

# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- IEA：未来五年全球煤炭需求仍将保持稳定
- 欧盟发布专题报告评估电池原材料供应安全问题
- 美国会核能创新和现代化法案助力先进核能开发和商业化
- ARPA-E 资助 3900 万美元支持创新能源技术研发
- 锯齿形可折叠电池展现超万次折叠柔韧性和高能量密度

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

IEA: 未来五年全球煤炭需求仍将保持稳定.....2  
欧盟发布专题报告评估电池原材料供应安全问题.....4  
美国会核能创新和现代化法案助力先进核能开发和商业化.....7

## 项目计划

ARPA-E 资助 3900 万美元支持创新能源技术研发.....9  
DOE 公布 2019 财年第一阶段第二批小企业研发创新资助计划 .. 10

## 前沿与装备

锯齿形可折叠电池展现超万次折叠柔韧性和高能量密度..... 13  
低温加工空穴材料助力倒置平面钙钛矿电池效率创纪录..... 14  
传统半导体封装技术设计新型柔性热电发电机..... 15  
模拟呼吸过程的电催化系统实现高效析氧和氧还原反应..... 15

## 本期概要

**国际能源署 (IEA) 发布《煤炭 2018: 至 2023 年的分析和预测》中期市场报告, 系统分析了未来五年 (2018-2023 年) 全球煤炭市场发展趋势:** 由于全球经济强劲增长导致需求旺盛, 2017 年全球煤炭需求逆势上涨 1%, 而未来五年煤炭需求将保持稳定。煤炭市场供应趋紧使煤炭价格在 2018 年继续上涨, 然而近两年煤炭价格上涨并未刺激新的投资。西欧正加速淘汰煤炭, 东欧煤炭需求则将保持稳定。世界煤炭需求未来走势将主要取决于中国, 中国实施的“打赢蓝天保卫战”政策将继续促进电力转型, 预计到 2020 年中国燃煤发电将停止增长。印度、东亚和东南亚成为世界煤炭需求增长的主要力量, 中国仍是煤炭贸易的“变数”。全球尚未对弃用煤炭达成一致, 碳捕集、利用和封存技术是燃煤发电国家实现低碳减排目标的关键技术。

**欧盟委员会发布《电池应用原材料报告》, 评估了欧盟钴、锂、石墨、镍等电池原材料供应面临的瓶颈和挑战:** 欧盟锂离子电池的主要原材料 (钴、锂、石墨、镍) 供应主要依赖进口, 且产地高度集中于中国、刚果 (金)、南非和智利等国。尽管欧盟境内电池原材料储量无法完全满足需求, 但其原材料开采及二次回收潜力很大。因此, 报告建议加大欧盟境内原材料资源开采力度, 加强原材料回收再利用, 拓展原材料资源, 以降低原材料供应风险, 增强欧盟电池制造竞争力。

**美国国会通过《核能创新和现代化法案》, 旨在发展先进反应堆创新和商业化所需的专业知识和管理流程, 促进先进反应堆发展:** 该法案要求在美国核监管委员会的预算和收费项目中建立透明度和问责措施, 制定商用先进核反应堆许可的监管框架并提交阶段性进展报告, 还要求提高铀资源利用率和监管效率, 为美国下一代先进反应堆的开发和商业化提供良好的政策环境。

**美国能源部先进能源研究计划署 (ARPA-E) 近期共投入 3900 万美元支持创新能源技术研发:** ARPA-E 为其“OPEN+”开放式招标群组资助子计划的第二、第三批 7 个项目资助 2100 万美元, 主要关注混凝土高效低能耗新制造工艺和甲烷生产高价值化学品两大主题, 前者主要目的在于开发超强耐用型混凝土生产技术, 后者主要研发以甲烷为原料生产高价值化学品技术。其“新计划领域主题征集”资助机会最新一轮招标将资助 1800 万美元用于变革性能源技术的早期研发, 聚焦下一代核能技术、井下地热勘探高温传感器、超耐久性混凝土和胶凝材料三大主题领域的潜在颠覆性技术。

**哥伦比亚大学的 Yuan Yang 教授带领的联合团队设计开发了一种锯齿形的柔性锂电池, 可折叠超万次并具备高能量密度, 为开发优异的柔性电池提供了全新策略:** 研究团队在折纸的启发下, 制备了一定数量具有传统的石墨负极/隔膜/钴酸锂 (LCO) 正极堆垛结构的完整电池模块, 将各个电池模块按照一定间隙排列成长条状, 中间间隙 (长度为 3 mm) 作为折叠关节, 并采用胶带薄膜保护折叠关节区域, 使其具备出色的可折叠性, 且能量密度可达传统电池的 96.4%, 在承受 45000 余次的连续折叠操作后仍可保持稳定电池容量。

### IEA：未来五年全球煤炭需求仍将保持稳定

12月18日，国际能源署（IEA）发布《煤炭 2018：至 2023 年的分析和预测》中期市场报告<sup>1</sup>指出，尽管面临气候政策、煤炭撤资和清洁能源崛起的挑战，2017 年全球煤炭需求依旧逆势上涨了 1%，主要原因是全球经济强劲增长导致需求旺盛。尽管欧洲和北美地区煤炭需求会有所下降，但印度和东南亚新兴经济体需求依旧旺盛，因此预计未来五年（2018-2023 年）煤炭需求仍将保持稳定。报告总结了近期煤炭市场趋势，并对未来五年全球煤炭市场供需变化、贸易和价格走势进行了分析预测。报告要点如下：

#### 1、全球煤炭需求将保持稳定

**煤炭需求在 2017 年恢复增长。**在经历连续两年下降后，全球煤炭需求于 2017 年恢复增长，达到 75.85 亿吨，同比增幅 1%，主要原因是全球经济强劲增长增加了工业生产和用电量。全球燃煤发电量增加 250 TWh 以上（同比增幅约 3%），占全球新增发电量的近 40%。在中国和印度燃煤发电推动下，2018 年煤炭需求将再次增长。

**煤炭市场趋势仍不利于变革。**越来越多的国家将取消燃煤发电作为一项关键的气候政策，但另一些国家认为煤炭资源丰富且经济可负担，将其视为首选电力来源。例如在印度，经济快速发展推动发电量和钢产量持续增长，促使煤炭需求增长，预计到 2023 年该国煤炭需求量将增加 1.46 亿吨。

**全球煤炭需求将稳定持续至 2023 年。**未来五年全球煤炭需求将保持稳定，欧洲和美国的需求下降将被印度和其他亚洲国家的增长抵消。由于大力发展煤转气和可再生能源，中国煤炭需求将逐渐下降。受到可再生能源和天然气的增长影响，煤炭在全球能源结构中的占比将从 27% 下降至 25%。

#### 2、煤炭市场供应紧张将推动煤炭价格上涨

**供应趋紧推高煤炭价格。**煤炭贸易在 2017 年出现反弹，中国煤炭进口量增长 1500 万吨，其他煤炭大型进口国，如巴西、台湾、韩国、马来西亚、墨西哥等，煤炭进口量也创下历史新高，而智利、日本和泰国进口量也接近其历史高位，仅有欧洲市场发生萎缩。伴随中国和印度煤炭需求在 2018 年进一步增长，全球动力煤海运贸易量接近 10 亿吨。旺盛的需求导致全球煤炭供应趋紧，从而推动价格上涨。

**价格上涨但并未引发新的投资。**近两年煤炭价格的持续上涨使煤炭生产商累积了大量的现金资产，其中一些额外收入被用于购买生产设施或扩大现有业务，并未用于投资新建煤矿。气候政策、资产搁浅的潜在风险、当地的反对以及上次经济衰退的教训降低了投资者对新煤矿的投资欲望。发达经济体的银行、保险公司、对冲

<sup>1</sup> Market Report Series: Coal 2018. <https://webstore.iea.org/market-report-series-coal-2018>

基金、公用事业和其他运营商正在退出煤炭业务。当前全球反对煤炭项目的信号日益强烈，极大地削弱了煤炭投资者的投资热情。

### **3、东西欧煤炭需求截然不同**

**西欧正加速淘汰煤炭。**欧盟 28 国正采取三方面的政策行动来抑制煤炭需求：①气候变化行动，包括采用碳排放交易体系；②空气污染防治行动；③燃煤发电淘汰行动。随着可再生能源的扩张，风能和太阳能竞争力日益凸显，上述政策最终将会使西欧的电力结构中淘汰掉煤炭。到 2023 年，法国和瑞典将关闭其最后的燃煤电厂，德国将成为西欧唯一的煤炭主要消费国。

**东欧煤炭需求保持稳定。**东欧地区大多数国家尚未宣布煤炭淘汰政策，巴尔干半岛、希腊和波兰正在新建少量新型燃煤电厂，这些新电厂将取代老化和效率较低的煤电机组，因此预计煤炭需求不会增加。东欧一些国家是世界上少数几个以褐煤发电为主的国家。

### **4、中国实施蓝天保卫战行动计划**

**中国燃煤发电消耗的煤炭占世界煤炭消耗总量的 1/4。**因此，煤炭需求的未来走势很大程度上取决于中国。2016 年以来中国用电需求反弹导致全球煤炭消费增长，此外，交通和供暖电气化、以及日益壮大的中国中产阶级将导致电力消费增加。但中国经济处于结构转型期，电力强度将逐渐下降，因此预计到 2020 年其燃煤发电将停止增长。

**“打赢蓝天保卫战”仍然是中国的优先政策。**中国的环境政策，特别是气候政策有效地限制了煤炭需求增长。政策的主要目标是减少住宅供暖以及工商业部门直接使用煤炭，并淘汰小型锅炉。水泥、钢铁和小型燃煤发电厂也是中国气候政策主要目标。政策优先支持可再生能源发电，以及天然气在供暖和工业中的应用。虽然煤炭的清洁利用是该战略的另一个重要方面，但目前只有煤炭转化（煤制油、煤制气和煤制化学品）领域的煤炭消费出现显著增长。由此判断，中国的煤炭需求已经进入缓慢的结构性下降阶段，年均降幅预计不到 1%。

### **5、印度、东亚和东南亚是推动煤炭需求增长的主要力量**

**印度煤电史无前例的增长态势仍将持续。**1974 年以来，印度燃煤发电量不断增长。预计到 2023 年印度经济年均增幅将在 8% 以上，从而持续推进电气化进程，在此期间电力需求预计将以每年 5% 的速度增长。可再生能源大规模发展以及在新建电厂使用超临界发电技术将减缓煤炭需求增速，到 2023 年煤炭需求年均增速将不到 4%。此外，经济增长和基础设施建设将增加钢铁和水泥生产的煤炭消耗。

**南亚和东南亚是煤炭需求增长的第二大驱动力。**印尼、巴基斯坦、孟加拉、菲律宾和越南的人口总数超过 8 亿，人均年用电量超过 800 千瓦时，这些国家为满足电力需求而新建的煤电厂将导致煤炭需求增长。其他人均用电量较高的国家（如马

来西亚和阿联酋)，其能源结构多元化政策支持使燃煤电厂数量增加。到 2023 年，东南亚的煤炭需求增长最快（每年超过 5%），印度煤炭需求增量最大（近 1.5 亿吨）。

## 6、中国仍是煤炭贸易的“变数”

印度、韩国，尤其中国是煤炭贸易的关键。煤炭进口未来走势依旧深受东南亚和南亚市场影响。尽管印度的煤炭生产和运输能力有所增强，但其进口量不会减少。预计韩国、越南、马来西亚、菲律宾、巴基斯坦和其他国家进口量也将增长，欧洲进口量将逐渐减少。总体而言，煤炭贸易很大程度上依赖于中国市场，其庞大市场规模和不断变化的政策将会短时间内改变进口走势。沿海地区的国内价格和进口价格不仅与套利有关，还与进口配额、港口上限、税收和质检等政策有关。

澳大利亚恢复了其煤炭出口的领导地位，印尼紧随其后。印尼国内需求增加和煤炭价格下降将导致印尼煤炭出口下降，使澳大利亚成为世界上最大的煤炭出口国。但如果价格上涨，则情况有可能发生变化。俄罗斯正在大力建设煤炭出口基础设施并将亚洲市场作为主要目标，因此预计俄罗斯出口量将增加。丰富廉价的天然气和可再生能源的增长将继续挤压美国国内煤电，其煤炭出口将取决于国际市场的价格。

## 7、煤炭是最具争议的燃料

一个星球，两个世界。2015 年起煤炭消费重心持续向亚洲转移，出现了两种截然相反的煤炭世界：使用煤炭发电和不使用煤炭发电，导致很难达成削减用煤和减排协议。英国和加拿大发动 20 多个国家和地区联合成立“弃用煤炭发电联盟”（Powering Past Coal Alliance），承诺在 2030 年前淘汰燃煤发电。如今，加入该联盟的国家发电消耗的煤炭量在全球煤炭消费总量中的占比不到 2%。然而，其他许多国家考虑到煤炭的经济性，并未计划终结煤电。

碳捕集、利用和封存（CCUS）是燃煤发电国家实现低碳减排目标的关键技术。如果要长期继续使用煤炭，并同时满足巴黎协定目标，必须将 CCUS 纳入投资组合。虽然 2018 年在政策和项目方面有一些好消息，但在部署 CCUS 方面的进展仍远远落后于能源未来可持续发展的要求。

（岳芳 郭楷模）

## 欧盟发布专题报告评估电池原材料供应安全问题

11 月 22 日，欧盟委员会发布《电池应用原材料报告》<sup>2</sup>，对钴、锂、石墨和镍四种主要电池原材料的供应现状和风险进行了详细探讨，指出了欧盟电池原材料供应面临的挑战和瓶颈，建议加大欧盟境内原材料资源开采力度，加强原材料回收再利用，拓展原材料资源，以降低原材料供应风险，增强欧盟电池制造竞争力。报告主要内容如下：

<sup>2</sup> Report on Raw Materials for Battery Applications.  
<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/3rd-mobility-pack/swd20180245.pdf>

## 1、欧盟主要电池原材料供应现状

锂离子电池代表了电动汽车和储能的核心技术，未来几年仍将是欧盟首选，其主要原材料（钴、锂、石墨和镍）生产高度集中。四种主要原材料大多由中国、刚果（金）、南非和智利供应，全球 69%的天然石墨产自中国，64%的钴由刚果（金）供应。

中国正占据并扩大锂离子电池原材料供应的主导地位。中国是天然石墨和金属硅的最主要生产国，并逐步扩大对钴的开采和精炼，且拥有世界上大部分锂精炼设备。

欧盟电池原材料主要依赖进口。天然石墨主要从中国进口，锂主要从智利进口，钴主要依靠芬兰生产（66%）和从俄罗斯进口，完全依靠欧盟境内资源来满足镍、天然石墨、锰、锂等电池原材料需求的潜力有限。

替代材料技术应用尚不成熟。锂-镍氧化物、锂-锰氧化物和锂-铁磷酸盐等材料可替代钴用于锂电池，但目前其性能均低于含钴电池。

## 2、电池原材料市场走势

**钴：**主要受到中国需求增长的影响，钴的价格在 2008 年上涨至 80 欧元/公斤（120 美元/公斤）的顶峰，在 2009-2016 年急剧下降之后，又在过去两年中翻了两番，并在 2018 年再次达到 80 欧元/公斤（90 美元/公斤）左右。

**锂：**自 2015 年以来，碳酸锂价格从 2011-2015 年的均价 6222 美元/吨上涨 14%，达到 2015-2016 年的均价 7091 美元/吨。

**镍：**20 世纪全球供需形势影响了镍的价格，其产量和价格总体保持上涨态势，加拿大的罢工导致几次价格高峰。2011-2015 年伦敦金属交易所的原生镍（>99.8%）均价为 16828 美元/吨。

**天然石墨：**片状石墨价格在维持多年稳定后于 2005 年逐渐上涨，在 2009 年全球金融危机后下降。由于中国钢铁行业的强劲需求，2011-2012 年片状石墨价格飙升，随后由于产能过剩和钢铁行业需求下降，回归至 2008 年水平。用于锂离子电池的无涂层球形石墨目前价格约为 3000 美元/吨，涂层球形石墨的价格高于 7000 美元/吨。

## 3、电池原材料供应情况

**勘探、资源和储量：**欧盟矿产勘探活动主要集中在葡萄牙、芬兰、瑞典和中欧地区，除了四种电池原材料外，黄金、铜和锌也是主要目标商品。欧盟目前已探明钴资源主要分布在芬兰、德国、挪威和瑞典。全球锂资源量有 5300 多万吨，储量达 1600 万吨，其中约一半位于南美洲，欧盟锂资源量约为 40 万吨金属锂当量（LMF），储量为 1.3 万吨 LMF。

欧盟矿产资源数据缺乏统一标准，数据整合较为困难。欧盟资助的 Minerals4EU 项目是唯一的矿产资源量和储量数据库，但是缺乏一致性和可比性，应在欧盟各国

实行联合国资源框架分类（UNFC）标准以建立统一的数据库。

**开采：**钴主要作为镍或铜开采的副产物，刚果（金）是最大生产国，欧盟仅有芬兰开采钴，占全球产量的 1%，欧盟每年从俄罗斯进口 640 吨钴。全球锂产品市场供应量约为 20 万吨碳酸锂当量（LCE），其中近 83%由四家生产商供应：美国 Albemarle、智利 SQM、美国 FMC 和中国四川天齐。葡萄牙每年开采约 350 吨锂矿石，欧盟每年进口约 3600 吨锂。过去五年，低品质镍产品的生产和投资大幅增长，但仅有不到 10%的镍以硫酸盐形式（用于锂离子电池正极）产出，北美、澳大利亚、中国、俄罗斯和格陵兰岛均生产高品质硫化镍，欧盟仅有芬兰、希腊和西班牙小规模开采镍矿石。2010 至 2014 年期间，石墨矿石（精矿）年平均产量约为 110 万吨，中国的片状石墨和无定形石墨产量占全球产量近 70%。欧盟仅有德国和奥地利生产石墨，产量仅占全球的 0.05%。

**加工和冶金：**2010 至 2014 年间，世界精炼钴年平均产量约为 8.34 万吨，中国是精炼钴的主要生产国。欧盟精炼钴主要依靠内部生产和从 17 个国家进口钴矿石，其主要生产国为芬兰（占全球产量 13%）、比利时（5%）和法国（<1%）。2010 年至 2014 年间，欧盟年平均进口的锂化合物约含有 3600 吨锂金属，葡萄牙和西班牙年生产约 600 吨锂化合物，不用于出口。2010 至 2014 年间全球镍金属年平均产量为 175 万吨，中国是精炼镍的最大生产国。欧盟的芬兰、法国和英国生产精炼镍。中国生产全世界 70%的天然石墨，其中 70%是无定形石墨、30%是片状石墨。

**材料回收与循环经济：**目前，汽车铅酸蓄电池回收率远高于其他电池。但欧盟大量汽车被作为二手车出口，市场上的电动汽车尚未达到报废年限，因此限制了电池回收总量。锂离子电池回收的最主要材料是钴，在电动汽车领域其回收潜力很大。2018 年 5 月，欧盟在“地平线 2020”框架计划下启动了一项名为 CROCODILE 的原材料创新行动项目，其预算近 1500 万欧元，将开发基于先进的火法、湿法、生物、离子和电冶金技术的创新冶金系统，用于欧洲钴的回收以及钴金属和上游产品的生产，将满足欧盟工业总需求量的 65%。欧盟已经资助了一些电动汽车电池再利用的项目，如电池 2020、本地储能先进系统（ELSA）、ABattReLife 和 Netfficient 等，下一步计划应考虑循环经济的整个价值链。此外，欧盟还资助了一些电池及其材料回收的工业和研究计划，ProSUM 项目建立的 Urban 矿山平台可收集电池的库存和流通量数据，以便更好地评估将废电池作为替代来源获取二次原材料的潜力。

#### 4、欧盟政策和监管框架

**原材料政策：**欧盟原材料政策旨在确保其原材料供应安全，主要基于全球市场采购、内部生产和回收再利用三个方面。2017 年 9 月，欧盟委员会通过了一项新的欧盟工业政策战略，强调原材料对欧盟经济所有工业价值链的重要性，一些欧盟成员国和地区更新了其原材料政策。

**电池指令：**该指令规定欧盟成员国和工业运营商有义务最大限度地回收废电池和蓄电池，并确保所有电池都经过适当处理。为了实现废电池的高水平回收，该指令确定了回收目标，欧盟已有 15 个成员国达到了废旧电池回收的既定目标（45%）。

**立法框架：**欧盟国家通常通过采矿法对采矿进行管理；环境影响评估（EIA）指令对可能产生重大环境影响的公共和私人项目进行评估；土地规划政策决定了矿物开采许可；通过税收政策和特许权吸引投资。

**开采许可：**将开采许可流程与环境影响评估相结合对建立良好的投资环境至关重要，授权流程过于复杂可能增加采矿项目风险。

最后，报告根据“欧洲电池战略行动计划”，针对欧盟电池原材料面临的问题，提出三大战略性建议：

**（1）完善电池原材料数据和知识。**应用 UNFC 标准，建立完善统一的电池原材料相关数据库，为原材料供应决策提供可靠信息。

**（2）促进欧盟电池原材料生产和回收。**电池原材料在欧盟本土生产面临的主要障碍包括：缺乏发现更深层矿床所需的地质数据；土地利用规划和采矿的整合不力使得难以对已探明矿床进行开采；欧盟复杂多样的监管要求；公众对原材料的认识不足，对生产经营的接受程度较低。应克服上述障碍，加大欧盟境内原材料开采和生产，并大力促进电池原材料回收。

**（3）确保在全球市场获取电池原材料。**欧盟部分电池关键原材料供应商高度集中在几个国家，应利用外交和贸易等手段扩展进口来源，确保从第三国可持续和公平地获取原材料。

（岳芳 郭楷模）

## 美国会核能创新和现代化法案助力先进核能开发和商业化

12 月 20 日，美国国会正式通过《核能创新和现代化法案》<sup>3</sup>（以下简称“法案”），旨在发展先进反应堆创新和商业化所需的专业知识和管理流程，在美国核管理委员会（NRC）的预算和收费项目中建立透明度和问责措施，以及改善铀资源利用率和监管效率，从而为美国下一代先进反应堆的开发和商业化提供良好的政策环境，促进先进反应堆发展。关键要点如下：

### 1、建立 NRC 预算和收费的透明度与问责机制

法案要求，从 2021 年开始，NRC 每年需向国会提交年度预算理由，明确提出完成 NRC 活动所需的预期支出。此外，2020-2030 年期间，与发展先进核反应堆技术的监管基础设施相关的费用将不计入 NRC 的收费项目。并且，NRC 需在 2029 年 12 月 31 日前提交是否有必要继续获得该项经费的意见报告。法案还规定，NRC 需

<sup>3</sup> Nuclear Energy Innovation and Modernization Act. <https://www.congress.gov/115/bills/s512/BILLS-115s512enr.pdf>

在法案颁布 180 天内，为其许可相关活动制定绩效指标和阶段性时间表，并在相应时间发布最终安全评估，如在规定日期后 180 天内未能发布，则需提交延迟说明报告。

**2、制定商用先进核反应堆许可的监管框架，确保更安全、有效的许可。** NRC 需在法案颁布后 270 天内，制定和实施商用先进反应堆阶段性许可流程。在法案颁布两年内，NRC 应制定和实施风险许可策略，促进在商用先进反应堆许可过程中使用基于风险评估和性能评估的技术。同时，在两年时间内，NRC 还必须制定和实施研究堆和试验堆的许可策略。在 2027 年 12 月 31 日前，NRC 应建立一个技术包容性监管框架，作为商用先进核反应堆许可的可选途径。NRC 还必须完成员工培训或聘请专家，以确保相关工作人员具备完成上述任务所需的专业知识。2020-2024 年期间，NRC 每财年将获得 1442 万美元拨款用于执行上述任务，该法案还要求 NRC 向国会提交相应的进展报告。

### **3、其他修订和报告提交**

•**修订围板螺栓指南。**法案颁布后 90 天内，NRC 需修订压水堆围板螺栓的基准检查计划及检查频率，并就修订情况向国会提交报告。

•**提交撤离行动报告。**法案颁布后 180 天内，NRC 需向国会提交说明，基于事故（“9.11 事件”、飓风桑迪、福岛事故以及其他近期自然灾害）后人口密集城市和郊区的定向或自发撤离的经验教训，已经采取或计划采取的所有行动。

•**鼓励对研究堆和试验堆的私人投资。**法案修订了现行的《原子能法》，许可研究堆和试验堆的所有人可通过提供服务和/或出售能源，收回不超过 75% 的年成本，以鼓励私人投资。

•**提交事故容错燃料报告。**法案颁布起一年内，NRC 应向国会提交一份报告，说明事故容错燃料（使现有商用核反应堆能够增强抵御核事故的能力并降低发电成本的一种新技术）许可流程的情况。

•**确定建立和运行地方社区咨询委员会的最佳行动。**法案颁布起 18 个月内，NRC 需提交并公布一份报告，确定建立和运行地方咨询委员会的最佳行动，以促进计划退役的被许可方和可能受影响的社区成员之间的沟通和信息交流。

### **4、提高铀资源利用率和监管效率**

•**提交铀回收许可流程相关报告。**法案颁布后 90 天内，NRC 需向国会提交报告，说明铀回收许可证发放和修订审查的期限，以及提高铀回收许可证颁发和修订审查效率和透明度的建议。

•**铀回收费用试点方案。**法案颁布后一年内，NRC 需完成自愿试点计划，确定铀回收例行许可的固定收费方案的可行性，并向国会提交总结报告。

（郭楷模 岳芳）

## 项目计划

### ARPA-E 资助 3900 万美元支持创新能源技术研发

近日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）分别发布资助公告和招标公告，共投入 3900 万美元支持创新能源技术研发。在 12 月 19 日发布的资助公告中，ARPA-E 宣布了其“OPEN+”开放式招标群组资助子计划<sup>4</sup>的第二、第三批 7 个资助项目<sup>5</sup>，共投入 2100 万美元资金，主要聚焦混凝土高效低能耗新制造工艺和甲烷生产高价值化学品两大主题，前者主要目的在于开发超强耐用型混凝土生产技术，后者主要研发以甲烷为原料生产高价值化学品技术。具体内容参见表 1。

表 1 “OPEN+”群组子计划第二、三批资助项目具体内容

主题	具体内容	资助金额/ 万美元
混凝土高效低能耗制造工艺	<ul style="list-style-type: none"><li>•开发连续玄武岩纤维（CBF）的节能制造工艺，实现高质量 CBF 大规模、低成本生产。CBF 可代替建筑用钢筋支撑混凝土，降低成本、延长寿命</li><li>•利用具有微结构的微生物进行 CO<sub>2</sub> 固化处理，进而开发碳酸盐水泥混凝土（C3）新制造工艺，以替代普通硅酸盐水泥混凝土（OPCC），增强材料寿命</li><li>•开发一种以硅酸钙矿物假硅灰石为原料来制造水泥的新方法，以减少成本和能耗</li></ul>	612
甲烷生产高价值化学品	<ul style="list-style-type: none"><li>•开发以天然气为原料制造碳纳米管纤维，用于替代汽车行业的金属材料，减少车身重量，提升燃油经济性，减少能耗和排放</li><li>•开发将天然气转化为高价值碳材料并同时生产氢气的工业方法</li><li>•扩大一种天然气产氢和固碳且不消耗水的新工艺的生产规模，其预期成本将与最先进的商业技术成本相当</li><li>•开发一种甲烷制氢的新型高通量反应器，通过熔融金属喷雾反应器实现低成本产氢和固碳</li></ul>	1488

12 月 20 日，ARPA-E 发布“新计划领域主题征集”资助机会的新一轮招标公告，计划资助 1800 万美元支持变革性能源技术的早期研发<sup>6</sup>，旨在开展下一代核能技术、井下地热勘探高温传感器、超耐久性混凝土和胶凝材料三大主题的潜在颠覆性技术研究。具体内容参见表 2。

<sup>4</sup> 详情参见本刊 2018 年度第 24 期内容。

<sup>5</sup> ARPA-E ANNOUNCES \$21 MILLION FOR SECOND, THIRD OPEN+ COHORTS.

<https://www.arpa-e.energy.gov/?q=news-item/arpa-e-announces-21-million-second-third-open-cohorts>

<sup>6</sup> Department of Energy Announces \$18 Million for Transformative Energy Technologies.

<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-18-million-transformative-energy-technologies>

表 2 先进变革性能源技术三大主题研究

主题领域	主要技术领域
下一代核能技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>•通过传感器、数据分析、机器人、高级控制技术，减少或取消人工定期监测和维护，并提前纠正异常状况</li> <li>•高性能调节器用于气冷堆以提高功率密度</li> <li>•超高温 (&gt;1500°C) 反应堆先进能量转换系统</li> <li>•通过先进控制系统、反应堆反馈管理、能够储存热量确保可变输出的系统等实现灵活电力生产</li> <li>•快速、低成本的先进施工技术</li> </ul>
井下地热勘探 高温传感器	<p>开发井下地热勘探用的高温传感工具，包括：①光纤传感器，如分布式声学传感器 (DAS)、分布式温度传感器 (DTS)、分布式应变传感器 (DSS)；②测量地质流体热焓的传感器，尤其是实时测量流量、温度、蒸汽分数和压力的设备，以及开发多功能（如可以同时测量应变和流量）集成传感器</p>
超耐久性混凝土和胶凝材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>•材料和混合物：①通过对高耐久性胶凝材料和混凝土混合物分子设计优化，显著减少或消除微裂纹，提高延展性，实现自修复，降低渗透性，缩短凝固时间，提高韧性和耐久性；②保持或提高耐久性的同时引入增材制造技术改善制造工艺</li> <li>•先进工艺：①先进混合和/或预混系统以扩大专用混合物的生产规模；②高耐久性材料低温加工工艺；③混合物设计和最终结构均匀性的实现和/或验证新方法；④制造和/或施工的新方法，以缩短凝固时间，提高混凝土韧性和耐久性；⑤实现大尺寸结构 (&gt;125m<sup>3</sup>) 增材制造的技术，如系统控制、精确材料输送、现场混合或配制</li> <li>•模拟、测试、传感和维护：①开发结构-过程-属性预测模型，以确定退化路径，更精确评估混合物，确定最佳修复时间和材料；②混凝土和水泥材料的加速耐久性试验；③用于监测混凝土结构的先进无损探测和传感技术；④显著延长现有混凝土结构使用寿命的新型修复方法</li> </ul>

(岳芳 郭楷模)

## DOE 公布 2019 财年第一阶段第二批小企业研发创新资助计划

12月18日，美国能源部 (DOE) 公布了 2019 财年第一阶段第二批<sup>7</sup>“小企业创新研究与技术转让 (SBIR/STTR)” 资助计划<sup>8</sup>，即向选中的中小企业资助 3700 万美元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

<sup>7</sup> 2019 财年第一阶段第一批资助详情参见本刊 2018 年度第 17 期内容。

<sup>8</sup> Department of Energy Issues Small Business Innovation Research and Small Business Technology Transfer Funding Opportunity Announcement.  
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-issues-small-business-innovation-research-and-small-business-technology>

财年第二阶段资金申请资格,进行原型或工艺研发,第二阶段资助期限最长为2年。本次资助的研究具体内容参见表1。

表2 小企业研发创新项目具体研究内容

主题	研究内容
能源安全和应急响应	•能源系统网络安全:①应急运行期间的电网安全;②电力系统设置的安全性和应急响应
国防核不扩散研究	•先进样品微量分析识别技术:①应用机器视觉技术将分析成像平台与光学显微镜相结合;②分散样品的颗粒操纵和去除 •远程检测技术:①新型高光谱成像传感器;②小型传感器套件;③去除植被工具;④植物生物指示剂 •替代辐射源技术:①用于核安全的紧凑型回旋加速器;②用于工业射线照相的非放射性同位素技术;③非放射性同位素辐照技术实现无菌昆虫技术
电力	•先进电网运行技术:①电网区块链技术;②先进继电保护技术及工具 •先进电网储能技术:①极端天气事件期间和之后的能源保障电池系统;②电网储能系统的先进电路拓扑
能效及可再生能源研究	•先进制造:①制造业网络安全;②原子级精度的气体分离技术;③将 Covetic 纳米材料 <sup>9</sup> 用于生产关键材料和战略材料;④电子垃圾的电化学回收 •生物质能:①无细胞生物合成技术提升生物质碳转化效率;②碳循环经济中的塑料设计及降解;③藻类工程孵化器 •建筑物:①下一代住宅空气处理机;②用于固态照明的新型材料和工艺;③商业建筑中传感器、执行器和控制器的自动点映射;④建筑能源建模;⑤建筑技术项目的数据融合 •燃料电池:①燃料电池薄膜和离子聚合物;②高压、低温气体喷嘴;③低成本薄膜氢气传感器;④燃料电池汽车车载储氢压力容器结构健康监测的智能传感器;⑤氢气转化为液态烃燃料的创新概念 •地热能:改进的地下钻探井下遥测技术 •太阳能:①光伏系统中的实时串联电阻监测;②光伏模块污垢检测器;③存储技术实现低成本分布式太阳能光伏发电;④优化设计和运行以提高太阳能光伏发电在极端事件中的恢复能力;⑤用于农村的太阳能发电装置;⑥太阳能发电并网的经济可靠解决方案 •汽车:①电动汽车电池;②适用于电动汽车超快速充电的碳化硅器件;③减少内燃机的热损耗和摩擦损失;④燃料和发动机优化;⑤提高车用铸造部件的性能并减轻重量;⑥车用低成本、轻质、高性能纤维增强复合材料 •海洋能:①利用海洋水动力学和抽水蓄能电站提高偏远社区微电网灵活性;②海洋能储能系统;③海洋能为抽水和气体压缩提供动力;④利用海洋能从海洋中提取高价值矿物资源 •风能:①协调安全的分布式风能系统控制和通信技术;②利用远程诊断技术降低海上风电运行、维护和维修成本,提高系统可靠性;③风力发电机叶片回收 •交叉领域:①创新太阳能模块制造工艺和技术;②地热能海水淡化和关键材料

<sup>9</sup> Covetic 纳米材料:通过液态金属电转换处理产生的含有石墨烯条带网络和纳米颗粒的金属,比传统金属的导热和导电性能更好,且更不易氧化,并能实现低成本规模化生产。

	回收系统；③将其他能源用于海水淡化和关键材料回收系统；④用于检测和去除氢气中杂质的先进材料
环境管理	•创新地下监测技术：老化关键基础设施的泄漏检测与远程检测无损评估
化石能源	•碳封存技术：①大容量地下监测数据处理和简化；②深层地下监测的遥测系统；③深层地下储层监测的纳米传感器；④等离子技术用于二氧化碳利用 •稀土元素和关键矿物：①稀土元素生产 •石油和天然气：捕获天然气并将其转化为有价值产品以减少燃烧的技术
聚变能科学	•聚变能系统的先进技术和材料：①面对等离子体部件；②包层和安全技术；③超导磁体和材料；④结构材料和涂料 •聚变科学与技术：①诊断技术；②聚变等离子体的加热和燃料元件；③磁约束等离子体的模拟和数据分析工具；④聚变科学验证平台的组件和建模 •高能量密度等离子体与惯性聚变能：①驱动技术；②超快诊断；③高强度短脉冲激光技术
高能物理研究	•粒子加速器的先进理念和技术：①用于增材制造的金属粉末；②改进的加速器建模和控制系统软件；③高梯度加速器研究与开发；④高电流阴极；⑤用于靶材的高发射率涂层；⑥用于高动态孔径晶格的非线性磁体；⑦用于高强度强子同步加速器的新型束流光学 •射频加速器技术：①加速器低成本射频电源；②高效率高平均功率射频源 •加速器激光技术研发：①降低超快光纤激光器件的成本；②多光纤激光器的载波包络锁相的新型可扩展技术；③陶瓷基光学材料；④高性能衍射光栅；⑤基于计算机建模的高功率飞秒激光器涂层研制；⑥高功率超快激光器的高效空间整形与控制 •粒子加速器超导技术：①磁体用高场超导线缆技术；②超导磁体技术；③超导射频腔；④低温和制冷系统 •用于数据采集和处理的高速电子仪器：①用于高能对撞机探测器的抗辐照互补金属氧化物半导体传感器；②用于高能对撞机的粒子探测器的衬底；③互补金属氧化物半导体传感器和电荷耦合图像传感器连接点后处理技术；④高能物理暗物质探测器的专用晶圆和传感器；⑤高密度芯片互连技术；⑥高能对撞机探测器的抗辐照高带宽数据传输；⑦用于高能对撞机探测器的实时大规模并行触发处理器；⑧用于宇宙微波背景探测器的数据采集系统；⑨皮秒定时电子工具 •高能物理探测器和仪器：①低成本、高性能的可见/紫外光子探测器；②大型低温探测器技术；③低温测辐射热计阵列技术；④超低质量、高速率带电粒子跟踪；⑤闪烁探测器材料和波长移位器；⑥超低背景探测器和材料；⑦高级复合材料；⑧增材制造 •量子信息科学技术：①量子信息系统超导射频腔形状设计；②量子信息系统可扩展三维超导射频结构制造技术优化；③量子信息系统低温技术研发；④光学向微波传输量子信息的光电探测器
核能	•先进核能技术：①先进传感器和仪器；②先进核反应堆燃料制造和表征技术；③燃料循环的材料保护与控制；④先进模型与模拟；⑤电厂现代化；⑥材料研发；⑦核电系统的能量转化系统部件开发；⑧先进制造方法；⑨核能系统网络安全技术 •核废料先进技术：①乏燃料和废料处置技术；②乏燃料和废料储存与输送技术

(岳芳)

### 锯齿形可折叠电池展现超万次折叠柔韧性和高能量密度

柔性可穿戴电子产品在医疗保健和传感设备有着广阔的应用前景。然而缺乏匹配的柔性电池成为制约该产品大规模商业化的一大瓶颈。哥伦比亚大学 Yuan Yang 教授带领的联合团队在折纸的启发下，设计开发了一种锯齿形的柔性锂电池，其能量密度可达传统电池的 96.4%，且在承受 45000 余次的连续折叠操作后仍可保持稳定电池容量，展现出超高的柔韧性和能量密度，为开发优异的柔性电池提供了全新策略。研究人员制备了一定数量具有传统的石墨负极/隔膜/钴酸锂（LCO）正极堆垛结构的完整电池模块，然后将各个电池模块按照一定间隙排列成长条状，中间间隙（长度为 3 mm）作为折叠关节。为了确保电池在运行过程中能够经受大的形变，研究人员采用胶带保护薄膜按照一上一下的顺序将间隙（以及两侧）中的电池金属箔覆盖形成锯齿形条状电池，保护膜仅用于折叠关节区域，占面积的 4% 以下，基本不影响能量密度。储存能量的功能主要由交替条状电池承担，保护膜覆盖的间隙主要用作折叠关节，负责应对折叠形变。这样的装配策略不仅允许出色的可折叠性（间隙关节具有柔韧性接头），并且能够获得高能量密度（因为两个条状电池之间的间隙在折叠时接近零），而且制造过程简单且易于放大生产，因此整个电池的完整性得到了很好的维护。随后通过有限元计算来评估折叠关节处抗形变能力，结果显示由于受到胶带保护膜的覆盖，折叠关节可以承受 180° 剪切变形，由于主要形变都由折叠关节承受，使得条状电池金属箔在折叠过程中基本不发生形变，其最大应变仅为 0.5%。因此，覆盖折叠接头两侧的胶带能够在连续折叠时提高电池的机械柔韧性。随后对该电池进行充放电循环和机械疲劳测试：未折叠处理前电池能量密度可达 275 Wh/L，为传统电池的 96.4%。此外，即使在 0.5C（1 C = 145 mAh/g）倍率下不同力学变形（130°、180° 折叠角）100 次循环，可折叠电池仍可保持 96% 的初始容量，平均库仑效率高达 99.9%。更重要的是，该柔性电池组可以承受极端的连续折叠操作（130° 折叠角度下连续折叠 45000 次）后，仍可保持 124.2 mAh/g 稳定容量，展现出超强的机械柔韧性。最后研究人员将该锯齿电池用来给 LED 灯供电，发现弯曲电池到 130°，LED 的亮度没有发生变化，即折叠操作对电池性能基本没有影响。该项研究研发出一种具有锯齿状结构的柔性可折叠电池，具备了极高的能量密度为 275 Wh/L，达到传统非折叠电池的 96.4%；且在 130° 折叠角度下连续进行 45000 次折叠后能够保持稳定容量，展现出超强的机械柔韧性和电化学稳定性。为柔性电池的设计提供了新方向。相关研究工作发表在《Advanced Energy Materials》<sup>10</sup>。

（周斌 郭楷模）

<sup>10</sup> Xiangbiao Liao, Changmin Shi, Tianyang Wang, et al. High-Energy-Density Foldable Battery Enabled by Zigzag-Like Design. *Advanced Energy Materials*, 2018, DOI: 10.1002/aenm.201802998

## 低温加工空穴材料助力倒置平面钙钛矿电池效率创纪录

相比于传统的正向结构，低温（ $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ）倒置平面钙钛矿太阳电池具有制备工艺更简单、无迟滞效应、易于制备柔性器件等优点，成为近年来光伏研究领域的热点，但倒置器件转换效率较正向结构低是其面临的主要问题。日本山形大学 Junji Kido 教授研究团队在低温下成功设计合成了一种具有空穴传输性能的有机半导体薄膜 TFB，作为空穴材料应用于以甲胺铅碘（ $\text{MAPbI}_3$ ）为光敏剂的倒置平面结构钙钛矿电池中，获得了高达 20.2% 的稳态效率，是迄今为止基于  $\text{MAPbI}_3$  光敏剂倒置结构钙钛矿太阳电池性能的最高值。研究人员将 TFB 溶解到对二甲苯溶剂中配置 TFB 溶液，随后通过旋涂法将其旋涂于透明导电玻璃 ITO 上，经  $150^{\circ}\text{C}$  退火处理使其结晶，接着通过一步法在 TFB 薄膜上沉积  $\text{MAPbI}_3$  钙钛矿薄膜，最后组装成完整电池器件。为了对比，研究人员同时制备了不含 TFB 空穴薄膜、以及基于传统的 PTAA、PEDOT:PSS 空穴薄膜的电池器件。扫描电镜测试结果显示，含有 TFB 钙钛矿  $\text{MAPbI}_3$  晶粒是四个样品中最大的，意味着其晶界减少从而有效抑制界面复合。稳态光致发光光谱表征发现，含有 TFB 钙钛矿  $\text{MAPbI}_3$  特征吸收峰最低，表明了电子-空穴在 TFB/ $\text{MAPbI}_3$  界面层高效分离同时被 TFB 空穴传输层高效抽取传输至外电路，体现出 TFB 优秀空穴材料的特性。在室温、一个标准模拟太阳光辐照下，含有 TFB 电池器件的平均稳态效率达到了 19.2%，最高值达到 20.2%，远远优于不含 TFB（稳态效率值为 10.2%，最高值 13.4%）、基于 PTAA（13.5%，14.6%）、基于 PEDOT:PSS（13%，13.5%）的三种电池性能，是目前已报道的文献中倒置平面结构钙钛矿太阳电池效率的最优值。为了进一步研究基于 TFB 空穴薄膜电池器件的重现性，研究人员制备了 64 个统一规格的电池样品进行光伏性能测试，实验显示超过 93% 的器件转换效率超过 18.5%，67% 的器件效率超过 19%，表现出良好的重现性。此外，器件的性能老化测试显示，含有 TFB 空穴封装电池器件经过 30 天后仍可保持初始效率的 90%，展现出良好的稳定性。该项研究成功在低温下制备了新型空穴材料，而采用该空穴材料的倒置平面结构钙钛矿电池器件获得了创纪录的转换效率，且具备了优异的重现性和稳定性，为发展低温柔性钙钛矿电池积累了关键技术基础。相关研究成果发表在《*Advanced Functional Materials*》<sup>11</sup>。

（郭楷模）

<sup>11</sup> Daobin Yang, Takeshi Sano, Yuma Yaguchi, et al. Achieving 20% Efficiency for Low-Temperature-Processed Inverted Perovskite Solar Cells. 2018, *Adv. Funct. Mater.*; DOI:10.1002/adfm.201807556

## 传统半导体封装技术设计新型柔性热电发电机

以热电材料为核心的热电转换技术能够将热能直接转换成电能，在转换过程中无噪音和有害物质排放，是一种非常重要的清洁、环保新能源技术。然而传统热电材料（如碲化铋）由于采用刚性结构无法紧密贴合具有复杂几何形状的热源表面（如曲面热源管道、人体表面），且需要高温差，使其在应用领域受到限制。由日本大阪大学 Katsuaki Suganuma 教授领导的联合研究团队开发出一种高热电转化效率、高机械柔韧性、廉价的大面积柔性热电发电机（TEG）模块，其性能达到了传统刚性块体热电材料水平，且能够经历上千次的弯折而性能不衰退，在柔性可穿戴自供电设备领域展现出广阔的应用前景。研究人员利用传统的半导体封装技术首先在刻蚀好图案的廉价聚酰亚胺有机薄膜衬底上沉积一层铜膜，随后沉积金膜作为顶电极，接着按照先前刻蚀好的图案通过热压工艺在金膜上安置 250 个小面积热电转化特性的碲化铋半导体芯片，最后再沉积一层锡银铜合金底电极，组装成一个 5×5 cm 大面积的柔性热电发电机（FlexTEG）模块，并系统开展了热电性能测试。在 50K、85K、105K 不同温度梯度下，大面积柔性 FlexTEG 模块的最大输出电压依次为 1.4V、3.8 V 和 5V，最大输出功率依次为 600 mV、1500 mV、2100 mV。通过计算可知，该 FlexTEG 模块在 105 K 时最大功率输出密度为 158 mW/cm<sup>2</sup>，热电转化效率达 1.84%，这是目前已报道的柔性 TEG 性能的最优值，达到了与商用块体刚性热电材料相当的性能。随后在 150 mm、200 mm 和 250 mm 不同曲率下对制备的 FlexTEG 进行弯折测试，结果显示不论何种曲率经过上千次的弯折后，器件的电阻基本没有变化，表明器件具备了优异的机械柔韧性。该项研究利用半导体封装技术精心设计柔性 TEG，不仅具备了商用块体刚性热电材料相当的性能，且工作温度更低、机械柔韧性更好，为探索高性能新型柔性热电材料提供了新的思路和解决方案。相关研究成果发表在《*Advanced Materials Technologies*》<sup>12</sup>。

（郭楷模）

## 模拟呼吸过程的电催化系统实现高效析氧和氧还原反应

氧电催化反应在许多能量储存/转换装置（如金属-空气电池、燃料电池等）中起着关键的作用，但是氧还原反应（ORR）和析氧反应（OER）缓慢的动力学行为大大限制了这种装置的广泛应用，因此急需发展一种能够用于两个反应的高效催化系统。斯坦福大学 Yi Cui 教授带领的研究团队开发了一种模拟呼吸过程的电催化系统，具备了从催化剂表面双向快速输送气体的功能，即从催化剂表面快速向催化系统内部输送气体和将气体反应物快速输送到催化剂表面的两种方向高效运行，分别

<sup>12</sup> Tohru Sugahara, Yusufu Ekubaru, Ngo Van Nong, et al. Fabrication with Semiconductor Packaging Technologies and Characterization of a Large-Scale Flexible Thermoelectric Module. *Advanced Materials Technologies*, 2018, DOI: 10.1002/admt.201800556

对应于 OER 和 ORR 反应过程。研究人员首先以聚乙烯 (PE) 为原材料设计制备了一个约 12  $\mu\text{m}$  超薄纳米多孔膜的新型电极结构, 大量的孔隙能够为更多催化位点提供充足的三相接触线, 同时又可以为气体扩散提供快速通道, 其厚度仅为传统气体扩散电极的三十分之一, 是良好的气体扩散电极材料。接着利用磁控溅射在多孔 PE 膜表面沉积一层均匀的催化剂涂层, 催化涂层材料分别有金/镍铁氧化物 (Au/NiFeO<sub>x</sub>) 复合物和金/铂 (Au/Pt) 复合物 (其中选择 NiFeO<sub>x</sub> 和 Pt 作为 OER 和 ORR 催化剂, Au 和 Ag 作为导电层), 该催化剂也具备了电荷传输和亲水特性。随后将涂覆有催化剂涂层的 PE 膜卷起并密封形成一个类似肺泡的袋状结构 (即袋子内表面为涂覆催化剂涂层, 外表面没有), 即肺泡状 PE (alv-PE), PE 膜外表面的疏水性能防止水渗透到孔隙中, 从而有效将气体 (内部) 和液体隔离 (外部)。因此, 在 alv-PE 表面上就会形成气固液三相接触线, 能够实现气体分子和电荷快速输送。这种类似肺泡的 PE 膜扩散电极形成了一个水无法穿透但可以双向输送气体的屏障。对于 OER, 在催化剂表面上形成 O<sub>2</sub> 分子, 可以通过 PE 膜快速扩散到肺泡袋内的气相中。对于 ORR, O<sub>2</sub> 通过 PE 膜孔快速扩散到反应三相接触线, 无需预先溶解到大部分电解质中, 从而在两种含氧反应中都具有优异的电催化性能。在 0.6 V、1 摩尔的氢氧化钾溶液中对涂覆不同催化剂的 alv-PE 催化系统进行电催化性能表征, Ag/Pt 催化剂涂覆的 alv-PE 结构, 在 0.6V 时 ORR 电流密度为 -250 mA cm<sup>-2</sup>, 比相同的催化剂负载非肺泡结构的 PE 膜高 25 倍, 并且连续 100 个小时的测试后, 其电流密度依旧稳定在 -250 mA cm<sup>-2</sup>, 表现出良好的化学稳定性。采用 Au/NiFeO<sub>x</sub> 催化剂涂层的 alv-PE 催化系统的 OER 在 10 mA cm<sup>-2</sup> 电流密度下获得了仅为 190 mV 低过电位, 比负载同样催化剂的非肺泡结构 PE 膜过电位低了近 90 mV, 且连续测试 250 小时后, 依旧保持稳定的电流密度, 呈现出优秀的 OER 活性和稳定性。该项研究基于呼吸过程启示, 巧妙设计了具备从催化剂表面双向快速输送气体特性、能够实现 OER 和 ORR 不同功能的肺泡状催化系统, 且具备了优异的催化活性和稳定性, 为设计和开发高效的产氢和析氧催化剂提供了全新思路。相关研究工作发表在《*Joule*》<sup>13</sup>。

(刘竞 郭楷模)

---

<sup>13</sup> Jun Li, Yangying Zhu, Wei Chen, et al. Breathing-Mimicking Electrocatalysis for Oxygen Evolution and Reduction. *Joule*, 2018, DOI:10.1016/j.joule.2018.11.015

## 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

