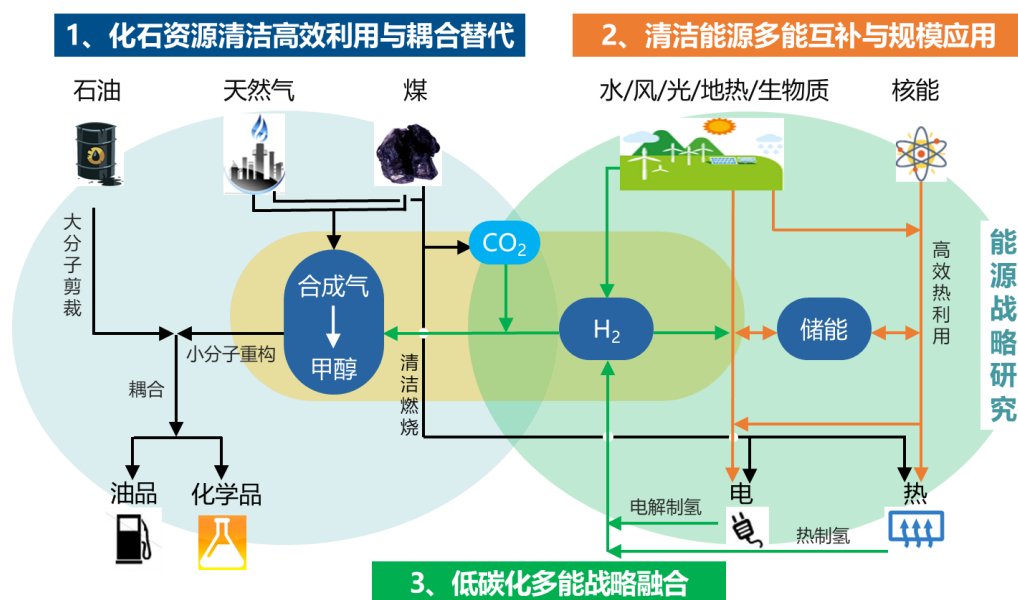




# 洁净能源科技动态监测快报

2022 年第 07 期（总第 33 期）



## 本期看点

- IEA 亚洲低排放煤炭技术报告：煤气化技术专题
- 欧盟委员会发布《欧盟太阳能战略》
- 欧盟发布 2022-2025 年综合能源系统研发实施计划
- 麻省理工学院发布《储能系统的未来》研究报告
- IEA 《世界能源投资报告 2022》剖析全球能源投资态势
- IRENA：可再生氨发展势头强劲 竞争力仍有待提升

## ◆ 化石资源清洁高效利用

IEA 亚洲低排放煤炭技术报告: 煤气化技术专题 .....	2
欧美等国联合启动“全球甲烷承诺能源路径”计划 .....	5
富羟基双壳纳米盒助力高效 CO <sub>2</sub> 光还原制合成气 .....	7
基于 CuO 载氧体的固体碳燃料化学链燃烧反应机理研究 .....	8
全光学通路试验台助力检测燃烧过程中超细颗粒物分布 .....	10
燃煤电厂集成新型储热系统的设计与性能评价 .....	11

## ◆ 清洁能源多能互补

欧盟委员会发布《欧盟太阳能战略》 .....	12
美国政府利用《国防生产法》加速国内清洁能源技术发展 .....	16
美国能源部资助规模化生物精炼和生物燃料减排技术 .....	17
界面优化实现钙钛矿-硅叠层太阳能电池认证效率突破 29.3% .....	18
全无机钙钛矿太阳能电池创造 17.4% 转换效率新纪录 .....	18
聚丙烯酰胺水凝胶助力高效稳定太阳能光电解制氢 .....	19

## ◆ 低碳化多能融合

欧盟发布 2022-2025 年综合能源系统研发实施计划 .....	21
美国能源部资助 5700 万美元支持工业减排和清洁能源制造 .....	25
美国能源部资助 2500 万美元支持开发清洁氢能发电技术 .....	26
英国研究与创新署 2500 万英镑支持动力电池技术研究 .....	27
利用顺序分解无烧结合成法制备高性能固态电池 .....	27
新型 Pd-Cu 催化剂助力酸性介质中 CO <sub>2</sub> 高效电催化转化 .....	29

## ◆ 能源战略研究

麻省理工学院发布《储能系统的未来》研究报告 .....	31
IEA《世界能源投资报告 2022》剖析全球能源投资态势 .....	33
IRENA: 可再生氢发展势头强劲 竞争力仍有待提升 .....	40

## 本期概要

国际能源署 (IEA) 煤炭工业咨询委员会 (CIAB) 工作组发布《亚洲净零未来进程中低排放煤炭技术的作用》报告, 其中第 7 章针对煤气化制化学品技术进行了详细分析, 包括: (1) 煤气化工艺, 包括利用甲醇作为中间体制烯烃的 MTO 技术、基于合成气的费托技术、煤直接液化生产燃料等; (2) 中国煤制天然气和氢气发展现状; (3) 国外煤制化学品和燃料发展现状; (4) 煤焦油和沥青制化学品发展现状; (5) 煤气化技术实现脱碳目标的对策建议。

欧盟委员会发布《欧盟太阳能战略》, 作为 REPowerEU 计划的一部分, 其目标在 2025 年实现太阳能光伏发电装机量超过 320 吉瓦 (较 2020 年增加一倍以上), 到 2030 年装机量达到近 600 吉瓦, 具体措施包括: (1) 通过“欧洲太阳能屋顶倡议”快速促进光伏发电的大规模部署; (2) 缩短许可发放流程, 扩大公共领域太阳能装置的安装规模; (3) 建立涵盖整个可再生能源领域的欧盟大规模技能伙伴关系; (4) 成立欧洲太阳能光伏产业联盟, 建立欧洲太阳能工业生态系统。

欧洲能源转型智能网络技术与创新平台 (ETIPSNET) 公布《2022-2025 年综合能源系统研发实施计划》, 取代在 2020 年发布的 2021-2024 年研发实施计划, 明确了到 2025 年的研发资助重点。该实施计划基于欧盟 2021 年 7 月提出的“减碳 55%” (Fit for 55) 一揽子计划目标, 并考虑了近期地缘政治紧张局势对能源市场的影响, 强调需加速研发创新以促进能源安全和能源转型。同时, 该实施计划还宣布 2020 年发布的《综合能源系统 2020-2030 年研发路线图》也将更新为 2022-2031 年路线图, 预计在 2022 年年底发布。本次实施计划将投入 10 亿欧元围绕 9 大应用场景实施 31 项研发创新优先项目。

麻省理工学院发布《储能系统的未来》研究报告指出, 到本世纪中叶, 可再生能源发电有望取代化石燃料发电, 部署不同的储能技术可以优化和利用不断增长的可再生能源发电: 报告研究和分析了各种储能技术 (电化学储能、储热、化学储能和机械储能) 关键性能、应用领域和成本指标等, 呼吁应积极支持长时储能技术、多类型电化学储能技术, 以实现到 2050 年电网系统完全脱碳。

国际能源署 (IEA) 发布《世界能源投资报告 2022》, 指出 2021 年世界能源投资总额约 2.22 万亿美元, 并预测 2022 年世界能源投资总额将增长 8%, 达到 2.4 万亿美元。其中, 能源投资增长幅度最大的是电力部门, 主要投资于可再生能源和电网领域, 而发达国家和中国是推动全球能源投资增长的最主要力量。此外, 报告指出能源安全 and 大宗商品价格的不断增长促使对化石燃料供应链投资的增加, 但只有加大对清洁能源投资, 实现能源清洁转型, 才是保障能源安全, 实现全球气候目标的唯一持久解决方案。

国际可再生能源机构 (IRENA) 与氨能源协会 (AEA) 联合发布报告《创新展望: 可再生氨》, 指出在未来几十年内, 氨作为氢载体、动力燃料的新市场具有重要发展潜力, 特别是在航运部门: 在 1.5°C 情景下, 到 2050 年全球氨市场需求预计将达到 6.88 亿吨, 这些氨必须是低碳的可再生氨。目前生产可再生氨的成本高于采用 CCS 技术的化石氨生产成本, 但从 2030 年开始, 可再生氨的成本有望与采用 CCS 技术的化石氨持平。报告最后对促进氨生产向可再生氨过渡提出了十大行动建议。

# 化石资源清洁高效利用

## IEA 亚洲低排放煤炭技术报告：煤气化技术专题

近期，国际能源署（IEA）煤炭工业咨询委员会（CIAB）工作组发布《亚洲净零未来进程中低排放煤炭技术的作用》报告<sup>1</sup>，提出支持先进低排放煤炭技术创新以应对亚洲减排挑战。报告第 7 章针对煤气化制化学品技术进行了详细分析，关键点如下：

### 一、煤气化工艺

煤气化生产化学品和燃料的主要途径有 3 条：①利用甲醇作为中间体制烯烃的 MTO 技术；②基于合成气的费托技术；③煤直接液化生产燃料。煤气化的技术已经成熟，但提高合成气的生产和运行效率的相关工艺设计仍在不断发展。例如，通用电气/德士古（General Electric/Texaco）的水煤浆气化炉目前有 70 多家工厂正在使用（尤其是早期工厂）；壳牌干粉加压流化床反应器由空气产品公司（Air Products）部署，即将用于最近宣布的印度尼西亚项目。其他反应器设计包括西门子干粉气流床反应器、部署在南非 Sasol 的 Lurgi 反应器、Synthesis Energy 的 U-GAS 气化炉，以及由中国设计的 HT-L 航天粉煤加压气化技术，该反应器在中国的粉煤气化工艺中具有很强的竞争力。

自 2018 年以来，扩建和新建煤化工项目一直持续推进。尽管煤气化过程主要是将碳元素固定在化工产品中，但碳排放强度仍然是行业的首要关注点。通常情况下，生产 1 吨甲醇需要 2.5 吨煤，而大量的碳以二氧化碳的形式被释放。同样，对于合成甲烷，煤炭中超过一半的碳以 CO<sub>2</sub> 的形式排放，生产 1 吨合成天然气需要约 2.5 吨煤，二氧化碳排放量接近 8 吨（考虑到灰分）。

中国引领着全球煤气化技术的发展，受到“一带一路”倡议的影响，在非洲和亚洲其他地区也建立了新的煤基化学品和燃料工厂。最近印度计划投资 100 亿美元用于煤气化生产化学品的设施建设，项目设备主要采用空气产品公司的技术生产尿素和燃料。煤制化学品和燃料行业正在以前所未有的速度扩张，部分原因是许多地区的电力行业都在放弃使用煤炭，从中长期来看，可能会抑制煤炭原料的价格。

### 新型煤化工设备——气化和液化

中国目前在建的煤化工工厂有 150 家，另有 220 个项目已经公布，预计将在 2023 年底开始启动建设。合成气制甲醇是 MTO 工艺的基础，到 2024 年预计需要气化 1.25

<sup>1</sup> 本刊第 4 期报道了报告总体关键点，第 5 期报道了共燃技术专题，第 6 期报道了发电技术专题。  
The role of low emission coal technologies in a net zero Asian future. <https://www.sustainable-carbon.org/report/the-role-of-low-emission-coal-technologies-in-a-net-zero-asian-future/>

亿吨煤来生产 5200 万吨聚酯。因此每年需增加 1000 万吨的甲醇产量，来用于生产烯烃和单乙二醇（MEG，聚酯纤维的生产原料）。生产的烯烃多用于制备聚乙烯和聚丙烯，到 2023 年年产量将增加 1000 万吨，使当前产量翻番。

煤炭转化为燃料的步伐也在加快，2021 年实现每年甲醇制汽油（MTG）的产能为 100 万吨。总体而言，费托合成和煤液化相关产品的年产量将增至 3300 万吨。对于重质组分，煤加氢和煤焦油技术计划到 2023 年将产能再增加 1 亿吨。

中国的煤化工战略包括部署生产聚氯乙烯（PVC）、纯化对苯二甲酸（PTA）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET、苯乙烯、芳烃、硝酸、三聚氰胺（由尿素制成）和丙酸等）等设施。截至 2019 年底，中国已经在煤化工领域投资 850 亿美元，而且这一数字还将继续增加。例如，近期恒力宣布投资 200 亿美元，用于建设将煤炭通过乙二醇中间体转化为聚酯的项目，该项目可以将 2000 万吨煤转化为 900 万吨的聚酯，计划 2025 年投入运营。煤化工领域的其他龙头企业还包括神华集团和中国石化。例如中国石化的一个旗舰项目是年产 170 万吨的煤基 MTO 项目，交付了产能为 505563 立方米/小时（以  $\text{CO}+\text{H}_2$  计）的合成气设备和产能为每年 180 万吨的甲醇设备（以 100% 甲醇计）。

## 二、中国煤制天然气和氢气发展现状

近年来，中国对天然气的需求量逐年上升，2021 年煤制天然气（SNG）产能达到了每年 650 万吨，2024 年之前将增至每年 1 亿吨。如果将煤转化为氢并随后用来合成氨，那么到 2021 年需要增加 1020 万吨的产能，到 2024 年可能增至 2000 万吨。由  $\text{CO}_2$  和氨合成的尿素可以用作肥料，为从气化厂捕集  $\text{CO}_2$  提供减排方案。目前，从陕西的工业设备中回收  $\text{CO}_2$ ，利用可再生能源产生的氢气，通过日立造船（Hitachi Zosen）的甲烷生产技术每年可生产 350 万吨的甲烷，由于从煤气化工厂回收  $\text{CO}_2$  比发电厂更容易，因此，该方法将是部分  $\text{CO}_2$  封存的一种替代策略。

## 三、国外煤制化学品和燃料发展现状

部分国外的气化项目如表 1 所示，其中一些与“一带一路”倡议有关，旨在向发展中国家推广煤炭技术，鼓励采用本国煤炭而不是进口的石油和天然气。空气产品公司计划投资 20 亿美元建立位于印度尼西亚加里曼丹的年产 200 万吨煤制甲醇工厂（600 万吨/年原料），以减少石油进口并应对印度尼西亚煤炭出口预期下降的影响。该工厂将销售甲醇，以生产从甲醛中提取的热固性聚合物，这些项目仍在评估中。目前二甲醚的生产成本仍在 490 美元/吨左右。这个数字还不包括预计将达到 20-40 美元/吨  $\text{CO}_2$  的碳捕集成本。Coal India 计划在孟加拉的丹库尼建造年产 60 万吨的煤制甲醇工厂，甲醇与汽油以 15:85 的比例形成混合燃料，避免了 100% 甲醇的相关安全问题。总体而言，印度每年将消耗 1 亿吨煤用于煤气化制燃料、肥料和化学品，预计未来 10 年总投资 550 亿美元，以建立一个新的煤化工行业。

表 1 国外煤化工和燃料工厂的发展情况

位置	产品	规模
印度	燃料	十年内投资 550 亿美元，煤炭年消耗量 1 亿吨
孟加拉丹库尼	甲醇（与汽油混合）	年产 60 万吨
印度尼西亚东加里曼丹	甲醇	年消耗 600 万吨煤，产能 200 万吨
印度尼西亚苏门答腊	二甲醚	20 亿美元投资用于煤制甲醇和二甲醚

#### 四、煤焦油和沥青制化学品发展现状

从煤焦油和沥青中间体可获得的化学品有 1000 多种，表 2 中提供了主要产品的详细信息。上部分为煤焦油馏分衍生品，下部分为沥青产品。石脑油衍生物等可用作混凝土添加剂的馏分产品的需求也在增加。

表 2 煤焦油和沥青主要产品及其用途

焦油馏分产品				
氢能作为城市燃气	杀虫剂（木馏油）	石炭酸（石油生产的苯酚）	CO <sub>2</sub> （灭火器、苏打水）	杀菌剂（去虱洗发水）
樟脑丸（限制国家）	食品防腐剂（某些国家使用柠檬黄）	乙炔（仅限中国，与电石水解竞争）	溶剂（苯）	硫磺
石脑油合成的橡胶	油漆颜料	木材防腐剂	定香剂	分散剂
石脑油衍生物（混凝土添加剂、农用化学品和清洁剂）	医学（用于皮肤病的角质塑料）	纤维（人造丝、人造纤维、尼龙）	洗发水和面霜（湿疹膏、煤焦油洗发水、去头屑洗发水）	
消毒剂	发酵粉	氨水	清漆	橡胶粘合剂
沥青产品				
碳黑	沥青油	清洗用油	碳纤维	电池（电极）
绝缘材料（碳泡沫）	碳纤维（绝缘和结构材料）			

#### 五、煤气化技术实现脱碳目标的对策建议

煤气化是中国乃至整个亚洲地区一项重要的技术，因此如果要想实现近零排放目标，减少化工行业的 CO<sub>2</sub> 排放，特别是在煤气化制化学品方面的相关措施至关重要。如前文针对钢铁、水泥和铝行业所述，基于一系列方法，包括：①“燃料”转换为氢氨、生物质和通过气化发电产生的电力等低排放能源；②提高能源效率；③部署当前最佳和未来的创新技术，包括碳捕集、利用与封存（CCUS）。

短期内，通过发展先进的气化技术来避免产能下降，优化工业基础设施来提高煤化工能效，每年可减少 CO<sub>2</sub> 排放 1.2-2.4 亿吨。从中期来看，燃料替代、CCUS 和国际能源合作将变得越来越重要。由于气化器的合成气流中 CO<sub>2</sub> 浓度和分压均较高，因此使用 Selexol 和 Rectisol™ 型技术的预捕集系统可能比基于胺的后捕集技术更有效。

其他针对化学品生产的措施包括：（1）氨：合成氨过程中每年产生的 0.5 亿吨 CO<sub>2</sub> 通常被转化为尿素肥料。但是尿素在使用时会将 CO<sub>2</sub> 重新释放到大气中。为了避免这一现象，尿素可以用绿氨生产的硝酸盐肥料代替，或者使用低排放氢气来生产氨。其它的创新策略包括甲烷分解和高温电解，这些方法仍处于实验室研究阶段。

（2）乙烯：乙烯是一种用于制造塑料的基础化学品。乙烯的生产同样会排放 CO<sub>2</sub>，因此塑料回收能有效降低与乙烯生产相关的碳排放。此外，塑料制造商可以使用低排放氢气或生物质来加热热解炉，实现减排目标。

（朱丹晨 汤匀）

## 欧美等国联合启动“全球甲烷承诺能源路径”计划

6 月 17 日，欧盟宣布与美国及其他 11 个国家首次启动“全球甲烷承诺（GMP）能源路径”计划，以强化石油和天然气部门的甲烷减排，推动全球气候行动和能源安全<sup>2</sup>。目前，石油和天然气部门约占所有人为甲烷排放量的四分之一，因此，减少石油和天然气行业的燃烧和甲烷排放对应对气候变化、改善健康环境具有重要作用。具体内容如下：

### 一、各国和国际组织宣布提供 5900 万美元的专用资金和实物援助，以支持计划的实施

包括：①400 万美元用于支持世界银行“减少全球天然气空燃伙伴关系（GGFR）”计划。其中美国捐赠 150 万美元、德国捐赠 150 万美元、挪威捐赠 100 万美元；②550 万美元用于支持全球甲烷倡议（GMI）。其中美国将捐赠 350 万美元；加拿大将在未来四年内捐赠 200 万美元，作为其全球气候融资的一部分，以支持发展中国家的甲烷减排项目。③联合国环境规划署国际甲烷排放观测站将捐赠 950 万美元，用于支持与 GMP 能源路径一致的石油和天然气部门甲烷减排科技评估工作。④全球甲烷中心（由 20 多家慈善机构和组织组成的全球慈善组织）捐赠高达 4000 万美元，以支持化石能源领域的甲烷减排。

此外，联合国环境规划署国际甲烷排放观测站将于合作伙伴一道，启动 COP27 甲烷排放警报和响应系统第一阶段任务。欧盟已承诺向其提供 1700 万欧元，以支持观测站工作。气候与清洁空气联盟还将通过其化石能源中心支持 GMP 能源路径计

<sup>2</sup> EU-US Joint Press Release on the Global Methane Pledge Energy Pathway.  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_22\\_3793](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3793)

划，以减少化石能源的甲烷和其他气候污染物的排放。

## **二、全球天然气生产商宣布将减少甲烷排放并确保清洁、安全的天然气供应**

美国正在持续支持天然气公司减少甲烷排放和节省消费成本，2021年11月提出了新的能源性能指标和排放指南。在此基础上，美国环境保护局将在2022年发布一项补充拟议意见，以减少新的和现有的石油和天然气设施甲烷和其他污染物排放；美国内政部将提出新的法规，以减少公共土地上天然气开采所产生的浪费性燃烧和排放；美国交通部正在制定一套全面的安全相关法规，以减少或消除天然气管道系统中的甲烷排放；根据两党基础设施法案，将向交通部提供10亿美元用来更换存在泄漏点的天然气管道；此外，美国还将采取必要措施，如重新加入世界银行的“减少全球天然气空燃伙伴关系（GGFR）”计划。

墨西哥和墨西哥国家石油公司（PEMEX）将以20亿美元的国际信贷投资，推进石油、天然气相关项目的全面评估，到2024年，将天然气勘探、生产和加工过程中的甲烷气体排放量减少86%到100%。

阿根廷承诺在COP27上提交其2030年国家气候行动计划，其中包括将限制石油和天然气部门甲烷排放的具体措施，加强对化石燃料燃烧和甲烷排放的控制，以及增加可再生能源在其发电中的份额。

加拿大正在制定一项国家甲烷战略，承诺到2030年将石油天然气中甲烷排放较2012年至少减排75%以上。此外，加拿大还将为GHGSat（一家通过卫星监测地球温室气体排放的数据公司）公司提供2000万美元，用于使用高科技卫星监测和量化甲烷排放。

## **三、天然气主要消费国宣布将努力减少与天然气生产和消费相关的甲烷排放**

欧盟和日本政府将努力减少石油和天然气生产和消费整个价值链的甲烷排放，采取的措施包括：制定国际监测和核查标准；对减少化石燃料价值链的甲烷排放提供技术援助和投资；支持低温室气体排放的石油和天然气生产和消费活动。此外欧盟还将在本区域内致力于实施联合国石油和天然气甲烷伙伴关系。

欧盟和美国重申，将通过美国-欧盟能源理事会，就碳氢化合物供应商甲烷排放生命周期分析进行合作，旨在推动全球努力提高碳氢化合物生产温室气体排放量的测量、报告和验证的一致性和准确性，并支持改进国家温室气体清单中甲烷的最高排放值。

此外，德国还宣布加入世界银行“减少全球天然气空燃伙伴关系（GGFR）”计划。

## **四、石油和天然气部门的甲烷减排是可再生能源扩张的补充手段，以推动全球气候进步和能源安全**

除了减少整个化石燃料供应链的温室气体排放外，全球还必须加快可再生能源



的部署和能效的提高，以减少对挥发性化石燃料的依赖。清洁能源转型是减少对挥发性化石燃料的依赖，实现能源安全的一种最有效解决方法。能源效率和节能在应对当今气候危机和能源价格不断攀升方面发挥至关重要的作用，同时能有效缓解全球能源市场价格和需求的上行压力，加强能源安全。国际能源署估计，到 2025 年，提高能效和加快部署可再生能源和其他清洁能源解决方案将减少 3500 亿立方米的天然气消耗量，超过目前整个非洲、中南美洲的年均天然气消耗量。

(汤匀)

## 富羟基双壳纳米盒助力高效 CO<sub>2</sub> 光还原制合成气

利用光催化材料在太阳光驱动下，将二氧化碳(CO<sub>2</sub>)在温和条件(常温和常压)催化转化为合成气(CO 和 H<sub>2</sub> 混合物)，作为工业原料进行利用(Fisher-Tropsch 反应、甲醇合成、合成气发酵等)，是一种可持续的碳中和策略。合成气中 CO 和 H<sub>2</sub> 的比例决定了下游工业化应用的选择性，若可调节 CO<sub>2</sub> 催化转化制合成气中 CO 和 H<sub>2</sub> 的比例，将大大拓展合成气的应用范围。

新加坡南洋理工大学楼雄文教授与浙江师范大学 Yong Hu 合作提出了一种简单的多步骤模板法，制备出一种基于双壳纳米盒的高效光催化剂 Cu<sub>2</sub>S@ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，其外壳为富羟基钴酸镍纳米片(ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，内壳为 Cu<sub>2</sub>S。研究人员发现 Cu<sub>2</sub>S@ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中 p-n 异质结的内部电场可以引导光电子在 ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 导带中积累，从而驱动 CO<sub>2</sub> 光催化反应，得益于 Cu<sub>2</sub>S@ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有促进光吸收、提高空间电荷分离和迁移率的特征，使得 Cu<sub>2</sub>S@ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表现出高效的 CO<sub>2</sub> 光催化性能。此外，研究人员通过研究 Cu<sub>2</sub>S@ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中羟基对于 CO<sub>2</sub> 光催化反应的影响，发现羟基可以促进 CO<sub>2</sub> 的吸附，而不是 H<sub>2</sub> 的吸附，这种吸附偏好有利于 CO<sub>2</sub> 光催化反应的选择性，并抑制氢气光催化反应。因此，基于 Cu<sub>2</sub>S@ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的上述优势，通过调节 Cu<sub>2</sub>S@ROH-NiCo<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中羟基的含量能够有效调节合成气中 CO 和 H<sub>2</sub> 比例。实验结果表明，不同的羟基含量可以使合成气中的 CO 和 H<sub>2</sub> 比例在 0.51-1.24 之间变化，从而更好地适应下游的工业化应用，实现碳循环利用。

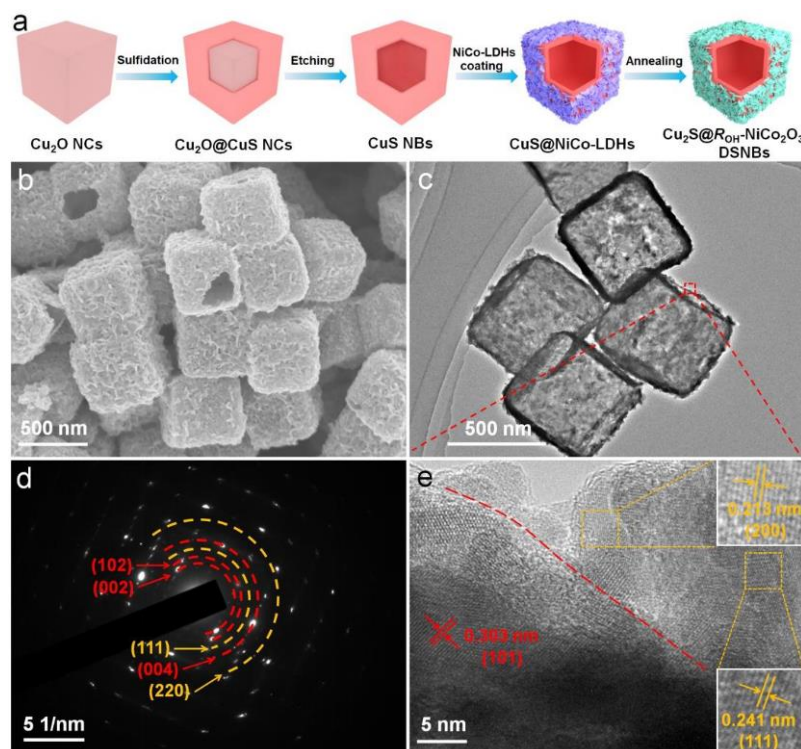


图 1  $\text{Cu}_2\text{S}@ROH\text{-NiCo}_2\text{O}_3$  制备方法和形貌表征

本研究通过多步骤模板法，开发出具有光电催化性能的  $\text{Cu}_2\text{S}@ROH\text{-NiCo}_2\text{O}_3$  双壳纳米盒催化剂，有效促进  $\text{CO}_2$  光还原制合成气，其中  $ROH\text{-NiCo}_2\text{O}_3$  表面羟基的含量可以调节  $\text{CO}_2$  光还原的活性和选择性，从而最大范围调节合成气中  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  的比例，以适用于下游工业生产应用。该工作为通过调控光催化剂的表面化学性质来调节太阳能光催化  $\text{CO}_2$  制合成气提供了一种普遍而有效的方法。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》<sup>3</sup>。

(李倩 汤匀)

## 基于 $\text{CuO}$ 载氧体的固体碳燃料化学链燃烧反应机理研究

化学链燃烧 (CLC) 被认为是一种极具应用前景的低成本  $\text{CO}_2$  减排技术，化学链氧解耦燃烧 (CLOU) 是 CLC 中一种直接利用载氧体改造固体燃料的方法。这种设计消除了固体燃料与载氧体反应时相对缓慢的固-固反应和固体燃料气化反应。在该反应过程中，过渡金属如  $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$  在较宽的温度范围内具有较好的机械稳定性和化学反应性，是未来商业化化学链燃烧 (CLC) 中首选的氧载体之一。尽管之前有诸多相关研究，但固体燃料和  $\text{CuO}$  燃烧在更大温度范围内的反应动力学和原子水平上的反应情况仍不明晰。

美国宾夕法尼亚州立大学 Adri C.T. van Duin 教授采用 ReaxFF 反作用力场模拟

<sup>3</sup> Lei Li, Xinyan Dai, De-Li Chen, et al. Steering Catalytic Activity and Selectivity of  $\text{CO}_2$  Photoreduction to Syngas with Hydroxy-Rich  $\text{Cu}_2\text{S}@ROH\text{-NiCo}_2\text{O}_3$  Double-Shell Nanoboxes. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, DOI: 10.1002/anie.202205839.

方法，研究了正丁烷与两种简化固体碳燃料（褐煤和无烟煤）在有/无纳米铜氧化物（CuO）催化剂作用下的反应动力学。研究发现燃料转化不仅受燃料/CuO 界面上的化学反应控制，还受 CuO 分解、粒子内氧扩散、燃料热解以及气相 O<sub>2</sub> 燃烧的影响。相关研究表明，CuO 和 C(s)反应的潜在过程为碳组分被氧化时从碳表面解吸，在特定的温度下，大约 50%的解吸碳以 CO<sub>2</sub> 的形式存在，另外 50%以 CO 的形式存在。本研究中，在无烟煤/CuO 和多环芳烃/CuO 体系中都观察到更显著的“两阶段动力学”特征，对于固体燃料来说，在低温范围内表面反应是主导因素，而在高温范围发生 CuO 热分解时，表面反应转向 O<sub>2</sub> 燃烧。在 ReaxFF 分子动力学模拟中，研究发现对于所有类型的燃料，热解都发生在 O<sub>2</sub> 燃烧之前。气体燃料（如正丁烷分子）的 O<sub>2</sub> 燃烧活化能（E<sub>a</sub>）比与 CuO 反应的活化能高得多（53 vs 9 kcal/mol），表明在所有温度范围内，CuO/燃料界面上的化学反应占主导地位。另一方面，褐煤的 O<sub>2</sub> 燃烧活化能和 CuO 表面反应活化能的差异较小（23 vs 6 kcal/mol），可能同时发生表面反应和气相燃烧。进一步的阿伦尼乌斯分析表明，对于所选的固体燃料存在两种不同的动力学机制，它们之间的转变温度与 CuO 纳米颗粒的热分解行为密切相关：在此转变温度以下，固体燃料和 CuO 之间的表面反应主导了反应动力学；而在高温下，CuO 分解和氧扩散是整个活化能变化的主要原因。燃料以及气相碳氧化物的 O<sub>2</sub> 燃烧是高活化能过程，且反应缓慢，因此，低温机制似乎是一种直接反应，其中能量释放是由从碳解吸的产物类型决定的。而在较高的温度下，反应机理由 CuO 的 O<sub>2</sub> 分解控制，转变为 C(s)与 O<sub>2</sub> 的限速反应。

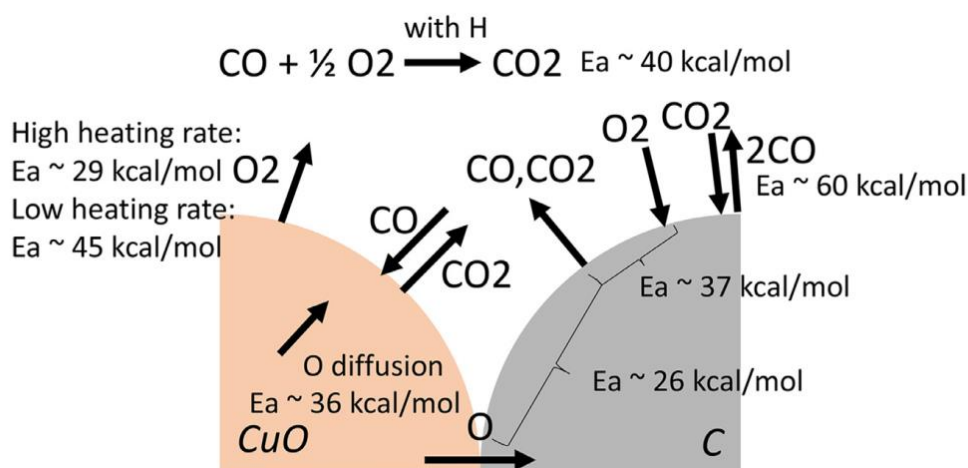


图 1 CuO 和 C 可能的反应机理

通过 ReaxFF 反作用力场模拟方法进行分子动力学模拟，将为理解利用 CuO 载氧体的固体燃料化学链燃烧在原子尺度上的反应机理和反应动力学提供一个新的视角。相关研究成果发表在《*Combustion and Flame*》<sup>4</sup>。

（朱丹晨 汤匀）

<sup>4</sup> Wenbo Zhu, Richard A. Yetter, J. Eric Boyer, et al. Mechanistic study of chemical looping reactions between solid carbon fuels and CuO. *Combustion and Flame*, 2022, DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112216

## 全光学通路试验台助力检测燃烧过程中超细颗粒物分布

可吸入微粒 ( $d_p \leq 10 \mu\text{m}$ ) 是固体燃料燃烧过程的不良产物。这些颗粒会在人体呼吸系统中积聚, 从而导致严重的肺损伤。因此, 了解这些颗粒的形成对于避免或减少细颗粒物 (PM) 释放到大气中至关重要。到目前为止, 大多数研究都是针对简化条件下的层流和早期固体燃料燃烧进行的, 只有少数研究针对更复杂的湍流火焰结构进行。然而, 工业规模的大多数实际应用都涉及湍流条件, 对湍流条件下火焰结构的研究迫在眉睫。

德国亚琛工业大学 Christian Axt 教授团队基于旋流甲烷辅助煤粉燃烧过程对 PM 形成进行了研究, 侧重于空间分辨测量湍流旋流火焰中超细颗粒物的形成。该团队提出的试验台如图 1 所示, 具有全光学通路, 允许在不同高度和径向位置进行侵入式和非侵入式测量。为了研究火焰特性对超细颗粒物形成的局部影响, 提供了激光多普勒测速仪 (LDV)、吸入高温计、傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱和扫描迁移率粒度仪 (SMPS) 光谱仪的测量结果, 通过速度、温度和物质浓度测量进行了彻底的火焰表征。根据 LDV 数据, 发现湍流火焰具有内部再循环区, 二次流具有高度涡流。这种再循环区能够稳定火焰, 可以有效地保证研究和测量的可重复性。火焰局部停留的时间增加, 内部再循环还创造了煤和天然气的完全燃烧区域。采用吸入式高温计测量气体温度, 相比于简单热电偶, 有效对测量结果进行了额外的辐射校正。测量的温度结果表明, 最高温度出现在燃烧室的中心, 由于与高二次气流混合, 在径向距离为 20 mm 处急剧下降。通过 FTIR 测量的气体浓度表明, 这是由于煤颗粒的最大燃尽发生在内再循环区 (IRZ), 而在高速区域 (位于 IRZ 之外), 煤颗粒的速度太高, 无法完全燃尽煤颗粒。基于超细颗粒物测量, 可以表明其形成强烈依赖于局部火焰特性。在中心线 (高温、低速、高停留时间), 拟合的对数正态函数显示出对数平均值 ( $x_c$ ) 和对数标准差 ( $\omega$ ) 稳步增加。随着距中心线的径向距离的增加, 也随着速度的增加和温度的降低, 对数平均值和对数标准偏差比靠近中心的区域增加得更多。在径向位置  $r=20 \text{ mm}$ , 不同轴向距离 ( $1d$  至  $4d$ ) 的测量分布彼此接近, 发现影响对平均值和标准偏差的主要因素为径向距离。同时, 速度分布在大约径向距离  $r=25 \text{ mm}$  处显示出它们的最大值, 因此可以有效证明湍流对超细颗粒物的形成具有重大作用。

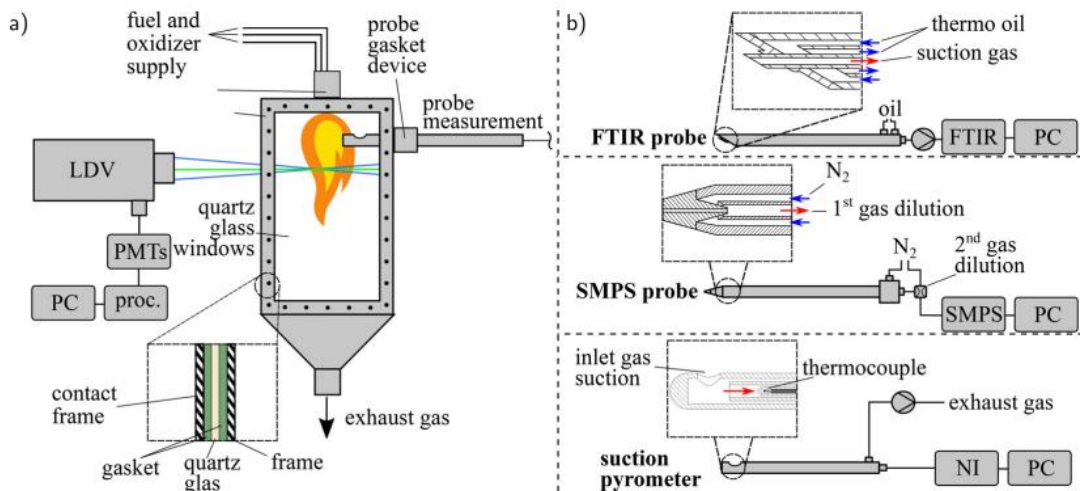


图 1 (a) 使用传统探头测量和非侵入式光学测量技术研究火焰特性的实验装置。本研究中用于调查的探针列于右侧 (b)。FTIR、SMPS 和 NI 的缩写分别代表傅里叶变换红外、扫描迁移率粒度仪和温度测量模块

该项研究表明温度、速度和浓度等局部变量对颗粒的形成有很大的影响，是进一步使用测量值进行 CFD 模拟研究验证的重要基础，也是进一步发展湍流情况下的 PM 形成模型的关键。相关研究成果发表在《*Combustion and Flame*》<sup>5</sup>。

(王一峰 汤匀)

## 燃煤电厂集成新型储热系统的设计与性能评价

西安交通大学刘明教授团队提出了一种基于多个热源（即高温烟气和过热蒸汽）集成在燃煤电厂中的新型熔盐储热系统。为了评估热能存储系统的性能，建立了仿真模型，并进行了焓分析。结果表明，熔盐储热一体化实现了火力发电系统运营灵活性和热效率的协同提升。在锅炉保持稳定燃烧的情况下，由于集成了热能存储系统，充电过程中最小功率负荷从额定负荷的 30% 下降到 14.51%。为了降低燃煤电厂的电力负荷，余热储存在蓄热系统中以备后用。通过热源与蓄热介质的适当匹配，热能存储系统的等效往返效率高达 85.17%。相关研究成果发表在《*Journal of Energy Storage*》<sup>6</sup>。

(薛凯丽 汤匀)

<sup>5</sup> Christian Axt, Anna Maßmeyer, Stefan Pielsticker, et al. Spatially-Resolved experimental investigations of combustion characteristics in a solid fuel doped methane swirl flame and the influence on the formation of ultrafine particulate matter. *Combustion and Flame*, 2022, DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112223

<sup>6</sup> Kezhen Zhang, Ming Liu, Yongliang Zhao, et al. Design and performance evaluation of a new thermal energy storage system integrated within a coal-fired power plant. *Journal of Energy Storage*, 2022, DOI: 10.1016/j.est.2022.104335

# 清洁能源多能互补

## 欧盟委员会发布《欧盟太阳能战略》

5月18日，欧盟委员会发布了《欧盟太阳能战略》<sup>7</sup>，作为REPowerEU计划的一部分，旨在到2025年实现太阳能光伏发电装机容量超过320吉瓦（较2020年增加一倍以上），到2030年装机容量达到近600吉瓦。欧盟希望通过该战略，使新增光伏的产能在2027年可抵消每年90亿立方米的天然气消费量。该战略概述了加速太阳能利用的全面愿景，并提出在短期内克服各种挑战的多项举措。报告要点如下：

### 一、通过欧洲太阳能屋顶倡议快速促进光伏发电的大规模部署

太阳能光伏是最便宜的电力来源之一。截至2020年底，欧盟太阳能光伏装机容量达到136吉瓦，发电量占欧盟发电总量的5%左右。为了实现欧盟提出的2030年可再生能源目标和REPowerEU计划的目标，未来十年，欧盟平均每年需新增45吉瓦的装机容量。

#### 1、欧洲太阳能屋顶倡议

据估计，屋顶光伏可满足欧盟近25%的电力需求。欧盟发布的“欧洲太阳能屋顶倡议”，旨在释放未充分利用的屋顶太阳能发电潜力，以提供更清洁、更安全和可负担的电力。主要包括：（1）到2030年，将可再生能源占比提高到45%；（2）将屋顶太阳能装置（包括大型太阳能装置）的许可期限限制为最长3个月；（3）通过规定，确保所有新建筑做好部署“太阳能”的准备；（4）强制建筑安装屋顶太阳能，包括：①到2026年，所有实用面积超过250平方米的新公共和商业建筑；②到2027年，所有实用建筑面积超过250平方米的现有公共和商业建筑；③到2029年，所有的新建住宅；（5）确保该倡议以立法的形式在所有成员国得到充分执行；（6）到2025年，在每个超过1万人口数量的欧盟城市中，至少建立一个以可再生能源为基础的社区；（7）确保收入水平较低的消费者同样能够使用太阳能，例如通过社会救济住房、能源社区以及对私人设施的融资支持；（8）鼓励新建筑及翻新建筑采用光伏一体化的建材，确保全面实施《建筑能效指令》（EPBD）中有关新兴建筑近零能耗建筑标准的现行规定。各成员国应为屋顶光伏系统建立强大的支持框架，包括储能、热泵等设施综合利用，大规模部署屋顶太阳能，优先考虑拥有较高能源等级（A-D）的建筑。如果全面实施，作为REPowerEU计划的一部分，该倡议将加速屋顶光伏安装，并在实施的第一年增加19太瓦时的电力（比“减碳55%”中预测的高出36%）。

<sup>7</sup> EU Solar Energy Strategy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A221%3AFIN&qid=1653034500503>

到 2025 年，将产生 58 太瓦时的额外电力（超出预测的两倍多）。

## 2、解决太阳能部署的融资问题

与其他能源相比，太阳能技术前期成本相对较高，但运营成本较低。因此，提供有吸引力的融资条件对于推动这一战略部署至关重要。欧盟分析表明，从当前到 2027 年，除“减碳 55%”一揽子计划提案目标所需的投资之外，REpowerEU 对太阳能光伏的额外投资将达到 260 亿欧元，其中部分来自欧盟公共资金，其余大部分来自于私营投资。目前，复苏和适应性基金已至少投入 190 亿欧元支持可再生能源的推广。除专门的能源融资计划，欧盟各成员国还应寻求与交通基础设施或研究和创新计划的协同合作，确保在相关政策领域对太阳能供电项目有着相对应的协调和支持框架。

## 3、公共部门的部署和支持措施

屋顶太阳能部署将使民众从能源消费者转变为生产者，为鼓励公众和社区加强太阳能利用，欧盟及其成员国将开展以下工作：（1）成员国的一站式服务机构向公众提供各类相关信息，并就能效措施和太阳能项目向公众提供建议。（2）欧盟为公众和安装人员提供免费开放的基于网络的 PVGIS 光伏地理信息系统工具，以即时评估屋顶太阳能潜力；（3）采取一个综合的“学习-计划-行动”方案，帮助能源社区建立技术专长并确保获得融资；（4）鼓励由专业化和大型行为者管理的其他类型的集体太阳能行动，以参与基于集体自我消费和能源共享的创新商业模式；（5）通过与其他设备的交互实现太阳能集成：①利用停放的电动汽车（EV）作为能源存储设备，促进太阳能电力的即时储能，有助于分布式太阳能的动态系统集成；②部署车载一体化光伏集成系统，提高电动汽车的能源自主性，用车载太阳能发电替代部分电网电力，有效减少交通部门排放；（6）通过即将出台“能源数字化行动计划”，制定能源智能家电制造商的行为准则，以支持大范围的能源消费、生产和存储设备的互操作性。

## 4、支持建筑和工业部门的太阳能利用

太阳能可以通过太阳能集热器、光伏或两者的结合（包括光伏、光热混合太阳能技术）来满足建筑的大部分电力和供热需求。对于太阳能在建筑上的部署，主要措施包括：（1）将建筑翻新与储能、热泵等设施部署相结合；（2）对于新建筑，重新制定的《建筑能源性能指令》要求，在技术上可行的情况下，到 2030 年实现能源消费 100%来自可再生能源；（3）在 2026 年至 2029 年期间，在所有新建和现有超过一定规模的公共和商业建筑以及新建的住宅建筑，逐步安装太阳能设备；（4）部署光伏建筑一体化（BIPV）。

太阳能可提供工业用热，后者占工业能源需求的 70%。基于太阳能集热器或聚光太阳能，太阳能可以为 100~500℃的工业过程提供热量。然而，太阳热能的工业利

用潜力仍未得到有效开发。太阳能发电可与热泵或电炉结合使用提供热量，也可用于制氢，作为工业过程中的燃料或原料。由于成本下降，特别是在高辐射和土地约束有限的地区，预计太阳能发电制氢将在未来十年具有竞争力。欧盟准备在创新基金（Innovation Fund）框架下制定一项欧盟范围内的差异化碳合同计划，以支持工业能源需求脱碳的创新解决方案。

## **5、加强电力并网设施建设**

分布式太阳能装置的有效整合需要对配电网进行重大调整以实现更高的系统性能，其中包括智能电网等数字化投资。主要包括：（1）“能源数字化行动计划”将强调提供明确投资信号以加速电网数字化转型的重要性；（2）更新“泛欧能源网络（TEN-E）”，扩大跨境电力基础设施和智能电网，提高欧盟太阳能电力的整合和传输；（3）消除输、配电网的障碍，预计将投入 96 亿欧元用于能源网络和基础设施；（4）支持低压直流电技术研究，减少太阳能光伏和风能在引入电网过程中的能源转换损耗；（5）与欧洲和国际标准化组织合作，制定必要的标准和协议。

### **二、简化许可发放流程，扩大公共领域太阳能装置的安装规模**

公用事业规模的太阳能装置对于以所需速度取代化石燃料至关重要，为加快太阳能部署，将采取如下行动：（1）通过竞争性招标推动太阳能安装规模的增长；（2）创建一个专门从事太阳能采购的试行实践区；（3）通过《可再生能源指令》（RED）修订版、可再生能源购买协议（PPAs）确保电力市场的稳定；（4）提出一项关于快速通过可再生能源项目的建议书，以及一份关于许可的立法提案；（5）缩短指定开发地区的许可流程，重新利用以前的工业或矿业用地部署太阳能；（6）促进太阳能部署的创新利用，如光伏农业、漂浮式光伏发电以及与交通基础设施结合等。

### **三、建立涵盖整个可再生能源领域的欧盟大规模技能伙伴关系**

欧盟太阳能光伏行业在 2020 年创造了 357 000 个全职（直接和间接）工作岗位，预计到 2030 年这一数字至少会翻一番，但熟练的技术工人缺口较大。因此，成员国应分析太阳能部门的技能差距，制定合适的培训方案，同时考虑增加女性参与的潜力。在欧盟层面，作为 REPowerEU 计划的一部分，欧盟将考虑建立大规模陆上可再生能源（包括太阳能）技能伙伴关系。欧盟将支持成员国采取行动支持劳动力的再培训和技能提升，以及劳动力市场向太阳能等增长型行业市场过渡。为促进技能人员流动性，欧盟对成员国内相互认证计划提出要求。

### **四、成立欧洲太阳能光伏产业联盟，确保获得可持续的太阳能**

2020 年，欧盟进口太阳能电池板共计 80 亿欧元，其中 75%均来自单一国家，扩大欧盟的太阳能产业链，特别是制造业，将有助于减少欧盟对其他国家的依赖，同时创造就业岗位、提升产品附加值，并增强产业弹性。

#### **1、继续支持太阳能研究创新**



主要举措有：（1）通过“地平线欧洲”（Horizon Europe）科研框架计划，继续支持研究和创新，以降低太阳能技术的成本，同时提高能源效率和可持续性，这些技术主要包括异质结电池、钙钛矿和叠层电池。2023-2024 年计划中将制定一项支持太阳能研究和创新的旗舰计划，重点关注新技术、环境和社会经济可持续性以及综合设计。（2）在“地平线欧洲”计划下，欧洲清洁能源转型伙伴关系将在 2021-2027 年期间争取成员国、能源行业和公共机构对太阳能研究创新的支持，制定太阳能研究与创新议程，进一步扩大成员国的合作。航天部门将作为新的创新因素，欧盟将推动开发高性能太阳能电池，并促进空间与地面之间的协同。（3）在 2020-2030 年间，创新基金将提供约 250 亿欧元的资金支持用于包括太阳能在内的低碳技术商业示范，以弥补研究成果和商业发展之间的差距。欧洲区域发展基金将支持成员国确定研究创新的优先领域。

## 2、增强供应链弹性

目前，欧盟在光伏组件的制造和安装依赖国际供应商，尽管技术进步，但预计到 2030 年硅的需求将增长 4 倍。因此，欧盟旨在基于资源获取、循环经济和可持续性，建立与关键原材料相关的安全弹性供应链。从 2025 年开始，达到使用寿命的光伏板数量将大幅增加，需要建立一个旧材料回收的生态系统。此外，欧盟需要布局硅锭、晶圆和电池单元等上游价值链的关键材料制造，提高欧盟对大规模外部供应中断情况的抵御能力。

## 3、成立欧洲太阳能光伏产业联盟

欧洲太阳能光伏产业联盟（EU Solar PV Industry Alliance）是太阳能制造链中各利益相关者的协调机构，将汇集行业、研究机构、协会及其他利益相关者。该联盟旨在为太阳能有效可持续开发提供行动框架，建立欧洲太阳能工业生态系统，并通过财政支持吸引私营投资。包括：（1）“InvestEU”将通过欧洲投资银行和其他公共金融机构为私人投资提供低风险融资；（2）创新基金将资助零碳和低碳设备创新，如太阳能电池板及其组件；（3）“复苏和弹性及凝聚力政策基金（Recovery and resilience and Cohesion policy funds）”支持促进地方发展的相关项目。此外，联盟将建立一个与“地平线欧洲”计划紧密联系的研究创新支柱。

## 4、加强国际合作

太阳能是全球向清洁能源和净零排放转型的基石，未来全球仍需进一步加速太阳能的部署和整合。欧盟将与世界各地的合作伙伴进行合作，加快太阳能技术的普及利用。欧盟还将与国际能源署（International Energy Agency）、国际太阳能联盟进行合作，分享太阳能技术、政策和实践方面的经验，并为煤炭依赖型国家的公平转型制定零排放能源路线图。

（朱丹晨 李岚春）

## 美国政府利用《国防生产法》加速国内清洁能源技术发展

6月6日，美国总统拜登发布总统决议，授权美国能源部（DOE）利用《国防生产法》（DPA）加速国内五种关键清洁能源技术发展<sup>8</sup>，包括：太阳能光伏器件；变压器等关键电网基础设施；热泵；建筑保温系统；电解槽、燃料电池、铂族金属催化材料等。具体技术支持内容如下：

### 1、太阳能光伏器件

太阳能光伏（PV）是美国许多地区新增装机容量最大和成本最低的清洁电力来源。然而，美国国内太阳能光伏装机规模不能满足现有需求。通过支持安全、稳定、多样化和有竞争力的国内太阳能光伏供应链，加强国家安全，促进能源独立，从而应对气候变化的紧迫威胁，降低美国消费者的能源成本。

### 2、变压器等关键电网组件

美国高度依赖国外进口的关键电网组件。传统的工业生产不足以满足支持本国脱碳的电气化转型、防御网络安全攻击和关键基础设施维护，并且无法在短期内满足美国日益增长的电力需求。通过扩大变压器和关键电网组件的国内生产，将促使电力系统更为可靠，加强国内能源安全。评估表明，到2030年美国输电系统将扩张60%，到2050年可能需扩张两倍以上，以满足美国可再生能源发电量的增加和不断扩张的电气化需求。

### 3、热泵

美国建筑部门占能源消耗的40%以上。为了降低建筑物能耗，减少美国和盟国对俄罗斯等竞争对手石油和天然气的依赖，提高热泵的使用率是一项重要的解决方案。然而，目前美国暖通空调制造商没有加速生产热泵。拜登政府将鼓励美国制造业扩大热泵生产并加快合格的建筑专业人员在家庭和住宅建筑中安装热泵。

### 4、建筑隔热保温系统

美国大约一半的房屋是在《现代建筑能源规范》颁布之前建造的，这意味着它们没有使用现代隔热保温材料对建筑进行节能改造，导致能耗较高。经预测，建筑改造可以将能源使用量减少50%或更多。除了降低家庭的能源成本和增加清洁能源劳动岗位外，隔热保温良好的建筑物在发生能源供应中断时，可以更长时间地保持安全的室内温度，从而减少极端天气造成的伤亡。虽然美国的隔热保温材料生产目前足以满足新建筑和一些旧建筑的改造，但必须加速对旧建筑进行隔热保温改造，以进一步降低能源消耗。

### 5、电解槽、燃料电池、铂族金属催化材料

电解槽、燃料电池和铂族金属催化材料对于提高清洁氢的国内生产和利用至关

<sup>8</sup> President Biden Invokes Defense Production Act to Accelerate Domestic Manufacturing of Clean Energy.  
[https://www.energy.gov/articles/president-biden-invokes-defense-production-act-accelerate-domestic-manufacturing-clean?utm\\_medium=email&utm\\_source=govdelivery](https://www.energy.gov/articles/president-biden-invokes-defense-production-act-accelerate-domestic-manufacturing-clean?utm_medium=email&utm_source=govdelivery)

重要。通过电解生产的清洁氢预计将为实现脱碳目标做出重大贡献。拜登政府支持国内电解槽、燃料电池和铂族金属催化材料供应链的行动将减少美国对进口材料的依赖，特别是对俄罗斯（世界第二大铂族金属催化材料生产国）和中国进口材料依赖，加强国家能源安全。随着氢经济规模的扩大，制氢成本将进一步降低，有助于构建弹性的国内供应链。

（汤匀）

## 美国能源部资助规模化生物精炼和生物燃料减排技术

6月1日，美国能源部（DOE）宣布在“规模化综合生物精炼厂”计划框架下资助5900万美元，重点关注综合生物精炼厂的试点及示范规模扩大，以及第一代玉米乙醇减排技术<sup>9</sup>。详情如下：

### 1、综合生物精炼厂的实验室规模扩大

该主题领域将扩大生物精炼的关键工艺，使其从实验室规模（技术成熟度3或4级）提升至工业相关设备规模，以用于未来中试规模的整体工艺集成。该主题领域包含2个子主题：

**（1）使用传统生物基原料的技术。**重点关注使用木质纤维素、藻类、有机湿废物、分类城市固体废物、食物垃圾、沼气、谷物淀粉、油料作物、建筑和拆除废物和/或二氧化碳废物等为原料生产生物燃料的关键工艺步，鼓励利用预测建模和高性能计算来加速和优化单元运行设计。

**（2）使用环境空气中CO<sub>2</sub>的技术。**重点关注通过直接空气碳捕集（DAC）从环境空气中获得CO<sub>2</sub>并用于藻类系统的技术，包括：①将DAC与藻类生长系统相结合以实现藻类生物物质的高产量；②在适合CO<sub>2</sub>从大气加速扩散到生长介质的培养装置中培养高产藻类菌株；③可与生物燃料共同生产并可降低成本的生物产品。

### 2、综合生物精炼厂的试点及示范

该主题领域将把生物燃料和生物产品制造技术规模扩大到试点和示范规模，包括：①可持续航空燃料、可再生柴油、可持续船用燃料、可持续铁路燃料等的生产；②利用现有生物精炼设施的新工艺；③利用美国油料作物的新工艺，实现至少70%的碳减排量。针对试点或示范项目，重点关注2个子主题：①初步设计和分阶段建设；②最终设计和建设。

### 3、第一代玉米乙醇减排技术

该主题领域将分析或示范在现有第一代玉米乙醇行业中降低温室气体排放和碳强度的策略，如低碳农业实践、转向可再生能源供热和供电（即可再生天然气或生

<sup>9</sup> DOE Announces \$59 Million to Expand Biofuels Production and Decarbonize Transportation Sector.  
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-59-million-expand-biofuels-production-and-decarbonize-transportation-sector>.

物质)、过程中 CO<sub>2</sub> 的利用以及乙醇设施的生产力或转化效率措施。该主题领域包含 2 个子主题: ①可行性研究, 以分析技术经济性和生命周期排放效益; ②将玉米乙醇生产的关键工艺从实验室规模(技术成熟度 3 或 4 级)扩大至试点前水平(技术成熟度 5 级)。

(岳芳)

## 界面优化实现钙钛矿-硅叠层太阳能电池认证效率突破 29.3%

沙特阿卜杜拉国王科技大学 Stefaan De Wolf 课题组在钙钛矿/C<sub>60</sub>界面上, 通过热蒸发形成 1 nm 厚的 MgF<sub>x</sub> 夹层, 可以较好地调节钙钛矿层的表面能, 促进电子提取, 减缓非辐射复合。基于上述效应, 面积为 1 cm<sup>2</sup> 单片钙钛矿-硅叠层太阳能电池的开路电压 (V<sub>oc</sub>) 达到 1.92 V, 填充系数 (J<sub>sc</sub>) 提高到 80.7%, 独立认证的稳定光电转换效率达到 29.3%。进一步对封装叠层器件进行了湿热测试, 1000 小时后没有明显的 V<sub>oc</sub> 和 J<sub>sc</sub> 降低, 且仍具有初始效率的 95.4%。该项工作为今后开发高性能太阳能光伏器件开辟新的途径。相关研究成果发表在《Science》<sup>10</sup>。

(汤匀)

## 全无机钙钛矿太阳能电池创造 17.4%转换效率新纪录

尽管金属卤化物钙钛矿太阳能电池(PSC)的光电转换效率(PCE)已超过 25%, 但在商业化应用之前必须解决长期运行不稳定性问题。

美国普林斯顿大学 Yueh-Lin Loo 等人设计了包括 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CuSCN 传输层以及氟掺杂氧化锡(FTO)和 Cr/Au 电极的全无机叠层, 在钙钛矿活性层和空穴传输层之间加入二维 Cs<sub>2</sub>PbI<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 覆盖层, 稳定界面的同时使全无机 PSCs 的光电转换效率从 14.9% 提高到 17.4%。研究人员用 CsCl 溶液处理 CsPbI<sub>3</sub> 表面, 然后进行热退火, 沉积了一个完全无机的 Cs<sub>2</sub>PbI<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 层。掠入射广角 X 射线散射(GIWAXS)测试显示 CsCl 处理后的 CsPbI<sub>3</sub> 薄膜出现了与二维 Cs<sub>2</sub>PbI<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 的(002)和(004)反射相对应的两个新反射。为了研究这种覆盖层的表面钝化效果, 研究人员测量了时间分辨光致发光(TRPL)瞬态过程。在覆盖层的存在下, 器件的寿命从 14 ns 增加到大于 62 ns, 表明它有效地抑制了 CsPbI<sub>3</sub> 表面的非辐射复合, 延长了电荷载流子的寿命和扩散长度。在耐高温方面, 具有这种二维覆盖层的器件在 35°C 下没有出现降解, 需要在 110°C 和恒定光照下超过 2100 小时才能降低其初始效率的 20%。基于此, 通过计算得出, 制备的 PSCs 在 35°C 下能连续运行 51000 ± 7000 小时(即大于 5 年)。

<sup>10</sup> Jiang Liu, Michele de Bastiani Erkan Aydin, et al. Efficient and stable perovskite-silicon tandem solar cells through contact displacement by MgF<sub>x</sub>. *Science*, 2022, DOI: 10.1039/D1YA00077B

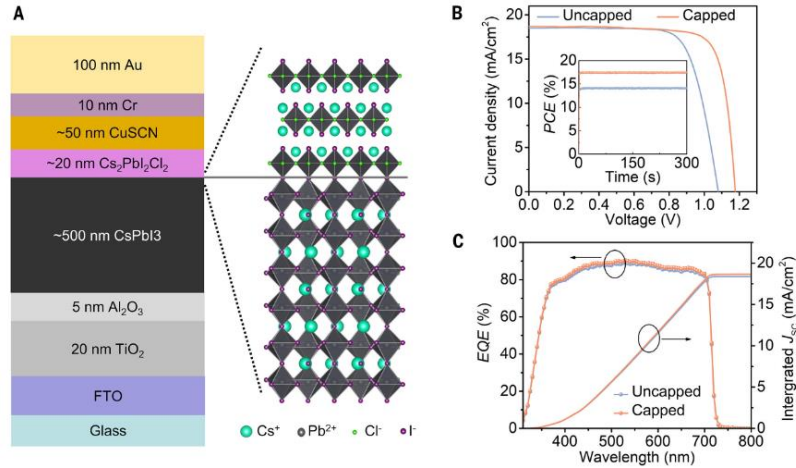


图 1 全无机钙钛矿太阳能电池的制备与光电性能表征

本项研究为了最大限度地提高太阳能电池的热稳定性和光稳定性，选择无机 CsPbI<sub>3</sub> 作为光吸收层，在 CsPbI<sub>3</sub> 和 CuSCN 空穴传输层之间添加二维的 Cs<sub>2</sub>PbI<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> 层，制备出目前转换效率最高的全无机 PSCs 器件，效率高达 17.4%，且具有优异的热稳定性和光稳定性。相关研究成果发表在《Science》<sup>11</sup>。

(廖明月 汤匀)

## 聚丙烯酰胺水凝胶助力高效稳定太阳能光电解制氢

光电化学 (PEC) 水分解能够利用阳光和水生产绿色氢气。然而，确保低成本和储量丰富的材料组成的 PEC 器件的长期稳定性是一大挑战。

韩国延世大学 Jooho Moon、Hyungsuk Lee 等人使用聚丙烯酰胺水凝胶 (PAAM) 作为高渗透性和透明的器件顶部保护剂，制备出一种性能稳定的光电化学器件。水凝胶保护的 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光电阴极在 100 小时内仍能保持初始光电流的 70% 左右，表现出优异的稳定性。使用低成本薄膜 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光电阴极和 BiVO<sub>4</sub> 光阳极，在宽的电解液 pH 窗口下，光电阴极的表面微结构也得到了较好的保持，展现出水凝胶在 PEC 运行过程中较好的保护作用。研究人员使用了一种新兴的低成本半导体光伏和 PEC 器件 (Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>) 作为光吸收器。采用模铸技术将 PAAM 水凝胶 (单体浓度=10%) 应用于参考 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光电阴极。采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 模具在表面处理装置上调节 PAAM 的厚度。与无 PAAM 相比，PAAM 在整个波长范围内的光吸收仅增加了约 2%。因此，光电流密度 ( $J_{ph}$ ) 大约 15% 的增加可能是由于量子效率的提高而不是光学效应。考虑到由于相同的 Pt/TiO<sub>2</sub>/Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 结构，两种器件的电荷传输特性相似， $J_{ph}$  的增强可以归因于更高的表面电荷转移效率。入射光子-电流转换效率 (IPCE) 光谱表明，PAAM 对长波长光子的捕获增强。在无 PAAM 的情况下，虽然表面气泡通过

<sup>11</sup> Xiaoming Zhao, Tianran Liu, Quinn C. Burlingame, et al. Accelerated aging of all-inorganic, interface-stabilized perovskite solar cells. *Science*, 2022, DOI: 10.1126/science.abn5679

吸收短波长光子（即高能光子）阻碍了近表面产生的光电子，但由于扩散长度足够大，在发生表面复合之前，光电子仍然参与了析氢反应（HER）。但是，由于波长较长的光子一般更深地渗透到吸收体层，导致光电子的行进距离增加，因此如果活性位被气泡堵塞，表面复合成为主导。相比之下，PAAM 对长波长光子的 IPCE 显著增强表明，在离表面较远的地方产生的大量光电子能有效地参与 HER，这对于串联器件的底层电极是至关重要的。

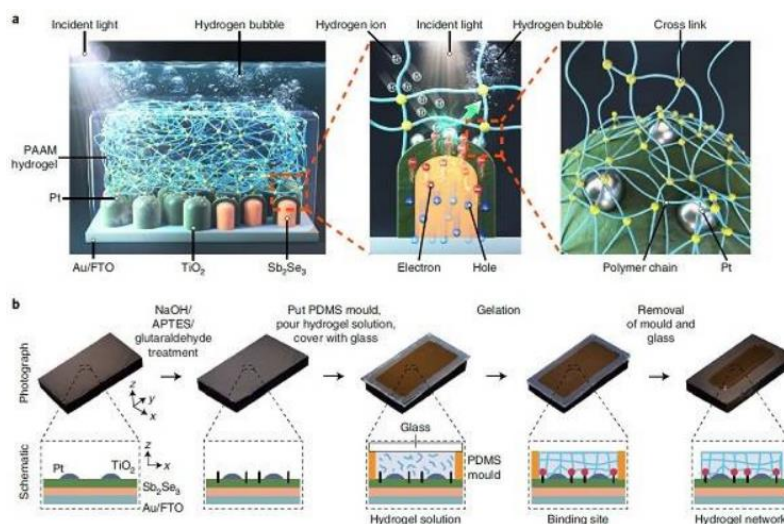


图 1 PEC 器件制备示意图

本项研究利用聚丙烯酰胺水凝胶作为高渗透性和透明的光电化学器件顶部保护剂，在宽 pH 范围下实现了高效光电化学分解制氢，并表现出优异的稳定性和效率，为今后实现具有经济效益的太阳能绿色制氢开创了新的途径。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》<sup>12</sup>。

（廖明月 汤匀）

<sup>12</sup> Juiwan Tan, Byungjun Kang, Kyungmin Kim, et al. Hydrogel protection strategy to stabilize water-splitting photoelectrodes. *Nature Energy*, 2022, DOI: 10.1038/s41560-022-01042-5

# 低碳化多能融合

## 欧盟发布 2022-2025 年综合能源系统研发实施计划

4月6日，欧洲能源转型智能网络技术与创新平台（ETIP SNET）公布《2022-2025年综合能源系统研发实施计划》<sup>13</sup>，取代在2020年发布的2021-2024年研发实施计划，明确了到2025年的研发资助重点。该实施计划基于欧盟2021年7月提出的“减碳55%”（Fit for 55）一揽子计划目标，并考虑了近期地缘政治紧张局势对能源市场的影响，强调需加速研发创新以促进能源安全和能源转型。同时，该实施计划还宣布2020年发布的《综合能源系统2020-2030年研发路线图》也将更新为2022-2031年路线图，预计在2022年年底发布。本次实施计划将投入10亿欧元围绕9大应用场景实施31项研发创新优先项目，主要内容如下：

### 一、优化跨部门集成和电网级储能

**1、跨部门集成和储能的价值（2022-2027年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①非电力能源载体系统服务的市场设计；②储能所有者和运营者的市场设计；③虚拟电厂的市场设计；④整体能源系统开发的能源模型；⑤开发欧洲水能系统模型；⑥提高网络弹性的运营措施（拓扑优化、分布式能源资源运营、移动分布式能源资源）；⑦泛欧市场设计；⑧非化学储能（气体存储、储热、压缩空气储能、飞轮储能等）。

**2、多能源系统控制和运行工具（2022-2027年，预算6000万欧元）。**主要研发活动包括：①市场参与者之间的数据交换协议/接口；②家庭/建筑/工业行业集成供热/制冷和储能的灵活性潜力；③“电制气”（Power-to-Gas）技术的灵活性潜力；④集成氢能的灵活性潜力；⑤利用多能源载体增强能源供应安全。

**3、智能资产管理（2022-2027年，预算4000万欧元）。**主要研发活动包括：①状态监测和预防性维护；②远程维护模型和工具。

### 二、市场驱动下输电系统运营商、配电系统运营商和产销合一者的交互作用

**1、确保输电系统运营商、配电系统运营商和系统用户交互作用的市场模型和架构（2022-2027年，预算2000万欧元）。**主要研发活动包括：①开发为输电系统运营商服务的能源管理平台，能与当地市场交互；②开发为配电系统运营商服务的能源管理平台，协助客户积极参与本地能源市场；③考虑需求灵活性的输配电一体化规划；④开发适合零售商和聚合商、能源服务公司和能源社区的商业模式；⑤本地

<sup>13</sup> ETIP SNET, R&I implementation plan 2022-2025. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/53e747cd-9f57-11ec-83e1-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-252703697>

市场设计及其与中央市场的交互。

**2、通过控制和运营增强输电系统运营商、配电系统运营商和系统用户交互作用（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①集成大数据管理相关技术，包括人工智能；②支持需求控制和聚合的信息通信技术基础设施；③用于监测分布式发电的信息通信技术基础设施；④开发为输电系统运营商服务的能源管理平台，能与当地市场交互；⑤开发为配电系统运营商服务的能源管理平台，协助客户积极参与本地能源市场；⑥增强水电和抽水蓄能电站的运行灵活性；⑦增强发电机组的系统灵活性作用（包括热电联产）。

**3、开发输电系统运营商-配电系统运营商合作平台（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①市场参与者之间的数据交换协议/接口；②用于监测分布式发电的信息通信技术基础设施；③支持需求控制和聚合的信息通信技术基础设施；④开发数据分析服务和平台供应商商业模式。

**4、输电系统运营商-配电系统运营商合作规划工具（2022-2031年，预算1000万欧元）。**主要研发活动包括：①考虑需求灵活性的输配电一体化规划；②考虑居民能源社区需求的配电网规划；③优化电力储能设备选址、规模和协调；④优化非化学储能（抽水蓄能、气体储能、储热等）；⑤以增强弹性为导向的资产规模和空间定位，以抵御极端天气和电网事件影响。

### 三、泛欧整体市场、区域市场和本地市场

**1、基本市场设计（2022-2029年，预算2500万欧元）。**主要研发活动包括：①泛欧市场设计；②本地市场设计及其与中央市场的交互；③为配电系统运营商和输电系统运营商之间提供辅助服务的市场设计；④高不确定性条件下均衡发电的最优调度；⑤储能所有者和经营者的市场设计；⑥虚拟电厂的市场设计。

**2、监管框架和战略投资（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①以增强弹性为导向的资产规模和空间定位；②区域（邻近系统）和欧盟层面的协调投资规划；③考虑需求灵活性的输配电一体化规划。

**3、跨境交易的信息系统（2022-2029年，预算2500万欧元）。**主要研发活动包括：①泛欧市场设计；②为输电系统运营商进行跨境辅助服务市场设计；③市场参与者之间的数据交换协议/接口；④支持需求控制和聚合的信息通信技术基础设施；⑤数据分析服务和平台供应商的商业模式。

### 四、可再生能源大规模并入输配电网

**1、在多部门以不同程度集成可再生能源的技术壁垒和措施（2022-2029年，预算2000万欧元）。**主要研发活动包括：①大型海上风电集成的输电系统规划。

**2、基于可再生能源的能源系统控制和运营（2022-2027年，预算5000万欧元）。**主要研发活动包括：①增强风力涡轮机和光伏发电系统的灵活性；②可再生能源的



实时可观测性；③大规模集成电动汽车的配电系统规划；④为网络运营提供先进可再生能源预测；⑤水力发电预测。

**3、通过建设基础设施和利用网络技术集成大规模可再生能源（2022-2029 年，预算 5000 万欧元）。**主要研发活动包括：①增强风力涡轮机和光伏发电系统的灵活性；②电力电子技术（灵活交流输配电、高压直流电等）在输配电网络中的灵活性；③为网络运营提供先进可再生能源预测；④水力发电预测；⑤状态监测和预防性维护；⑥保护具有低故障电流的配电网，自适应保护。

**4、通过规划实现弹性系统以大规模集成可再生能源（2022-2031 年，预算 2500 万欧元）。**主要研发活动包括：①协调低压直流/中压直流、交流配电网规划；②大规模集成分布式发电的配电系统规划；③通过接入分布式发电、储能、灵活性需求等增强电网稳定性；④集成大型海上风电的输电系统规划；⑤区域（邻近系统）和欧盟层面的协调投资规划；⑥协调高压直流和高压交流的网络规划；⑦考虑居民能源社区需求的配电网规划。

## 五、促进消费者参与能源系统的数字技术解决方案

**1、消费者/用户接受和参与的价值（2022-2027 年，预算 2000 万欧元）。**主要研发活动包括：①提高客户对能源系统的认识和接受度；②减少或消除能源基础设施对环境的影响；③支持消费者和产销合一者更好适应能源系统的方法和工具，如电力生产和消耗的在线测量、分时电价等；④支持行业消费适应性的方法和工具；⑤产销合一者的商业模式。

**2、设计安全的即插即用设备和物联网（2022-2027 年，预算 3000 万欧元）。**主要研发活动包括：①利用物联网技术进行监测和控制；②支持需求控制和聚合的信息通信技术基础设施；③为智能电器提供信息通信技术。

**3、利用通信网络，包括网络安全（2022-2029 年，预算 4000 万欧元）。**主要研发活动包括：①并行使用旧有数据采集与监控系统进行远程监控的风险和漏洞；②数据保护和符合通用数据保护条例的方法；③利用网络切片概念实现公共基础设施内的安全操作；④虚拟运营商的先进概念。

**4、跨部门灵活性使用案例（2022-2027 年，预算 3000 万欧元）。**主要研发活动包括：①住宅部门提供的需求灵活性；②工业提供的需求灵活性；③增强热发电机组的系统灵活性作用（包括热电联产）；④家庭/建筑/工业行业集成供热/制冷和储能的灵活性潜力。

## 六、所有系统中电力电子设备的安全运行

**1、下一代光伏和电池逆变器的控制解决方案（2022-2029 年，预算 3000 万欧元）。**主要研发活动包括：①电池储能的灵活性潜力；②增强可再生能源对低惯性系统一次电压和频率控制的作用；③增强风力涡轮机和光伏发电系统的灵活性。

**2、混合输配电和混合交直流配电网（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①协调高压直流和高压交流的网络规划；②电力电子技术（灵活交流输配电、高压直流电等）在输配电网络中的灵活性；③多终端高压直流网络以协调电力潮流；④协调低压直流/中压直流、交流的配电网规划。

**3、下一代配电站（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①保护具有低故障电流的配电网，自适应保护；②直流电网保护；③通过分布式能源和储能实现自下而上的电网恢复；④电网基础设施和功能的网络安全保护方法和工具。

**4、电力电子驱动网络的输配电仿真方法和数字孪生技术（2022-2029年，预算1000万欧元）。**主要研发活动包括：①输电、配电系统运营商的先进模拟（如数字孪生）；②先进人机接口；③能源系统的数字孪生；④变流器驱动型电网稳定性模型和工具。

## **七、增强系统监督和控制（包括网络安全）**

**1、下一代输电系统运营商控制室（2022-2029年，预算3500万欧元）。**主要研发活动包括：①优化负荷频率控制；②增强可再生能源对一次电压和频率控制的作用；③自修复技术；④负荷削减技术；⑤输电、配电系统运营商的先进模拟（如数字孪生）；⑥先进人机接口；⑦优化跨境互联维护调度；⑧优化水电和抽水蓄能的维护调度；⑨输电线路动态增容；⑩集成网络和系统组件的等效模型；⑪大规模区域间电网振荡的分析方法和工具；⑫电网基础设施和功能的网络安全保护方法和工具。

**2、下一代配电管理系统（2022-2029年，预算3500万欧元）。**主要研发活动包括：①优化配电网配置；②并行使用旧有数据采集与监控系统进行远程监控的风险和漏洞；③用于分布式网络控制的控制中心架构；④配电网重构提供的灵活性；⑤配电网的优化重构；⑥电网基础设施和功能的网络安全保护方法和工具。

**3、配电网下一代测量技术和地理信息系统（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①智能电表数据的通信基础设施；②为智能电网的安全使用提供公共信息通信技术基础设施、物联网和地理信息技术；③远程维护模型和工具。

**4、广域监测、控制和保护（2022-2031年，预算3500万欧元）。**主要研发活动包括：①输电系统的稳态和动态估计；②增强配电系统的可观测性和状态评估；③可再生能源的实时可观测性；④输电系统的广域监测、控制和保护架构。

## **八、交通集成与储能**

**1、交通部门脱碳的技术和经济影响（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①通过交通电力网络（铁路、地铁、有轨电车、无轨电车等）能量管理提供灵活性；②通过电动汽车智能充电和“车辆到电网”（V2G）技术提供灵活

性。

**2、通过电动汽车提高能源系统运行的有效性和弹性（2022-2029年，预算7000万欧元）。**主要研发活动包括：①大规模集成电动汽车的配电系统规划；②通过交通电力网络（铁路、地铁、有轨电车、无轨电车等）能量管理提供灵活性；③通过电动汽车智能充电和“车辆到电网”（V2G）技术提供灵活性。

### 九、建筑、区域和工业过程灵活性

**1、基于可再生能源的能源系统中建筑、基础设施和智能社区集成的价值评估（2022-2027年，预算2000万欧元）。**主要研发活动包括：①通过住宅部门提供需求灵活性；②产销合一者商业模式；③零售商和聚合商、能源服务公司和能源社区的商业模式。

**2、楼宇与智慧社区集成的控制与运行工具（2022-2029年，预算5000万欧元）。**主要研发活动包括：①通过住宅部门提供需求灵活性；②通过工业提供需求灵活性；③家庭/建筑/工业行业集成供热/制冷和储能的灵活性潜力；④支持消费者和产销合一者更好适应能源系统的方法和工具，如电力生产和消耗的在线测量、分时电价等；⑤支持行业消费适应性的方法和工具；⑥孤岛模式运行的微电网。

**3、在综合能源系统中规划建筑物和基础设施的弹性集成（2022-2029年，预算3000万欧元）。**主要研发活动包括：①用于能源系统一体化开发的能源模型；②考虑居民能源社区需求的配电网规划；③优化电力储能设备选址、规模和协调；④大规模集成分布式发电的配电系统规划；⑤大规模集成电动汽车的配电系统规划。

（岳芳）

## 美国能源部资助5700万美元支持工业减排和清洁能源制造

6月16日，美国能源部（DOE）先进制造办公室投入5700万美元支持30个研发项目<sup>14</sup>，支持开发工业减排和清洁能源制造技术，此次资助重点关注3个技术主题：制造工艺创新；先进材料制造；锂离子电池创新制造工艺。具体内容如下：

### 1、制造工艺创新

该主题领域投入2585万美元支持10个项目，包括：①利用CO<sub>2</sub>生产聚氨酯泡沫和纺织品原料，以制造零碳汽车；②丙酮的可持续性供应链；③可实现高效被动和主动对流干燥的蒸汽选择性膜热交换器循环技术；④利用热响应型聚合物对多孔材料进行非蒸发干燥；⑤通过智能干燥剂辅助热泵系统加热的创新技术，实现优质木材的高效干燥过程；⑥利用复合环烯烃树脂通过增材制造实现汽车轻量化；⑦开发一种逆向设计方法，用于轻型汽车部件制造的低成本敏捷工具；⑧开发一种改进模具材料的粉末加工技术，用于制造轻型汽车车身板材；⑨丙烯腈的可持续制造；

<sup>14</sup> DOE Awards \$57.9 Million to Reduce Industrial Emissions and Manufacture Clean Energy Technologies.  
<https://www.energy.gov/articles/doe-awards-579-million-reduce-industrial-emissions-and-manufacture-clean-energy>

⑩可感知、可管理、适应性强、可重复使用的工具，实现轻量化复合材料汽车零部件制造。

## 2、先进材料制造

该主题领域投入 2460 万美元支持 14 个项目，包括：①新一代超高温换热器材料；②能源系统中高分辨率碳化硅纤维复合材料构件的增材制造；③应用于恶劣环境下的涂层-合金材料的开发；④混氢天然气输送/分配和工业终端应用中的耐氢多层复合涂层材料；⑤应用于航空航天领域高疲劳和断裂强度的 Al-Ce 和 Al-Ce-Mg/Zn 合金材料；⑥用于高温航空航天结构的耐用铝钪合金材料固态增材制造工艺；⑦在航空航天中使用节能的混合稀土金属代替铸造铝合金中的钪；⑧使用新型 Al-Ce-Ni 基合金材料通过增材制造生产轻量化航空航天部件；⑨通过改性处理新型前驱体材料制造高效的碳化硅纤维；⑩适用于恶劣工况的先进轴承材料；⑪用于轴承和齿轮的金属氧化物涂层，可在恶劣环境下快速高效地沉积；⑫通过掺杂氧化物的激光定向能量沉积制备适用于恶劣环境的大规模网状氧化物弥散强化钢（ODS）组件；⑬通过机器学习改进氢燃气轮机热障涂层耐久性和工艺；⑭开发保护氢燃气轮机发电系统关键部件的高熵合金涂层。

## 3、锂离子电池创新制造工艺

该主题领域投入 748 万美元支持 6 个项目，包括：①高能快充锂离子电池的 CoEx 电极结构；②锂离子电池硅负极结构的高通量等离子体沉积；③激光粉末床熔合技术应用于正极制造；④锂离子电池电极声场辅助增材制造工艺的可靠性表征和规模扩大；⑤固态锂电池的可扩展、高通量等离子体喷涂制造技术；⑥锂离子电池结构的墨水直写 3D 打印技术。

（岳芳）

# 美国能源部资助 2500 万美元支持开发清洁氢能发电技术

5 月 19 日，美国能源部（DOE）宣布将为 6 个氢能研发项目提供 2490 万美元资金，以支持清洁氢发电技术的发展<sup>15</sup>。美国能源部将与私营公司合作，使氢气成为应用更广和效率更高的发电燃料。这些项目将有效提高现有和新型氢能技术的性能、可靠性和灵活性。具体内容如下：

**1、资助 140 万美元由 8 Rivers 公司建造一座新的制氢工厂，制氢纯度将达到 99.97%，同时捕获 90%-99% 的 CO<sub>2</sub>，运输并封存到美国怀俄明州埃文斯顿的一个油气井。**

**2、资助 300 万美元由天然气技术研究所开发在燃气轮机中使用的氢氨混合燃**

<sup>15</sup> DOE Announces Nearly \$25 Million to Study Advanced Clean Hydrogen Technologies for Electricity Generation. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-nearly-25-million-study-advanced-clean-hydrogen-technologies-electricity>

料，以推进氨作为清洁低碳燃料在发电中的应用。

**3、资助 600 万美元**由通用电气公司开发和测试使用 100% 氢燃料的燃气轮机组件，以研究和解决与混氢燃料相关的燃烧充分问题。

**4、资助 700 万美元**由通用电气和 GE 研究中心共同进行氢燃气轮机的优化研究，以显著提高热电联产过程中燃气轮机的运行效率。

**5、资助 450 万美元**由 Raytheon 科技研究中心探究通过提高天然气-氢气混合燃料中氢气的占比，将其混合应用于高温钻井平台，测试混合燃料对燃气轮机组件的影响。

**6、资助 300 万美元**由 Raytheon 科技研究中心开发和测试一种氨燃料燃气轮机燃烧器，该燃烧器将减少 CO<sub>2</sub> 的排放，并具有强大的可操作性和稳定性，燃烧效率预计将超过 99.99%。

(汤匀)

## 英国研究与创新署 2500 万英镑支持动力电池技术研究

5 月 23 日，英国研究与创新署 (UKRI) 宣布启动“法拉第电池挑战赛”第 5 轮资助，投入 2500 万英镑支持有望在未来 10-15 年进入汽车市场的先进动力电池技术<sup>16</sup>，以推进英国汽车行业的电气化进程。资助详情如下：

本次资助将支持合作研发项目和可行性研究项目，两类项目的资助金额分别为 50-1200 万英镑和 10-75 万英镑，重点关注如下方面研究：工艺改进；电池化学；电池组效率；新型设计理念。旨在实现如下目标：①具备高功率密度、高能量密度以及高安全性，实现高性能应用；②开发低成本和低能量密度电池技术，对钴、镍等矿产的依赖度较低；③可持续电池技术，包括提高资源效率、降低工艺的能量强度、提高可回收性等；④增强和保护英国电池供应链；⑤开发更高效和具有全球竞争力的制造工艺。

(岳芳)

## 利用顺序分解无烧结合成法制备高性能固态电池

陶瓷基固态电解质和隔膜作为一种增加电化学稳定窗口和提高安全性的方法，能够用于制备下一代电池，受到人们广泛关注。然而，为制备更高能量密度的陶瓷基固态电池，陶瓷基固态电解质的厚度需与当今锂离子电池中的聚合物电解质的厚度相当。但迄今为止，传统的陶瓷电解质加工工艺无法实现这一目标。

美国麻省理工学院 Jennifer L. M. Rupp 教授团队提出了一种无需烧结、顺序分

<sup>16</sup> Delivering the future of electric vehicle battery technology. <https://www.ukri.org/news/delivering-the-future-of-electric-vehicle-battery-technology/>

解合成 (SDS) 法用于陶瓷制备, 该方法可以合成厚度在 1~10 微米之间的锂石榴石隔膜, 接近当前锂离子电池 (LIB) 中聚合物隔膜的厚度。实验证明, 该工艺具有合适的晶粒薄膜厚度长径比(约为 80~500), 优异的  $\text{Li}^+$  电导率, 且能在较低温度( $<700^\circ\text{C}$ ) 下合成。顺序分解合成法是通过在凝固、成核和生长过程中利用“两步热解反应”制备出新的 SDS 厚膜 (1~10  $\mu\text{m}$ )。为了评估 SDS 法制备的锂石榴石隔膜的结构演化, 研究人员使用原位加热的拉曼光谱来分析沉积的隔膜随温度和时间的函数。结果显示, 沉积时隔膜由均匀分布的  $\text{LiNO}_3$  (固体) 和 Al、La 和 Zr 氧化物组成的非晶态氧化物组成; 当温度超过  $250^\circ\text{C}$  时,  $\text{LiNO}_3$  与  $\text{LiNO}_3$  (液体) 融合形成非晶态氧化物; 当隔膜在  $525 \sim 650^\circ\text{C}$  条件下加热 15 ~ 30 分钟时,  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  焦绿石相出现; 加热至  $650 \sim 750^\circ\text{C}$  时, 立方锂石榴石相结晶出现, 形成陶瓷膜的典型晶界结构。进一步对隔膜加热到  $850^\circ\text{C}$ , 1~30 分钟会发现明显的 Li 损失, 产生  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  相。然后研究人员考察在隔膜致密化过程中, 当 10 mol% 过量的 Li 被加入 SDS 过程的前驱体化学时, 扫描电子显微镜 (SEM) 显示出隔膜具有相对光滑和致密的表面, 厚度为  $4.1 \pm 0.9 \mu\text{m}$ , 表面粗糙度 (Ra) 为  $0.4 \mu\text{m}$ ; 在前驱体溶液中加入 75 mol% 的过量 Li 进行 SDS 处理时, 隔膜厚度接近  $4.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ ; Ra 增加到  $1 \mu\text{m}$ , 当过量 Li 进一步增加到 250 mol% 时, 薄膜的厚度为  $4.4 \pm 1.3 \mu\text{m}$ ; Ra 增加到  $3 \mu\text{m}$  时, 隔膜的孔隙率较大。最后研究人员使用电化学阻抗谱 (EIS) 来测量经过 SDS 处理的锂石榴石隔膜的总电导率, 结果显示在含 75 mol% 过量 Li 的 SDS 前驱体溶液中, 隔膜的  $\text{Li}^+$  电导率最高, 在  $30^\circ\text{C}$  时, 电导率高达  $(2.4 \pm 0.05) \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ , 在  $185^\circ\text{C}$  时为  $(1.5 \pm 0.05) \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ , 活化能为  $0.34 \pm 0.03 \text{ eV}$ 。

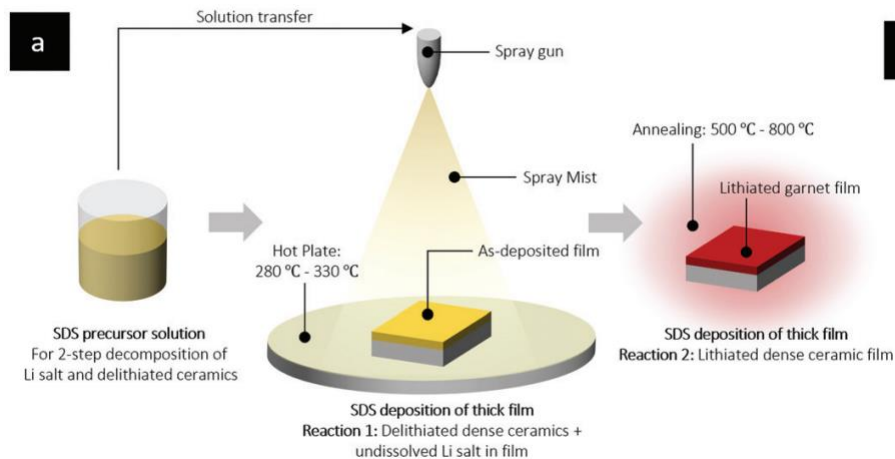


图 1 顺序分解合成 (SDS) 法制备陶瓷电解质示意图

本研究采用一种具有成本效益的顺序分解合成 (SDS) 方法, 制得与目前聚合物隔膜所需厚度范围接近的固体氧化锂基电解质, 并且在较低的加工温度( $<700^\circ\text{C}$ ) 下成功制备出高性能固态电池。该顺序分解合成法在制备固态电解质时无需经过烧结过程, 避免传统湿热法热解过程中质量快速损失, 可适用于其他含锂氧化物前体

和聚合物隔膜的加工过程，为今后实现大规模、低成本固态电池制备与应用奠定了基础。相关研究成果发表在《*Energy & Environmental Science*》<sup>17</sup>。

(严烙意 汤匀)

## 新型 Pd-Cu 催化剂助力酸性介质中 CO<sub>2</sub> 高效电催化转化

可再生电力驱动的二氧化碳转化制多碳 (C<sub>2+</sub>) 产品为实现低碳足迹燃料及化学品提供了一条有应用前景的途径。然而，输入的大部分 CO<sub>2</sub> (>85%) 在碱性和中性反应器中通过氧化还原反应生成 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 被电解液消耗；而酸性条件能有效克服这一限制，但该条件下具有较强的析氢反应。

加拿大多伦多大学 Edward H. Sargent 教授和香港中文大学王莹教授等人提出了一种在 Cu 基催化剂上，通过最大化的 CO 和 CO<sub>2</sub> 共吸附以减弱 H\* 结合，来抑制析氢反应活性的策略，实现无交叉、单程高效率利用 CO<sub>2</sub> 制 C<sub>2+</sub> 产品电合成方式，研究表明，pH=2.0 是酸性 CO<sub>2</sub> 电还原反应 (CO<sub>2</sub>RR) 的最适宜反应条件。为了抑制在酸性介质中析氢反应 (HER) 动力学，需要通过平衡溶液 pH 和碳酸盐形成一个适合 CO<sub>2</sub>RR 的反应环境。研究人员采用一维 (1D) 域扩散-反应模型模拟酸性电解液中 CO<sub>2</sub>RR 的局部环境。结果表明，在 pH=2.0 的电解液中，CO<sub>2</sub>RR 过程中 CO<sub>2</sub> 将不会形成碳酸盐而出现损失。为了设计出性能良好的酸性 CO<sub>2</sub>RR 催化剂，研究人员筛选了不同的双金属催化剂 X-Cu (X=Cr、Mo、W、Mn、Re、Fe、Ru、Co、Rh、Ir、Ni、Pt 和 Pd)，使用离散傅里叶变换 (DFT) 分析，首先计算了在双金属 X-Cu 的 (111) 表面上形成 CHO\* ( $\Delta G_{\text{CHO}^*}$ ) 和 OCCOH\* ( $\Delta G_{\text{OCCOH}^*}$ ) 的吉布斯自由能，观察  $\Delta G_{\text{OCCOH}^*}$  和  $\Delta G_{\text{OCCOH}^*} - \Delta G_{\text{CHO}^*}$  之间的比例关系时，结果表明 Pd-Cu 具有最高的活性和 C<sub>2+</sub> 选择性。研究人员通过溅射沉积，在聚四氟乙烯 (PTFE) 纳米纤维表面制备了 400 nm 厚的铜催化剂层。然后，将 Cu/PTFE 浸泡在 N<sub>2</sub> 饱和的 PdCl<sub>2</sub> 水溶液中，通过 Cu 和 PdCl<sub>2</sub> 之间的电偶替换，在 PTFE 上制备 Pd-Cu 催化剂，这种方法可以调整 Pd 和 Cu 的比例。最后为测试催化剂的 CO<sub>2</sub>RR 性能，发现 C<sub>2+</sub> 产物的选择性与 Pd 浓度相关，当 Pd 浓度提高到 >6.2% 时，CO<sub>2</sub>RR 的法拉第效率 (FE) 将随着 HER 的增加而降低；而在 Pd 浓度为 6.2% 时发现 CO<sub>2</sub>RR 效率最佳。结果表明，在 500 mA cm<sup>-2</sup> 时，实现了 CO<sub>2</sub> 到 C<sub>2+</sub> 产品的最高 FE 为 87%，C<sub>2+</sub> 的部分电流密度达到 440 mA cm<sup>-2</sup>，并且能保持稳定运行 4.5 h，并且 CO<sub>2</sub>RR 产品的单程碳效率 (SPCE) 高达 68%。

<sup>17</sup> Zachary D Hood, Yuntong Zhu, Lincoln Miara, et al. A sinter-free future for solid-state battery designs. *Energy & Environmental Science*, 2022, DOI: 10.1039/d2ee00279e

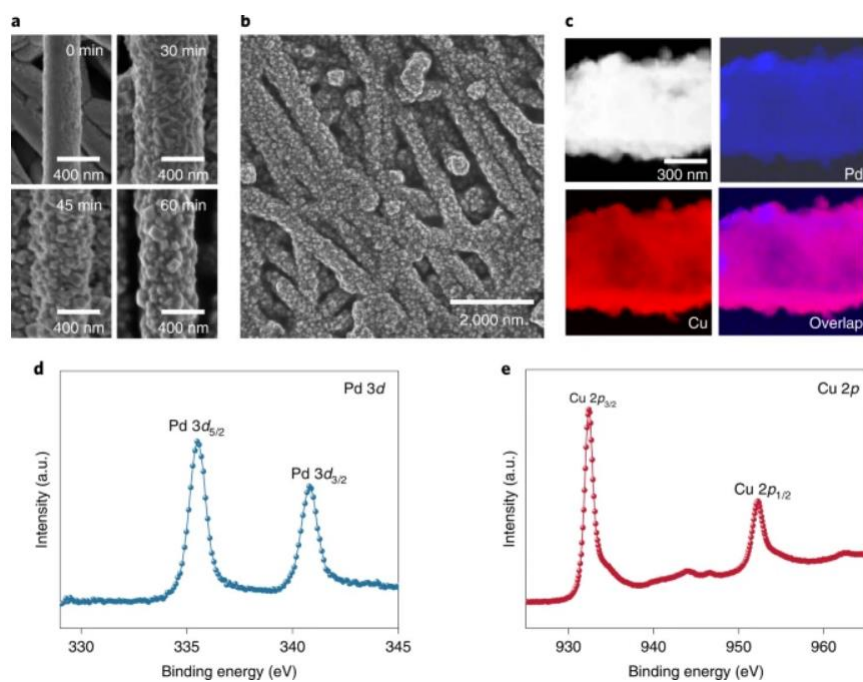


图 1 聚四氟乙烯 (PTFE) 纳米纤维形貌与元素表征

本项研究合成了一种 Pd-Cu 催化剂，通过在 Cu 基催化剂上最大化实现 CO 和 CO<sub>2</sub> 共吸附以减弱 H\* 结合，从而抑制析氢反应活性。相关密度泛函理论研究发现 Pd-Cu 催化剂能高效选择性生产 C<sub>2+</sub> 产品，而非 C<sub>1</sub> 产品，在 500 mA cm<sup>-2</sup> 条件下，CO<sub>2</sub> 到 C<sub>2+</sub> 的法拉第效率为 89±4%，同时单程 CO<sub>2</sub> 到 C<sub>2+</sub> 的利用率为 60±2%，这一研究为进一步克服 CO<sub>2</sub> 电解过程中的 CO<sub>2</sub> 损失指明了新的方向。相关研究成果发表在《*Nature Catalysis*》<sup>18</sup>。

(严烙意 汤匀)

<sup>18</sup> Yi Xie, Pengfei Ou, Xue Wang, et al. High carbon utilization in CO<sub>2</sub> reduction to multi-carbon products in acidic media. *Nature Catalysis*, 2022, DOI: 10.1038/s41929-022-00788-1



# 能源战略研究

## 麻省理工学院发布《储能系统的未来》研究报告

5月22日，麻省理工学院发布了《储能系统的未来》研究报告<sup>19</sup>，指出到本世纪中叶，可再生能源发电有望取代化石燃料发电，部署不同的储能技术可以优化和利用不断增长的可再生能源发电。报告研究和分析了各种储能技术（电化学储能、储热、化学储能和机械储能）关键性能、应用领域和成本指标等，呼吁应积极支持长时储能技术、多类型电化学储能技术，以实现到2050年电网系统完全脱碳。具体内容如下：

### 1、储能技术创新阶段比较

能源相关的技术创新通常需要经过五个阶段：①概念提出；②技术研发；③一定规模的工程试验；④技术示范；⑤部署应用。表1涵盖了各种储能技术当前创新阶段。

表1 特定储能技术当前创新阶段

储能相关技术	创新阶段				
锂离子电池	②		④	⑤	
液流电池（无机电解质）	②		④	⑤	
液流电池（有机电解质）	①	②	③		
钠硫电池				④	⑤
金属-空气电池		②	③		
关键材料供应（金属和稀土金属）	①	②	③		
电池回收	①	②	③	④	
电池二次利用	①	②			
抽水蓄能				④	⑤
储热		②	③	④	
氢气生产、运输、储存	①	②		④	
制氢（光电制氢、高温气冷堆制氢、电解水制氢）		②			

注：①概念提出；②技术研发；③一定规模的工程试验；④技术示范；⑤部署应用

随着脱碳要求变得更为严格和对波动性可再生能源发电的依赖不断增加，长时储能技术具有更广泛的应用前景。例如在波动性可再生能源发电供应低谷期或由于极端天气导致异常高水平的电力需求，而此时电网运营商被禁止使用未装碳捕集装置的天然气发电时，长时储能技术至关重要。

### 2、电化学储能

电化学储能能量密度通常比机械储能和储热系统高，但比化学储能（氢储能）

<sup>19</sup> The Future of Energy Storage. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2022/05/The-Future-of-Energy-Storage.pdf>

系统要低。电化学储能由于占地空间小，不受地理环境和资源的限制等特点成为一种通用且高度可扩展的技术，其应用领域涵盖发电厂到住宅等多种场景。

其中，锂离子电池因具有高能量密度、高功率密度和高往返效率，在电动汽车领域广泛应用，并在短时（通常为 4 小时或更短）电力系统储能领域广泛使用。目前用于电池制造的关键材料成本和可获取性决定了锂离子电池的应用成本，并可能限制其未来部署规模，而这一挑战将促使电化学储能从高性能锂离子电池的研发转向化学原料更为丰富的其他新型电化学储能技术。目前，锂离子电池正在朝向低成本和高性能方向发展。基于其自身储能容量成本的限制，锂离子电池不太可能大规模应用于长时（大于 12 小时）电力储能系统中。为了实现更具经济效益的长时储能，美国能源部应支持该方向技术的研发和示范，以推进使用储量更为丰富的材料来替代锂离子电池技术。长时储能的成本、使用年限和制造规模使研究人员探索新型电化学储能技术，例如氧化还原液流电池、金属-空气电池，这类电池使用更为廉价的充放电材料，更具有长时储能的特点。虽然这几种新型电化学储能技术已展现其应用前景，但在关键科学、工程和制造方面仍存在短板，这意味着政府需要加大力度进行投资协调予以支持。其他国家，尤其是中国正在积极探索该类技术的创新突破。

### 3、储热

储热技术是利用低成本材料储存热量，是一种适合长时储能需求的技术，这类技术的主要挑战是如何高效且经济地将热量转化为电力。为解决这一挑战，目前有 3 种方法：①将现有发电厂中的燃气轮机替代传统化石燃料锅炉，并在其旁配备储热设施，从而降低热能转化为电能的成本；②开发动力循环替代系统，即闭式布雷顿循环，在中温（550-1000 °C）下具有更高的热能转换效率；③推进耐高温材料和高功率转换装置的研发，以达到更高的热能转换效率、提高高温材料使用寿命、降低电力成本。

### 4、化学储能（氢储能）

氢气被普遍认为是一种先进的化学储能介质，因为其可以通过较为简便的方式生产，同时可以作为发电燃料或其他工业过程的原料或热源。化学储能技术领域主要关注氢储能。氢储能作为一种电力系统储能形式，其发挥的作用取决于氢气在整个经济领域中的采用程度，以及未来氢气生产、运输和储存的成本。目前，制氢的主要方法依赖于化石燃料，而这一过程将产生大量的碳排放。利用低碳电力电解水制氢将推动工业和交通运输等行业实现脱碳目标。通过电解水产生的氢气在波动性可再生能源发电量降低的时间段用作工业和发电的低碳燃料，将提高波动性可再生能源的利用率，降低电力系统脱碳成本。

### 5、机械储能

电能可转化为包括重力势能、动能等多种形式在内的机械能。机械储能包括多

种技术，其共同特点是它们的能量密度远低于化学储能或电化学储能的能量密度。因此，机械储能系统往往占地面积大，并需要一定的地势条件，不太适用于在小型设施中应用。

抽水蓄能是一种成熟且已广泛部署的技术，占全球和美国现有的电网级储能装机规模 90% 以上。但自 20 世纪 90 年代以来，抽水蓄能在美国和其他许多国家部署进度显著放缓（特别是中国）。此外，抽水蓄能项目的初始成本较高，规模较大、选址要求较高。该技术虽然不是严格意义上的利用电能或电能之间转换的储能技术，但现有的带有蓄水池的传统水电系统可以在平衡严重依赖波动性可再生能源发电的电力系统供需方面发挥更大的作用。

压缩空气储能系统将压缩的空气储存在地下的洞穴或地上的储气罐中，一些压缩空气储能系统还存储压缩空气时产生的热量。该技术作为潜在的电网级大规模储能技术被广泛研究。尽管压缩空气储能系统的成本估算受到多种不确定因素的影响，但该技术的能源成本通常高于未来可用的其他储能技术的成本。

## 6、不同储能技术成本

通过平准化储能成本（LCOS）数值来评价各种储能技术的成本，根据单位放电功率和储能容量成本可将储能技术分为三大类：一是储能容量成本低、功率容量成本高的技术最适合长时储能应用和不太频繁的充放电循环，包括储热、氢储能、金属-空气电池和抽水蓄能技术等；二是功率容量成本低、储能容量成本高更适合短时储能或频繁的充放电循环，包括锂离子电池技术；三是这两项指标较为平衡的技术，包括液流电池技术。然而真正的高效储能系统通常涉及不同持续时间的储能技术的结合使用。

（汤匀）

## IEA 《世界能源投资报告 2022》剖析全球能源投资态势

6 月 22 日，国际能源署（IEA）发布《世界能源投资报告 2022》<sup>20</sup>，指出 2021 年世界能源投资总额约 2.22 万亿美元，并预测 2022 年世界能源投资总额将增长 8%，达到 2.4 万亿美元。其中，能源投资增长幅度最大的是电力部门，主要投资于可再生能源和电网领域，而发达国家和中国是推动全球能源投资增长的最主要力量。此外，报告指出能源安全的广受关注和大宗商品价格的不断上涨促使对化石燃料供应链投资的增加，但只有加大对清洁能源投资，实现能源清洁转型，才是保障能源安全、实现全球气候目标的唯一持久解决方案。关键点如下：

**一、在全球能源危机背景下，2022 年全球能源投资总额仍将增长 8%，但资本投资近一半来自成本增加**

<sup>20</sup> World Energy Investment 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022>

2021 年世界能源投资总额约 2.22 万亿美元，在全球能源危机的背景下，2022 年能源投资将增长 8%，达到 2.4 万亿美元，高于新冠疫情前的水平。燃料价格攀升、成本上升、经济不确定性、能源安全担忧和气候危机，都是影响全球能源投资的诸多重要因素。总体来看，全球各种能源种类的投资都在增加，但涨幅最大的是电力部门（主要是可再生能源和电网），以及终端用能部门。尽管高昂的燃料价格给供应商带来了前所未有的利润，但是对石油、天然气、煤炭和低碳燃料供应的投资总体上低于 2019 年疫情前水平。尽管今年全球能源供应方面的投资将大幅增加，但不足以遏制不断飙升的能源价格，也不足以实现全球气候目标。2021 年全球通货膨胀愈演愈烈，尤其是在下半年供应链收紧的情况下。自 2022 年年初以来，大宗商品价格上涨已将主要经济体的通胀率推至近 40 年最高位，3 月份美国和欧盟的通胀率分别达到 8.5% 和 7.5%。为了抑制通货膨胀，各国央行在 2022 年春季开始提高利率并缩减资产负债规模，预计今年下半年将进一步收紧。对于与能源相关的行业，这导致债务成本比疫情前水平增加了 30% 以上。再加上疫情导致国际物流受阻、原材料短缺和成本上升，融资成本上涨可能会导致 2022 年全球能源投资更为保守。

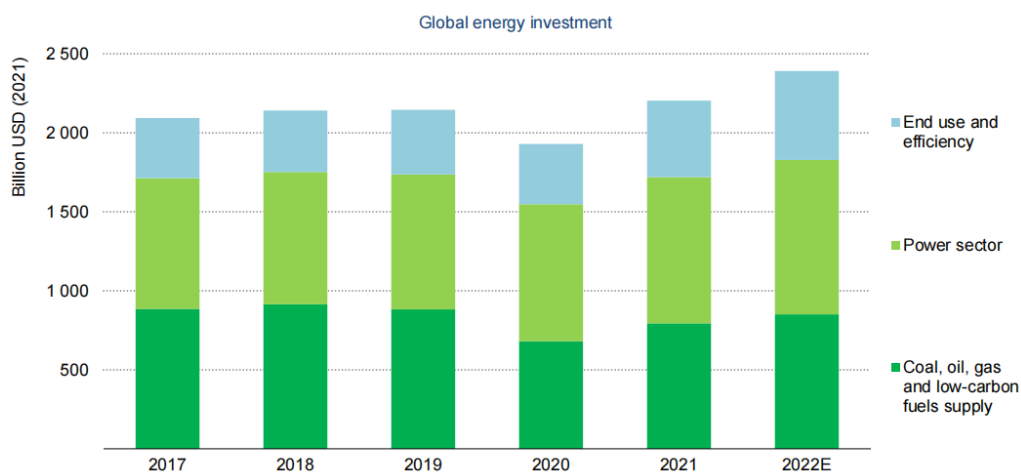


图 1 2017-2022 年世界能源投资总额变化趋势（单位：十亿美元）

## 二、可再生能源、终端用能部门和电动汽车正在引领清洁能源的发展

全球清洁能源投资在保持了几年的持平发展之后，在 2021 年开始显著增加，2021 年全球清洁能源投资超过 1.2 万亿美元，涨幅超过 7%，预计 2022 年全球清洁能源投资将超过 1.4 万亿美元，占能源总投资增幅的近四分之三。预计 2022 年的投资将延续 2021 年的增长趋势，以可再生能源、电网和电池储能为主导。其中，2022 年电力行业投资将增长 6%，可再生能源、电网和储能目前占电力行业总投资的 80% 以上。2021 年新增风能和太阳能项目直接投资总额约为 1500 亿美元，其中太阳能比 2020 年几乎翻了一番；对于风能，陆上风电直接投资在 2020 年大幅下降后再次超过 1000 亿美元的水平，而海上风电直接投资仍保持稳定在 500 亿美元以上。

在经历了前几年的持续停滞之后，全球对终端用能效率和电气化的投资在 2021

年达到了新高，比 2020 年增加了 27%。2021 年，全球建筑行业对能源效率的投资比 2020 年增长了 16%，达到约 2370 亿美元，这是自 2014 年以来建筑能效投资的最大增幅。

2021 年，全球电动汽车销量增长一倍以上，其中大部分涨幅由中国和欧洲贡献，电动汽车销量首次超过柴油车，2021 年全球汽车销量的所有净增长均来自电动汽车，预计 2022 年将继续强劲增长。电动汽车销量的增长进一步推动了对电气化的投资，2021 年电气化投资占交通运输行业终端用能总投资的 45% 以上，IEA 预计 2022 年将增加到 55% 以上。2021 年，对公共汽车和重型汽车电气化的投资也有所增加。对公共电动汽车充电基础设施的投资在 2021 年继续增长 20% 以上，预计到 2022 年将接近 100 亿美元，但这仍不到配电领域总投资的 5%。中国、欧洲和美国在这些技术领域的投资处于全球领先地位，占比达 90% 以上。此外，在电池储能方面的投资将达到新高，以锂离子电池为主导，预计资本投资将在短短两年内增长近两倍，到 2022 年达到近 200 亿美元。

2021 年，制氢用电解槽新增装机容量略低于 270 兆瓦，为历年来最高水平，IEA 预计这一规模相当于约 2 亿美元的投资，较 2020 年增长近四倍，预计 2022 年投产 670 兆瓦的电解槽投资将超过 5 亿美元。

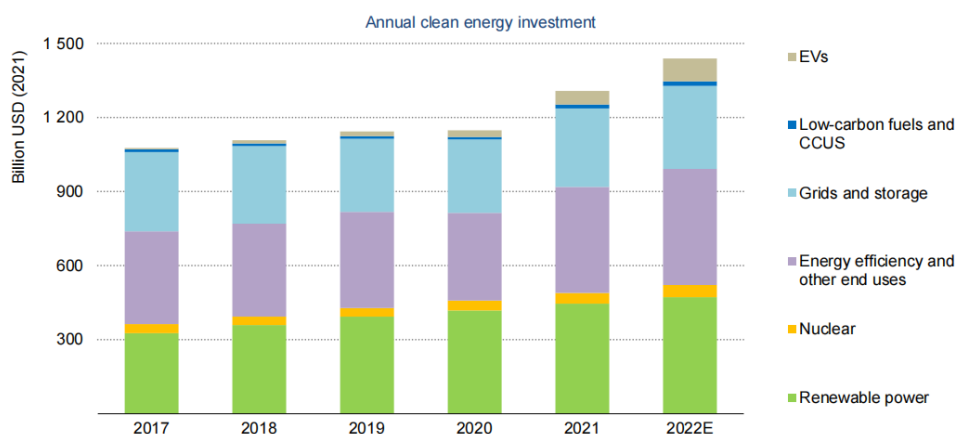


图 2 2017-2022 年世界清洁能源投资总额变化趋势（单位：十亿美元）

### 三、全球各经济体清洁能源投资差异明显

全球清洁能源投资的增长主要集中在发达经济体和中国，新兴经济体和发展中经济体（不包括中国）的清洁能源投资仍停留在 2015 年的水平，许多发展中国家的清洁能源投资力度相对薄弱，这一现象令人担忧。具体来看，在过去十年中，支持能源转型的投资在发达经济体和中国呈现加速增长趋势，而新兴经济体和发展中经济体的投资滞后。额外的财政和技术支持，包括资本优惠、私营资本和来自国际碳市场的资金流入，都将是推动新兴经济体和发展中经济体清洁能源投资的重要手段，加速对新兴经济体和发展中经济体的投资对于促进能源转型和能源安全至关重要。

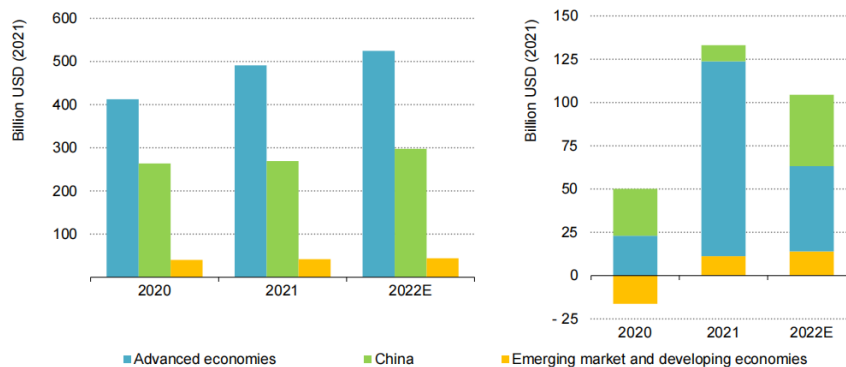


图 3 2020-2022 年不同经济体清洁能源投资总额变化趋势 (单位: 十亿美元)

#### 四、2021 年化石燃料投资有恢复迹象，预计 2022 年将缓慢增加

自俄乌冲突以来，石油和天然气价格飙升。俄罗斯是世界上最大的石油出口国之一，其部分石油供应遭到西方国家的制裁，使该国数百万桶石油搁浅，并迫使其石油公司关闭油井。俄罗斯最近还减少了对欧洲的天然气出口。尽管危机加速了对清洁能源的投资，但出于对能源安全的担忧，也促使恢复了对化石燃料的投资。IEA 表示，一些市场注意到能源价格将在未来短时间内持续高位并将造成能源危机，这促使市场对化石燃料供应的投资有所增加，尤其是对煤炭的投资。例如，欧洲或将重启“燃煤时代”。对俄罗斯天然气供应全面中断的担忧，已促使欧洲一些政府考虑重新使用煤炭。德国、意大利、奥地利和荷兰都表示，可以使用燃煤电厂来弥补俄罗斯天然气供应的减少。

全球石油和天然气投资在 2021 年增长了 10%，其中石油和天然气上游投资增至超过 380 亿美元，但仍低于疫情前的水平。预计 2022 年上游投资增幅最大的部分将来自美国大型企业，并有望在 2022 年增加 30% 以上。然而，欧洲大型企业上游资本投资计划在 2022 年基本持平，凸显出更多地受长期战略承诺而非短期价格的推动。

全球煤炭投资在前几年缓慢减少后，2021 年出现逆势增长，煤炭供应链投资约 1050 亿美元，较 2020 年增长 10%，恢复到 2019 年的水平。2021 年中国占世界煤炭产量的一半，占煤炭供应链投资的三分之二，推动全球煤炭投资增长。2021 年中国煤炭投资增长略高于 10%，增幅高于预期。预计 2022 年化石燃料发电投资将与 2021 年持平，天然气投资增加弥补了燃煤发电投资减少。

2021 年全球液化天然气需求增长 6%，高于天然气总需求 4.5% 的增长率。液化天然气项目的资本投资超过疫情前的水平，到 2021 年达到 230 亿美元，美国占总额的近一半。与 2021 年相比，预计 2022 年将新增 300 亿立方米的液化天然气出口能力，为目前紧张的液化天然气市场提供了小幅缓解能力。

2021 年，低排放燃料的总投资达到 160 亿美元，其中液体生物燃料的投资增加了一倍以上，达到 80 亿美元，其中三分之二来自生物柴油，这是由于对可再生柴油的投资增加，尽管乙醇投资也几乎翻了一番。2021 年，全球对沼气的投资略低于 70

亿美元，较 2020 年增长 30%，其中大部分来自欧盟新的生物甲烷投资，预计到 2022 年将进一步增长。

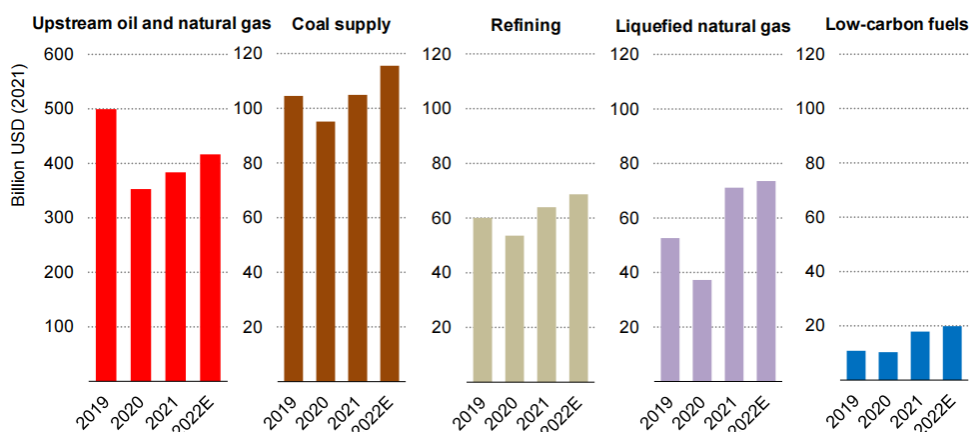


图 4 2019-2022 年燃料投资总额变化趋势（单位：十亿美元）

### 五、原材料相关的投资成为能源转型的焦点

自 2021 年初以来，关键原材料（特别是锂、钴、镍、铜和铝）的价格涨幅达过去十年最高水平，原因是需求增加、供应链中断、供应紧张的负面影响。许多对清洁能源技术至关重要的原材料价格普遍上涨，锂和钴的价格在 2021 年翻了一番多，铜、镍和铝的价格都上涨了 25%-40% 左右。2021 年，风机和太阳能光伏组件的价格分别上涨了 9% 和 16%。

正极材料成本（包括锂、镍、钴和锰）在电动汽车电池成本中的占比已从 2015 年的 5% 增长到目前的 20% 以上。2021 年有色金属总投资增长 20%，专注于锂市场的私营部门投资增加了 50%，创历史新高。预计 2022 年，有色金属投资增长仍将保持强劲。锂离子电池的价格可能由于原材料价格上涨的影响反映在最终价格中，预计 2022 年将出现大幅上涨。

目前，多国政府正在扩大原材料方面的投资活动，确保其国内清洁能源供应链原材料供应安全，更多的政府资金用于能源研究和开发关键原材料的替代材料。电动汽车相关的风险投资越来越多地用于电池设计和回收方法，以解决关键的原材料问题，流向汽车制造商的占比相应降低。从矿山废料中提取金属原材料，特别是废石和尾矿，可能是重要的二次原材料供应来源，以相对较快地促进生产。“再开采技术”过去并没有受到太多关注，但不断上涨的原材料价格和新技术正在引起企业和政府的兴趣。

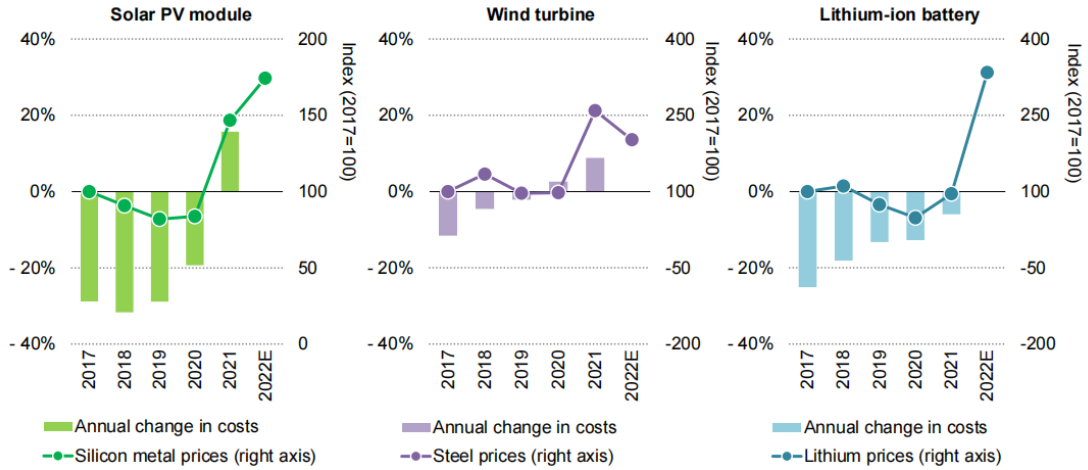


图 5 2017-2022 年光伏组件、风机和锂电池的成本趋势和关键材料价格变化

## 六、可持续金融在清洁能源发展中发挥重要作用

近年来，清洁能源企业的财务状况一直不稳定，但许多上市的能源相关企业从 2022 年开始，资产负债相对有所缓解。与疫情前相比，衡量流动性、盈利能力和股市估值的指标都有所改善或保持稳定。到 2021 年，可持续债务发行规模超过 1.7 万亿美元，其中绝大多数绿色债券旨在为可再生能源、低碳建筑和交通运输融资。投资者更多支持太阳能光伏和风能项目，这是由于该领域的技术最为成熟。

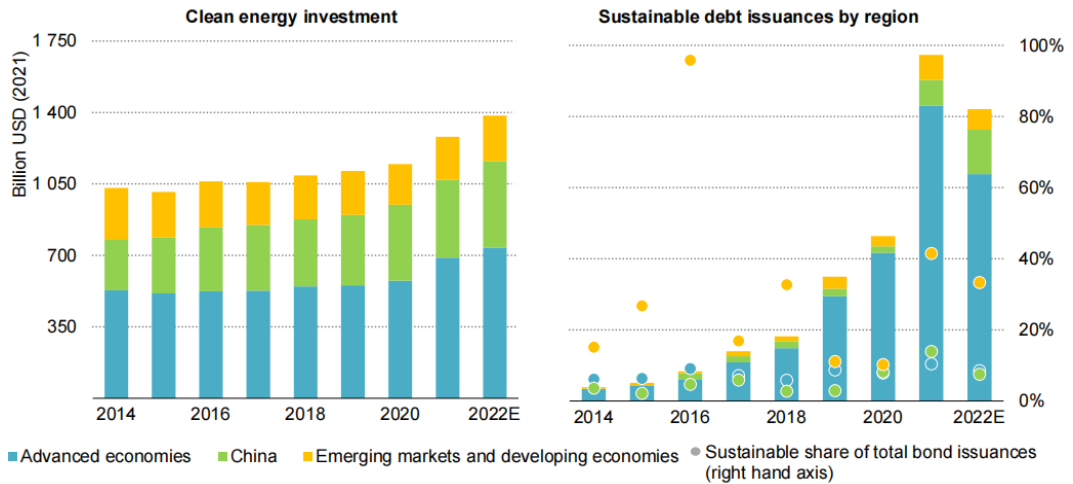


图 6 2014-2022 年不同经济体清洁能源投资规模与可持续债务变化趋势（单位：十亿美元）

## 七、能源研发投入及能源风险投资增加

2021 年，能源研发的公共投入增至 380 亿美元，其中近 90% 用于低碳能源研发。然而，从 2017 年到 2020 年，增幅仅为 5%，低于 7% 的年平均增幅。作为后疫情时代刺激计划的一部分，世界各国政府在 2021 年宣布扩大能源研发投入资金，其中大部分用于氢能技术，碳捕集、利用与封存（CCUS）技术和储能技术。



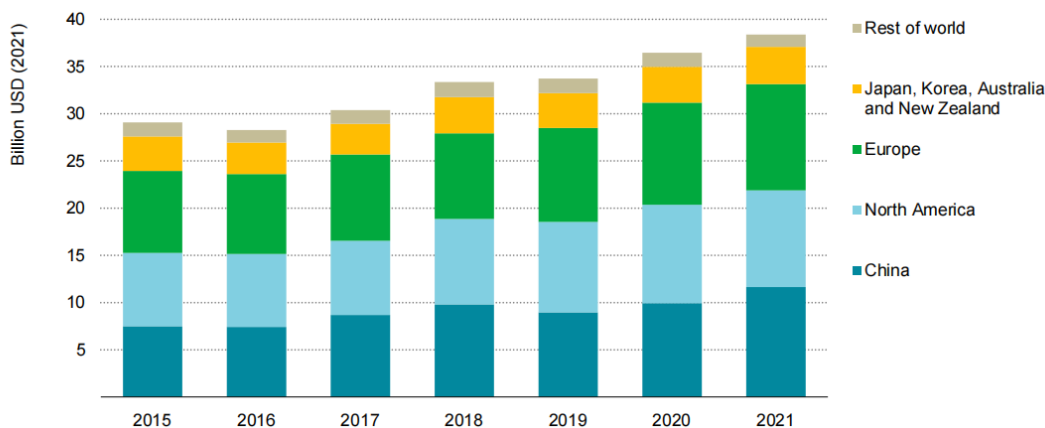


图 7 2015-2021 年各国政府能源研发公共投入变化 (单位: 十亿美元)

2021 年上市公司能源研发投资约 1170 亿美元, 较 2019 年疫情前水平增长 5%。科技领域中, 油气相关研发投资连续第二年下降, 降至 200 亿美元以下, 回落至 2015-2018 年间水平。汽车是能源相关企业研发投资最大领域, 2021 年增长 8%, 增至 510 亿美元, 预计 2022 年该行业每单位营业收入的研发投资将进一步增加, 并推动电池、氢能和储能领域的增长, 预计 2022 年涨幅超过 5%。

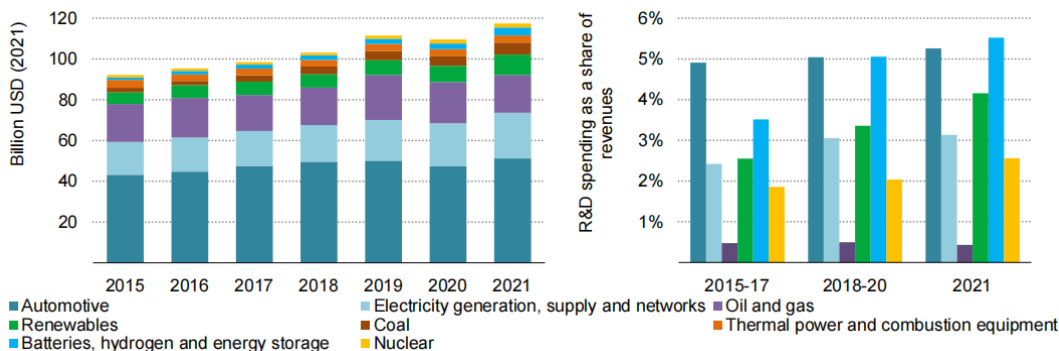


图 8 2015-2021 年全球能源上市公司研发投入及其占营业收入的比例变化 (按领域划分, 单位: 十亿美元)

2021 年能源技术初创企业筹集了 69 亿美元的早期风险投资资金, 是 2020 年水平的两倍, 创历史新高。2020 年的能源风险投资每笔交易的平均投资额大幅下降, 而 2021 年发生了逆转, 反映出投资者对能源转型的持续信心。2021 年后期能源风险投资也增长了 70%, 主要是储能、电池、氢能和燃料电池, 美国初创企业的投资翻了一番。2021 年, 约有 240 亿美元的风险投资用于电动汽车和电池, 占清洁能源初创企业筹集资金的一半以上。

(李倩 汤匀)

## IRENA：可再生氨发展势头强劲 竞争力仍有待提升

5月19日，国际可再生能源机构（IRENA）与氨能源协会（AEA）联合发布报告《创新展望：可再生氨》<sup>21</sup>，指出在未来几十年内，氨作为氢载体、动力燃料的新市场具有重要发展潜力，特别是在航运部门。在1.5°C情景下，到2050年全球氨市场需求预计将达到6.88亿吨，这些氨必须是低碳的可再生氨。目前生产可再生氨的成本高于采用CCS技术的化石氨生产成本，但从2030年开始，可再生氨的成本有望与采用CCS技术的化石氨持平。具体内容如下：

### 一、未来氨产能和市场需求强劲

氨是用于生产所有其他化学产品的七种基本化学品之一。它是仅次于硫酸的第二大化学物质。大约五分之四的氨用于生产氮肥，如尿素和硝酸铵；因此，它支持全球约一半人口的粮食生产。氨作为一种无碳燃料和氢载体，目前却尚未大规模应用。2050年对氨的需求预计将是2020年的三倍，并且这些氨均来自可再生能源生产的低碳氨。目前，大多数合成氨主要由天然气（72%）和煤炭（22%）生产。氨产业每年排放5亿吨CO<sub>2</sub>，约占全球排放总量的1%，占化工行业CO<sub>2</sub>排放的15%-20%。因此，解决氨生产中的碳排放问题是实现化工和农业部门脱碳的关键因素，还将扩大氨作为无碳燃料在交通运输行业的应用。

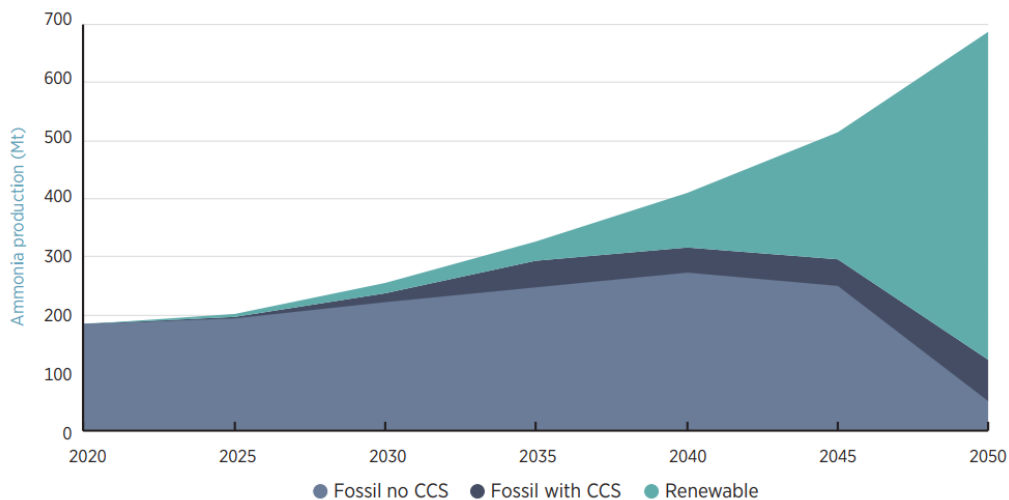


图1 2020-2050年1.5°C情景下全球氨产量的预测（单位：百万吨）

2020年，全球氨产量为1.83亿吨。在1.5°C情景下，预计到2030年现有市场需求将增加到2.23亿吨，到2050年将达到3.33亿吨。生产化肥需要的氨预计将从2020年的1.56亿吨增加到2050年的2.67亿吨。此外，在未来几十年里，氨作为氢载体、动力燃料的新市场具有重要发展潜力，特别是在航运部门。在1.5°C情景下，到2050年全球氨的市场需求预计将达到6.88亿吨，较2025年增长三倍以上。

<sup>21</sup> Innovation Outlook: Renewable Ammonia. <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia>

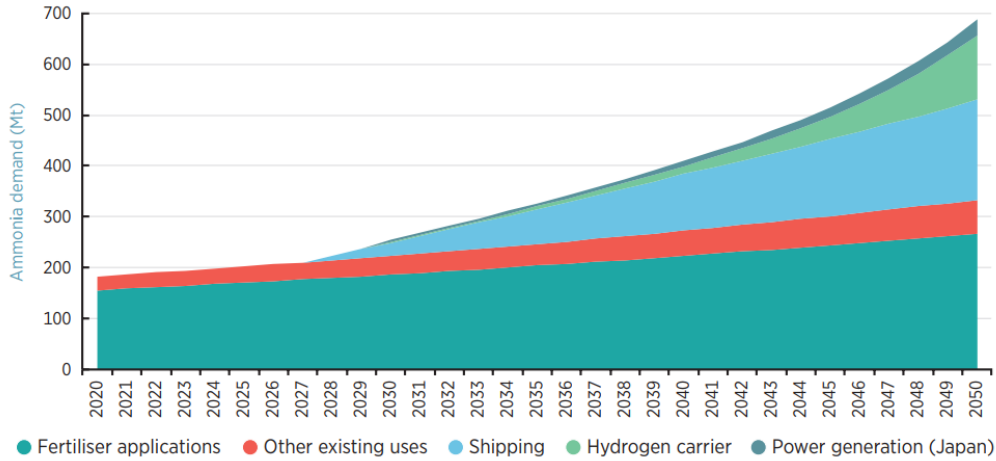


图 2 2020-2050 年 1.5°C 情景下全球氨市场需求的预测 (单位: 百万吨)

## 二、氨的工业生产正转向可再生氨

可再生氨是利用可再生原料和能源 (例如生物质、太阳能、风能、水电、地热) 生产得到的氨。2021 年可再生氨的产量不到 2 万吨, 相当于全球氨产量的 0.01%。首个以可再生氢作为原料的氨生产工厂于 2021 年 12 月在西班牙投入使用, 首个吉瓦 (GW) 规模的可再生氨工厂正在沙特阿拉伯建设中, 计划于 2025 年投入使用, 年生产能力为 120 万吨。到 2030 年, 可再生氨项目的总产能将达到 1500 万吨, 约占目前全球氨产量的 8%, 包括 54 个项目, 主要分布在澳大利亚、毛里塔尼亚和阿曼, 可再生氨的发展势头强劲, 但大多数已公布的项目尚未做出最终投资决定。IRENA 分析表明, 在 1.5°C 情景下, 到 2050 年可再生氨的产能需达到 5.66 亿吨。2025 年后, 可再生氨将成为全球流通的主要可再生能源商品之一。

## 三、到 2050 年可再生氨的生产成本有望低于化石氨

目前, 在拥有丰富太阳能和风能资源的地区, 可再生氨的生产成本估计为每吨 720-1400 美元, 到 2050 年将降低到每吨 310-610 美元。可再生氨要想与现有的化石氨生产竞争, CO<sub>2</sub> 的碳价须为每吨 150 美元。天然气基氨和煤基氨的生产成本为每吨 110-340 美元, 利用碳捕集与封存 (CCS) 技术可以对化石氨生产进行脱碳, 但 CCS 的成本因技术和捕集效率的不同而不同, CCS 将使每吨生产成本增加 100-150 美元, 因此低碳化石氨的生产成本将达到每吨 210-490 美元。虽然目前生产可再生氨的成本高于不进行碳减排的化石氨生产成本, 但预计到 2050 年可再生氨的成本将低于化石氨。可再生氨的成本在很大程度上取决于可再生氢的成本, 可再生氢占可再生氨生产成本的 90%。未来可再生氢生产成本的降低主要取决于可再生能源和电解槽成本的降低, 以及 Haber-Bosch 氨合成工艺在效率和优化存储、缓冲、规模和灵活性方面的收益。由于资本密集型资产利用率的任何提高都能直接降低产品成本, 故而每年的运营小时数 (容量系数) 是决定生产成本的关键因素, 这最终可能会给将来波动性可再生电力项目带来挑战。但是通过太阳能风能互补耦合发电系统, 电

解槽的容量系数可达 70%。在该技术加持下，从 2030 年开始，可再生氨的成本有望与采用 CCS 技术的化石氨持平。

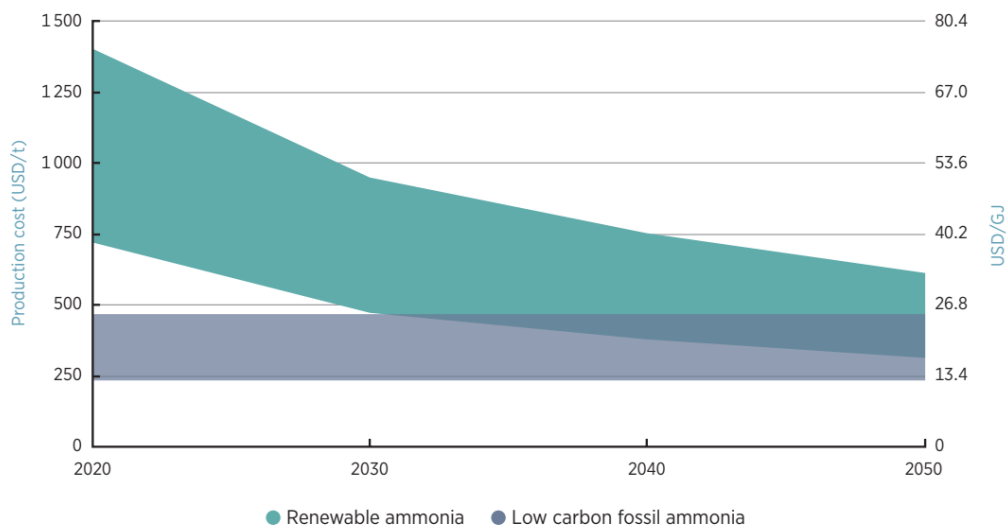


图 3 2020-2050 年可再生氨与低碳化石氨的生产成本预测与对比（生产成本左轴单位：美元/吨，右轴单位：美元/吉焦耳）

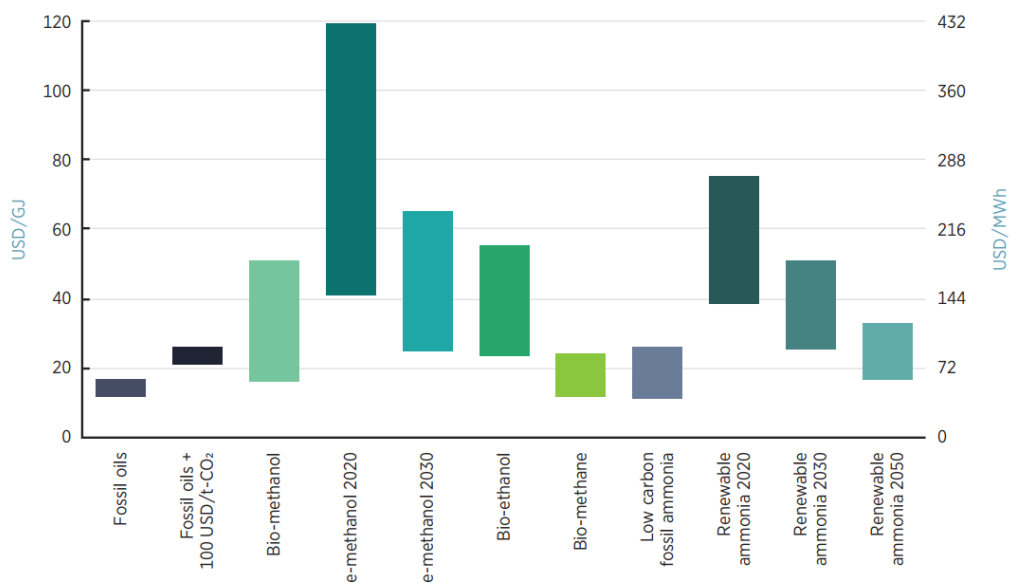


图 4 可再生氨与其他燃料的价格对比（基于每单位能源的价格，左轴单位：美元/吉焦耳，右轴单位：美元/兆瓦时）

#### 四、可再生氨的应用前景广阔

无论是化石能源还是可再生能源生产的氨，其化学结构(NH<sub>3</sub>)是相同的，因此，可再生氨是化石氨的直接替代品，每年的需求量达 1.83 亿吨（图 5）。现有的化石氨生产工厂可以通过引入可再生氢，取代 10%-20% 的天然气进行脱碳生产。大多数拟建的可再生氨生产厂都使用太阳能光伏和风能发电，技术和运营创新结合精心选址和项目设计，可以促进太阳能和风能的集成一体化。在现有市场之外，可再生氨

还可以作为低碳能源，例如用作氢载体，或作为燃料用于海运、动力和供热。与碳基氢载体相比，氨的优势在于利用氮作为氢载体，因为大气中氮气含量高达 78%，提纯大气中的氮的成本比 CO<sub>2</sub> 低，并且氨燃烧没有 CO<sub>2</sub> 排放。到 2050 年，在 1.5°C 情景下，这些新能源市场的可再生氨需求将增加 3.54 亿吨。

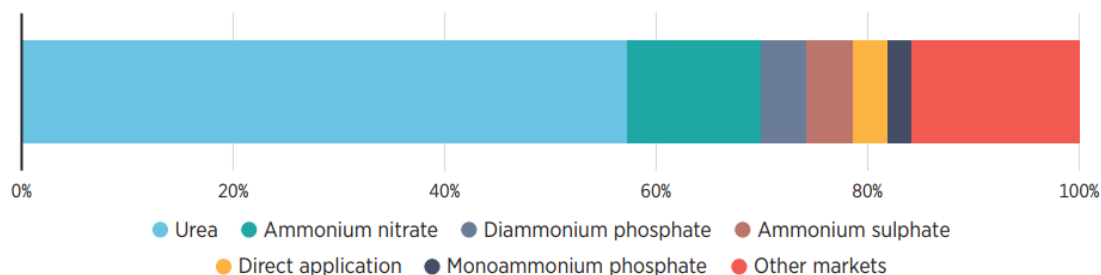


图 5 2019 年全球氨需求市场情况

## 五、促进氨生产向可再生氨过渡的十大行动

(1) **对 CO<sub>2</sub> 排放设定较高的碳价。**目前，当 CO<sub>2</sub> 的碳价约为 60-90 美元/吨时，才能弥补化石氨与低碳化石氨生产成本之间的差距；当 CO<sub>2</sub> 的碳价约为 150 美元/吨时，才能弥补化石氨与可再生氨生产成本之间的差距。

(2) **努力推进相关政策颁布实施。**无论是否对 CO<sub>2</sub> 排放定价，对燃料标准和可再生能源配额或授权强有力的监管措施，都可以最终促进价格激励，从而实现可再生氨市场的持续增长和投资。因而适当的政策手段是至关重要的，这可以确保公平的税收待遇，并为更广泛地采用可再生氨和其他有前景的可持续燃料提供长期稳定的价格下限。

(3) **积极推广现有可再生氨技术部署。**目前的重点应该是大规模实施现有技术，而不是开发新的突破性技术，因为可再生氨价值链中的大多数副产物都已证实具有经济效益。目前部署的重点应在于提高氨合成工艺的灵活性，提高电解槽的性能，提高氨裂解装置的性能，以及降低当前技术的成本。通过部署现有技术来创造短期市场，从而长远推进技术创新。

(4) **支持整个供应链的发展。**资助项目应将范围扩大到氨和其他氢载体。单一技术（如氢或太阳能电池板）的资助项目更倾向于支持早期的研发和试验项目。更广泛的资助项目侧重于这些技术的应用（如电制燃料、能量储存），通过连接跨生产的价值链来支持部署。由于国内生产可能无法满足需求，也需要引入外资，以支持全球供应链的发展。

(5) **促进国际合作以降低供应风险。**为了在生产和消费地区创造就业机会并鼓励有竞争力的可再生氨新产业，必须促进国际合作。同时，增加对可再生氨产能的投资可以扩大能源和原料供应范围，并将政治风险降至最低。

(6) **开发并资助电解槽制造技术。**未来十年千兆瓦规模的电解槽工厂的需求量

将不断增加。由于规模经济的加速发展，这种大规模电解槽工厂的发展必然会降低电解槽生产的成本，将使可再生氨比化石氨更有竞争力。

**(7) 政府将采取措施降低早期投资风险。**政府需出台相关激励措施帮助首批建设千兆瓦规模可再生氨厂的投资者降低投资风险。在运营支出（OPEX）方面，投资可以通过 CfD 或绿色溢价、可再生授权、采购合同和承购担保，或拍卖项目的中间担保买家来降低风险。

**(8) 不断优化可再生氨生产技术。**目前生产尿素的合成氨工厂可以通过整合 CCS 技术、eSMR 技术（电气化蒸汽甲烷重整）改造或用可再生氢气替代化石燃料实现脱碳，这代表着现有的每年约 8000 万吨合成氨的产能可以实现脱碳目标。

**(9) 支持需求侧逐步淘汰化石燃料。**政府和监管机构应该鼓励现有的化石燃料资产加速向可再生能源过渡，减少对化石燃料的需求。改造现有设备往往比建设新设备更具有成本效益，特别是在初始扩大规模阶段。对于电力部门和海运部门，目前的技术可以通过改装设备来使用氨燃料，这比建造新设备的成本更低。

**(10) 重新评估氨在氢能战略中的作用。**在肥料生产的背景下，大多数氢能战略只考虑了氨作为氢的消费者，而忽略了它作为燃料和氢载体的潜在功能。在将氨作为氢载体的情况下，氨应在可能的情形下直接使用，而不是使用从氨分解中获得的氢气。因此，氨可能是大规模进口氢气的最具成本效益的载体，并且对氨的直接使用可以进一步提高成本效益，需重新评估氢和氨在国家氢能战略背景下的角色。

（朱丹晨 汤匀）



## 《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：汤匀 陈伟

联系电话：(027) 87199180

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