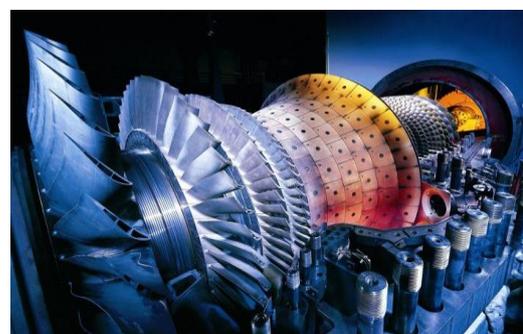


# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- WEC：拥抱颠覆性变革 迎接能源新时代
- IEA：CO<sub>2</sub>的资源化利用有助于应对气候变化并创造新价值
- NETL 评估美高性能材料在发电和航空航天领域的国际竞争力
- 英国政府投入 2.2 亿英镑支持发展球形托卡马克技术
- DOE 资助 7300 万美元支持非粮生物质能源研究

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](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

WEC: 拥抱颠覆性变革 迎接能源新时代 .....	2
IEA: CO <sub>2</sub> 的资源化利用有助于应对气候变化并创造新价值 .....	5
NETL 评估美高性能材料在发电和航空航天领域的国际竞争力 ....	7

### 项目计划

英国政府投入 2.2 亿英镑支持发展球形托卡马克技术 .....	10
DOE 资助 7300 万美元支持非粮生物质能源研究 .....	10
ARPA-E 资助 2600 万美元加速浮动式海上风力涡轮机研发 .....	12
DOE 资助 700 万美元推动先进燃煤发电技术研发 .....	13

### 前沿与装备

低成本太阳能直接驱动全解水产氢系统创下 18.7% 转换效率 .....	14
韩以科学家联合开发水滴蒸腾动力驱动纳米发电机 .....	15
核壳纳米颗粒电子传输层显著提升全无机钙钛矿电池性能 .....	16
新型可充电无穿梭效应铁-硫电池展现优异循环性能 .....	17

## 本期概要

**世界能源理事会（WEC）发布《颠覆性变革：能源新时代》报告，探讨了全球能源行业面临的颠覆性变革并提出了指导性的战略建议：**全球能源行业正在经历全面而深刻的变革。众多相互关联的非线性作用因素（如技术、社会、商业和政策变化等）既构成威胁，也带来机遇，使得能源行业的未来发展充满了诸多不确定性。为了让能源行业领导者、政策制定者更好地理解、管理能源行业面临的当前和未来复杂性变化，报告提出了四大指导性战略建议：（1）将颠覆性理念融入能源行业日常；（2）掌握新兴和未来的技术和社会发展趋势；（3）扩大对各种商业生态系统的了解和应用能力；（4）采用“颠覆性星座”概念框架来理解能源行业正在发生的变革。详见正文。

**国际能源署（IEA）发布《利用排放中的 CO<sub>2</sub> 创造价值》报告，系统分析了 CO<sub>2</sub> 资源化利用的市场潜力和面临的问题：**当前，全球每年有近 2.3 亿吨的 CO<sub>2</sub> 得到有效利用，其中，最大的利用市场是化肥工业，约有 1.3 亿吨 CO<sub>2</sub> 用于生产尿素。其次是石油和天然气行业，消耗 0.7-0.8 亿吨 CO<sub>2</sub> 以提高采收率。其他应用行业包括食品和饮料生产、金属制造、制冷、灭火以及温室植物生长。CO<sub>2</sub> 利用的早期市场正在兴起，但未来发展规模尚不确定，主要原因是 CO<sub>2</sub> 资源化利用技术尚处于早期开发阶段，且相关的监管框架尚未完善。为了促进 CO<sub>2</sub> 市场发展，报告提出了一系列的建设性建议。详见正文。

**美国 NETL 发布《高性能材料的出口潜力评估》报告，评估了 NETL 开发的高性能能源材料在发电和航空航天行业的出口潜力和对美国的经济影响：**先进超超临界发电技术将在 2026 年实现商业化，到 2040 年预计全球燃煤发电机组中约 20% 是超临界或超超临界机组。在此期间，美国高性能材料在先进超超临界发电和天然气联合循环发电市场的累计出口总额预计将超过 32 亿美元；而航空航天有可能成为高性能材料在发电领域以外的最大市场，该领域对高温合金的需求主要是为了提高发动机效率和减少排放，预计同期出口总额将超过 18 亿美元，还将分别提供大量工作岗位和收入。

**美国能源部（DOE）宣布向 35 个生物质能源技术研发项目提供 7300 万美元资助，开展十个主题研究项目，包括：**藻类集约化养殖；生物质组分的变异性和原料转化界面、高效木材加热器、生物质转化碳氢燃料技术、生物质制喷气燃料技术、城市和郊区生物质废物转化、先进生物加工和合成生物技术、碳循环经济塑料、生物质厌氧发酵和减少生物能源中水、能源消耗和排放；旨在推进可再生非粮生物质转化利用技术突破，以降低生物基产品（如生物质塑料）、生物质能源（如生物柴油）和生物质发电成本。

**英国商业、能源和产业战略部（BEIS）宣布将在“用于能源生产的球形托卡马克”（STEP）计划框架下投入 2.2 亿英镑推进球形托卡马克技术发展：**此次资助主要聚焦于球形托卡马克发电站的概念设计，计划在 2024 年前完成。STEP 计划最终目标是在 2040 年前建设一个核聚变发电站。其技术目标包括：实现 100 兆瓦以上的发电规模，探索聚变非电应用，确保氙自持，在核聚变环境下对材料和部件进行认证，以及实现全生命周期成本可负担。

# WEC：拥抱颠覆性变革 迎接能源新时代

9月9日，世界能源理事会（WEC）发布《颠覆性变革：能源新时代》<sup>1</sup>报告指出，伴随新兴能源技术的快速发展、新型商业模式不断涌现以及公共政策和公众行为方式变化，全球能源行业正在经历全面而深刻的变革。众多相互关联的非线性作用因素（如技术、社会、商业和政策变化等）既构成威胁，也带来机遇，使得能源行业的未来发展充满了诸多不确定性。因此，为了让能源行业、政策制定者更好地理解、管理能源行业面临的当前和未来复杂性变化，从而保障能源行业未来的可持续发展，报告引入“颠覆性星座<sup>2</sup>”创新概念，阐述相互关联的非线性作用的组合效应，并提出四大战略性建议，具体内容如下：

### 1、将颠覆性理念融入日常

“颠覆性”并不是一种新涌现的商业概念。历史上有很多颠覆性影响的案例：如众多企业没有对时代快速变化做出足够快的响应而被颠覆并淘汰；如实体视频租赁的消亡和在线内容流的兴起。就能源行业而言，煤炭以及石油和天然气上游领域都在经历颠覆性变革（如数字化、自动化技术、机器人引入）。因此现有企业正在努力寻找能够有效应对上述变革的长期可持续发展道路。实际上油气上游企业一直都在用“数据”技术来提高勘探成功率和生产采收效率，现如今他们正在利用数字技术和新的工作方法来变革整体业务，应对低油价的冲击。

事实上，整个能源行业总体上都在积极应对行业当下经历的变革。埃森哲的研究表明，能源行业对未来颠覆性变革的敏感性和生命科学对专利壁垒敏感性类似，它仅次于零售业对颠覆性变革的敏感性（数字和电子商务仍在继续蚕食着传统零售业市场份额）。这种敏感性是能源供需两侧创新的结果，即新能源资源出现和消费者偏好的改变、能源系统的数字化以及对脱碳的更大关注。换言之，能源行业经历的变革正在从“慢性”变化（一系列渐进性变化）转向“大爆炸”变革（能源供需模式将发生彻底变化）。

迎接颠覆性变革将需要以新能源系统为核心进行创新，成功者将会获得丰厚的回报。埃森哲对14个行业中995家大型企业进行了分析，其中包括对840名高管的调查，结果显示高利润高增长的企业与众不同的关键特征之一就是它们能够很好驾驭颠覆创新能力。也就是说，他们善于并积极创造“可能”而不仅仅限于改善“现在”；这些企业特别重视颠覆性技术研发投入，并为开拓全新的市场大力增加了颠

<sup>1</sup> DESIGNING FOR DISRUPTIONS: A NEW ERA FOR ENERGY.

<https://www.worldenergy.org/publications/entry/designing-for-disruptions-a-new-era-for-energy>

<sup>2</sup> 颠覆性星座概念是用以描述相互关联的非线性多种作用因素组合产生的最终影响，就能源行业而言，即描述影响能源行业的技术、社会、商业和政策等多种非线性相关联作用因素的组合效应。

覆性技术的投资。这可能意味着能源行业要及时改变其运营模式，从传统的以能源资产为中心向以能源消费者为中心转变，以及推动行业深度整合（大数据、人工智能、传感器等和能源行业）。

无论如何，能源行业各利益相关方应该摒弃传统思维，避免采取一种“惯性”的思维方式和文化，而应该采取更加开放姿态，将“颠覆性”理念融入到企业生产日常运作当中。例如，某些能源企业积极采取措施从能源行业外部任命董事会和高管人员（来自 IT 行业、电商行业）以推进公司顺利转型，迎接变革挑战。

## **2、掌握新兴和未来的技术和社会发展趋势**

这是一个技术创新迅速、市场环境不断变化、监管干预不断加强、地缘政治加剧动荡的时代。因此，为了更好地了解能源系统的未来变化以及如何在变化中取胜，能源行业领导者必须能够发现并采取措施应对重大的变革新趋势，而这并不是代表只有总是采取“先发制人”措施的企业才能成功，有时能够快速跟上行业变化的追随者也可能成功。但无论如何，想要在变化环境中成功脱颖而出就要求每一个能源行业参与者都必须能够及时监测到在诸如人工智能或先进材料等广泛技术领域发生的进展动态，因为这些技术会对能源行业产生颠覆性影响。

WEC 通过对 100 家最有希望的全球能源初创企业进行综合分析发现，技术驱动、政策驱动、消费者驱动和市场结构变化的综合作用对上述企业的未来发展影响作用最大。以北美的页岩革命为例，许多能源企业没有及时跟上水力压裂、水平钻井和水管理等新兴技术趋势，导致企业发展开始落后，不得不支付数十亿美元才能赶上那些规模较小、灵活且利基、但能够及时发现技术趋势并整合到业务的小企业/新兴企业。展望未来，储能技术是另一个可能给能源行业带来颠覆性影响的技术趋势，它将有效地重新配置能源。随着“万物电气化”的持续推进，预计储能市场在未来十年将以 25% 至 35% 的复合年增长率增长。

然而，社会变化越来越快，因此精确识别具有发展前景的新技术变得越来越困难。因为并非所有新兴技术都能够为能源行业带来积极影响，因此需要在多种选择中慎重筛选。一种有效的方法是从其他行业参与者那里获取经验（如从电商、IT 行业汲取新运营模式、数字化技术提升运营的经验），从而保障自身行业可持续转型发展。

## **3、扩大对各种商业生态系统的了解和应用能力**

在本报告中，“生态系统”是指由跨行业参与者组成的网络，各方共同定义、构建并执行具有市场开拓价值的客户和消费解决方案。生态系统是由参与者之间潜在合作的深度和广度所定义，每一方都将提供消费解决方案的一部分，或者贡献不可或缺的能力。生态系统的强大在于无需某一参与方拥有或操作解决方案所有组件，并且生态系统所产生的价值将远远超过每家机构单独创造的价值之和。当前，所有

的行业都有可能突然遭遇生态系统所引发的颠覆，那些准备不足、无法妥善应对的行业将面临企业价值不断削弱的命运。通过对全球多个行业 1252 位行业领袖调研，结果显示，当被问及他们如何推进本行业变革时，60% 高管的答案是“打造生态系统”，且近半数的受访企业已经、或正在建立一套生态系统，以应对颠覆性变化。

就能源行业而言，其面临的挑战在于新生态系统的复杂性。在过去的几年中，估计有 3000 亿美元的风险投资通过能源新进入者（新能源企业）和非传统跨界企业（如 IT 公司）流入能源行业。生态系统正在迅速扩大，有 1000 多家新能源初创企业出现。传统能源企业市场地位面临威胁，新能源企业的增长能力和市场份额都将超过传统能源企业，而能源服务企业、使能企业和跨界企业也将凭借能源互联网领域带来的新增长点迅速崛起，甚至赶超传统油气企业。新能源价值链和商业生态系统正改变过往以商品为中心或以供应方为驱动运营模式，正在转向以消费者为中心，客户价值将从集中式能源解决方案向分布式方案转移。传统能源企业需要突破新增长点，未来更注重考虑如何提高客户个性化服务的能力，这都需要数字化技术作为支撑，数字化转型对企业新业务的增长将有巨大的帮助。

归根结底，今天的创新步伐和广度意味着没有任何一个实体可以获取、开发、利用或投资各种可用机会，也无法独自完成颠覆性变革。通过汇集多个参与者（实际上形成了具有共同目标的参与者生态系统），可以颠覆现有的价值链，并迅速发掘出新的价值来源。这是一种新型的横向协作创新，可以降低 40% 以上的成本来重塑竞争力。因此，企业的领导者应该积极寻求建立生态系统和新商业模式。

#### **4、采用“颠覆性星座”概念框架**

本报告中引入“颠覆性星座（CoDs）”创新概念，用以理解影响能源行业的技术、社会、商业和政策等多种非线性相关联作用因素的组合效应。采用 CoDs 可以帮助能源行业领导者通过突破传统能源行业的边界和惯性思维，更好地思考如何引领企业变革。以道路交通工具为例，报告利用 CoDs 从技术、政策法规、商业模式和社会行为四个维度出发分析颠覆性因素（供应链生态系统、电动汽车和替代燃料、货运需求、城市化与城市基础设施）如何影响商业道路交通行业发展。

就供应链生态系统而言，技术和商业模式共同作用可以优化线路和减少货运卡车空转率，净影响是减少能源消耗。就电动汽车和替代燃料而言，快速的电气化正在取代石油燃料。对于中型和重型商用卡车，由于通常较低的车辆周转率和替代燃料技术的发展速度较慢，因此变化要慢得多。在这一细分市场中，随着消费者继续要求可持续的供应链以及解决分销基础设施问题，氢、天然气和生物燃料已成为柴油的新兴替代品。净影响是最终能源需求的碳足迹显著降低，以及由于提高燃料效率而导致最终能源需求相对减少。在对商品衍生需求中，电子商务在全球零售总额中的持续增长，再加上预计的人口增长和收入增加，将显著增加对消费品的需求，

从而也将增加产品和原材料的运输。在城市化和城市基础设施中，互连基础设施的出现，将所得数据用于城市规划以及对可持续城市发展需求将使商业运输和最后一英里交付得以优化。净影响是商业里程的增加和最终能源需求的增加。

(廖明月 郭楷模)

## IEA：CO<sub>2</sub>的资源化利用有助于应对气候变化并创造新价值

9月25日，国际能源署（IEA）发布《利用排放的CO<sub>2</sub>创造价值》报告<sup>3</sup>，系统分析了CO<sub>2</sub>在燃料、化学品、矿物质生产建筑材料、废物生产建筑材料以及提高生物加工产量五个技术领域的近期市场潜力。报告指出，虽然有些技术尚处于早期发展阶段，但这五类技术都可各自扩大至每年消耗1000万吨CO<sub>2</sub>的规模，相当于目前食品饮料行业对CO<sub>2</sub>的需求量。对CO<sub>2</sub>的资源化利用可以降低排放，取代一些生命周期碳排放较高的产品，建筑材料等还可实现对CO<sub>2</sub>的永久封存。报告还提出了在上述技术领域建立早期市场的建议。具体内容如下：

### 一、CO<sub>2</sub>的市场价值

**1、全球每年消耗约2.3亿吨二氧化碳。**其中，最大的消费市场是化肥工业，约有1.3亿吨CO<sub>2</sub>用于尿素生产活动。其次是石油和天然气行业，消耗7000-8000万吨CO<sub>2</sub>用于提高采收率。其他行业包括食品和饮料生产、金属制造、制冷、灭火以及刺激温室植物生长。目前大多数商业都涉及CO<sub>2</sub>的直接使用。

**2、CO<sub>2</sub>的新用途包括将其转化为燃料、化学品和建筑材料。**这些化学和生物转化工艺越来越多地吸引政府、行业和投资者的兴趣，但是大多数都处于起步阶段，并面临商业和监管方面的挑战。

**3、利用CO<sub>2</sub>生产燃料和化学药品是能源密集型产业，且需耗费大量氢气。**利用CO<sub>2</sub>和氢气可生产易于处理和使用的燃料，例如航空燃料。二氧化碳还可以代替化石燃料作为化学药品和聚合物的原料。能源消耗较少的用途包括使CO<sub>2</sub>与矿物或废物流（例如铁渣）反应，形成用于建筑材料的碳酸盐。

### 二、CO<sub>2</sub>利用的早期市场正在兴起，但未来发展规模尚不确定

**1、CO<sub>2</sub>衍生产品和服务的市场潜力难以评估。**主要原因是这些技术尚处于早期开发阶段，大多数应用领域有赖于政策框架完善情况，因而难以评估其未来市场规模。从理论上讲，利用CO<sub>2</sub>生产燃料和化学品可能会扩大至每年使用数十亿吨CO<sub>2</sub>的规模，实际则会与直接使用低碳氢或电力形成竞争，而后者通常更具成本效益。

**2、短期内扩大CO<sub>2</sub>利用规模的主要障碍来自商业化和监管框架，而非技术。**CO<sub>2</sub>衍生的五类产品和服务（即燃料、化学品、矿物建材、废物建材以及用于促进植物生长）的市场规模在短期内可各自扩大至每年至少使用1000万吨CO<sub>2</sub>，相当于

<sup>3</sup> Putting CO<sub>2</sub> to Use Creating Value from Emissions. [https://webstore.iea.org/download/direct/2830?fileName=Putting\\_CO2\\_to\\_Use.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2830?fileName=Putting_CO2_to_Use.pdf)

当前食品和饮料对 CO<sub>2</sub> 的需求量。由于制氢成本过高，目前使用 CO<sub>2</sub> 生产燃料和化学品的成本是常规方法的几倍，但在智利和冰岛等可再生能源成本低廉的地区可实现商业生产。使用 CO<sub>2</sub> 生产聚合物的成本可能低于使用化石燃料，但这一市场相对较小。目前，由 CO<sub>2</sub> 和矿物质或废物生产建筑材料具有竞争力，这一新兴市场正在兴起，与传统生产混凝土的技术相比，二氧化碳固化的混凝土具有更低的成本和更高的性能。建筑材料中使用的 CO<sub>2</sub> 将被永久封存在产品中，同时 CO<sub>2</sub> 固化混凝土的水泥用量减少，因此可带来更多的气候效益。对于某些混凝土产品，可能需要试验并更新产品标准以支持更广泛的部署。

### **三、对 CO<sub>2</sub> 的利用有助于达到全球气候目标，但需更好地量化其减排潜力并进行合理部署**

**1、CO<sub>2</sub> 的利用并不一定能减少排放。**量化气候效益是复杂的过程，需进行全生命周期评估并对其市场发展趋势有正确的认识。当 CO<sub>2</sub> 的利用方式可以规模化、使用低碳能源并能替代更高生命周期碳排放量的产品时，才可带来气候效益。对于零碳排放能源系统，需从生物质或空气中获取 CO<sub>2</sub>。使用 CO<sub>2</sub> 生产建筑材料等可永久封存碳的产品比生产燃料和化学品的碳减排量更大。

**2、需更深入了解 CO<sub>2</sub> 使用技术及其碳减排潜力。**需要基于清晰的方法指导和开放的数据库进行可靠的生命周期分析，从而为未来的政策和投资决策提供依据。近年来，几个专家组已开始制定此类准则。然而，由于许多 CO<sub>2</sub> 使用技术尚处于早期开发阶段，这项工作仍然具有挑战性。

**3、对于大规模减排，CO<sub>2</sub> 资源化利用是 CO<sub>2</sub> 封存的补充方案而非替代方案。**CO<sub>2</sub> 资源化利用不能达到与碳捕集与封存（CCS）同等的减排规模，但仍可在实现气候目标方面发挥作用。在碳封存受到限制的情景下，在能源系统中增加使用 CO<sub>2</sub> 的技术（包括生产甲醇和合成烃燃料），其减少的碳排放量不到碳封存的 13%，通过使用 CO<sub>2</sub> 达到负排放的可能性也非常有限。

### **四、制定 CO<sub>2</sub> 资源化利用技术的长期规划，同时应为早期市场发展创造机会**

CO<sub>2</sub> 资源化利用技术的发展前景很大程度上取决于政策支持，许多技术只能在气候政策框架认可其减排潜力，或对低碳产品实施激励措施的地方才能与传统工艺竞争。公共采购是一种有效的策略，有助于为可验证气候效益的二氧化碳衍生产品建立早期市场，并可帮助制定技术标准。预计短期内 CO<sub>2</sub> 使用的市场会相对较小，但可开发 CO<sub>2</sub> 生产建筑材料、聚合物和用于促进生物生长等技术的市场机会。具备低成本原料、低碳能源和消费群，且可利用现有 CO<sub>2</sub> 管道的工业区，有利于 CO<sub>2</sub> 使用技术的早期部署。另外，还需进一步的研究、开发和示范（RD&D），以实现未来净零碳排放经济，如从生物中或大气中获取 CO<sub>2</sub> 生产化学品和航空燃料。

### **五、促进 CO<sub>2</sub> 市场发展的政策建议**

预计短期内 CO<sub>2</sub> 市场规模仍相对较小，但其具备长远发展的潜力，尤其是用作航空燃料和化学品等含碳产品的原材料。各国政府可以发现早期机会，为碳捕集建立市场，促使技术在未来几十年中逐步成熟，并支持对未来 CO<sub>2</sub> 衍生产品可能发挥重要作用的行业投资。因此，建议短期内采取以下几种措施：

**(1) 增进对 CO<sub>2</sub> 的用途及其气候效益的进一步理解和量化评估技术。**应基于清晰的方法指导和开放的数据库，进行可靠的生命周期排放分析，从而为政策决策提供依据。各国政府可以建立国际专家工作组，以促进知识共享、制定标准和最佳实施准则。

**(2) 确定并利用规模可扩大的、商业可行的、能减少排放的 CO<sub>2</sub> 使用技术的早期市场机会。**如在道路和地板等非结构性建筑材料中使用 CO<sub>2</sub> 就是这样的机会，或在某些情况下利用 CO<sub>2</sub> 生产聚合物，以及在温室中使用 CO<sub>2</sub> 以促进作物生长。需要对聚合物进行认证并修订废弃物监管法规，以允许将废弃物转化为建筑材料。

**(3) 考虑实施低碳产品公共采购指南。**这一举措可为 CO<sub>2</sub> 衍生产品创造早期市场，并有助于建立技术标准和规范。采购指南应基于可靠的碳排放核算以及测试、报告和验证框架，以保证气候效益的实际实现。

同时，可以采取其他措施来为长期市场做好准备：

**(4) 促进 CO<sub>2</sub> 衍生建筑材料的多年测试试验。**这可以证明这些产品具有可靠的性能并被更广泛接受，尤其是在必须承受重负荷的结构材料市场（例如高层建筑）。如果试验成功，则需要政府与行业之间紧密合作以更新和扩展现有产品标准和规范。

**(5) 支持 CO<sub>2</sub> 未来用途相关技术的 RD&D。**这将在净零碳排放经济中发挥作用，包括航空燃料和化学品制造，且应与生产低碳氢以及从生物质和空气中捕获 CO<sub>2</sub> 的研究、开发和示范（RD&D）相结合。实施国际 RD&D 计划和建立知识交流网络可以促进这些技术的加速发展和应用。各国政府还直接资助在扩大规模、商业竞争和碳减排方面具有良好前景的技术示范。

（李鑫 岳芳）

## NETL 评估美高性能材料在发电和航空航天领域的国际竞争力

10月10日，美国国家能源技术实验室（NETL）发布《高性能材料的出口潜力评估》报告<sup>4</sup>，分析了 NETL 开发的高性能材料在先进超超临界（A-USC）发电、天然气联合循环发电和航空航天领域的潜在国际需求，评估了高性能材料的国际出口潜力和对美国的经济影响。报告认为，2026-2040 年 NETL 开发的高性能材料在国际先进超超临界发电和天然气联合循环发电市场的累计出口总额将超过 32 亿美元，在航空航天市场的出口总额将超过 18 亿美元，还将分别提供大量工作岗位和收入。报

<sup>4</sup> NETL Analysis Projects Global Demand for High-Performance Materials. <https://netl.doe.gov/node/9266>

告要点如下：

## 一、NETL 高性能材料研究情况

NETL 在其“先进能源材料”跨领域研究计划<sup>5</sup>资助下，进行高性能材料研究，包括高温合金、更耐腐蚀以及高温蠕变强度更好的材料，以降低化石燃料发电系统成本并提高性能。这些材料可承受极高的温度和压力，并可在各种腐蚀性炉渣和气体环境中运行，许多材料还可抵抗压力、温度变化引起的疲劳以及长时间暴露于高温环境引起的蠕变，上述属性使其具备在航空航天、采矿、电子和医疗设备领域的应用潜力。NETL 对高性能材料的开发主要集中在先进制造、计算材料、结构研究以及结构合金开发四个主题领域，具体研究内容如下：

**(1) 先进制造。**该领域主要进行如下研究：大型零件增材制造；化石燃料发电系统组件使用高镍合金增材制造的可行性验证；化石燃料电厂中梯度结构合金增材制造的计算材料和力学模型集成；集成计算材料工程，用于超临界 CO<sub>2</sub> 系统中具有抗高温蠕变和抗氧化性的镍高温合金热交换器的先进制造； $\gamma'$ 相强化合金的增材制造。

**(2) 计算材料研究。**该领域主要进行了如下研究：化石能源发电系统高性能结构合金设计的新型混合模型；镍基高温合金蠕变变形的多模态方法；极端环境下材料特性的高通量计算框架；镍基高温合金的先进计算方法；结合  $\eta$  相变的镍基高温合金蠕变物理模型的开发；用于高温化石能源发电的先进抗蠕变合金的加速蠕变测试程序；单轴蠕变和蠕变疲劳数据与模型的评估指南；先进超超临界零件设计和制造过程中，大型 H282 锻件和铸件以及 H282 和 Inc740 焊件的长期蠕变和疲劳数据，并为机械性能预测计算模型提供数据；先进燃煤锅炉中极端环境材料的腐蚀研究；先进发电厂耐蠕变合金的焊接性能研究；基于计算模型揭示氧化和热腐蚀降解的复杂耦合机理；化石燃料发电厂转子组件锻造缺陷损伤成核的基于粒子系统高性能建模。

**(3) 结构研究。**该领域重点关注先进超超临界系统组件测试，以及先进超超临界汽轮机中先进镍基合金的性能研究。

**(4) 结构合金开发。**该领域主要进行了镍基合金的先进制造建模。

## 二、NETL 高性能材料的国际出口竞争力

### 1、发电领域

#### (1) 先进超超临界发电

美国目前没有新建燃煤发电的计划，但正在开发高性能材料用于先进发电系统，如先进超超临界电厂。欧盟、中国、印度等国家或地区正进行先进超超临界发电系统的研究、开发和示范，国际能源署（IEA）预测先进超超临界发电技术将在 2026 年实现商业化。在先进超超临界商业化阶段（2026-2040 年），美国以外地区将新建

---

<sup>5</sup> Advanced Energy Materials. [https://netl.doe.gov/sites/default/files/2019-03/Program-124\\_0.pdf](https://netl.doe.gov/sites/default/files/2019-03/Program-124_0.pdf)

397 GW 的燃煤发电容量，参照当前全球燃煤发电机组中约 20% 是超临界或超超临界机组，2026-2040 年间预计将新建 84 GW 先进超超临界机组。

除美国外，全球目前正在进行的先进超超临界研发活动包括：①欧盟通过 AD700 计划和 COMTES700 计划，进行高性能材料开发以及先进超超临界锅炉、汽轮机和其他组件的设计、制造和评估，目前示范装置已投入运营，可用于评估新材料和组件；②中美两国成立中美清洁能源联合研究中心—清洁煤技术联盟，共同进行大容量先进超超临界锅炉的燃烧、传热和灰分沉积特性等研究，预期成果是获得高性能材料和先进超超临界电力系统组件相关的计算模型；③日本通过经济产业省 (METI) 的“凉爽地球” (Cool Earth) 创新能源技术计划，支持高性能材料开发以及先进超超临界锅炉、汽轮机和阀门组件的评估，2015 年 5 月开始对锅炉部件进行长时间的现场测试，预计 2020 年左右实现效率为 48% (以低位发热量为基准) 的发电系统商业化；④印度的公共事业机构和研究中心已经开始进行先进超超临界发电技术的开发和示范，目标是到 2020 年建成 A-USC 示范设施。上述国家/地区的相关研究可能会与美国 NETL 的高性能材料技术在国际市场形成竞争，NETL 综合考虑全球的研究计划和政策环境后认为，美国将可能占有全球先进超超临界发电领域 50% 的市场。

## (2) 天然气联合循环发电

根据 IEA 的预测，2030-2040 年是天然气联合循环发电的商业化阶段，美国以外地区将新建 589-649 GW 的天然气发电机组，而且该阶段新建的所有天然气发电机组都将采用包含高性能材料的燃气轮机。

## 2、航空航天领域

航空航天有可能成为高性能材料在发电领域以外的最大市场，该领域对高温合金的需求主要是为了提高发动机效率和减少排放。高温合金每年约占飞机材料成本的 20%，大部分用在飞机发动机中，在航空航天的其他应用还包括涡轮叶片、叶轮、燃烧室、涡轮盘、飞机紧固件、机身组件、火箭发动机等，主要涉及三个航空航天工业领域：飞机发动机和发动机零件制造；航天器和导弹的推进装置和零件；其他飞机零件和辅助设备制造。NETL 估计，如果 2025 年实现高性能材料市场化，将使上述行业的出口增长率从每年 3.5% 提升至 10%，2026-2040 年航空航天业累计潜在出口将超过 1420 亿美元 (以 2018 年美元计)，其中 35 亿美元将归因于 NETL 的研发和示范。

## 三、NETL 高性能材料出口对美国的经济影响

按照 NETL 的高性能材料研究计划目标，假设到 2026 年实现高性能材料在先进超超临界发电和航空航天领域的商业应用，到 2030 年实现其在天然气联合循环发电领域的商业应用，以 550 MW 先进超超临界发电厂和 350 MW 天然气联合循环发电厂为代表，预计先进超超临界发电厂和天然气联合循环发电厂中高性能材料的成本

分别为 1380 万美元和 761 万美元，分别占电厂成本的 4% 和 10%。以此为基准，以 2026-2040 年美国占据海外先进超超临界发电和天然气联合循环发电市场的 50% 计，其中 NETL 高性能材料的累计出口总价值将超过 32 亿美元，创造超过 28000 个岗位，产生 18 亿美元以上的收入，以及超过 45 亿美元的 GDP。另外，考虑美国航空航天工业高性能材料相关的出口增长和美国在全球市场的占有率，2026-2040 年航空航天业出口产品中 NETL 高性能材料的总价值将超过 18 亿美元，创造工作岗位超过 17000 个，产生 12 亿美元以上的收入，以及超过 29 亿美元的 GDP。

（岳芳）

## 项目计划

### 英国政府投入 2.2 亿英镑支持发展球形托卡马克技术

10 月 3 日，英国商业、能源和产业战略部（BEIS）宣布将在“用于能源生产的球形托卡马克”（STEP）计划框架下投入 2.2 亿英镑<sup>6</sup>，支持球形托卡马克发电站的概念设计，旨在推进球形托卡马克技术发展，以实现核聚变发电商业化。

STEP 计划基于球形托卡马克紧凑型核聚变技术，将在 2020 年开始运行升级版兆安培球形托卡马克（MAST-U）装置进行核聚变研究，此次资助主要聚焦于球形托卡马克发电站的概念设计，计划在 2024 年前完成。STEP 计划最终目标是在 2040 年前建设一个核聚变发电站。其技术目标包括：实现 100 兆瓦以上的发电规模，探索聚变非电应用，确保氙自持，在核聚变环境下对材料和部件进行认证，以及实现全生命周期成本可负担。

MAST 是全球最大的两个球形托卡马克装置之一<sup>7</sup>，目前正处于升级阶段，第一阶段升级后将达到中心磁场 0.84 特斯拉、加热功率 7.5 兆瓦、等离子体电流 2 兆安培，第二阶段升级后加热功率将进一步增加至 12.5 兆瓦。升级的 MAST-U 装置可用于测试核聚变发电站原型的反应堆系统，其采用的创新型高功率 Super-X 偏滤器可降低来自等离子体的热功率负载，因此也可用于核聚变发电装置。

（岳芳）

### DOE 资助 7300 万美元支持非粮生物质能源研究

10 月 1 日，美国能源部（DOE）宣布向 35 个生物质能源技术研发项目提供 7300 万美元资助<sup>8</sup>，旨在推进可再生非粮生物质转化利用技术突破，使包括藻类、非粮能

<sup>6</sup> UK to take a big ‘STEP’ to fusion electricity. <https://www.gov.uk/government/news/uk-to-take-a-big-step-to-fusion-electricity>

<sup>7</sup> 另一装置是美国普林斯顿等离子物理实验室的升级版国家球形托卡马克装置 NSTX-U

<sup>8</sup> Department of Energy Announces \$73 million for 35 Projects for Bioenergy Research and Development. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-73-million-35-projects-bioenergy-research-and-development-0>

源作物（如玉米、甘蔗等）和各种废弃物（如植物秸秆、稻壳等）在内的各类生物质资源更经济、有效地转化为生物燃料、生物质电力和生物制品，以降低生物基产品（如生物质塑料）、生物质能源（如生物柴油）和生物质发电成本。本次资助主要聚焦 10 大主题领域，具体内容如下。

**1、藻类集约化养殖（资助金额 2000 万美元）。**优化生物反应器压力环境和害虫防治技术，提高藻类产量；创新型的藻类培养技术；通过快速的藻类菌种筛选和生物质改良提高藻类产量；提高用于废水处理和生物燃料生产的大型藻类集约化培育系统生产率和性能；基于藻类生长预测决策模型提升藻类生产率。

**2、生物质组分的变异性和原料转化界面（资助金额 700 万美元）。**增强原料表征和建模技术，以促进玉米秸秆纤维素最佳预处理和解构；改进用于控制玉米秸秆原料性能的单流程、不受天气影响的分馏技术；生物质灰化学特性和热化学转化过程理化研究；木质素去芳香化和羧基官能化制聚合物；基于机器学习建模将生物质组织特性与处理和转化性能建立关联，用于指导生物质生产和转化；生物质颗粒之间以及生物质颗粒与介质之间相互作用研究。

**3、高效木材加热器（资助金额 300 万美元）。**开发旋流燃烧器，实现木材的高效旋转燃烧；开发自动化生物质锅炉；木材加热器的安全性能监控和用户警报系统。

**4、生物质转化碳氢燃料技术（资助金额 800 万美元）。**将沼气催化转化为可直接使用的可再生柴油燃料；将生物质释放的  $\text{CO}_2$  转化为碳氢燃料；先进的生物质快速热解催化系统；纤维素转化成碳氢燃料。

**5、生物质制喷气燃料技术（资助金额 500 万美元）。**乙醇喷气燃料；纤维素合成可替代型喷气燃料；用乙醇生产可再生的环烷烃用于替代喷气燃料，提升能量密度减少颗粒排放。

**6、城市和郊区生物质废物转化（资助金额 500 万美元）。**将湿废料电转化为甲烷以外的产品。

**7、先进生物加工和合成生物技术（资助金额 940 万美元）。**在抗污染的两室系统中严格控制生长和生产的分离，以实现稳定的连续生物处理；实现无细胞异丁醇的经济生产；加速聚酮化合成酶工程技术发展，以提高生物燃料和生物质产品产量；发展 CRISPR 基因编辑技术，缩短设计-建造-测试-学习周期，加速微生物工程技术的发展，推动生物技术发展。

**8、碳循环经济塑料（资助金额 760 万美元）。**基于生物质可回收塑料创新制造技术；木质素衍生的酚类可回收热固性聚合物；将非均质聚酯废料生物转化为高价值化工产品；发展环保化学回收技术和新型可修复和可循环利用的复合材料制造工艺。

**9、生物质厌氧发酵（资助金额 500 万美元）。**将湿有机废物流转化为高价值产

品技术；发展先进的预处理/厌氧发酵（APAD）技术，用于少于 5 吨干污泥容量的小型废水处理厂，以提高污泥向生物天然气的转变效率。

**10、减少生物能源中水、能源消耗和排放（资助金额 200 万美元）。**发展生物精炼制燃料技术减少温室气体和空气污染物排放；基于主体的能源生产路径多目标优化建模。

（廖明月 郭楷模）

## ARPA-E 资助 2600 万美元加速浮动式海上风力涡轮机研发

9 月 20 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布在“利用航海技术和集成伺服控制的轻量级和浮动式气动涡轮机”主题计划（ATLANTIS）下投入 2600 万美元<sup>9</sup>，支持 13 个浮动式海上风力涡轮机新技术研发项目，旨在开发替代传统大型海上风电平台的新型设备，以更好利用海上风能。本次资助将从新设计、计算机工具和实验三方面进行浮动式海上风力涡轮机的开发，具体研究内容见表 1。

表 1 ARPA-E 浮动式海上风力涡轮机研发项目具体内容

主题	具体内容	资助金额/ 万美元
垂直风力涡轮机	设计一种垂直风力涡轮机，以提高发电效率，降低成本。采用更轻的拉索结构代替塔架，减轻质量，同时将设计振荡涡轮机平台，保证安全运行	250
12 MW 轻型风力涡轮机的优化控制系统	将采用先进的控制算法，并与浮动式海上风力涡轮机的集成结构进行共同设计，涡轮机和控件的设计将使设备质量最少降低 35%	280
浮动式海上风力涡轮机数字化模型的开发、验证和运行	开发、验证和运行世界首个浮动式海上风力涡轮机的数字化模型，将针对 WindFloat Atlantic 海上风电项目进行开发，通过评估真实、动态海上环境的浮动式海上风力涡轮机性能，优化预测和运行能力，降低成本，并可用于下一代涡轮机设计	360
低成本浮动式海上垂直风力涡轮机	采用控制协同设计方法，开发低成本浮动式海上垂直风力涡轮机，将进行如下设计：更小、更轻的浮动平台；通过转子叶片的气动弹性剪裁减少停车和运行负荷；将主动式叶片流量控制与转子速度控制相结合，以减少扭矩变化；模块化传动系统	300
浮动式海上风力涡轮机协同仿真平台	开发软件进行浮动式海上风力涡轮机的仿真和控制协同设计，将采用仿射粒子群算法，并通过控制协同设计进行设计优化。开发的软件将开源、直观、可扩展，具有完全耦合的动态模块，可在大型并行超算上进行高效编写	118
超柔性智能浮动式	设计一种新型浮动式海上风力涡轮机，将浮动式海上风电场	150

<sup>9</sup> DEPARTMENT OF ENERGY ANNOUNCES \$26 MILLION FOR OFFSHORE WIND ENERGY.  
<https://www.arpa-e.energy.gov/?q=news-item/department-energy-announces-26-million-offshore-wind-energy>

海上风力涡轮机	发电成本降至固定式海上风电场的水平（7.5 美分/kWh）。设计具有超柔性轻型叶片、先进的空气动力学控制表面和创新的子结构。该项目将完成 10 MW 机组的初步控制协同设计和示范装置 50% 的前端工程设计	
风电系统的集成伺服控制系统	开发工具用于集成伺服控制模型的浮动式海上风力发电机的控制协同设计	271
浮动式海上风力和控制先进实验室（FOCAL）计划	开发第一个公开的浮动式海上风力涡轮机模型数据库，包括先进涡轮机控制、减轻浮动平台载荷和提高灵活性技术的相关数据	153
惯性和动能回收的智能优化设计	基于顺应性材料、结构表面和先进控制系统，开发新型风力系统架构，通过主动控制系统避免使用刚性、高成本材料	261
15 MW 浮动式海上风力涡轮机协同设计的比例模型	通过 15 MW 浮动式海上风力涡轮机的实验数据，评估常规和非常规浮动式海上风力涡轮机的性能，验证用于设备开发的计算机程序和技术	156
基于流体和结构分析，构建高效的大气数据驱动控制协同设计优化框架	开发高效的大气数据驱动控制协同设计优化模块化软件框架，用于浮动式海上风力涡轮设计	136
基于模型的海上风力发电系统设计与控制协同设计	开发综合建模仿真平台，可促进控制协同设计，合并多物理场模型，并能通过快速仿真以验证模型和评估控制器	49
超轻型混凝土浮动式海上风力涡轮机	设计一种超轻型、耐腐蚀的混凝土浮动式海上风力发电机，使用美国国家航空航天局（NASA）的减震技术，可降低平台重量，提高涡轮机性能，降低平准化度电成本（LCOE）	140

（岳芳）

## DOE 资助 700 万美元推动先进燃煤发电技术研发

10 月 11 日，美国能源部（DOE）宣布在“Coal FIRST”计划框架下，向 7 个先进燃煤发电概念设计项目提供 700 万美元资助<sup>10</sup>，旨在推进开发超越现有技术的新型燃煤发电，使燃煤电厂更适应现代化电网。本次资助聚焦 7 大主题领域，具体内容如下：

**1、300 兆瓦零排放阿拉姆循环（Allam Cycle）燃煤电厂预前端工程设计（pre-FEED）研究。**阿拉姆循环发电成本比传统化石能源发电更低，碳捕集率超过 97%。项目将进行煤气化和阿拉姆循环的集成设计，该技术目前正由 NET Power 公司进行验证。这一技术的净效率将在 40% 以上，热值更高且可进行碳捕集，具备甚至有潜力超越天然气联合循环的爬坡速率，比整体煤气化联合循环节约 50%-60% 的水，燃料更具灵活性，并可在电力需求不足时将电力储存为化学品。

<sup>10</sup> U.S. Department of Energy Invests \$7 Million for Projects to Advance Coal Power Generation under Coal FIRST Initiative.  
<https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-invests-7-million-projects-advance-coal-power-generation-under-coal>

**2、先进多联产系统 pre-FEED 研究。**将采用中温鼓泡床脱挥和干燥工艺为原煤硫化提供准备，该技术扩大了流化床气化炉生产合成气的煤原料范围（包括使用废煤），提高了系统的适应性。该技术还包括了一个水煤气变换反应器，可优化合成比例，并支持燃烧前碳捕集的一系列方案。

**3、结合先进超超临界、燃气轮机和储能的未来电厂概念 pre-FEED 研究。**该设计将集成 250 兆瓦先进超超临界燃煤发电、80 兆瓦燃气轮机和储能技术，可实现快速启动，适应负荷快速变化，当电力需求低于最小负荷时，多余电力将被储存在储能系统中，用于早晚高峰期的初始爬坡。

**4、结合碳捕集的超临界加压流化床新型概念 pre-FEED 研究。**该技术具备高发电效率和灵活的负荷循环能力，目标是实现 40% 以上的发电效率、灵活运行和接受各种煤原料（包括废煤），并配备碳捕集装置。

**5、集成超临界 CO<sub>2</sub> 循环、加压流化床燃烧和电热储能的燃煤发电 pre-FEED 研究。**超临界 CO<sub>2</sub> 循环发电比常规和先进的蒸汽朗肯循环发电更高效、占地面积更小，无需消耗水，基于 CO<sub>2</sub> 的电热储能将为系统增加灵活性，这些技术有助于实现未来小型、高效、灵活的模块化燃煤电厂。

**6、高效、灵活、低负荷运行的 300 兆瓦燃煤电厂 pre-FEED 研究。**该发电厂概念将提供适应快速启动、负荷变化和动态循环的优化方案，以增强灵活性适应未来电网。该设计将平衡最高效率和最低发电容量，以确定汽轮机的最低额定值，同时在叶片长度和转子直径受设计和制造限制情况下维持高压汽轮机的入口尺寸。压力部件的设计将最大限度提高运行灵活性。

**7、高效模块化电厂 pre-FEED 研究。**该研究将在再热布雷顿循环中将高效灵活的往复式发动机与常规燃气轮机结合，还结合了朗肯底循环，以最大限度提高热效率。该项设计利用的都是成熟的技术，能够适用于水煤浆和粉煤等多种原料形式。

（岳芳）

## 前沿与装备

### 低成本太阳能直接驱动全解水产氢系统创下 18.7% 转换效率

利用太阳能分解水释放氧气和氢气，能将丰富而廉价的太阳能资源转换为清洁的、可再生的氢燃料，是一个受到广泛专注的研究领域。但目前高效太阳能驱动的催化裂解水产氢系统光敏剂价格昂贵，且需要聚光器，致使成本过于高昂不利于商业化推广应用，因此开发低成本高效的催化产氢系统成为了研究热点。瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）Michael Grätzel 教授带领的研究团队设计开发了一种低铂（Pt）含量催化剂和钙钛矿/晶硅叠层太阳电池组成的光电催化系统，实现了太阳能直接驱动下高效稳定地催化裂解水产氢和放氧，其太阳能到氢能（STH）转化效率高达 18.7%，

创下了低成本光敏剂全解水产氢系统的太阳能制氢最高效率。当催化剂尺寸由块体减小到纳米尺度时，其表面积会大幅增加，使得催化活性位点更多地暴露出来，从而有助于提升催化活性。有鉴于此，研究人员利用原子沉积方法在涂覆于碳布(CC)表面的碳化钛(TiC)纳米线(作为骨架)表面沉积了一层Pt纳米颗粒团簇催化剂，透射电镜表征显示Pt纳米颗粒团簇均匀地分散覆盖在TiC纳米线表面。而选区电子衍射测试显示样品存在两种晶格常数：一个是0.274 nm，对应于TiC(111)晶面；一个0.236 nm，对应于Pt的(111)晶面，进一步证实了制备的样品确为CC/TiC-Pt复合催化剂。为了对比，研究人员利用同样的工艺在碳布和碳布/二氧化钛(CC/TiO<sub>2</sub>)骨架上沉积了同样厚度的Pt纳米团簇形成了CC/Pt和CC/TiO<sub>2</sub>/Pt，随后将上述制备催化剂置于碱性(KOH)和酸性(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)电解质溶液中进行析氢反应催化活性研究。实验结果显示，外加偏压的情况下，在酸性溶液中，达到10 mA/cm<sup>2</sup>产氢电流密度，CC/TiC-Pt的过电位只需35mV，低于CC/Pt(54 mV)和CC/TiO<sub>2</sub>/Pt(50 mV)；同样的情况也出现在了酸性电解质中。而在100 mV过电位下，CC/TiC-Pt电流密度可以达到328 mA/mg，比商用的Pt/C(67 mA/mg)还高出近5倍。上述结果表明了CC/TiC-Pt具有极其优异的催化活性。更为关键的是，该催化剂可以连续稳定工作100小时，表现出与商用Pt/C催化剂相当的化学稳定性。接着将CC/TiC-Pt和镍铁(NiFe)层状氢氧化物分别作为析氢和析氧活性催化剂电极，并与钙钛矿/晶硅叠层太阳电池(提供电能)结合组装成太阳能直接驱动全解水反应体系，而无需任何外加偏压(即无需消耗额外电能)。在一个标准的模拟太阳光(光照强度为100 mW/cm<sup>2</sup>)辐照、无聚光器未施加任何外部偏压的条件下，通过测量恒压电流曲线表征太阳能到氢能转换性能，结果显示全解水反应体系获得了18.7%的转化效率，是目前文献报道的无偏压低成本光敏材料太阳电池直接驱动电解水产氢体系的最高纪录。该项研究首先精心设计合成了负载于碳化钛纳米线骨架上的铂纳米团簇产氢催化剂，提升了催化活性位点暴露面，随后与镍铁层状氢氧化物析氧催化剂电极、钙钛矿/晶硅叠层太阳电池组合成太阳能直接驱动的全解水催化体系，在一个标准模拟太阳光辐照、无聚光器未施加任何外部偏压(即没有额外电能，纯太阳能驱动)的条件下获得了高达18.7%太阳能到氢能转化效率，是目前已报道的太阳能直接驱动低成本光解水产氢系统的最高转换纪录，为设计研发低成本高性能太阳能产氢系统开辟了新思路。相关研究成果发表在《Joule》<sup>11</sup>。

(郭楷模)

## 韩以科学家联合开发水滴蒸腾动力驱动纳米发电机

纳米发电机能够将日常生活闲置的资源(如机械能、温差能等)转化成电能，

<sup>11</sup> Jing Gao, Florent Sahli, Chenjuan Liu, et al. Solar Water Splitting with Perovskite/Silicon Tandem Cell and TiC-Supported Pt Nanocluster Electrocatalyst. *Joule*, 2019, DOI: 10.1016/j.joule.2019.10.002

且成本低廉、柔韧性好,在自驱动的可穿戴设备和传感器件中具有广阔的应用前景。韩国高等科学技术研究院 Il-Doo Kim 教授课题组与以色列理工学院研究人员合作将流动电流和电位场和水的蒸腾作用结合,设计开发了一种水滴蒸腾驱动的纳米发电机,实现了稳定长时电力输出。理论和实验研究表明液态电解质在毛细管通道中流动时,在沿流动方向会发生离子积累,产生流动电位与流动电流。基于上述理念,研究人员设想构建一个非对称湿润的毛细装置,实现水滴蒸腾驱动纳米发电机。为此,研究人员首先将炭黑均匀地沉积在棉布上形成,随后接上外电路,最后在一侧滴上数滴水(称为湿侧),一侧保留干燥(干侧),形成湿度非对称两侧电力装置。电流电压测试发现,装置可以产生 0.53 V 稳定电压, 3.91  $\mu\text{A}$  电流, 1.14  $\text{mWh cm}^{-3}$  最大能量密度,其中电压不会随水滴数量的变化而变化,但在湿侧滴加的水量增加时,整个器件发电的时间会延长,主要是因为水量增加使得水滴蒸发的时间延长,表明成功设计出了水滴蒸腾驱动纳米发电机 TEPG。进一步研究发现如将炭黑涂覆的棉布两侧都滴上水滴,形成全部湿润的两侧时候,器件没有电压输出,表明了必须形成非对称湿润的两侧(即一个湿侧一个干侧)才能实现发电。为了探究环境对 TEPG 性能影响,研究人员将器件置于不同温度环境和湿度环境中进行电学性能测试,实验显示随着温度增加器件发电时间缩短,因为温度升高加快了水滴蒸发过程;而随着湿度增加(从 20%到 80%),器件发电时间则会延长,因为水滴蒸发过程变长了,但随着两侧全部变成湿润状态,器件就会停止工作,在这个过程中器件最长可以工作 11 小时(工作环境为 20%空气湿度)。为了探究器件工作机制,研究人员将极性和非极性液体滴定在制备 TPEG 上,发现只有滴加了极性液体器件才能发电,表明了推动器件发电的关键作用因素是离子而不是溶剂分子,也即极性液体滴定在炭黑涂覆棉布表面时,通过毛细作用产生流动电位与流动电流,而随着时间推移,棉织物毛细管会促使水滴从器件的湿侧流向干侧最终导致停止发电。为了确认该 TPEG 器件真实环境工作特性,将多个 TPEG 串联可以成功驱动电压为 2.2 V,电流为 20 mA 的发光二极管 LED 亮起来。该项研究设计开发了一种水滴蒸腾驱动的纳米发电机,通过几滴水就可以产生可观的电力输出,为开发可穿戴电子设备(特别是与防水器件、衣物结合)中的电源器件开辟新路径。相关研究成果发表在《ACS Nano》<sup>12</sup>。

(郭楷模)

## 核壳纳米颗粒电子传输层显著提升全无机钙钛矿电池性能

有机无机杂化钙钛矿太阳电池光电转换效率已经突破 25%,逼近晶硅太阳电池,成为了极具应用前景的新一代薄膜光伏器件。然后由于有机成分的不稳定易于分解,

<sup>12</sup> Tae Gwang Yun, Jaehyeong Bae, Avner Rothchild, et al. Transpiration Driven Electrokinetic Power Generator. *ACS Nano*, 2019, DOI:10.1021/acsnano.9b04375

导致了该类电池存在稳定性差、寿命短问题，亟需给予解决。而开发全无机钙钛矿太阳电池成为解决上述问题的关键途径之一，但全无机器件目前效率较有机无机器件偏低（集中在 10% 左右），有待进一步改善。由加利福尼亚大学洛杉矶分校 Yang Yang 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计制备了一种氧化锌@氧化锡（ZnO@SnO<sub>2</sub>）核壳结构纳米颗粒，作为电子传输层应用于全无机钙钛矿太阳电池，显著提升了器件的性能。与有机电荷传输材料相比，金属氧化物显示出比有机材料更好的稳定性和载流子迁移率。在这些金属氧化物中，由于合适的能级，SnO<sub>2</sub> 被证明是无机钙钛矿太阳电池中的有效电子转移层。而 ZnO 具有较大的电子迁移率有助于电子的快速抽取，但 ZnO 的本征表面缺陷很容易导致电子与空穴的严重复合，且 ZnO 直接与钙钛矿晶体接触时，容易导致钙钛矿晶体在热处理过程中容易分解。因此综合考虑上述情况，研究人员采用溶剂热法制备了 ZnO@SnO<sub>2</sub> 核壳纳米粒子，一方面整合了 ZnO 和 SnO<sub>2</sub> 各自优点，同时利用 SnO<sub>2</sub> 外壳层将 ZnO 包覆起来钝化了表面缺陷同时避免其直接与钙钛矿晶体直接接触。透射电镜表征显示，合成的 ZnO@SnO<sub>2</sub> 核壳纳米颗粒平均粒径为 8.1 nm，高倍率透射电镜表征显示内核 ZnO 平均粒径为 4.7 nm，外壳 SnO<sub>2</sub> 厚度约 3.4 nm。接着研究人员利用旋涂法制备了全无机钙钛矿晶体薄膜铯铅碘溴（CsPbI<sub>2</sub>Br），扫描电镜显示 CsPbI<sub>2</sub>Br 是由平均粒径 100-200 nm 颗粒组成，且薄膜呈现均匀致密结构。紫外可见光谱测试发现 CsPbI<sub>2</sub>Br 能带位于 -4.17 eV（相对平带而言），而 SnO<sub>2</sub> 能带在 -4.43 eV（相对平带），表明了 SnO<sub>2</sub> 和 CsPbI<sub>2</sub>Br 两者之间能带良好匹配，有利于电子转移。随后以涂覆 ZnO@SnO<sub>2</sub> 核壳纳米粒子电子传输层 FTO 薄膜为底电极，以 CsPbI<sub>2</sub>Br 薄膜为光敏剂，以 Spiro-OMeTAD 为空穴、Ag 电极为顶电极组装成完全的全无机钙钛矿太阳电池并进行电化学性能测试。实验结果显示，电池获得了 16.45 mA cm<sup>-2</sup> 短路电流密度，1.11 V 开路电压，79% 填充因子，从而获得了 14.35% 高转换效率。而单独采用 SnO<sub>2</sub> 作为电子传输层的器件转换效率仅为 11.66%。该项研究设计制备了 ZnO@SnO<sub>2</sub> 核壳纳米粒子电子传输层，整合两者优点，同时消除了 ZnO 表面缺陷和避免其直接与钙钛矿晶体直接接触引起钙钛矿分解，应用于全无机钙钛矿太阳电池，从而显著提升了电池器件的转换效率和稳定性，推进了钙钛矿太阳电池技术向商业化进程。相关研究成果发表在《*Journal of the American Chemical Society*》<sup>13</sup>。

（程向阳 郭楷模）

## 新型可充电无穿梭效应铁-硫电池展现优异循环性能

硫电极（S）具备极高的理论比容量（~1675 mAh/g），且具有资源丰富、价格低廉等优点，在二次电池领域得到了极为广泛的关注和研究。目前关于 S 电极电池

<sup>13</sup> Palmstrom A F.; Eperon, G E, Leijtens T, et al. Core-Shell ZnO@SnO<sub>2</sub> Nanoparticles for Efficient Inorganic Perovskite Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, DOI: 10.1021/jacs.9b06796.

研究主要集中在将 S 电极和碱金属/碱土金属进行组合，构建可充电的 S-M (M 为碱金属/碱土金属) 电池。然而上述类型的 S-M 电池存在穿梭效应会引起电池性能逐步衰退。因此减轻穿梭效应甚至完全消除穿梭效应成为了 S 电极电池研究热点。俄勒冈州立大学 Xiulei Ji 教授研究团队合成制备了硫/碳 (S/C) 复合正极，并与廉价的铁 (Fe) 负极组合，设计制备了一种全新的可充电 Fe-S 电池，得益于电化学反应物和反应产物的不可溶性，电池完全杜绝了穿梭效应，获得了极高的放电比容量和循环稳定性。研究人员以活性炭为骨架利用湿化学法将 S 均匀沉积在碳骨架上，并通过调节反应物前驱体比例制得了优化的 S/C 复合材料，主要目的是改善 S 电极导电性。X 射线衍射表征显示，在产物中只探测到了  $23.6^\circ$  和  $43.5^\circ$  两个特征衍射峰，分别对应于活性炭的 (002) 和 (101) 晶面，而没有任何与 S 相关的衍射峰；但 X 射线能谱仪表征清晰可见产物存在 S 元素。上述结果表明了 S 纳米颗粒完全渗透到活性炭的孔洞当中。随后以 S/C 为正极、Fe 金属为负极，硫酸铁为电解质组装成完整的 Fe-S 电池器件并进行一系列电化学性能测试。在 10 mA/g 放电电流密度下进行恒电流充放电循环，电池获得了高达 1050 mAh/g 放电比容量，并可稳定循环 150 余次。通过对电化学反应过程的追踪发现，电极活性物质在整个充放电循环过程中体积的膨胀率仅为 32.6%，远远低于 Li-S 电池，这有助于改善电池循环性能。且对整个循环过程产物追踪探测可以清晰看到，Fe-S 电池的整个电化学反应涉及了  $S_8$ 、 $FeS_2$ 、 $Fe_3S_4$  和 FeS 产物，均为不可溶性质但可分解可逆，因此该电池器件可以有效规避了传统 S-M 电池的穿梭效应，这是电池循环稳定性改善的根本性原因。随后进一步提高放电电流探究电池的倍率性能，结果显示在 20、50、80、100 和 150 mA/g 放电电流密度下，电池分别获得了 950、890、831、796 和 686 mAh/g 放电比容量，100 余次循环后容量保持率均超过 95%，平均库伦效率高达 99.8%，表现除了优异的高倍率性能。该项研究精心设计硫碳复合电极，改善了硫电极导电性，随后与铁金属负极组合成电池器件，得益于放电产物的不可溶性但可逆性，有效规避了穿梭效应，增强了电池的比能量和循环稳定性，为设计开发高效长寿命的硫电极电池指明了新方向。相关研究成果发表在《*Advanced Materials*》<sup>14</sup>。

(郭楷模)

<sup>14</sup> Xianyong Wu, Aaron Markir, Yunkai Xu, et al. Rechargeable Iron-Sulfur Battery without Polysulfide Shuttling. *Advanced Materials*. 2019, DOI: 10.1002/aenm.201902422

## 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

