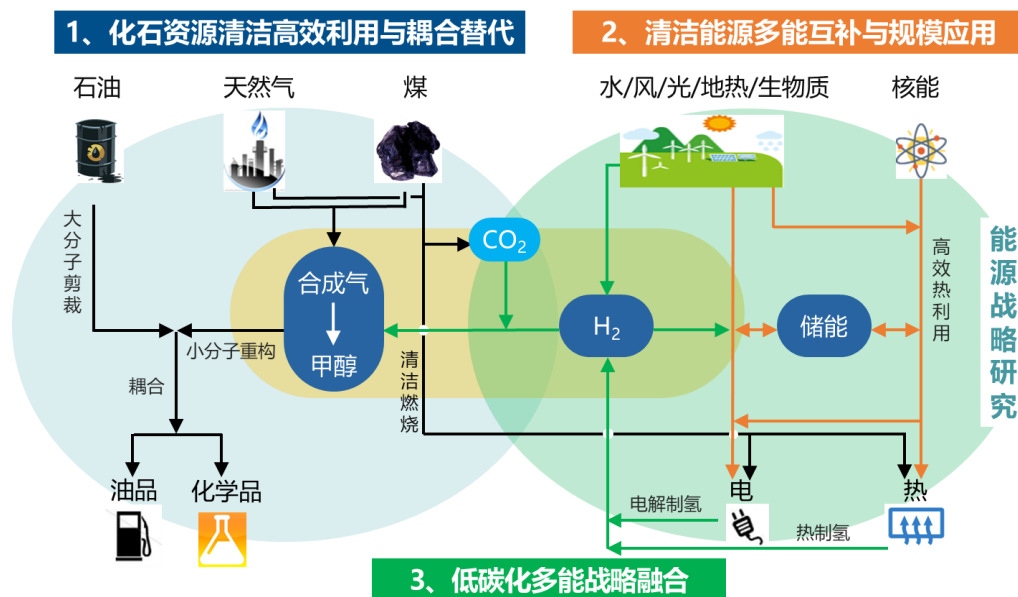




# 洁净能源科技动态监测快报

2021 年第 03 期（总第 17 期）



## 本期看点

- IEA：全球煤炭市场将在 2021 年复苏 中期前景仍不明朗
- 欧盟发布《海上可再生能源战略》明确中长期发展目标
- 美国能源部核能办公室提出 2030 年战略愿景
- ARPA-E 资助 1 亿美元支持变革性清洁能源技术研发
- 欧洲能源研究联盟发布能源数字化战略研究与创新议程
- IRENA 和甲醇协会联合发布可再生甲醇创新展望报告

# 目 录

2021 年第 03 期 (总第 17 期)

## ◆ 化石资源清洁高效利用

- IEA: 全球煤炭市场将在 2021 年复苏 中期前景仍不明朗 ..... 2
- DOE 支持煤炭提取稀土元素及关键矿物技术开发..... 6

## ◆ 清洁能源多能互补

- 欧盟发布《海上可再生能源战略》明确中长期发展目标..... 8
- 美国能源部核能办公室提出 2030 年战略愿景 ..... 11
- ARPA-E 资助 1 亿美元支持变革性清洁能源技术研发..... 13
- 加拿大支持净零排放清洁技术创新 ..... 15
- 天然辣椒素添加剂助力 MAPBI<sub>3</sub> 薄膜平面型钙钛矿电池创效率纪录 ..... 16

## ◆ 低碳化多能融合

- 欧洲能源研究联盟发布能源数字化战略研究与创新议程..... 18
- 日本 NEDO 支持 CO<sub>2</sub> 合成液体燃料一体化生产技术开发 ..... 22
- 英国资助零排放航空氢电替代动力技术开发 ..... 23
- 共轭磺胺类有机正极材料实现锂电池比容量突破 520 WH/KG ..... 24
- 同步辐射 X 射线层析成像技术揭示固态电池界面动态演化..... 25

## ◆ 能源战略研究

- IRENA 和甲醇协会联合发布可再生甲醇创新展望报告..... 27
- IRENA 预测到 2030 年绿氢将具备经济竞争力..... 32

## 本期概要

国际能源署（IEA）发布煤炭中期市场报告《煤炭 2020》，分析了全球煤炭市场供需、成本、价格和项目投资现状及到 2025 年的发展趋势，重点针对短期（到 2021 年）的市场情况进行了预测：（1）受新冠疫情影响，2020 年全球煤炭需求大幅下降 5%，预计 2021 年将增长 2.6%并在 2025 年前保持平稳；（2）天然气价格持续下降使其具备与燃煤发电的竞争能力，已对部分国家的煤炭需求产生明显影响；（3）预计 2021 年全球煤炭产量及交易量均将复苏，但考虑中国和印度政策变化，煤炭交易中后期前景仍不明朗；（4）炼焦煤开采项目更受投资者青睐，澳大利亚、俄罗斯和南非是出口导向型煤矿开采投资的重点地区。

欧盟委员会发布《海上可再生能源战略》，提出了欧盟海上可再生能源的中、长期发展目标：为助力欧盟实现到 2050 年的碳中和目标，该战略提出到 2030 年海上风电装机容量从当前的 12 吉瓦提高至 60 吉瓦以上，到 2050 年进一步提高到 300 吉瓦，并部署 40 吉瓦的海洋能及其他新兴技术（如浮动式海上风电和太阳能）作为补充。到 2050 年将需要投入近 8000 亿欧元资金。该战略提出了实现上述目标的政策和监管建议，包括在海洋空间规划、海上可再生能源及电网基础设施、海上可再生能源监管框架、撬动私营投资、技术研究创新、供应链和价值链六方面将采取的关键行动。

美国能源部（DOE）核能办公室发布《战略愿景》，旨在推进先进核能科技发展以促进核能产业壮大，满足美国能源、环境和经济需求。该《战略愿景》提出了到 2030 年的五大愿景目标以应对美国核能领域面临的挑战，并针对各愿景提出了支撑目标和阶段性绩效指标。五大愿景目标包括：（1）确保美国现有核反应堆的持续运行；（2）实现先进反应堆的部署；（3）开发先进核燃料循环；（4）保持美国核能技术的领导地位；（5）建立高效组织。

欧洲能源研究联盟（EERA）宣布新推出“能源数字化”联合研究计划，并发布《能源数字化战略研究与创新议程》，确定了到 2024 年能源数字化的研发目标和关键优先事项：该议程重点关注 2 个特定领域：高性能计算，数据科学与人工智能；以及 4 个交叉领域：能源系统集成交叉领域技术，材料、工艺和设备多尺度建模，水电数字化技术，核材料物理模型、健康监测和无损显微结构检验。

美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布第五轮开放招标计划（OPEN 2021），资助 1 亿美元支持具有潜在颠覆性影响的变革性清洁能源技术研发：本次资助主要聚焦七大主题领域，涵盖电网、交通运输、建筑能效、发电和产能、可再生能源发电、生物能源、其他能源技术等领域，旨在确保美国在未来绿色能源技术的全球领导地位，并助力实现 2050 年净零排放目标。

国际可再生能源机构（IRENA）和甲醇协会联合发布《创新展望：可再生甲醇》报告，探讨了可再生甲醇在石化原料、交通燃料等主要市场的现状和前景：报告指出，全球甲醇产量在过去 10 年几乎翻番至 9800 万吨/年，预计到 2025 年产量将增长至 1.2 亿吨/年，2050 年将达 5 亿吨/年。可再生甲醇在石化原料、交通燃料等主要市场的应用将有助于推动实现碳中和目标。然而，当前可再生甲醇的成本偏高、产量偏低，且技术有待进一步发展以实现商业化。如果政策措施得当，2050 年以前可再生甲醇将具备成本竞争力。为此，报告探索了以合理成本生产可再生甲醇的方法，并向政府和产业界提出了七项建议。

# 化石资源清洁高效利用

## IEA：全球煤炭市场将在 2021 年复苏 中期前景仍不明朗

近期，国际能源署（IEA）发布煤炭中期市场报告《煤炭 2020》<sup>1</sup>，分析了全球煤炭市场供需、成本、价格和项目投资现状及到 2025 年的发展趋势。由于 2020 年新冠疫情这一特殊事件的影响难以估量，报告重点针对短期（到 2021 年）的市场情况进行了预测。报告指出，受新冠疫情影响，2020 年全球煤炭需求大幅下降 5%，预计 2021 年将增长 2.6% 并在 2025 年前保持平稳。天然气价格持续下降使其具备与燃煤发电的竞争能力，已对部分国家的煤炭需求产生明显影响。预计 2021 年全球煤炭产量及交易量均将复苏，但考虑中国和印度政策变化，煤炭交易中后期前景仍不明朗。炼焦煤开采项目更受投资者青睐，澳大利亚、俄罗斯和南非是出口导向型煤矿开采投资的重点地区。主要内容如下：

### 1、新冠疫情预计导致 2020 年全球煤炭需求大幅下降 5%

由于受到电力需求下降、可再生能源迅速发展及天然气价格下降冲击，2019 年全球燃煤发电的煤炭需求下降了 3.3%，煤炭总需求则下降 1.8% 至 76.27 亿吨。2020 年，由于疫情导致全球经济萎缩，影响全球电力、钢铁和水泥行业，预计全球煤炭需求将大幅下降 5% 至 72.43 亿吨。其中，欧盟和北美的煤炭需求降幅均超过 15%，韩国、日本和印度等亚洲国家需求小幅下降 5%-10%，中国作为全球最主要煤炭消费国，需求将维持 2019 年水平。

### 2、煤炭需求主要受电力行业影响，预计 2021 年全球煤炭需求将增长 2.6%

煤炭需求主要受电力需求变化影响，2019 年全球电力需求仅微弱增长 1%，加上许多国家支持更为清洁的发电技术带来的冲击，全球燃煤发电量下降了 3%。相应地，全球动力煤和褐煤需求分别下降了 2.4% 和 9%。2020 年，全球电力需求将下降 1.5%，燃煤发电量将下降 5.2%，动力煤和褐煤需求将分别下降 5% 和 13%。新冠疫情对经济的影响导致电力需求下降，另外疫情造成的天然气价格下跌使其在电力和工业中更具备竞争力，进而影响了煤炭需求。预计 2020 年欧洲和美国的燃煤发电量将分别下降 23% 和 18%。国际货币基金组织（IMF）预测 2021 年全球 GDP 将增长 5.2%，这将促进电力和工业的煤炭需求，预计全球电力消费将反弹 2.9%，燃煤发电量将增长 2.8%，煤炭消费则将增长 2.6% 达到 74.23 亿吨，但仍低于 2019 年水平。另外，全球燃煤发电在发电总量中占比将降至 35%，是 IEA 有记录以来的最低值。欧盟和美国的煤炭需求将分别出现 2012 和 2014 年以来的首次反弹，印度、中国和

<sup>1</sup> Coal 2019: Analysis and Forecasts to 2025. <https://www.iea.org/reports/coal-2020>

东南亚则将同比增长 1%、3.1% 和 7%。

### 3、全球煤炭需求将在 2021 年反弹后至 2025 年趋于平稳

到 2025 年，将有三个主要因素对全球煤炭需求造成下行压力。其一，经济放缓导致的电力需求下降和天然气价格下降将促使发达国家燃煤电厂退役速度加快；其二，风能和太阳能等低碳发电技术将随着成本下降和政策的持续支持而不断发展，导致燃煤发电前景黯淡；其三，低廉的天然气将动摇原本认为煤炭是最廉价电力来源的看法，在某些以煤电为主体的亚洲国家也出现了这一转变迹象。然而，随着电力需求和基础设施的增加，某些地区的煤炭需求将会上升，尤其是南亚、东南亚等地，中国煤炭消费则从 2013 年起就进入了稳定波动阶段。亚洲地区煤炭需求的增加将被美国和欧盟的减少抵消，预计全球煤炭需求将在 2021 年反弹之后，保持稳定到 2025 年（图 1）。

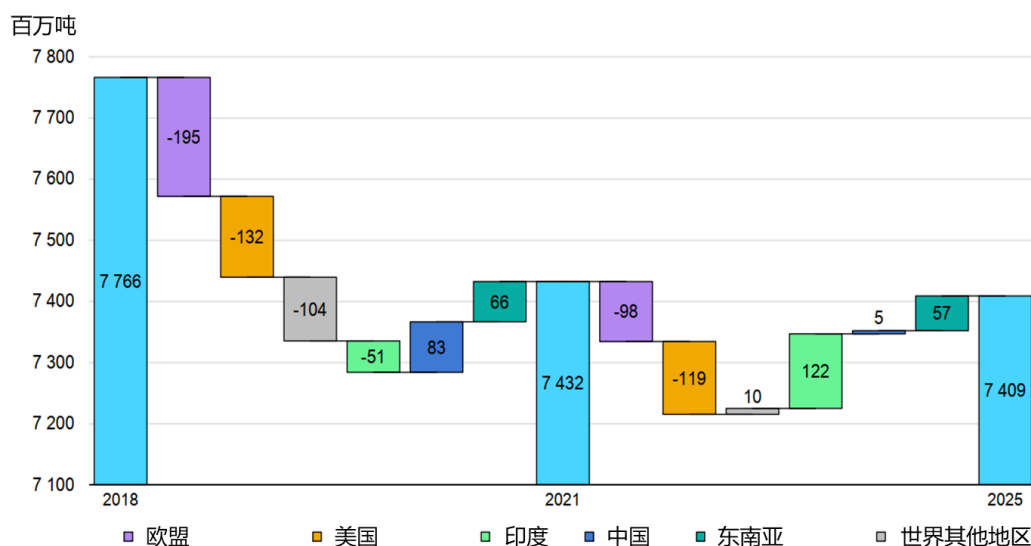


图 1 2018-2025 年全球不同地区煤炭需求变化（单位：百万吨）

### 4、中国煤炭需求仅受到疫情短暂影响，煤炭仍为其能源战略的重要组成

受到新冠疫情影响，中国经济在 2020 年第一季度出现负增长，但第二季度开始复苏，政府为经济复苏实行的刺激政策以及基础设施和房地产投资的反弹使中国电力、钢铁和水泥生产从 4 月份开始增长，预计 2020 年中国燃煤发电的煤炭需求将下降不到 1%，炼焦煤需求则受到钢铁行业刺激将增长 2.4%，煤炭需求总量仅下降 0.5% 左右。根据 IMF 预测，2021 年中国 GDP 将增长 8.2%，相应的电力需求增长将推动发电用动力煤需求增加 3.2%，而非电力应用的动力煤需求将持续下降，炼焦煤需求将上升 600 万吨，煤炭需求总量将增加 6100 万吨。煤炭仍然占中国一次能源供应的一半以上，中国经济增长、空气污染、能源安全和气候变化相关政策将对煤炭需求有直接影响：“两新一重”建设将在短期内提高煤炭需求；北方秋冬季空气污染的综合治理举措将逐步淘汰大量低效、高污染的中小型燃煤锅炉；为减少对油气的进口依赖将加大对煤炭转化的支持力度；“3060”碳目标将减少煤炭在能源结构中的

占比。尽管中国正减少对燃煤发电的依赖，但其仍将是未来几十年中国电力供应的基石。中国仍在继续批准新建燃煤电厂，但新获批电厂存在如下特征：大部分新增电厂集中在少数省份或自治区；越来越多的获批电厂位于煤矿附近；大部分电厂将连接到特高压电网，或为热电联产电厂；超超临界发电成为默认的技术方案。

#### **5、天然气发电竞争日益激烈，对煤炭的主导地位形成了挑战**

由于成本原因，许多国家通常优先发展燃煤电厂而非天然气电厂，但 2019 年和 2020 年天然气价格下跌改变了两者竞争力，对一些国家煤炭需求产生明显影响。美国页岩革命已经使天然气取代煤炭成为首选发电燃料，2019 年该国燃煤发电量出现历史最大降幅（-19%），并在 2020 年持续下降，但 2021 年由于天然气价格和电力需求上涨将出现反弹。欧盟碳排放交易制度下不断上涨的碳价正加强天然气发电竞争力，2020 年欧盟燃煤发电量继续下降，预计 2021 年由于天然气价格回升将使褐煤电厂竞争力大于天然气联合循环发电，但一些效率较低的电厂仍难以与天然气电厂竞争。日本尽管天然气现货价格较低，但大多数天然气合约都与油价挂钩，因此燃煤发电更具可靠性。但较低电力需求和光伏发电部署正导致燃煤发电削减，日本经济产业省宣布在 2030 年前关闭低效率的亚临界和超临界燃煤电厂，为煤电中长期发展定下基调。韩国空气污染政策促使其削减燃煤发电量，税收改革使天然气发电更具竞争力，第三阶段碳排放交易计划将持续到 2025 年，将惠及天然气电厂，但同样存在由于天然气主要通过长期合约采购而无法从较低现货价格中充分受益的问题。

#### **6、2020 年全球煤炭产量下降，但 2021 年有望增加**

2019 年全球煤炭产量增加 1.5%，需求下降导致库存不断增加。煤炭需求持续下降，预计 2020 年全球煤炭产量将下降 6.5%。随着需求增加，预计 2021 年全球煤炭产量将增至 76.75 亿吨。中国是世界最大煤炭生产国，煤炭产量从 2017 年开始逐渐回升，2020 年疫情原因导致煤炭生产暂时中断，但从二季度开始的反弹和下半年对煤炭进口限制的加强支撑国内煤炭生产，预计产量将与 2019 年持平。根据 2020 年产量恢复情况、煤矿审批和投资情况，预计 2021 年中国煤炭产量将与 2020 年相当。

#### **7、煤炭主要生产国未来煤炭供应策略各有不同**

中国和印度正采取措施，在保障充足煤炭供应的同时加大盈利，并控制进口量。中国“十三五”规划期间的煤炭供给侧改革提升了煤炭行业的竞争力，政府正继续努力提高竞争力和盈利能力，2020 年全国煤炭交易中心正式在北京开业运营。此外，新重组了晋能控股集团和山东能源集团，两大集团加上国家能源投资集团的煤炭年产量将超过 10 亿吨。印度政府打算提高煤炭行业的效率和竞争力，尤其是引入商业开采以改造煤炭行业，2020 年 11 月通过拍卖程序分配了 5000 万吨/年的开采产能。经历了 2020 年的煤炭产量下降，澳大利亚和印度尼西亚准备提高 2021 年产量。随着钢铁行业的复苏，澳大利亚炼焦煤产量预计将在 2021 年强劲反弹 8%，继续保持

其在炼焦煤市场的主导地位；动力煤产量仅略微提升 1%；煤炭总产量将增长 3.7%。印度尼西亚则将其 2021 年煤炭产量目标设定为 5.55 亿吨，IEA 预测其产量将增长 3% 达到 5.45 亿吨。美国由于 2021 年天然气价格和煤炭需求预期上涨将缓解煤炭竞争压力，但中期前景并未改善。美国一些大型矿业公司正逐渐放弃生产发电用动力煤，转向生产用于钢铁行业的炼焦煤。欧洲少数几个产煤国将有序关闭煤矿，并尽量减少关停对产煤区的社会影响。

## 8、预计 2021 年煤炭国际交易量将复苏，但中期前景仍不明朗

2020 年，受到新冠疫情的严重影响，全球煤炭贸易量预计减少 10% 左右，是有史以来最大降幅，动力煤贸易量将下降 10%，炼焦煤将下降 12%。中国的进口配额新规加剧了煤炭贸易的不确定性，印度和欧洲进口量降幅最大，日本、韩国等地也有所下降。美国和哥伦比亚共减少了 2500 多万吨的动力煤出口量以平衡大西洋市场，印度尼西亚和澳大利亚也减少了出口以平衡亚太市场。经过供应方面的调整，2020 年底动力煤价格与上年基本持平。在全球需求预期增长的支持下，预计 2021 年全球煤炭贸易量将复苏（预期增加 2.4%），但煤炭出口量仍将远低于疫情前水平。澳大利亚和印度尼西亚将从煤炭进口需求增长中受益，预计 2021 年煤炭贸易量将分别增加 2000 万吨和 600 万吨。中国对煤炭进口配额的限制将在 2021 年持续进行，预计 2021 年动力煤进口量将与 2020 年相当。印度对国内动力煤的支持加上 2020 年的库存积累，预计其 2021 年动力煤进口量仅增长 500 万吨。中国煤炭进口政策变化和印度本土动力煤生产的发展将导致煤炭市场中期前景具有极大不确定性。

## 9、煤炭供应成本下降，但价格下降导致供应商盈利能力恶化

由于燃料价格下降，2019 年煤炭供应成本相应下降，但煤炭价格下降幅度更大，部分生产商在 2019 年陷入困境。2020 年，煤炭价格进一步下降，给生产商带来更大压力。采矿成本中柴油燃料价格在 2020 年初有所下降，但在年中出现反弹，而安全措施等造成的成本也有所上升，意味着 2020 年有很大一部分煤矿无法盈利。

## 10、澳大利亚、俄罗斯和南非是出口导向型煤矿开采投资的重点地区

正在开发的出口导向型煤炭开采项目中，晚期项目<sup>2</sup>的开采产能约为 9300 万吨/年，而早期项目的开采产能约为 8.19 亿吨/年（图 2）。大部分晚期项目位于澳大利亚（41%）、俄罗斯（22%）和南非（19%），其中澳大利亚和俄罗斯的大部分项目用于炼焦煤，南非的大部分项目用于动力煤；早期项目中 66% 计划在澳大利亚部署。晚期项目中 69% 用于炼焦煤，尽管动力煤市场规模是炼焦煤的三倍，但投资者更为青睐炼焦煤项目。相比之下，动力煤项目占早期项目的 54%。投资者对炼焦煤项目兴趣渐增可能是由于气候变化政策和公众反对增加了动力煤项目的风险和不确定性，燃煤发电更易被其他清洁技术替代，而钢铁等行业近期不太可能淘汰煤炭。

<sup>2</sup> 此处按照项目开发进展对正在开发的项目进行分类，晚期项目指已获得批准并完成最终投资决定，或正在建设中的项目；早期项目指正处于可行性评估或环境评估阶段，或正在等待审批的项目。

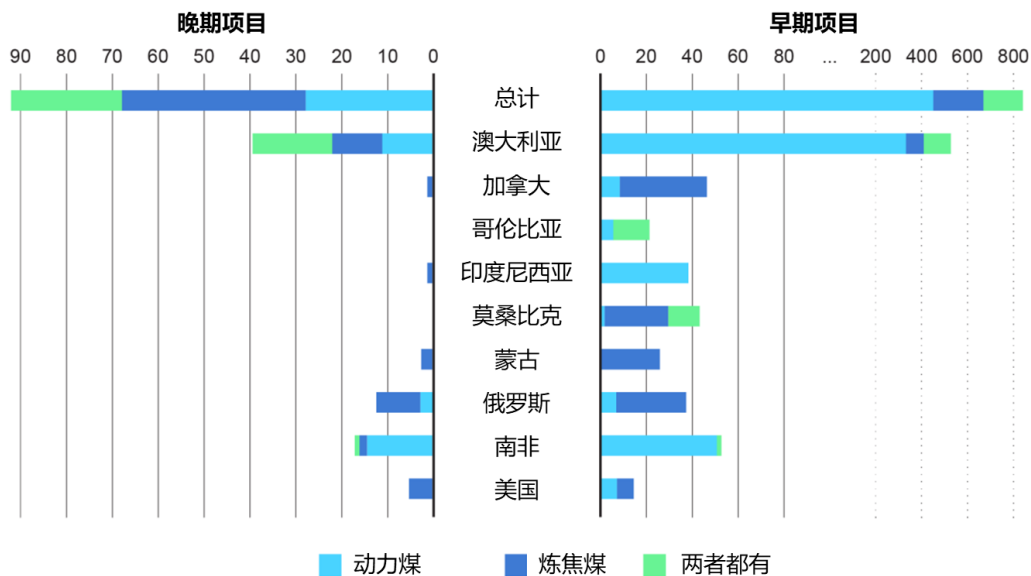


图 2 全球不同国家/地区出口导向型煤炭开采项目生产能力（单位：百万吨/年）

（岳芳）

## DOE 支持煤炭提取稀土元素及关键矿物技术开发

1月20日，美国能源部（DOE）化石能源办公室宣布在“关键矿产可持续发展计划”框架下投入2835万美元，资助从煤炭中提取稀土元素及关键矿物的先进加工技术<sup>3</sup>，旨在通过建立国内关键矿物和稀土元素供应链，降低军事工业供应风险，同时满足新兴清洁能源技术市场的生产需求。未来五年，全球稀土元素市场规模预计将从当前的50亿美元增长40%至70亿美元，关键矿物市场规模也将同步增长。此次资助将重点开发环境友好的中游加工技术，以显著降低资本成本和运营成本。资助领域具体内容如下：

### 1、开发从煤基和替代资源中生产稀土金属和联产关键矿物的先进工艺

该主题领域侧重于开发将稀土分离为单体分离高纯度（ISHP）材料和还原稀土制金属，以及联产关键矿物的先进技术。与传统的分离和金属还原技术（如溶剂萃取和金属热还原工艺）相比，该主题开发的先进ISHP和金属还原工艺将有可能降低20%的资本成本和运营成本。研究重点包括：

（1）在现有中试设施中，利用**煤基材料**生产纯度在90%-99%的混合稀土氧化物/混合稀土盐、关键矿物。其中包括：至少5种纯度在90%-99.99%的ISHP稀土氧化物/稀土盐；至少5种纯度在99.5%-99.8%的单一稀土金属或二元稀土金属化合物；至少5种纯度在90%-99%由单一关键矿物构成的氧化物、盐或金属。

<sup>3</sup> U.S. Department of Energy to Invest \$28.35M in Advanced Processing of Rare Earth Elements and Critical Minerals for Industrial and Manufacturing Applications. <https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-invest-2835m-advanced-processing-rare-earth-elements-and-critical>



(2)在现有中试设施中,利用**非煤基材料**生产高纯度混合稀土氧化物/混合稀土盐和关键矿物。其中包括:至少5种纯度在90%-99.99%的ISHP稀土氧化物/稀土盐;至少5种纯度在99.5%-99.8%的单一稀土金属或二元稀土金属化合物;1至5种纯度在90%-99%由单一关键矿物构成的氧化物、盐或金属(原料待定)。

## 2、开发从煤基和替代资源中生产关键矿物(不包括稀土元素)的技术

该主题领域聚焦利用传统或商业化技术,将关键矿物分离、纯化,最终转化为有价值的工业材料。研究重点包括:

(1)利用**煤基材料**生产1至5种纯度在90%-99%由单一关键矿物构成的氧化物、盐或金属。

(2)利用**非煤基材料**生产1至5种纯度在90%-99%由单一关键矿物构成的氧化物、盐或金属。

**编者按:**此次招标资助项目团队将包含整个关键矿物和稀土元素价值/供应链的利益相关方,包括:资源评估和表征领域;采矿和矿物加工领域;中试规模稀土元素和关键矿物设施开发商和运营商;先进分离和提纯开发商;金属还原加工开发商;至少一个工业合作伙伴,其专长是制造和/或生产含有稀土元素和/或关键矿物的中间产品和/或最终产品。

(汤匀)

# 清洁能源多能互补

## 欧盟发布《海上可再生能源战略》明确中长期发展目标

近期，欧盟委员会发布《海上可再生能源战略》<sup>4</sup>，提出了欧盟海上可再生能源的中、长期发展目标。为助力欧盟实现到 2050 年的碳中和目标，该战略提出到 2030 年海上风电装机容量从当前的 12 吉瓦提高至 60 吉瓦以上，到 2050 年进一步提高到 300 吉瓦，并部署 40 吉瓦的海洋能及其他新兴技术（如浮动式海上风电和太阳能）作为补充。欧盟委员会估计，这将需要到 2050 年投入近 8000 亿欧元资金。该战略提出了实现上述目标的政策和监管建议，包括在海洋空间规划、海上可再生能源及电网基础设施、海上可再生能源监管框架、撬动私营投资、技术研究创新、供应链与价值链等六方面将采取的关键行动，详情如下：

### 1、空间和资源可持续管理的海洋空间规划

海上可再生能源开发活动可能会与其他经济活动共存，因此海洋空间规划应采取整体的、多用途/多目的的方法。欧盟将重点采取如下关键行动：

（1）欧盟委员会将促进跨境合作，并鼓励成员国根据《国家能源和气候计划》（NECP）将海上可再生能源发展目标纳入国家海洋空间规划（2021 年 3 月）。

（2）欧盟委员会将报告海洋空间规划指令的执行情况，以反映海上可再生能源的长期发展（2022 年）。

（3）欧盟委员会将与成员国和区域组织一起制定一项通用方法，并就海洋空间规划部署试点项目，以研究海上项目面临的环境风险以及对自然保护的影响（2021-2025 年）。

（4）欧盟委员会已提交了一份关于风能开发和自然保护立法的指导文件。

（5）欧盟委员会将以实践社区的形式促进政府机构、利益相关方和科学家之间开展海上可再生能源问题对话（2021 年）。

（6）欧盟委员会将与成员国和区域组织一起支持多用途项目（2021-2025 年）；

（7）欧盟委员会和欧洲防务局将共同采取行动，以识别在国防活动预留地区开发海上可再生能源的障碍，并改善共存状况。

### 2、开发海上可再生能源及电网基础设施的新方式

为了构建大规模海上可再生能源网络，海上电网的开发和规划需要超越国界，覆盖整个海洋，并考虑通过复合能源系统等形式实现多功能性。因此，欧盟成员国需要采取协调一致的方法，对海上可再生能源开发制定长期目标，并在整体的区域

<sup>4</sup> An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future.  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/offshore\\_renewable\\_energy\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/offshore_renewable_energy_strategy.pdf)

性电网规划和开发中落实长期目标。另外，成员国的输电系统运营商和国家监管机构应在规划电网基础设施方面进行更多协调。欧盟将重点采取如下关键行动：

（1）欧盟委员会将为成员国制定一个框架，用于确定共同的长期目标，确保 2050 年之前在每个海域部署海上可再生能源（2021 年）。

（2）欧盟委员会将根据修订的泛欧能源网络（TEN-E）条例，为输电系统运营商的海上电网长期规划提出一个框架，涉及每个海域的监管机构和成员国，包括部署复合能源系统项目（2020 年 12 月）。

（3）在各自职权范围内，欧盟委员会、成员国和监管机构将制定一个框架，使输电系统运营商能够对海上电网进行预期投资，为未来的规模扩大和开发做好准备（2021 年起）。

（4）欧盟委员会将公布欧盟指导方针，说明如何协调跨境能源传输项目与能源发电项目开发的成本和收益分摊（到 2023 年）。

### **3、更明确的海上可再生能源监管框架**

将来在大部分欧洲海域中，更复杂的跨境海上项目将越来越重要，目前的监管框架并未考虑能源岛、复合能源系统以及海上制氢等新型项目。此外，将海上项目与多个具有不同并网规则的市场相连还存在实际的物理挑战，需为高压直流电网的并网开发通用规则。还需设计更适合可再生能源（包括海上可再生能源）的市场，而潮汐能、波浪能和浮动式海上风电及光伏等新兴海上可再生能源技术也需要专门扶持以推动试点示范的部署。欧盟将重点采取如下关键行动：

（1）欧盟委员已经发布了指导文件阐明监管框架，尤其是海上复合能源系统项目招标区的监管框架。

（2）欧盟委员会将提议修订立法，使成员国可以更灵活地分配海上复合能源系统项目为缓解电网拥堵提供服务所获得的收入（2022 年）。

（3）欧盟委员会将指派电力利益相关方委员会对海上高压直流电网的并网规则进行修订（2021 年）。

（4）欧盟委员会将确保修订的能源和环境保护国家援助指南能够提供全面升级且符合目标扶持的框架，以经济高效的方式部署清洁能源，包括海上可再生能源（到 2021 年底）。

（5）欧盟委员会将就跨境项目成本效益分摊制定指南（2021 年）。

### **4、通过欧盟公共资助撬动对海上可再生能源的私营投资**

到 2050 年，大规模海上可再生能源技术的投资需求预计将接近 8000 亿欧元，其中约 2/3 用于资助相关电网基础设施，1/3 用于海上发电。近十年，欧洲对海上和陆地电网的年投资总额约为 300 亿欧元，未来十年预计增加至超过 600 亿欧元，并将在 2030 年以后继续增加，私营部门将提供其中大部分资金。对于成熟的海上可再

生能源技术，欧盟公共资助有助于缓解市场失灵，降低资本成本；而对于早期不成熟技术，则可促进市场的开拓和建立，吸引更多私营投资，提高竞争力，加快早期部署和商业化进程。欧盟将重点采取如下关键行动：

（1）欧盟委员会将鼓励成员国在复苏基金（RRF）的“Power up”旗舰项目下，将与海上可再生能源部署相关的改革和投资纳入国家复苏计划中（2020-2021年）。

（2）欧盟委员会将在新的“连接欧洲设施”（CEF）、可再生能源融资机制以及欧盟大型投资基金“投资欧洲”（InvestEU）等框架下，促进跨境合作项目的开发，包括互联项目（到2021年）。

（3）欧盟委员会、欧洲投资银行（EIB）和其他金融机构将共同努力，通过InvestEU支持对海上可再生能源的战略投资，包括对促进欧盟技术领先的高风险投资（到2021年）。

## 5、重点支持海上项目的研究和创新

促进研究和创新是大规模部署海上可再生能源的重要前提。当前，对清洁能源研发的投资主要来自私营部门。近年来，欧盟在清洁能源上的年均投资近200亿欧元，其中企业贡献了约77%，各国政府约占17%，欧盟资助了6%。欧盟的支持对于进一步激励国家公共投入和私营部门投资以降低海上能源投资风险，加速示范和部署至关重要。欧盟将重点采取如下关键行动：

（1）根据欧盟“地平线欧洲”多年期研发资助框架的第一个工作方案（2021-2022年），委员会提议：①支持输电系统运营商、制造商和海上风电开发商之间的合作，在2022年启动一个大型高压直流输电网示范项目；②支持开发风能、海洋能和浮动式太阳能的新型设计；③提高整个海上风能价值链的工业效率，包括使用数据驱动方法和物联网设备的数字技术；④将“可持续设计”原则系统融入可再生能源研究与创新中。

（2）欧盟委员会将审查战略能源技术计划（SET Plan）关于海洋能和海上风能的目标和实施议程，并启动一个SET Plan高压直流输电工作组。

（3）欧盟委员会将研究如何将海上能源发电和基础设施的技术开发与社会经济和海洋环境发展可持续融合，例如通过研究其带来的累加效应和社会意识问题。

（4）欧盟委员会将与成员国和地区（包括岛屿）合作，协调利用可用资金开发海洋能技术，以期实现欧盟海洋能总装机容量到2025年达到100兆瓦，到2030年达到1吉瓦左右。

## 6、建立更强大的欧洲供应链和价值链

为了实现欧盟海上可再生能源目标，并使欧洲经济最大程度从中受益，需加强欧洲海上可再生能源供应链。需加大对耐腐蚀材料、风力和海洋涡轮机制造、塔架、基座、浮动设备和电缆生产的投资以扩大产量，一些港口也需要进行升级。欧盟将

重点采取如下关键行动：

(1) 欧盟委员会和欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 将推动不同制造商设备的标准化和互操作性 (将于 2028 年投入使用)；欧盟委员会、成员国和行业界将共同努力，在国际上推广欧盟标准。

(2) 欧盟委员会将完善可再生清洁能源产业论坛，以促进可再生能源价值链的发展，并将在论坛内设立一个专门的海上可再生能源工作组 (2021 年)。

(3) 欧盟委员会将鼓励成员国和地区利用 2021-2027 年欧盟凝聚政策基金 (Cohesion Policy Funds)，包括欧洲社会基金 (European Social Fund Plus) 以及相关的公正转型机制 (Just Transition Mechanism)，以支持对海上可再生能源的投资，促进经济多样化，创造新的就业机会，并推出再培训/提高技能计划。

(4) 欧盟委员会将支持国家和地区主管当局制定和实施教育和培训计划，包括技术教育和高等教育，以发展海上可再生能源的专业技能资源，以及通过技能议程 (Skills Agenda) 下的行动，吸引具备合适资质的年轻工人和再培训/高技能工人从事海上可再生能源工作。

(5) 欧盟委员会将通过减少海上可再生能源项目障碍和充分利用法律补偿措施，促进第三国的市场准入。

(6) 欧盟委员会将通过与伙伴国家在能源对话中交流政策框架标准和行业发展，促进海上可再生能源新市场的开发，并加强现有市场的发展 (正在进行)。

(7) 欧盟委员会将对海上设施的退役成本和影响进行分析，以评估在拆除现有设施和未来设施退役时，是否需要制定欧盟范围内的法律要求，尽量减少对环境、安全和经济的影响。

(高天 岳芳)

## 美国能源部核能办公室提出 2030 年战略愿景

1 月 8 日，美国能源部 (DOE) 核能办公室发布《战略愿景》<sup>5</sup>，旨在推进先进核能科技发展以促进核能产业壮大，满足美国能源、环境和经济需求。该《战略愿景》提出了到 2030 年的五大愿景目标以应对美国核能领域面临的挑战，并针对各愿景提出了支撑目标和阶段性绩效指标，关键要点如下：

### 一、愿景及使命

愿景是：实现美国核能产业蓬勃发展，促进清洁能源发展和经济增长。使命为：推进先进核能科学技术发展，满足美国能源、环境和经济需求。

### 二、战略愿景五大目标

#### 1、确保美国现有核反应堆的持续运行

<sup>5</sup> Office of Nuclear Energy: Strategic Vision. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/DOE-NE%20Strategic%20Vision%20-Web%20-%2001.08.2021.pdf>

**(1) 支撑目标：**①开发降低运行成本的技术；②拓展发电以外的市场；③为现有装置的继续运行提供科学依据。

**(2) 阶段性绩效指标：**①到 2022 年，示范一个可扩展的核能制氢试点电厂；②到 2025 年，开始用事故耐受型燃料取代美国商业反应堆的现有燃料；③到 2026 年，完成工程设计和许可，以在运行核电站中成功部署反应堆数字安全系统；④到 2030 年，实现事故耐受型燃料的广泛应用。

## **2、实现先进反应堆的部署**

**(1) 支撑目标：**①减少部署先进核能技术的风险和时间；②开发扩展核能市场的反应堆技术；③支持多样化设计以提高资源利用率。

**(2) 阶段性绩效指标：**①到 2024 年，示范并测试一个通过先进制造技术制造的微型反应堆堆芯；②到 2025 年，实现商业微型反应堆的示范；③到 2027 年，实现核能-可再生能源多能融合系统的示范运行；④到 2028 年，通过与工业界的成本分担伙伴关系计划实现两种先进反应堆设计的示范运行；⑤到 2029 年，投运第一座商用小型模块化反应堆；⑥到 2035 年，通过与工业界的合作伙伴关系计划再示范至少两个新的先进反应堆设计。

## **3、开发先进核燃料循环**

**(1) 支撑目标：**①解决国内核燃料供应链的缺口；②弥补国内先进反应堆核燃料循环的差距；③评估建立核废料综合管理系统的方案。

**(2) 阶段性绩效指标：**①到 2021 年，开始建立铀储备的采购流程；②到 2022 年，实现国产高含量低浓缩铀（HALEU）燃料技术的示范；③到 2023 年，通过非国防原料提供多达 5 吨 HALEU 燃料；④到 2030 年，评估先进反应堆的燃料循环。

## **4、保持美国核能技术的领导地位**

**(1) 支撑目标：**①扩大美国核能产业在全球市场的机遇；②保持世界一流的研发能力；③培养高水平科学家构建未来核能研发力量。

**(2) 绩效指标：**①到 2021 年，资助多达 50 个大学研发项目以及 500 万美元的学生奖学金和助学金；②到 2021 年，重启大学使用的铀氢锆（TRIGA）研究堆；③到 2021 年，与 5 个有意开展核能计划的国家建立正式合作；④到 2021 年，建立一种全面方法协助各国制定核能计划；⑤到 2022 年，增强美国在促进和平利用核能多边组织中的领导力和参与度；⑥到 2026 年，建造多功能试验反应堆；⑦到 2026 年，完成样品制备实验室；⑧到 2030 年，与美国国家航空航天局（NASA）合作示范用于外星球地面供电和深空探索推进动力的核裂变系统。

## **5、建立高效组织**

**(1) 支撑目标：**①支持并培育核能办公室高素质、多元化的人员队伍；②实现计划、项目、研发投资和合同的高效管理；③定期与利益相关方沟通。

**(2) 阶段性绩效指标：**①到 2021 年，为核能办公室的每一个计划办公室制定一个多年期计划方案；②到 2021 年，在预算范围内按时达到里程碑目标的 95%；③到 2021 年，通过招聘补充关键人员缺口；④到 2022 年，更新核能办公室战略愿景，修订目标和绩效指标；⑤到 2022 年，将部落地区核能工作组（NETWG）<sup>6</sup>成员从 11 个增加至 13 个。

（岳芳）

## ARPA-E 资助 1 亿美元支持变革性清洁能源技术研发

2 月 11 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布第五轮开放招标计划（OPEN 2021）<sup>7</sup>，资助 1 亿美元支持具有潜在颠覆性影响的变革性清洁能源技术研发，确保美国在未来绿色能源技术的全球领导地位，同时助力美国 2050 年实现净零排放目标。本次资助主要聚焦七大主题领域，具体内容如下：

### 1、电网

针对大于 69 千伏和小于等于 69 千伏工作电压，分别开发电力传输系统的规划和运营技术（包括交流和直流）；围绕电网开发相关的算法、模型、软件和控制技术，优化电网运行效能；开发电网级的电池储能技术；开发电网级的非电池储能技术（空气压缩储能、飞轮储能、抽水蓄能等）；开发高比例可再生能源并网下的电网高效稳定运营技术。

### 2、交通运输

开发非生物质的替代燃料技术；开发更高燃烧效率更低排放的内燃机；开发高性能的电动汽车电驱系统；开发车用燃料电池；利用轻量化材料开发设计更加先进的车辆架构；开发先进的车辆管理系统；开发更加先进的材料、组件、电路拓扑架构、封装工艺等以优化车辆电子系统；开发更加先进的电动汽车电池储能技术；开发汽车用热储能技术。

### 3、建筑能效

开发先进建筑热电联产一体化技术；开发先进的建筑供热和制冷技术，提升效能；开发先进建筑能源管理系统，如智能电表、自动化控制系统；开发高效环境友好的照明技术；开发高能效的建筑围护结构（如具备良好蓄热功能的窗户、屋顶）。

### 4、发电和产能

将燃料电池和化石燃料发电系统集成耦合，同步实现发电和氢能制备；针对化石燃料发电，开发更加先进的燃气轮机技术；针对固定式应用（如发电），开发先

<sup>6</sup> NETWG 于 2014 年 12 月成立，旨在促进 DOE 核能办公室与美国印第安部落之间就核能相关活动开展沟通与合作，消除印第安部落地区核能及相关基础设施发展的障碍。

<sup>7</sup> U.S. Department of Energy Announces \$100 Million for Transformative Clean Energy Solutions Supporting President Biden's Climate Innovation Agenda. <https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-100-million-transformative-clean>

进燃料电池技术；开发提升铀利用率技术以及改善核电站安全性的材料；针对核聚变发电技术开发相关的材料提升其反应安全性；开发先进的碳捕集、利用和封存技术；开发常规和非常规化石资源的勘探和开采技术；开发提升化石燃料发电厂运行效率的技术；开发可燃性气体的存储、输运和监测技术；开发增强型化石资源化学和生物转化技术（如煤制油），提升转化效率；开发先进的火力发电厂水处理与节水技术。

## 5、可再生能源发电

开发更加先进的风力发电机架构、更轻量化的叶片、更高精度的风力资源预测技术；开发更加灵敏的地震感应、更加先进的地热资源识别、勘探和钻井技术；开发先进的水资源识别和流体动力学仿真技术，以及流体动能的高效收集和转换技术；开发太阳能资源的高精度识别和预测仿真技术，更高效率的太阳能发电技术；开发先进的太阳能热转化/太阳能催化转化技术；开发先进电力电子器件（如半导体、电容器、电感器等），来提升可再生能源发电效率。

## 6、生物能源

开发提高生物质产量和降低水资源消耗的培育技术；开发先进的催化剂提升生物质到燃料的转化效率；开发先进的生物质热解技术；更加高效的低成本生物质原料收集和处理技术；开发先进的生物基化学品生产、微生物燃料电池、微生物碳捕集技术。

## 7、其他能源技术

开发水资源的高效回收、处理和再利用技术；开发先进的热能存储技术；针对制造业开发先进的节能技术；针对家用电器和家用电子设备开发先进的节能技术；针对大型计算机、数据中心，开发节能技术；针对制造业开发先进节能减排技术；开发先进的废热回收利用技术；开发耐极端高温环境的材料应用于发电设施；开发新型的高性能半导体材料；针对便携式电子器件和设备开发相关的电源技术（如便携式燃料电池、储能电池等）。

**编者按：** ARPA-E 除了设立特定领域主题研究计划外，还每三年开展一次开放式项目招标计划。OPEN 招标计划于 2009 年推出，旨在支持非共识探索研究和机会型探索研究，避免遗漏在主题研究领域之外的创新思想。2009 年第一轮开放式招标（OPEN 2009）资助了 1.67 亿美元，2012 年第二轮（OPEN 2012）资助了 1.3 亿美元，2015 年第三轮（OPEN 2015）资助了 1.25 亿美元，2018 年第四轮（OPEN 2018）资助了 1.99 亿美元。

（郭楷模）



## 加拿大支持净零排放清洁技术创新

2月11日，加拿大创新、科学和经济发展部（ISED）宣布投入5510万加元，支持企业开发用于能源、农业和资源部门的净零排放清洁技术<sup>8</sup>，为建立更强大、绿色和弹性的经济奠定技术基础。此次资助由加拿大可持续发展技术基金（SDTC）具体实施，将资助20家中小型清洁技术公司的创新技术，涵盖能源勘探与生产、能源利用、发电、废物管理和农业5个领域，资助项目详情如下：

### 1、能源勘探与生产

该领域将资助如下项目：①Carbon Cap 公司获得60万加元资助，用于开发废物能源回收系统，可提高建筑物能效；②Challenger Technical Service 公司获得40万加元资助，开发多组分井下注入系统，将一种特殊的环氧树脂应用于石油或天然气井，以阻止甲烷和其他气体泄漏至地面；③Novamera 公司获得300万加元资助，用于开发可持续钻井开采技术，该技术为一种小孔钻井技术，能够更安全、经济、可持续地开采小规模窄脉矿床。

### 2、能源利用

该领域将资助如下项目：①Universal Matter 公司获得450万加元资助，利用焦耳热闪蒸技术将塑料和橡胶废料以及其他低成本原料转化为石墨烯；②Edgehog Advanced Technologies 公司获得250万加元资助，将推进用于太阳能电池板的下一代全向防反射、自清洁玻璃的商业化，该技术可将光伏电池的输出能量最高提升12%；③Giatic Scientific 公司获得110万加元资助，开发强度实时监测技术以减少混凝土中的水泥；④Intellinox Technologies 公司获得120万加元资助，用于开发下一代厨房智能通风系统；⑤Thetis Environmental 公司获得150万加元资助，开发三维空间超滤膜，可在环境温度和高温下运行，用于工业废水的固/液分离；⑥AdvEn Industries 公司获得390万加元资助支持其超级活性炭商业示范工厂，利用可持续低碳制造技术将富碳残留物转化为超级活性炭等高性能碳产品。

### 3、发电

该领域将资助如下项目：①Westgen Technologies 公司获得130万加元资助，支持开发其低成本远程发电和空气压缩系统，可降低偏远油气井中气动设备的甲烷排放；②Hydrostor 公司获得160万加元资助，用于将其先进压缩空气储能技术扩展至商业化，该技术可经济高效地提供6-24小时的电力；③QD Solar 公司获得530万加元资助，用于开发钙钛矿-胶体量子点叠层太阳电池。

### 4、废物管理

该领域将资助如下项目：①Li-Cycle 公司获得400万加元资助，支持其锂离子

<sup>8</sup> Government of Canada invests in Canadian clean technology innovations. <https://www.canada.ca/en/innovation-science-economic-development/news/2021/02/government-of-canada-invests-in-canadian-clean-technology-innovations.html>

电池回收技术规模扩大以实现商业化；②Titanium 公司获得 1000 万加元资助，支持其开发一系列从废物中创造价值的技术，包括从油砂发泡处理尾矿中回收沥青、溶剂、高价值矿物质和水；③Excir Work 公司获得 540 万加元资助，支持其从电子废物中回收贵金属技术的大规模示范和部署，可回收 95% 以上的金、钯、银和铜。

## 5、农业

该领域将资助如下项目：①Entosystem 公司获得 160 万加元资助，用于支持利用厨余垃圾养殖昆虫，生产黑士兵蝇蛋白粉和有机肥料；②ChrysaLabs 公司获得 160 万加元资助，支持开发可靠的土壤肥力实时评估技术；③Precision AI 公司获得 400 万加元资助，支持开发农业自主无人机技术，可通过人工智能和无人机技术优化农业生产，同时最大程度减少有害化学物质的使用；④Advanced Intelligent Systems 公司获得 40 万加元资助，用于开发农业生产的定制机器人（如收割机器人等）；⑤Sulvaris 公司获得 130 万加元资助，用于开发利用废料生产钾盐和硫酸铵的技术。

（岳芳）

## 天然辣椒素添加剂助力 MAPbI<sub>3</sub> 薄膜平面型钙钛矿电池创效率纪录

目前文献报道的钙钛矿太阳能电池主要采用多晶钙钛矿薄膜，然而多晶结构薄膜存在大量的晶界和缺陷，诱发了非辐射的界面复合，致使电池的性能受到抑制。因此，减少钙钛矿薄膜的晶体缺陷、抑制薄膜的非辐射界面复合是改善电池性能的关键因素之一，而向薄膜中加入添加剂是目前广泛采用的行之有效方法，但目前文献报道的添加剂都是环境不友好的化学试剂，亟需探索开发环境友好型的添加剂。

瑞典林雪平大学 Mats Fahlman 教授课题组牵头的国际联合研究团队将纯天然的辣椒素作为微量添加剂加入到甲基铵铅碘（MAPbI<sub>3</sub>）中，不仅有效地抑制了薄膜的表面缺陷，还改变了钙钛矿表面的电子结构，使其表面的钙钛矿从 P 型转变成 N 型形成了异质结，在上述两种因素协同作用的情况下，电池的性能和稳定性均得到了改善，获得了 21.88% 的转换效率，是迄今为止基于 MAPbI<sub>3</sub> 钙钛矿薄膜中平面型钙钛矿电池性能的最高值。研究人员首先将纯天然的辣椒素配置成溶液，作为添加剂按照不同的比例加入到钙钛矿 MAPbI<sub>3</sub> 前驱体溶液中，随后通过旋涂法制备了钙钛矿薄膜。为了对比研究，研究人员同步制备了无辣椒素添加剂的 MAPbI<sub>3</sub> 薄膜。随后分别以上述薄膜为光敏层制备出了完整的平面型结构钙钛矿太阳能电池器件，并开展电化学性能测试。实验结果显示，无添加剂电池器件光电转换效率为 19.1%，填充因子不到 80%；而含有添加剂的电池器件均表现出更加优异的性能，其中当添加剂的

比例为 0.1% 时（添加剂与钙钛矿质量比），基于辣椒素添加剂的电池器件性能达到最优，尤其填充因子直接突破了 80%，达到了 83.8% 高值，进而电池光电转换效率提升到了 21.9%，创造了基于  $\text{MAPbI}_3$  钙钛矿薄膜中平面型钙钛矿电池效率的最高值。一系列的微观表征表明了辣椒素添加剂引入后钙钛矿薄膜的缺陷浓度下降，非辐射的界面复合减少；且薄膜表面电子结构发生了转变，从 P 型变成 N 型即形成了表面局域的异质结，这有助于载流子空穴的分离。最后对电池器件长程稳定性开展研究，实验显示含有辣椒素添加剂的电池在一个标准太阳光辐照下连续运行 800 小时后，效率仍可维持初始值的 90% 以上，表现出了优异的稳定性。

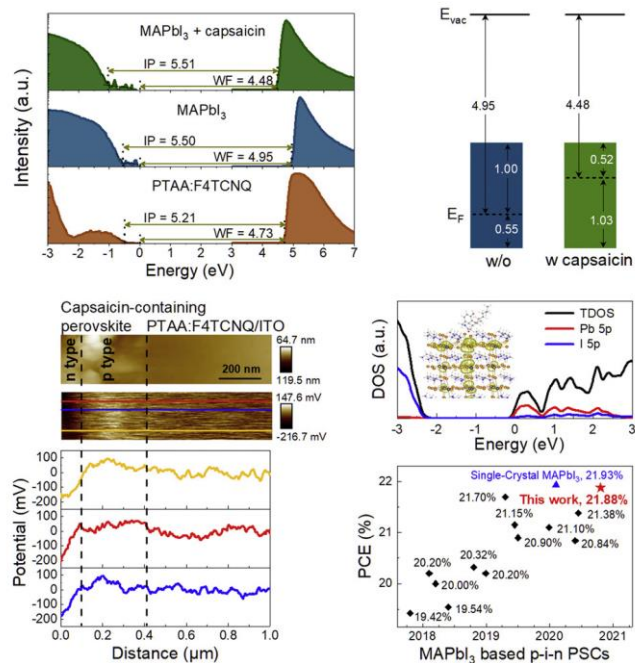


图 1 辣椒素改善  $\text{MAPbI}_3$  钙钛矿太阳能电池性能示意图

该项研究将天然的辣椒素作为添加剂引入到钙钛矿薄膜中，一方面减少了薄膜缺陷抑制了非辐射复合损失，另一方面改变了薄膜表面电子结构形成了异质结，两者协同作用增强了电池的性能，获得了迄今为止基于  $\text{MAPbI}_3$  薄膜的平面型钙钛矿太阳能电池效率最高值 21.88%，且表现出优异的长程稳定性，为开发高性能长寿命的钙钛矿电池指明了新方向。相关研究成果发表在《*Joule*》<sup>9</sup>。

（程向阳 郭楷模）

<sup>9</sup> Shaobing Xiong, Zhangyu Hou, Mats Fahlman, et al. Direct Observation on p- to n-Type Transformation of Perovskite Surface Region during Defect Passivation Driving High Photovoltaic Efficiency. *Joule*, 2021, DOI: 10.1016/j.joule.2020.12.009

# 低碳化多能融合

## 欧洲能源研究联盟发布能源数字化战略研究与创新议程

1月13日，欧洲能源研究联盟（EERA）宣布新推出“能源数字化”（DfE）联合研究计划，旨在通过信息技术和能源数字化支持实现零碳欧洲目标<sup>10</sup>。EERA是欧洲最大的低碳能源研究非营利性国际协会，是欧盟战略能源技术规划（SET-Plan）的研究支柱，此前共开展了17个低碳能源技术领域的联合研究计划，本次新增的DfE联合研究计划是在能源和数字技术交叉领域的研发部署，是EERA的首个跨领域联合研究计划。该计划发布了《能源数字化战略研究与创新议程》<sup>11</sup>，确定了到2024年能源数字化的研发目标和关键优先事项，重点关注2个特定领域：高性能计算，数据科学与人工智能；以及4个交叉领域：能源系统集成交叉领域技术，材料、工艺和设备多尺度建模，水电数字化技术，核材料物理模型、健康监测和无损显微结构检验。关键内容如下：

### 一、高性能计算

#### 1、目标及重点任务

该领域的目标是设计可利用百亿亿次（Exascale）超级计算机的软件、工具和服务，以解决能源领域新科学挑战。主要包括两个子目标：

**（1）通过高性能计算实现变革性的能源科学发现。**将重点完成如下任务：①利用百亿亿次超级计算机实现低碳能源科学的突破性进展，将识别EERA低碳能源技术领域的科学挑战，确定各领域最新技术、瓶颈、成本、领域间协同作用、差距分析，并设计开发领域适用软件；②设计和开发最先进的计算方法和高性能计算软件，使数值模拟工具能用于百亿亿次超级计算机并可管理生成的数据。

**（2）推进百亿亿次超级计算机服务。**将重点进行如下活动：促进协同设计软件开发方法并在能源业界中使用数值工具，将设计一个“软件即服务”（SaaS）门户，作为EERA高性能计算服务的主要入口。

#### 2、研究主题及预期产出

本议程已确定了至2023年的部分研究主题及预期产出，包括：①识别科学挑战，预期产出为评估相关低碳能源技术所需开展的计算活动，并确定其科学优先级和协同作用（到2021年）；②识别技术挑战，预期产出为确定能源领域适用的高性能计算工具和服务（到2021年）；③用于能源领域的高性能计算开发方案，预期产出为

<sup>10</sup> A new joint research programme consolidates EERA's efforts towards the digitalisation of energy. <https://www.eera-set.eu/news-resources/2529-a-new-joint-research-programme-consolidates-eera-s-efforts-towards-the-digitalisation-of-energy.html>

<sup>11</sup> Strategic Research and Innovation Agenda of the transversal Joint Programme Digitalization for Energy. [https://www.eera-set.eu/component/attachments/?task=download&id=478:Dow-JP-DfE\\_v16](https://www.eera-set.eu/component/attachments/?task=download&id=478:Dow-JP-DfE_v16)

EERA 和能源百亿亿次计算卓越中心(EoCoE-2)合作发布的立场文件(到 2021 年);  
④开发 SaaS 门户, 预期产出为设计和实施 SaaS 门户, 包括服务和代码(到 2022 年); ⑤建立能源高性能计算社区, 预期产出为建立一个大型欧洲平台, 以协调高性能计算在能源领域的部署, 并实施具有挑战性的举措(到 2023 年)。

## 二、数据科学与人工智能

### 1、目标及重点任务

该领域目前处于启动阶段, 主要包括三个子目标:

**(1) 实施 FAIR<sup>12</sup>和开放原则**, 即基于 FAIR 和开放原则构建开发能力, 同时考虑数据安全性、隐私和主权要求, 以支持开发有价值的可利用数据治理基础架构。将重点完成如下任务: ①建立一个 EERA 跨联合研究计划论坛, 讨论公平和开放的数据标准; ②为所有联合研究计划开展 FAIR 相关活动和研讨, 建立 FAIR 和开放能源数据的成熟标准, 包括元数据标准; ③建立 EERA 以外的 FAIR 和开放能源数据社区, 形成足够规模以开发和正式批准建立能源领域的 FAIR 和开放(元)数据标准; ④汇集用于 FAIR 和开放数据的平台服务, 长期目标是使 EERA 成为欧洲能源研究人员和能源数据企业查找、访问和交换能源(元)数据的枢纽。

**(2) 开发人工智能方法**。将重点进行如下活动: ①实现 FAIR 和开放数据服务与 AI 工具所需协议的数据格式和扩大服务过程的无缝连接; ②在能源系统管理中应用机器学习技术, 如确定能源价格、需求和存储的最佳平衡方案, 精准预测, 智能电网, 故障预防等; ③应用深度学习方法, 如开发确定性和概率预测方法, 以及利用深度神经网络处理大规模能源数据集的非线性复杂关系。

### 2、研究主题及预期产出

本议程已确定了至 2024 年的部分研究主题及预期产出, 包括: ①识别技术挑战, 预期产出为确定能源社区感兴趣的资源库和数据库(到 2021 年), 确定 EERA 需要的 AI 工具和服务(到 2021 年), 确定低碳能源社区的元数据标准(到 2021 年), 确定将数据库无缝连接到 AI 工具和服务需实现的技术方法(到 2022 年); ②实现 FAIR 数据论坛和平台服务, 预期产出为网站、资料库等(到 2023 年); ③正式批准 FAIR 和开放能源数据标准(到 2024 年)。

## 三、能源系统集成交叉领域技术

### 1、目标及重点任务

该领域的目标是收集、存储和处理来自各种数据源的数据和信息, 并将各种方法和工具结合起来, 以优化综合能源系统的设计和运营, 提高系统效率、经济性和弹性, 同时确保用户侧的易用性、隐私性和环境友好性。主要包括三个子目标:

**(1) 收集相关数据和信息, 以对综合能源系统进行建模和仿真**。将重点完成如

<sup>12</sup> FAIR 原则指可发现 (Findable)、可访问 (Accessible)、可互操作 (Interoperable) 和可重用 (Reusable)。

下任务：①确定建模和预测所需的最少数据和信息，该任务将确定所需使用的传感器数量和理想的采样率；②集成非传感器来源的数据和信息，此类信息可能来自能源系统中的服务及维护和/或组件升级，以及与发电和需求的潜在变化相关信息。

**(2) 数据驱动的建模和预测相关混合工具和方法。**将重点完成如下任务：开发并提供必要的专有知识和技术，以在所有时空尺度上进行汇总、预测、控制和优化。

**(3) 建模和数据集成。**将重点完成如下任务：开发一种新方法、技术和解决方案，采用考虑不同能源网络（电、气、石油、热力、交通）之间潜在协同作用的综合方法，确保系统各参与者和组件之间的有效交互。

## 2、研究主题及预期产出

本议程已确定了至 2023 年的部分研究主题及预期产出，包括：①确定建模和预测所需的最少数据和信息，预期产出为降低安装、运行/服务和维护成本（到 2021 年）；②集成非传感器来源的数据和信息，预期产出为改善运行或预测可靠性以及能源系统可靠性（到 2022 年）；③在不同时空尺度上对相关数据进行汇总、预测、控制和优化，预期产出为对本地和区域/国家级别的能源系统及其相互作用和关系进行建模（到 2023 年）。

## 四、材料、工艺和设备多尺度建模

### 1、目标及重点任务

该领域的目标是确定能源领域的材料、工艺和设备的多尺度建模和仿真面临的挑战和发展趋势，提出通用方法以进行新型材料的原子和微观特征研究，确定通过百亿亿次高性能计算、机器学习和人工智能实现大规模计算（包括数据挖掘）的新方法，定义能源应用相关的介尺度模型以及能够耦合离散模型和连续模型的关键参数，集成多物理场建模和仿真以解决与能源领域设备和工艺相关的工程问题。将重点完成如下任务：①开发材料微尺度（原子及分子）模型和工具；②开发设备和工艺的介尺度及大尺度模型，如利用输运方程的蒙特卡洛法、有限元法、有限体积法等，通过介尺度和大尺度建模研究材料结构中的缺陷、裂纹、晶界等，评估固体和流体能源材料的特定参数和行为，研究设备或工艺中的化学或物质输运过程，优化对最优材料的筛选过程等；③开发集成仿真平台、模型降阶方法和应用工具；④与高性能计算、数据科学和人工智能相关的新计算范式，包括材料模拟、数据库和材料筛选、机器学习和人工智能用于材料发现和加速计算、百亿亿次高性能计算用于材料设计等。

### 2、研究主题及预期产出

本议程已确定了至 2023 年的部分研究主题及预期产出，包括：①电化学界面的多尺度建模，预期产出为批准该主题相关的大型欧洲资助计划，组织电化学界面多尺度建模相关的国际会议或座谈会（到 2023 年）；②基于机器学习的新材料性能识

别，预期产出为借助欧盟及成员国的高性能计算资源投入，资助该主题相关的大型欧洲计划（到 2023 年）。

## **五、水电数字化技术**

### **1、目标及重点任务**

水电行业正处于数字化转型的开始阶段，该领域第一阶段的目标是确定研究重点和主题，包括：确定该领域的最新技术及其发展水平；确定水电数字化的相关应用案例；总结水电数字化相关的国家级和国际研究计划；增进对水电站运行、负荷、老化和寿命之间关系的理解；通过更多基于数据的决策确定未来挑战（如安全性）；支持学术界和行业共同参与数字化计划和项目。将重点完成如下任务：①设备级技术方面，包括：监控系统的安装和管理；数据的质量保证和统一；涡轮和发电机的数字孪生；关键设备的异常检测安装和管理。②系统级技术方面，包括：支持辅助服务的虚拟电厂；网络攻击的安保和预防；大数据基准；与其他数字化活动的接口。③经济方面，包括：经济高效的运行和维护；数字平台的新商业模式。④环境方面，包括：根据新的可用数据改进水力模型；通过河床扫描建立河流数字孪生；基于卫星流量监测的模型验证；识别鱼类行为和鱼梯影响的图像处理技术。⑤社会方面，包括：促进对现有和新技术的接纳；减轻跨学科合作的复杂性；维护和运行方面的专有知识管理。

### **2、研究主题及预期产出**

本议程已确定了至 2023 年的部分研究主题及预期产出，包括：①水电应用案例，预期产出为水电数字化相关应用案例报告（到 2021 年）；②水电数字化研究动态，预期产出为水电数字化国内外研究动态报告（到 2021 年）；③水电站整修，预期产出为开发一种确定水电站最佳整修时间的工具（到 2023 年）。

## **六、核材料物理模型、健康监测和无损显微结构检验**

### **1、目标及重点任务**

该领域重点关注核材料的物理建模、健康监测和无损检验，以将材料微观结构、性能、加工参数、建模与核电厂组件的在役检查和状态检测联系起来。主要包括两个子目标：

**（1）物理建模，开发模型以实现通过实验数据推断安全运行条件。**该领域考虑的物理模型涵盖所有范围，从使用量子力学和物理数学进行电子结构计算，到使用有限元方法求解连续模型。将进行以建模为目的、使用几种先进材料表征技术的实验，在不同尺度下观察材料微观结构特征和变化，对暴露后的材料进行检查以研究物理机理及不同尺度变化之间的相关性。

**（2）材料健康监测和无损结构检验，开发和优化智能无损检验技术，**包括用于材料和组件表征以及结构监测的认知自适应传感器技术。将开发和优化用于材料健

康监测和无损结构检验的机器学习和人工智能算法，处理和分析生命周期各阶段的材料健康监测和无损结构检验数据，并存储在核材料数据库的数字孪生文件中，并开发和应用可预测材料特性的模型。

**(3) 与高性能计算、数据科学和人工智能相关的新范式。**将采用多种方法进行多尺度建模，包括量子力学、物理数学和有限元法等，通过大数据和人工智能来处理、选择和分析各种材料性能表征技术产生的大量数据。

## 2、研究主题及预期产出

本议程已确定了至 2024 年的部分研究主题及预期产出，包括：①用于材料的机器学习和人工智能技术，预期产出为对欧洲最新技术、差距和需求进行汇编（到 2021 年）；②用于材料健康监测和无损结构检验的机器学习和人工智能技术，预期产出为开发和优化能够处理和分析相关数据的机器学习和人工智能算法（到 2022 年）；③数字孪生数据库，预期产出为建立核材料全生命周期数字孪生数据库（到 2024 年）；④用于材料性能预测的机器学习和人工智能技术，预期产出为开发和应用材料特性预测模型（到 2024 年）。

（岳芳）

## 日本 NEDO 支持 CO<sub>2</sub> 合成液体燃料一体化生产技术开发

2 月 22 日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布将在“碳回收和下一代火力发电等技术开发”计划框架下新增两个研发主题<sup>13</sup>，支持开发以 CO<sub>2</sub> 为原料的液体合成燃料一体化生产技术，以降低汽车及飞机的温室气体排放。

此次资助共计投入约 45 亿日元，资助期限为 2020-2024 年，将利用炼油厂和工厂排放的 CO<sub>2</sub> 为原料，结合可再生能源电力、可再生氢气与费托合成（F-T）技术，开发液体合成燃料（汽油、柴油、航空燃料等）一体化生产技术。具体而言，利用可再生能源电力共电解 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 生成合成气，或是以甲基环己烷（MCH）为储氢介质从海外运输可再生氢气用作原料，通过 F-T 合成技术生产液体燃料。两个新增研发主题为：**(1) 下一代费托（F-T）合成技术研发**，将重点研发如下技术：①直接 F-T 合成技术；②F-T 反应产物的选择性调控。**(2) 利用可再生能源电力的液体合成燃料生产技术研发**，将重点研发如下技术：①CO<sub>2</sub> 共电解制合成气技术；②CO<sub>2</sub> 制液体合成燃料一体化生产工艺；③液体合成燃料的利用技术。

<sup>13</sup> CO<sub>2</sub> からの液体合成燃料一貫製造プロセス技術の研究開発に着手。  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101410.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101410.html)



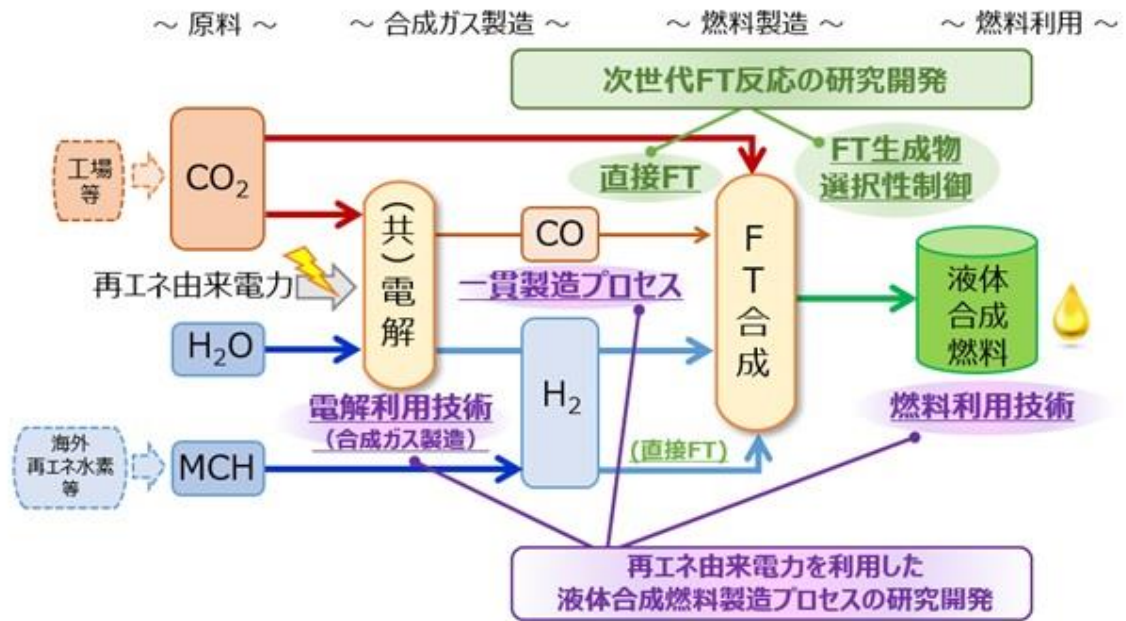


图 1 CO<sub>2</sub> 合成液体燃料一体化技术开发项目示意图

(岳芳)

## 英国资助零排放航空氢能替代动力技术开发

1月27日，英国商业、能源和工业战略部（BEIS）宣布投入8460万英镑支持开发开创性的绿色航空技术<sup>14</sup>，旨在推动航空行业的变革发展，实现方便、快捷的零排放航空飞行。本次资助共支持3个研发项目，重点关注利用氢或电力作为替代动力开发零排放航空技术，以减少航空业对化石燃料的依赖。资助经费由政府 and 工业界各承担一半。资助项目详情如下：

### 1、氢能混动系统（H2GEAR）

H2GEAR项目将公私投入5440万英镑，由GKN航空公司（GKN Aerospace）主导。该项目将开发创新的液氢电动混合推进系统，用于区域航线飞行，并确保可扩大规模至更大型飞机用于更长航线。

### 2、HyFlyer二期项目

HyFlyer二期项目将公私投入2460万英镑，由ZeroAvia公司主导。该项目将扩大其零碳排放发动机规模在19座飞机上进行示范，预计最早可在2023年1月进行首次示范飞行，2023年底实现零碳排放商业飞行。该项目一期于2019年获得资助制造零碳发动机，已成功完成6座氢能混动飞机（全球最大氢能飞机）的试飞。

### 3、电动飞机飞行控制、储能和推进综合系统（InCEPTion）

InCEPTion项目将公私投入560万英镑，由蓝熊系统研究公司（Blue Bear Systems

<sup>14</sup> £84 million boost for technology to power a green aviation revolution. <https://www.gov.uk/government/news/84-million-boost-for-technology-to-power-a-green-aviation-revolution>

Research) 主导。该项目将开发全电动零排放推进系统, 可用于短途飞行的小型飞机, 具备静音、高效等优点。如果扩大规模, 则可为包括无人机、客机在内的各种飞机提供动力, 用于运送大宗物品、区域通勤等, 促进形成新型交通服务。

除此以外, 英国政府还计划通过“未来飞行挑战”(Future Flight Challenge) 资助计划, 总计投资 1.25 亿英镑支持开发未来航空飞行器技术, 促进实现新型电动或自动驾驶飞行器。除了提供研发资助, 英国政府还成立了零排放航空理事会(Jet Zero Council), 该理事会将推动政府和工业界建立合作伙伴关系, 旨在促进可降低航空排放的新型技术和创新方法的发展。

(岳芳)

## 共轭磺胺类有机正极材料实现锂电池比容量突破 520 Wh/kg

最早的有机正极电池材料可以追溯到半个多世纪前, Williams 等人报道了 3V 锂/二氯异氰尿酸原电池。在这一开创性的发展之后, 有机电极材料的研究出现一段短暂的活跃期, 但很快就被无机过渡金属的兴起所淹没。然而, 过去十年随着人们对锂离子电池技术在能量密度、效率和安全性方面的担忧, 有机电池因其更环保、可持续以及对关键原材料供应的依赖性更小, 而备受关注。在过去几十年里, 研究人员提出并研究了各种有机化合物作为电化学储能电极材料。然而, 这些化学物质中并没有多少符合实际要求。这是因为, 这些化学物质的高共价和高电位性质使得 n 型锂材料面临空气中水分的快速水解、分子氧的氧化反应所带来的挑战。迄今为止, 有机锂离子正极(n 型, 含锂和空气稳定) 的最新进展几乎没有。因此, 设计能够满足锂离子正极材料要求的化学材料, 促进有机电池这一新兴领域对性能不断提高的追求显得尤为迫切。

比利时法语区鲁汶大学 Alexandru Vlad 团队报道了利用共轭磺酰胺(CSAs) 扩展有机锂离子正极材料的化学空间结构, 使其比容量与传统  $\text{LiFePO}_4$  电池材料相媲美, 达到 520 Wh/kg。此锂离子正极材料与其他正极材料相比: (1) 合成步骤减少; (2) 在大气环境下, 该正极材料与锂离子构建了稳定的化学键; (3) 在电位接近或高于 3V 时, 仍显示出可逆的多电子氧化还原反应。通过实验与理论研究相结合, 研究人员揭示了磺-胺-亚胺氧化还原单元在 CSAs 中具有丰富的结构-性能-电荷-存储性能的相互作用。根据对 CSAs 结构的设计, 在 2.85-3.45V 电压下, 其可逆容量范围为 100-200 mAh/g, 在活性材料水平表明, 其最高比容量将达到 520 Wh/kg。这些结果证实了 CSAs 是除了共轭羧基体系之外具有氧化还原中心的有机正极材料, 作为新兴有机电池领域的潜在应用材料, 其结构和组成多样性有待进一步探索, 为未来有机电池实际应用提供了新方向。相关研究成果发表在《*Nature Materials*》<sup>15</sup>。

<sup>15</sup> Jiande Wang, Alae Eddine Lakraychi, Xuelian Liu, et al. Conjugated sulfonamides as a class of organic lithium-ion positive electrodes, *Nature Materials*, 2020, DOI: 10.1038/s41563-020-00869-1.

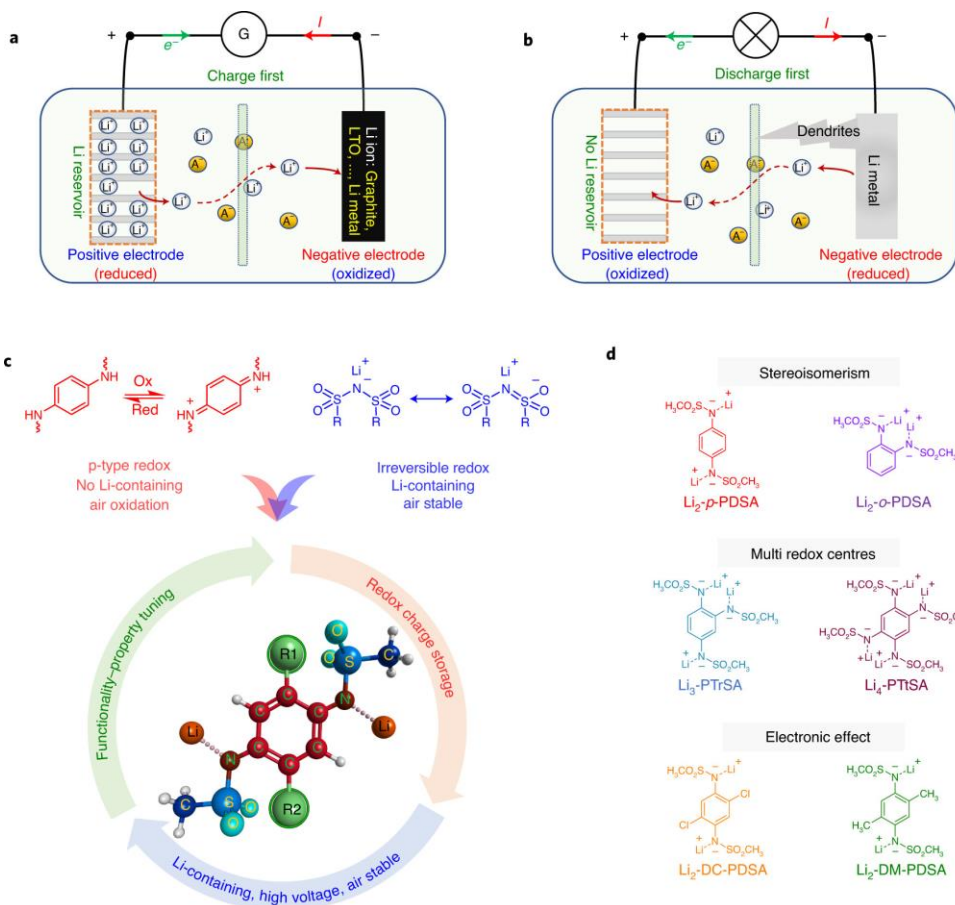


图 1 锂离子电池、锂金属电池工作原理及 CSA 设计的分子原理

(汤匀)

## 同步辐射 X 射线层析成像技术揭示固态电池界面动态演化

固态电池因其替代液体电解质，具有更高的安全性而引起人们的兴趣。此外，固态电解质（SSEs）能够抑制锂枝晶的生长，从而使得锂金属电池得以推广应用。尽管目前具有高离子导电性的 SSEs 得到了一定的发展，但对固体电极/SSE 电池界面的理解和控制已成为固态电池发展中的主要挑战。一般来说，由于 SSE 不能像液体电解质一样流动，与液体电解质电池相比，化学机械降解在固态电池中会更加严重。因此，探究固态电池界面化学-机械转换对于设计固态电池至关重要。

大多数 SSEs 对金属锂是不稳定的，在界面处会分解形成界面层，界面处电子的传输过程对电池的化学机械降解路径起着重要作用。此外，形成钝化间相的 SSEs（如  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  和  $\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$  体系）经常容易受到锂金属穿刺和短路的影响，从而限制了循环电流密度。同时，在氧化还原循环过程中，保持 Li/SSE 界面的机械接触同样具有挑战性。电极材料和间相的形态变化会导致电池界面电子传导损失或其他机械损失。电化学研究表明，锂剥离过程中 Li/SSE 界面的形成从根本上限制了孔洞的形成，孔洞的减少将导致更大的局部电流密度，从而驱动锂金属电极的穿刺。因此，

要探究这一“埋藏于”固态电池中的界面变化过程，需要一种技术能够穿透材料并提供局部的界面信息。X 射线层析成像技术因其空间分辨率低至亚微米尺度，并能将观测材料进行原位重建，而受到研究者的广泛应用。但目前还没有任何 X 射线层析成像实验对电极循环过程中电极与固态电解质界面空隙的形成和 Li/SSE 界面接触进行成像分析，以实现与电化学行为的定量联系。

基于此，美国佐治亚理工学院 Matthew T. McDowell 团队及合作者利用 Operando 同步辐射 X 射线层析成像技术在较高标称电流密度 ( $\geq 1 \text{ mA cm}^{-2}$ ) 下直接观测 Li/Li<sub>10</sub>SnP<sub>2</sub>S<sub>12</sub>/Li 对称电池的动态现象。研究人员首先在两种不同的电流密度下进行原位 X 射线显微成像，观察  $4 \text{ mA cm}^{-2}$  和  $1 \text{ mA cm}^{-2}$  电流密度循环前后重构界面图像，发现在界面处可以看到形成了中间衬度的界面相，其中  $1 \text{ mA cm}^{-2}$  电流密度下，完全循环一次后，界面处的空隙显著增大。随后研究人员

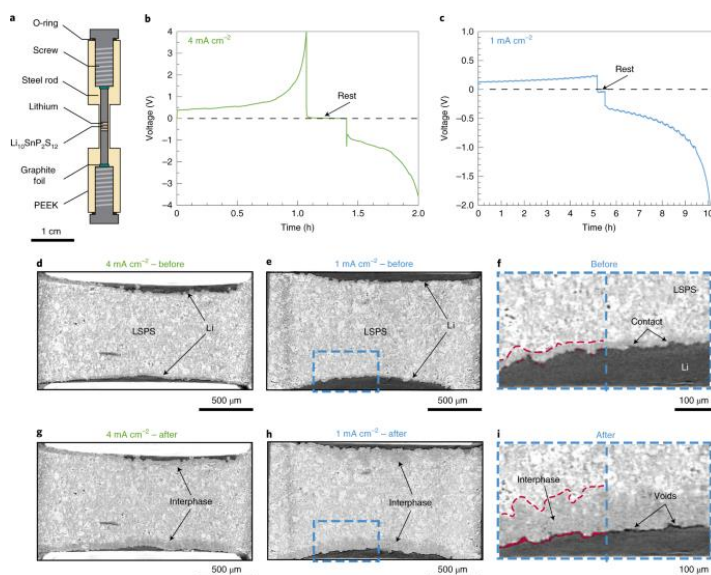


图 1 两种电流密度下固态电池的原位 X 射线成像

探究了电池循环过程中 Li/Li<sub>10</sub>SnP<sub>2</sub>S<sub>12</sub> 界面处空隙形成、界面相演化及体积变化特征。发现电池界面相的形成将引起界面处的相变和显著的体积变化，通过电化学定量分析揭示了电池失效最终是由界面空隙形成及接触损失所导致的电流收缩所驱动的。

该项研究揭示了固态电池中界面的动态演化，直观地展现了导致电池失效的重要因素：界面接触损失和重构过程，观察到化学机械现象对锂离子电池的运行起着关键作用。而 Operando 同步辐射 X 射线层析成像技术可以量化 Li/SSE 界面的接触损失，从而帮助解释充电过程中的丝状锂成核与生长，此发现也为了解固态电池性能衰减机制提供了重要启示。相关研究成果发表在《Nature Materials》<sup>16</sup>。

(汤匀)

<sup>16</sup> John A. Lewis, Francisco Javier Quintero Cortes, Yuhgene Liu, et al. Linking void and interphase evolution to electrochemistry in solid-state batteries using operando X-ray tomography. *Nature Materials*, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00903-2>

## IRENA 和甲醇协会联合发布可再生甲醇创新展望报告

1月27日，国际可再生能源机构（IRENA）和甲醇协会（Methanol Institute）联合发布《创新展望：可再生甲醇》<sup>17</sup>报告，探讨了可再生甲醇<sup>18</sup>在石化原料、交通燃料等主要市场的现状和前景。报告指出，当前可再生甲醇的成本偏高、产量较低，但扩大可再生甲醇在上述领域的应用有助于推动工业和交通部门的脱碳。如果政策措施得当，2050年以前可再生甲醇将具备成本竞争力。为此，报告探索了以合理成本生产可再生甲醇的方法，并为政府和产业界提出了七项建议。主要内容如下：

### 一、全球甲醇市场状况

甲醇是化工行业最重要的基本化学品之一，主要用于生产甲醛、醋酸和塑料等化学产品，此外还可用做车辆、船舶、工业锅炉和烹饪燃料。当前甲醇主要由化石燃料（天然气或煤炭）制取，其全生命周期 CO<sub>2</sub> 排放量约为 3 亿吨/年，约占化学和石化行业排放总量的 10%。过去 10 年，全球甲醇产量几乎翻了一倍，到 2019 年达到约 9800 万吨/年，其中中国煤制甲醇贡献最大。未来甲醇需求将持续增长，到 2025 年产量预计达到 1.2 亿吨/年，到 2050 年将增加至 5 亿吨/年。如果上述产量只由化石燃料生产，到 2050 年 CO<sub>2</sub> 碳排放量将达到 15 亿吨/年。

### 二、可再生甲醇生产现状

甲醇也可由其他含碳原料制成，包括生物质、沼气、废物流和 CO<sub>2</sub>（如通过从烟气中捕集或直接空气碳捕集获取）等。可再生甲醇主要通过两种途径制取（图 1）：

（1）由生物质制生物甲醇，关键的潜在可持续生物质原料包括农林业废料及副产品、垃圾填埋场沼气、污水、城市固废和造纸黑液等；（2）由可再生能源结合碳捕集获取的 CO<sub>2</sub>，如生物质能与碳捕集结合（BECCS）或者通过直接空气碳捕集（DAC）获取，以及使用绿氢（可再生能源电力制氢）和 CO<sub>2</sub> 催化合成甲醇（e-甲醇）。

受到全球气候变化和碳减排压力影响，可再生甲醇逐渐引起关注。当前全球可再生甲醇年产量不足 20 万吨，主要为生物甲醇，大多以其他工业过程中的废物流和副产品流为原料。例如，荷兰正在运营一家利用生物甲烷生产生物甲醇的商业规模工厂；加拿大正在运营一家从城市生活垃圾中生产生物甲醇的工厂；冰岛正在结合地热发电厂生产的可再生氢和 CO<sub>2</sub> 生产 e-甲醇。这些项目都受益于一些有利条件，

<sup>17</sup> Innovation Outlook: Renewable Methanol. <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol>

<sup>18</sup> 可再生甲醇指由可再生能源资源生产的甲醇，如通过生物质转化，或由绿氢（即可再生能源电解制氢）和 CO<sub>2</sub> 合成。

如原料成本较低（如生物甲烷）、与传统工业过程结合（如造纸工业），或拥有非常廉价的可再生能源电力（如地热能）。根据当地条件，还有其他潜在机会用于生物甲醇和 e-甲醇的生产。例如，从甘蔗中提取生物乙醇的一体化生产，将生物质原料和化石燃料混合作为原料，以及热、电和其他化学品联产。将可再生原料（如生物质、CO<sub>2</sub>、绿氢、可再生能源电力）共同输入天然气或煤制甲醇生产设施中，即逐步在传统甲醇生产中引入可再生甲醇生产，是降低传统甲醇生产的环境影响和碳强度的一种过渡策略，这些工厂生产的甲醇被称为低碳甲醇。采用可再生甲醇作为原材料和燃料，将对化工和交通部门的脱碳发挥重要作用。

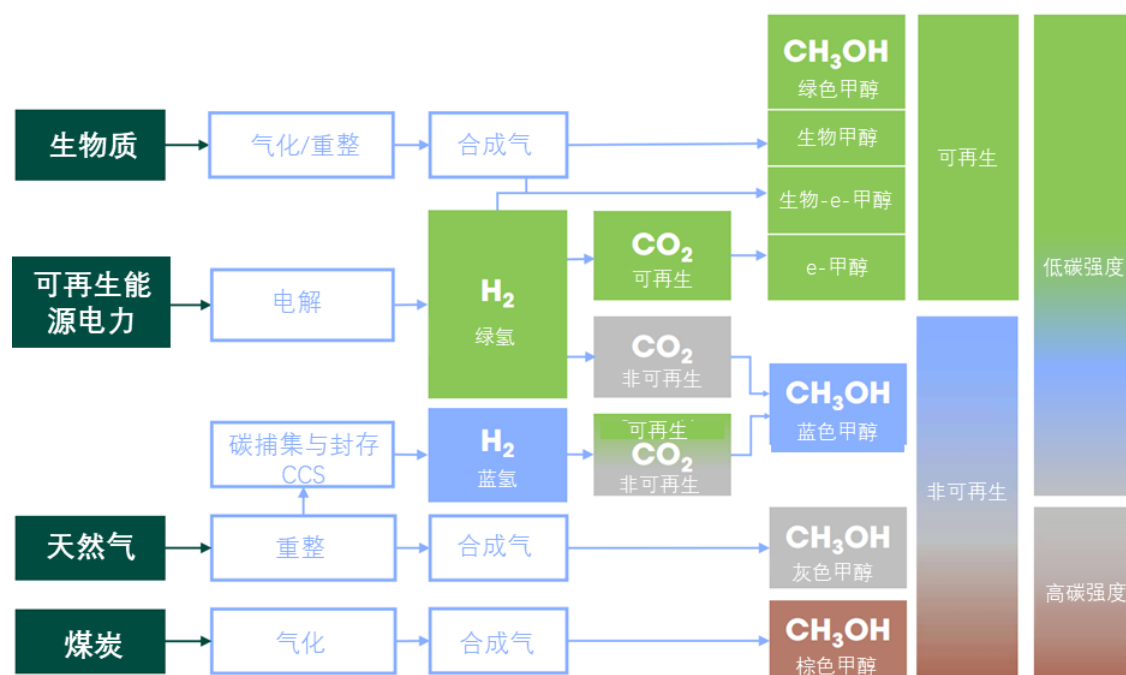


图 1 甲醇主要生产路线

### 三、生物甲醇的生产成本

目前生物甲醇产量较低，实际成本相关数据有限，意味着需要估算其潜在成本。生物甲醇的生产成本取决于原料成本、投资成本和转化过程效率。目前，生物质和城市固废原料的成本在 0-17 美元/吉焦。由于生物甲醇的原料成本较低（大部分在 6 美元/吉焦以内），预计最终生产成本在 320-770 美元/吨范围内，取决于具体项目的资本支出、运营成本和转化过程效率的差异。随着工艺的改进，如果原料价格仍维持较低水平，生物甲醇最终生产成本区间可降至 220-560 美元/吨；如果原料价格较高，最终成本区间也相应较高（如图 2 所示）。其中，利用其他工业过程的废物流（如造纸黑液和城市固废）生产生物甲醇，将简化原料物流和提高工厂整体经济效益。热、电或其他化学品联产也可能提高生物甲醇生产的经济性。短期内，生物质可以被混合送入煤基气化炉，沼气可以送入天然气基甲醇工厂，因此在传统原料中逐步引入生物质作为原料，将使甲醇生产更可持续，生产成本更低。

#### 四、绿色 e-甲醇的生产成本

e-甲醇的成本在很大程度上取决于氢气和 CO<sub>2</sub> 成本。CO<sub>2</sub> 成本取决于捕集来源，例如生物质、工业过程或 DAC。如果 CO<sub>2</sub> 来自 BECCS，其成本为 10-50 美元/吨，e-甲醇的最终生产成本预计为 800-1600 美元/吨。如果通过 DAC 获得 CO<sub>2</sub>，其成本为 300-600 美元/吨，e-甲醇的最终生产成本将在 1200-2400 美元/吨。未来绿氢成本主要取决于可再生能源电力和电解槽成本的进一步降低，以及设备效率和使用寿命的提高。随着可再生能源电力价格下降，预计到 2050 年 e-甲醇最终成本将下降到 250-630 美元/吨（如图 2 所示）。

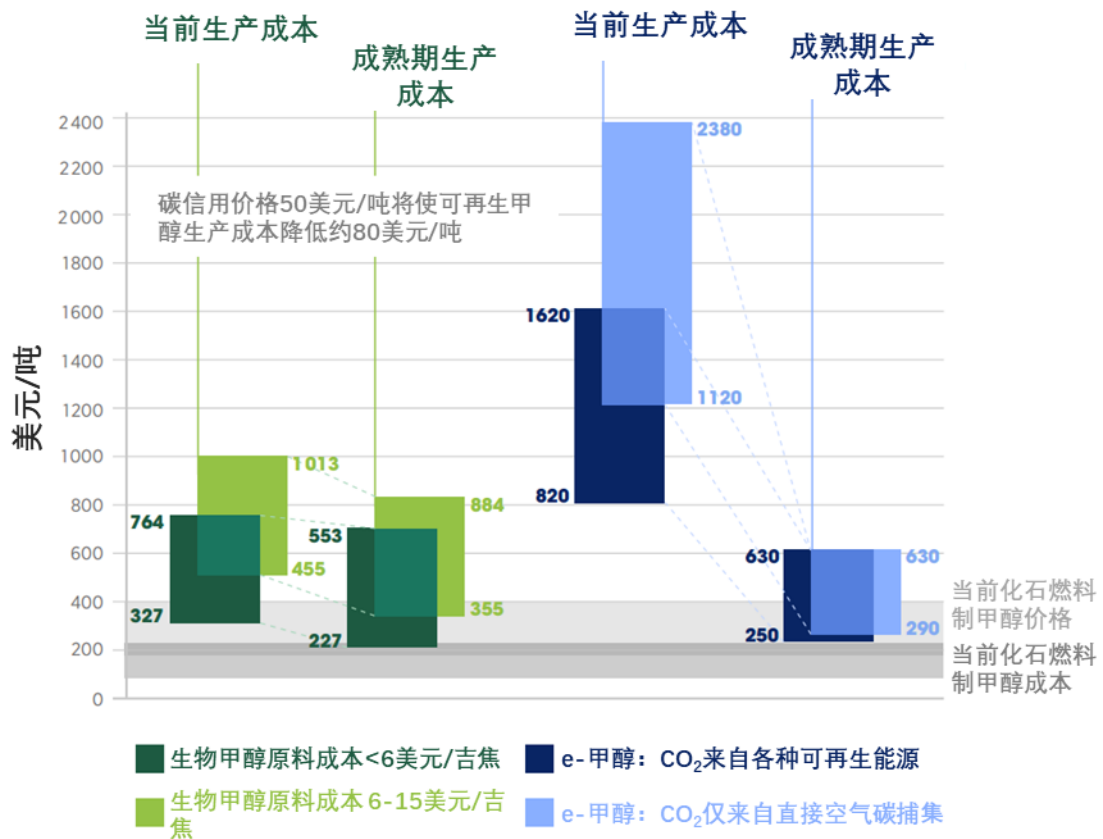


图 2 生物甲醇和 e-甲醇当前和未来生产成本比较

#### 五、提高生物甲醇竞争力的方法

**1、技术成熟和成本下降。**石油和煤的气化是一项成熟技术，已应用于多个大型装置。然而，各种生物质和城市固废的气化技术还处于早期商业化阶段，需要进一步发展才能完全商业化。最理想的情况是，生物甲醇成本接近化石燃料制甲醇。但目前，生物甲醇的生产成本是化石燃料制甲醇的两倍。由于原料成本预计在未来不会大幅下降，通过规模经济和其他改进方法（如工艺改进、改进工厂配置和规模以提高效率和降低成本），减少资本支出将是降低生物甲醇生产成本的最大因素。

**2、可持续和低成本的生物质原料。**生物甲醇生产规模扩大将取决于低成本生物质原料的获取（原料成本在总生产成本中占比可高达 50%）。生物甲醇生产需要可

靠和稳定的原料供应。虽然在某些情况下，生物质原料供应可以在当地获取，但仍有许多国家的项目需要更广泛的原料供应链支持。此外，必须以可持续的方式获取生物质原料。需要对可持续发展进行评估和监测，以充分考虑并管理经济、环境和社会的不利影响带来的风险。到 2030 年，全球可持续生物质最大可用量约为 147 艾焦。世界各地的生物质原料成本可能根据类型和地点的不同而变化，最高可达 17 美元/吉焦，最低为 6 美元/吉焦，主要受到城市固废和残余物可用性的影响。由于生物质有广泛的能源用途和多样的工业原料用途，未来生物甲醇生产将具有潜在竞争力。

## 六、提高 e-甲醇竞争力的方法

**1、丰富且低成本的绿氢。**大规模生产 e-甲醇将取决于低成本的绿氢和 CO<sub>2</sub> 获取途径，以及工厂的资本成本。从成本角度看，制氢所需的可再生能源电力成本和工厂利用率（尤其是电解槽）将是 e-甲醇生产成本的主要影响因素。目前，e-甲醇成本仍然高昂。然而，由于风能和太阳能发电成本在大多数市场上已经能与化石燃料发电相竞争，预计未来几十年可再生能源电力成本将继续下降。因此，e-甲醇成本将显著降低。规模经济效应和电解槽技术创新也将进一步降低 e-甲醇的最终成本。

**2、可持续且负担得起的碳源。**e-甲醇生产所需的 CO<sub>2</sub> 可以从各种来源捕集，包括发电厂和工业废气流（如钢铁和水泥生产）。然而，要实现可再生和可持续发展，CO<sub>2</sub> 必须从生物质燃烧、发酵和沼气等可再生资源中获取。需扩大碳捕集来源，DAC 将是最具潜力的技术，但其成本需要大幅降低。将生物甲醇和 e-甲醇生产集成到单个设施将带来极大益处，生物甲醇生产中产生的过量 CO<sub>2</sub> 可用作生产 e-甲醇的原料。

## 七、发展可再生甲醇的益处与挑战

目前全球对甲醇的需求接近 1 亿吨/年，并且还在持续增长，可再生甲醇的潜在市场很大。除了现有的甲醇用途外，可再生甲醇还可以直接或间接通过甲醇衍生物替代大多数石油基碳氢化合物和石化产品，每年潜在市场需求将达数十亿吨甲醇。可再生甲醇代替化石燃料生产的甲醇可减少温室气体排放，某些情况下还可以减少其他有害物质（如硫氧化物[SO<sub>x</sub>]、氮氧化物[NO<sub>x</sub>]、颗粒物[PM]等）的排放。此外，可再生甲醇是一种多功能燃料，可用于化工和交通部门，如用于内燃机、混合动力汽车、燃料电池汽车和船舶等。甲醇在室温环境下是液体，易于储存、运输和分配，并与现有的基础设施具有较好兼容性，可与传统燃料相混合。利用生物质、CO<sub>2</sub> 和氢气生产甲醇的技术已进入商业化阶段，可以用于生物甲醇和 e-甲醇的生产。

目前，影响可再生甲醇应用的主要障碍是其成本高于利用化石燃料生产的甲醇，而且这种成本差距将在未来一段时间内持续存在。然而，可再生甲醇的价值在于与现有技术相比具有减排潜力。解决工艺差距以及促进大规模生产和使用将有助于降低可再生甲醇生产成本，但这将需要各种政策支持。在正确的支持机制和最佳的生产条件下，可再生甲醇生产成本将实现与化石燃料甲醇相当的生产成本和价格。



## 八、推动向可再生甲醇转型的建议

**1、确保对整个价值链进行系统投资，包括技术开发、基础设施和部署。**甲醇可用于现有内燃机以及更先进的动力总成和化学生产工艺中。现阶段可使用常规的灰色甲醇和蓝色甲醇，随着时间的推移，绿色甲醇的替代规模会逐步扩大。规模经济效应和技术改进将使可再生甲醇在多个行业形成成本竞争力。同时，对可再生甲醇的针对性投资必须得到支持，包括直接补贴和对电解槽、碳捕集和合成设备等生产设施资本成本提供贷款担保。工业界和政府还需要在主要试点项目以及燃料基础设施部署方面建立合作伙伴关系，以降低成本和减轻风险。

**2、通过公共政策建立公平竞争环境，以促进部门融合。**推动电力部门对可再生能源电力的投资以及农业/林业部门对生物质的利用，可扩大规模以减少可再生甲醇的运营成本。还需对 BECCS 或 DAC 捕集 CO<sub>2</sub> 进行投资。可再生甲醇可用于交通和工业领域，各部门可能会寻求通往碳中和的不同路径，公共政策应通过促进部门融合鼓励协同增效。

**3、发挥化学行业的市场力量，重点关注消费产品的碳强度。**可再生甲醇可以成为数百种与日常生活息息相关产品的重要组成部分，通过碳足迹和溢价定价机制，能够为循环经济做出贡献。

**4、明确可再生甲醇如何在“欧洲绿色协议”、经济复苏计划和氢能战略中助力实现碳中和。**应明确碳中和支持战略框架中包括低碳液体燃料和化学原料，如可再生甲醇。

**5、将减少碳排放的政策目标转化为监管和支持措施，以推动可再生甲醇的长期增长。**燃料标准/配额相关监管措施应考虑目标市场的碳强度，实施价格激励措施，以实现稳定的持续增长和投资。

**6、鼓励在制定贸易战略上开展国际合作，以在生产和消费地区创造就业机会并培育具有竞争力的 e-甲醇新产业。**作为一种电力合成燃料和电力合成化学品，可在具有大量可再生能源资源的地区生产 e-甲醇，作为易于运输的液体形式载体。在不同国家投资 e-甲醇工厂将使能源和原料供应多样化，并减少政治风险。

**7、制定政策工具，以确保公平税收，并为可再生甲醇和其他有前景燃料提供长期保底价。**燃油消费税和其他税收应基于能源含量而非数量（如“美元/千瓦时”而非“美元/升”）。可以为包括生物甲醇和 e-甲醇等可再生甲醇在内的可再生燃料提供能源税减免，还可以通过差价合约（CfD）激励投资先进的可再生甲醇生产项目。

（汤匀 岳芳）

## IRENA 预测到 2030 年绿氢将具备经济竞争力

近期，国际可再生能源机构（IRENA）发布《绿氢成本下降：电解制氢规模化以实现 1.5°C 气候目标》<sup>19</sup>报告，分析预测了到 2050 年可再生能源电力电解制氢（即绿氢）的成本趋势。报告指出，由于太阳能和风能成本下降、电解槽性能提升和规模扩大，预计到 2030 年绿氢成本将能够与蓝氢（配备碳捕集的化石燃料制氢）竞争。电解槽作为绿氢生产的第二大成本构成，需加大投入以促进其成本下降。通过降低电解槽成本和优化性能，结合低成本可再生能源电力，长期内将使绿氢生产成本最高降低 85%。报告同时还提出了促进绿氢规模化的阶段化发展路径及关键里程碑，以及政府推动电解槽技术创新的政策建议。主要内容如下：

### 1、电力是绿氢生产的最大成本，但降低电解槽成本亟需提上日程

随着越来越多的国家贯彻推行深度脱碳战略，氢气（尤其是可再生能源电力电解制取的绿氢）将发挥关键作用，尤其是在难以实现直接电气化的行业，如钢铁、化工、长途运输、航运和航空等。除监管法规和市场设计之外，生产成本也是绿氢部署的主要障碍。随着可再生能源成本下降，绿氢成本正在下降，但仍是蓝氢（化石燃料制取并结合碳捕集与封存技术）的 2-3 倍，需要进一步降低成本。绿氢生产的最大成本是可再生能源电力成本，因此，低电力成本是生产有竞争力的绿氢必要条件。这为世界各地拥有大量可再生能源资源的地区生产氢气创造了机会。然而，要使绿氢具备市场竞争力，仅仅确保低电力成本还不足，还需降低电解设施成本。电解槽成本是绿氢生产的第二大成本，通过一些降低成本的策略有望将电解制氢工厂的投资成本短期内降低 40%，长期内降低 80%。

### 2、绿氢生产成本长期内可降低 85%，到 2030 年将在许多市场与蓝氢竞争

通过降低电力成本和电解槽资本成本，以及提高电解槽效率和优化运行，长期内可使绿氢生产成本最高降低 85%（如图 1 所示）。

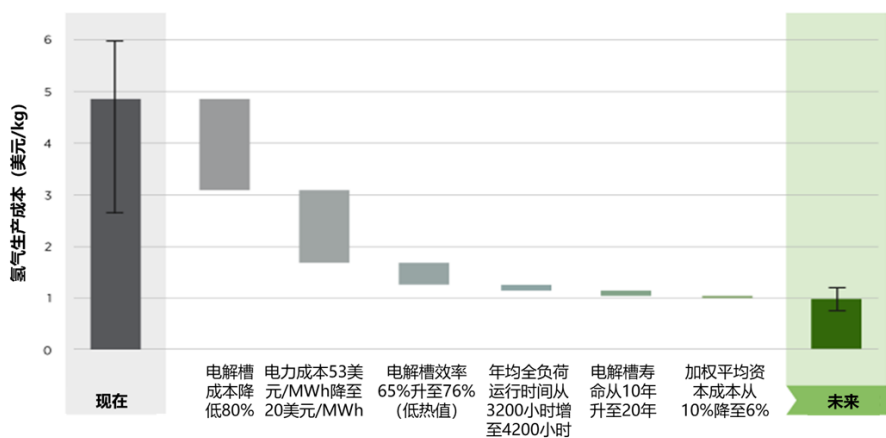


图 1 未来制氢成本降低要素分解（单位：美元/kg）

<sup>19</sup> Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>

报告预测了 2020 年至 2050 年间不同电价及电解槽成本的绿氢成本下降情景（如图 2 所示）。在最佳情景下，通过使用低成本可再生能源电力（20 美元/兆瓦时），目前部分地区绿氢生产成本已经可以与蓝氢竞争。低电价对于生产具有竞争力的绿氢至关重要，即使电解槽成本降低也无法弥补高电价带来的高成本。通过低廉的可再生能源电力和电解槽的积极部署，2040 年之前绿氢成本可能低于所有情景下的蓝氢成本。如果在未来十年内迅速扩大规模，预计到 2030 年绿氢将在许多国家（例如电价为 30 美元/兆瓦时的国家）和应用领域开始具备与蓝氢相当的竞争力。

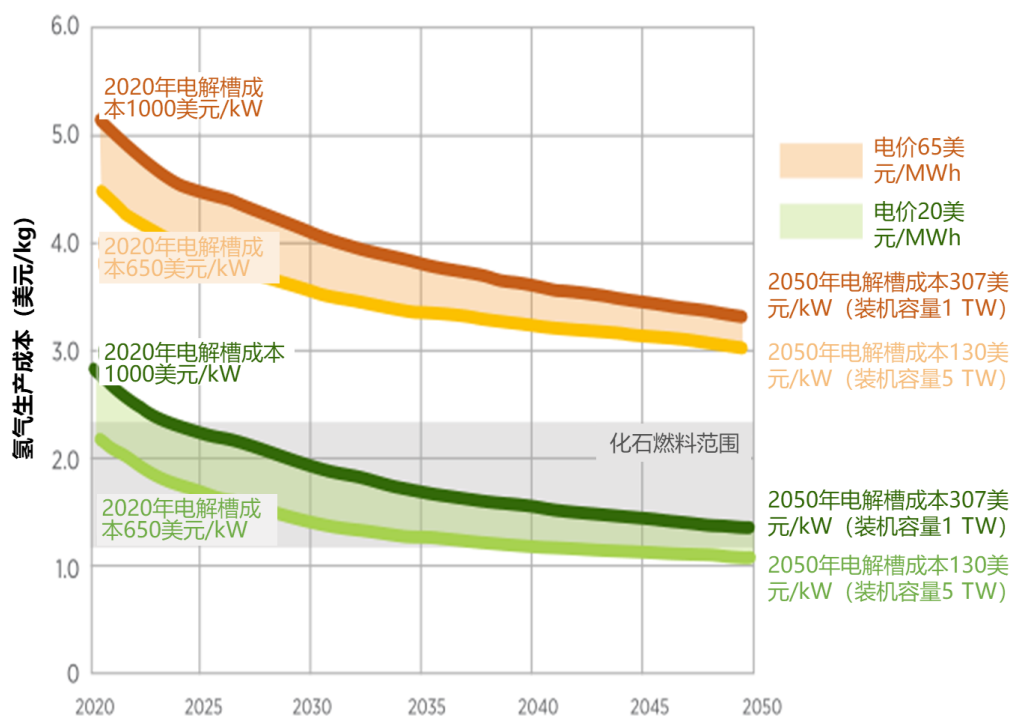


图 2 2020-2050 年不同电价及电解槽成本变化下的绿氢成本预测（单位：美元/kg）

### 3、影响电解槽成本的因素

**(1) 电解槽设计和建造。**模块尺寸增加和电堆制造创新对电解槽成本有重大影响。电解制氢设施规模从目前的 1 兆瓦提高到 20 兆瓦可以降低超过 1/3 的成本。然而，成本并不是影响设备规模的唯一因素，因为每种技术都有自己的电堆设计，不同制造商的电堆设计也各不相同。系统优化设计还需考虑效率和灵活性等系统性能。

**(2) 规模经济。**在吉瓦规模设备的生产设施中，电堆生产的自动化可以实现成本的逐步降低。在较低产量下，电堆约占总成本的 45%；而在较高产量下，电堆成本占比可降至 30%。对于质子交换膜电解槽，实现规模经济的临界点约为 1000 台/年（设备规模为 1 兆瓦），在这种情况下，规模化可以使电堆制造成本降低近 50%。除了电解槽之外的其他辅助系统组件成本与电解槽成本同样重要，可通过系统组件和电解厂设计的标准化来降低成本。

**(3) 材料成本。**稀有材料可能成为降低电解槽成本和扩大规模的障碍。用于质子交换膜电解槽的铱和铂原料当前产量仅可支持 3-7.5 吉瓦/年的制造能力，而到

2030年预计产量需求约为100吉瓦/年。然而，碱性电解槽制造商已经在开发避免使用此类材料的解决方案，并且已有技术能够显著降低质子交换膜电解槽对上述材料的需求。阴离子交换膜电解槽技术不需要稀有材料。

**(4) 运行效率和灵活性。**从经济角度来看，电力供应负荷较低时效率损失大，限制了系统的灵活性。具有多个电堆和电源单元的模块化工厂设计可以解决这个问题。此外，压缩机也会是影响灵活性的一个障碍，因其可能无法像电堆那样快速地改变生产率。一个替代方案是采用一体化设计，通过优化和集成储电和储氢设备，使制氢工厂具备足够容量应对需求变化。如果这些服务的价值得到充分认可和变现，绿氢生产将为电力系统提供极大的灵活性。氢气将在灵活性方面发挥关键作用，因为氢气可用于可再生能源的季节性存储，没有任何重要的替代能源可与之竞争。尽管将带来巨大的效率损失，但这是在严重依赖波动性能源资源的电力系统中实现100%可再生能源发电的必要基础。

**(5) 工业应用。**电解系统的设计和运行可以针对具体应用进行优化，包括：需要稳定供应且低物流成本的大型行业用户；可获得低成本可再生能源的大规模离网设施，但为终端用户输送氢气会产生大量费用；分散的小规模生产需要小型模块以提高灵活性，同时降低物流成本，从而补偿电解槽较高的单位容量投资成本。

**(6) 学习率。**一些研究表明，燃料电池和电解槽的学习率与光伏类似，可以达到16%-21%，大大低于过去10年光伏36%的学习率。基于这一学习率水平并考虑到实现1.5°C气候目标需要采取的部署路径，到2030年电解槽成本可降低40%以上。

#### 4、降低电解槽成本的策略

当前各类电解槽技术的成本和性能不尽相同，碱性电解槽和质子交换膜电解槽技术最为成熟，已经实现商业化。每种技术都有自己的竞争优势：碱性电解槽的安装成本最低；质子交换膜电解槽占地面积较小，并具有更高的电流密度和输出压力；固体氧化物电解槽的电耗率最高。随着技术创新和大规模部署的发展，不同电解技术成本和性能的差距将会逐渐缩小。然而，由于规模、应用和交付距离不同，预计系统成本仍将处于很大范围内。通常，系统成本不仅包括电堆，还包括辅助系统、电源整流器、氢气净化系统、水供应和净化、冷却和调试，但不包括运输、土建工程和场地整备等。

**(1) 降低电解槽电堆成本的主要策略。**在电堆级别，主要有两种策略可以降低成本：①电堆设计和单元组成，包括使用非关键材料，重新设计电堆以实现更高效率、更高的耐用性（更长寿命）以及增加电流密度（更高的生产率）；②增大模块尺寸，这可以使部分辅助系统组件达到规模经济，应在实现大规模制造、标准化和可复制的小模块尺寸与实现大幅降低辅助系统组件成本的大模块尺寸之间进行权衡，同时尽量减少部署组件数量并加快部署时间。

(2) 降低电解槽系统成本的主要策略。在系统级别，主要有两种策略可以降低成本：①扩大制造规模，需要通过高通量、自动化制造来减少各组件成本，如催化剂涂覆膜的卷对卷工艺、金属板的先进涂覆工艺等；②边做边学(Learning-by-doing)，涉及标准化、应用部署中学到的经验教训以及执行多个项目来优化设备安装。

### (3) 电解槽技术性能现状及 2050 年目标

对于质子交换膜电解槽 (PEME)、碱性电解槽 (AE)、阴离子交换膜电解槽 (AEME) 和固体氧化物电解槽 (SOE)，报告给出了各技术的关键技术和经济性指标现状及 2050 年目标供参考，如表 1 所示。

表 1 不同电解槽技术的关键技术及经济性指标现状和 2050 年目标

指标	2020 年现状				2050 年目标			
	PEME	AE	AEME	SOE	PEME	AE	AEME	SOE
额定电流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	1-2	0.2-0.8	0.2-2	0.3-1	4-6	>2	>2	>2
电压范围 (限值, V)	1.4-2.5	1.4-3	1.4-2.0	1.0-1.5	<1.7	<1.7	<2	<1.48
运行温度 (°C)	50-80	70-90	40-60	700-850	80	>90	80	<600
单元压力 (bar)	<30	<30	<35	1	<70	>70	>70	>20
负荷范围 (%)	5-120	15-100	5-100	30-125	5-300	5-300	5-200	0-200
氢气纯度 (%)	99.9-99.9999	99.9-99.9998	99.9-99.999	99.9	99.9-99.9999	>99.9999	>99.9999	>99.9999
电压效率(低热值, %)	50-68	50-68	52-67	75-85	>80	>70	>75	>85
电耗率 (电堆, kWh/kg)	47-66	47-66	51.5-66	35-50	<42	<42	<42	<35
电耗率 (系统, kWh/kg)	50-83	50-78	57-69	40-50	<45	<45	<45	<40
寿命 (电堆, 万小时)	5-8	6	>0.5	<2	10-12	10	10	8
电堆单元规模	1 MW	1 MW	2.5 kW	5 kW	10 MW	10 MW	2 MW	200 kW
电极面积 (cm <sup>2</sup> )	1500	10000-30000	<300	200	>10000	30000	1000	500
冷启动(至常规负荷, 分钟)	<20	<50	<20	>600	<5	<30	<5	<300
资本成本 (电堆, 美元/kW), 最小 1 MW	400	270	-	>2000	<100	<100	<100	<200
资本成本 (系统, 美元/kW), 最小 10 MW	700-1400	500-1000	-	-	<200	200	<200	<300

### 5、扩大绿氢规模的发展路径及关键里程碑

报告认为，向低成本绿氢发展并非遵循固定时间，而在于达到一些关键里程碑，其实现速度取决于政府的目标和实施举措，反过来将促进电解槽制造和部署的规模扩大和竞争加剧。具体而言，实现绿氢成本降低的长期目标将经过三个阶段，即市场建立（阶段1）、规模扩大和改进设计（阶段2）、全球市场（阶段3），各阶段将需要实现一些里程碑进展，如图3所示。

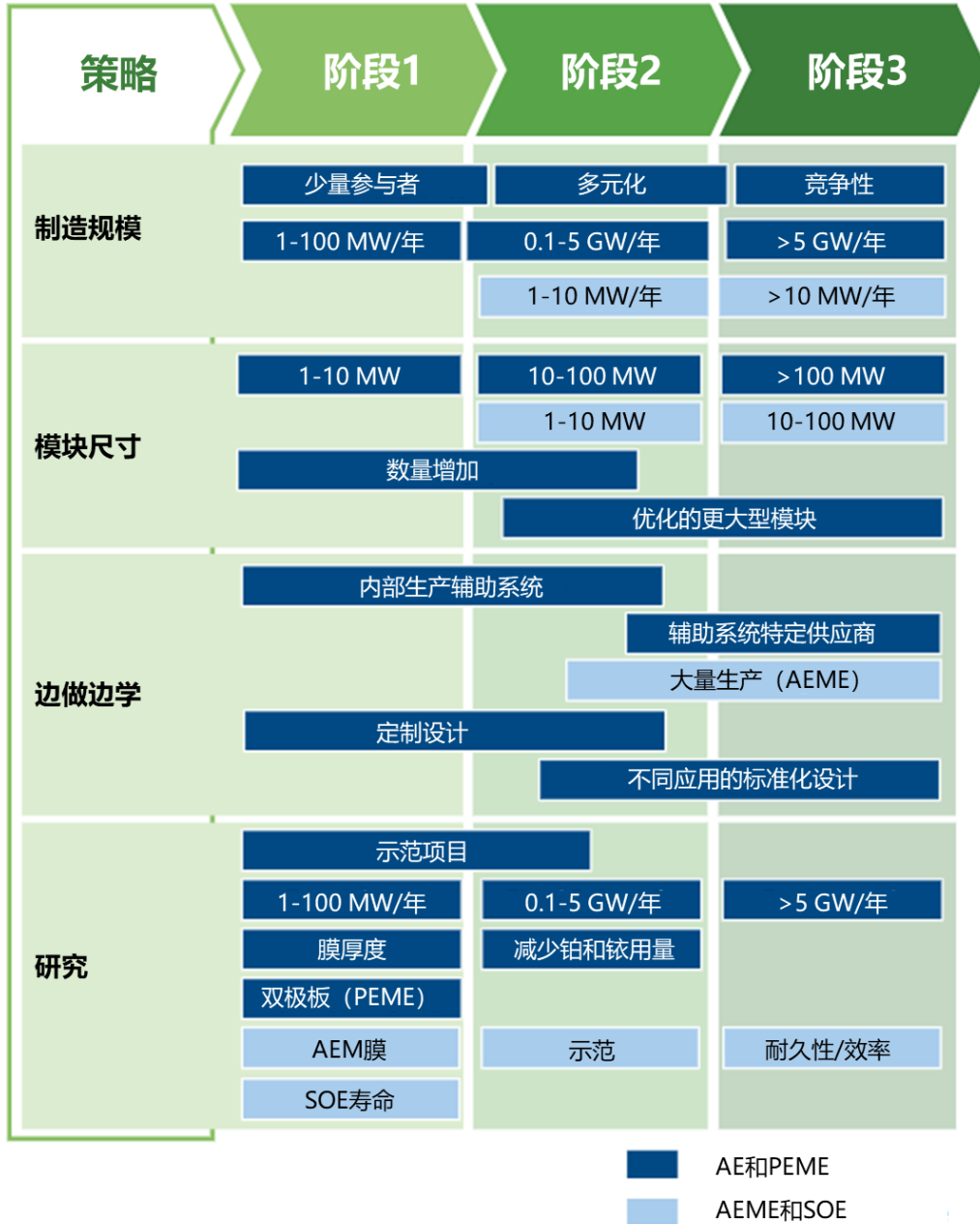


图3 电解槽规模化部署三阶段降低成本策略的里程碑

## 6、政府应通过长期政策支持技术创新以促进绿氢规模化发展

创新对于降低成本和提高电解槽的性能至关重要，应通过创新达到如下目标：

①通过标准化和简化制造和设计来降低成本，以实现工业化和规模化；②提高效率，以减少制氢所需的电量；③提高耐用性，以延长设备寿命，并通过提高产量分摊电解槽设施成本。政府可以发布明确的长期信号来支持电解槽创新，包括：

（1）推动对绿氢生产、运输和利用的投资，包括有助于提高其竞争力的所有领域。降低技术成本和改进性能，在材料供应、商业模式和贸易中使用通用标准和认证。

（2）建立监管法规并进行市场设计，以支持创新投资并扩大绿氢生产。包括设定制造或部署目标，实行税收优惠，在难以脱碳行业进行强制性配额，以及实行其他降低风险的机制等方法，同时使新的商业模式能够保证私营部门大规模投资时可预测的盈利。

（3）支持研究、开发和示范，以减少质子交换膜电解槽制造中铱和铂稀有金属的使用；将所有碱性电解槽转变为无铂和无钴技术；强制性减少稀有材料的使用，作为扩大制造规模的一个条件。

（4）推动整个氢能价值链跨区域、跨部门和利益相关方之间的协调，设定共同目标。

（高天 岳芳）



## 《洁净能源科技动态监测快报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

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

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：[energy@whlib.ac.cn](mailto:energy@whlib.ac.cn)