装机容量 30.6 GW，占同期全球新增装机容量的一半 (50.7%)，再次成为全球风电增长引擎；该地区增长的主要驱动力来自中国 (+26.2 GW) 和印度市场 (+2.4 GW)。欧洲以 15.36 GW 新增装机容量紧随其后，占到全球新增装机容量的 25.5%；主要是受到西班牙、瑞典和希腊强劲增长的推动。北美地区以 13.4 GW 的新增装机容量挤进榜单前三甲，占全球新增装机容量的 16.1%；其中美国表现最为抢眼，2019 年美国市场以 9.1 GW 装机容量再次经历了强劲增长的一年。在拉丁美洲，在巴西、阿根廷、智利风电装机容量增长驱动下，该地区 2019 年新增装机容量 3.68 GW，占全球新增装机容量的 6.1%。在非洲和中东地区，过去一年发展相对缓慢，仅新增了 0.94 GW 装机容量，较 2018 年减少了 2.6%。

New capacity 2019 installed by region (%)



New capacity 2019 and share of top five markets (%)

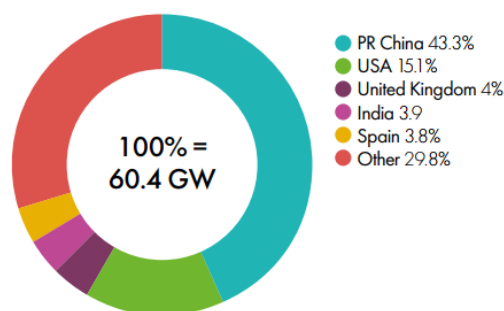
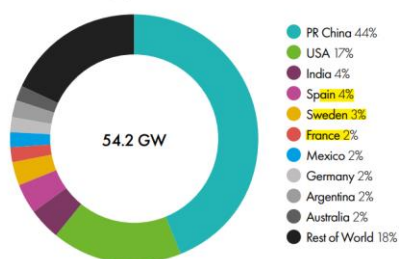


图3 2019年全球不同国家/地区风电新增装机容量前五的市场及其占比（单位：GW）

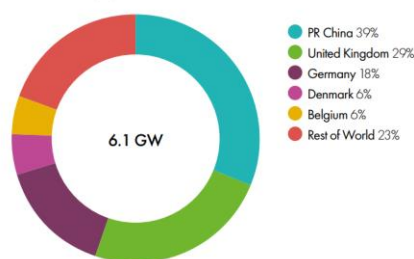
就累计装机容量而言，2019年全球前五大风电市场保持不变。其中中国风电累计装机容量依旧稳居全球第一，达到236.4 GW，占全球风电装机总量三成以上(36%)。紧随其后的是美国，累计装机容量达到135.4 GW。德国以61.1 GW累计装机容量位列第三，引领欧洲风电市场。印度和西班牙分别以55.8 GW和37.26 GW位列全球四、五位。上述五个国家累计装机容量之和占到了全球累计装机总容量的72%。

海上风电方面，2019年是该行业创纪录发展的一年，新增装机6.1 GW，累计装机容量达到了29 GW，占全球风电总装机量的4.4%。这一增长由中国带动，中国在海上新增装机容量方面位居第一，2019年新增了2.3 GW装机容量；英国和德国分别位居第二和第三，分别装机1.8 GW和1.1 GW。但就累计海上风电装机容量而言，英国仍位居榜首，为9.7 GW，占全球总容量近三分之一。

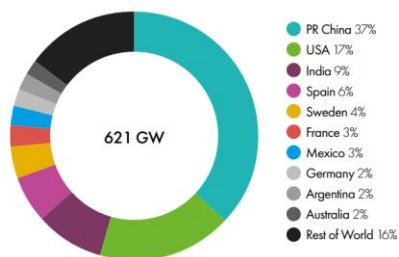
New installations onshore (%)



New installations offshore (%)



Total installations onshore (%)



Total installations offshore (%)

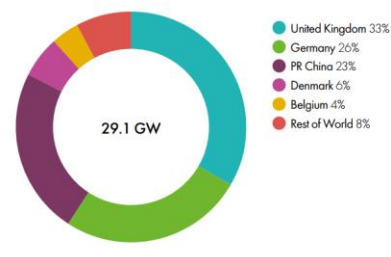


图4 2019年海上和陆上风电新增装机和累计装机前10位（或前5位）国家（单位：GW）

展望未来五年（2020-2024年），在政策激励、可再生能源发展目标和技术进步

多重因素作用下，全球风电市场将继续保持良好的增长态势。在此期间，全球风电装机容量年复合增长率（CAGR）预计达到 4%，即会新增 355 GW 装机容量。其中海上风电将会得到快速发展，CAGR 将会达到 19.5%，即年度新增装机容量将从 2019 年的 6 GW 增长到 2024 年的 15 GW，使得其在全球新增装机中的占比将从目前的 10% 增至 20%，主要归因于平准化电力成本（LCOE）的急剧下降和全球能源转型的加速使得海上风能的投资吸引力增强。但需要指出的是，目前的预测暂没有考虑新型冠状病毒肺炎疫情（COVID-19）的影响，主要是因为当前 COVID-19 对全球风能装机的全面影响仍不得而知。但 COVID-19 的爆发使得 2020 年全球供应链出现中断和项目执行暂停情况，这会对全球的预测带来一定影响。因此，GWEC 正在密切监视局势，会根据 COVID-19 对全球经济和能源市场潜在影响的实际情况对 2020-2024 年预测数值进行及时修正。

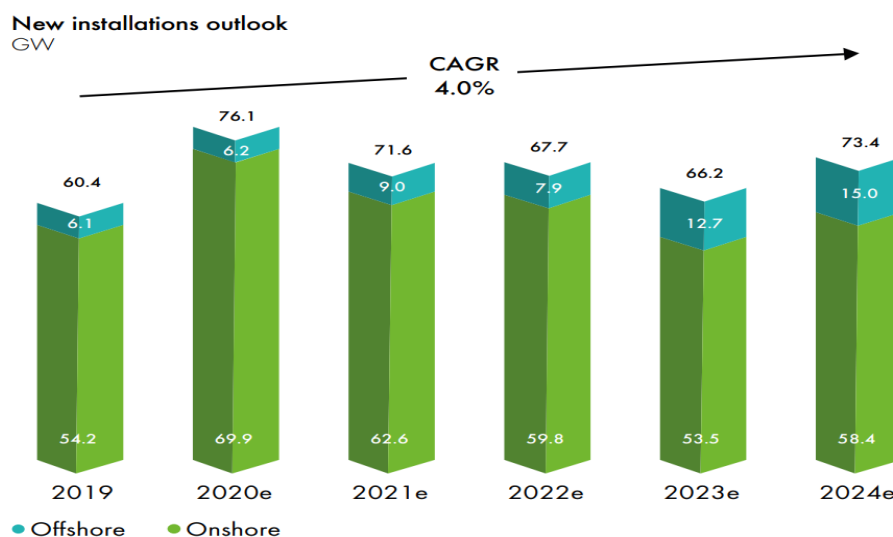


图 4 2020-2024 年全球风电新增装机容量变化趋势预测

（郭楷模）



《洁净能源科技动态监测快报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

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

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：energy@whlib.ac.cn