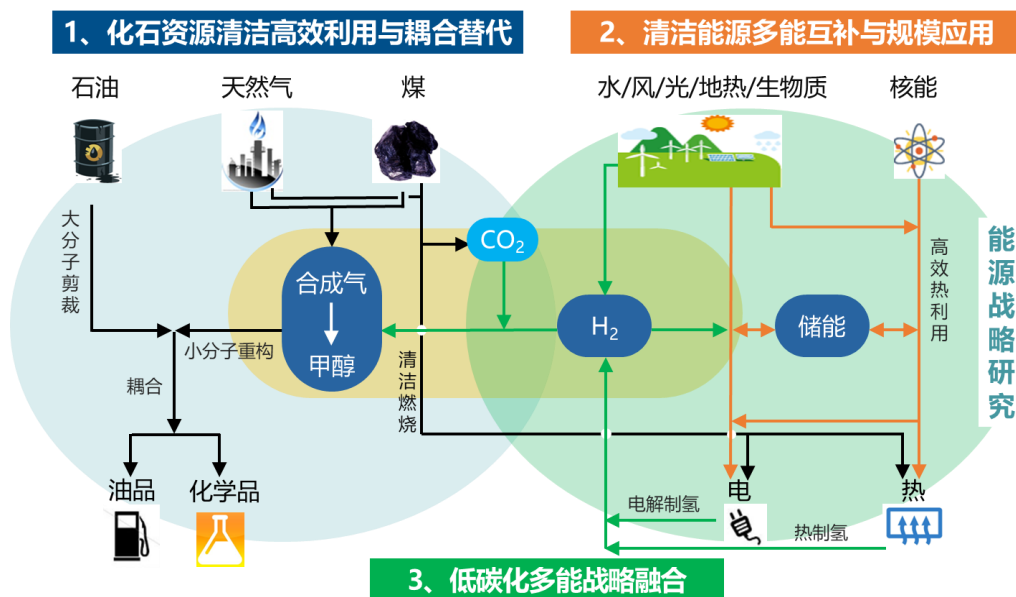




洁净能源科技动态监测快报

2019 年第 02 期（总第 02 期）



本期看点

- 美国规划至 2035 年天然气水合物研究开发路线图
- 欧洲风能技术创新平台发布至 2027 年风能研发路线图
- 欧洲可再生能源供热制冷技术创新平台发布 2050 技术发展战略框架
- 欧盟“电池 2030+”计划工作组发布电池研发路线图草案
- 国际能源署发布《世界能源展望 2019》报告
- OPEC 展望至 2040 年全球石油供需市场发展走势

目 录

2019 年第 02 期 (总第 02 期)

◆ 化石资源清洁高效利用

美国规划至 2035 年天然气水合物研究开发路线图	2
ARPA-E 资助 4300 万美元支持碳捕集和封存技术研发	3
DOE 资助 700 万美元推动先进燃煤发电技术研发	4
NETL 开发煤炭原料提质和生产煤基高价值产品新技术	5

◆ 清洁能源多能互补

欧洲风能技术创新平台发布至 2027 年风能研发路线图	7
欧洲可再生能源供热制冷技术创新平台发布 2050 技术发展战略框架	9
英国政府投入 2.2 亿英镑支持发展球形托卡马克技术	14
DOE 资助 7300 万美元支持非粮生物质能源研究	14
微量添加剂抑制相转变大幅提升钙钛矿电池空气环境稳定性	16

◆ 低碳化多能融合

欧盟“电池 2030+”计划工作组发布电池研发路线图草案	17
一维 PtNi 合金纳米笼串珠催化剂展现超强催化活性和稳定性	19
低成本太阳能直接驱动全解水产氢创下 18.7% 转换效率纪录	21

◆ 能源战略研究

国际能源署发布《世界能源展望 2019》报告	23
OPEC 展望至 2040 年全球石油供需市场发展走势	27
IRENA: 氢能正迎来前所未有的发展机遇	31

本期概要

美国能源部(DOE)天然气水合物咨询委员会发布新版《天然气水合物研究开发路线图:2020-2035》报告,提出了近期和远期目标,并系统阐述了实现目标需要开展的三大优先研究领域,包括:(1)通过钻井和取芯对墨西哥湾储层进行表征;(2)天然气水合物产能测试和示范;(3)美国近海水域的天然气水合物潜力评估。

欧洲风能技术创新平台(ETIP-Wind)发布《风能研发路线图》,确定了2020-2027年间欧盟风能技术五个重点领域的研发优先事项,包括:并网及系统集成;运行与维护;下一代风能技术;降低海上风电成本相关技术;浮动式海上风电。

欧盟可再生能源供热制冷技术创新平台(RHC-ETIP)发布《欧洲100%可再生能源供热制冷2050年愿景》报告,提出了至2050年实现100%可再生能源供热制冷的技术发展框架:太阳能区域供热是一种创新的解决方案,比基于燃气的区域供热成本更低。生物质能在供热市场的发展潜力巨大,预计2050年以后欧洲利用生物质进行能源生产的潜力为7-30艾焦。地热区域供热将越来越多地应用于现有建筑物和旧城区,地热能和小型供热网可能是单个建筑物的最佳选择。预计到2050年,地热供热制冷系统将在欧洲随处可见。用热泵代替化石燃料锅炉可以节省约50%的一次能源,用热泵替换电加热系统则可节省2/3-3/4的终端或一次能源。预计到2050年,区域热网可以满足欧洲近一半的供热需求。

欧盟“电池2030+”(BATTERY 2030+)计划工作组发布电池研发路线图第二版草案,提出未来10年欧盟电池技术的研发重点:未来将围绕材料开发、电池界面/中间相研究、先进传感器、自修复功能四个主要研究领域,以及电池制造和回收利用两个交叉研究领域开展新概念技术(技术成熟度在1-3级)研发活动。

国际能源署(IEA)发布《世界能源展望2019》报告,采用情景分析法展望了至2040年全球能源发展趋势:碳排放强烈反弹、化石能源依赖度高居不下和地缘政治持续动荡等多种因素作用使得全球能源系统转型面临严峻挑战。展望未来,能源安全至关重要,而石油则是焦点所在。美国页岩油气产量预计长期保持在较高水平,这会直接挤占OPEC国家和俄罗斯在全球石油供应中的份额,后两者的占比将从2005年前后的55%下降到2030年的47%,使得全球石油供应更加多元化。但无论全球能源如何发展,世界仍然严重依赖中东的石油供应。而就能源需求方而言,非洲对全球能源发展趋势的影响越来越大。到2040年,非洲石油需求增长幅度会大于中国,同时受近年来该地区一系列重大气田的发现等因素影响,其天然气需求量也将大幅增长。全球将进一步迈向电气化,展望期内,电力将是需求增速最快的终端能源品种。

石油输出国组织(OPEC)发布《全球石油展望2019》报告,对全球石油供需现状和未来发展趋势进行了系统的展望分析:至2040年,石油仍将是能源结构主体,在能源结构中的占比仍将保持最高份额。届时,全球石油需求预计增长约1200万桶/日,即从2018年的9870万桶/日增至2040年的1.106亿桶/日。

化石资源清洁高效利用

美国规划至 2035 年天然气水合物研究开发路线图

近日，美国能源部（DOE）天然气水合物咨询委员会发布了《天然气水合物研究开发路线图：2020-2035》¹报告，这是继 2006 年和 2013 年后，发布的第三版天然气水合物研发路线图。相比 2013 年的路线图，最新版本路线图将天然气水合物研发周期从 2015-2030 调整到 2020-2035 年，提出了近期和远期的两大目标：一是到 2022 年在北极北坡完成天然气水合物长期储层响应测试；二是到 2035 年，通过证明天然气生产的可持续性和经济可行性，降低天然气水合物开采的商业风险，并确保开采井完整性。

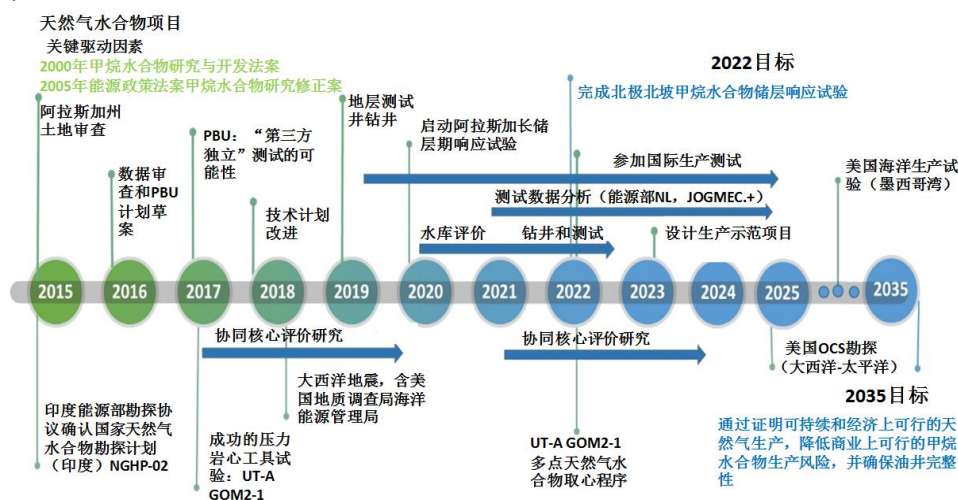


图 1 美国天然气水合物研发路线图

报告系统地阐述了 DOE 天然气水合物研究计划的三大重点研究领域，包括：通过钻井和取芯对墨西哥湾储层进行表征，天然气水合物产能测试和示范以及美国近海水域的天然气水合物潜力评估。具体内容如下：

（1）通过钻井和取芯对墨西哥湾储层进行表征

墨西哥湾储层特征研究的最终目的是准确评估天然气水合物的聚集程度和性质以及墨西哥湾含水合物储层的生产潜力。为对墨西哥湾含天然气水合物储层特征的研究，主要有三个目标：

目标 1：利用近距离观测井和岩心数据了解非均质性、分层、覆盖层和天然气水合物分布；

目标 2：描述和预测天然气水合物储层在生产过程中的行为，并通过长时间的生

¹ Gas Hydrates Research and Development Roadmap: 2020-2035.

https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Gas%20Hydrates%20Roadmap_MHAC.pdf

产测试验证气藏数值模拟；

目标 3：建立对地质力学行为与天然气水合物饱和度之间关系的基本认识。

(2) 天然气水合物产能测试和示范

该项目目的是收集适当和充分的数据，以大大降低地下永冻砂岩储层中天然气水合物开采的商业风险。天然气水合物产能测试和示范（2020-2035）主要有两个目标：

目标 1：首次开展长期储层响应测试，以帮助确定是否能够长期可持续产生粗粒度的多年冻土相关水合物成藏；

目标 2：开展第二次长期储层响应测试，以证实模拟和半商业化生产率能够支持天然气水合物开采的商业可行性。

(3) 美国近海水域的天然气水合物潜力

为了评估美国近海边缘天然气水合物的范围和储层可行性，需要采用全系统方法对海洋天然气水合物系统中的变量设置约束。这一方法在大洋钻探计划（ODP）对全球天然气水合物系统的钻探中已被证实可行。不过，研究结果表明，海底天然气水合物的积累存在明显的变化，包括理想的无天然气水合物的储层环境。这一内容主要有 5 个目标：

目标 1：完成现有的、全系统的方法，重点研究阿拉斯加北坡和墨西哥湾；

目标 2：通过勘探地球物理勘查/钻井/取芯识别墨西哥非海湾和阿拉斯加北坡边缘的重要天然气水合物系统；

目标 3：提高对不同构造环境下天然气水合物系统是如何形成和随时间演化以及在什么时间尺度上形成和演化的认识，辨别它们是否可再生；

目标 4：不同构造环境下甲烷形成和储层损失的约束机制（全球甲烷碳循环）；

目标 5：能源部继续发挥协调作用，参与其他机构在资源评估、碳循环研究以及美国边缘和国外海底测绘的工作。

（李桂菊）

ARPA-E 资助 4300 万美元支持碳捕集和封存技术研发

11 月 14 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布新设立“灵活碳捕集和封存（FLECCS）”主题研究计划，资助 4300 万美元用于推进碳捕集和封存（CCS）技术研发²，着重解决 CCS 设计、运营和商业化部署面临的一系列技术挑战，促进电力系统脱碳化。本次资助研究课题将分两个阶段开展，第一阶段将侧重于 CCS 概念原型的设计和优化工作。第二阶段将开展 CCS 实物组件、小型原型系统开发，以减

² Department of Energy Announces \$43 Million to Develop Carbon Capture and Storage Technology
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-43-million-develop-carbon-capture-and-storage-technology>

少 CCS 系统商业化部署面临的技术风险和成本。具体内容如下：

表 1 碳捕集和封存（CCS）主题研发计划具体内容

阶段	具体研究内容
阶段一	<ul style="list-style-type: none">•开发一个配备 CCS 系统的燃煤电厂仿真模型，开展整个系统模拟运行试验，以评估该系统的技术经济特性•采用节点边际电价（LMP）数据（由 ARPA-E 提供），来实现对配备 CCS 系统发电站电力的优化调度，如当 LMP 大于整个电厂的运行边际成本时开始进行工作调度，而当 LMP 低于整个电厂的边际成本时则降低电力功率输出或关闭•详细研究配备 CCS 系统发电厂的工作过程动态和物理机制。因为 CO₂ 注入过程中可能导致注入井的压力、温度和密度的突变，导致干冰和 CO₂ 水合物的形成，可能导致注入井出口堵塞和管道套管破裂•开展配备 CCS 系统电站的现场验证试验，以验证其真实的技术和经济性能，来支持 CCS 系统设计和制造优化工作（如需要开发新材料）•综合考量配备 CCS 系统电厂的全部工厂成本、LMP 数据等信息来优化电厂的设计和运营，实现净现值（NPV）最大化
阶段二	<ul style="list-style-type: none">•开发基于第一阶段确定的配备 CCS 系统发电站的最佳设计方案•构建一个配备 CCS 系统发电站原型系统，开展现场运行试验，验证技术经济性

（张凯宏 郭楷模）

DOE 资助 700 万美元推动先进燃煤发电技术研发

10 月 11 日，美国能源部（DOE）宣布在“Coal FIRST”计划框架下，向 7 个先进燃煤发电概念设计项目提供 700 万美元资助³，旨在推进开发超越现有技术的新型燃煤发电，使燃煤电厂更适应现代化电网。本次资助聚焦 7 大主题领域，具体内容如下：

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

³ U.S. Department of Energy Invests \$7 Million for Projects to Advance Coal Power Generation under Coal FIRST Initiative. <https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-invests-7-million-projects-advance-coal-power-generation-under-coal>

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

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

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

5、集成超临界 CO₂ 循环、加压流化床燃烧和电热储能的燃煤发电 pre-FEED 研究。超临界 CO₂ 循环发电比常规和先进的蒸汽朗肯循环发电更高效、占地面积更小，无需消耗水，基于 CO₂ 的电热储能将为系统增加灵活性，这些技术有助于实现未来小型、高效、灵活的模块化燃煤电厂。

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

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

（岳芳）

NETL 开发煤炭原料提质和生产煤基高价值产品新技术

近期，美国国家能源技术实验室（NETL）正通过“选煤计划”，以及和大学、其他国家实验室通过“煤基碳材料制造联合会”（COAL MAT）开展合作，开发煤炭在建筑材料、储能、碳基复合材料和 3D 打印材料等领域的新用途⁴。NETL 的选煤研究通过对煤进行处理以改善其物理化学性质，以增强其作为碳基原料的价值，并用于开发煤基新型高价值产品，主要包括对煤炭原料提质和生产其他高价值产品技术的实验室和中试规模测试。正在进行的具体研究包括：

⁴ NETL Creating New Technologies and Leading Major New Consortium to Create Non-Traditional Uses for American Coal. <https://netl.doe.gov/node/9241>

1、煤炭原料提质

通过煤炭脱水、煤瘦化（fine coal leaning）、干法选煤等方法提升低阶煤品质，通过化学处理和生物加工技术降低对环境的影响。主要包括：①煤制碳基产品研究，生产具有成本竞争力的高价值碳纤维和纳米材料；②煤原料研究，以提高煤炭使用价值，扩大发电和炼钢市场；③煤炭属性数据库开发，使煤炭供应商和电厂运营商能够估算煤炭属性和成分对现有和新建发电厂效率、可靠性和排放的经济影响。

2、煤生产高价值产品

在研的技术包括以煤为碳基原料来制造碳纤维、水泥和结构复合材料的碳基添加剂、电池和电极材料、碳纳米材料和复合材料、塑料复合材料及3D打印材料。主要包括：①煤基制造技术的开发和表征，研究煤基碳纤维和含有此类纤维的复合材料；②探索和部署用煤和煤基副产品制造新材料和消费品新技术，包括利用煤炭生产低成本碳纳米材料（石墨烯），并用于生产建筑材料（混凝土/沥青）、微型碳基电子产品和水净化材料；③评估和分析煤基制造技术如何影响碳基产品市场以及当前煤炭市场，评估煤炭原料将对哪些市场和产品产生最大影响，以及将这些产品推向市场的经济驱动因素和挑战。

清洁能源多能互补

欧洲风能技术创新平台发布至 2027 年风能研发路线图

11 月 27 日，欧洲风能技术创新平台（ETIP-Wind）发布了《风能研发路线图》⁵，确定了 2020-2027 年间欧盟风能技术五个重点领域的研发优先事项，包括：并网及系统集成；运行与维护；下一代风能技术；降低海上风电成本相关技术；浮动式海上风电。

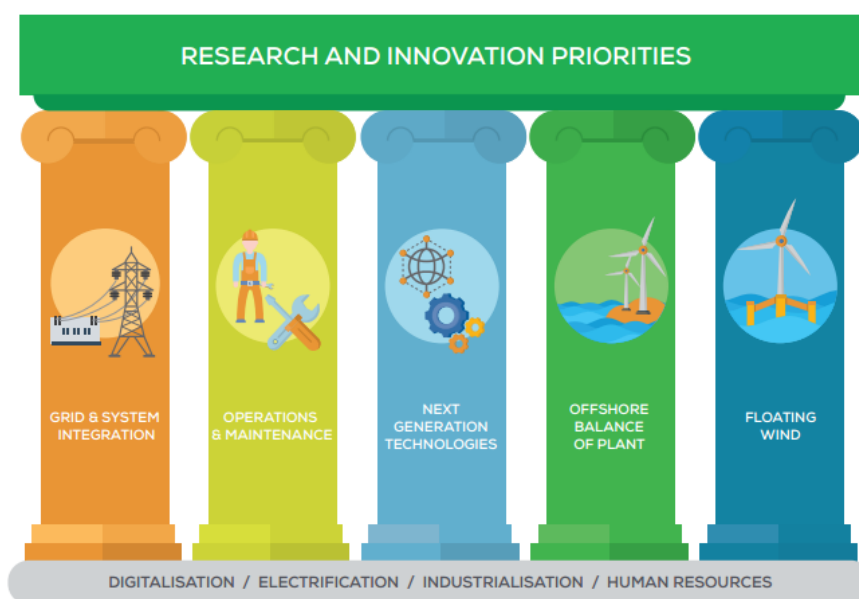


图 1 风能研发路线图五大优先研究领域

路线图详细阐明了各技术领域面临的关键挑战和近、中、远期研发优先事项，并明确了研发优先级。欧盟委员会于 2016 年在“战略能源技术规划”（SET-Plan）框架下建立了 ETIP-Wind，汇集了风能行业的利益相关方，包括产业界、政府部门和研发机构，主要工作是制定欧洲风能技术研发重点并进行沟通和协调，以确保欧洲风能保持领先地位，实现欧洲气候和能源目标。路线图明确的研发要点如下：

一、并网及系统集成

按照研发重要性进行优先级排序，近、中、长期将实施的优先事项如表 1 所示。

⁵ ETIPWind Roadmap. <https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-roadmap-2020.pdf>

表 1 并网及系统集成领域的阶段性优先事项

实施优先级	2020-2022	2023-2024	2025-2027
高	发电量和需求量预测；短时间周期储能技术研究	输电基础设施优化	100%可再生能源的系统稳定性研究
中	长时间周期储能	量化系统服务；可持续混合能源系统解决方案	—
低	多种配置风电场；未来系统需求建模	—	—

二、运行与维护

按照研发重要性进行优先级排序，近、中、长期将实施的优先事项如表 2 所示。

表 2 运行与维护领域的阶段性优先事项

实施优先级	2020-2022	2023-2024	2025-2027
高	寿命评估和运行情况监测；开发用于涡轮机控制和监测的数字技术	动态电缆修复解决方案；智能运行的数字化解决方案；预测环境参数输电技术设施优化	—
中	利用机器人进行检查和维修的方法	退役策略和技术；极端环境下的运行解决方案	—
低	—	—	—

三、下一代风能技术

在下一代风能技术领域，按照研发重要性进行优先级排序，近、中、长期将实施的优先事项如表 3 所示。

表 3 下一代风能技术领域的阶段性优先事项

实施优先级	2020-2022	2023-2024	2025-2027
高	新型组件材料的开发和性能验证；叶片回收示范；将风电系统整合到周围的自然和社会环境中	开发可持续材料；制定标准；新型制造工艺开发	组件和材料回收
中	开发大型零件运输的新方法	传感器、诊断和响应技术研发；下一代风力发电机；降噪技术；组件的可靠性研究	颠覆性技术
低	—	—	—

四、降低海上风电成本

按照研发重要性进行优先级排序，近、中、长期将实施的优先事项如表 4 所示。

表 4 降低海上风电成本相关技术领域的阶段性优先事项

实施优先级	2020-2022	2023-2024	2025-2027
高	—	布线和连接	制定跨行业标准和协议；集成优化设计方案；方法和流程的验证
中	数据可用性和共享；子结构批量生产的流程分析	材料耐用性和保护	—
低	—	—	完善供应链物流

五、浮动式海上风电

按照研发重要性进行优先级排序，近、中、长期将实施的优先事项如表 5 所示。

表 5 浮动式海上风电领域的阶段性优先事项

实施优先级	2020-2022	2023-2024	2025-2027
高	精益制造；验证设计工具；系泊和锚；动态电缆；控制方法	—	—
中	—	开发供应链中的集成设计流程	停机控制
低	—	浮动安装、组装和大型维护	—

(周荷雯 李由姿 岳芳)

欧洲可再生能源供热制冷技术创新平台发布 2050 技术发展战略框架

10月24日，欧洲可再生能源供热制冷技术创新平台（RHC-ETIP）发布了《欧洲100%可再生能源供热与制冷2050年愿景》⁶报告，提出到2050年实现欧洲供热和制冷完全使用可再生能源的发展目标。该愿景从城市、区域能源网络、建筑、工业等不同应用领域，确定了到2050年实现完全可再生能源供热和制冷的技术发展战略框架，总结了欧盟用于供热和制冷的各种可再生能源技术最新现状及开发潜力。欧盟委员会于2016年在“战略能源技术规划”（SET-Plan）框架下建立了RHC-ETIP，汇集了生物质、地热、太阳能热利用和热泵等行业的利益相关方，涉及区域供热和制冷、储热及混合系统等技术领域，旨在加强可再生能源在供热和制冷领域的应用。报告要点如下：

⁶ The RHC ETIP publication ‘2050 Vision for 100% Renewable Heating and Cooling in Europe’ is ONLINE!. <https://www.rhc-platform.org/2050-vision-for-100-renewable-heating-and-cooling-in-europe-is-online/>

一、实现 100% 可再生能源供热和制冷的技术发展战略框架

1、城市可再生能源供热和制冷

为了实现城市的 100% 可再生能源供热和制冷，需要整合当地能源系统的不同组成部分和参与者并建立协同效应，具体的技术目标是：①改善建筑物和区域的智能电器和能量管理系统，将其完全整合至整个能源系统中，实现以智能方式管理供热和制冷的供应、储热、可再生能源电力及其输送；②开发接口技术以连接（近）零能耗建筑，以建立零能耗建筑群和负能耗区域；③向城市提供可满足所有供热、制冷和热水需求的可再生能源供热和制冷技术及系统的相关信息。

2、区域可再生能源供热和制冷

（1）发展目标。通过使用生物质、太阳能、地热能、余热和环境热以及非化石燃料发电，区域可再生能源供热和制冷可实现完全脱碳。将可再生能源集成到区域供热和制冷系统需要开发和示范以下解决方案：①将系统与当地无碳和低碳能源相匹配，建立具有较低和极低供应温度的新型区域供热和制冷网络，降低现有网络的温度，系统设计和运行应适应更低温度，并集成热泵、制冷设备和储能设备；②从能源系统整体角度，在不同规模上与不同终端用能部门（电力、热/冷、燃气、交通）相关联，有效供应、管理和利用高比例可再生能源。

（2）数字化技术将起到关键作用。数字化技术对于实现 100% 区域可再生能源供热和制冷起关键作用，需从 4 个方面发挥其作用：①供应，通过数字化技术获得更低成本、更高效和使用更多可再生能源的系统，如通过智能网络控制器等先进解决方案集成波动性可再生能源，通过削峰等智能控制手段提高可再生能源系统的运行效率；②区域，通过低成本、可靠且可扩展的数据收集和通信系统管理实时能源数据，通过机器学习和数据挖掘优化能量分配，最大限度提升系统与温度、流量、压力、热需求和电网损失相关的性能；③用户，数字化技术可帮助用户了解其用能情况，调整用能需求以提高区域供热和制冷系统的效率，智能电表和远程控制可以细化数据的时间颗粒度，供需双向数据流将有助于改善系统运营；④设计与规划，通过开发和应用数字解决方案优化市政规划，如大数据分析、映射算法、过程计划工具、复杂优化和仿真方法等，开发和测试技术和运行模型对多能源系统进行仿真和优化。

3、100% 可再生能源建筑

（1）发展目标。在建筑物中使用可再生能源供热和制冷将最终实现如下目标：①通过能效措施将所需设备的尺寸/功率/容量降至最低；②尽可能使用太阳能或被动地热供热及制冷；③必要时使用生物能或可再生能源电力补充供热和制冷需求。

（2）储能和部门协同是关键因素。储热技术可优化不同可再生能源的组合，显著改善与可再生能源间歇性相关的问题。集成现场供热和制冷、储能、可再生能源

电力和燃气网的解决方案将提供更优质的能源服务，使用热泵进行空间供热和制冷，并将其与太阳能热利用结合用于生活热水和空间供热将是一种选择。

(3) 系统化方案 and 用户参与将越来越重要。建筑物供热和制冷将向系统化方案演变，根据建筑的设计标准进行优化。系统将变得更智能和用户友好，可进行远程操作或控制。物联网技术、智能电表和建筑能量智能管理系统将使用户更深入参与到能源系统中，成为产消合一者。

4、100%使用可再生能源供热和制冷的工业

在工业领域实现完全使用可再生能源供热和制冷需要设计新的工艺，以及对现有设备进行改造。通过创新过程技术实现持续的过程管理，可实现在 120℃ 以下使用可再生能源，并能极大降低能源需求。储热对于整合不同的供热和电气至关重要，可应对价格波动和季节性变化。到 2050 年，可再生能源可以完全满足工业的供热和制冷需求，太阳能、地热能等将用于低温过程热，可再生能源电力则将主要用于高温过程热，通过可再生能源生产的氢气和氨可用于生产钢铁、水泥等高温过程。用于制造的工业能量管理系统主要针对单一供应，只能在有限范围内对需求和供应（热、电）的波动做出响应，因此需利用数字化技术优化工业能量管理系统的设计和运行，利用基于过程需求和供应的（近似）实际生产数据、历史数据和预测数据，开发整体优化方法。将利用数字化模型，针对实例开发和验证高效过程的解决方案，并在制造行业（如印刷电路板行业）中实施。

二、用于供热和制冷的可再生能源技术发展现状及开发潜力

1、太阳能热利用

(1) 技术现状。太阳能热利用技术具有极强的可扩展性，目前用于供热和制冷主要提供 40-70℃ 范围的生活热水和空间供热，太阳能区域供热系统功率可超过 100 兆瓦（热）。光热发电已经在工业过程供热方面有了大规模的应用，其成本低于燃气锅炉且在整个生命周期中基本恒定，因此可避免燃油价格波动的风险。主动式太阳能房屋将太阳能用于生活热水，可实现 70%-80% 的能源需求由太阳能供应。工业过程太阳能供热可满足 150℃ 要求的供热，需要进一步示范和可行性验证。

(2) 开发潜力。太阳能区域供热是一种创新的解决方案，比基于燃气的区域供热成本更低。太阳能热利用可实现夏季的需求削峰和补充冬季热量供应，与季节性储热和其他低温热源集成能够发挥良好的效果。工业过程太阳能供热将需要解决标准化、系统验证和风险评估等问题以实现规模化应用。数字化将有助于不同技术和设备间的集成，物联网、工业 4.0、智能家居及电力和热力设备的整体集成将使太阳能热利用解决方案更为智能。

2、生物质能

(1) 技术现状。目前生物质占欧盟终端用能的 10.5%，占可再生能源消耗量的

59%，75%的生物质被用于供热。生物质用于空间供热的典型规模是千瓦级，而几十兆瓦的生物质锅炉则用于集中供热，并且用来供应热水。沼气和生物燃料可在锅炉中直接燃烧供热也可用于热电联产，生物甲烷则可注入天然气网中。生物能可提供工业过程所需低温热、蒸汽和高温热，是最便捷的解决方案之一。燃烧木柴、木片或生物质颗粒的小型加热系统易于使用、成本低，正取代欧洲许多地区的燃油取暖。生物质既可用于区域供热又可用在热电联产系统中发电，能源利用效率高达 85%-90%。用于家庭的微型热电联产尚处于起步阶段，但具备增加使用生物质的潜力。

(2) 开发潜力。除立法、监管和产业等因素，生物质能在供热市场的发展潜力取决于：开发高品质生物燃料；发展技术以降低成本；智能系统集成，通过数字和人工智能技术降低规划、安装和运行的复杂性。预计 2050 年以后欧洲利用生物质进行能源生产的潜力为 7-30 艾焦。

3、地热能

(1) 技术现状。目前地热能用于供热和制冷主要用在从几千瓦级的家庭热水到 500 千瓦以上的大型热水供应，以及区域供热。一些创新的应用如地热制冷、融化冰雪以及海水淡化已经得到验证。地源热泵和地热区域供热系统可提供住宅所需的低温热。地热区域供热将越来越多地应用于现有建筑物和旧城区，地热能和小型热网可能是单个建筑物的最佳选择。

(2) 开发潜力。未来几十年的关键挑战是地热区域供热和地源热泵的可靠设计、工程和控制能力，以保持全年将地热可持续地用于供热和制冷。对热电联产地热系统和新一代地热系统（如增强型地热系统）的进一步开发也将发挥关键作用。地热将与其他可再生能源整合用于建筑的能源系统，地热能存储（如地下储热、埋管储热、含水层储能）将被用于季节性储能，并可用于工业余热和太阳能的存储。还将进一步发展地热供热用于农业。增强型地热系统作为一项突破性技术将大规模发展，通过热电联产可同时提供电力和热量。预计到 2050 年，地热供热和制冷系统将在欧洲随处可见。

4、热泵

(1) 技术现状。随着部署的增加，热泵技术正成为使供热和制冷脱碳的能源组合的基石。同时，热泵也是提高白色家电甚至电动汽车能效的首选技术。除了利用可再生能源，当前的热泵技术可以利用工业余热、建筑和工业过程中的废气等。将储热集成到热泵系统中可以弥补能源生产和消费的时间差。热泵系统可实现 50-70℃ 的温差，将多个压缩机组合则将克服更大的温度差，从而将源头温度提升至需要的水平。压缩循环热泵（电驱动）将低温可再生热能转化为高温热能。热驱动热泵（如吸附式冷却器）基于热吸附循环，利用废热或可再生热能进行制冷，其性能提升可实现驱动温度高达 250℃。工业热泵通常供应温度水平在 30-50℃ 或 55-65℃ 的热量，

当前研究目标是提供温度为 200-250℃ 的热量。热泵技术的创新和研究正专注于改进组件、产品和系统，而新技术（如磁热泵）尚处于概念/实验阶段。

(2) 开发潜力。用热泵代替化石燃料锅炉可以节省约 50% 的一次能源，用热泵替换电加热系统则可节省 2/3-3/4 的终端或一次能源。从系统角度来看，热泵的节能潜力更大，将高效热电联产系统中的锅炉替换为热泵，还可使废热能够用于区域供热系统，将地热或太阳能用于热泵则可为热泵创造更好的部署机会。

5、储热

(1) 技术现状。在目前各种储热技术中，采用水作为储热介质的显热存储技术最简单、成本最低，广泛用于住宅、区域供热和工业，采用液体和固体介质的地下显热存储也是常用的大规模储热方式。潜热存储方式能量密度更高，存储温度范围更广且可用于制冷。热化学存储基于放热和吸热的可逆化学反应，理论存储密度比水基储热系统高十倍，且没有热量损失，但该技术较新，尚需开发各种适用于市场的产品。地下储热主要用于平衡季节性供需，还可储存中温余热，提高可再生能源和废热的利用率以及能源系统的灵活性。

(2) 开发潜力。未来将进一步开发或改进大规模储热技术，包括：长寿命、低成本的耐高温衬里材料；不同地质环境下大容量、深坑或储罐存储的施工技术；可降低热损失并提高存储性能的隔热材料和技术；浮式或自带盖子的结构，可有效利用储罐的顶部空间；改进系统集成、液压和控制，以优化系统性能；开发工作温度在 5-15℃ 的相变材料，将冷库集成到冷却系统中；开发集成热交换器的储罐，缩小储罐体积并提高能量传输率，如使用纳米相变材料；通过材料开发（如中孔材料和复合材料）和组件优化等，降低技术成熟度达到 5-6 级的紧凑型储热技术的成本；开发测试和评估方法，并将材料整合到反应器组件中；开发新型传感器技术以优化控制；进行下一代紧凑型储热技术的示范；开发新型相变材料和钛复合材料、反应器和系统集成技术，用于工业中、高温储热。

6、区域热网

(1) 技术现状。目前欧盟已部署了 6000 多个区域热网，满足欧盟 11%-12% 的供热需求，北欧、东欧等气候较冷国家对区域热网的应用较多。第四代区域热网正开始取代第三代技术，这是一种低温区域热网，其在热量分配过程中可减少热损失，改善热量供应和需求的热品质匹配，降低热应力和烫伤风险。低温区域热网还有助于提高热电联产电厂的电热比，并通过烟气冷凝回收废热，提高热泵效率，增强对低温余热和可再生能源的利用。

(2) 开发潜力。预计到 2050 年，区域热网可以满足欧洲近一半的供热需求。城市将是区域热网的最佳应用地区，可收集城市景观中的低等级废热作为区域热网的热源。区域制冷是技术成熟的新兴行业，具备强劲的增长潜力。可再生能源电力

驱动的大型热泵将越来越多用于区域热网。工业和商业产生的大量余热也可作为区域热网的热源，提高能源利用率。区域热网还可作为一种有效的储能方案，吸收过剩的可再生能源电力以平衡电网。

（岳芳）

英国政府投入 2.2 亿英镑支持发展球形托卡马克技术

10 月 3 日，英国商业、能源和产业战略部（BEIS）宣布将在“用于能源生产的球形托卡马克”（STEP）计划框架下投入 2.2 亿英镑⁷，支持球形托卡马克发电站的概念设计，旨在推进球形托卡马克技术发展，以实现核聚变发电商业化。

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

MAST 是全球最大的两个球形托卡马克装置之一⁸，目前正处于升级阶段，第一阶段升级后将达到中心磁场 0.84 特斯拉、加热功率 7.5 兆瓦、等离子体电流 2 兆安培，第二阶段升级后加热功率将进一步增加至 12.5 兆瓦。升级的 MAST-U 装置可用于测试核聚变发电站原型的反应堆系统，其采用的创新型高功率 Super-X 偏滤器可降低来自等离子体的热功率负载，因此也可用于核聚变发电装置。

（岳芳）

DOE 资助 7300 万美元支持非粮生物质能源研究

10 月 1 日，美国能源部（DOE）宣布向 35 个生物质能源技术研发项目提供 7300 万美元资助⁹，旨在推进可再生非粮生物质转化利用技术突破，使包括藻类、非粮能源作物（如玉米、甘蔗等）和各种废弃物（如植物秸秆、稻壳等）在内的各类生物质资源更经济、有效地转化为生物燃料、生物质电力和生物制品，以降低生物基产品（如生物质塑料）、生物质能源（如生物柴油）和生物质发电成本。本次资助主要聚焦 10 大主题领域，具体内容如下。

1、藻类集约化养殖（资助金额 2000 万美元）。优化生物反应器压力环境和害虫防治技术，提高藻类产量；创新型的藻类培养技术；通过快速的藻类菌种筛选和

⁷ UK to take a big ‘STEP’ to fusion electricity. <https://www.gov.uk/government/news/uk-to-take-a-big-step-to-fusion-electricity>

⁸ 另一装置是美国普林斯顿等离子体物理实验室的升级版国家球形托卡马克装置 NSTX-U。

⁹ Department of Energy Announces \$73 million for 35 Projects for Bioenergy Research and Development. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-73-million-35-projects-bioenergy-research-and-development-0>

生物质改良提高藻类产量；提高用于废水处理和生物燃料生产的大型藻类集约化培育系统生产率和性能；基于藻类生长预测决策模型提升藻类生产率。

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

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

4、生物质转化碳氢燃料技术（资助金额 800 万美元）。将沼气催化转化为可直接使用的可再生柴油燃料；将生物质释放的 CO₂ 转化为碳氢燃料；先进的生物质快速热解催化系统；纤维素转化成碳氢燃料。

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

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

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

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

9、生物质厌氧发酵（资助金额 500 万美元）。将湿有机废物流转化为高价值产品技术；发展先进的预处理/厌氧发酵（APAD）技术，用于少于 5 吨干污泥容量的小型废水处理厂，以提高污泥向生物天然气的转变效率。

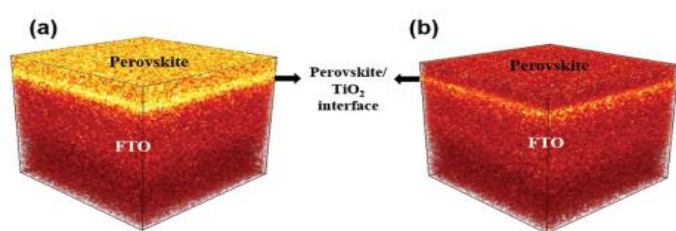
10、减少生物能源中水、能源消耗和排放（资助金额 200 万美元）。发展生物精炼制燃料技术减少温室气体和空气污染物排放；基于主体的能源生产路径多目标优化建模。

（廖明月 郭楷模）

微量添加剂抑制相转变大幅提升钙钛矿电池空气环境稳定性

目前高效率的有机无机杂化钙钛矿太阳电池主要是基于混合阳离子阴离子钙钛矿吸光材料（如同时含有甲胺 MA^+ 和甲脒 FA^+ 两种阳离子），然而含有 FA 钙钛矿材料稳定较差，非常容易发生相变。如当环境潮湿时，黑色的 α 相甲脒碘化铅 (FAPbI_3) 钙钛矿很容易转化为黄色的 δ 相（一种六角形的非钙钛矿晶相），从而导致器件性能衰退。因此如何抑制上述材料的相转变对改善器件稳定性和推动钙钛矿太阳电池商业化意义重大。韩国国立蔚山科学技术院的 Sang Il Seok 教授课题组利用二氯亚甲基胺 (MDACl_2) 作为添加剂对混合阳离子钙钛矿进行掺杂改性，在保持 FAPbI_3 禁带宽度（即保持光吸收特性）前提下，有效地抑制了上述材料的相转变，从而显著改善了电池器件稳定性，其在高达 85% 湿度环境下存放 70 小时后仍可维持 90% 以上的初始转换效率，且在 150°C 高温环境下加热 20 小时依旧可以保持 90% 的初始效率。

相比 FA^+ ，二氯亚甲基胺离子 (MDA^{2+}) 含有更多的氢原子，因此 MDA^{2+} 可以形成更多的氢碘键 (H-I)，从而有效地稳定住 FAPbI_3 钙钛矿 α 相结构。为此研究人员在 FAPbI_3 前驱体中加入微量的 MDACl_2 并通过旋涂和退火处理制备了 MDACl_2 掺杂改性的钙钛矿薄膜 $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ ，同时制备纯相的 FAPbI_3 用于对比研究。紫外可见光谱显示，掺杂改性的 $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ 薄膜带隙宽度为 1.47 eV，与原始的 FAPbI_3 带隙宽度（1.45 eV）基本一致，这能够保证材料的光吸收特性不发生变化。X 射线衍射测试结果显示， $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ 和 FAPbI_3 均是单一的 α 相结构。电化学性能表征结果显示，基于 $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ 薄膜钙钛矿太阳电池获得了 24.66% 转换效率（权威机构认证效率为 23.7%），高于没有 MDACl_2 掺杂的薄膜电池效率 23.05%，主要原因是 MDACl_2 引入拓宽了钙钛矿光谱响应范围。该项研究通过在甲脒碘化铅钙钛矿前驱体中加入微量的二氯亚甲基胺，在保障初始光吸收特性前提下，有效地稳定甲脒碘化铅 α 相结构，避免其向 δ 相发生转变导致光敏特性消失，从而显著改善了薄膜及其器件环境稳定性，在高达 85% 湿度环境下存放 70 小时后仍可维持 90% 以上的初始转换效率，且在 150°C 高温环境下加热 20 小时依旧可以保持 90% 的初始效率，表现出优异的抗热、湿度稳定性，让钙钛矿太阳电池更接近商业化。相关研究成果发表在《*Science*》¹⁰。



含有 (a) 和不含有 (b) MDACl_2 添加剂的钙钛矿薄膜
飞行时间二次离子质谱

可以形成更多的氢碘键 (H-I)，从而有效地稳定住 FAPbI_3 钙钛矿 α 相结构。为此研究人员在 FAPbI_3 前驱体中加入微量的 MDACl_2 并通过旋涂和退火处理制备了 MDACl_2 掺杂改性的钙钛矿薄膜 $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ ，同时制

备纯相的 FAPbI_3 用于对比研究。紫外可见光谱显示，掺杂改性的 $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ 薄膜带隙宽度为 1.47 eV，与原始的 FAPbI_3 带隙宽度（1.45 eV）基本一致，这能够保证材料的光吸收特性不发生变化。X 射线衍射测试结果显示， $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ 和 FAPbI_3 均是单一的 α 相结构。电化学性能表征结果显示，基于 $\text{FAPbI}_3\text{-MDACl}_2$ 薄膜钙钛矿太阳电池获得了 24.66% 转换效率（权威机构认证效率为 23.7%），高于没有 MDACl_2 掺杂的薄膜电池效率 23.05%，主要原因是 MDACl_2 引入拓宽了钙钛矿光谱响应范围。该项研究通过在甲脒碘化铅钙钛矿前驱体中加入微量的二氯亚甲基胺，在保障初始光吸收特性前提下，有效地稳定甲脒碘化铅 α 相结构，避免其向 δ 相发生转变导致光敏特性消失，从而显著改善了薄膜及其器件环境稳定性，在高达 85% 湿度环境下存放 70 小时后仍可维持 90% 以上的初始转换效率，且在 150°C 高温环境下加热 20 小时依旧可以保持 90% 的初始效率，表现出优异的抗热、湿度稳定性，让钙钛矿太阳电池更接近商业化。相关研究成果发表在《*Science*》¹⁰。

（郭楷模）

¹⁰ Hanul Min, Maengsuk Kim, Seung-Un Le, et al. Efficient, stable solar cells by using inherent bandgap of α -phase formamidinium lead iodide. *Science*, 2019, DOI: 10.1126/science.aay7044.

低碳化多能融合

欧盟“电池 2030+”计划工作组发布电池研发路线图草案

11月18日，欧盟“电池 2030+”（BATTERY 2030+）计划工作组发布了电池研发路线图第二版草案¹¹，提出未来10年欧盟电池技术的研发重点，旨在开发智能、安全、可持续且具有成本竞争力的超高性能电池，使欧洲电池技术在交通动力储能、固定式储能领域以及机器人、航空航天、医疗设备、物联网等未来新兴领域保持长期领先地位。该路线图草案提出了欧盟电池研发的长期愿景和总体目标，指出未来将围绕材料开发、电池界面/相间研究、先进传感器、自修复功能四个主要研究领域，以及制造和回收利用两个交叉研究领域开展新概念技术（技术成熟度在1-3级）研发活动。欧盟委员会在2018年5月公布的《电池战略行动计划》中宣布将设立一个大型的电池研发长期计划，并于当年10月发布《电池 2030+愿景文件》，初步提出了“电池 2030+”计划的愿景和研究目标。2019年3月，欧盟启动“电池 2030+”协调和支持行动，主要目的是确定该计划的研发路线图，本次研发路线图第二版草案经讨论修改后，将于2020年2月底提交给欧盟委员会。路线图草案的关键内容如下（详细内容请参见专报）：

一、“电池 2030+”计划目标

研发具有超高性能的智能、可持续电池，以应用于各种领域。此类电池将具备超高性能（即能量和功率密度接近理论极限）、出色的使用寿命和可靠性、增强的安全性和环境可持续性以及可扩展性，并能以具有竞争力的成本大规模量产。

通过“电池 2030+”计划在未来10年的研究，将为电池技术带来如下影响（与当前技术相比）：①将电池实际性能（能量密度和功率密度）和理论性能之间的差距缩小1/2；②至少将电池的耐用性和可靠性提高三倍；③将电池的生命周期碳足迹至少减少五分之一（对于给定的电力组合）；④电池回收率至少达到75%，关键原材料回收率接近100%。

二、重点研究领域

1、材料开发

通过创建材料加速平台，将合作伙伴的优势互补与现有的合作环境相结合，以支持提高对电池材料认识的研究工作。重点研发技术包括：①开发高通量自主合成机器人，以解决电解质配方和电极活性材料及其组合时的材料表征问题；②建立用于对电池材料及其原位和运行过程中表征的自动化高通量基础设施，将物理参数导

¹¹ Battery 2030+ Roadmap (Second Draft). https://battery2030.eu/digitalAssets/820/c_820604-l_1-k_battery-2030_roadmap_version2.0.pdf

向的基于数据的建模和数据生成相结合，对电池及其活性材料进行高通量测试，建立可加速开发新材料和界面的电池材料平台；③建立基于分布式访问模型的跨部门通用数据基础架构，确保在材料的闭环研发过程中，能够实时进行跨部门实验数据集成和建模；④多尺度互连和集成工作流程，通过机器学习和物理理论导向的数据驱动模型识别最重要的参数和特征，开发创新方法以有效和稳固的方式最佳地耦合和连接不同尺度的模型；⑤开发人工智能，将基于 AI 技术开发集成物理参数和数据驱动的混合模型；⑥统一数据协议，利用欧洲材料建模委员会（EMMC）和欧洲材料与建模本体（EMMO）支持的语义访问协议，并将学术界和工业界、材料建模和工程联系起来，实现整个电池价值链中的数据标准化；⑦电池材料和界面的逆向设计，通过所需性能目标来定义电池材料和/或界面的组成和结构，从而颠覆传统的开发过程。

2、电池界面/中间相研究

重点关注如下研究：①开发针对更高的空间分辨率、时域和运行条件的新型计算和实验技术，以获得超高性能电池系统构造的新认知；②开发结合实验、理论和数据驱动的全新研究方法，通过基于物理的数据驱动混合模型和仿真技术以描述最先进的实验；③开发具有高保真度的电池界面表征技术，通过对电池界面及其动态特性的精确表征，建立电池界面属性的大型共享数据库；④设计电池及其材料的标准化测试协议，以便通过将电池性能与其化学性质进行比较来获取有关电池界面的关键信息；⑤开发更精确的模型，以接近最真实的界面、老化和退化情况。

3、先进传感器

重点关注如下研究：①将智能功能嵌入电池，集成和开发适用于电池的多种传感器，如光学、电学、热学、声学 and 电化学传感器，并设计/开发固体电解质中间相动态监测功能；②将传感器嵌入电池，开发具有创新化学涂层的传感器，将传感器尺寸减小到几微米以适合电极隔板的厚度，采用无线传感技术来避免连接布线问题，还可开发能够监测多个参数的新型传感器。

4、自修复功能

重点关注如下研究：①功能化电解质隔膜，研究电解质隔膜孔道内接枝的方法，经过专门设计使其具有自修复特性；②针对大多数组件和界面开发聚合物自修复策略，也将探索超分子在自修复多相固体聚合物电解质系统中的应用；③开发生物基电解质隔膜，通过控制电解质的分解从而改善电池老化，使用无毒的生物基分子/蛋白质（例如环糊精）设计薄而多孔的可控隔膜，其选择性可以通过使用和优化蛋白质工程来实现；④探索利用滑动轮凝胶控制隔膜表面的有机物并优化电池装置的效率，另外将研究复合电极，其包含能够通过施加刺激来释放修复剂的微胶囊，将设计具有矿物或聚合物壳的微囊，在受刺激破裂时将释放锂盐、钠盐等。

5、电池制造

未来电池制造应避免使用当前的反复试错方法，并且电池和制造过程必须“智能”，开发电池数字化模型。因此需进行如下工作：①引入新功能，如自修复材料/界面、传感器或其他执行器、电池生态设计和替代电池设计；②开发灵活的制造流程和高精度建模工具，以优化工艺、条件和机器参数，开发用于处理电极浆料和电池性能的实时模型（即用于电池制造的数字化模型）；③在电池制造过程中开发和验证多重物理量和多尺度模型，以更准确了解制造过程的每个步骤。

6、电池回收

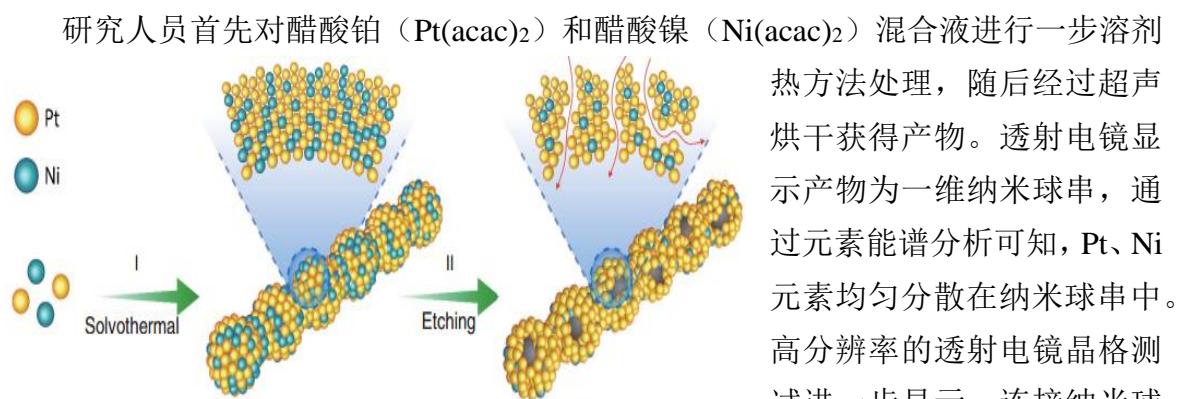
计划将开发突破性的电池回收工艺，主要研究方向包括：①数据收集和分析（通过标签、电池管理系统、传感器等）；②现代低碳足迹物流概念，包括分散式处理；③自动将电池组拆解到单元级别；④尽可能探索重复使用和再利用；⑤自动拆解电池至最大的单个组件；⑥开发选择性粉末回收技术，并将其“翻新”为电池活性物质，如果不可能，则通过调整组成来合成活性物质前驱体。

为此，将进行特定研发活动：①电池设计中尽可能延长寿命，并考虑重新校准、翻新以及二次使用和多次使用的适用性；②集成传感器和自修复功能，用于识别损坏/老化的组件并为它们的重复使用做准备；③开发可追溯性概念，特别是整个电池生命周期中关键原材料的可追溯性，自动电池分拣和评估，以及开发对有价值关键材料的有效、低成本和可持续的一步回收处理；④选择性回收过程中将使用 AI 技术和分拣设备，同时还将寻求适用于所有电池的通用过程，确保即使是金属-空气电池等新型电池，也能最大程度地回收电池组件。

（周斌 岳芳）

一维 PtNi 合金纳米笼串珠催化剂展现超强催化活性和稳定性

电催化氧气还原是燃料电池中的关键过程。然而氧还原反应（ORR）动力学过程非常迟缓，需高度依赖资源稀少和价格高昂的铂（Pt）系贵金属催化剂，这使得燃料电池成本一直居高不下，因此开发高性能低/无 Pt 含量的催化剂成为该领域研究热点。由新加坡南洋理工大学 Xiong Wen Lou 教授课题组牵头的国际联合研究团队设计制备了一种铂镍（PtNi）合金纳米笼串珠催化剂，质量活性和比活性分别达到 3.52 A/mg_{Pt} 和 5.16 mA/cm_{Pt}，是目前商业化 Pt 催化剂的 17 和 14 倍，且经过五万多次循环，催化活性基本无衰减，表现出了超强的氧催化还原能力和稳定性。将其应用于燃料电池，可以稳定连续运行 180 余小时，有望替代商业 Pt/C 催化剂，大幅降低燃料电池成本，进一步推进该电池技术的商业化。



一维 PtNi 合金纳米笼串珠催化剂合成示意图

该项研究设计制备了一种新型低铂含量的一维 PtNi 合金纳米笼串珠催化剂。独特的空心一维多孔结构、应力和配位效应的协同作用, 将催化剂催化活性提升了一个数量级, 质量和面积比活性分别为商用 Pt/C 催化剂的 17 倍和 14 倍, 且经过 5 万次循环后, 其催化活性基本没衰减, 表现出极其优异的稳定性, 为设计开发高效长寿命低成本催化剂提供了新思路。相关研究成果发表在《*Science*》¹²。

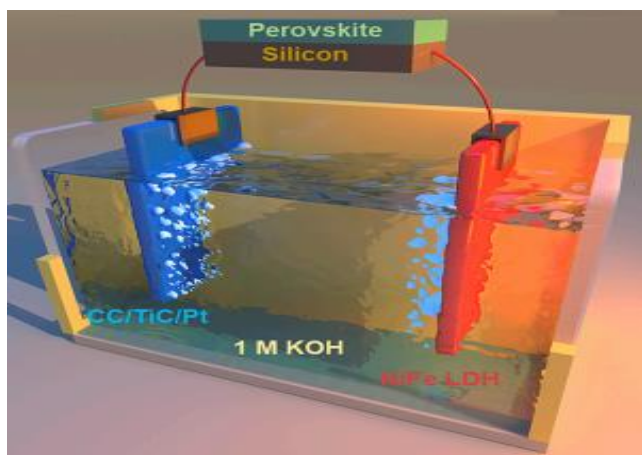
(郭楷模)

¹² Xinlong Tian, Xiao Zhao, Ya-Qiong Su, et al. Engineering Bunched Pt-Ni Alloy Nanocages for Efficient Oxygen Reduction in Practical Fuel Cells. *Science*, 2019, DOI:10.1126/science.aaw7493

低成本太阳能直接驱动全解水产氢创下 18.7%转换效率纪录

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

当催化剂尺寸由块体减小到纳米尺度时，其表面积会大幅增加，使得催化活性位点更多地暴露出来，从而有助于提升催化活性。有鉴于此，研究人员利用原子沉积方法在涂覆于碳布（CC）表面的碳化钛（TiC）纳米线（作为骨架）表面沉积了一层 Pt 纳米颗粒团簇催化剂，透射电镜表征显示 Pt 纳米颗粒团簇均匀地分散覆盖在 TiC 纳米线表面。而选区电子衍射测试显示样品存在两种晶格常数：一个是 0.274 nm，对应于 TiC（111）晶面；一个 0.236 nm，对应于 Pt 的（111）晶面，进一步证实了制备的样品确为 CC/TiC-Pt 复合催化剂。为了对比，研究人员利用同样的工艺在碳布和碳布/二氧化钛（CC/TiO₂）骨架上沉积了同样厚度的 Pt 纳米团簇形成了 CC/Pt 和 CC/TiO₂/Pt，随后将上述制备催化剂置于碱性（KOH）和酸性（H₂SO₄）电解质溶液中进行析氢反应催化活性研究。实验结果显示，外加偏压的情况下，在酸性溶液中，达到 10 mA/cm² 产氢电流密度，CC/TiC-Pt 的过电位只需 35mV，低于 CC/Pt（54 mV）和 CC/TiO₂/Pt（50 mV）；同样的情况也出现在了酸性电解质中。而在 100 mV 过电位下，CC/TiC-Pt 电流密度可以达到 328 mA/mg，比商用的 Pt/C（67 mA/mg）还高出近 5 倍。上述结果表明了 CC/TiC-Pt 具有极其优异的催化活性。更为关键的是，该催化剂可以连续稳定工作 100 小时，表现出与商用 Pt/C 催化剂相当的化学稳定性。接着将 CC/TiC-Pt 和镍铁（NiFe）层状氢氧化物分别作为析氢和析氧活性催化剂电极，并与钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池（提供电能）结合组装成太阳能直接驱动全解水反应体系，而无需任何外加偏压（即无需消耗额外电能）。在一个标准的模拟太阳光（光照强度为 100 mW/cm²）辐照、无聚光器未施加任何外部偏压的条件下，通过测量恒压电流曲线表征太阳能到氢能转换性能，结果显示全解水反应体系获得了 18.7%的转化效率，是目前文献报道的无偏压低成本光敏材料太阳能电池直接驱动电解水产氢体系的最高纪录。



基于钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池光催化电解水系统

纯太阳能驱动)的条件下获得了高达 18.7% 的太阳能到氢能转化效率,是目前已报道的太阳能直接驱动低成本光解水产氢系统的最高转换纪录,为设计研发低成本高性能太阳能产氢系统开辟了新思路。相关研究成果发表在《*Joule*》¹³。

(郭楷模)

¹³ Jing Gao, Florent Sahli, Chenjuan Liu, et al. Solar Water Splitting with Perovskite/Silicon Tandem Cell and TiC-Supported Pt Nanocluster Electrocatalyst. *Joule*, 2019, DOI: 10.1016/j.joule.2019.10.002

能源战略研究

国际能源署发布《世界能源展望 2019》报告

11月13日，国际能源署（IEA）发布《世界能源展望 2019》报告¹⁴，采用情景分析法展望了至2040年全球能源发展趋势：碳排放强烈反弹、化石能源依赖度高居不下、能效改善速度缓慢和地缘政治持续动荡等多种因素作用使得全球能源系统转型面临严峻挑战。展望未来，能源安全至关重要，而石油仍是焦点所在。无论全球能源如何发展，世界仍然严重依赖中东的石油供应。而就能源需求而言，电力需求增速将是全球能源增速的2倍多，太阳能光伏成为全球电力装机中占比最大的发电类型，海上风电到2040年有望吸引万亿美元投资。就区域而言，非洲对全球能源发展趋势的影响越来越大。报告要点如下：

1、能源安全至关重要，石油依旧是焦点所在

快速发展的能源行业凸显了对能源安全问题采取全面综合、动态追踪应对思路的重要性。2019年9月发生在沙特阿拉伯的袭击事件表明，传统的能源安全风险并未消失。与此同时，从网络安全到极端天气等一系列新型能源安全风险也需要各国保持警惕。在既定政策情景中，到2040年将有近2600万桶/日的石油通过马六甲海峡，约2000万桶/日的石油通过霍尔木兹海峡。石油船运的任何事件都可能严重影响市场，应急石油储备可以继续在对石油安全威胁方面发挥作用。

美国页岩油气产量长期保持在较高水平，重塑了全球能源市场、贸易流向和能源安全形势。在既定政策情景中，到2030年，预计美国石油产量增量将占到全球增量的85%，其天然气产量增量占全球增量的30%；致密油产量将在2035年达到峰值，将从2018年的600万桶/日增至1100万桶/日。美国作为油气出口国的地位将进一步巩固，到2025年美国页岩油气总产量将会超过俄罗斯的油气总产量。

美国石油产量增加将挤占OPEC国家和俄罗斯在全球石油供应中的份额。后两者的占比将从2005年前后的55%下降到2030年的47%，全球石油供应更加多元化，这意味着单一组织控制国际石油市场将更加困难。部分主要生产国在油气收入方面将面临较大压力，进一步凸显了这些国家努力实现经济多样化的重要性。

无论全球能源如何发展，世界仍然严重依赖中东的石油供应。到目前为止，中东地区仍然是国际石油市场最大的净供应方，也是液化天然气的重要出口地区。在既定政策情景中，到2040年在印度进口需求翻番带动下，80%的国际石油贸易目的地在亚洲。

¹⁴ World Energy Outlook 2019. <https://www.iea.org/weo2019/>.

电力成为现代能源安全的核心。可再生能源成本降低和数字技术进步为能源转型带来了巨大的机遇，同时也带来了一些新型能源安全风险。政策制定者和监管者必须迅速采取行动，以跟上技术变革的步伐并满足电力系统灵活运行的需求。储能市场的设计、电动汽车与电网的双向互动、数据隐私等问题都有可能使消费者面临新的风险。

2、世界能源可实现快速转型，但发展方向和速度需要政策引导

页岩革命以及上游和中游超过 1 万亿美元的投资正在使美国成为石油和天然气净出口国。页岩革命始于 20 世纪 70 年代美国政府开始资助一系列研究和开发项目，之后政府继续提供税收优惠政策、市场改革措施和合作计划，为私营企业自主创新提供平台。

太阳能光伏和其他一些可再生能源技术（主要在电力行业）同样正经历着从最初靠政策和财政支持转向大规模商业开发。实现能源系统整体转型需要在更广泛的能源技术领域取得进展，包括能效、二氧化碳捕集利用和封存、氢能、核能和其他方面。同时，还需要所有相关行业采取行动，而不仅仅是电力行业。

只有政府能够营造决定能源创新和投资的环境，向业界传递关于能源行业未来发展道路的明确信号和清晰方向。既要满足包括能源普及性在内日益增长的能源需求，同时又要减少排放，是一项艰巨的任务，需要各界广泛参与，但各国政府必须发挥引领作用。来自个人、民间组织、企业和投资者的倡议可以产生重大影响，但各国政府才是重塑能源体系、推动全球能源变革的最重要力量。

3、石油需求增速将趋于平稳，各类能源竞争激烈

2025 年后全球石油需求增长将明显放缓，2030-2040 年将趋于平稳。在既定政策情景中，未来一段时期长途货运、水运、航空以及石化行业对石油的需求将继续增长。但由于燃油经济性提高和燃料替代（主要由电能替代），乘用车石油需求在 2030 年前达到峰值。因此，2018-2025 年期间，全球石油需求将从 9700 万桶/日年均增加 100 万桶/日。2025 年后全球石油需求增速将放缓，2030-2040 年期间年均增加 10 万桶/日，到 2040 年达到 1.06 亿桶/日。而在可持续发展情景中，石油需求将很快达峰后到 2040 年回落至 6700 万桶/日，相当于 1997 年水平。

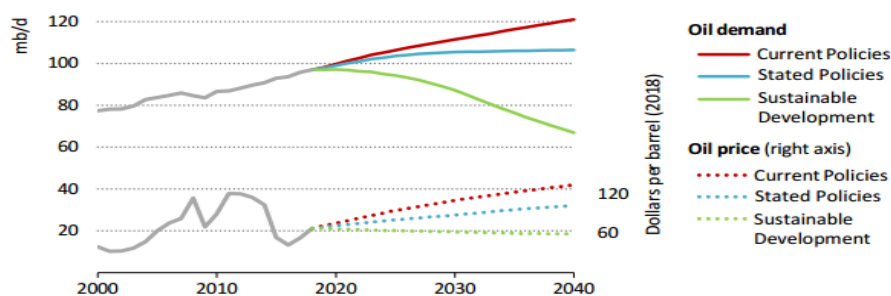


图 1 2018-2040 年不同情景下全球石油需求和价格变化态势（左轴单位：百万桶/日，右轴单位：美元/桶）

煤炭、天然气和可再生能源三者正激烈争夺亚洲快速增长经济体中电力和供暖部门的份额。煤炭是大多数亚洲发展中国家目前使用的主要能源。在以中国和印度为代表的国家中，可再生能源是煤炭在电力行业的主要挑战者。亚洲发展中国家占到全球可再生能源发电量增量的一半以上。工业和居民天然气需求（尤其是中国）的持续快速增长，激发了全球范围内对新建液化天然气供应和天然气管网的投资浪潮。

非洲对全球能源发展趋势的影响越来越大。到 2040 年，非洲石油需求增长幅度会大于中国，同时受近年来该地区一系列重大气田的发现等因素影响，其天然气需求量也将大幅增长。对非洲而言，最大的变数是未来其太阳能光伏的增长速度。作为太阳能资源最丰富的大陆，太阳能光伏可以为其中许多人提供最经济的电力。

4、不论全球能源需求总量增速如何，电力需求都将以更快速度增长

在既定政策情景中，到 2040 年之前全球能源需求年均增速为 1%。其中一半以上由低碳能源提供，光伏的贡献最大。同时，得益于液化天然气贸易的增加，天然气提供了未来三分之一的能源需求增量。2030-2040 年，石油需求会趋于平稳，而煤炭需求量则将有所下降。以电力为代表的一些能源部门将经历快速变革。

电力是现代经济的核心，在既定政策情景中，电力需求的增长速度是能源需求总量增速的两倍多。在既定政策情景中，到 2040 年全球电力需求年均增速将达到 2.1%。工业（特别是中国的工业）是电力需求增长的最主要部门，其次是家用电器、制冷设备和电动汽车。在可持续发展情景中，电力是除了可再生能源直接利用和氢能外，到 2040 年需求还在不断增长的少数能源品种之一，其增长主要来自电动汽车。到 2040 年，电力在终端能源需求中占比将超过石油，而目前其占比不到石油的一半。

在既定政策情景中，太阳能光伏成为全球电力装机中占比最大的发电类型。2025 年左右，可再生能源在发电结构中占比将超过煤炭，这主要得益于风能和太阳能光伏发电的持续增加。可再生能源在总发电量中占比将从 2018 年的 26% 增长至 2040 年的 44%。风能和太阳能光伏发电增速最为抢眼，但水力发电仍占据可再生能源发电的主要份额，2040 年占全球总发电量的 15%。

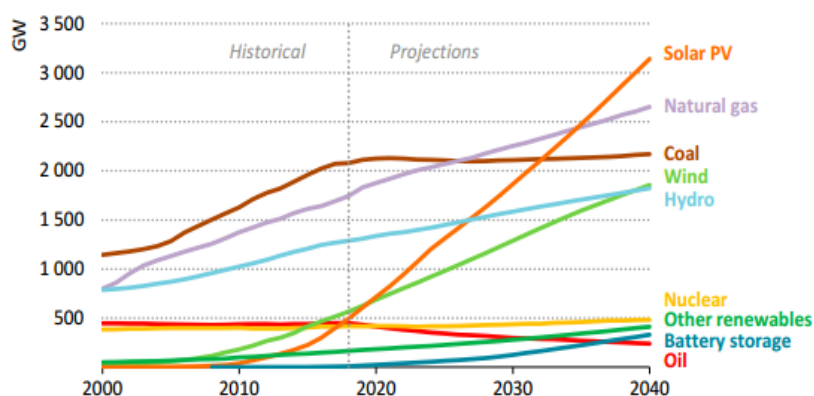


图 2 2018-2040 年不同能源资源电力装机容量变化态势（单位：GW）

海上风电将加速发展，到 2040 年有望吸引万亿美元投资。海上风电资源开发潜力巨大，可以满足数倍于当前的全球电力需求。尽管海上风电具有波动性，但由于其采用更大的风力机组，可以在远离海岸的地方获得更强更稳的风力，因此其运行小时数比太阳能光伏和陆上风电更高。此外，还有更多的新技术即将涌现，包括可以开辟新资源和新市场的浮动式风力发电机。到 2040 年，海上风电项目越来越具有成本竞争力，有望吸引万亿美元投资，装机容量将增加 15 倍。欧洲在海上风电领域取得的成功激发了中国、美国和其他国家的兴趣。在可持续发展情景中，海上风电与陆上风电联合发力，成为欧盟的主要发电来源，为欧洲电力行业的全面脱碳铺平了道路。如果海上风电成为制氢的主要能源，其推广速度甚至会更快。

电池成本是影响电力市场和电动汽车发展的关键因素。在既定政策情景中，到 2040 年全球电池容量将增加 40 倍。电力系统对灵活性的需求不断增加，尤其是在印度。印度将是能源需求总量增长最多的国家，在既定政策情景中，随着电池成本的大幅降低，到 2040 年印度将安装约 120 吉瓦的储能设备。当规模效应进一步凸显或电池技术取得重大突破时，到 2040 年电池成本可以进一步降低 40%。太阳能和电池储能结合的发电站将成为非常有吸引力的经济和环境方案，大大削减印度对新建燃煤电厂的投资预算。

5、大幅提高能效是向可持续能源系统转型的主要推动力

全球能源效率改善进展缓慢。在供暖、制冷、照明、出行和其他能源需求不断增加的背景下，全球能源强度（单位产值所消耗的能源）下降速度正在放缓。2018 年，全球能源强度仅降低了 1.2%，约为 2010 年以来平均水平的一半。这一结果从侧面反映出新的能效政策和已有能效措施的作用出现弱化。

加速提高能效是使世界迈向可持续发展情景最重要的决定性因素。充分利用所有经济可行的能效提升技术和方法，每年可使全球能源强度降低 3% 以上。包括努力提高钢铁、铝、水泥和塑料等材料的高效设计、使用和回收。提高“材料效率”足以降低这些行业排放量的增长。同时也包括使用数字化、智能化的创新工具，如将电力需求调整到一天当中成本更低、排放强度更低的时段，降低消费者的电费支出，维护电力系统平衡，同时也有助于减少排放。

6、现有燃煤电厂需要解决与煤炭相关的排放

若要改变当前的全球排放趋势，不仅要关注新的能源基础设施，还要关注现有能源系统“锁定效应”带来的排放。这意味着要解决现有发电厂、工厂、货船和其他资本密集型基础设施的排放。尽管电力行业变化迅速，但在既定政策情景中，与电力相关的二氧化碳年排放量并未下降。一个重要的原因是，存量燃煤机组还有很长的服役期，而它们占到当前能源相关排放总量的 30%。

在过去的 20 年里，亚洲占全球新建燃煤发电装机容量的 90%，这些发电机组

未来的服役期可能会很长。亚洲发展中经济体现有燃煤机组平均只有 12 年的运行年限。报告提出了三种可以减少存量燃煤电厂排放量的方案：一是增加二氧化碳捕集、利用和封存（CCUS）装置，或对现有燃煤电厂进行耦合生物质发电技术改造；二是调整燃煤电厂定位，在降低运行小时数的同时，为电力系统提供可靠容量和灵活性；三是让燃煤机组提前退役。在可持续发展情景中，2080 吉瓦存量燃煤机组中的大部分将采用上述三个方案中的某一个。

7、天然气将在未来能源系统中发挥关键作用

天然气管网是将能源输送到消费者的重要通道，通常情况下其比电网输送的能源更多，并且其输送的能源品种不局限于天然气，具有很好的灵活性。从能源安全的角度来看，并行的天然气管网和电网可以成为互补。从能源转型的角度来看，天然气可以替代污染更严重的燃料，快速实现短期环境效益。从长远来看，天然气管网能否输送真正的低碳或零碳能源，如低碳的氢能和生物甲烷，是一个更重要的议题。

尽管氢能目前生产成本相对较高，但已经引起各界的关注。将其掺入天然气管网提供了一种扩大供应和降低成本的新方案。报告对生物甲烷供应（利用有机废物和残渣进行生产）可持续发展潜力的评估表明，生物甲烷可以满足目前约 20% 的天然气需求。随着对减少二氧化碳和甲烷排放的价值认识的提高，以上两种方案的成本竞争力将进一步提高。

（张凯宏 岳芳）

OPEC 展望至 2040 年全球石油供需市场发展走势

11 月 5 日，石油输出国组织（OPEC）发布《全球石油展望 2019》报告¹⁵，对全球石油供需现状及其影响因素（包括人口、经济、技术等）进行了系统深入分析，进而对全球石油供需市场中长期发展走势进行了展望，报告关键点如下：

•到 2040 年，全球一次能源需求预计增加 7200 万桶/日（油当量，下同）。全球能源需求预计将从近 2.86 亿桶/日增长到 2040 年超过 3.57 亿桶/日，即年均增长率约 1%。展望期内，非 OECD 国家的能源需求预计将增加近 7500 万桶/日，而 OECD 国家的需求估计下降约 300 万桶/日。由于不同国家/地区人口结构、能效水平、气候变化政策等存在差异性导致了能源需求各有不同。非 OECD 国家的能源需求增长动力主要来自亚洲地区，其中仅印度和中国两个国家的能源需求增量预计将占非 OECD 国家能源需求增长总量的近 50%。

¹⁵ World Oil Outlook 2040. https://www.opec.org/opec_web/en/press_room/5731.htm

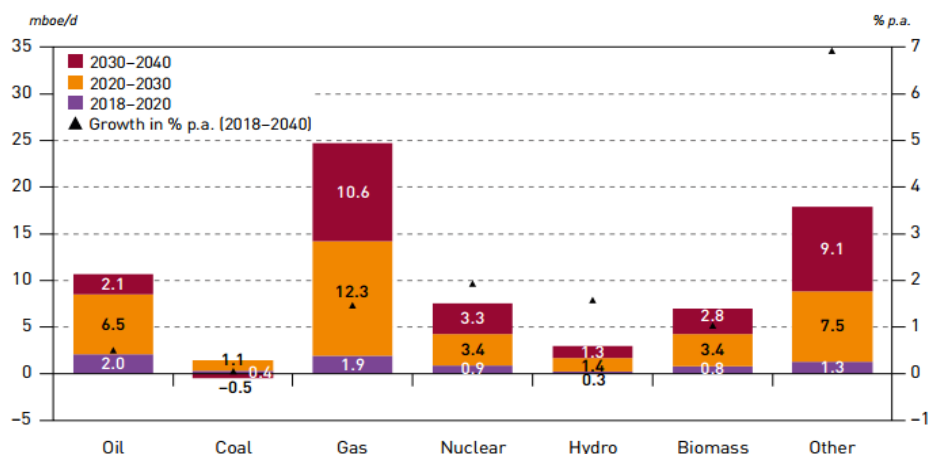


图1 2018-2040年全球一次能源来源需求变化态势（左轴单位：百万桶/日，右轴单位：年均增长率百分比）

•到 2040 年石油仍将是能源结构主体，在能源结构中占比仍将保持最高份额。2018 年，石油占全球能源需求的 31% 以上，超过煤炭（27%）和天然气（23%）。预计到 2040 年，石油仍将是能源结构中占比最高的能源来源，份额预计将超过 28%。2018-2040 年期间，全球天然气需求预计将从 6550 万桶/日升至 9000 万桶/日以上，届时天然气将成为第二大能源来源，占一次能源总量的 25%。天然气需求的增长将主要来自亚洲，以中国、印度和 OPEC 成员国为主。

•尽管 2030 年后煤炭需求将出现下降的趋势，但至 2040 年煤炭仍将是 CO₂ 排放的最大来源。据估算，2040 年煤炭产生 CO₂ 排放将占到能源相关 CO₂ 排放总量的 40%，即 149 亿吨。到 2040 年，与能源相关的排放总量将增加到 380 亿吨以上，比 2018 年的观测水平高出 40 亿吨以上。但展望期内 CO₂ 排放增长的速度将显著放缓。

•相较而言，可再生能源将成为增长最快的能源；但就绝对值而言，天然气预计增量最大。展望期内，可再生能源（包括太阳能、风能和地热能）年均增速预计达到 6.9%，即从 2018 年到 2040 年，可再生能源需求预计将增长近 1800 万桶/日。同期，核能和生物质能的需求预计将均增长约 700 万桶/日，而水电的需求将增长约 300 万桶/日。

•展望中期（至 2024 年），全球石油年均供应增量将在 100 万桶/日左右，从 2019 年的 110 万桶/日下降到 2024 年的 90 万桶/日。预计新增需求将主要来自非 OECD 国家，年均石油需求增量将保持在 100-120 万桶/日。OECD 国家的石油需求预计将逐步从中期最初几年的微量增长转向 2020 年以后需求的下降，部分抵消非 OECD 国家的增长。

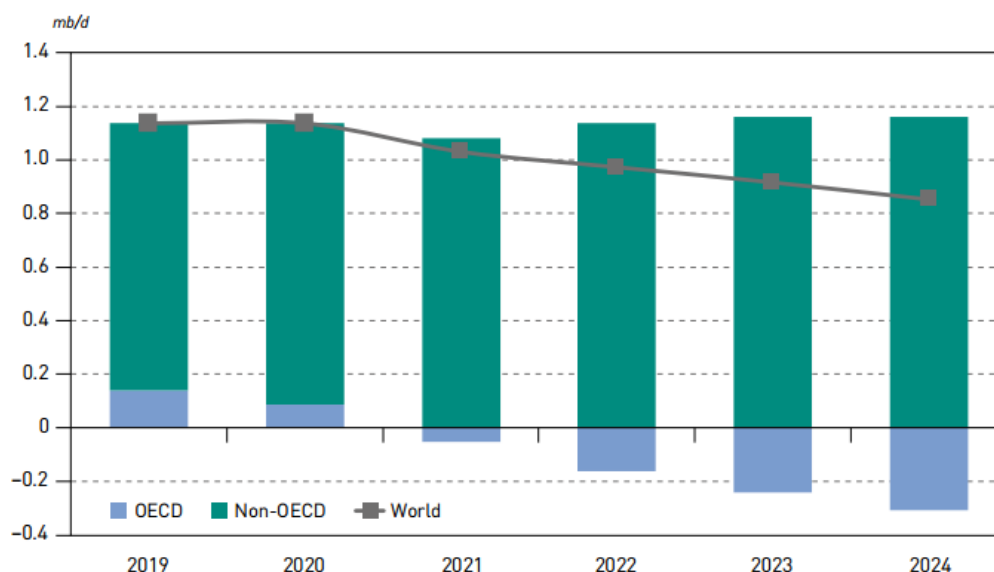


图2 2019-2024年全球不同地区石油消费需求年增量变化态势（单位：百万桶/日）

•**国际海事组织(IMO)关于燃烧排放标准的监管条例影响预计会弱于预期。**2020年1月1日起生效的IMO将船舶燃料油的含硫量限制在0.5%的新规定不仅对航运行业构成挑战，而且对全球炼油系统和相关成品油供应都将是一个颠覆性事件。然而，不断变化的市场环境以及航运行业的发展，会导致先前与IMO条例相关的预测（石油需求、石油供应和炼油方面）发生变动。最近的评估表明，全球炼油系统将有足够的灵活性来应对IMO新条例对燃料结构变化要求。尽管如此，新规定对高硫燃料油（HSFO）价格、汽油价格以及富含硫的石油价格仍将产生显著影响。

•**展望长期（至2040年），全球石油需求预计增长约1200万桶/日，即从2018年的9870万桶/日增至2040年的1.106亿桶/日。**从区域角度看，OECD国家的需求预计下降，而非OECD国家需求进一步扩大。在中产阶级不断壮大、人口高速增长和经济增长潜力增强等多种因素推动下，展望期内非OECD国家的石油需求预计增长2140万桶/日。预计OECD国家未来几年的石油需求将稳定在4800万桶/日左右，到2040年将降至3800万桶/日左右。就全球范围来看，石油需求年均增量预计将从2018年的140万桶/日降至2028年底的50万桶/日左右。

•**就部门而言，石化行业将是全球石油需求增量的最大来源（+410万桶/日），并将引领石油需求长期增长，但交通运输业仍将是需求总量最大的行业。**在交通运输行业，尽管总体增长接近300万桶/日，但需求占比预计将下降2%；航空业的需求预计也将大幅增长，将成为增长最快的部门，石油需求年均增长率预计为1.5%；海洋运输、铁路和国内水路需求也将出现一定增长。预计到2040年，交通运输行业将占石油需求总量的43%。但根据预测，这一行业将出现石油需求、运输服务和交通工具数量之间的强烈脱钩，主要原因包括技术不断发展所推动的燃料效率提高、能源政策的收紧以及清洁能源汽车的日益普及（电动汽车、氢燃料电池汽车）。2018-2040年间，车辆总数将增长逾10亿辆，达到24亿辆。这一增长的大部分（9.53亿

辆)来自非 OECD 国家。预计到 2040 年,电动汽车(包括纯电动和插电式混合动力汽车)保有量将达到约 3.2 亿辆,相当于全球汽车保有量的 13%。预计大多数电动汽车将是乘用车(3.05 亿辆),将占 2040 年乘用车总量的 15%。

•**美国页岩油将主导非 OPEC 国家石油中期供应增长。**从 2018-2024 年,非 OPEC 国家的石油供应总量预计将增加 990 万桶/日,达到 7220 万桶/日,主要归因于上游投资的增长恢复和需求前景乐观。预计美国页岩油供应将继续强劲增长,将占到非 OPEC 国家中期供应增长的 60%。此外,在其它地区的周期性复苏中,除了圭亚那外,巴西、挪威和加拿大也将贡献可观的供应增长。非 OPEC 国家的长期供应增长预计较为温和。就中期而言,美国页岩油供应预计大幅增加 670 万桶/日,此后增速将放缓呈现温和增长态势。美国页岩油供应预计在 2029 年达到 1740 万桶/日的峰值。其它地方的页岩油产量也有增长潜力,但估计产量仍相对较小。预计到本世纪 20 年代中期,美国的石油供应总量将达到 2280 万桶/日的峰值。非 OPEC 国家的石油供应总量预计在 2026 年达到 7260 万桶/日,但此后逐渐下降,到 2040 年将降至 6640 万桶/日。在本世纪 20 年代中期以后,预计只有巴西和哈萨克斯坦这两个非 OPEC 国家的石油产量将出现显著增长,几乎所有其他非 OPEC 产油国的长期石油产量都将下降。

•**到 2024 年,馏分油产能增量预计约为 800 万桶/日,集中在中东和亚太地区。**预计近 70%的馏分油产能增长将发生在展望期的前三年(2019-2021 年),年均增量预计约为 180 万桶/日。然而,此后几年的产能增量预计将趋于平稳,降至 40 万桶/日。大多数增长来自亚太地区和中东地区(+570 万桶/日,占全球新增产能的 70%以上),主要是受石油需求增长的推动,同时也有中东地区炼油出口增加的影响。预计非洲也将有明显增长(+80 万桶/日),其中尼日利亚的一个大型项目所占份额最大。

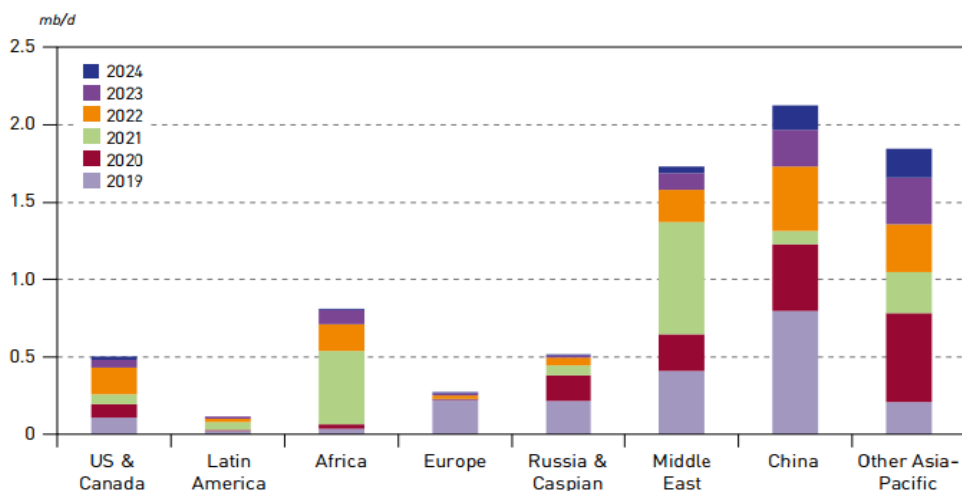


图 3 2019-2024 年全球不同地区馏分油产能增量变化态势 (单位: 百万桶/日)

•**到 2024 年全球馏分油预计出现 400 万桶/日过剩产能。**虽然 2019 年的馏分油

供需差额仍然不大，但从 2020 年开始，供过于求的态势逐步加强，即全球馏分油产能盈余不断增加。预计中东、美国、加拿大、欧洲和中国将出现最大顺差。这可能导致 2020 年后下游竞争加剧，并可能导致部分炼油厂关闭。由于几个地区的需求下降，以及极具竞争力的新炼油厂的增加，预计中期内炼油厂产能退出量将达到 210 万桶/日。预计大部分出现在美国、加拿大和欧洲。预计拉丁美洲将是唯一一个出现产能不足的地区。

•到 2040 年，全球馏分油产能预计增长 1650 万桶/日，主要集中在发展中国家（亚太、中东、非洲和拉丁美洲）。产品产能增长在前期会对现有的炼油厂带来一定的负荷压力，这将对中期过后项目和投资的放缓产生重大影响。对次级产能的预测表明，到 2040 年，需要增加大约 880 万桶/日的转换装置、180 万桶/日的脱硫装置和 500 万桶/日的辛烷生产装置。随着需求的增长和更严格产品规范的实施，预计这些新增项目中的大部分将在 2030 年之前投产。2019-2040 年间，预计维持生产所需的全球上游投资为 8.1 万亿美元，中游行业需要 1 万亿美元，下游投资估计在 1.4 万亿美元左右。综合来看，这意味着全球将需要近 10.6 万亿美元的长期投资来维持上述预期的石油供需。

•在经历了中期的下滑之后，受中东对亚太地区中期出口增加的推动，全球石油出口长期看涨。中期来看，全球石油贸易量预计将相对稳定在近 3800 万桶/日。在区域出口方面，最大的变化是美国和加拿大石油出口会出现显著增加，预计到 2025 年将攀升至接近 500 万桶/日的水平，较 2018 年增加约 300 万桶/日。从长期来看，石油贸易前景将发生根本性的变化，2025-2040 年预计石油出口将增加 450 万桶/日达到近 4200 万桶/日。预计到 2040 年，来自美国和加拿大的出口量将降至 300 万桶/日左右。从 2025 年到 2040 年，中东地区的出口总量将增加约 700 万桶/日，达到约 2300 万桶/日的水平。

（郭楷模）

IRENA：氢能正迎来前所未有的发展机遇

10 月 10 日，国际可再生能源机构（IRENA）发布了《氢能：可再生能源的前景》报告¹⁶，详细分析了氢能用于能源脱碳的潜力。报告指出，通过可再生能源制取的氢气（即“绿色氢气”）将在全球能源转型中发挥核心作用，预计 2050 年绿色氢气将占全球能源消费的 8%，尤其将在钢铁、化工、航运、卡车和航空业等难以脱碳的行业发挥重大潜力。同时，绿色氢气还有助于增加对可再生能源发电的需求，到 2050 年全球 16% 的发电量将用于生产氢气，约有 4-6 太瓦的太阳能和风能发电容量将用于生产绿色氢气和氢基产品。报告认为，氢能大规模部署将是一个长期的过程，对

¹⁶ Hydrogen: A renewable energy perspective. <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>

如何挖掘氢能的潜力提出了政策建议。具体内容如下：

一、大规模发展氢能的时机已经来临

1、氢能将在能源转型中发挥关键作用

(1) 发展氢能有助于应对各种关键的能源挑战。发展氢能可以为碳密集型部门（如交通运输、化工和钢铁等）提供极具发展潜力的脱碳方法。氢能还可以帮助改善空气质量并加强能源安全。此外，还可提高电力系统的灵活性。

(2) 氢在供应和使用方面具有多种途径。氢是一种自由能源载体，可以由多种能源生产。

(3) 发展氢能可以促进对可再生能源的利用。氢能有潜力帮助解决太阳能光伏（PV）等可再生能源的波动性输出问题。氢气是存储可再生能源的一种良好选择，并且有望成为最经济的方式，可在几天、几周甚至几个月内存储大量电力。氢气和氢基燃料可以实现可再生能源的中长距离运输。

2、氢能正在全球范围内快速发展

(1) 清洁氢能正迎来前所未有的政治和商业发展机遇。全球氢能相关政策和项目正在迅速增加，多个国家正部署可再生能源电解水制氢的示范项目和早期商业项目，并注重改进电解槽技术和扩大电解制氢产能，电解槽制氢项目规模呈指数级增长（图 1）。氢能商业应用不断增加，到 2018 年底，全球已安装 22.5 万台家用燃料电池（其中日本占 98%），建成 380 多座加氢站，燃料电池汽车保有量达 11200 辆，2018 年销售量约为 4000 辆。

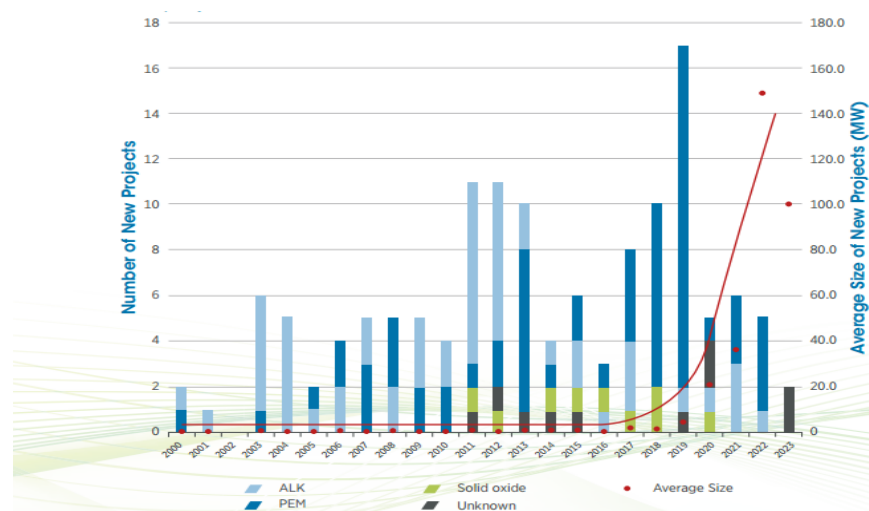


图 1 2000-2023 年全球新增电解制氢项目变化态势（左轴：项目数量；右轴：新项目平均规模<兆瓦>）

(2) 氢能应用领域逐渐扩大。由于可再生能源成本持续下降，以及全球减少温室气体排放的紧迫性增加，许多国家已开始采取行动利用氢能促进脱碳，其应用从汽车工业转移到了难以脱碳的行业，例如能源密集型工业、卡车、航空、航运和供热等。电力制燃料的新概念中，将电解产生的氢气转化为液体燃料成为氢能一项新

的潜在应用。氢气还可用作制氨、钢铁和炼油原料，2018 年全球直接还原炼铁产量达到了 1 亿吨，柴油和航空煤油需求的增加使炼油厂对用于加氢裂化的氢气需求增加，对低硫柴油的需求也使炼油厂脱硫用氢气的需求增加。

(3) 将低碳化石燃料制氢作为过渡选择。化石燃料制氢是当前成本最低也是最主要的制氢方式，但其排放偏高。为化石燃料制氢配备碳捕集和封存（CCS）系统，可实现低碳制氢（即“蓝色氢气”），可作为向无排放的可再生能源电力制氢（即“绿色氢气”）过渡的方式。碳捕集效率有望达到 85%-95%，然而目前一些项目的碳捕集效率并不理想，而且如果捕集的 CO₂ 被用于提高石油采收率（EOR）或生产石化产品或合成燃料，则最终仍会排放 CO₂。因此，实现大规模的蓝色氢气必须基于碳捕集率大大提高，并确保在有效的监控、报告和验证系统下实现长期封存。

(4) 可暂时利用天然气基础设施作为氢气运输设施。输送纯氢气的管道虽然技术上可行，但目前尚未大规模部署。世界某些地区已经具备完善的天然气输送和分配基础设施，按低比例将氢气混入天然气中，无需进行重大技术改变和投入大量资金。此外，将氢气合成为甲烷则可直接使用现有天然气管道，但这增加了氢能利用的成本。此外，需要仔细评估终端设备（锅炉、燃气轮机和灶具）是否适应氢气和天然气的混合。但可以确定，如果要使用纯氢气，则需对天然气基础设施和终端设备进行重大升级。对于氢气混合比例以及如何将现有天然气基础设施逐渐向 100% 输送氢气转变，需各方一致确定共同目标并设定清晰的路线图，还需制定相应的监管法规和安全标准。

(5) 绿色氢气作为新商品的潜力。可以将绿色氢气转化为合成天然气（使用生物能源燃烧产生或直接捕集空气中的二氧化碳），并使用现有基础设施将其运送到市场。还可通过蒸汽甲烷重整配合 CCS 将天然气转化为低碳氢，这为加拿大、伊朗、挪威、卡塔尔、俄罗斯联邦和美国等天然气生产国提供了前景。由于氢气可以在边远的沙漠地区以低成本生产并运到市场，这为中东和北非等地区以及阿根廷、澳大利亚、智利和中国等国家提供了新的机遇。因此，向氢经济的转变为如今依赖化石燃料出口作为国民收入重要来源的国家和地区提供了新的经济前景，还可能为拥有丰富可再生能源资源的国家创造新的出口机会。但是，运输氢气需要耗费大量能量将氢气液化，或者将氢气转化为其他载体，例如氨、甲醇和液态有机氢载体，这带来了巨大的损失。如果可以在现场制氢并用于生产清洁产品，如氨、甲醇、直接还原炼铁或通过电力转换为燃料，则可以减少此类损失。

二、氢能与可再生能源的关系

1、氢能可推动可再生能源的加速部署

氢能大规模部署（或氢气衍生的燃料和大宗商品）可以推动对可再生能源发电需求的显著增长。IRENA 估计，2050 年将有 19 艾焦氢气由可再生能源电力制取，

占终端能源消耗的 5%和发电量的 16%。而氢运输过程中会造成重大能量损失，可能会使氢能供应的电力需求成倍增加。因此大规模部署氢气将对电力行业产生重大影响，并且为可再生能源部署带来更多机会

2、可通过制氢提高电力系统灵活性

电解槽可在几分钟甚至几秒钟内增加或降低产量，新兴的质子交换膜电解槽比碱性电解槽响应速度更快，因此可利用电解槽缓解电网拥堵，这有助于减少对波动性可再生能源的削减。同时，可再生能源电力可通过制氢来输送。

3、氢气可用于季节性存储波动性可再生能源电力

到 2050 年，高比例风能和太阳能并网将使储能需求显著增长，将可再生能源制氢与储氢相结合，可以为能源系统提供长期的季节灵活性。储氢可以以多种方式进行，如高压压缩、低温液化、固体储氢、转化为液体燃料或与天然气混合储存在天然气基础设施中。可再生能源电力季节性储能需求将从 2030 年开始大幅增长，但氢能相关基础设施和法规应从当前开始规划。

三、清洁氢能的成本竞争力

可再生能源制氢成本与电解槽的资本支出、可再生能源电力的平准化度电成本（LCOE）和电解槽的运行率（即年运行时间占比）密切相关。目前，碱性电解槽的资本支出通常为 840 美元/千瓦，许多地方公用事业规模太阳能光伏和陆上风电的成本已达到 2-3 美分/千瓦时。电解槽的运行率越高，单位氢气的生产成本越低，应确保其运行率超过 50%。当前可再生能源制氢成本高于化石燃料（煤炭和天然气）制氢成本，在最佳情况下，即采用最低成本的风电（23 美元/兆瓦时）和最低成本电解槽（200 美元/千瓦，到 2040 年有望扩大规模使用），绿色氢气有望与蓝色氢气成本相当（如图 2 所示）。

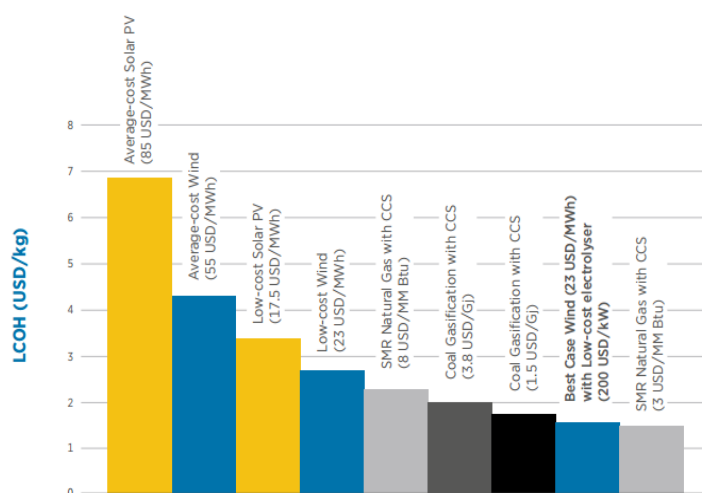


图 2 各种制氢技术成本现状（单位：美元/kg）

IRENA 预测，到 2050 年，全球能源领域将消耗 19 艾焦“绿色氢气”，意味着到 2030 年全球将安装约 700 吉瓦电解槽，到 2050 年则将达 1700 吉瓦。考虑技术的

发展，到 2050 年电解槽成本降至 375 美元/千瓦，配备 CCS 的化石燃料制氢成本则基本保持不变。因此，利用低成本风电和光伏电力制取的氢气将在未来五年内具备与化石燃料制氢相当的成本竞争力，尤其是与配备 CCS 的天然气制氢相比。2030-2040 年间，所有绿色氢气的成本将低于蓝色氢气。到 2035 年，以可再生能源电力平均成本为基准的制氢成本也开始具备与“蓝色氢气”的竞争力，碳价将进一步提升绿色氢气的竞争力，在某些地区绿色氢气将在未来 3-5 年内具备成本竞争力。

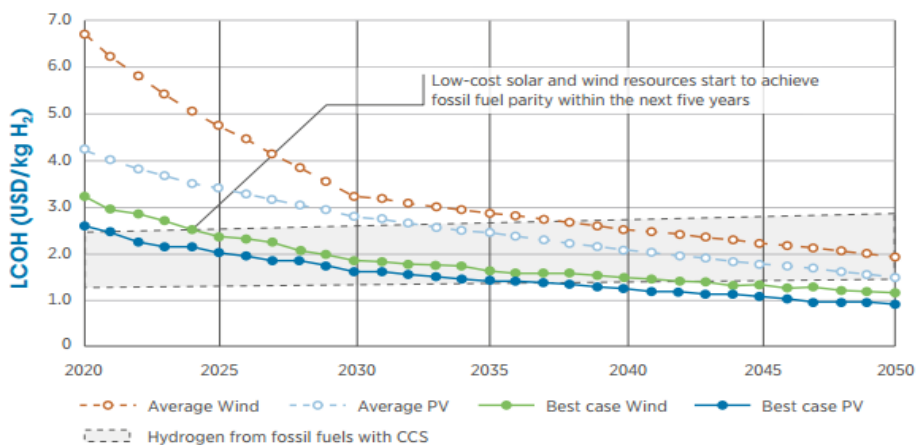


图 3 风电和光伏发电制氢成本发展趋势（单位：美元/kg）

四、关于扩大氢能部署规模的政策建议

1、认识氢能在能源系统转型中的战略作用

(1) 将氢能作为关键环节纳入能源系统转型。尽管未来十年中还无法发挥氢能的作用，并且还需进一步降低氢能成本，但此后氢能将迅速增长并在 2050 年前做出重大贡献。各国政府和私营部门必须加强努力，以实现这一前景。

(2) 将绿色氢气作为长远的氢气供应方式。从长远来看，可再生能源制氢是唯一可持续发展的氢气供应方式。未来绿色氢气将具备成本竞争力，应关注降低可再生能源电力和电解槽成本，提高电解槽效率，以及电力系统集成。配备 CCS 的化石燃料制氢也可以起到过渡作用，特别是在具有低成本化石燃料储量、良好碳封存条件以及可以向输送氢气过渡的天然气管道系统的地区。

(3) 将氢经济纳入《巴黎气候协定》的国家自主贡献目标（NDC）中。气候目标是向氢经济过渡的主要动力，因此对于能源系统而言，至关重要的是要在气候承诺中体现这种潜力，对将绿色氢气作为一种重要的温室气体减排方案的认识尚有待提高。

(4) 采取措施增加清洁氢气在能源市场的应用。例如，制定可持续制氢的强制性目标，强制性将氢气与天然气混合，或实施可再生能源指令以促进交通运输业中氢的使用等。

2、制定强制性政策助推清洁氢气普及利用

(1) 制定无碳排放供氢的认证系统和规定。确保未来的氢气供应与气候目标相

一致至关重要，特别是对于遥远地方运输的氢气，则需要确定其来源。

(2) **记录并交流国际最佳实践，确保信息共享。**氢能领域处于迅速发展阶段，技术、监管框架和标准都需要进一步发展。

(3) **确保高效的氢气供应和使用。**氢气的挥发性意味着转化、运输和存储过程中会造成明显的能耗损失。需要进行技术改进以确保较高的整体效率。

3、注重氢气供应基础设施建设和切实可行的过渡途径探索

(1) **评估天然气管道系统材料及终端用气设备，以更好地了解将其用于氢气运输的潜力。**各种研究表明，将天然气管道系统作为过渡是可行的，但只有实践才能证明技术和经济可行性。

(2) **进行技术协作，并协调法规、规范和标准。**天然气管道系统、地下存储和燃烧设备中气体混合物的使用标准通常是以天然气中氢气含量很少为标准设计的，因此需进行修订。国家标准化机构和国际组织在此过程中可以发挥关键作用。在标准变更方面发展并取得共识是一个漫长的过程。因此，现在需要采取紧急行动，以避免成为中期行动的障碍。

(3) **鼓励发展氢能基础设施，同时通过研发和示范以降低绿色氢气的供应成本。**尽管绿色氢气在技术上是可行的，但在未来几十年中将需要进行大规模推广，以确保氢能在能源转型中发挥重要作用。

4、开拓新的氢能利用市场

(1) **将氢能应用于碳密集型行业。**对于卡车运输而言，低成本氢气的可用性是一个关键因素。在工业领域，基于绿色氢气的氨生产在技术上是可行的。钢铁生产需要开发更多工艺，可极大降低碳排放。铁路、船运和航空领域也极具应用前景。新的氢商品贸易可以使氢能不仅围绕能源转型发挥作用，还可以为当今的主要石油和天然气生产国创造经济前景。

(2) **开发航空、船运、化学品和石化行业的可再生能源电力转换制化学品和燃料技术（Power-to-X）。**尽管目前此类技术的成本很高，但存在巨大的降低成本潜力，能够为碳密集型的行业提供技术可行且成本低廉的解决方案。其关键是具有可长期使用的可持续 CO₂ 来源，例如生物质燃烧或直接空气捕获 CO₂。

(3) **将氢能作为向未来能源系统转型期间推动部署更多波动性可再生能源的关键因素。**氢能具备增强系统灵活性、提升电力需求和可再生能源份额等优点，因此应被视为能源转型的重要解决方案。

(4) **在能够将氢气生产和氢气利用结合的地区启动示范项目。**例如，炼钢和合成氨以及合成燃料项目，从而消除氢气运输的成本。

(张凯宏 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