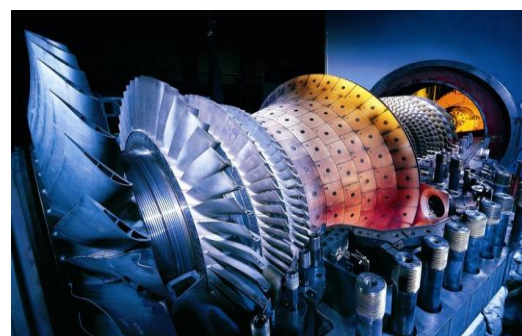


# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- 美收紧对华核技术出口管制对我国的影响分析及应对措施建议
- IEA：石化行业将带动全球石油需求增长
- IEA：未来五年可再生能源将持续强劲增长态势
- DOE 资助 4600 万美元研发先进太阳能发电系统集成技术

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](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

美收紧对华核技术出口管制对我国的影响分析及应对措施建议 ...2  
IEA: 石化行业将带动全球石油需求增长 .....5  
IEA: 未来五年可再生能源将持续强劲增长态势 .....9

## 项目计划

DOE 资助 4600 万美元研发先进太阳能发电系统集成技术 .....13  
DOE 资助 1000 万美元支持热电联产技术研发 .....13

## 前沿与装备

气固相反应法实现大面积高性能钙钛矿太阳电池制备 .....14  
翼状 Au@MoS<sub>2</sub> 异质结催化剂实现高效经济电解水制氢 .....15  
钽钒化合物负极显著增强钾离子电池性能 .....16  
气溶胶沉积室温制备钒酸锂固态正极大幅增强电池性能 .....17

## 本期概要

美国能源部（DOE）发布《美国对中国民用核能合作框架》报告，主要针对美国联邦法规第 10 章第 3 节的 810 条款（10 CFR part 810）中核技术出口管制内容做出调整，旨在收紧对中国民用核技术出口的限制。这是继此前美国政府拟禁止中国持股 25% 以上的公司收购美国科技公司，进一步加强对中国的技术出口限制，真正目的是打响对华科技攻防战，遏制中国高科技产业。本次核技术出口管制内容调整主要包括：在技术上，限制对象聚焦在小型模块化轻水堆、非轻水先进反应堆技术、2018 年及之后的新技术；在设备和部件上，华龙一号、CAP1400 等与美国有直接经济竞争关系的设备将不能出口；部分材料限制出口。同时，中广核及其所属单位或相关实体在技术、设备与部件、材料这三个环节均受到出口限制。详见正文。

国际能源署（IEA）发布《石化行业未来》报告指出，对到 2050 年全球石化行业的现状和石化产品需求增长对全球能源需求影响进行了综合分析预测：未来数十年，随着经济发展，全球对石化产品的需求将持续旺盛态势。当前，石化产业分别占全球石油和天然气需求总量的 14% 和 8%，其中化学原料占了大部分。到 2030 年，石化行业将占全球石油新增需求的 1/3 以上，到 2050 年则将达到近 50%，超过卡车、航空和航运，届时其对石油的消费量将增加约 700 万桶/天。就地区而言，中国和美国在内的一些国家短期内产能增加最多，长期增长则主要来自亚洲和中东地区。石化产品需求增多也会给环境带来严峻挑战。因此，石化行业需要一条宏伟但切实可行的低碳转型途径。为此，报告提出了十条战略性建议。详见正文。

国际能源署（IEA）发布《可再生能源市场 2018》报告，概述了可再生能源发展现状并对未来五年（2018-2023 年）的发展趋势进行了分析预测：自 1990 年以来可再生能源取得了快速发展，其年均增长率达到了 2%，其在全球一次能源供应总量（TPES）中的占比达到了 13.7%。未来 5 年（2018-2023 年间）可再生能源在全球能源需求中的占比预计增长五分之一，到 2023 年达到 12.4%；期间，生物质能将成为可再生能源消费增长的最大来源，将占这一时期可再生能源消费增长的 30%。就行业来看，电力行业将是可再生能源增长最快的领域，到 2023 年可再生能源电力将占到全球总发电量的 30%（2017 年占比为 24%）。预测期内，供暖行业中可再生能源的消费需求预计增加 20%，届时可再生能源将满足供暖行业能源需求的 12% 的份额。相比上述两个部门，可再生能源在交通运输行业中的占比最低，预计仅从 2017 年的 3.4% 增长到 2023 年的 3.8%。

美国能源部（DOE）宣布资助 4600 万美元用于支持先进太阳能发电系统集成技术项目研发，涵盖两大技术主题，包括：（1）太阳能环境监测技术研发和成果转化，（2）主动弹性技术解决方案研发、现场验证和成果转化；旨在推进太阳能发电系统集成相关技术的研发创新突破和技术成果的快速转化，以有效地预警、检测、防御各类潜在的物理和网络安全威胁和攻击，增强日益增多的太阳能电力份额的电网的弹性和稳定性。

# 美收紧对华核技术出口管制对我国的影响分析及应对措施建议

2018年10月11日，美国能源部（DOE）以国家安全名义为由发布《美国对中国民用核能合作框架》<sup>1</sup>报告（下文统称为《框架》），主要针对美国联邦法规第10章第3节的810条款（10 CFR part 810<sup>2</sup>）中核技术出口管制内容做出调整，为所有现有的、未做出决定的以及将来向中国进行的核技术转移制定了指导原则，旨在收紧对中国民用核技术出口的限制，防止中国非法获取美国民用核能技术用于军用和其他未授权的用途。这是继此前美国政府拟禁止中国持股25%以上的公司收购美国科技公司，进一步加强对中国的技术出口限制，美国再以“国家安全”为由，加强对华科技出口管制，真正目的是打响对华科技攻防战，封堵中国的高科技产业。因此，系统地分析研判该出口管制可能给我国核技术及核电产业未来发展产生的影响，并作出相应的预案和措施显得意义重大。以下就该合作框架内容及其对我国核技术及产业发展的可能潜在影响进行系统分析并提出相应的应对措施。

## 一、《美国对中国民用核能合作框架》核心内容

### 1、技术出口政策调整

#### （1）推定许可（取决于非贬损性的最终用户审查）：

- 修订或延期2018年1月1日以前的已有核技术转让许可。但该推定许可不适用于小型模块化轻水堆和非轻水先进反应堆技术；

- 转让运行安全相关的新技术，但条件是要对适用性和裨益进行技术分析，对最终用户进行评估；

- 新技术转让必须要有利于美国已商业化的核能技术市场规模的扩大。

#### （2）推定禁止：

- 小型模块化轻水堆技术禁止出口；

- 非轻水先进反应堆技术禁止出口；

- 禁止2018年1月1日以后新兴核技术出口；

- 任何向中广核及所属单位或相关实体机构技术出口的申请都不予批准。

向中广核及所属单位或相关实体机构出口申请（包括技术出口、设备和零部件出口以及材料出口）许可、修订或延长列为推定不批准，直到中广核涉嫌非法获取核技术的诉讼在美国司法系统得到解决。

<sup>1</sup> DOE Announces Measures to Prevent China's Illegal Diversion of U.S. Civil Nuclear Technology for Military or Other Unauthorized Purposes.

<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-measures-prevent-china-s-illegal-diversion-us-civil-nuclear-technology>

<sup>2</sup> CFR810条款由能源部进行授权许可，并需要得到美国国务院、核管会、商务部、国防部的一致支持。它是美国核材料及技术出口的管制条款，条款中详细列出了出口管制的范围，相关的核材料及技术在出口时需要经过能源部的授权许可。

对于非中广核的中间商和最终用户，美国政府将逐案进行审查以评估是否存在将民用核技术转用于军事用途的风险，以及对美国国家和经济安全的风险，对交易方的风险。

美国政府将平衡风险与出口带来的经济战略利益。如果批准，将设置规避风险的条件。另外，源代码相关产品（包括核技术相关电脑软件、系统和相关组件）和部分设计制造技术的出口不予批准。

## **2、设备和组件出口政策调整**

### **（1）推定许可（取决于非贬损性的最终用户审查）：**

- 支持 AP1000、CAP1000 建设的设备组件以及 CAP1400 主要的相同组件出口，出口将获批准；

- 不在前述受限范围的民用核设备能够继续出口，包括小型模块化压水堆或非轻水先进反应堆的设备部件，但是技术转让不能超出安装和运行范畴。

### **（2）推定禁止：**

- 与美国有直接竞争的如华龙一号、CAP1400 技术的美国专用设备出口将不予批准；

- 任何向中广核及所属单位或相关实体机构核设备和组件出口的申请都不予批准。

## **3、材料出口政策调整**

### **（1）推定许可（取决于非贬损性的最终用户审查）：**

- 新的申请，现有许可的修订或延期。

### **（2）推定禁止：**

- 任何向中广核及所属单位或相关实体机构核材料出口的申请都不予批准。

综合分析上述内容可知，本次技术管制主要涉及三个方面：在技术上，限制对象聚焦在小型模块化轻水堆、非轻水先进反应堆技术、2018 年及之后的新技术；在设备和部件上，华龙一号、CAP1400 等与美国有直接经济竞争关系的设备将不能出口；部分材料限制出口。同时，中广核及其所属单位或相关实体在技术、设备与部件、材料这三个环节均受到出口限制。

## **二、框架内容调整可能给我国核电技术和产业产生的影响**

本次对华核技术出口管制目的不仅在于限制中国核电产业发展（减弱国际市场竞争能力），保护美国自身核工业发展和全球竞争力，更大意图在于遏制中国新兴核技术发展。因此，出口限制难免对中国核技术及产业有所影响，主要包括：

### **1、对自主三代核电技术影响甚微**

多年来，我国核电技术通过消化吸收和自主创新结合，核电技术水平与产业规模得到大幅提升。目前，我国已经实现了对华龙一号、CAP1400 两种三代核电技术

自主可控，实现了关键设备与材料的国产化研制。根据中国核能协会发布的《中国核能发展报告 2018》，我国在建核电机组及总装机容量位列世界第一，且半数采用的是第三代核电技术；就“华龙一号”而言，其燃料组件、蒸汽发生器、DCS 仪控系统关键设备均实现了国内自主设计与制造，设备国产化率达到 87% 以上，进口设备基本没有美国提供的产品，即使有，也不存在唯一性；CAP1400 的超大型锻件、核级锆材、核级电缆、安全壳钢板等关键材料研制已打破国外技术垄断，其国产化率也超过 80%。综上述，我国已拥有两种自主可控的第三代核电技术，且与世界其他核电强国，如法国、俄罗斯，亦有技术与项目的合作关系，美国并非我国先进技术与设备的唯一来源，因而此次限制影响相对有限。而关于 AP1000 建设的设备部件，新的合作框架为推定批准，因此不会对 AP1000 项目产生影响。

## 2、处于研发阶段的新型反应堆技术面临挑战

尽管管制对中国三代核电技术和产业影响不大，但不代表没有危机。应当注意到新《框架》提及的管制内容还包括核电相关的源代码、小型模块化轻水堆、非水先进反应堆等新堆技术内容。在堆技术研发方面，除了国家电投外，中核和中广核均与美国有不同程度的合作交流。在快堆发展上，中美双方曾积极推进两国实验快堆开展联合辐照试验，并签署第四代核电厂开发及商业化合作协议，而行波堆的合作还促成比尔盖茨当选中国工程院外籍院士。如今在新管制的乌云笼罩下，上述项目合作面临较大的变数，使得我国新堆技术研发面临挑战。

## 三、对策建议

### 1、政府企业通力合作

面对上述核管制，国内的核电企业应该团结合作，将受制于人需要攻克的技术和设备短板列出清单，利用各家的优势合理分工，通力合作，攻坚克难。此外，对比中美两国近十年的核电发展可知，想要保持核电技术的不断进步就必须给予核电稳定可持续的发展政策环境，通过科学规划和持续投入不断促进核电技术的进步。

### 2、积极与国际多边管制组织接轨

通过开展与国际多边管制组织的磋商与对话，我国分别于 1997 年和 2004 年先后进入桑格委员会（1997 年）和核供应集团（2004 年）成为正式成员国，可以享受组织内各成员国在核物项出口方面的优惠与便利措施，建议进一步多渠道、宽领域地开展国际合作，以拓宽核技术和相关物项的获取途径。

### 3、坚定走自主创新的发展道路，提升自主可控竞争力

提高自主创新能力是统领我国未来科技发展的战略主线。因此，在中外合作、吸收借鉴的基础上，中国必须坚持走自己的路。对受制于人尚未实现完全自主化的关键高端材料、核心装备制造和关键工艺等核心技术，必须加强自主创新、集中攻关瓶颈和卡脖子问题，实现核心技术自主可控才是核电长远发展根本。

#### 4、持续跟踪和吃透不断变化的出口管制内容

一方面，持续跟踪发达国家核技术出口管制政策的变化，以准确评估国外对华出口管制政策对我国核技术领域发展所产生的影响。另一方面，运用发达国家对我国出口管制技术的指标，作为研发工作的定量评价标准之一。

（郭楷模）

## IEA：石化行业将带动全球石油需求增长

10月5日，国际能源署（IEA）发布《石化行业未来》报告<sup>3</sup>指出，石化行业对全球能源系统的发展至关重要，但受到的关注却少于应有的重视，成为全球能源系统的“盲点”。未来数十年，随着经济发展，全球对石化产品的需求将呈现持续旺盛的态势。在此背景下，石化行业对未来石油需求变化的影响将比汽车、卡车和航空业的作用更大，其将成为全球石油需求增长的最强劲驱动力：到2030年，石化产业将占全球石油新增需求的1/3以上，到2050年则将接近一半。报告全面评述了全球石化行业的现状和石化产品需求增长对全球能源需求的影响，提出了加速石化行业低碳转型的方案。报告要点如下：

### 1、全球经济高度依赖石化产品

石化产品及其衍生产品广泛用于日常生活，如塑料、化肥、包装材料、服装材料、洗涤剂 and 轮胎等，其对经济重要性不言而喻。此外，石化产品还是现代能源系统的重要组成部分，如太阳能电池板、风力涡轮机叶片、电池、建筑保温材料和电动汽车零件中都少不了石化产品的支持。

石化产品是全球能源体系的一大组成部分，其对能源系统的重要性还在继续上升。自2000年以来，全球对塑料的需求几乎翻了一倍，目前已超过了对其他大宗材料（如钢铁、铝或水泥）的需求。1970年以来，全球塑料产量增长10倍以上，氨产量增长了3~7倍。与美国、欧洲和其他发达经济体相比，印度、印度尼西亚和其他发展中国家塑料和化肥的人均消费量分别为前者的1/20和1/10，意味着全球石化产品的需求还有很大的增长空间。

石化行业原料的能源资源消耗问题被忽视。石化行业中能源资源以两种方式被消耗：（1）作为生产石化产品的原料；（2）提供石化产品生产过程中的能量。各类石化产品原材料中有90%从石油和天然气中获取，其余10%则从煤炭和生物质获取。每年消耗超过5亿吨油当量的化石燃料原料生产近10亿吨化学品，用于制造石化基础原料以最终合成石化产品的化石燃料约占石化行业总能源消耗的一半。

### 2、石化产业已成为石油消费增长的最主要驱动因素，且其需求将进一步增长

石化产业日益增加的重要性是全球能源系统争论中的关键盲点之一。尽管重要

<sup>3</sup> IEA. The Future of Petrochemicals: Towards more sustainable chemical industry. <https://www.iea.org/petrochemicals/>.



性与日俱增，但石化产业的多样性和复杂性使其受到的关注度远未达到应有的水平。

石化产业正迅速成为全球石油消费的最大推动力。当前，石化产业分别占全球石油和天然气需求总量的 14% 和 8%，其中化学原料占了大部分（图 1）。到 2030 年，石化行业将占全球石油新增需求的 1/3 以上，到 2050 年则将达到近 50%，超过卡车、航空和航运，届时其对石油的消费量将增加约 700 万桶/日。与此同时，在燃油经济性改善、公共交通普及、替代燃料和电气化的共同作用下，当前石油需求的主要相关领域的重要性将会减弱，尤其是乘用车。从现在到 2030 年，石化产业还将再消耗 560 亿立方米的天然气，相当于加拿大目前天然气消费量的一半左右。

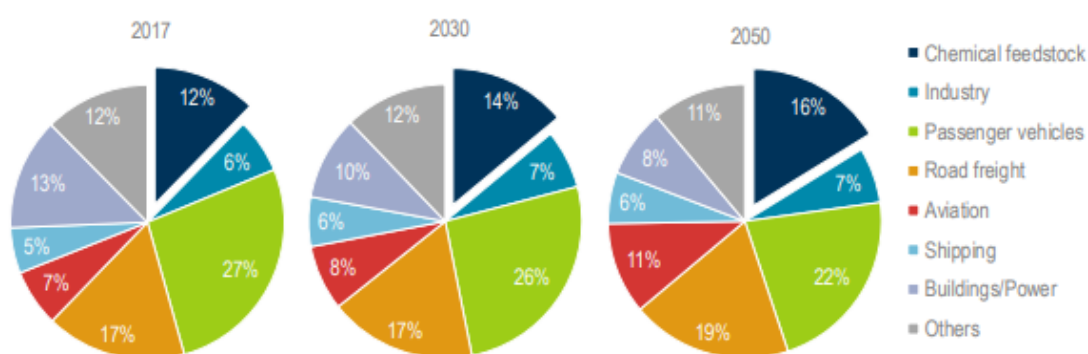


图 1 不同行业占全球石油总需求的份额（2017 年、2030 年和 2050 年）

中国和美国在内的一些国家短期内产能增加最多，长期增长则主要来自亚洲和中东地区。预计到 2025 年，美国在全球蒸汽裂解乙烯市场的份额将从 2017 年的 20% 增长至 22%。与中东一样，美国因其丰富的天然气资源而得以获得低价乙烷，从而在石化原料方面拥有优势。这一优势使美国与中东占据了中短期内以乙烷为原料的石化产品的最大出口份额。中国的煤基甲醇制烯烃产能在 2017 年至 2025 年间将增长近一倍，为其庞大的国内制造业提供原料。从长期上看，亚洲和中东在高价值化学品市场上的份额将各增加 10 个百分点，而欧洲和美国的市场份额将会减少。到 2050 年，印度、东南亚和中东总共将占全球氨产量的 30% 左右。

持续增长的全球经济、人口数量和技术发展意味着对石化产品的需求将日益增长。以欧洲、日本和韩国为代表，虽然石化产品回收力度大幅上升，且采取了很多减少一次性塑料使用的措施，但就目前来看，这些努力将被发展中经济体在塑料消费（和处理）方面迅速增长的份额所抵消。难以找到替代品是导致石化产品整体需求增长强劲的另一因素。

### 3、石化和油气行业格局正发生变化

化学原料供应格局新变化加剧了全球石化行业的竞争。在经历了二十年的停滞和衰退后，美国因页岩气革命而实现了石化生产低成本，重获行业领头羊地位。目前，美国乙烷制石化产品产能约占全世界的 40%。以沙特阿拉伯和伊朗为代表的中东地区新上马了一批项目，在关键的石化产业上始终保持了最低的生产成本。中国

和欧洲分别约占全球以石脑油为基础的高价值化学品产能的四分之一，但在需更轻型原料的产业方面，由于原料供给有限产能较小。中国的煤化工产业目前已实现稳定的技术进步。印度产能将在仅占全球产能 4% 的基础上大幅上升，以满足不断增长的国内需求。

**石油公司正寻求石化产业链的整合。**在汽油需求增长放缓、化学品增长前景强劲且利润可观的背景下，石油公司正进一步加强与石化市场的联系。尽管仍有挑战性，新兴的原油直接制化学品工艺将可能代替传统的炼化技术。例如，沙特阿拉伯国家石油公司（沙特阿美）和沙特基础工业公司最近宣布了一项大型原油制化学品项目，预计将日处理 40 万桶原油，其规模为全球目前唯一的新加坡原油制化学品项目的五倍。

#### 4、化学品的生产、使用和处理会造成环境负担

石化产品的生产、使用和处置带来了各种气候、空气质量和水污染方面的挑战，需要加以解决。尽管石化产品带来的益处良多，正越来越多地被应用在各种对可持续能源系统至关重要的尖端清洁技术中，石化衍生品的生产、使用和处理仍带来了一系列亟待解决的可持续发展方面的挑战，尤其是环境问题。

虽然化工行业的能源消耗量接近钢铁和水泥行业能源消耗量之和，其二氧化碳排放量却小于两者中的任何一个。化工行业的排放量达 15 亿吨，是工业部门二氧化碳总排放量的 18%，相当于燃烧产生二氧化碳总排放量的 5%，但仍低于钢铁、水泥等重工业，原因在于：（1）化工行业比其他重工业消耗更多的石油和天然气，而后者通常更依赖煤炭；（2）石化原料所含的碳多被保留在成品（如塑料）中，仅在产品燃烧或分解时才会被释放。

#### 5、清洁技术情景（CTS）是石化产业低碳转型可行的解决方案

CTS 为石化产业提供了一条宏伟但切实可行的途径，在这一情景中，环境影响将全面降低。在 CTS 中，到 2050 年初级化工生产排放的空气污染物将减少近 90%，水需求则将比不施行 CTS 的基准情景低近 30%。另外，CTS 强调改善废弃物管理、加大回收力度，这将有助于减少每年流入全球海洋的 1000 万吨塑料废弃物，实现到 2050 年累计海洋塑料废弃物量比基准情景减半的目标。

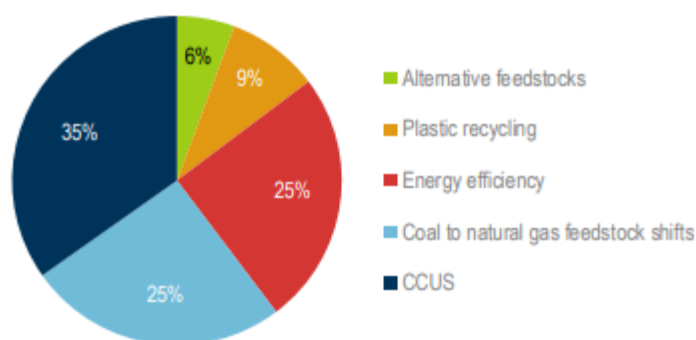


图 2 CTS 中不同措施导致的 2017-2050 年累计二氧化碳减排占比

到 2050 年,加强塑料回收再利用所累积的二氧化碳减排量将相当于目前化工行业年排放量的一半左右。在 CTS 中,到 2050 年塑料废弃物的全球平均收集率将增加近三倍。与当前趋势相比,将使再生塑料的产量增加,并累计减少约 5% 的高价值化学品需求。要实现这一结果,在技术上有很大挑战,需要发达经济体将平均收集率提升至最佳实践水平,新兴经济体收集率则需达到当前的最高水平。

石化行业的清洁转型主要依靠碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术,以及催化工艺和天然气替代煤炭。由于经济效益相对较高,CCUS 技术在石化行业规模化减排方案中占据了主导地位;通过用新技术替代传统的催化工艺可为单位产量减少超过 15% 的能源消耗;在氨和甲醇的生产过程中以天然气替代煤炭,尤其是在中国,可同时减少生产过程中的排放量和能源强度。在基于电力和生物质的工艺方面,尽管投资成本在下降,但对这些清洁能源载体的高需求带来的高价格使得这些工艺在大多数地区无法在成本上与其他工艺竞争。

CTS 中石化原料所需的轻质油产品份额激增可能对炼油业造成挑战。至 2050 年,与塑料消费相关的石油需求将超过公路客运交通的需求。这将对炼油行业有重大影响,后者当前的工艺主要针对生产重油和轻油产品。由于致密油更易制成轻质油产品,预计美国致密油产量增长将有助于应对这一挑战。然而,其贡献是否长期可持续则将取决于资源基础、技术和市场条件。

报告最后就建立一个更可持续和更有效率的石化工业,为各国政府、石化工业界和其他主要利益相关方提出了十条战略性建议:

#### 生产方面:

- 持续资助石化行业低碳绿色生产技术研发,并限制相关风险。
- 通过公私合作框架建立和扩展工厂级基准计划,并通过财政措施加以激励。
- 采取有效的监管措施以减少二氧化碳排放,包括避免不对称区域定价压力的影响,以及有针对性的支持以在必要时刺激创建初始利基市场。
- 通过开发和应用空气污染控制技术、燃料替代和改善燃料质量,使工业能够满足严格的空气质量标准(如世界卫生组织标准)。
- 燃料和原料价格应体现实际市场价值,确保促进清洁能源的燃料补贴能精准指向,且不会阻碍向替代化学原料的转变。

#### 使用与处理方面:

- 减少对一次性塑料的依赖(具有不可替代功能一次性塑料除外),包括引入用于可重复使用产品(如饮料容器)或财政工具(如税收中性塑料消费税,其收益用于防止和减轻塑料污染)的存-退系统。
- 改善世界各地废弃物管理实践,既增加回收利用又大幅减少塑料废物的泄漏。例如,禁止所有可回收垃圾填埋或征收处理税,并从源头改善可回收物分类和收集。

•提高消费者对回收消费品的多重益处、废物管理不善导致的环境问题和最有效的政策干预措施的认识。

•激励化学品生产商采用优化材料使用、重复使用和促进闭环回收的设计。

•将生产者责任从生产扩展到化学产品使用和处置等方面，例如通过罚款系统来惩罚材料的有限回收和使废物分离复杂化的行为。

（岳芳 郭楷模）

## IEA：未来五年可再生能源将持续强劲增长态势

10月8日，国际能源署（IEA）发布《可再生能源市场 2018》报告<sup>4</sup>指出，得益政策激励和技术进步，自1990年以来可再生能源取得了快速发展，其年均增长率达到了2%，在全球一次能源供应总量（TPES）中的占比达到了13.7%。未来五年，可再生能源将持续强劲增长态势，预测期间全球能源需求增量的40%将来自可再生能源，到2023年预计可再生能源在全球能源需求中的占比将达12.4%。报告对全球可再生能源发展现状和未来五年（2018-2023年）的发展趋势进行了系统分析预测，着重概述了可再生能源在电力、供暖和交通运输三大部门领域的发展情况。报告要点如下：

### 1、可再生能源发展概览

2018-2023年，可再生能源在全球能源需求中的占比预计增长五分之一，到2023年达到12.4%；期间，生物能源将成为可再生能源消费增长的最大来源，将占这一时期可再生能源消费增量的30%，主要是供暖和交通运输中行业大规模采用生物能源的结果。到2023年，生物能源仍将是可再生能源的主要来源，其在可再生能源总量中的份额将接近五成（46%）。

就行业来看，电力行业将是可再生能源增长最快的领域，到2023年可再生能源电力将占到全球发电总量的30%（2017年占比为24%）。在此期间，可再生能源将提供全球70%以上的新增发电量，以光伏发电增长最为强劲，其次是风能、水电和生物能源。到2023年，水电仍将是全球可再生能源电力主要来源，其在全球电力中的占比预计为16%，其次是风能（6%）、太阳能光伏（4%）和生物能源（3%）。虽然增长速度比电力行业慢，但供暖行业（包括建筑物或工业供暖）的可再生能源需求增长将成为到2023年可再生能源增长最主要的贡献力量。预测期内（2018-2023年间），供暖行业中可再生能源的消费需求预计增加20%，届时可再生能源将满足供暖行业能源需求12%的份额。相比上述两个部门，可再生能源在交通运输行业中的占比最低，预计仅从2017年的3.4%增长到2023年的3.8%；且该行业可再生能源资源主要来自生物燃料。

<sup>4</sup> Renewables 2018 analysis and forecasts 2023.

<https://webstore.iea.org/download/summary/2312?fileName=Chinese-Renewables-2018-ES.pdf>

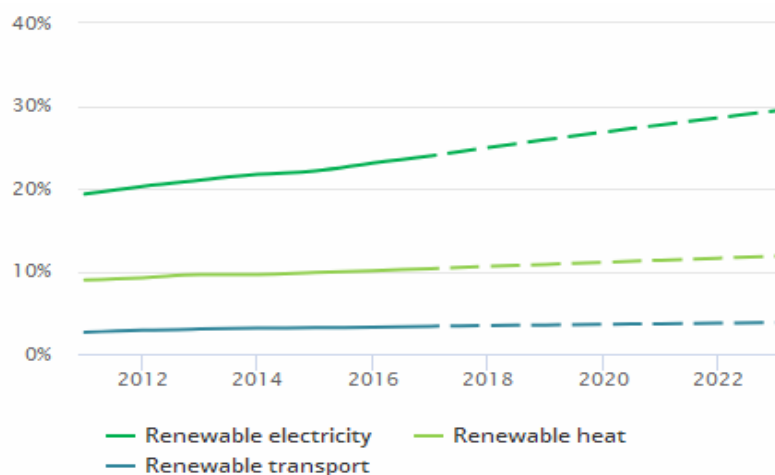


图1 2011-2023年间可再生能源在不同部门占比变化态势

到2023年，巴西将成为世界上能源结构最绿色的国家，可再生能源在其终端能源消耗总量中的占比将达到45%。交通和工业部门是最主要的生物质能消费行业，水电则占据了电力部门的主导地位。与此同时，由于中国推出各项减排政策以及减少空气污染措施，中国在预测期内的可再生能源绝对增长量将超过欧盟，成为全球最大的可再生能源消费国。

## 2、电力

电力部门依旧是可再生能源发展最为迅速的领域，2017年可再生能源电力新增装机容量达到了创纪录的178 GW，占全球同期新增装机总量的三分之二以上。预测期内，可再生能源电力装机容量预计至少增长46%（不同情景预测值有所不同）。其中，光伏将是增长的最大来源，其次是风电、水电和生物质能。主要情景显示，到2023年，光伏装机容量预计增长575 GW；同期，风电装机容量预计增加324 GW，届时累计装机将达到839 GW；水电装机预计增加125 GW，较2012-2017年间的增量减少40%，主要原因是中国和巴西减少了众多的大型水电项目；生物质能预计以年均5-8 GW的增量增长到158 GW；地热装机预计增长28%达到17 GW以上，其中70%的增长主要来自发展中国家和新兴经济体；海洋能源增长依旧缓慢，到2023年预计仅增长100 MW，主要来自潮汐能源（50%），其次是波浪能。

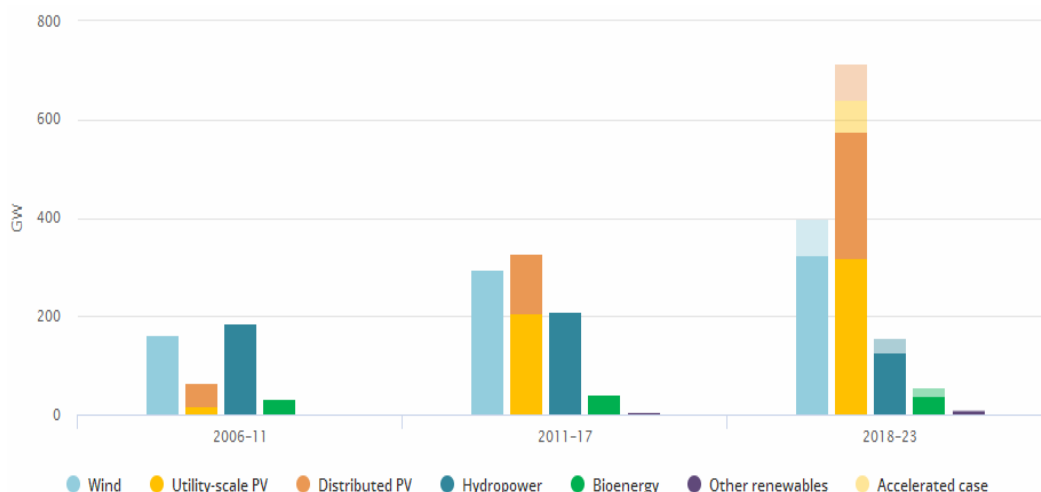


图2 不同情景下2006-2023年间不同可再生能源技术新增装机容量变化态势（单位：GW）

2017年，用于能效的绿色债券发行量首次超过了用于可再生能源和其它能源的债券，其价值增长了两倍，达到470亿美元。此外，政府设立了支持可持续性项目的绿色银行，增加了对能效项目的投资份额。能效的资金来源仍然以资产负债表融资为主，但呈现多元化的趋势。全球市场规模约为270亿美元的能源服务公司对开发低成本可复制能效项目的商业模式起到重要作用。一些国家的政策鼓励能源公司通过可交易的节能证书（白证）来寻求成本最低的能效项目，法国和意大利市场的价格创了纪录。总体而言，能效投资变化与政府出台的政策密切相关，因此制定更高标准的能效政策和激励投资措施有助于进一步刺激全球的能效投资增长。

### 3、供暖

供暖行业（家庭、工业等领域的供暖）是最大用能终端，其能耗占到终端能源消耗总量的近50%。预测期内，供暖行业的可再生能源消费量预计增长20%，主要增长源来自生物质能，到2023年可再生能源将占供暖行业用能总量的12%。

用于供暖的可再生能源资源中占比最高的是生物质能，2017年其占比高达70%，主要应用于工业和建筑供暖。到2023年，用于工业部门供暖的生物质能消费需求预计增长13%，主要增长需求来自水泥、糖和乙醇工业。同期，用于建筑部门供暖的生物质能消费需求预计增长8%，主要的增长动力来自欧盟国家的建筑供暖，预计占新增消费量的54%。太阳热能（包括热水器和热电站）主要用于居民住宅供暖（主要是生活用水的加热）和工业生产领域（如食品、饮料、纺织等低温生产），预计到2023年消费需求将增长40%。采用地热供暖的国家目前数量较少，主要集中在中国和土耳其，2017年上述两个国家的地热消费量占到全球消费总量的近80%。受限于发展地热国家数量有限，预测期内，地热供暖的消费需求预计增长不到24%。可再生能源电力只占全球供暖用能总量的7%，主要应用在建筑和工业部门；到2023年，用于工业供暖的可再生能源电力消费需求预计增长20%，而用于建筑供暖的消费需求预计增长11%。

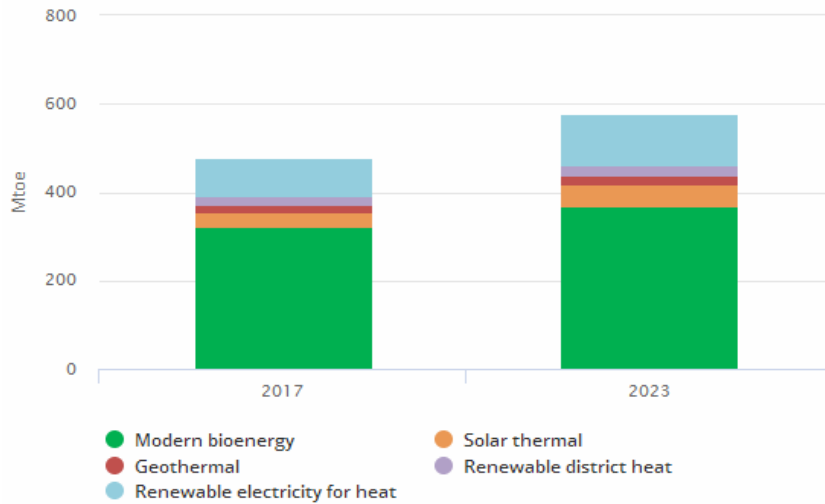


图 3 2017/2023 年用于供暖的不同可再生能源消费量变化态势 (单位: 百万吨油当量)

#### 4、交通运输

相比电力、供暖部门，可再生能源在交通运输行业中的应用规模较小，占比最低，仅占交通运输消耗燃料总量的 3.4%（2017 年）。预测期内，用于交通运输部门的可再生能源预计增长 19%，其在交通运输燃料总量中的占比预计小幅增长到 3.8%。

尽管交通电气化快速发展，但应用于交通运输部门的可再生能源资源主要是生物燃料，预测期内生物燃料产量预计增长 15% 达 1650 亿升，届时生物燃料将占到交通运输行业可再生能源消耗总量的 90%。同期，用于交通运输的可再生能源电力消费需求预计增长三分之二，主要增长动力来自电动汽车、电动两轮车、电动公交车快速发展，公路交通是最大的可再生能源电力消费领域。到 2023 年，可再生能源预计将占到交通运输行业电力消费总量的近三分之一。

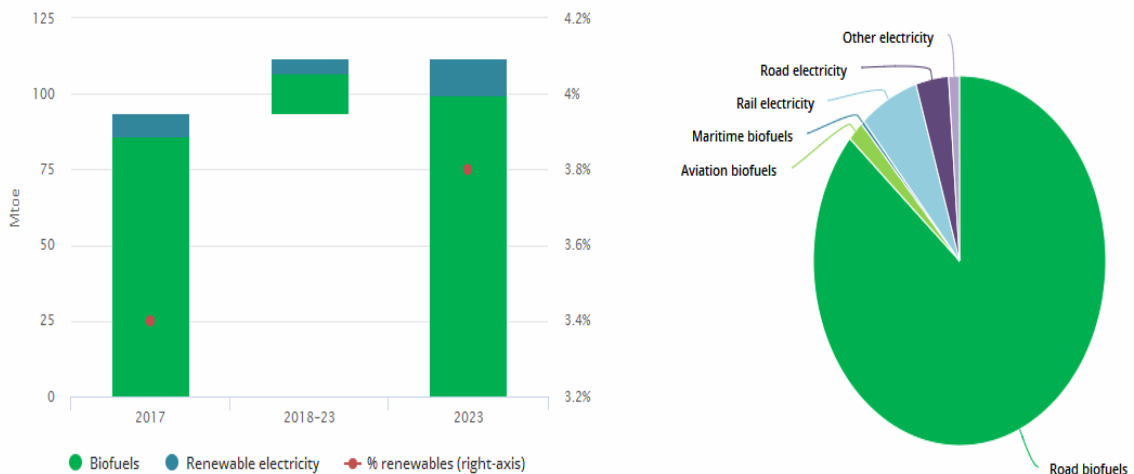


图 4 2017/2023 年用于交通运输的不同可再生能源消费量变化态势 (左图, 单位: 百万吨油当量) 和 2023 年不同交通模式消耗的可再生能源占比

(郭楷模)

## 项目计划

### DOE 资助 4600 万美元研发先进太阳能发电系统集成技术

10月15日，美国能源部（DOE）宣布资助4600万美元用于支持先进太阳能发电系统集成技术研发项目<sup>5</sup>，旨在推进太阳能发电系统集成相关技术（如先进预测技术、控制策略、实时监测系统、安全稳定的通信技术）的研发创新突破和技术成果的快速转化，以有效地预警、检测、防御各类潜在的物理和网络安全威胁和攻击，增强太阳能电力占比日益增加的电网弹性和稳定性。本次资助项目着重关注两大技术主题，包括太阳能环境监测技术研发和转化，以及主动弹性技术解决方案研发、现场验证和成果转化，具体内容参见表1。

表1 先进太阳能发电系统集成技术项目具体研究内容

技术主题	研究内容
太阳能环境监测技术研发和成果转化	为部署在美国各地的太阳能发电系统开发先进的太阳能环境监测技术和工具（先进传感器、采集器等），以精确测量影响太阳能发电的各类环境要素（如太阳辐射强度、组件温度、风速、风向等），以及时准确地采集和分析各类数据，来提升太阳能发电系统弹性，更好地应对各类信息物理系统攻击以及自然灾害的影响，保障发电系统的稳定运行，以实现在大电网短中断时候可以有效为关键用电负荷正常供电，保障电网稳定运行和关键基础设施
主动弹性技术解决方案研发、现场验证和成果转化	针对太阳能发电系统开发主动弹性技术解决方案（包括热管集热器、相变材料蓄热、辅助热源、自动控制系统、互联技术），实现对太阳能光、热资源的可控采集、存储和转化，以应对太阳能本身的波动性问题，提升太阳能资源的利用效率，同时增强对潜在的信息物理系统威胁和自然灾害风险预防和防范能力，从而保障太阳能发电系统稳定和集成高比例太阳能电力电网的弹性，在技术成熟时候进行现场验证并推进商业化应用

（郭楷模）

### DOE 资助 1000 万美元支持热电联产技术研发

9月7日，美国能源部（DOE）宣布资助1000万美元用于支持先进中小型热电联产（CHP）技术研发<sup>6</sup>，旨在开发经济、高效、多种燃料源可用的中小型热电联产（CHP）发电技术，为电网运营商提供更加经济高效稳定的电力获取方式，利用 CHP

<sup>5</sup>Department of Energy Announces \$46 Million to Improve Resiliency of Solar Generation.

<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-46-million-improve-resiliency-solar-generation>

<sup>6</sup> Energy Department Selects Seven Projects to Develop Combined Heat and Power Technologies that Offer Services to the Electric Grid.

<https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-selects-seven-projects-develop-combined-heat-and-power-technologies>



备用容量保障波动性可再生能源占比日益增加的电网运营的稳定性和弹性，为用户提供更高效、更经济、更安全可靠电力服务，本次资助项目涵盖两大技术主题，包括：（1）电力电子和控制系统开发；（2）热电联产系统发电组件，具体内容参见表 1。

表 1 热电联产研发项目两大技术主题

主题	研究内容
电力电子和控制系统	<ul style="list-style-type: none"> <li>•为热电联产系统开发一个功率可调的逆变器和相应的控制系统，使高速燃气轮机能够更有效地为电网提供支持，并易于应用在新的热电联产装置上或易于改进</li> <li>•开发一套全尺寸的电网接口逆变器系统和控制解决方案，将中小型热电联产发电机与低中压公用电网连接。增强的微电网控制器将使热电联产系统操作员能够通过发电机和/或微电网控制器与大电网运行人员实现有机互动</li> <li>•为灵活的 CHP (F-CHP) 系统开发一个功率调节系统 (PCS) 转换器和相应的控制系统。功率调节系统转换器和控制器将支持不同类型的 CHP 源，并且可以扩展以形成所需的功率，以用作 CHP 和中压 (MV) 网络之间的接口连接器。该研究工作可以使各种 CHP/分布式能源资源 (DER) 协同工作，并直接与公用事业中压电网连接。该技术将来可以支持多个微电网设备</li> </ul>
热电联产系统发电组件	<ul style="list-style-type: none"> <li>•该项目将开发高温有机朗肯循环 (ORC) 发电装置，以在保持热电联产系统所需热能的同时为电网提供额外所需的电力，该项目开发的 ORC 将突破当前底循环后有效热能的限制</li> <li>•通过计算机模拟标准技术展示关键的新颖组件，开发出改进的热电联产系统。主要使用超临界 CO<sub>2</sub> 底循环来增加电力输出以响应电网要求。该方法将优化电力系统的设计，开发一些关键部件（先进的热交换器）并在实际测试中验证其性能，以证明整个系统的可行性</li> <li>•扩大燃气轮机运行窗口以实现更大范围调节和更灵活功热比，并通过 CHP 实现对电网的支持。这将通过开发能够在高弹性运行期间维持低排放的燃烧系统来实现。该项目重点关注索拉 Titan 130 型燃烧室，以扩大操作窗口实现 30%-40% 低负荷运行</li> <li>•开发一种模块化、可扩展的中压电源转换器，具有增强稳定性的电网支持功能，适用于在中小型美国制造工厂运行的未来灵活 CHP 系统。该项目通过先进的宽禁带半导体技术提供电力电子和控制系统的基礎工作。它能够使用各种原动机技术实施到各种现有和未来的 CHP 系统中</li> </ul>

(岳芳)

## 前沿与装备

### 气固相反应法实现大面积高性能钙钛矿太阳能电池制备

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%，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。然而稳定性、重现性和工艺放大问题阻碍了该电池商业化进程。由日本冲绳科学技术大学院大学 Yabing Qi 教授牵头的国际联合研究团队利用简单的气固相反应法制备了无针孔高成膜质量的微米级氯元素部分替代掺杂的钙钛矿薄膜，小面积（ $0.1\text{ cm}^2$ ）电池光电转换效率达到了 19.1%，大面积（ $5\times 5\text{ cm}$ ）电池也高达 15.3%，且具备优异的稳定性和重现性。研究人员首先在  $100^\circ\text{C}$  温度下将氯化铵（ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{MACl}$ ）与碘化铅氢（ $\text{HPbI}_3$ ）前驱体混合液反应制得氯元素部分替代碘的复合物  $\text{HPbI}_3(\text{Cl})$  薄膜，且扫描电镜显示产物薄膜厚度高达近  $1\ \mu\text{m}$ （一般情况钙钛矿薄膜厚度在  $500\text{ nm}$  左右，厚度越薄形貌越难控制），得益于厚度增加，薄膜表面粗糙度显著减少，即薄膜平整度提升，且实现了无针孔的百分百覆盖率。接着将  $\text{HPbI}_3(\text{Cl})$  薄膜暴露于  $\text{MACl}$  气氛中进行固气反应生成  $\text{MAPbI}_3(\text{Cl})$ ，随后在空气环境中（相对湿度 40%-60%）进行退火处理使其结晶。X 射线衍射峰显示退火后的  $\text{MAPbI}_3(\text{Cl})$  薄膜在  $14.1^\circ$  和  $28.2^\circ$  呈现出典型特征峰，证实了薄膜确为钙钛矿结构。二次离子质谱法对材料成分进行分析确认 Cl 元素确实掺入到上述薄膜当中。随后将其用于组装电池器件并进行电化学性能测试。在 1 个标准的模拟光照下，对 16 个相同规格的未封装器件（ $0.1\text{ cm}^2$ ）进行了电压电流性能测试，所有电池转换效率的偏差不超过 0.4%，表现出优秀的重现性，稳态平均光电转换效率达到 19.1%，最优转换效率更是达到了 20%，且基本没有迟滞现象；老化测试显示电池能够稳定运行 1600 小时，表现出优异的稳定性。接着制备了  $5\times 5\text{ cm}$  的大面积钙钛矿太阳电池器件，光电转换效率可达 15.3%。该项研究通过气固两相反应方法制备了高结晶度、无针孔全覆盖的微米级厚度的氯元素部分掺杂的钙钛矿薄膜，基于该薄膜电池器件表现出了优秀的重现性和稳定性，且薄膜面积能够有效放大，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《*Nature Communications*》<sup>7</sup>。

（郭楷模）

## 翼状 $\text{Au}@\text{MoS}_2$ 异质结催化剂实现高效经济电解水制氢

电催化裂解水析氢反应（HER）是有效和可持续的制氢方法。然而当前高效的 HER 催化剂主要是各种贵金属（如 Pt、Pd 和 Rh）材料，稀缺性和昂贵性严重限制了电解水制氢商业发展。而硫化钼（ $\text{MoS}_2$ ）作为一种传统贵金属催化剂的替代物，以其低成本、高活性的优势成为了该研究领域的热点。美国西北大学 Vinayak P. Dravid 教授研究团队利用形貌工程设计制备了金（Au）纳米颗粒修饰的翼状  $\text{MoS}_2$  异质结催化剂  $w\text{-Au}@\text{MoS}_2$ ，利用 Au 纳米粒子的晶种效应，实现了对  $\text{MoS}_2$  催化剂

<sup>7</sup> Zonghao Liu, Longbin Qiu, Emilio J. Juarez-Perez, et al. Gas-solid reaction based over one-micrometer thick stable perovskite films for efficient solar cells and modules. *Nature Communications*, 2018, DOI: 10.1038/s41467-018-06317-8

薄膜生长方向和形貌的调控，大幅增加了  $\text{MoS}_2$  催化剂边缘活性位点和导电性，从而实现了经济高效地电催化分解水产氢。研究人员首先通过化学气相沉积法(CVD)在负载有 Au 纳米颗粒的硅 (Si) 衬底上沉积生长了  $\text{MoS}_2$ ，透射电镜和扫描电镜联合测试结果显示，产物为 Au 核  $\text{MoS}_2$  壳翼状结构的 w-Au@ $\text{MoS}_2$  异质结，呈现上述结构主要由于 Au 核晶种效应所致，即 Au 原子和 S 原子之间具备很强亲和能，使得 Au 核诱导  $\text{MoS}_2$  生长成翼状。元素分布测试显示，中间的为 Au 元素，边缘为 Mo 和 S 元素，证实了 w-Au@ $\text{MoS}_2$  核壳结构。考虑到硅衬底低导电性，研究人员利用同样的工艺在高度有序的热解石墨衬底 (HOPG) 上生长了 w-Au@ $\text{MoS}_2$  异质结催化剂作为对比。随后对 Si 衬底和 HOPG 衬底 w-Au@ $\text{MoS}_2$  催化剂的电催化析氢性能进行对比测试。结果显示，与 Si 衬底上单独的 Au 或者  $\text{MoS}_2$  催化剂相比，在 Si 衬底上生长的 w-Au@ $\text{MoS}_2$  异质结催化剂的电催化活性都要强；然而，由于 Si 衬底的低导电性，其 HER 性能提升的幅度不算太高。而以 HOPG 为衬底的 w-Au@ $\text{MoS}_2$  异质结催化剂的 HER 性能则是大幅提升。以 HOPG 为衬底的 w-Au@ $\text{MoS}_2$  异质结催化剂 Tafel 斜率较单独的 Au ( $\sim 64 \text{ mV dec}^{-1}$ ) 或者  $\text{MoS}_2$  ( $\sim 72 \text{ mV dec}^{-1}$ ) 催化剂都要小 ( $\sim 59.6 \text{ mV dec}^{-1}$ )，其过电压也大幅下降至 145.9 mV (Au 和  $\text{MoS}_2$  分别为 200 mV 和 210 mV)。当使用恒定阴极电位时，研究人员在 10 小时反应窗口的析氢过程中观察到稳定的电流，展现出了良好的电化学稳定性。而根据氢气的覆盖范围， $\text{MoS}_2$  的平坦基面显示出  $\Delta G_{\text{H}}^{\circ}$  1.2-2.0 eV，而弯曲的基面 (曲率为  $0.0338 \text{ m}^{-1}$ ) 导致活动增加，因为  $\Delta G_{\text{H}}^{\circ}$  减小。这是由于  $\text{MoS}_2$  壳结构中存在应变和晶格畸变。当氢气覆盖率增加到 50% 时， $\text{MoS}_2$  翼的边缘位置  $\Delta G_{\text{H}}^{\circ}$  接近零，这与基面相比，HER 活性明显增加。之字形边缘部位具有轻微的正  $\Delta G_{\text{H}}^{\circ}$ ，这有利于氢吸附，而边缘部位由于其负  $\Delta G_{\text{H}}^{\circ}$  而有利于氢析出。说明翼形  $\text{MoS}_2$  为析氢反应提供了大量边缘活性位点，而导电衬底 HOPG 允许有效的面内电子向边缘的活性位点传输从而进一步改善翼形  $\text{MoS}_2$  的总体催化活性。该项研究利用“种子效应”实现了对  $\text{MoS}_2$  形貌的控制，开发出一种独特的翼形低成本 Au@ $\text{MoS}_2$  异质结构复合催化剂，增加了  $\text{MoS}_2$  催化剂边缘的活性位点，从而实现了高效电解水产氢，为开发高效低成本的电催化裂解水产氢催化剂开辟了新路径。相关研究工作发表在《*Nano Letters*》<sup>8</sup>。

(刘竞 郭楷模)

## 钼钨化合物负极显著增强钾离子电池性能

相比锂元素，钾元素具备资源丰富、成本低廉、工作电压高等优点，因此钾离子电池在大规模电化学储能领域中具备广阔的应用前景。然而，钾离子半径大于锂，使得其在电极材料中的嵌入和脱嵌变得困难，从而导致电池性能较低。德国伊尔梅

<sup>8</sup> Christian M. Wolff, Peter D. Frischmann, Marcus Schulze, et al. Morphological Engineering of Winged Au@ $\text{MoS}_2$  Heterostructures for Electrocatalytic Hydrogen Evolution. *Nano Letters*, 2018, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b03109

璠工业大学的 Yong Lei 教授带领的研究团队研发了一种铵钒层状化合物( $\text{NH}_4\text{V}_4\text{O}_{10}$ , NVO) 并首次作为负极应用于钾离子电池, 其具备了大的晶格间距和良好的两维离子传输通道, 显著改善了钾离子( $\text{K}^+$ ) 嵌入和脱嵌动力学, 从而显著增强电池性能。为了改善电极离子传输特性, 必须开发出大晶格间距且具备离子传输通道的电极材料。为此研究人员利用水热法制备了 NVO 化合物, 扫描电镜测试结果显示该化合物呈现出分层次的花状形貌, 其组成单元是一维纳米线, 意味着该花状化合物具备了离子快速传输通道。而透射电镜表征显示, NVO 化合物(001) 晶面间距达到了  $9.8 \text{ \AA}$ , 大于了  $\text{K}^+$  离子的直径, 即可以有效地实现  $\text{K}^+$  嵌入和脱嵌(保障  $\text{K}^+$  的快速扩散), 具备了更加优异的可逆的钾离子存储性能, 有助于电池性能提升。随后将制备的 NVO 化合物作为负极用于钾离子电池并在三个不同的电压区间进行了电化学性能测试。在 2-4.2 V 电压窗口区间, 电池的初始放电比容量高达  $210 \text{ mAh g}^{-1}$ , 但是经过 10 次循环后比容量便大幅衰减至  $114 \text{ mAh g}^{-1}$ ; 而在 1-3.8 V 和 2-3.8V 电压区间, 电池初始放电比容量低于前者, 依次为  $106 \text{ mAh g}^{-1}$  和  $86 \text{ mAh g}^{-1}$ , 但循环稳定性更好, 10 次循环后放电比容量基本没有衰减。通过电化学阻抗谱测试可知, 电池在 2-4.2 V 电压窗口时串联电阻最大为  $4728 \ \Omega$ , 远大于在 1-3.8 V 和 2-3.8V 两个电压窗口区间电池的串联电阻(分别为  $2898 \ \Omega$  和  $1295 \ \Omega$ ), 意味着在后面两个电压区间工作电池的离子传输更为高效。进一步对电池进行循环稳定性测试, 在 1-3.8V 电压区间、 $50 \text{ mA g}^{-1}$  放电电流密度下循环 200 次, 电池获得了  $116 \text{ mAh g}^{-1}$  放电比容量, 容量保持率为 96%, 单圈循环的容量衰减率仅为 0.02%; 而在 2-3.8V 电压区间循环时, 循环 200 次后获得  $75 \text{ mAh g}^{-1}$  放电比容量, 容量保持率 93%, 单圈循环的容量衰减率仅为 0.03%; 上述两者放电性能和容量保持率都高于先前已报道的性能最优的钒氧化物负极的钾离子电池(容量不超过  $70 \text{ mAh g}^{-1}$ , 容量保持率均小于 80%)。更为关键的是, 当将放电电流提升 60 倍至  $3 \text{ A g}^{-1}$  时, 电池在 1/2-3.8 V 区间依旧可以获得较高的放电比容量, 分别为  $51 \text{ mAh g}^{-1}$  和  $47 \text{ mAh g}^{-1}$ , 展现出了优秀的高倍率性能。电化学机理研究表明, NVO 在高电位时没有脱铵反应是保持其结构稳定性的重要因素, 从而达到电池性能的循环稳定性。该项研究制备新型的层状结构钒铵化合物花状负极材料, 具备了宽泛的晶面间距为钾离子提供了快速传输通道, 增强了储钾性能, 从而增强了电池性能和循环寿命。为设计和开发高性能的钾离子电池提供了新的路径。相关研究工作发表在《*Small Methods*》<sup>9</sup>。

(郭楷模)

## 气溶胶沉积室温制备钒酸锂固态正极大幅增强电池性能

全固态锂电池具备了高能量密度性、高安全性、高输出功率等性能优点, 比传

<sup>9</sup> Y. Xu, H.S. Dong, M. Zhou, et al. Ammonium Vanadium Bronze as a Potassium-Ion Battery Cathode with High Rate Capability and Cyclability. *Small Methods*, 2018, DOI: 10.1002/smt.201800349

统液态电池相比更具优势，在新能源汽车领域应用前景广阔，是有望替代目前锂离子电池的下一代电池。日本丰桥科学技术大学 Yoji Sakurai 教授研究团队首次利用气溶胶沉积法成功实现室温下在石榴石型氧化物固体电解质上制备了三钒酸锂 ( $\text{LiV}_3\text{O}_8$ , LVO) 正极薄膜，显示出极高的可逆充放电容量，且在  $100^\circ\text{C}$  高温下具有良好的循环稳定性，有助于开发高稳定性高性能的全固态电池。研究人员首先利用球磨法将块状的 LVO 粉末碾碎成微粒，随后在室温条件下利用气溶胶沉积法在石榴石型氧化物固体电解质锂镧锆氧 ( $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ , LLZT) 表面沉积一层致密的  $\text{LiV}_3\text{O}_8$  正极薄膜，形成了 LVO/LLZT 固态电解质电极复合材料。扫描电镜显示，LVO 微粒呈现棒状，平均粒径长度为  $0.5\text{-}2\ \mu\text{m}$  之间。X 射线衍射峰只呈现出 LVO 的特征峰，即碾压粉碎的处理没有破坏 LVO 原本的相结构，即保持了原本的物理化学性能。接着将 LVO/LLZT 与锂金属 (Li) 负极组装成完整电池，同时制备了用传统液态电解质替换 LLZT 的电池作为参照样品，进行对比研究测试。在  $0.1\text{C}$  ( $0.024\ \text{mA}/\text{cm}^2$ )、 $50^\circ\text{C}$  温度下对电池进行了电化学性能测试，采用传统液态电解质电池放电比容量为  $30\ \text{mAh}/\text{g}$ ，而采用固态电解质电池放电比容量高达仅为  $15\ \text{mAh}/\text{g}$ ，但有趣的是随着温度逐步升高，两种电池性能呈现了相反的发展趋势，其中采用液态电解质电池性能随温度升高而下降，而采用固态电解质的则相反。但温度升高到  $100^\circ\text{C}$  时，传统液态电解质电池性能显著衰退，而固态电解质电池性能反而增强，放电比容量增大至  $120\ \text{mAh}/\text{g}$ ；而在保持温度时候降低放电电流密度到  $0.01\text{C}$  时，固态电池比容量更是大幅飙涨至  $300\ \text{mAh}/\text{g}$ ，展现出良好的高温性能，更为关键的是电池在不同的放电电流密度下都保持了良好的稳定性，主要原因是采用的气溶胶沉积法将 LVO 电极薄膜与固态电解质 LLZT 紧密结合，改善了电极/电解质界面的传输阻抗。下一步将致力于材料和工艺的改进以提升该类复合电极/固态电解质低温下的电化学性能。该项研究利用气溶胶沉积法在固态电解质表面直接沉积正极材料，使得电极和固态电解质界面有效融合，大大改善了两者之间的界面接触，从而降低了界面传输阻抗，增强了电池的放电比容量和循环稳定性，为开发高效全固态电池提供了一种新策略。相关研究工作发表在《*Materials*》<sup>10</sup>。

(郭楷模)

<sup>10</sup> Ryoji Inada, Kohei Okuno, Shunsuke Kito, et al. Properties of Lithium Trivanadate Film Electrodes Formed on Garnet-Type Oxide Solid Electrolyte by Aerosol Deposition. *Materials*, 2018, DOI: 10.3390/ma11091570

## 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

