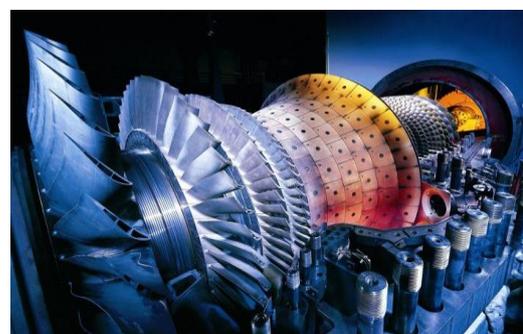


# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- OPEC：到 2040 年全球日均石油需求预计增至 1.117 亿桶
- 美科学院报告提出地质调查局能源资源计划未来方向
- DOE 资助 2800 万美元强化能源基础设施网络安全
- 《*Science*》刊文评述钙钛矿太阳能电池商业化挑战

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



**《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](mailto: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

- OPEC: 到2040年全球日均石油需求预计增至1.117亿桶 .....1  
美科学院报告提出地质调查局能源资源计划未来方向 .....5

### 项目计划

- DOE 资助2800万美元强化能源基础设施网络安全 .....8  
DOE 资助445万美元支持地热层间封隔研究 .....10

### 前沿与装备

- 《Science》刊文评述钙钛矿太阳能电池商业化挑战 .....10  
丝网印刷工艺应用于大面积无空穴钙钛矿全流程制备 .....13  
铂纳米和有机分子共催化剂实现可见光驱动全解水产氢析氧 .....14  
锰元素掺杂NASICON型正极材料增强钠离子电池能量密度 .....15  
黑磷量子点催化剂有效抑制锂硫电池穿梭效应 .....15

## 本期概要

**石油输出国组织（OPEC）发布了《2018 世界石油展望》报告，对到 2040 年世界石油发展态势进行了全面的分析预测：**伴随世界经济和人口持续强劲增长，未来 25 年（2015-2040 年）全球能源需求将保持强劲增长态势，到 2040 年全球的能源需求预计增长 33%（以 2015 年为基准）。同期，世界石油需求将增加 1450 万桶/日，达到 1.117 亿桶/日，届时石油在全球能源消费结构中的占比预计为 28%，依旧占据全球能源消费总量中的最大份额。就行业而言，公路运输将继续引领石油需求，石化行业需求增幅最大，航空业增长最快。预测期内，非 OPEC 国家的原油供应（包括致密原油）将减少 110 万桶/日，而 OPEC 国家则将增加近 400 万桶/日。预计蒸馏石油精炼产品长期（到 2040 年）产能增加约 1780 万桶/日，产能增加的地区主要集中在发展中国家（亚太、中东、非洲和拉丁美洲）。

**美国国家科学院发布《美国地质调查局能源资源计划的未来方向》报告，提出未来 10 到 15 年内能源资源计划成果开发和研究的方**向：（1）快速响应技术进步并预测未来的信息需求，重点关注地质资源的新活动和延续活动，优先考虑现有和新兴的常规/非常规石油和天然气及采出水、地热能、甲烷水合物和地下储能相关的技术，保持传统石油、天然气、煤炭、铀和新兴能源资源领域的战略能力。（2）探索、识别和应用新的数据分析和机器学习工具以及评估方法，将资源开发的环境影响纳入能源资源计划成果，采用全生命周期和全系统方法，基于质量和可开采性对资源进行量化，在区域和流域尺度上开发多种资源和多储层地质模型。（3）改进能源资源计划评估方法以减少不确定性。

**《Science》杂志刊发了中国、美国、加拿大和韩国四国科学家联合撰写的《钙钛矿太阳能电池商业化挑战》综述文章，详细阐述了近年来钙钛矿太阳能电池取得的进步以及商业化面临的挑战：**通过器件结构优化，当前小面积钙钛矿电池转换效率已经突破 23%，与商业化多年的多晶硅电池、CdTe、CIGS 等化合物薄膜电池相当，逼近单晶硅。尽管 PSCs 电池转换效率取得了重要的进步，但电池存在严重的稳定性问题，这成为了电池迈向商业化的致命阻碍。目前发展的主要解决方案，包括改进电池封装、钙钛矿结构维度下降（三维到二维）、增加疏水层等。想要让钙钛矿太阳能电池走出实验室迈向商业应用就必须发展大面积的规模化制造技术。相关公司和研究团队已经开始了卓有成效的尝试，开展了不同大面积制造工艺的试验并取得了初步效果。未来，科技界和企业界需要在光伏组件大面积制造技术、长程稳定性、有毒原材料替换处理、标准化测试方法、废旧电池回收等方面加大研究力度。

**美国能源部（DOE）宣布资助 2800 万美元用于支持先进能源系统相关的网络安全技术研发，包括：**高网络弹性的交流输电系统、增强集成分布式能源的区域电网系统的安全、云网络传感器、改善天然气压缩设施信息物理系统安全、用于能源系统的深度信息物理态势感知等，以有效地预警、检测、防御各类潜在的网络安全威胁和攻击，保护联邦政府关键能源基础设施（油气、电力等）免受网络威胁、物理攻击。

### OPEC：到 2040 年全球日均石油需求预计增至 1.117 亿桶

9月23日，石油输出国组织（OPEC）发布了《2018世界石油展望》报告<sup>1</sup>，在综合考量了人口增长、经济发展模式、政策环境、能源供需等多个因素基础上，对到2040年世界石油发展趋势进行了预测：鉴于世界经济和人口持续强劲增长的情况，未来25年（2015-2040年）全球能源需求将保持强劲增长态势，到2040年全球的能源需求预计增长33%（以2015年为基准），期间石油仍将是主要的能源资源，届时全球日均石油需求量预计增长至1.117亿桶。报告关键要点如下：

#### 1、能源总体需求趋势

**2015-2040年间，全球一次能源日均消费需求预计以年均1.2%的增幅增长，预计到2040年增加9100万桶油当量/日，达到3.65亿桶油当量/日。**其中，95%的增长来自中国 and 印度等发展中国家，其年均增长率为1.9%；同期，欧亚大陆需求温和增加450万桶油当量/日，年均增长率为0.7%；而OECD国家需求增量不到100万桶油当量/日，能源需求几乎停滞不前。

**中国和印度强劲的能源需求是世界能源需求增长的最主要驱动因素。**2015-2040年间，发展中国家能源需求将增加8600万桶油当量/日，中国和印度将分别增加2200万和2100万桶油当量/日，两个国家占到了发展中国家增量的一半。

**天然气和可再生能源需求将强劲增长。**预测期内（2015-2040年），预计天然气需求增长近3200万桶油当量/日，年均增长1.7%，到2040年天然气在能源消费总量中的比重将达到25%，较2015年增加3.3%。同期，可再生能源（不包括生物质能和水电）的需求年均增速将达到7.4%，成为预测期内增速最快的能源类型。但由于基数较小，可再生能源绝对增量不太高，为1900万桶/日。由于发展中国家的强劲发展势头及日本核电的回归，预测期内核能需求也将强劲增长，预计增加约900万桶油当量/日。生物质能的需求预计增加850万桶油当量/日。煤炭需求年均增长率最低为0.2%，且是唯一在预测期内达到需求峰值的能源，将在2030年达到8200万桶油当量/日的峰值。石油需求预计以年均0.6%的增速温和增长，到2040年的需求量超过1亿桶油当量/日（1.117亿桶/日）。

**整个预测期内，石油依旧占据全球能源消费总量的最大份额。**到2040年，石油在全球能源消费结构中的占比预计为28%，而化石燃料仍然会占据未来能源消费的主导地位，占全球能源消费总量的75%。

**煤炭仍将是最大的二氧化碳排放源。**能源相关碳排放年度总量将从2015年的330亿吨增加至2040年的390亿吨，2040年燃烧煤炭将为全球新增157亿吨二氧化碳

<sup>1</sup> 2018 World Oil Outlook 2040. [https://www.opec.org/opec\\_web/en/press\\_room/5161.htm](https://www.opec.org/opec_web/en/press_room/5161.htm)

碳排放。由于需求的显著增加，天然气相关的二氧化碳年排放量增量最多(33亿吨)。

## 2、石油需求变化趋势

**中期(到2023年)全球石油需求年均增长120万桶/日。**到2023年，全球石油需求将达到1.045亿桶/日，比2017年高出700万桶/日。其中，发展中国家石油需求将以每年110万桶/日的速度增长。

**国际海事组织(IMO)推出的燃料排放新规将使炼油厂面临挑战，并影响全球石油需求。**IMO规定从2020年1月起所有船用燃料的含硫量限制在0.5%以内，受此新规影响，石油需求增长速度将从2018年的160万桶/日降至2019年的140万桶/日，随后在2020年反弹至170万桶/日。

**到2040年，世界石油需求将增加1450万桶/日，达到1.117亿桶/日。**不同地区的情形呈现显著差异：OECD国家需求下降，欧亚大陆适度上升至饱和，发展中国家需求则不断增长。另外，全球石油需求增长速度减缓，年均增量从2017-2020年间的160万桶/日降至2035-2040年间的20万桶/日。

**印度将成为石油需求增长最大最快的国家。**预测期内，印度石油需求年均增长率为3.7%，增长幅度达到580万桶/日，均居世界首位，但其需求总量仍远低于中国。

**乙烷/液化石油气等轻质燃料仍将是未来的主导产品。**石油行业快速扩张、电动汽车的快速普及以及海洋部门对长期柴油消耗的减少进一步改变了预期石油需求构成。2017-2040年间，1450万桶/日的石油需求增量中，超过一半由轻质燃料贡献(780万桶/日)，尤其是对乙烷/液化石油气(LPG)的需求增幅最大(330万桶/日)。

**就行业而言，公路运输将继续引领石油需求，石化行业需求增幅最大，航空业增长最快。**2017年公路运输占全球石油需求量的45%，达4360万桶/日，预计到2040年将增长至4780万桶/日。航空部门是石油需求增长最快的部门，平均每年增长1.5%。工业对石油的需求主要受石化行业推动，该行业2017至2040年石油需求将增加450万桶/日，包括钢铁、玻璃和水泥、建筑和采矿等。其他工业将继续面临来自替代燃料的激烈竞争，总需求量将增加120万桶/日。电力是唯一石油需求预测下降的行业。

**预计到2040年世界机动车总数将达到24亿辆。**预计2017至2040年间车辆总数将增加约11亿辆，其中乘用车增长约8.77亿辆，有7.68亿辆的增量来自发展中国家，中国的乘用车增幅最大(2.91亿辆)。商用车保有量将增加一倍以上，从2017年的2.3亿辆增加至2040年的4.62亿辆，主要由发展中国家贡献(1.83亿辆)，占商用车增量近80%。

**预计2040年电动汽车将占全球汽车总量的13%左右。**2040年电动汽车(包括纯电动汽车和混合动力汽车)将达到3.2亿辆，乘用车电动汽车将超过3亿辆，占乘用车的15%。天然气乘用车将增加7700万辆，燃料电池汽车(FCV)增速将放缓。2040年商用汽车中大部分仍为传统汽车，天然气汽车将占商用车的6%，电动汽车

升至 4%。总体而言，包括电动汽车在内的替代燃料汽车（AFV）将达到汽车总量的 18% 左右。

### 3、液体燃料供应发展趋势

**强劲复苏改善了美国致密油中期增长趋势。**2017-2023 年非 OPEC 国家液体燃料供应预计增长 860 万桶/日，其中美国的供应增长占到 65%，这是由于美国致密油的近期表现超过预期、需求前景较为乐观并在价格上有优势的缘故。

**受美国致密油供应强劲势头的推动，非 OPEC 国家液体燃料供应在 2020 年代晚期达到峰值，略低于 6700 万桶/日。**此后，到 2040 年，其供应量将缓慢下降至 6260 万桶/日。2017-2040 年期间，非 OPEC 国家的原油供应（包括致密原油）将减少 110 万桶/日，而天然气凝析液（NGL）、生物燃料和其他液体燃料（包括加拿大油砂）的增长幅度在 100-300 万桶/日的范围内。

**全球致密油供应顶峰时期相当于非 OPEC 国家液体燃料供应的 25%，占全球液体燃料供应量的 15%。**2020 年代末期，全球致密油供应将达到 1560 万桶/日，其中 90% 由美国供应。

**OPEC 国家原油供应将在中期下降，并在美国致密油供应高峰过后复苏。**由于美国及其他非 OPEC 国家供应增长势头强劲，对 OPEC 国家原油需求从 2017 年的 3260 万桶/日降至 2023 年的 3160 万桶/日，在非 OPEC 国家液体燃料供应下降后，由于全球需求的缓慢增长，对 OPEC 国家原油需求有所提升，到 2040 年将增加近 400 万桶/日。

### 4、精炼产品前景

**预计精炼产品中期产能增加 780 万桶/日，主要是中东和亚太地区。**炼油厂投资跟随石油需求增长趋势，预计 2018-2023 年期间约 88% 的投资将位于发展中国家。2019-2021 年炼油产品产量将从 2016-2018 年的每年不超过 100 万桶/日增加至 160 万桶/日，然后在 2022 和 2023 年回到 100 万桶/日。

**炼油产能发展趋势表明中期结束时产能将会过剩。**根据炼油厂投资项目趋势估计，其潜在产能逐渐超过炼油产品需求增长，到 2023 年，炼油厂产能增长潜力（740 万桶/日）已经远超需求增量（250 万桶/日），预计产能过剩最大的地区为美国、加拿大、欧洲以及中东，而拉丁美洲和亚太地区（不包括中国）则将出现产能不足。

**预计精炼产品长期（到 2040 年）产能增加约 1780 万桶/日。**由于全球需求从工业化地区向发展中地区转移。产能主要增加的地区集中在发展中国家（亚太、中东、非洲和拉丁美洲）。由于需求下降导致炼油厂利用率降低，预计欧洲和日本等地区可能会关闭部分工厂。

**预计中期炼油厂将关闭产能 100 万桶/日。**这一估计略低于去年的预测，原因是欧洲和日本等地区在消除最严重过剩产能方面取得了很大进展，以及中期需求预测

有所上调。

随着需求增加及产品规格提升，二次增能增加。到 2040 年需增加约 1040 万桶/日的转化装置、2020 万桶/日的脱硫装置和 550 万桶/日的辛烷装置，其中大部分均将在 2030 年前实现以应对需求增长和更严格的产品标准的实施。

## 5、石油出口

由于中东向亚太地区出口量增加，预计长期内全球原油出口将增加约 540 万桶/日。受美国和加拿大出口增加推动，到 2020 年全球原油出口将由 2017 年的 3850 万桶/日增加至 4000 万桶/日；到 2025 年，拉丁美洲和非洲产量下降导致全球出口量降至 3900 万桶/日；到 2040 年，全球出口量将逐步增加至近 4300 万桶/日。

## 6、能源与技术

内燃机（ICE）仍具备超过现有排放标准的巨大开发潜力；通过使用适当尺度催化剂和过滤器以及合适的温度控制，可以解决 ICE 污染排放问题（主要是 NO<sub>x</sub>）；电池技术将持续发展，未来十年内将生产出全固态电池；传统以及电动动力系统将在未来几十年内并存；回收将在电动汽车领域发挥重要作用；燃气涡轮发动机仍将是商用飞机的主要发动机；航空运输电气化可能进一步发展；大型船用柴油发动机效率已经达到创纪录水平，提升空间有限，空气润滑和杂化可以提供更好解决方案；LNG 作为无硫燃料有多种优势，但在短期和中期内会受到缺少加注设施的影响；到目前为止，联合循环燃气轮机（CCGT）在化石燃料发电技术中的碳排放量最低；预计将来可再生能源发电将主要来自风能和太阳能；储能技术将是可再生能源的关键要素，电池储能系统正与电动汽车同步发展；致密油将继续发挥重要作用，特别是在中期；“原油-化学品”概念可大大改善加工设施产量，并为石化行业带来“工业 4.0”原则；数据收集、数据处理和人工智能将贯穿资源探索、开发和最终炼油过程；技术发展不仅可以促进新能源发展，还可增强传统能源作用。

## 7、能源与气候变化

巴黎协定与天然气成本竞争优势共同给煤炭行业带来更大压力；美国宣布退出巴黎协定后，欧盟、中国和印度重申了对该协定的承诺；道路运输部门受到更多监管审查，各地制定更严格的排放标准；柴油燃料在几个国家面临更严格的质量标准，特别是在“柴油门”争议之后；各地都制定了普及电动汽车的相关政策，但正对电动汽车政策补贴进行重新评估；各地区正重新审视核能在发电行业中推动实现气候和能源安全目标的潜力；政府的支持以及可再生能源（尤其是风能和太阳能）成本下降，使其有望在发电行业发挥更大作用；美国能源政策经历了“能源安全”到“能源独立”，并最终达到了“能源优势”的目标；虽然美国正开发其致密油资源，但致密油商业化取决于经济和技术；欧盟计划到 2030 年将温室气体排放减少 40% 以上，可再生能源占能源结构达 27% 以上，能源效率至少提高 27%；液化天然气（LNG）

是欧盟能源多样化的一项主要途径；中国政策发展体现了其实现“蓝天”未来目标所作出的努力；以风能和太阳能为主的可再生能源可为印度提供中长期内需增加的大部分电力；虽然政策可以成为长期变化的推动力，但消费者偏好及财政情况对能源市场也有重大影响。

## 8、能源与可持续发展

应采用综合统一的方法实现第七个可持续发展目标（SDG7）<sup>2</sup>。能源在“2030年可持续发展议程”中占有突出地位，SDG7 要求增加可再生能源利用和提高能源效率，这将对未来能源结构和水平产生重大影响。预计煤炭将成为受影响最大的燃料，到2040年需求将减少65%，石油需求则将下降近15%，天然气需求下降13%。然而，全球二氧化碳减排量无法满足温度下降2℃的目标。因此需采取综合统一的方法以实现SDG7，国际合作、财政支持、技术转让和产能建设也同样重要。

（岳芳 郭楷模）

## 美科学院报告提出地质调查局能源资源计划未来方向

8月29日，美国国家科学院发布了《美国地质调查局能源资源计划的未来方向》报告<sup>3</sup>，针对美国地质调查局（USGS）的能源资源计划，确定了美国及世界面临的能源资源挑战，提出未来10到15年内能源资源开发和研究的方法以最有效地应对这些挑战，并更好地为USGS能源研究重点和美国政府的能源需求及优先事项提供信息。美国地质调查局能源资源计划负责提供公正、公开的国家及地区规模能源资源评估，包括对石油、天然气和煤炭等技术可采的碳氢化合物国内及国际资源禀赋的研究评估，以及对未来美国能源结构可能起重要贡献的其他地质资源（如地热、甲烷水合物和铀资源）的评估。报告具体内容如下：

### 1、未来10至15年内，美国和世界将极大依赖能源资源，将面临的主要挑战有：

**充分认识到国家能源资源存量及其不确定性。**资源开发需要对地质结构与地质工程，勘探开采技术，数据获取、管理与分析工具，水文学，耦合过程及其环境影响以及地质资源的经济开采有深刻理解。

**以对环境和社会负责的方式探索 and 开发地质资源。**在资源开发的生命周期中了解地下环境和资源开发的影响，包括：土地和水的使用要求；采出水的管理；含水层污染的可能性；避免或减轻诱发地震活动；二氧化碳的地质封存；放射性和其他能源废物的长期地质封存。

**克服新资源开发过程中的技术和经济障碍。**需在以下领域进行技术开发和创新：开发可采资源开采后的地下能源；新兴地质资源（例如甲烷水合物）；减轻环境影

<sup>2</sup> SDG7 是联合国 17 个可持续发展目标之一，具体是确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源。

<sup>3</sup> Future Directions for the U.S. Geological Survey's Energy Resources Program.

<https://www.nap.edu/catalog/25141/future-directions-for-the-us-geological-surveys-energy-resources-program>

响（例如石油和天然气生产引起的甲烷泄漏、石油和天然气井产出减少以及诱发地震活动）；废物处理或隔离（例如二氧化碳）。

**适应波动性电源（例如风能和太阳能）及相关能源存储。**地下储能（或废弃物处置）需要对地下储层进行表征，了解如何储存资源、储存的影响以及如何提取储存的资源。

**2、能源资源计划应快速响应技术进步并预测未来的信息需求，对此提出的建议包括：**

**根据能源资源计划任务和国家的信息需求，重点关注地质资源的新活动和延续性活动。**能源资源计划应关注与地质能源开发相关的问题，通过不断重新评估当前和新兴能源趋势和信息需求，以及利益相关者最需要的成果，确定其活动的优先级，从而提高其相关性。

**优先考虑与现有和新兴的常规/非常规石油和天然气及采出水相关的地质研究及成果，以及与地热能、甲烷水合物和地下储能相关的新兴技术。**常规/非常规石油和天然气勘探和开发（需要高用水量水力压裂技术）将在未来 10-15 年内主导能源部门，能源资源计划评估对于为国家能源政策提供信息至关重要。计划应采取如下举措：（1）通过提高其评估方法及输入数据的透明度来改进对石油、天然气和地热的评估；（2）评估应与信息同步更新，应包含与生命周期有关的信息，如所需的水资源、采出水的毒性、处置和环境影响，以及与经济可开采性相关的信息；（3）继续就甲烷水合物相关研究开展能源资源计划合作，考虑水合物开发的全生命周期的环境后果，并根据水合物生产技术的开发情况定期重新评估与水合物相关的研究重点；（4）高度关注与地下储能和废物处理相关的难以预期的耦合过程（水力/化学/热/机械），以便更好地了解地下储能系统的长期性能及其影响。

**保持传统石油、天然气、煤炭、铀和新兴能源资源领域的战略能力；根据信息需求，调整以上及其他领域的成果和研究重点。**能源资源计划需做好应对可能从油页岩等领域中获益的准备。另外，计划可针对新发现或不太明确的资源量进行评估，使其战略指导具备更大的灵活性。例如，煤炭资源评估可能侧重于冶金、煤气化和稀土元素提取等特定资源。同样，与能源资源开发有关的人类健康和安全方面的空间信息也可纳入评估。能源资源计划与铀资源相关的成果在美国政府机构和行业中是独一无二的，最近在这个领域的工作包括：估算未发现的铀资源的新方法、采矿后地下水采收相关项目、不同主岩中矿床的改进估算方法、传统铀矿的修复、溶浸采铀（美国铀矿开采的主要方法）对地下水的影响及治理研究。目前的评估工作与铀开发的基础研究达到了平衡。

**3、下一代成果的综合方法：随着数据量的增加，能源资源计划应探索、识别和应用新的数据分析和机器学习工具以及评估方法。对此提出的建议包括：**

**将与资源开发的环境影响有关的数据纳入能源资源计划成果。**决策者应完全了解影响能源开发总成本的所有因素，包括缓解和补救环境影响。计划目前单独评估与能源资源开发有关的环境因素，应将其与环境研究的地理空间相关要素结合起来，并将其他公共和私人信息源结果纳入资源评估中。例如，计划可以在能源资源图上叠加生物多样性地图和濒危及受威胁物种地图。

**考虑地质资源时应采用全生命周期和全系统方法，从初始资源评估到开发、废物处理以及已开发场地的处置。**能源资源计划不是按主题领域划分研究成果，而是需要将基于生命周期和系统的综合方法应用于其分析，以便进行可靠的情景分析，并估算决策者对资源开发的影响和总成本。例如，鉴于需要生产大量天然气，有关可能放置井的位置以最大限度地减少所需水量，以及哪种提取技术可能最有效地减轻预期环境影响的信息将具有指导意义。

**基于质量和可恢复性对资源进行量化，以改进对地质资源的评估。**能源资源计划不进行经济分析，但它可以通过向决策者提供何时以及如何开发特定资源可获得最大利益的相关信息来支持经济分析。计划评估应包括资源质量和经济可开采性的信息，以及支持他人开发能源供应曲线的信息。

**重视在区域和流域尺度上开发多种资源和多储层地质模型。**单个能源资源计划成果中的系统级信息（如多种资源、多储层和环境影响等）有助于决策者权衡不同开发事项及其组合的影响。然而，通常情况下，计划成果专注于特定规模的某种能源资源。下一代计划评估成果可以结合区域数据和数值模型，以提高对多种资源、流域规模地质资源库的理解。

**4、有些能源资源计划评估方法十多年未经过修正，而石油和天然气生产、采矿和加工及数字化数据传播等技术已经有了很大进展，资源的利用及市场也发生了变化，因此需改进评估方法以减少不确定性。对此提出的建议包括：**

**成为国家级公共地质资源数据的保管机构。**目前，缺少统一的国家级地质数据库用于地质资源的开发、研究、政策和法规。联邦、州和私营部门为特定目的来收集数据，因此难以将这些数据组合建立区域或国家级的数据库。利益相关者认为能源资源计划维护的数据库（如煤炭资源，烃源岩、石油和天然气地球化学，采出水）还不够全面，计划应扩展其当前的数据汇编、存档和传播功能，并使之成为美国国家级能源相关地球科学数据的保管和传播者。为了满足客户需求，计划应优先创建更易于更新的数据集、创建数据库提供新类型信息、开发适当的数据存储系统和数据库架构、改善网络传送机制。

**提高能源资源计划成果和相关数据的及时性。**利益相关者认为能源资源计划成果发布过晚，尽管计划通过发布评估技术摘要以增加成果及时性，但由于缺乏支持数据和分析方法的描述，这些成果对许多决策者的用途有限。如果成果能够基于最

新的可用数据以及勘探和开发技术的最新进展，并在进行资源开发决策之前交付，其实用性将会增加。

**建立正式机制，定期与外部和主要利益相关方合作，确定未来能源资源计划活动和优先顺序，并确定计划成果和研究的影响。**能源资源计划没有正式的利益相关者识别和互动机制，也缺乏正式机制来确定利益相关者的需求或计划成果的影响。与利益相关者定期、正式的接触可以帮助确定计划优先事项，确定新出现的问题，审查计划能力，并确定新的地质资源评估与开发方法。能源资源计划可以通过建立联邦和州级实体以及非政府组织的外部顾问委员会来与利益相关者进行正式接触，以补充其现有内部顾问委员会的建议。

**与其他 USGS 单位、联邦和州机构以及国内和国际组织合作，更有效地实现能源资源计划使命。**计划在甲烷水合物研究领域的工作是一个协调研究的范例，它利用各种外部机构的专业知识和资源来推进知识的总体状态。类似地，能源资源计划其他研究领域可以在提高效率的基础上扩展各自的广度和范围。例如，计划可以建立伙伴关系，并将其资源与具有丰富数据集和样本档案的州机构的资源相结合。另外，计划还可从短期的研究中获益以完善其专业知识。为了保持其可靠性，计划应在合作中保持客观和中立。

(岳芳)

## 项目计划

### DOE 资助 2800 万美元强化能源基础设施网络安全

10 月 1 日，美国能源部 (DOE) 宣布资助 2800 万美元用于支持先进能源系统相关的网络安全技术研发<sup>4</sup>，旨在整合公私部门（美国联邦政府能源、网络等相关部门，能源和互联网企业等）的研发力量，研发出新一代的网络安全防护技术，以有效地预警、检测、防御各类潜在的网络安全威胁和攻击，以保护联邦政府关键能源基础设施（油气、电力等）免受网络威胁、物理攻击。本次资助项目具体内容参见表 1。

表 1 能源基础设施网络安全技术项目具体研究内容

技术主题	研究内容	承担机构
高网络弹性的交流输电系统	利用电网信息物理系统、计算机科学和电力工程原理，为交流输电系统开发新工具和深度网络安全防御解决方案，以减轻针对交流输电系统控制器、工作站和电网的网络攻击的风险	ABB 公司，爱荷华州立大学，伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校

<sup>4</sup>Department of Energy Invests \$28 Million to Advance Cybersecurity of the Nation's Critical Energy Infrastructure. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-invests-28-million-advance-cybersecurity-nation-s-critical-energy>

增强集成分布式能源的区域电网系统的安全	通过扩充 IEEE 1547 协议（分布式能源与电力系统互联协议），为增强分布式能源和电网物理和逻辑互联的安全性提供一个参考框架，并提供一个实施的参考案例以推动利益相关方采用	ABB 公司，杜克能源公司，橡树岭国家实验室，伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校
云网络传感器	开发并演示一个低成本的云端传感器网络，以实现潜在网络威胁的实时预警、检查，以减少网络攻击风险	Dragos 公司，阿莫林公司，第一能源公司，爱达荷国家实验室，北美电力可靠性委员会电力信息共享与分析中心，南方公司
改善天然气压缩设施信息物理系统安全	利用机器学习、先进的控制算法和信息物理模型，为天然气压缩站开发一个先进的信息物理保护(CPP)系统，用于监控和天然气压缩站关键节点网络异常和防御网络攻击	通用电气全球研究中心，贝克休斯，通用电气，爱达荷国家实验室
改善风力发电站的信息物理系统弹性	利用物理模型和机器学习技术开发用于风力发电系统的自适应防御技术，以应对复杂的网络攻击	通用电气全球研究中心，通用电气可再生能源公司，爱达荷国家实验室
时间敏感量子密钥分发	把时间敏感网络与量子密钥分发(QKD)相结合，增强信息传送的安全，以实时探测电网通信中网络入侵攻击企图	通用电气全球研究中心，查塔努加电力局，MITRE 公司，橡树岭国家实验室，Qubitekk 公司
网络流控制器安全管理	为网络流控制器开发安全管理流程，该流程控制器将提供完整的网络事件可见性、态势感知，以及针对作业网络中检测到的威胁的主动防御措施	施韦策工程实验室，玻利维尔电力管理局，Dragos 公司，Juniper 网络公司
能源输送控制系统的网络安全解决方案	开发一种网络安全解决方案，实时监控能源输送控制系统内的嵌入式设备的运行内存和固件配置情况，保障设备能够按照预期情况稳定运行	TDi 技术公司，美国电力研究协会，艾斯能公司，NRG 能源公司，橡树岭国家实验室
用于能源系统的深度信息物理态势感知	融合网络和物理数据和算法、有效集成分析和可视化技术，开发下一代安全能源管理系统，来检测能源系统中网络恶意和异常事件	德州农工大学工程实验站，西北太平洋国家实验室，桑迪亚国家实验室，Sekurity 公司，伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校，威斯特拉能源公司
电网基础设施数据协议	开发一个开源工具，能够使用公开的元数据（如实时价格）来检测网络异常以改善运营商的预警和防御网络攻击事件能力	联合技术研究中心，西北太平洋国家实验室，南加州爱迪生公司，田纳西大学

油气环境的自 为石油天然气运营商开发一个自动化的配置分析工具， WhiteScope 公司等  
 动化配置分析 以提供一种安全的方法来检查油气设备配置情况、制定  
 工具 安全策略并获取相关报告

(郭楷模)

## DOE 资助 445 万美元支持地热层间封隔研究

9月5日，美国能源部（DOE）宣布为4个地热层间封隔研究项目提供445万美元的资助<sup>5</sup>，以支持研发增强型地热系统（EGS）的工具和技术，提高其性能及成本效益。层间封隔技术可以根本改善EGS的性能和经济性，能够有效地预测定位特定区域，优化裂隙网络，从而降低EGS开发成本和操作风险，增加地热井筒发电量。EGS具备在全国范围内提供稳定可靠的可再生能源的潜力，目前美国地热发电容量仅有3.8 GW，投资EGS技术可以产生超过100 GW的发电容量。本次资助的项目侧重于研发对井筒完整性和裂缝导流能力风险较低、能够在腐蚀性坚硬岩石环境中长时间高温下操作、能承受较大压差的层间封隔工具和技术，具体项目见表1。

表1 DOE 资助的地热层间封隔研究项目内容

承担机构	研究内容
C-Crete Technologies 有限公司	开发嵌入高性能聚合物中的石墨烯纳米带，可通过目标高能微波固化并隔离井下区域
Fervo Energy 公司	与斯伦贝谢公司合作，通过高温部件（弹性体）升级其最受欢迎的“Copperhead”层间封隔技术，部署于地热环境
Hotrock Energy Research Organization	开发用于层间封隔的基于可热降解膨胀材料的高温封隔器系统，包括临时隔离井下区域的可膨胀弹性体和泡沫。
Welltec 有限公司	设计全金属、无弹性的层间封隔工具，用于更高温度的EGS环境

(岳芳)

## 前沿与装备

### 《Science》刊文评述钙钛矿太阳能电池商业化挑战

9月21日，《Science》杂志刊发了中国、美国、加拿大和韩国四国科学家联合撰写的《钙钛矿太阳能电池商业化挑战》<sup>6</sup>综述文章，详细阐述了近年来钙钛矿太阳能电池在器件结构性能、稳定性、规模化制造技术等方面取得的重要科研进展及其商业化应用面临的潜在系列挑战。报告的关键要点如下：

<sup>5</sup> DOE. Energy Department Awards \$4.45 Million for Geothermal Zonal Isolation Research.

<https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-awards-445-million-geothermal-zonal-isolation-research>

<sup>6</sup> Yaoguang Rong, Yue Hu, Anyi Mei, et al. Challenges for commercializing perovskite solar cells. *Science*, 2018, DOI: 10.1126/science.aat8235

## 1、器件结构和性能

钙钛矿太阳电池（PSCs）是由染料敏化太阳电池（DSSC）发展演化而来的，其器件的主体结构依旧是多薄膜堆叠的分层结构。目前研究的主要结构体系分为两类（图 1B）：一是“类 DSSC”的介孔结构（mesoscopic PSCs），包括透明导电玻璃、电子阻挡层、介孔电子传输层（ETL）、钙钛矿层、空穴层（HTL）和对电极层，而就 ETL 和 HTL 的位置不同，介孔 PSCs 电池又可以细分为正向结构和反向结构；二是“类聚合物太阳电池”的平面型结构（planar PSCs），即分层结构中用平面的电子传输层替代介孔电子传输层，即电池结构不含有介孔层。目前光电转换效率最高的电池采用的是传统介孔结构，单结的小面积（ $0.09\text{ cm}^2$ ）介孔钙钛矿电池转换效率已经达到了 23.3%（图 1C），与商业化多年的多晶硅电池、CdTe、CIGS 等化合物薄膜电池相当，逼近单晶硅。

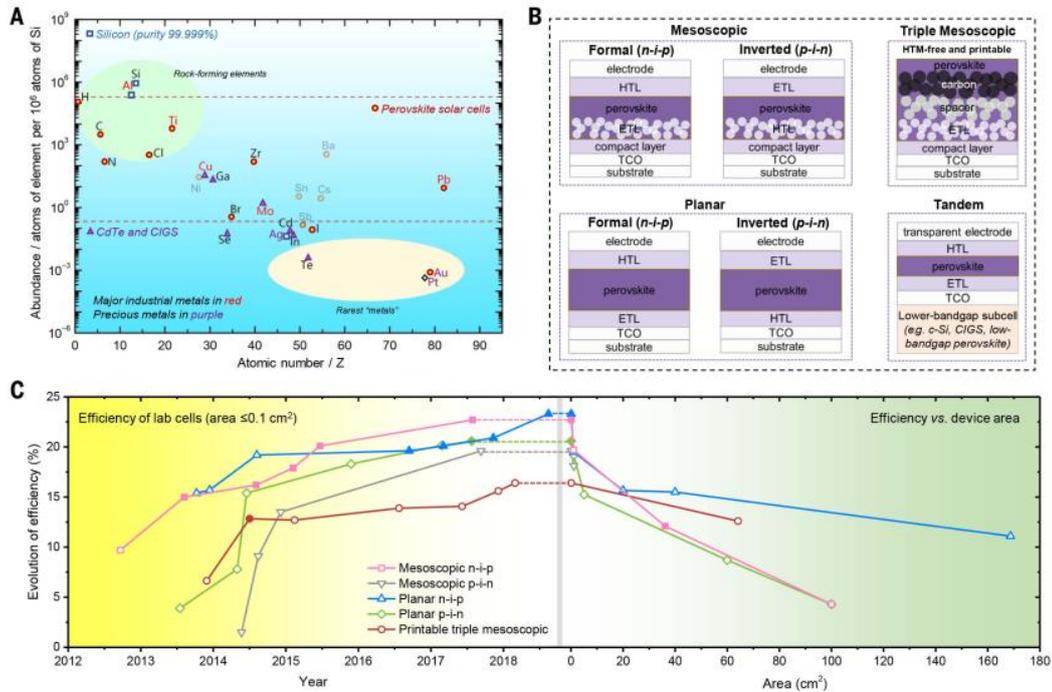


图 1 不同结构的钙钛矿太阳电池结构示意图及其转换效率

而为了突破单结太阳电池 Shockley-Queisser 效率极限，研究人还开发了基于钙钛矿电池的串联多结太阳电池，效率蹿升到了 25%左右的水平。然而，无论是单结还是多结钙钛矿电池，其高效率的电池均是小面积尺寸（小于  $1\text{ cm}^2$ ），不利于商业化生产。

## 2、器件稳定性

尽管 PSCs 电池转换效率取得了重要的进步，且具备了制备工艺简单和成本低廉优点，然而钙钛矿薄膜易于受到水分、氧气、紫外光照等因素的影响而引起薄膜降解，从而导致电池性能逐步衰退，也即电池存在严重的稳定性问题，这成为了电池迈向商业化的致命阻碍。针对上述问题，目前发展的主要解决方案集中在改进电

池封装、钙钛矿结构维度下降（三维到二维）、增加疏水层等。例如，通过封装工艺降低水和氧气造成的钙钛矿层分解，选用更加稳定的新材料替代不稳定传输层，提高器件稳定性等。经过多年的技术攻关，目前钙钛矿电池的稳定性问题得到了一定的改善，在温度 55°C、功率为 1 kW/m<sup>2</sup> 的辐照下 PSCs 实现了 10 000 小时左右稳定运行而没有出现明显的性能衰退，相当于能够在大多数欧洲国家提供 10 年的户外使用期限（图 2）。不过，需要指出的是，PSCs 标准化测试方法还需要进一步统一化。除此之外，还要提高测试报告的透明化，譬如需要提供初始的器件性能、归一化参数等数据。

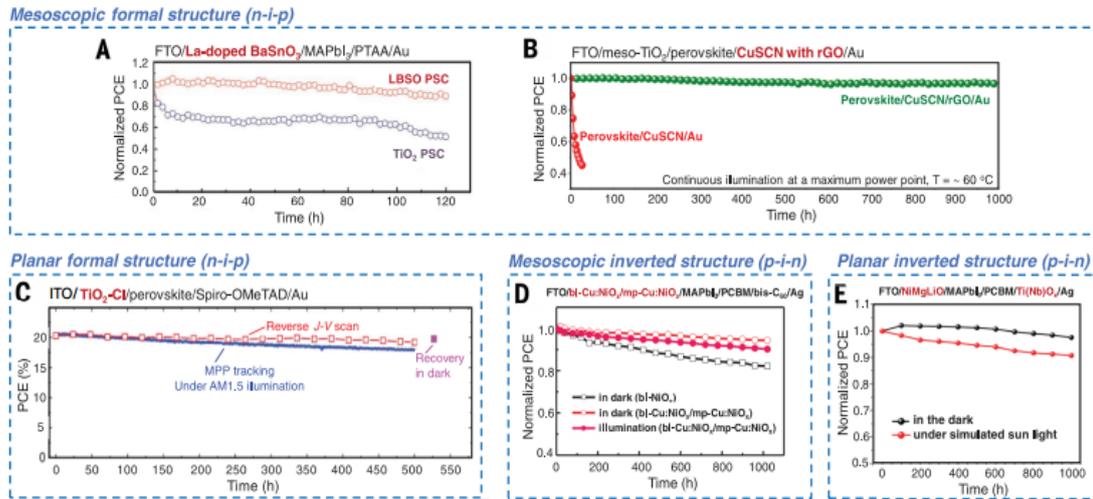


图 2 不同结构的钙钛矿太阳能电池稳定性测试

### 3、规模化制造工艺

如上文所述，目前高效率的钙钛矿电池均是小面积尺寸（小于 1 cm<sup>2</sup>），不利于商业化生产。因此想要让钙钛矿太阳能电池走出实验室迈向商业应用就必须发展大面积的规模化制造技术。相关公司和研究团队已经开始了卓有成效的尝试，开展了不同大面积制造工艺的试验并取得了初步效果：杭州纤纳光电科技有限公司（Microquanta Semiconductor）得到面积为 17.8 cm<sup>2</sup> 的刚性钙钛矿电池模块，获得了 17.4% 转换效率；荷兰 Solliance 公司利用卷对卷工艺制备了 169 cm<sup>2</sup> 柔性钙钛矿电池，其转化效率为 11.1%；华中科技大学光电国家实验室采用丝网印刷工艺得到了面积为 100 cm<sup>2</sup> 的电池模块，其转换效率超过 10%。由上可见，通过各方努力钙钛矿太阳能电池在规模化制造工艺方面取得了显著进步。然而，商业化生产不止要求规模化生产技术，还要考虑退役电池的回收处理问题、生产线的安全操作问题（钙钛矿部分原材料具有毒性）等，上述问题都需要一一解决。

文章最后总结道，钙钛矿太阳能电池的研究已经涵盖了从基础研究到产业应用的方方面面，既有电池机理相关基础科学问题，又有工业级的制造和应用问题。未来，科技界和企业界需要在光伏组件大面积制造技术、长程稳定性、有毒原材料替换处

理、标准化测试方法、废旧电池回收等方面加大研究力度。而随着学术界和企业双方合作的加强和研究深入，阻碍钙钛矿电池商业化进程的问题会逐步得到解决。

(郭楷模)

## 丝网印刷工艺应用于大面积无空穴钙钛矿全流程制备

钙钛矿太阳能电池的转换效率在短短数年时间内便突破 23%，超过多晶硅逼近单晶硅，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。然而目前高效率钙钛矿太阳能电池都局限于小面积（ $0.1 \text{ cm}^2$  左右），不利于大规模产业化生产。英国斯旺西大学 Trystan M. Watson 教授研究团队将低成本的丝网印刷工艺应用于钙钛矿电池制备的全流程，制备出了迄今为止最大面积（ $198 \text{ cm}^2$ ）的无空穴碳基钙钛矿太阳能电池，转换效率达到了 6.6%。研究人员首先利用激光刻蚀在导电玻璃 FTO 上进行刻蚀处理（防止小电池单元串联时发生短路），随后利用丝网印刷技术依次在 FTO 上印刷二氧化钛（ $\text{TiO}_2$ ）致密层、 $\text{TiO}_2$  和二氧化锆（ $\text{ZrO}_2$ ）多孔层、多孔碳层和钙钛矿薄膜层，以制备出完整的电池模块。该电池模块由数十个电池单元串联而成，有效面积达到了  $198 \text{ cm}^2$ ，这是迄今为止已报道的最大面积无空穴碳基钙钛矿电池单元模块。随后将没有封装的无  $\text{TiO}_2$  致密层和有致密层的电池（未经过放置处理）置于一个标准太阳光辐照下进行电化学性能对比测试研究，结果显示含有  $\text{TiO}_2$  致密层电池短路电流和开路电压依次为  $20 \text{ mA cm}^{-2}$  和 2V，高于没有致密层的电池，从而获得了更高的光电转换效率，达到 3.2%，后者仅为 1.9%。而当将电池置于湿度 70% 黑暗室温环境中 144 小时后，两种电池的性能得到了进一步的提升，其中含有  $\text{TiO}_2$  致密层电池提升到了 6.6%，而无致密层的电池则提升至 4.2%。这主要是由于，放置于一定湿度空气环境中使得一定水分进入钙钛矿电池当中，提升了钙钛矿薄膜的结晶性和载流子输运特性。更为关键的是，无封装的电池在上述环境中放置 2 个月后转换效率几乎没有出现衰退，表现出极其优异的稳定性，研究人员指出这主要是源于电池结构，即采用了多孔碳作为空穴，有效保护钙钛矿薄膜免受外界环境的侵蚀破坏。下一步将致力于工艺的改进，主要是提升填充因子，从而进一步提升电池效率。该项研究一方面将低成本的丝网印刷技术应用到钙钛矿电池全流程制备，同时采用碳基结构替代传统空穴结构，制备出了迄今为止最大模块面积的无空穴碳基钙钛矿电池，既简化制备工艺还大幅降低成本，为钙钛矿电池规模化商业生产积累了关键技术基础。相关研究成果发表在《*Advanced Materials Technologies*》<sup>7</sup>。

(郭楷模)

<sup>7</sup> Francesca De Rossi, Jenny A. Baker, David Beynon, et al. All Printable Perovskite Solar Modules with  $198 \text{ cm}^2$  Active Area and Over 6% Efficiency. *Advanced Materials Technologies*, 2018, DOI: 10.1002/admt.201800156

## 铂纳米和有机分子共催化剂实现可见光驱动全解水产氢析氧

在全球能源紧缺和气候变化挑战的大背景下，既能产氢又能产氧的光催化全解水技术逐渐成为了全球科学家关注的热点研究方向。然而，当前高效的催化剂大都光响应范围较窄，即只吸收紫外光，对可见光和近红外基本不吸收，且需要牺牲剂和额外的能耗。德国慕尼黑大学的 Jacek K. Stolarczyk 教授研究团队联合维尔茨堡大学的研究人员制备了全新的铂(Pt)纳米催化剂和有机分子催化剂( $\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})\text{Cl}_2$ )共同修饰的硫化镉(CdS)纳米棒，实现了在无牺牲剂的情况下可见光驱动全解水产氢和析氧。要同时实现产氢和析氧就必须让光照产生的电子空穴对能够快速分离且不发生复合逆反应。为此，研究人员提出共催化剂设计思路，即利用 CdS 纳米棒形貌实现对氧化位点和还原位点的空间分离，即一方面把 Pt 颗粒生长在纳米棒的尖端，这些 Pt 颗粒充当了光吸收激发的电子受体，也即充当还原剂负责将水还原为氢气；另一方面， $\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})\text{Cl}_2$  基氧化催化剂锚定于 CdS 纳米棒的周边位置，主要负责产氧。通过上述处理让 CdS 纳米棒同时具备还原和氧化催化功能，从而能够同时进行水氧化和还原以制备氢气和氧气。基于上述思路，研究人员首先通过热注入法制备了 CdS 纳米棒，随后通过热分解法在纳米棒的两端生长 Pt 纳米颗粒催化剂，在二甲基二硫代氨基甲酸钠官能团化学键作用在纳米棒的周边键合上  $\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})\text{Cl}_2$  基有机分子氧化催化剂，从而形成了 Pt 纳米颗粒和  $\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})\text{Cl}_2$  共修饰的 CdS 复合纳米棒。时间分辨光谱表征表明了 CdS 复合纳米棒具备了高效的电荷分离以及超快电子和空穴转移到反应位点特性（电子快速转移到纳米棒两端、空穴快速转移到纳米棒的周边），有效避免了电子空穴的复合。在无牺牲剂、温和酸性条件下（ $\text{pH}=6$ ）和  $20 \text{ mW cm}^{-2}$  强度的 Xe 灯照射下，对 CdS、CdS-Pt 以及 Pt 纳米颗粒和  $\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})\text{Cl}_2$  共同修饰的 CdS 复合纳米棒的光催化进行测试，对产物的探测结果显示纯粹的 CdS 纳米棒没有任何产物产生，而只有 Pt 纳米颗粒修饰的 CdS-Pt 系统只探测到氢气，产率为  $20 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}\text{h}^{-1}$ ，也即量子效率为 4.9%，表明了电子确实有效地转移到纳米棒的两端。而 CdS 复合纳米棒产物探测显示既有氢气又有氧气，其中 CdS 复合纳米棒在每纳米棒 10 个催化分子（ $\text{Ru}(\text{tpy})(\text{bpy})\text{Cl}_2$ ）时候，检测到产氧的效率达到  $71 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}\text{h}^{-1}$ ；当每纳米棒 83 个催化分子时，检测到氧气产生速率增加至  $170 \mu\text{mol g}_{\text{cat}}^{-1}\text{h}^{-1}$ ；上述析氧效率相当于前者的表观量子效率为 0.10%，后者为 0.27%。该项研究精心设计了贵金属纳米颗粒和有机分子双催化剂共同修饰的 CdS 纳米棒，将氧化剂和还原剂同时引入并利用 CdS 纳米棒形貌实现对氧化位点和还原位点的空间分离，实现了电子和空穴的高效分离和转移，从而实现了光驱动全解水产氢和析氧，为设计开发高效的全解水催化剂提供了新思路。相关工作发表在《*Nature Energy*》<sup>8</sup>（刘竞 郭楷模）

<sup>8</sup> Christian M. Wolff, Peter D. Frischmann, Marcus Schulze, et al. All-in-one visible-light-driven water splitting by

## 锰元素掺杂 NASICON 型正极材料增强钠离子电池能量密度

钠离子快离子导体(NASICON)型正极材料因其具有三维钠离子快速传输网络、长循环稳定性以及高钠离子迁移率优点,而备受研究人员关注。然而,该类型电极由于其固有的热力学性质决定充放电过程中每单位电极结构中只有两单位的钠离子( $\text{Na}^+$ )能够实现可逆脱嵌,这大大限制了其能量密度。法国亚眠大学的 Christian Masquelier 教授带领的研究团队利用元素的替代掺杂的方法用锰离子( $\text{Mn}^{2+}$ )取代 NASICON 型正极材料磷酸钒钠( $\text{NaV}_2(\text{PO}_4)_3$ )中一个  $\text{V}^{3+}$  离子的位置,显著提升了电极充放电过程中可逆的离子脱嵌数量,从而提高了电池的能量密度。研究人员通过溶胶凝胶法,将  $\text{Mn}^{2+}$  引入到  $\text{NaV}_2(\text{PO}_4)_3$  前驱体溶液中,随后通过  $800^\circ\text{C}$  水热反应获得结晶产物。X 射线衍射表征显示,产物为纯相的  $\text{Na}_4\text{MnV}(\text{PO}_4)_3$ ,即  $\text{Mn}^{2+}$  确实掺入到  $\text{NaV}_2(\text{PO}_4)_3$  晶体晶格当中取代了其中一个  $\text{V}^{3+}$  的位置。随后以  $\text{Na}_4\text{MnV}(\text{PO}_4)_3$  为正极组装成完整的钠离子电池,并在不同的电压工作区间进行了一系列的电化学性能测试。首先考察了在  $2.5\text{-}3.7\text{ V}$  电压范围内(对应着  $\text{V}^{3+}/\text{V}^{4+}$  与  $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$  氧化还原电对的价态变化)电池性能与电极材料结构行为关系,发现在这一电压区间,采用新型的  $\text{Na}_4\text{MnV}(\text{PO}_4)_3$  为正极电池与传统的  $\text{NaV}_2(\text{PO}_4)_3$  正极电池一样呈现出典型的可逆两相反应(两个  $\text{Na}^+$  脱嵌),且两者的电池性能相当,前者放电比容量为  $101\text{ mAh g}^{-1}$ ,后者为  $103\text{ mAh g}^{-1}$ 。然而,当拓宽工作电压区间后( $2.5\text{-}4.3\text{ V}$ ,充电过程对应着  $\text{V}^{3+}/\text{V}^{4+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$  及  $\text{V}^{4+}/\text{V}^{5+}$  氧化还原电对的价态变化),采用新型的  $\text{Na}_4\text{MnV}(\text{PO}_4)_3$  为正极的电池就显现出不同于两相的可逆性单相反应(实现了三个单元的  $\text{Na}^+$  脱嵌),放电比容量进一步提升到了  $156\text{ mAh g}^{-1}$ ,库伦效率可达  $80\%$  以上。研究人员指出,电池性能提升主要是  $\text{Mn}^{2+}$  的取代激活了高电压处  $\text{V}^{4+}/\text{V}^{5+}$  氧化还原电对,从而实现了比容量提升。该项研究利用锰离子( $\text{Mn}^{2+}$ )部分取代掺杂修饰 NASICON 型正极材料  $\text{NaV}_2(\text{PO}_4)_3$ ,从而实现了每单位电极结构中三个单元的钠离子( $\text{Na}^+$ )的可逆脱嵌,从而增强了能量密度。为设计和开发高性能的钠离子电池开辟了新路径。相关研究工作发表在《*Small Methods*》<sup>9</sup>。

(郭楷模)

## 黑磷量子点催化剂有效抑制锂硫电池穿梭效应

锂硫电池的理论比能量可达  $2600\text{ Wh kg}^{-1}$ ,是商用锂离子电池的  $3\text{-}5$  倍,作为新一代储能器件引起广泛关注。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。由香港理工大大学 Shu Ping

combining nanoparticulate and molecular co-catalysts on CdS nanorods. *Nature Energy*, 2018; DOI: 10.1038/s41560-018-0229-6

<sup>9</sup> Fan Chen, Vadim M. Kovrugin, R alid David, et al. A NASICON-Type Positive Electrode for Na Batteries with High Energy Density:  $\text{Na}_4\text{MnV}(\text{PO}_4)_3$ . *Small Methods*, 2018, DOI: 10.1002/smt.201800218

Lau 教授牵头的联合研究团队设计制备了新型的黑磷量子点 (BPQDs) 催化剂应用于锂硫电池, 有效抑制了多硫化物的“穿梭效应”, 大幅改善锂硫电池倍率性能和循环寿命。研究人员将黑磷 (BP) 块体置于甲基吡咯烷酮溶液中, 经过超声、离心, 制备了不同尺寸的 BP 纳米片 (BP-400、BP-800) 和 BPQDs。透射电镜表征显示, BP-400、BP-800 和 BPQDs 纳米片平均尺寸分别为 400nm、800nm 和 4.5 nm。将制备的三种尺寸的 BP 纳米片置于含有多硫聚物  $\text{Li}_2\text{S}_8$  (锂硫电池放电中间产物, 量越多电池性能衰退越快) 的四乙二醇二甲醚溶液当中进行恒电流的  $\text{Li}_2\text{S}$  沉积实验, 结果显示 BPQDs 表面沉积最多的硫化锂 ( $\text{Li}_2\text{S}$ ), 意味其能够更加有效地吸附多硫聚物并将其有效催化转化为  $\text{Li}_2\text{S}$ , 即 BPQDs 是良好的锂硫电池催化剂材料。通过密度泛函理论 (DFT) 计算可知, BPQDs 纳米片与  $\text{Li}_2\text{S}_8$  具有很强的表面相互作用, 尤其是 BPQDs 纳米片边缘活性位点与  $\text{Li}_2\text{S}_8$  相互作用最强, 即通过缩减 BP 纳米片, 可以大大提高 BP 对多硫聚物的吸附性从而达到抑制“穿梭效应”的目的。X 射线光电子谱 (XPS) 表明 BPQDs 对多硫聚物强吸附作用主要是通过 P-S 和 P-Li 键与多硫聚物发生强烈相互作用实现的。BP 量子点催化活性位点对多硫聚物的强吸附和快速催化转化促进了  $\text{Li}_2\text{S}$  的沉积, 这使得多硫聚物在正极中的使用率更高, 从而有助于电池性能提升。随后研究人员将 BPQDs 结合到硫纳米 (S) 颗粒负载的多孔碳纤维 (PCNFs) 形成的 PCNF/S/BPQDs 复合材料, 作为正极应用到锂硫电池并进行电化学性能测试。测试结果表明 (1.7-2.8 V 电压区间、0.1C [1C=1675 mA  $\text{g}^{-1}$ ] 倍率下), 含有 BPQDs 的复合正极电池初始的放电比容量高达 1385 mAh  $\text{g}^{-1}$ , 远远高于无 BPQDs 的 PCNF/S 电极电池 (907 mAh  $\text{g}^{-1}$ )。长期循环稳定性测试显示, 经过 200 次充放电循环后, PCNF/S/BPQDs 正极电池放电比容量依旧高达 1072 mAh  $\text{g}^{-1}$ , 平均单次循环衰减率仅为 0.06%; 相反, PCNF/S 正极电池放电比容量大幅衰减到了 623 mAh  $\text{g}^{-1}$ , 平均单次循环衰减率达到了 2%; 表面了引入 BPQDs 确实能够有效地抑制多硫聚物的“穿梭效应”。而将放电电流提升到 4C 时, PCNF/S/BPQDs 正极电池依旧可以获得高达 784 mAh  $\text{g}^{-1}$  放电比容量, 1000 次循环中每次循环容量衰减仅为 0.027%, 展现出优异的高倍率性能。该项研究合成制备了新型的 BPQDs 催化剂应用于锂硫电池正极, 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, 为限硫增效提供了一种新的方向策略。相关研究工作发表在《*Nature Communications*》<sup>10</sup>。

(郭楷模)

<sup>10</sup> Zheng-Long Xu, Shenghuang Lin, Nicolas Onofrio, et al. Exceptional catalytic effects of blackphosphorus quantum dots in shuttling-free lithium sulfur batteries. *Nature Communications*, 2018, DOI: 10.1038/s41467-018-06629-9

## 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](mailto:energy@whlib.ac.cn)

微信公众号：CASEnergy

