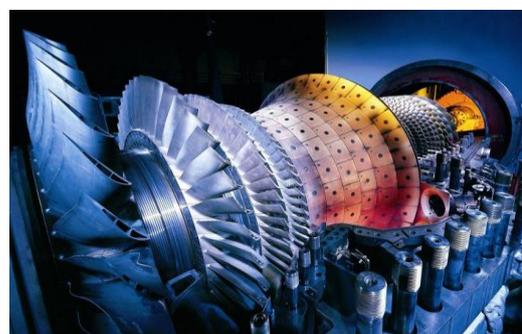


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- 美国能源信息署发布报告展望至 2050 年全球能源发展趋势
- 美国规划至 2035 年天然气水合物研究开发路线图
- IRENA：氢能正迎来前所未有的发展机遇
- NETL 开发煤炭原料提质和生产煤基高价值产品新技术
- 溶剂调谐实现室温快速制备大面积钙钛矿新工艺

主管：中国科学院文献情报系统战略情报服务协调组

主办：中国科学院武汉文献情报中心



中国科学院武汉文献情报中心
Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences
湖北省科学图书馆
Hubei Sciences Library



《先进能源科技动态监测快报》

中国科学院武汉文献情报中心

湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

网址:

<http://www.whlib.ac.cn>

联系人:

郭楷模

guokm@whlib.ac.cn

电话:

027-87199180



先进能源情报网

<http://energy.whlib.ac.cn>



先进能源科技战略情报研究中心

微信公众号



先进能源情报网微信公众号

中国科学院文献情报系统先进能源情报网简介

中国科学院文献情报系统先进能源情报网是在中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组的整体组织和指导下,由中国科学院武汉文献情报中心牵头组建,联合中国科学院文献情报系统能源领域相关研究所,共同搭建的情报研究资源共享及协同服务的非营利性情报研究及服务团体。先进能源情报网将汇聚中科院文献情报系统内与领域相关的战略情报研究人员、学科情报人员、研究所科研管理人员、研究所文献情报人员,以及相关的管理和学科专家,通过“协同开展情报研究服务、组合共建情报产品体系、促进情报资源交流共享、提升整体情报保障能力”的工作方式,创新院所协同的情报研究和服务保障模式,促进情报资源的共享、情报需求和情报供给的对接、情报技术方法的合作开发,实现情报能力的扩散和提升,进而对中国科学院各个层面(院层面、所层面、项目团队层面及科研人员层面)的重要情报需求提供坚实保障。

先进能源情报网成员单位

成员单位	单位名称
组长单位	武汉文献情报中心
副组长单位 (排名不分先后)	合肥物质科学研究院 大连化学物理研究所 青岛生物能源与过程研究所 广州能源研究所
成员单位 (排名不分先后)	上海高等研究院 山西煤炭化学研究所 上海应用物理研究所 兰州近代物理研究所 广州地球化学研究所 过程工程研究所 电工研究所 工程热物理研究所 武汉岩土力学研究所 武汉物理与数学研究所 苏州纳米技术与纳米仿生研究所 福建物质结构研究所

目 录

决策参考

美能源信息署发布报告展望至 2050 年全球能源发展趋势2
美国规划至 2035 年天然气水合物研究开发路线图5
IRENA: 氢能正迎来前所未有的发展机遇6

项目计划

NETL 开发煤炭原料提质和生产煤基高价值产品新技术11
DOE 资助 2800 万美元支持风能研发和示范12
DOE 资助 2490 万美元支持先进水力发电技术研发13

前沿与装备

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14
溶剂调谐实现室温快速制备大面积钙钛矿新工艺15
CoS@CuxS 双壳纳米盒正极呈现高储钠特性增强电池性能16
网状纳米化合物 $Sb_2Si_2Te_6$ 展现优异热电转换性能18

本期概要

美国能源部能源信息署 (EIA) 发布《国际能源展望 2019》报告, 展望了世界主要国家和地区到 2050 年的全球能源消费、供应、结构变化趋势: 未来 30 年发展中国家 (尤其是亚洲发展中国家) 经济蓬勃发展, 全球经济将持续增长, 推动全球能源需求将继续增长。工业仍将是最大的终端用能部门, 可再生能源消费预计比化石能源增长更快, 但到 2050 年化石能源依旧是能源消费结构主体。电力在能源供应体系中的地位逐渐增强, 发电量增长大部分由可再生能源和天然气推动。

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》, 提出了近期和远期目标和需要开展的优先研究领域: 到 2022 年在北极北坡完成天然气水合物长期储层响应测试, 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。路线图提出如下的优先研究领域: (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。

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, 详细分析了氢能用于能源脱碳的潜力并提出了政策建议: 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。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。报告提出了扩大氢能部署规模的四大政策建议: (1) 认识氢能在能源系统转型中的战略作用; (2) 制定强制性政策助推清洁氢气普及利用; (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; (4) 开拓新的氢能利用市场。

美国国家能源技术实验室 (NETL) 正改善煤炭物理化学性质以增强其作为碳基原料的价值, 开发其在建筑材料、储能、碳基复合材料和 3D 打印材料等领域的新用途: 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, 涉及煤炭原料提质和煤生产高价值产品两方面。

北卡罗来纳大学教堂山分校 Jinsong Huang 教授课题组成功开发出一种可在室温下快速制备大面积钙钛矿薄膜工艺, 制备出了效率高达 16.4% 的大面积 (63.7 cm²) 钙钛矿太阳能电池器件: 通过对钙钛矿前驱体溶剂的配位调谐, 将挥发性非配位溶剂和低挥发性配位溶剂混合使用, 有效地改善了钙钛矿薄膜的结晶速度和质量, 从而开发出一种室温下快速刮涂制备大面积钙钛矿的新工艺, 制备的 63.7 cm² 大面积器件获得了高达 16.4% 的转换效率, 且具备良好稳定性, 为钙钛矿太阳能电池商业化奠定了关键技术基础。

美能源信息署发布报告展望至 2050 年全球能源发展趋势

9月24日，美国能源部能源信息署（EIA）发布《国际能源展望 2019》¹，采用情景模型分析方法对主要国家和地区到 2050 年的全球能源消费、供应、结构变化等因素进行系统展望。报告指出，无论何种情景，伴随发展中国家经济（尤其是亚洲发展中国家）蓬勃发展，全球经济将持续增长，推动未来 30 年全球能源需求将继续增长。报告要点如下：

1、至 2050 年全球能源持续增长，但各地区情况不一

在参考情景中，到 2050 年世界能源消费总量预计增长近 50% 至 911 万亿英热单位，大多数增长来自非 OECD 国家，预计增长约 70% 至 624 万亿英热单位，主要原因是这些国家经济和人口增长强劲；而同期经合组织国家预计仅增长 15% 至 287 万亿英热单位，归因于这些国家已经是成熟的市场，经济和人口增长缓慢，且能效提升显著。而就非 OECD 国家而言，主要的增长动力来自亚洲国家，展望期内（2018-2050 年）该地区的能源需求预计将增长近一倍，成为世界上能源消费增长最快、消费规模最大的地区。就该地区国家而言，中国能源消费增速将逐步放缓，但至 2050 年中国的工业能源消费仍居世界首位。印度则出现快速增长，预计年均增幅 3.4%，从 2018 年的 16 万亿英热单位增长到 2050 年 47 万亿英热单位。

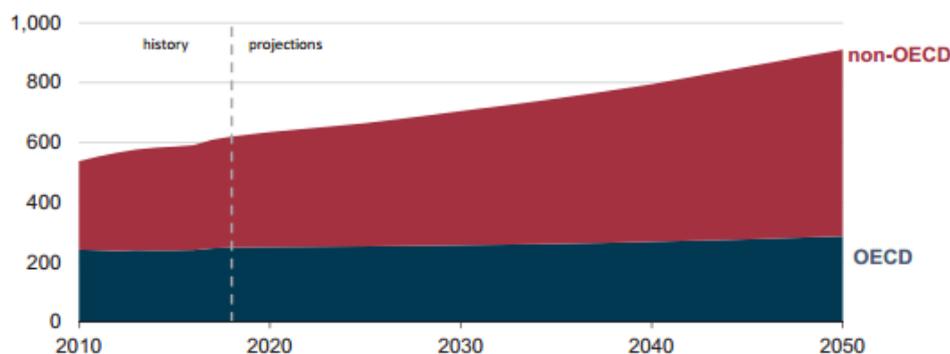


图 1 2010-2050 年 OECD 和非 OECD 国家能源消费量发展趋势（单位：万亿英热单位）

2、至 2050 年工业部门仍将是终端能源消费主体

展望期内，工业部门（如炼油、采矿、制造业、农业和建筑业）仍将是最大的终端用能部门，预计该部门能源消费量将增长 30% 以上，达到 315 万亿英热单位，将占到全球终端用能增量的 50% 以上。能源消费量增长主要原因是经济活动强劲，展望期内各行业的总产值预计将翻一番，而其中约一大半的增长与工业活动有关。

¹ International Energy Outlook 2019 with projections to 2050.
<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>

其余的增长来自服务业和非工业其他经济活动。工业部门用能增长大多发生在非 OECD 国家。在参考情景中，非 OECD 国家工业部门能源消费量的年均增幅预计超过 1.0%，而同期 OECD 国家消费量的年均增幅预计不到 0.5%。至 2050 年，交通部门能源需求预计增长 77%，增长主要归因于非 OECD 国家的交通运输能源消费继续增长，预计届时上述国家将占世界交通运输能源消费总量的近 65%。同期，OECD 国家交通运输能源消费量预计保持稳定。同期，建筑（住宅和商业）部门的能源消费预计以年均 1.3% 的增速增长，从 2018 年 91 万亿英热单位上升到 2050 年的 139 万亿英热单位，使得建筑部门在全球能源消费总量中的占比从 2018 年的约 20% 增加到 2050 年的 22%。与其他部门类似，非 OECD 国家也是建筑部门能源消费增长的主要驱动力，预计以每年约 2% 的速度增长，约为 OECD 国家的 5 倍（0.4%），且到 2025 年非 OECD 国家建筑能耗预计就会超过 OECD 国家。

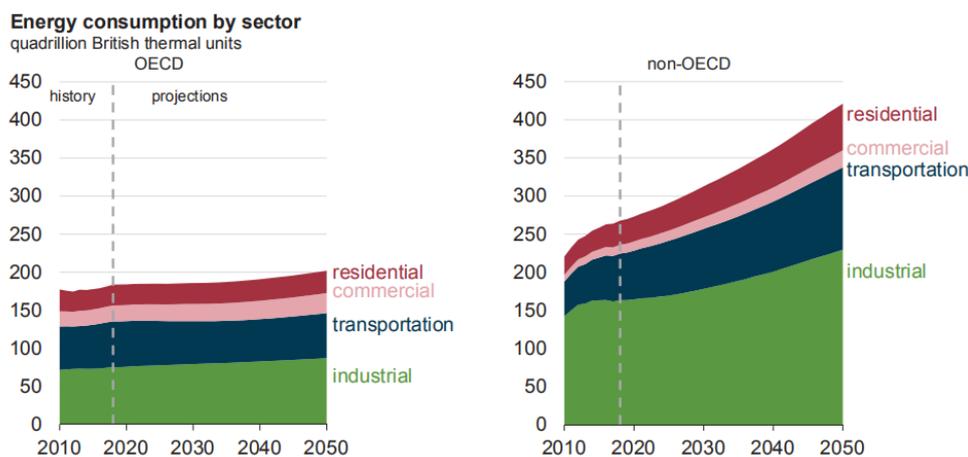


图 1 2010-2050 年 OECD 和非 OECD 国家不同终端用能部门能源消费量发展趋势（单位：万亿英热单位）

3、可再生能源快速增长，但化石能源依旧是能源消费结构的主体

就能源结构而言，展望期内可再生能源消费预计比化石能源增长更快，但到 2050 年化石能源依旧是能源消费结构主体，其在能源消费总量中的占比仍将超过 70%。在化石燃料中天然气消费增长最快，年均增幅预计达到 1.1%，高于液体燃料（0.6%）和煤炭（0.4%）；到 2050 年全球天然气消费量预计增长超过 40%，达到近 200 万亿英热单位。大部分增长来自非 OECD 国家，展望期内上述国家天然气消费量预计增长 70% 至 120 万亿英热单位，同期 OECD 国家消费量预计增长 17% 至 78 万亿英热单位。油价的上涨一定程度上会驱使能源用户从液体燃料转向其他替代燃料以及采取节能技术，但到 2050 年全球液体燃料消费仍将增长，预计增幅 20% 至 240 万亿英热单位。受到非 OECD 国家煤炭需求增长驱动，到 2050 年全球煤炭消费量预计增长至 90 多亿吨。展望期内，可再生能源是增长最快的能源，预计年均增幅 3%，到 2050 年将成为最大的一次能源（占比超过 25%）。同期，核电预计每年增长 1%，

到 2050 年其在一次能源占比预计达到 5% 左右。

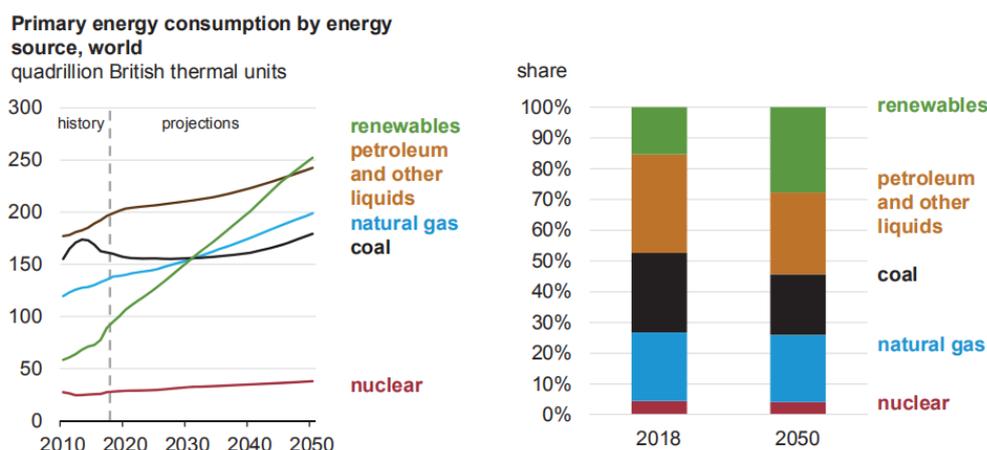


图 3 2010-2050 年一次能源消费中不同能源消费量和占比发展趋势（单位：万亿英热单位）

4、电气化水平不断提升，电力在能源供应体系中的地位提高

提高电气化水平是未来世界能源发展的主要趋势之一。越来越多的常规能源通过转化为电力在终端利用，风能、太阳能等也主要是通过转化为电力得到利用，因此主要用来发电的能源占一次能源消费比重将稳步提高。展望期内，非 OECD 国家的发电量预计将以年均 2.3% 的增速增长，而 OECD 国家为每年 1.0%。发电量的增长大部分是由可再生能源和天然气推动的，到 2050 年它们在总发电量中所占的比例预计上升到 70%。期间，可再生能源（包括水电）将是增长最快的发电来源，平均每年增长 3.6%，主要原因是技术进步（促使成本下降）和政府政策支持。参考情景显示，到 2025 年可再生能源将超过煤炭成为主要电力来源，到 2050 年可再生能源预计占世界发电总量的一半。同期，天然气发电量预计以年均 1.5% 的增幅增长，核能发电量预计以年均 1.0% 的增幅增长。燃煤发电量预计保持相对稳定，但随着发电总量的增加，其占比预计将从 2018 年的 35% 下降到 2050 年的 22%。

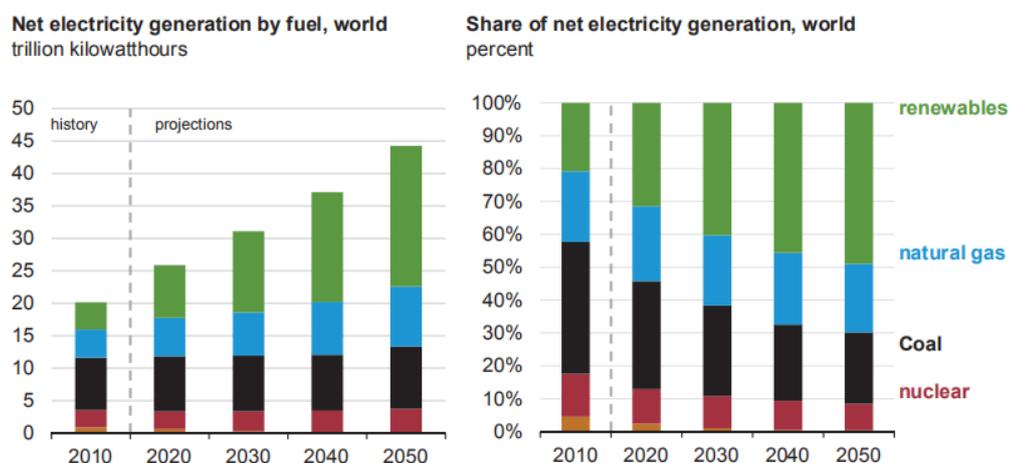


图 4 2010-2050 年不同能源发电量和占比发展趋势（单位：万亿千瓦时）

（郭楷模）

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》²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。

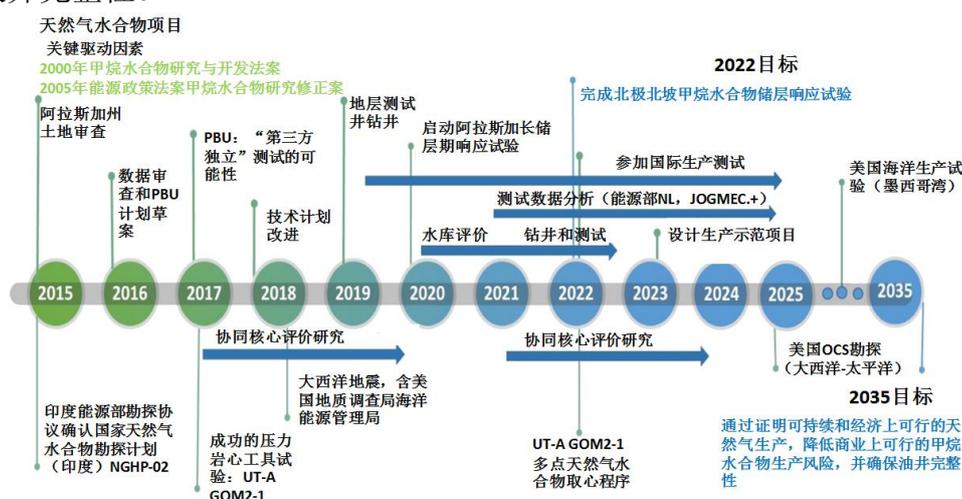


图 1 美国天然气水合物研发路线图

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

² Gas Hydrates Research and Development Roadmap: 2020-2035.
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Gas%20Hydrates%20Roadmap_MHAC.pdf

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）

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³，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

³ Hydrogen: A renewable energy perspective. <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>

(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。

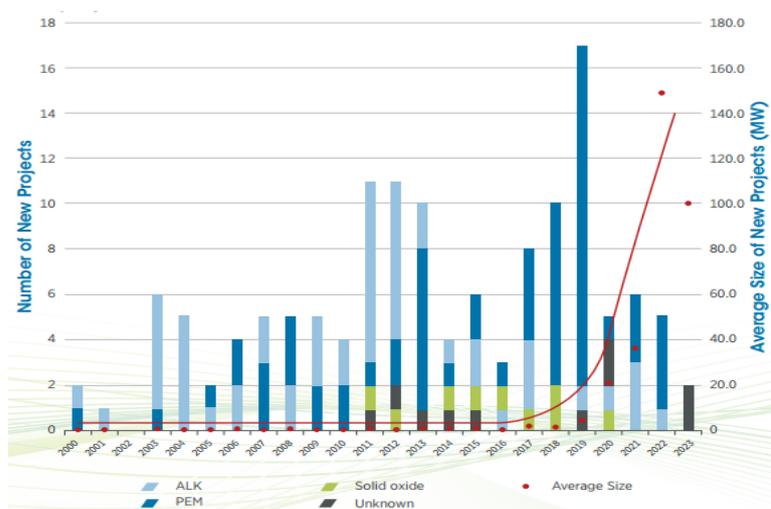


图 1 2000-2023 年全球新增电解制氢项目变化态势（左轴：项目数量；右轴：新项目平均规模<兆瓦>）

(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）。

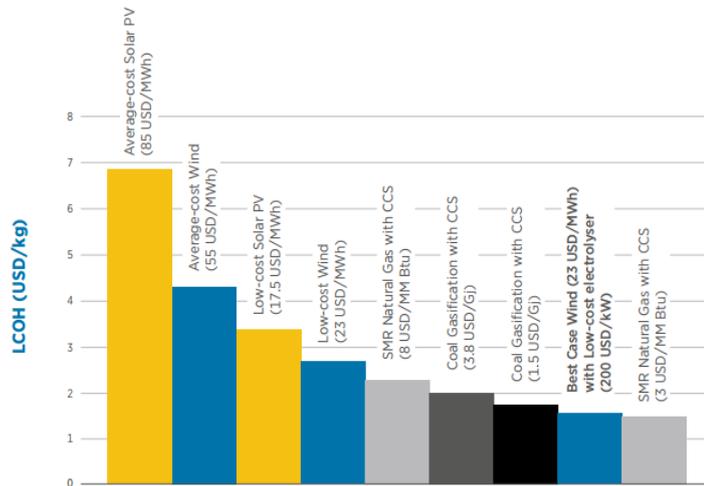


图 2 各种制氢技术成本现状（单位：美元/kg）

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。

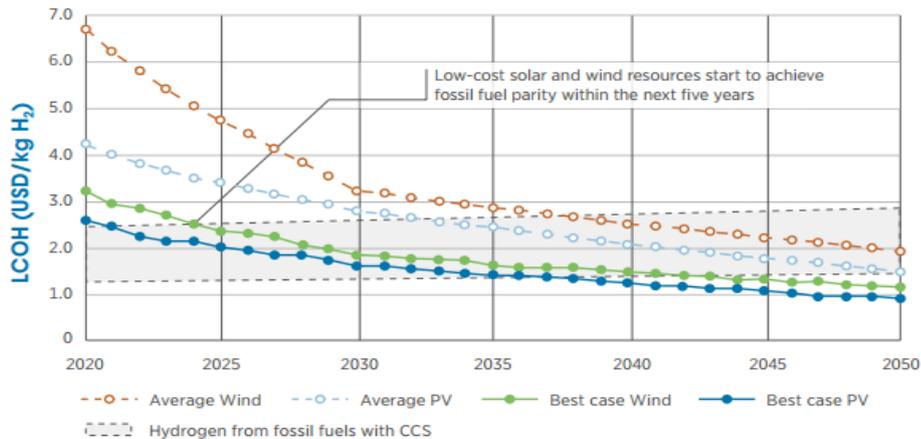


图 3 风电和光伏发电制氢成本发展趋势（单位：美元/kg）

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)

项目计划

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：

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。

（岳芳）

DOE 资助 2800 万美元支持风能研发和示范

10 月 22 日，美国能源部（DOE）宣布向 13 个风能研发和示范项目提供 2800 万美元资助⁵，旨在降低风电成本，推进陆上风能、海上风能和分布式风能的发展。本次资助主要聚焦四大主题领域，包括技术测试、示范、集成和服务等方面，具体内容见表 1。

表 1 风能研发示范项目具体内容

主题	具体内容	资助金额 /万美元
风能创新促进 乡村经济发展	•开发标准化分布式风能/电池/发电机微电网系统，为乡村居民和企业提供灵活、节能、可靠的电力	600

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

⁵ DOE Awards \$28 Million for Wind Energy Research, Development, and Demonstration Projects. <https://www.energy.gov/articles/doe-awards-28-million-wind-energy-research-development-and-demonstration-projects>

	<ul style="list-style-type: none"> •开发新型建模、规划和运行方法，用于部署和运行风能和储能技术，实现在保障电网可靠性的同时容纳更高比例的风能 •设计优化模型和控制算法，以协调风能与其他分布式电源的应用（如储能电池和太阳能光伏等） •提供技术援助，并开发标准化风能工程解决方案、指标、案例、最佳实践和金融模式，以实现乡村分布式风能的经济高效利用 	
海上风电研发	<ul style="list-style-type: none"> •通过半实物仿真改进海上风力涡轮机机舱测试，从而使用 7.5 MW 测功机同时进行机械、电气和控制器测试 •升级理海大学土壤-基础相互作用实验室，以将计算机模拟与物理测试相结合，进行风、波浪、洋流和其他因素对海上风力涡轮机结构影响的建模研究 •升级马萨诸塞州清洁能源中心风力技术测试中心，对 85-120 米长的叶片进行结构测试 •通过数值模型模拟风浪对波浪水池中浮动式海上风力涡轮机的综合影响 •量化疲劳对各种船用混凝土混合物的刚度、强度和耐久性的影响，以促进开发具有经济高效、弹性的海上风电混凝土支撑结构 •开发和验证一种新型自主方法，通过声压测试检测风力涡轮机叶片的退化和损坏 	700
降低海上风电风险和成本的新型技术	<ul style="list-style-type: none"> •示范用最先进传感技术表征伊利湖项目现场附近鸟类的活动 •开发 10-12 MW 风力涡轮机用新型浮动结构，以取代目前部署的两个 6 MW 浮动式海上风电示范项目的浮动结构 	1000
风力涡轮机高塔技术	160 米风力涡轮机塔架的现场螺旋焊接，以及使用自升式塔式起重机安装塔顶组件	500

(岳芳)

DOE 资助 2490 万美元支持先进水力发电技术研发

10 月 31 日，美国能源部 (DOE) 投入 2490 万美元⁶，支持开发行业主导的创新水力发电技术，以推动海洋和水动力学行业发展，并提高水电作为灵活电网资源的能力。本次资助将重点关注四个领域的研究：水电运营灵活性；低水头水电和河流流体动力学技术；先进波浪能设备设计；海洋能中心研究基础设施升级。具体内容见表 1。

表 1 先进水力发电技术研发具体内容

主题	具体内容
水电运营灵活性	<ul style="list-style-type: none"> •量化水电运营灵活性的能力：开发一种行业认可的方法和框架，以量化水电调节运营灵活性的能力，示范该方法有效性及全面应用的可行性 •提高水电灵活性的运营策略：①对低水头混流式水轮机的运行进行分

⁶ DOE Announces \$24.9 Million Funding Selections to Advance Hydropower and Water Technologies.
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-249-million-funding-selections-advance-hydropower-and-water-technologies>

	析、建模和模拟，以证明其灵活性潜力；②开发一种水电灵活运行的数学描述方法，可适应各种约束并根据流入量和净负荷分析潜在的不确定性；③开发先进的建模和优化方法，以利用梯级水电系统增强运行灵活性
低水头水电和河流流体动力学技术	<p>•模块化低水头水电技术：①开发一种创新螺旋式鱼类通道模块，用于低水头水力发电厂上游和下游鱼类的通过；②利用现有的行业方法和技术最大限度地降低性能和成本风险，从而推进对鱼类友好的水平轴流低水头发电模块的设计；③开发一种鱼类通道模块，可同时容纳多个物种，并可轻松集成到发电系统中；④利用虹吸流设计推进沉积物通道模块</p> <p>•模块化河流发电技术：①开发并示范一种模块化河流发电系统，其中每个涡轮发电机组均作为独立单元安装，并可以将相邻模块连接成水平或垂直阵列；②使用叶片独立控制的垂直轴摆线式水轮机模块提供 30 kW 发电系统；③设计一种横流摆线式水轮机模块，可通过液压连接并使用单个发电机</p>
先进波浪能设备设计	①开发下一代波浪能转换器，将使用复合材料减少资本支出，并使用永磁发电机最大程度地提高效率，并将在夏威夷的波浪能测试站点进行测试；②设计下一代压差波浪能转换器，使用深度控制和可变几何结构降低负载，年均功率将达到 45 kW；③制造下一代振荡水柱设备，通过使用高级控件、改进结构设计和改进涡轮机设计，开发更具成本竞争力的设备；④设计一个年均功率 100 kW 的波浪能转换器，将在一个浮动平台安装两台浪涌装置，通过集成控制系统控制实现最大发电能力。
海洋能源中心研究基础设施升级	升级现有的国家海洋可再生能源中心基础设施，包括：①太平洋海洋能源中心，通过研究、教育、推广以及测试站点环境表征、设计和运行，促进波浪能、潮流能和内河能量转换器的开发；②夏威夷国家海洋可再生能源中心，主要研究波浪能及海洋热能转换，具有与美国海军的共同测试站点；③东南国家海洋可再生能源中心，专注于洋流和海洋热能转换，并专门研究环境基准观测系统

(岳芳)

前沿与装备

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。研究人员首先对醋酸铂(Pt(acac)₂)

和醋酸镍 ($\text{Ni}(\text{acac})_2$) 混合液进行一步溶剂热方法处理, 随后经过超声烘干获得产物。透射电镜显示产物为一维纳米球串, 通过元素能谱分析可知, Pt、Ni 元素均匀分散在纳米球串中。高分辨率的透射电镜晶格测试进一步显示, 连接纳米球串中每个纳米球单元节点的晶格常数为 0.227 nm, 对应 Pt 元素; 而纳米球晶格常数为 0.216 nm 对应 PtNi 合金, 即整个一维的纳米球串是由 PtNi 合金纳米球通过 Pt 连接线串起来。随后通过酸腐蚀策略去除一部分 Ni 成份, 透射电镜表征显示纳米球串依然保持了初始结构, 没有出现任何塌陷等结构形变, 但可以观察到纳米球已经从实心变成了空心多孔结构, 空心纳米球依旧是 PtNi 合金, 球壳平均厚度约为 2.2 nm, 即通过腐蚀制备了出了一维 PtNi 合金空心纳米笼串珠。氮气脱吸附曲线测试显示, 一维 PtNi 合金空心纳米笼串珠比表面积为 $68.2 \text{ m}^2/\text{g}_{\text{Pt}}$, 高于没有腐蚀处理的实心球串 $43.2 \text{ m}^2/\text{g}_{\text{Pt}}$, 这种空心结构有利于将更多的催化活性位点暴露出来, 从而增强催化活性。随后对上述催化剂进行电化学性能测试, 在氮气饱和的氯酸溶液中进行循环伏安测试, 结果显示商业化 Pt/C 催化剂质量和面积比活性分别为 $0.21 \text{ A}/\text{mg}_{\text{Pt}}$ 和 $0.36 \text{ mA}/\text{cm}^2_{\text{Pt}}$, 而新型的一维 PtNi 合金空心纳米笼串珠催化活性较 Pt/C 大幅提升一个数量级, 分别为 $3.52 \text{ A}/\text{mg}_{\text{Pt}}$ 和 $5.16 \text{ mA}/\text{cm}^2_{\text{Pt}}$, 分别是 Pt/C 催化剂的 17 倍和 14 倍。且后者经过 5 万次循环后, 其催化活性基本无衰减, 表现出极其优异的稳定性。为了进一步探究该催化剂的实际实用性, 将上述新型一维 PtNi 合金催化剂应用到纸质交换膜燃料电池中, 在 0.6 V 下获得了 $1.5 \text{ A}/\text{cm}^2$ 电流密度, 峰值功率达到 $920 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 且可以稳定循环 180 小时。原位 X 射线同步辐射测试结果表明, 上述新型一维 PtNi 合金催化性能主要来源于该催化剂一维空心多孔结构在氧还原过程中具有最优的铂氧物种吸附强度, 另外在提高催化活性的同时亦能保持较高的结构稳定性。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*》⁷。

(程向阳 郭楷模)

溶剂调谐实现室温快速制备大面积钙钛矿新工艺

有机无机杂化钙钛矿太阳能电池效率已突破 25%, 接近晶硅太阳能电池, 且制备工艺简单、成本低廉, 被视为最有希望替代晶硅电池的新一代薄膜电池技术。然而, 目前高效率钙钛矿太阳能电池器件主要局限在小面积尺寸 ($\sim 0.1 \text{ cm}^2$), 且需要在惰性气氛中进行, 不利于电池的规模化生产。因此, 开发室温大面积钙钛矿太阳能电池制

⁷ 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

备工艺意义重大。北卡罗来纳大学教堂山分校的 Jinsong Huang 教授课题组通过对钙钛矿前驱体溶剂的配位调谐，成功开发出了一种室温下快速制备大面积钙钛矿薄膜工艺，制备出了效率高达 16.4% 的大面积 (63.7 cm^2) 钙钛矿太阳能电池器件，且该工艺具备良好的普适性，为钙钛矿太阳能电池商业化奠定了极为关键的技术基础。相关研究已表明，低挥发性钙钛矿前驱体溶剂（如二亚甲基亚砜[DMSO]等）会抑制室温下钙钛矿薄膜的快速结晶；而高挥发性溶剂（如 2-甲氧基乙醇[2-ME]等）则相反，但会导致结晶质量偏低。为此，研究人员将上述两种高低挥发溶剂混合（其中挥发性溶剂体积占比 98%），以克服双方缺点整合优点。随后研究人员分别以 DMSO、2-ME 和 DMSO/2-ME 溶液作为溶剂制备了钙钛矿前驱体，通过快速刮涂法制备了一系列的钙钛矿薄膜，随后置于 70°C 加热台干燥结晶。扫描电镜测试发现，采用单独 DMSO 溶剂的薄膜干燥和结晶速度很慢，需要数十分钟；而采用单独的 2-ME 溶剂钙钛矿薄膜结晶速度很快，导致结晶质量不高，晶粒尺寸偏小（晶粒不大，晶粒越大缺陷越少）；而采用 DMSO/2-ME 混合溶剂钙钛矿薄膜在室温下实现了快速干燥和高质量结晶。且通过调整刮涂速度发现，单独溶剂所能承受的最快刮涂速度不超过 40 mm/s （超过这一阈值，无法形成致密薄膜），而混合溶剂刮涂速度上限可达 99 mm/s （速度快有助于节约生产时间提高经济收益）。为此，研究人员以上述 DMSO/2-ME 混合溶剂钙钛矿薄膜作为光敏层，制备了完整的电池器件，并进行了光电性能测试。结果显示，小面积 (0.08 cm^2) 器件获得了高达 21.3% 的转换效率；研究人员进一步制备了 63.7 cm^2 的大面积器件，获得了 16.4% 的高效率，经过连续 1000 小时的一个标准模拟太阳光辐照后器件仍可保持 87% 的初始效率，表现出优异的稳定性。此外，为了探究器件适应真实温度环境能力，研究人员测试了工作温度从 25°C 到 85°C 变化过程中器件性能变化情况，结果显示器件温度系数仅为 $0.13\%/^\circ\text{C}$ （即每升高 1°C 效率仅衰减 0.13%），优于商用晶硅电池 ($0.44\%/^\circ\text{C}$)，且经过遮光后基本可以恢复初始效率。该项研究将挥发性非配位溶剂和低挥发性配位溶剂混合使用，有效地改善了钙钛矿薄膜的结晶速度和质量，从而开发出一种室温下快速刮涂制备大面积钙钛矿的新工艺，制备的 63.7 cm^2 大面积器件获得了高达 16.4% 的转换效率，且具备良好稳定性，为钙钛矿太阳能电池商业化奠定了关键技术基础。相关研究成果发表在《*Science Advances*》⁸。

（郭楷模）

CoS@Cu_xS 双壳纳米盒正极呈现高储钠特性增强电池性能

钠金属具有与锂相似的物理化学性质，但钠资源更加丰富、价格低廉，所以钠离子电池在大规模储能领域中具有广阔的应用前景，引起了广泛关注。研发高性能、

⁸ Yehao Deng, Charles H. Van Brackle, Xuezheng Da, et al. Tailoring solvent coordination for high-speed, room-temperature blading of perovskite photovoltaic films. *Science Advances*, 2019, DOI: 10.1126/sciadv.aax7537

稳定的储钠材料是钠离子电池得以实际应用的关键。新加坡南洋理工大学 Xiong Wen Lou 教授课题组以金属有机骨架 (MOF) 为模板通过多步化学反应设计制备了一种中空双壳纳米盒正极材料, 并将其应用于钠离子电池, 电极独特的几何结构克服了传统钠离子电池电极体积易于膨胀和导电性差问题, 显著提升了电池倍率性能和循环稳定性。研究人员首先以表面活性剂辅助法合成钴基沸石咪唑骨架 (ZIF-67) 纳米立方体 (一种 MOF), 以此为模板通过种子外延生长方法在其表面沉积一层锌基沸石咪唑框架 (ZIF-8), 形成以 ZIF-67 为核、ZIF-8 为壳的核壳多面体 ZIF-67@ZIF-8。接着通过 ZIF-67@ZIF-8 前驱体与硫代乙酰胺溶液进行溶剂热反应实现阴离子交换作用获得新产物, 扫描透射电镜表征显示新产物呈现中空结构, 元素谱进一步分析显示中空结构由两种成分不同的壳层组成, 内壳层为硫化钴 (CoS_2), 外壳层为硫化锌 (ZnS), 即形成了中空的双壳纳米盒。随后通过与铜阳离子交换反应, 以实现 Cu 对 Zn 的取代。透射电镜表征显示产物仍然保持良好的中空双壳结构, 内壳依旧为 CoS_2 , 且通过元素谱分析进一步发现微量的 Cu 元素已经渗透到内壳层当中, 而外壳含有 S 和 Cu, 但由于微量 Cu 已经渗入内壳, 使得外壳的 Cu 元素量难以准确量化, 因此外壳命名为 Cu_xS , 即形成了 $\text{CoS}_2@\text{Cu}_x\text{S}$ 双壳纳米盒。接着将 $\text{CoS}_2@\text{Cu}_x\text{S}$ 作为钠离子电池电极进行电化学性能测试, 发现在 0.4-2.6 电压窗口、0.1 A/g 电流密度下进行充放电循环, 电池获得了 535 mAh/g 的稳定可逆放电比容量。随后进一步测试了在 0.2、0.3、0.5、1、2、3 A/g 不同电流密度下电池放电比容量, 分别获得了 446、411、390、368、349、342 mA h/g, 表现出了优异的倍率性能。而非 Cu 替代的 $\text{CoS}_2@\text{ZnS}$ 正极电池器件随着电流密度增加出现了放电比容量大幅衰减情况, 表明 Cu 取代改善了电化学可逆循环反应。最后在 0.3 A/g 电流密度下对 $\text{CoS}_2@\text{Cu}_x\text{S}$ 双壳纳米盒电极器件的长程稳定性进行研究, 发现经过 300 次循环后, 电池仍可保持 76% 的初始容量, 具备了优异的电化学稳定性。 $\text{CuS}@\text{CoS}_2$ 电极电池性能改善主要原因来自其独特的几何结构: 一方面中空的结构能够有效地缓解充放电循环过程中电极材料的应力, 避免电极发生脆裂; 其次二维表面结构有利于电子快速传输, 上述改善效应叠加提升了电池性能。该项研究利用金属有机框架模板作为模板通过阴阳离子多步交换反应方法, 设计制备了一种中空双壳纳米盒子复合电极, 其独特的几何结构增强了钠离子传输, 克服了电极充放电过程的体积膨胀问题, 显著增强了电池倍率性能和循环稳定性, 为设计开发高性能钠离子电池提供了新技术路径。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》⁹。

(程向阳 郭楷模)

⁹ Yongjin Fang, Bu Yuan Guan, Deyan Luan, et al. Synthesis of Cu-Substituted $\text{CoS}_2@\text{Cu}_x\text{S}$ Double-Shelled Nanoboxes via Sequential Ion Exchange for Efficient Sodium Storage. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, DOI: 10.1002/ange.201912924

网状纳米化合物 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 展现优异热电转换性能

基于热电材料的热电转换技术可通过收集废热并将其转化为电能来提高能源利用效率，在全球能源危机的大背景下越来越受到人们的重视。两维（2D）层状晶体结构的热电材料因其低的本征热导率和高热电性能成为目前研究热点。由新加坡南洋理工大学 Qingyu Yan 教授课题组牵头的国际联合研究团队将碲化硅（ Si_2Te_3 ）片状材料引入到 2D 层状单晶碲硅锑（ $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ ）中，得益于 Si_2Te_3 纳米片的电子“过滤”和质子散射特性，降低了晶格热导率，显著提升了热电转换优值系数 ZT（热电材料的热电转换效率主要取决于优值系数 ZT，ZT 越大热电转换性能越强）。研究人员首先利用化学气相沉积法合成了片状的 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ ，X 射线测试显示其为 2D 层状结构。其中 Sb 原子位于 Te 八面体（ SbTe_6 ）的中心， Si_2 哑铃位于类似的 Si_2Te_6 乙烷状基团的八面体中，形成 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 二维原子层。扫描和透射电镜表征显示， $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 二维原子层之间以范德华力键合堆叠成网络层状结构，即形成了由 2D 原子层单元 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 组成的层状网络结构。接着对材料进行球磨、放电等离子烧结处理转化成了多晶结构。通过电学性能测试显示，多晶 2D 层状 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 表现出了重掺杂 P 型半导体属性，室温下呈现出极高的塞贝克系数为 $120 \mu\text{VK}^{-1}$ ，室温载流子浓度约为 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。此外，其还表现出较低的晶格热导率（在 823K 时约为 $0.5 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ）和较高的无量纲优值 ZT（在 823K 时约为 1.1）。通过密度泛函理论研究发现 Sb 空位缺陷无论在富 Te 和富 Sb 环境中均具有较低的形成能，这是 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 材料高载流子浓度的主因；声子谱计算表明 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 中存在由 Sb 和 Te 原子低频振动引起的低频光学声子（ $\sim 35 \text{cm}^{-1}$ 处），而光学声子与声学声子之间的耦合将增强声子散射，减少声子弛豫时间并缩短声子平均自由程。进一步计算了晶格不同方向的格林森常数，显示每个方向的数值都比较大，意味着材料存在强的声子非谐性，从而抑制了热传播，即导致较低的热导率。随后研究人员改进制备方法，采用湿化学合成反应方法，成功在 2D 层状 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ 材料晶界之间引入了 Si_2Te_3 纳米薄层，形成了网络状 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6/\text{Si}_2\text{Te}_3$ 复合物，电学性能表征显示，材料热导率减少，从而增强了热电转换性能，在 823K 下无量纲优值 ZT 为 1.65。该项研究首先合成了高热电性能的两维（2D）层状晶体材料中 $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$ ，随后利用湿化学合成方法成功引入 Si_2Te_3 纳米薄层，显著增强了材料热电转换性能，为设计开发高性能的热电材料和器件提供了新思路。相关研究成果发表在《*Joule*》¹⁰。

（郭楷模）

¹⁰ Yubo Luo, Songting Cai, Shiqiang Hao, et al. High-Performance Thermoelectrics from Cellular Nanostructured $\text{Sb}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$. *Joule*, 2019, DOI:10.1016/j.joule.2019.10.010

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心是服务国家和中科院能源决策管理、科技创新、产业发展的专业情报研究机构，历年来承担和参与了多项国家级、中科院、省部级能源科技战略规划和重要科技计划研究。中心的主要产品包括《先进能源发展报告》、《先进能源动态监测快报》（半月刊）、《能源与科技参考》及各类深度能源情报研究分析报告，主要研究方向包括能源科技领域的国际科技战略与规划、科技计划与预算、科技进展与动态、科技前沿与热点、重大成果工程应用、重要科技政策与管理研究。

	研究内容	特色产品
战略规划研究	开展科技政策与科研管理、发展战略与规划研究等相关服务，为科技决策机构和管理部门提供信息支撑。	先进能源发展报告：科技引领能源 国际能源战略与新能源技术进展 金融危机背景下的能源战略 世界能源强国能源科技创新体系分析报告 美国能源科技计划管理机制及启示
领域态势分析	开展特定领域或专题的发展动态调研与跟踪、发展趋势研究与分析，为研究机构、企业的科研项目提供情报服务。	核电技术国际发展态势分析报告 太阳能热发电技术国际发展态势分析报告 智能电网国际发展态势分析报告 规模化电力储能技术国际发展态势分析报告 高端洁净煤发电技术国际发展态势分析报告
技术路线研究	开展产品、成果、专利或标准的情报研究，分析相关行业的现状及发展趋势，为企业发展与决策提供参考。	国际能源领域技术路线图解析 低阶煤热解/气化/循环流化床专利态势分析 新型煤气化技术发展报告 太阳能技术新突破：钙钛矿太阳电池 我国能源互联网发展重要战略问题研究

编辑出版：中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号（430071）

联系人：陈伟 郭楷模 岳芳

电话：（027）87199180

电子邮件：energy@whlib.ac.cn

微信公众号：CASEnergy

