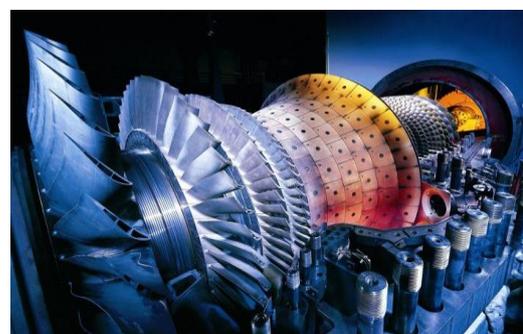


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- IHA：2018 年全球水力发电量达创纪录的 4200 TWh
- 欧洲光伏产业协会：到 2023 年全球光伏累计装机预计超 1000 GW
- 美国能源部评估地热发展潜力及对美国潜在影响
- 美欧日多国联合发起“国际氢能合作伙伴”倡议
- 英科学家设计全球首个热力学可逆的产氢反应器

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

IHA: 2018年全球水力发电量达创纪录的4200 TWh2
欧洲光伏产业协会: 2023年全球光伏累计装机预计超1000 GW ...3
美国能源部评估地热发展潜力及对美国潜在影响6

项目计划

美欧日多国联合发起“国际氢能合作伙伴”倡议7
DOE资助8900万美元支持能源领域制造技术研发创新8
DOE资助4600万美元推进小企业研发创新8

前沿与装备

英科学家设计全球首个热力学可逆的产氢反应器13
MXene/S复合电极抑制穿梭效应助力超长循环和稳定性14
新型原位微观表征技术揭示钙钛矿薄膜降解潜在作用机制15
开发超薄柔性固态电解质提高锂电池安全性16

本期概要

国际水电协会 (IHA) 发布《2019 全球水电发展现状报告》指出, 对全球水力发电的发展现状和趋势进行了系统分析: 2018 年全球水电新增装机容量超 21.8 GW, 累计装机总量达到 1292 GW, 累计发电量则达到创纪录的 4200 TWh, 创下了水力发电的历史新高。就地区而言, 东亚和太平洋地区再次成为水电发展最快的地区, 新增装机容量 9.2 GW, 其次是南美洲 (4.9 GW), 南亚和中亚 (4 GW) 位列第三。就国家而言, 中国以 8.5 GW 再次领跑全球水电新增装机排行榜, 紧随其后的是巴西 (3.9 GW) 和巴基斯坦 (2.5 GW)。与其他领域一样, 水电也迎来了数字化转型, 在全球范围内, 数字技术正大规模地整合到现有水电设施中以实现现代化, 提高电网灵活性和安全性。水电系统的数字化升级通过提供更高灵活性和增强控制性的辅助服务, 使抽水蓄能和传统水电能够与其他可再生能源共同运行。

欧洲光伏产业协会 (SolarPower Europe) 发布《2019-2023 年全球太阳能光伏市场展望》报告, 对全球及主要光伏市场的现状和未来五年的发展进行了展望分析: 2018 年是光伏发展史上极具里程碑意义的年份, 因为全球新增光伏装机容量首次突破 100 GW 大关, 达 102.4 GW。其中亚太市场依旧是全球光伏增长最为强劲的地区 (新增装机 71.3GW), 使得该地区累计光伏装机容量达到了 295.7 GW, 是全球第一大光伏市场。紧随其后的是欧洲光伏市场, 新增 11.3 GW 的装机容量, 同比增长 21%, 累计装机达到 125.8 GW, 占全球光伏装机总容量的 24%。而美洲地区以 78.2 GW 累计装机位列全球第三大光伏市场, 在全球光伏装机总容量中的占比为 15%。未来五年全球光伏市场将持续增长, 预计到 2023 年全球累计装机容量将超过 1000 GW。

美国能源部 (DOE) 发布《地热愿景: 挖掘地下热能潜力》报告, 系统评述地热发展潜力及对美国的潜在影响, 包括: (1) 技术改进可以显著降低地热发电成本并增加地热部署规模, 有望到 2050 年时将全美的地热发电装机容量提升 26 倍至 60 GW 水平; (2) 优化项目的审批许可流程也可以减少成本和促进地热开发; (3) 克服地热在供暖和制冷领域的部署障碍能够刺激地热市场增长, 到 2050 年地源热泵有望满足全美 2800 万户家庭供暖和制冷需求; (4) 增加地热部署规模可以改善美国的空气质量和减少 CO₂ 排放。

美国能源部 (DOE) 宣布将投资 8900 万美元用于支持能源领域的创新型先进制造技术研发, 本次资助主要聚焦在三个领域: (1) 先进材料制造的创新; (2) 降低工业效率和生产率的热收支过程; (3) 互联、灵活、高效的制造设施和能源系统。旨在推动围绕关键能源技术制造的创新, 降低工业过程能源强度。

由纽卡斯尔大学 Claire R. Thompson 教授课题组牵头的联合研究团队设计制备了全球首个接近热力学平衡的反应器: 该反应器流化床含有钙钛矿相镧锶铁氧 (La_{0.6}Sr_{0.4}FeO_{3-δ}) 组成的固态氧存储器, 能够将氧气从床体的水蒸气 (H₂O) 一端转移到另外一端的一氧化碳 (CO), 避免反应气体发生混合产生水煤气反应, 实现了在一个装置内完成产氢和最终产物的有效分离, 为高效经济制氢开辟了全新的技术路径。

IHA：2018 年全球水力发电量达创纪录的 4200 TWh

5月13日，国际水电协会（IHA）发布《2019全球水电发展现状报告》¹指出，2018年全球水电新增装机容量超21.8GW，累计装机总量达到1292GW，累计发电量则达到创纪录的4200TWh。中国以8.5GW新增装机容量位居首位，巴西（3.9GW）紧随其后，巴基斯坦（2.5GW）排名第三；巴西已超越美国成为水电累计装机容量第二多的国家。报告具体内容如下：

1、水力发电在2018年创历史新高

2018年全球水力发电量达到了4200TWh，新增水电装机容量21.8GW（包括近2GW的抽水蓄能），水电累计装机总量达到了1292GW。就地区而言，东亚和太平洋地区再次成为水电发展最快的地区，新增装机容量9.2GW，其次是南美洲（4.9GW）、南亚和中亚（4GW）、欧洲（2.2GW）、非洲（1GW）、北美和中美洲（0.6GW）分列三到六位。就国家而言，中国以8.5GW再次领跑全球水电新增装机排行榜，紧随其后的是巴西（3.9GW）和巴基斯坦（2.5GW）。截至2018年，中国水电累计装机达到352.3GW，是全球最大的水电生产国；巴西的水电装机总量达到了104GW，超越美国（103GW）居全球第二。

2、抽水蓄能对能源转型越来越重要，但政府和市场对其认识不足

抽水蓄能已被认为是现代和未来清洁能源系统的重要组成部分，风能、太阳能等波动性可再生能源电力的大幅增加使得电网稳定性面临日益严峻的挑战，也促进了对抽水蓄能的存储能力的需求上升。目前，抽水蓄能占全球储能装机容量的94%以上，与其它形式的储能相比，抽水蓄能在成本、可持续性和规模上均具有优势，抽水蓄能技术的广泛运营已经证明了其能够满足波动性可再生能源增加对电网稳定性的要求。尽管世界各地开始重视抽水蓄能，但未能深入认识其价值，开发进展缓慢，市场激励不足，政策和监管框架限制了其发展。与传统水电相似，抽水蓄能项目面临投资回收周期长、前期投资成本高等问题，此外，其未来的收益难以预测，为能源系统提供的辅助服务也不能获得足够的回报。因此，不仅应将抽水蓄能视为备用发电设施或辅助电网服务供应来源，还应将其视为能够为区域和地方能源及水系统提供效益的资源，需要制定与抽水蓄能技术相匹配的市场政策和监管框架以促进其发展。

3、水电迎来了数字化转型的新时代

目前，越来越多的水电设施正在向数字化系统和流程转型，水电项目设计、运营和维护方式的革命将确保水电能够很好地发挥其在清洁能源未来中的作用。现代

¹ 2019 Hydropower Status Report . <https://www.hydropower.org/status2019>

水电开发的早期规划和设计阶段将图纸和计划转换为数据，以创建电厂的计算机模型，对多种使用场景和配置进行模拟；增强型数字控制系统可以提高涡轮机和发电机的性能，有助于延长水电设施的使用寿命；使用先进性能监控分析可以优化运营和维护并降低成本，同时可以通过关键性能指标（KPI）自动跟踪和基准测试来改进维护流程；随着数字传感技术与人工智能的结合，状态监测变得越来越精细（可以获得大量的多维度数据），智能状态监测和诊断可以通过远程收集数据并同时对其进行全方位分析来改进故障诊断，从而在设备发生故障之前检测到组件故障或设备老化问题；创新的解决方案，例如使用无人机进行设施和环境检查，成为一种新的先进状态监测手段。在全球范围内，数字技术正被大规模地整合到现有水电设施中以实现其现代化，提高电网灵活性和安全性。水电系统的数字化升级通过提供更高灵活性和增强控制性的辅助服务，使抽水蓄能和传统水电能够与其他可再生能源共同运行。这也为水电数字化带来了新挑战：数字化过程需要超越用于电站层面的规划和运营的数字控制系统，在电力系统层面采用适应更快、更灵活运营的数字技术；针对数字技术普及带来的安全漏洞，通过网络安全监控和快速响应系统增强安全防护；通过远程操作和自动化流程对劳动力进行重新部署；进行技能培训以适应数字化系统。

4、电力市场的区域合作促进水电发展

通过区域互联整合电力市场有助于各国更有效地利用水电和其他可再生能源，北欧电力市场为其他地区提供了借鉴和学习的案例。北欧国家拥有世界上最先进的跨境电力系统，将挪威、瑞典、芬兰、丹麦和波罗的海国家整合到一个共同的区域市场。北欧的电力主要由水电、核电、煤电和风电构成，通过区域互联使各国能够获得各种能源资源并更有效利用水电，如丹麦处于低风力条件时能够使用挪威的低成本水电，以及将水电用作互联国家火电的补充能源储备。通过区域合作，提高了能源安全性，并在面对波动性可再生能源和气候变化时具有更大的弹性。

（岳芳 郭楷模）

欧洲光伏产业协会：2023 年全球光伏累计装机预计超 1000 GW

5月14日，欧洲光伏产业协会（SolarPower Europe）发布《2019-2023 年全球太阳能光伏市场展望》报告²，对全球及主要光伏市场的现状和未来五年的发展情况进行了展望分析。

相比 2017 年，2018 年全球光伏装机容量增长了 4%，但较前两年的装机增长率（2016 年为 50%、2017 年为 30%）出现了回落，主要原因是中国政府减少了上网电价补贴导致本地区光伏市场新增装机显著萎缩。尽管增幅放缓，但 2018 年依旧是

² Global Market Outlook 2019-2023. <http://www.solarpowereurope.org/strong-global-solar-market-outlook/>

光伏发展史上极具里程碑意义的年份,因为全球新增光伏装机容量首次突破 100 GW 大关,达到 102.4 GW 的历史新高,超过所有其他电力资源(如化石能源、核能、风能)增量,使得全球累计装机达到了 509.3 GW。总体而言,2018 年不同地区光伏市场都取得了不同程度增长。其中亚太市场依旧是全球光伏增长最为强劲的地区(新增装机 71.3 GW),使得该地区累计光伏装机容量达到了 295.7 GW,占到了全球光伏装机总容量近 6 成(58%),是全球第一大光伏市场。紧随其后的是欧洲光伏市场,新增 11.3 GW 的装机容量,同比增长 21%,累计装机达到 125.8 GW,占全球光伏装机总容量的 24%。而美洲地区以 78.2 GW 累计装机位列全球第三大光伏市场,在全球光伏装机总容量中的占比为 15%。同期中东和非洲地区的光伏市场也取得了增长,使该地区的累计装机总量增长到了 9.6 GW,全球占比提升至 1.7%。

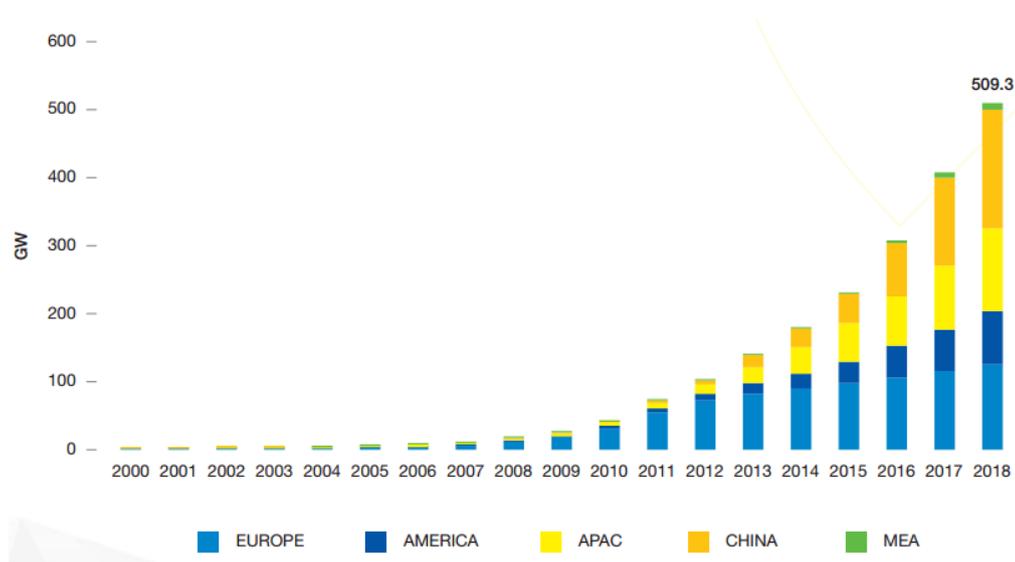


图 1 2000-2018 年世界主要地区光伏累计装机容量发展态势 (单位: GW)

2018 年,尽管中国光伏装机增长放缓至 44.4 GW (2017 年是 52.8 GW),但依旧是表现最为强劲市场,是同期全球光伏装机净增量最大的国家,占到全球新增装机容量的 43%;紧随其后的是美国,2017 年新增光伏装机容量为 10.6 GW;印度、日本和澳大利亚分居三至五位,分别增加了 8.3 GW、6.6 GW 和 5.3 GW。

截至 2018 年底,全球累计光伏装机前 10 个国家的装机容量均超过 7 GW:其中中国以 173.2 GW (占全球总装机的 34%) 独占鳌头;美国和日本分别以 62.1 GW (12%) 和 55.9 GW (11%) 分列二、三位;德国 (45.8 GW, 9%)、印度 (25.5 GW, 5%)、意大利 (19.9 GW, 4%)、英国 (13 GW, 3%)、澳大利亚 (12.6 GW, 2.4%)、法国 (10.2 GW, 2%) 和韩国 (7.7 GW, 1.5%) 分列四到十位。

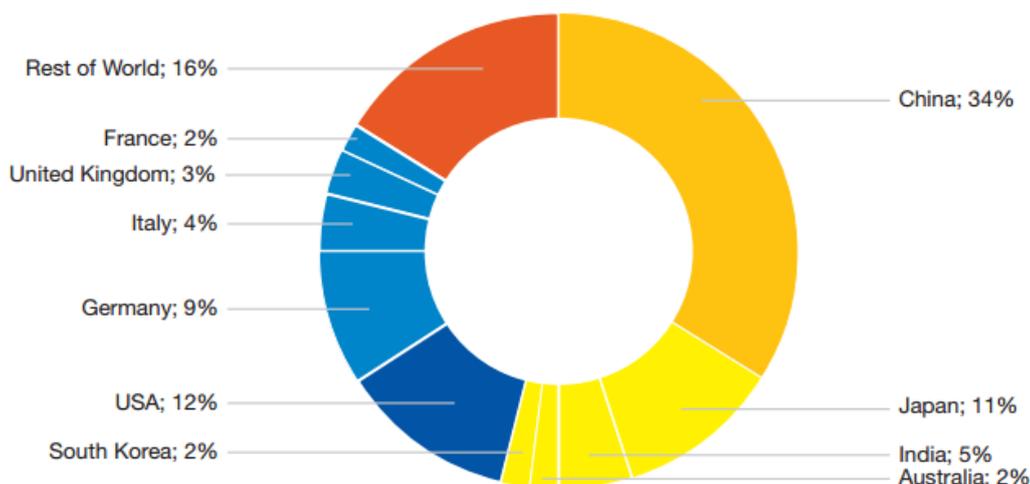


图2 截止2018年底全球累计光伏装机前10位国家的占比

报告通过情景模拟（高增长情景、中间情景和低增长情景）对未来五年全球光伏市场发展做出展望：预计2019年全球光伏市场年度新增装机容量有望突破80GW，累计装机容量将达到593.9-692.6GW之间（不同情景预测结果不同）；到2023年，年度新增装机容量则会达到125.6-263.9GW之间，累计装机容量将达到1043.63-1610GW。但无论哪种模拟情景，有两点是肯定的：2019年全球光伏累计装机容量将突破590GW，到2023年将超过1000GW；亚洲将毫无疑问继续主导全球光伏市场。在此期间，中国仍将是全球最具活力的光伏市场，预计到2023年新增装机容量有望超过200GW。

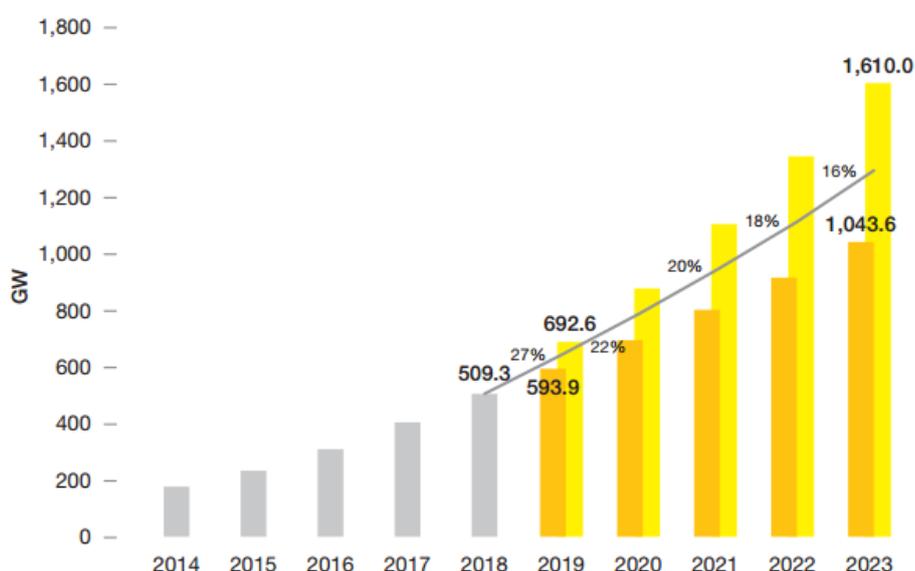


图3 到2023年不同情景下全球光伏累计装机容量发展趋势预测（单位：GW）

就主要国家而言，未来五年（中间情景），美国预计新增装机70GW，累计装机有望达到116GW，从而保持其全球第二大光伏市场位置。同期，印度预计新增装机88.7GW，累计装机预计达到116GW。日本预计新增26.5GW，累计装机有望

达到 82.3 GW。德国预计现在 26.7 GW，累计装机预计达到 72.6 GW，仍将是欧洲最大的光伏市场。西班牙预计新增装机 19.4 GW，累计装机有望达到 25.3 GW，跻身欧洲第二大光伏市场。总体而言，未来五年全球光伏市场发展前景乐观。尽管如此，光伏发展还是有很大提升空间。依据 IRENA 的测算，如果要实现《巴黎气候协定》中承诺的全球升温控制在 2℃ 以内水平，就要求到 2050 年前平均每年新增光伏装机要达到 400 GW 水平，因此目前的发展速度还是不够的，需要全球各国加大努力和合作。

（丁华琪 郭楷模）

美国能源部评估地热发展潜力及对美国潜在影响

5 月 30 日，美国能源部（DOE）发布《地热愿景：挖掘地下热能潜力》报告³指出，按照当前开发速度，到 2050 年全美的地热发电装机容量有望达到 6 GW。而如果适当加大开发力度（如优化审批流程）加快地热开发进程，地热装机容量可以在上述常规增量的基础上再增加一倍以上，达到 13 GW。而如果进行全方位的改进（从政策监管到技术到商业环境），则有望达到 60 GW。除了电力应用领域，地热开发还能为美国的居民和商用住宅提供创新的供暖和制冷解决方案，促进美国能源结构多元化发展，进一步提升美国能源供应安全。报告系统评述了地热开发的潜力及其能够为美国带来的潜在益处，关键内容如下：

1、技术改进可以显著降低地热发电成本并增加地热部署规模

改进用于探索、发现、使用和管理地热资源的工具、技术和方法，有助于降低地热资源开发相关的成本和风险，而上述工作可以大幅提升地热开发部署速度，预计有望在 2050 年时将全美的地热发电装机容量提升 26 倍至 60 GW，而这将占到 2050 年全美电力装机总容量的 3.7%，占到全美总发电量的 8.5%。技术改进是实现增强型地热系统（EGS）商业化的关键途径，而这一点对美国地热产业发展至关重要，因为报告分析表明相对于其他地热资源（如传统的水热型），EGS 有望提供电力行业最大的电力增长潜力。而且，除电力行业外，EGS 还能够促进地热在非电力部门应用的增长（如区域供暖制冷）。

2、优化项目的审批许可流程也可以减少成本和促进地热开发

报告对包括地热开发的关键监管、许可和土地准入障碍等项目审批许可相关的程序进行了系统分析，发现通过各种机制构建来简化地热开发项目审批和许可流程，可以减少施工期间的融资成本缩短开发周期。例如，分析表明了如果将地热监管和许可要求置于类似于石油和天然气及其他能源行业的水平，可以使地热行业勘探和

³ DOE Releases New Study Highlighting the Untapped Potential of Geothermal Energy in the United States.
<https://www.energy.gov/articles/doe-releases-new-study-highlighting-untapped-potential-geothermal-energy-united-states>

开发更多资源并降低成本。即使仅仅单独优化许可流程也能够促进地热发电容量增加，有望在 2050 年将地热发电量增加到 13 GW，比无优化流程增量（6 GW）增加一倍多。

3、克服地热在供暖和制冷领域的部署障碍能够刺激地热市场增长

地热能够为美国的居民和商用住宅提供创新的供暖和制冷解决方案，其在供暖和制冷领域具备了巨大应用潜力，是地热发展关键增长领域。发展地源热泵（GHP）产业将有助于降低居民和商用住宅消费者的能源成本。现有 GHP 装机容量约为 16.8 GW，可满足约 200 万户家庭的供暖制冷需求。报告分析了住宅领域 GHP 技术的市场潜力，到 2050 年 GHP 有望满足全美 2800 万户家庭供暖和制冷需求，相当于现有 GHP 装机容量的 14 倍。到 2050 年，GHP 市场有望占居民住宅供暖和制冷市场份额的约 23%。同样，到 2050 年有望在全美范围内安装超过 17500 个使用地热资源结合 EGS 技术的区域供暖系统，可满足约 4500 万户家庭的需求。而截至 2017 年，全美仅仅安装了 21 个区域供暖系统。发展地热能还能美国各地的农村社区和城市中心提供经济发展机会。报告分析表明，积极发展地热产业能够为全美的城市和农村社区创造新的就业机会。而发展强大的住宅和商业 GHP 产业也可以增加美国的地热劳动力岗位。

5、增加地热部署规模可以改善美国的空气质量和减少 CO₂ 排放

报告分析表明，发展地热产业有助于减少二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）和细颗粒物（PM_{2.5}）的排放，使得空气质量得到改善。就电力部门而言，到 2050 年，发展地热可以为电力部门累计减少高达 5.16 亿吨的 CO₂ 排放量。对于供暖和制冷行业，到 2050 年可累计减少高达 12.8 亿吨的 CO₂ 排放量。到 2050 年，两个部门的 CO₂ 减排量相当于每年从道路上减少约 2600 万辆汽车。

6、报告中的地热部署目标水平可在不影响国家水资源情况下实现

报告分析表明，与当前的发展进程相比，报告提出的高水平部署目标会使得电力部门在 2050 年消耗的水量略有增加（约 4%），但这种增长可以通过使用非淡水资源（城市生活废水和污水）来降低。

（廖明月 郭楷模）

项目计划

美欧日多国联合发起“国际氢能合作伙伴”倡议

5 月 29 日，在加拿大温哥华举办的第 10 届清洁能源部长级会议（CEM）上，美国、加拿大、日本、荷兰和欧盟委员会领导联合发起了“国际氢能合作伙伴”倡议，旨在汇集来自世界各地的氢能相关的政府、企业和研究机构的智慧和研究力量，消除氢能和燃料电池部署障碍，以加快其在社会各个经济部门的商业化部署进程。

该倡议下的具体国际合作事宜将由国际能源署（IEA）负责协调开展。

“国际氢能合作伙伴”倡议聚焦氢能和燃料电池技术在清洁能源转型中的作用，指出氢能将在全球能源清洁转型中发挥关键作用，但现阶段氢能及其相关技术规模化商业部署仍旧面临挑战（如安全存储、运输成本等）。而各国发起的该倡议将有效地推动氢能相关政策、计划和项目等方面的国际合作，以解决部署障碍，推进氢能及其相关技术的大规模部署，以助力全球打造一个清洁、可负担、安全可靠的能源系统。本次倡议初期工作将主要聚焦在三个领域：（1）确保在当前的工业应用领域成功部署氢能及其相关技术；（2）实现氢能及其相关技术在交通运输部门中的应用（如公共交通、货运卡车、海运船舶等）；（3）探索氢能在提供公众社区用能需求中的应用潜力。

（丁华琪 郭楷模）

DOE 资助 8900 万美元支持能源领域制造技术研发创新

5月7日，美国能源部（DOE）宣布将投资 8900 万美元用于支持能源领域的创新型先进制造技术研发⁴，旨在通过推动围绕关键能源技术制造的创新，降低工业过程能源强度，本次资助重点关注三个主题，具体内容参见表 1。

表 1 能源领域制造技术研发创新项目主要研究内容

主题	研究内容
先进材料制造的创新	专注于通过机器学习，开发性能更高的电池、用于供暖与制冷的相变存储材料，以及将温差转换为电能的新型半导体等。重点是开发和规模化新的低成本制造工艺，促进用于车辆和固定储能的电池国产化
降低工业效率和生产率的热收支过程	由于 70%的过程能源使用与加热相关，本主题关注对工业过程干燥技术的创新研究，以提高能效产量和产品质量。此外，还关注新的过程强化设计，以减少总热能
互联、灵活、高效的制造设施和能源系统	随着 DOE 资助的新型宽带隙半导体取得新进展，本主题寻求利用更高效的工业电源转换设备和新机遇，将过程能量转换为电能，并与电网更好地集成。此外，还关注热电联产的新进展，从而提高电效

（万勇 郭楷模）

DOE 资助 4600 万美元推进小企业研发创新

5月20日，美国能源部（DOE）宣布在“小企业创新研究与技术转让（SBIR/STTR）”

⁴ Department of Energy Announces \$89 Million for Innovative Manufacturing Technologies.
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-89-million-innovative-manufacturing-technologies>

计划框架下资助 4600 万美元⁵，向美国 39 个州和哥伦比亚特区的 202 家小企业的 231 个项目提供资助，开展能源安全和应急响应、国防核不扩散、电力、能效和可再生能源、环境管理、化石能源、聚变能、高能物理以及核能九大主题领域的研发创新工作，旨在推进美国科学技术的创新和技术成果转化，创造新的就业机会，以增强美国在具有竞争优势领域的领先地位和经济实力。此次公布的为 2019 年第一阶段的第二批资助计划，资助期限为 6 至 12 个月，受资助者在项目完成时通过评估考核的将获得 2020 财年第二阶段资金申请资格，进行原型或工艺研发以验证第一阶段的研发成果，第二阶段资助期限最长为 2 年。本次资助的项目具体研究内容如下：

1、能源安全和应急响应（599 万美元）

能源系统网络安全研究，包括：有线网络物理层认证；开发电网监控技术；开发商业化新技术以预警、监测和防范日益复杂的网络攻击。

2、国防核不扩散（281 万美元）

（1）构建一种新型的快速多模态显微成像系统，包括：开发软件工具以快速准确记录和关联不同传感器捕获的核裂变物理化学数据，实现对上述数据叠加分析。

（2）远程检测技术，包括：开发自动检测和量化制造过程中的气体流出物的算法；开发软件工具，利用飞机和卫星拍摄的图像提高远程侦察武器开发相关活动和设施的能力；将传感器集成到无人机以监控可疑的大规模杀伤性武器设施；利用新型光电传感器开发高分辨率、多光谱偏振相机以改进多模态成像技术；数字地形建模；新型红外激光光谱仪快速远程检测化学品。

（3）替代辐射源技术，包括：开发紧凑型回旋加速器以寻找和分析隐藏的核材料；先进全矩阵捕获超声成像和检测套件；开发杀虫电子设备用于农业应用以及预防疟疾；昆虫不育 X 射线辐照器替代危险放射性同位素（铯和钴），使昆虫不育术安全有效；开发低成本便携式 X 射线系统用于昆虫不育技术；碲化镉器件的快速生产。

3、电力（170 万美元）

（1）先进电网运营技术，包括：增加电网稳健性的区块链解决方案；保障大规模电力系统数据安全的软件系统；利用区块链支持拥有太阳能电池板的消费者之间的点对点能量传输；利用区块链保护电网设备技术的现场示范；改进的检测和定位电网故障的方法；低压地下电网网络及设备的保护装置。

（2）先进电网储能技术，包括：便携、安全、可靠的电源备份解决方案；开发商用碳化硅功率半导体元件。

4、能效及可再生能源（2159 万美元）

⁵The U.S. Department of Energy Announces \$46 Million for Small Business Research and Development Grants..
<https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-46-million-small-business-research-and-development-grants-0>

(1) 先进制造，包括：开发创新网络安全解决方案，使小型制造商能够安全地访问基于云的智能制造资源；开发可进行更多选择性分离的新型膜材料；新型低成本分离技术以实现一步净化天然气；开发下一代铝合金电导体以提升输电网的能效；采用新型铜/碳纳米复合材料制造和验证电子元件；利用电化学回收高价值电子成分（E-RECOV）技术从手机、硬盘等废弃电子设备中回收更多金属。

(2) 生物能源，包括：使用新的聚合物修饰酶将果糖原料转化为高品质甘露醇；萜类化学品和燃料的无细胞生产；开发用于无细胞生产的保持酶活性的平台技术；无细胞发酵从非工业宿主生产食品防腐剂；开发由藻类制成的可生物降解的聚合物；利用化学循环系统催化氧化再循环塑料废物和热集成；发现和优化有效的塑料解聚酶；使用可再生作物废弃资源（如玉米棒）生产 1,5-戊二醇基聚酯多元醇；塑料废物的生物转化生产洗涤剂、润滑剂和其他化学品；开发下一代生物基包装材料；开发用于生物基合成高吸水性聚合物的微生物工艺；藻类培养中的热量控制技术；用于藻类生物燃料生产的新型超低成本藻类培养的热控制技术；高通量、低成本自动化的基于 AI 的藻类监测和表征技术；建造并示范具有十几个单独反应器的全自动化实验室微藻培育系统。

(3) 建筑，包括：用于建筑物的先进低成本空气处理装置；应用先进设计和优化技术开发下一代住宅空气处理装置；用于住宅供暖、通风和空调（HVAC）系统的下一代紧凑型高效空气处理设备；用于高效 OLED 照明的可扩展超高导电透明单壁碳纳米管薄膜；用于高效照明的抗反射材料；用于柔性固态照明的新型材料；用于 OLED 照明的新型蓝色磷光发光材料；建筑数据自动分类和验证系统；用于控制优化的可扩展、数据驱动和高分辨率模型；用于能量模型的高分辨率热舒适度映射的跨平台应用；实时建筑数据与动态电气化建筑蒸汽系统经济调度的整合；数字双胞胎深层数据的建筑物内融合。

(4) 燃料电池，包括：纳米结构质子交换膜；相分离烃离子对膜；改进的燃料电池离子聚合物和膜；用于氢气纯化的低温高压纯化器；用于高压低温氢燃料的块状金属玻璃喷嘴的热塑性成形；薄膜氢传感器开发、测试和集成；氢气泄漏检测和警告系统；PVDF 薄膜用于复合材料储氢罐的在线评估；嵌入式监测技术实现储氢罐故障的早期预警；复合包覆压力容器电阻监测；氢燃料存储罐碳纤维复合包覆材料损伤监测方法；CO₂ 直接加氢制甲醇的创新催化剂设计。

(5) 地热能，包括：基于短程井下通信、井下处理、模式识别、机器学习和远程电磁测量的地热钻井优化系统；通过通信技术实现高温定向钻井。

(6) 太阳能，包括：太阳能光伏模块的远程实时监测；光伏组件污染探测器；用于分布式太阳能的低成本耐用有机电池；用于季节性储能和氢燃料的低成本清洁 NH₃ 合成；太阳能发电分布式控制系统；光伏电池板除雪设备；用于高自然灾害风

险地区的太阳能支架系统；用于畜牧生产的太阳能安装和跟踪系统；具有新型单极和整体横向支撑的低成本双轴太阳能定位系统；碳化硅模块化架构的太阳能串式逆变器；用于高效熔盐聚光式太阳能热发电的高温碳化硅接收器组件；用于聚光式太阳能热发电的新型轻型低成本定日镜；太阳能组件的低成本制造；采用超低成本储热流体的分布聚光式太阳能系统；用于聚光式太阳能熔盐储存的先进材料。

(7) 车辆，包括：用于锂金属/高镍含量锂镍锰钴电池的新型高离子导电性的固态电解质；电动汽车和混合动力汽车用锂金属电池柔性复合固态电解质的卷对卷生产工艺；全闭环锂离子电池高价值负极材料回收；含硅锂离子电池负极稳定 SEI 膜的研制；利用可控微气溶胶热解开发高能量密度和长循环寿命锂离子电池正极材料；开发高能量密度车用电池；电动汽车用超低钴含量正极的制备；提高电池可靠性的添加剂；开发商用碳化硅功率半导体元件；低成本涡旋式有机朗肯循环余热回收发动机；将等离子电解氧化涂层用于发动机活塞的隔热层；提高柴油机的耐用性和效率的先进涂料；用于汽油火花点火发动机的新型热障涂层；改进柴油发动机使用乙醇等清洁燃料；超临界乙醇重整用于高效直喷式重型压燃式发动机；铝制动系统的可行性研究；新型熔模铸造工艺减轻汽车铸件重量；开发多功能传感器优化车辆多功能复合材料制造工艺；用于汽车零部件生产的短纤维预制件技术；通过压缩成型的高性能纤维增强超分子 Vitrimer 复合材料；低成本碳纤维/竹纤维混合中间体材料减轻车辆重量；低成本树脂技术快速制造高性能纤维增强复合材料；热固性树脂回收和再循环生产低成本碳纤维复合材料。

(8) 水，包括：偏远地区水力发电微电网；海洋能微电网；波浪能转换器；新型波浪能发电的管泵装置；新型行波泵开发；多冲程可变排量振荡泵；海水淡化提取稀土元素。

(9) 风能，包括：基于混合模型的风力发电机远程诊断和预测方法；退役风力涡轮机叶片制造第二代玻璃纤维复合材料。

(10) 联合主题。①先进制造和燃料电池联合主题：用于检测和去除氢吸附剂中杂质的先进材料。②先进制造和地热联合主题：采用多效蒸汽吸附的矿物回收零排放脱盐技术；利用地热加热页岩气出水的脱盐系统；地热盐水中回收锂、水和发电的集成系统；用于油田盐水回收的新型膜系统；用于盐水淡化和稀土材料回收的纳米多孔原子薄膜。③先进制造和太阳能联合主题：新型晶体硅模块架构，通过提高可制造性和耐用性来降低成本；低成本建筑集成有机光伏组件的先进制造；钙钛矿太阳电池的电喷雾沉积。

5、环境管理（20 万美元）

新型地下监测概念研究，开发基于机器人的超声波扫描技术用于检测核废料储存罐的缺陷。

6、化石能源（400 万美元）

(1) 碳封存技术，包括：CO₂ 通用操作传感器系统；CO₂ 监测数据的自动采集系统；利用声学进行地下通信；用于井下传感器的声波遥测；CO₂ 联合遥测系统；可扩展的光纤传感器阵列系统；等离子体催化 CO₂ 和 CH₄ 生产高价值化学品；常压等离子体催化 CO₂ 还原甲醇；等离子体催化 CO₂ 转化为碳和水；新型等离子体技术将 CO₂ 转化为工业原料；低温等离子体-紫外-催化工艺将 CO₂ 转化为甲醇；新型等离子体催化重整 CO₂ 用于航空燃料和储能。

(2) 石油和天然气，包括：模块化天然气制合成油反应器；利用伴生气生产高价值碳；低成本 SoftOx 工艺将井口的酸性天然气转化为可与原油混合的液体；天然气转化为乙酸；新型模块化天然气制合成油反应器

(3) 稀土元素和重要矿物，包括：用离子液体低温还原稀土金属；从煤和煤基原料中提取稀土金属的新型低成本工艺。

7、聚变能科学（343 万美元）

(1) 聚变能系统的先进技术和材料，包括：用于增强型转向器/散热器连接功的能梯度 Cu-W 中间层；单片钨面向等离子体部件；通过增材制造进行功能梯度结构连接件的设计和制造，用于面向等离子体部件与冷却结构的连接；供能梯度复合层间粘合材料提高高温接头的强度和韧性；提高氙产量和简化反应堆设计；用于高温超导磁体电缆的智能终端；基于稀土钡铜氧系（REBCO）高温超导的电缆导管绝缘接头；利用声学传感器阵检测大型超导磁体故障。

(2) 聚变科学与技术，包括：高频行波管用于聚变反应堆燃烧等离子体诊断；二维色散干涉仪；用于高真空的大型复杂 3D、金属和合金结构的增材制造；ITER 组件的增材制造；3D 全波迭代射频波束仿真工具。

(3) 高能密度等离子体与惯性约束聚变能，包括：高压固态触发器；超快像素阵列相机的设计与制造；高脉冲能量高重复频率激光器；超高功率激光器。

8、高能物理（598 万美元）

(1) 粒子加速器的先进理念和技术，包括：通过机器学习实现高度自动化的加速器操作；粒子加速器仿真的集成 workflow 管理；用于加速器的高电流等离子体阴极；费米实验室缪子-电子（Mu2e-II）实验冷却靶的高发射率涂层设计；新型电介质双光束加速器。

(2) 高能物理探测器和仪器，包括：大面积超高灵敏度光传感器；高灵敏度大面积光电阴极的新型制造工艺；高灵敏宇宙微波背景探测器的商业制造工艺；用于高速带电粒子跟踪的 3D 金刚石探测器；用于 UV 光子检测的新型波长变换材料；用于高能物理探测器的抗辐射、高导热粘合剂；用于下一代宇宙背景研究的高精度辐射过滤器的 3D 打印。

(3) 用于数据采集和处理的高速电子仪器，包括：辐射强化工程基板；低成本工程半导体基板；电容诱导退火后的热处理。

(4) 激光技术研发加速器，包括：用于激光加速的陶瓷放大器；耐损伤超快光学器件；高能量和平均功率的飞秒级激光器的干涉涂层。

(5) 量子信息科学 (QIS) 支持技术，包括：三维超导多量子比特系统增材制造技术的优化；QIS 的新型极低温冷却技术；用于 QIS 的高量子效率光电探测器。

(6) 无线电频率加速器技术：高效率、高平均功率感应输出管。

(7) 用于粒子加速器的超导技术，包括：开发用于加速器的改进 Nb₃Sn 导体；紧凑型超导加速器；用于无缺陷共形铌薄膜的射频超导空腔原位涂层和清洗；用于粒子加速器磁体系统的脉动热管；低温压力和温度传感器；用于加速器磁体的高导热率和比热纳米复合环氧技术。

9、核能 (579 万美元)

(1) 先进核能技术，包括：将机器学习用于核反应堆设计模型；核反应堆仿真建模技术；核电设施监测网络；用于熔盐反应堆的小型电磁泵；用于电子束焊接和增材制造的高压电子枪；压力容器辐照技术；将 SiC 复合材料和适用于高温腐蚀性熔盐环境的金属合金连接的工艺；管道组件设计的分析和优化工具。

(2) 先进核废料处理技术，包括：热盐密封系统；优化乏燃料罐生命周期管理的机器学习工具；新型永久性超声波传感器用于乏燃料罐的健康监测；乏燃料干式储存罐的膜片焊接工艺；应力腐蚀裂纹原位修复。

(岳芳 郭楷模)

前沿与装备

英科学家设计全球首个热力学可逆的产氢反应器

当前生产氢气大多数反应器表现出显著的不可逆性，整个化学反应受到反应平衡的限制，导致反应物的不完全转化，致使最终产物呈现混合物形态，需要额外分离操作，导致整个过程耗时耗能。因此设计出能够克服化学平衡限制，实现氢气生产和分离能够同时进行的反应器意义重大。由纽卡斯尔大学 Claire R. Thompson 教授课题组牵头的联合研究团队设计制备了全球首个接近热力学平衡的反应器，应用于水煤气反应，实现了氢气的生产和分离同步进行，实现了高效经济产氢。该反应器流化床含有钙钛矿相镧锶铁氧 (La_{0.6}Sr_{0.4}FeO_{3-δ}) 组成的固态氧储存器，能够将氧气从床体的水蒸气 (H₂O) 一端转移到另外一端的一氧化碳 (CO)，避免反应气体发生混合，上述两端分别称为 H₂O 进料半循环和 CO 进料半循环。随后将上述反应器用于水煤气转换反应，实验结果显示，整个反应的化学平衡常数一直稳定在 1 附近，表明了反应实现了平衡。研究人员进一步采用 X 射线衍射和同步辐射测试手段，对

上述化学反应中每个循环反应的平衡情况进行追踪,用变量 K^* 来标记每个循环反应平衡性。在反应器开始运行时,研究人员观察到 K^* 值远大于 1。这主要归因于氧化状态下反应器流化床 H_2O 向 H_2 转化的效率较低,而 CO 向 CO_2 转化效率较高。在循环之后,材料的氧化态分布变得确定并且每个循环变得可重复,其中 H_2O 和 CO 的转化率相等,两者均超过 75%,且 K^* 值达到 14,说明已经克服了平衡限制($K^*=1$)。研究人员通过控制固态氧储存器,使得反应器不同端可以得到纯相 H_2 和 CO_2 产物。由于存储器具有不同程度的非化学计量,能够与反应气流保持平衡,因此能够保留对其所处环境的“化学记忆”,而这种功能能够阻止一氧化碳或二氧化碳进入所生产的氢气流中,从而实现有效分离。为了测试“化学记忆”功能,研究人员通过缩短反应半周期持续时间来改善流化床的记忆性能并改善转化率。当周期持续时间从 60s 降低到 48s 时,转化率超过 80%,并且 K^* 值加倍。当持续时间增加到 120 秒时,转化率降低(不超过 50%),且 K^* 降低到 1.4。长周期的反应发现,当进行 300 次循环反应后, K^* 没有发生太大改变,氧气存储器形态也未发生变化,表明其具有良好稳定性。研究人员认为,氧气存储器稳定性主要是由于其具备在没有相变的情况下提供和接收氧气的的能力。更为关键的是,研究人员开发的“化学记忆”反应器的概念不仅适用于氧交换反应,而且因其具有非化学计量的材料,上述反应器还能沿用到可逆地偶联氢化和脱氢反应,展现出良好的应用前景。该项研究开发出全球首个热力学可逆的产氢反应器,实现了在一个装置内完成产氢和最终产物的有效分离,为高效经济制氢开辟了全新的技术路径,对氢能产业的发展具有良好推动作用。相关研究成果发表在《*Nature Chemistry*》上⁶。

(刘竞 郭楷模)

MXene/S 复合电极抑制穿梭效应助力超长循环和稳定性

锂硫电池是极富潜力的下一代高能电池系统,其理论能量密度可达 2600 Wh kg^{-1} ,是锂离子电池理论能量密度的 3-5 倍。然而聚硫化物穿梭效应使得该类电池循环能力和容量迅速衰减,成为了锂硫电池商业化应用的一大障碍。而开发具备抑制多硫化物穿梭、良好导电性和机械性能的电极是解决上述问题的主要途径之一。都柏林圣三一学院 Chuanfang Zhang 教授课题组牵头的国际研究团队设计合成了一种新颖的 MXene(二维过渡金属碳化物或氮化物)/硫复合的锂硫电池电极材料,其具备了良好的导电性、机械强度和独特的多硫化物吸附性能,从而在保障电池性能前提下,有效抑制了多硫化物的“穿梭效应”,获得了超长循环寿命和超低的容量衰减率。研究人员首先采用盐酸腐蚀方法制备了 MXene 材料 $Ti_3C_2T_x$,随后通过真空过滤方法

⁶ Ian S Metcalfe, Brain Ray, Catherine Dejoie, et al., Overcoming chemical equilibrium limitations using a thermodynamically reversible chemical reactor. *Nature Chemistry*, 2019, DOI:10.1038/s41557-019-0273-2

将硫(S)元素填充到上述二维 $Ti_3C_2T_x$ 材料中形成 $Ti_3C_2T_x/S$ 复合材料。扫描电镜和透射电镜表征显示, $Ti_3C_2T_x/S$ 复合物依旧呈现完整的二维层状纳米片结构,且层间距较未填充 S 的 $Ti_3C_2T_x$ 增大了,这有助于存储更多的离子提升电池容量。X 射线能谱微区成分分析显示 S 元素是均匀地分布在整个二维的纳米片表面。通过对上述 $Ti_3C_2T_x/S$ 复合材料进行弯折测试,结果显示 S 元素填充并没有改变二维材料 $Ti_3C_2T_x$ 良好的机械柔韧性,即 $Ti_3C_2T_x/S$ 复合材料依旧保持良好的柔韧性,并且经过 200 多次弯折测试发现,整个 $Ti_3C_2T_x/S$ 复合材料导电性也基本没有变化(维持在 1650 S/cm 上下),有潜力应用到柔性电池当中。而利用传统制备方法制备出 $Ti_3C_2T_x-S$ 简单混合的复合材料(非化学吸附填充),其导电性仅为 830 S/cm。为了检验电极材料性能,研究人员分别制备了以 $Ti_3C_2T_x-S$ 、 $Ti_3C_2T_x/S$ 为正极的锂硫电池,并进行电化学性能测试。结果显示,当倍率从 0.1C(1C=1675 mA/g)增大到 2C 时候,基于 $Ti_3C_2T_x/S$ 电极电池放电比容量从 1383 mAh/g 小幅降至 1075 mAh/g,相反 $Ti_3C_2T_x-S$ 电极电池不仅 0.1C 的比容量小(1196 mAh/g),且倍率增加到 2C 时候放电比容量显著下降至 824 mAh/g。随后在 1C 倍率下对电池的循环稳定性进行测试,发现 $Ti_3C_2T_x/S$ 电极电池初始放电比容量为 1169 mAh/g,经过 1500 余次的超长循环后,比容量仍可高达 970 mAh/g,意味单次循环的容量衰减率仅为超低的 0.0014%,这是目前已报道的锂硫电池容量衰减率的最低值;相反,基于 $Ti_3C_2T_x-S$ 电极电池初始的放电比容量只经过 325 次循环就开始显著下滑至 857 mAh/g(初始容量为 1183mAh/g),而进一步延长循环次数电池比容量进一步下滑。通过对循环前后电极微结构表征发现,循环测试之后在 $Ti_3C_2T_x/S$ 电极的 MXene 薄膜表面原位形成了一层的硫酸盐络合物层,这个络合层充当了保护膜,有效抑制了多硫聚物的穿梭,提高了硫的利用率,因此增强电池性能和循环稳定性。该项研究精心设计硫元素填充的 MXene 纳米片复合电极应用于锂硫电池中,有效抑制多硫聚物的“穿梭效应”,增强了电池的倍率性能和循环稳定性,为设计和开发高性能的锂硫电池提供了一种新的研究思路。相关工作发表在《*Advanced Functional Materials*》⁷。

(丁华琪 郭楷模)

新型原位微观表征技术揭示钙钛矿薄膜降解潜在作用机制

钙钛矿太阳能电池光电转换效率在过去短短十年内已从最初的 3.8%上升到了 24% 以上,展现出了强劲的发展势头。尽管如此,但与理论极限转换效率(30.5%)相比还有很大的提升空间。因此,探明影响钙钛矿太阳能电池效率的潜在因素,尤其是晶体缺陷(形成和演变机制),显得意义重大。意大利那不勒斯国家研究委员会微电子与微系统研究所(CNR-IMM) Corrado Spinella 教授课题组采用原位低能量透射电

⁷ Huan Tang, Wenlong Li, Limei Pan, et al. A Robust, Freestanding Mxene-Sulfur Conductive Paper for Long - Lifetime Li-S Batteries. *Advanced Functional Materials*, 2019, DOI:10.1002/adfm.201901907

镜系统研究甲基胺碘化铅 (MAPbI₂) 钙钛矿薄膜中铅基缺陷形成演变机制, 为改善钙钛矿薄膜成膜质量进一步提升器件性能积累了关键理论知识。研究人员采用两步法在衬底上制备了 MAPbI₃ 钙钛矿薄膜, 为了让低能量透射电镜能够有效地观测薄膜, 薄膜的厚度被有效控制在 40 nm (因为薄膜太厚低能电子无法到达理想薄膜深度)。随后采用 200 kV 低能透射电镜对钙钛矿薄膜进行表征, 且为了尽可能减少电子束对薄膜的影响将电子束设置成每隔 4 秒释放一次, 连续追踪 1500 秒。扫描电镜测试显示, 在初始的时候, 辐照下 MAPbI₃ 钙钛矿薄膜表面光滑, 呈现典型的多晶结构, 晶体粒径在 50-200 nm 之间, 且没有“针孔”存在。X 射线衍射表征显示 MAPbI₃ 薄膜为纯相的钙钛矿, 不存在 PbI₂ 杂相。随着时间推移, 观察到在薄膜的晶界逐渐形成了纳米团簇, 且逐步向三重晶界处移动, 最终形成尺度在 10-15 nm 之间的众多纳米团簇, 同时在原来的位置留下了缺陷空位。能量色散的 X 射线光谱测试表明纳米团簇化学成分是 Pb, 即 Pb 纳米团簇。同样测试条件, 但没有辐照, 则没有观察到 Pb 纳米团簇形成。意味辐照是引起 Pb 纳米团簇形成的潜在诱因。从长时间的实验观察可以发现, Pb 纳米团簇在 120s 后尺寸就定下来了, 不会随着测试时间的延长而进一步演变。但此时发现 MAPbI₂ 钙钛矿薄膜晶粒核心部分结构开始发生变化, 逐步在其表面形成了细碎的纳米晶粒, 并在 850s 后全部转化为细碎的纳米晶粒。X 射线衍射表征显示该细碎的晶粒是 PbI₂。因此, 研究人员推测, 前 120s 的 MAPbI₃ 到 Pb 纳米团簇的变化和 120s 后的 MAPbI₃ 到 PbI₂ 纳米晶粒的变化动力学行为存在竞争关系。因此前 120s Pb 纳米团簇形成后就不再发生变化, 也即 Pb 团簇形成受到 MAPbI₃ 到 PbI₂ 转变的限制。而且有趣的是, Pb 纳米团簇和 PbI₂ 可以共享晶界, 不存在两者的转化, 而且就体量而言, PbI₂ 体量远大于 Pb 团簇。因此如何对钙钛矿薄膜进行钝化处理 (主要抑制 MAPbI₃ 到 PbI₂ 转变/Pb 纳米团簇) 是保持钙钛矿电池稳定性的关键因素。该项研究对 MAPbI₃ 钙钛矿薄膜的降解过程进行了详细的表征研究, 揭露了 MAPbI₃ 钙钛矿薄膜在降解的过程中存在两个相结构转变, 一个是 MAPbI₃ 到 Pb 纳米团簇, 另一个是 MAPbI₃ 到 PbI₂ 纳米碎晶粒转变, 更加深刻理解了该类薄膜的降解机制, 为薄膜钝化处理积淀了关键的理论知识, 对改善电池性能具有重要的指导意义。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》⁸。

(丁华琪 郭楷模)

开发超薄柔性固态电解质提高锂电池安全性

商用锂离子电池理论能量密度接近 480 Wh/kg, 但当考虑金属壳体、正负极、集流器等组件时候, 理论值要减半。而且高性能的锂离子电池通常采用液态电极,

⁸ Alessandra Alberti, Corrado Bongiorno, Emanuele Smecca, et al. Pb clustering and PbI₂ nanofragmentation during methylammonium lead iodide perovskite degradation. *Nature Communications*, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-09909-0

存在易燃易爆安全问题。因此开发轻量化电池组件和固态电解质是解决上述问题的关键所在。美国斯坦福大学 Yi Cui 教授课题组设计制备了一种全新的超薄、高机械柔性的聚合物固态电解质，在确保电池性能前提下，显著提升电池的安全性。研究人员利用湿化学法制备了聚酰亚胺（PI）纳米主体材料，扫描电镜表征显示 PI 主体材料含有大量有序垂直纳米隧道，这种几何结构能够为锂离子传输提供快速通道改善离子导电性。而扫描电镜横截面图显示 PI 整体的厚度仅为 8.6 μm ，这样厚度的聚合物薄膜通常无法具备良好的离子导电性，常规高导电性的聚合物薄膜的厚度一般都在 200 μm 以上。为了解决上述问题，随后往 PI 主体材料填充聚环氧乙烷（PEO）和双（三氟甲烷磺酰）亚胺锂（LiTFS）形成 PI/PEO/LiTFS 复合固态聚合物，以进一步增强材料离子导电性。30 $^{\circ}\text{C}$ 温度下离子扩散系数测试显示，沿着垂直隧道方向的离子扩散系数达到了 $2.3 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ ，比没有 PI 主体的 PEO/LiTFS 复合固态聚合物离子导电性高出了 4 个数量级，PI/PEO/LiTFS 离子导电性足够满足锂离子电解质的需求。弹性模量测试显示，PI/PEO/LiTFS 复合聚合物的弹性模量为 850 MPa，远远高于 PEO/LiTFS 复合聚合物（仅为 0.1 MPa），意味着前者具备了优异的机械柔韧性，有助于抑制锂枝晶生长避免发生短路。接着以新制备的 PI/PEO/LiTFS 固态复合聚合物、以及传统的液态溶液为电解质分别制备了对称电池，测试电化学稳定性，结果发现，采用液态电解质的电池中产生了大量的锂枝晶，相反基于 PI/PEO/LiTFS 固态电解质的电池中仅出现了微量的锂枝晶，表明了 PI/PEO/LiTFS 固态电解质确实能够有效地抑制锂枝晶生长。最后研究人员以 PI/PEO/LiTFS 固态复合聚合物为电解质，与磷酸铁锂正极和锂负极组装成完整的电池器件进行电化学性能测试。在 C/10、C/5、C/2 和 1C 不同倍率下，基于 PI/PEO/LiTFS 固态电解质的锂电池都能够获得较好的放电比容量，分别为 176 mAh/g、156 mAh/g、138 mAh/g 和 125 mAh/g，表现出了良好的倍率性能。且在 C/2 倍率下，电池可以稳定循环 200 余次，平均库伦效率接近 100%，能量密度高达 246 Wh/kg，是目前文献报道的固态电解质电池能量密度的最高值，与液体电解质电池的能量密度相当。更为关键的是，将电池进行弯折后，电池的依然可以正常工作点亮 LED 灯泡，展现出良好的柔韧性。该项研究设计制备了一种超薄的柔性聚合物固态电解质，在保障电池性能前提下，提升了器件的稳定性和机械柔韧性，为解决锂离子电池安全问题和柔性化发展提供了思路。相关研究成果发表在《*Nature Nanotechnology*》⁹。

（丁华琪 郭楷模）

⁹ Jiayu Wan, Jin Xie, Xian Kong, et al. Ultrathin, flexible, solid polymer composite electrolyte enabled with aligned nanoporous host for lithium batteries. *Nature Nanotechnology*, 2019, Published: 27 May 2019

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

