

中国科学院A类战略性先导科技专项

变革性洁净能源关键技术与示范

Transformational Technologies
for Clean Energy and Demonstration

研究发展动态

2022年第4期（总第18期）

全球最大100MW级液流电池储能调峰电站正式并网发电



中国科学院大连化学物理研究所
中国科学院武汉文献情报中心

专项研发进展

介尺度方法在能源战略研究领域的应用进.....	1
万吨级mPAO基础油示范装置工艺设计包完成编制.....	1
异壬醇清洁氧化制异壬酸.....	2
煤化工废水处理及回用技术基础研究取得重大突破.....	3
“2000吨/年气化细灰流化-熔融燃烧技术”通过科技成果鉴定....	4
千吨级煤气化渣铝硅分质制备高模数水玻璃多联产技术通过科技 成果评价.....	5
复杂地形条件下大型风电叶片研究成果通过挂机测试.....	6
中深层地热资源基于超长重力热管的开发利用技术取得系列突破 进展.....	7
国内首套全国产化农业秸秆生物天然气示范工程实现高效稳定运 行.....	9
全球最大100MW级液流电池储能调峰电站正式并网发电.....	10
500kW/50kWh飞轮储能单机系统集成.....	11
液态太阳燃料技术入选“2022年度IUPAC化学领域十大新兴技术”	13

专项过程管理

9个项目组织完成2022年度总结交流汇报.....	15
洁净能源先导专项完成2022年年度工作交流暨总体组会议	15

国内视点

2023年全国能源工作会议部署能源重点工作任务.....	17
《关于进一步完善市场导向的绿色技术创新体系实施方案（2023—2025年）》解读.....	19
《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》要点.....	23
《扩大内需战略规划纲要（2022 - 2035年）》能源要点.....	25
工信部等五部门开展第三批智能光伏试点示范活动.....	28
海水原位直接电解制氢技术取得重大突破.....	29
协同调控反应微环境促进强酸环境CO ₂ 电还原制备多碳产物.....	31
热交联空穴导体实现23.9%效率的稳定反式钙钛矿电池.....	32
双功能预钠化实现超稳定钠离子电池硬碳材料制备.....	33

国际瞭望

国际能源署发布《世界能源展望2022》.....	35
美国能源部发布《工业脱碳路线图》.....	51
美国能源部发布国家清洁氢能战略和路线图草案.....	60
美国能源部投入4亿美元支持能源科学前沿基础研究.....	67
澳大利亚投入1.6亿澳元支持清洁能源及工业减排技术.....	71
调节表面电势实现全钙钛矿叠层电池创纪录2.19 V开路电压.....	73
CO ₂ 原位出溶流动电解池用于高效电催化CO ₂ 还原.....	75
新型非铈基催化剂实现电解制氢稳定运行超1000小时.....	77
双盐电解质体系与热调控协同策略实现锂离子电池稳定快充.....	80

专项研发进展

介尺度方法在能源战略研究领域的应用进展

中国科学院过程工程研究所完成了能源系统软件 CASE 1.1 版开发，其基本界面如下图所示。该版本是在 1.0 版本的基础上，补充、完善了能源加工转化部门和需求部门，构成了从供能到用能的完整能源系统。该软件带有自主开发的单纯形法求解器，求解精度高、速度快、稳定性好。利用该求解器，项目团队已完成了成本最低、碳排放量最小、能源消耗量最小等单目标求解。同时，基于自主提出的多目标转化为单目标方法，将上述三个目标联合组成的三目标优化问题转化成了单目标优化问题，并完成了求解。此外，基于多目标优化结果，对能源系统网络进行了有效的简化，在保持技术模型准确性的同时，降低了技术模型的复杂度。



能源系统软件 CASE 1.1 版输入与输出界面

[中国科学院过程工程研究所 黄文来]

万吨级 mPAO 基础油示范装置工艺设计包完成编制

2022 年 11 月，上海高研院李久盛团队完成万吨级“煤基 α -烯烃制

备 mPAO 基础油”示范装置工艺包设计编制工作。

此次工艺包设计合作方为具备甲级工程设计资质的惠生工程（中国）有限公司，同时也是千吨级中试装置的设计承担单位。课题组与惠生公司团队首先对技术中试验证结果进行了总结，分析了中试过程中存在的问题，重点对原料预处理单元的过滤装置、催化剂配置单元的加料部件、聚合单元的温控系统、真空系统的回流线等、关键采样点设置等技术环节进行了优化和改进。

在此基础上，双方历时 3 个月完成了工艺包的整体设计。所设计装置的粗原料处理能力为 10758 吨/年；基础油生产能力 6570 吨/年，其中：三聚体 2950 吨/年、重组分 2500 吨/年、mPAO10 1121 吨/年；工艺副产品为单体烷烃和再聚合二聚体，产能 4257 吨/年。此外，基于工艺装置设计和原材料价格，双方还对万吨级装置建设进行了投资估算和经济性分析，导出了建设投资额、投资回收期和项目内部收益率等经济数据，可为后续的产业化推广提供基础性经济数据。

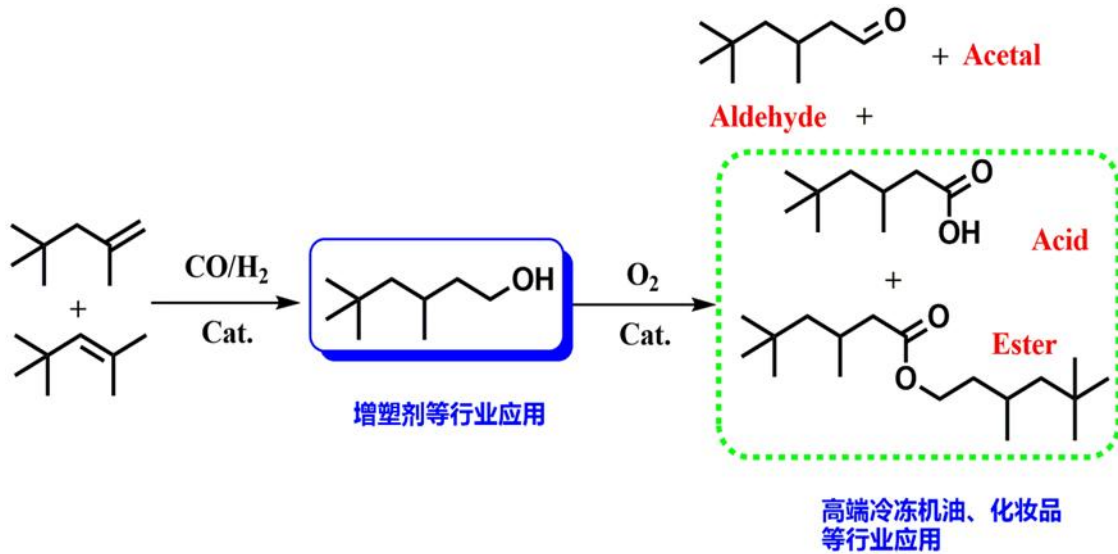


[中国科学院上海高等研究院 李丹丹]

异壬醇清洁氧化制异壬酸

异壬酸作为有机合成基础原料，广泛应用于涂料、香料、润滑剂、增塑剂、金属加工液、高端的冷冻机油、化妆品等领域。目前异壬酸生产工艺被阿曼石油 OQ Chemicals、德国 BASF 公司、德国 Evonik

和日本协和等国外公司垄断，国内缺乏具有自主知识产权的异壬酸合成技术。



碳八烯烃羰基化--清洁氧化合成异壬酸

由兰州化物所夏春谷团队牵头的“异壬醇羰基化合成关键技术”项目发展了多相化的金属氧化物负载金属催化剂，无溶剂和碱助剂下实现异壬醇氧化生成异壬酸，在打通了从碳八烯烃一步羰基化合成异壬醇、异壬醇清洁氧化制备异壬酸的整个流程，形成了羰基合成+选择氧化的研究特色。克服了传统异壬醛氧化制异壬酸强放热，易脱羧，产品选择性低，存在过氧酸等过氧化物，以及催化剂分离难等科学和技术难题。优化的反应条件下，目标产物异壬酸+异壬酸异壬酯选择性大于 99%。

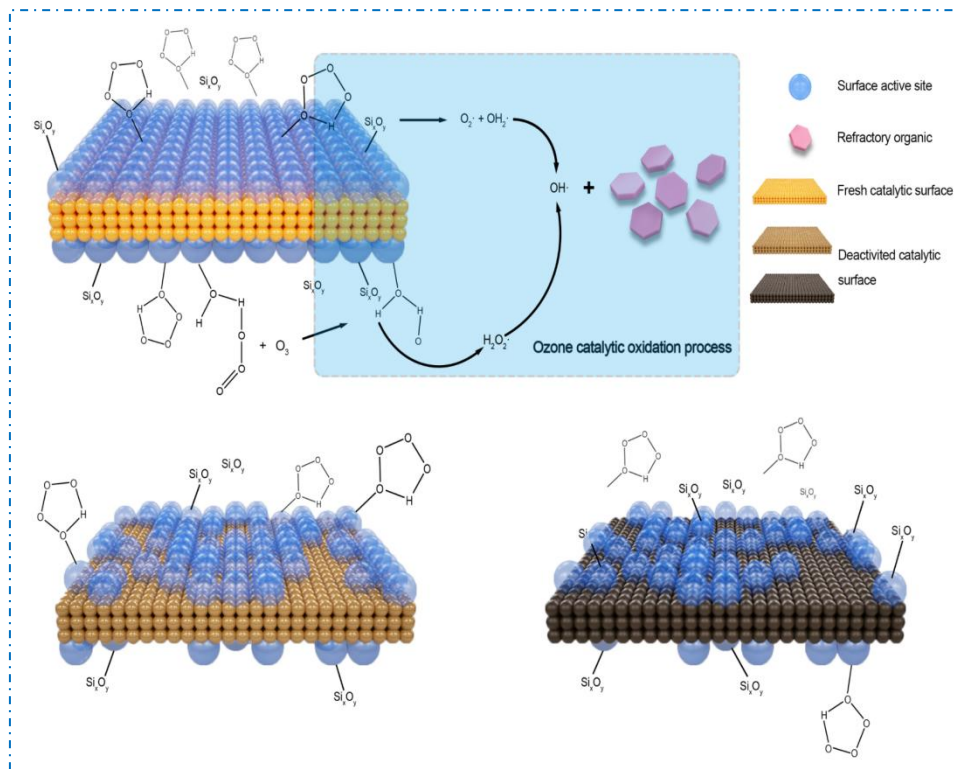
[中国科学院兰州化学物理研究所 刘建华]

煤化工废水处理及回用技术基础研究取得重大突破

煤化工废水处理及回用对我国煤化工的清洁绿色发展有着非常重要的意义。中科院大连化物所孙承林团队长期致力于煤化工废水处理技术的工业放大和工程研究，相关技术是“合成气下游及耦合转化利用”项目的重要研究内容之一。

在煤化工废水的处理和回用的关键技术的放大过程中，催化剂表

面硅沉积和高盐介质中自由基半衰期短一直是困扰催化剂使用效率和寿命的科学难题。2022 年底，该团队创新性制备了碳包裹的 $\text{Fe}_3\text{C}@C$ 结构催化剂，成功解决了高硅介质下催化剂表面硅沉积科学难题（AOPs 国际首例）。此外，通过在催化剂表面构建纳米空间限域层的策略成功解决活性氧物种在高盐介质中半衰期短科学难题（TOC 催化效率，从 4% 提高至 100%）。相关研究成果发表在 *J. Mater. Sci. Technol.* 2022 和 *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022。



传统 $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂在高硅废水中失活机理图

[中国科学院大连化学物理研究所 卫皇罍]

“2000 吨/年气化细灰流化-熔融燃烧技术”通过科技成果鉴定

2022 年 12 月 11 日，中科院工程热物理研究所完成的“2000 吨/年气化细灰流化-熔融燃烧技术”通过了由中国环境科学学会组织的科技成果鉴定，鉴定委员会认为，该“研究成果具有较好的环境与经济效益，达到国际领先水平”。该技术有望解决气化细灰资源化利用

难题。

煤气化细灰是气流床气化炉运行过程中产生的固体废弃物，存在部分碳被熔渣所包裹、无机组分反应活性差的问题，目前主要以填埋处置为主，我国累计堆存已达数亿吨，造成了严重的大气污染和土壤污染，严重制约了煤化工固废循环资源化利用。

针对这一技术难题，中国科学院工程热物理研究所循环流化床实验室项目团队通过原理探索、小试试验、中试验证的系统研究，研发了气化细灰流化-熔融燃烧技术，在 2000 吨/年中试研究中，实现了无需辅助燃料的低热值气化细灰高效燃烧。第三方测试结果表明，中试装置处理能力达到 2120 吨/年，处置后的飞灰和熔渣综合含碳量 $< 0.5\%$ ，渣/灰比 $> 9.5/0.5$ ，可实现资源化利用。在中试研究的基础上，研发团队完成了 10 万吨/年气化细灰流化熔融燃烧工程技术方案，现已通过专家评审，正在积极推动技术示范，为突破解决气化细灰资源化利用难题、弥补煤化工行业的短板贡献科技力量。

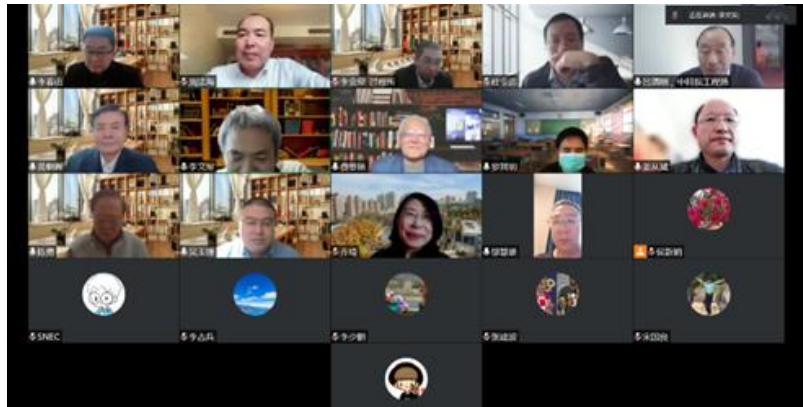


[中国科学院工程热物理研究所 李伟]

千吨级煤气化渣铝硅分质制备高模数水玻璃多联产技术通过科技成果评价

2022年12月15日，中科院过程工程所李会泉团队与中石化宁波技术研究院有限公司合作完成的“千吨级煤气化渣铝硅分质制备高模数水玻璃多联产技术”项目，顺利通过由中国石油和化学工业联合会组织的科技成果评价。评价委员会一致认为：项目总体技术达到了国际先进水平，其中上述创新技术达到国际领先水平，建议加快该技术的产业化。

煤气化渣是煤炭气化过程产生的主要固体废物，其大规模高效利用是行业亟待解决的“卡脖子难题”。该项技术突破了气化渣机械化学协同活化耦合除杂、活化液脱铁解毒制备聚合氯化铝（PAC）、稀碱体系寡聚体结构调控制备高模数水玻璃等关键技术，实现了气化渣铝硅分质高值利用与高模数水玻璃全湿法绿色低碳制备，完成了千吨级中试验证，经第三方检测，水玻璃模数达到3.53，为煤气化渣大规模化增值利用提供了循环经济产业链新途径。



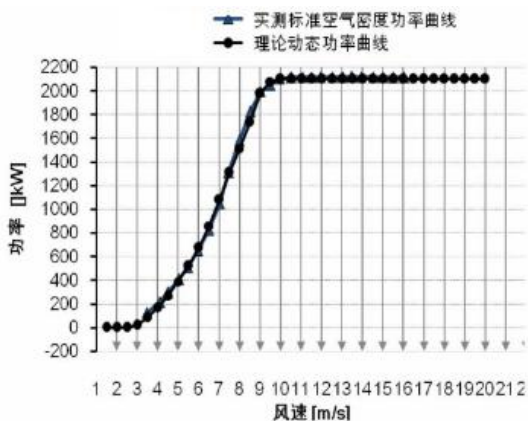
[中国科学院过程工程研究所 张建波]

复杂地形条件下大型风电叶片研究成果通过挂机测试

2022年10月，由中科院工程热物理所牵头的“复杂地形条件下大型风电叶片研究”任务在河北省康保县龙源一期风电场挂机测试，

并通过第三方机构运行性能测试，整机运行良好，样片设计气动效率系数 C_p 为 0.492，与行业同功率同长度叶片相比，年均风速标准威布尔分布下设计年发电量提高 3.0%，叶片重量为 13.7 吨，相比同类叶片轻 9.0%，根部设计极限载荷对标叶片小 10%，整体性能达到了预期的指标要求。

中国科学院工程热物理研究所开发研制的适应复杂地形条件下 2MW 级风电叶片样片针对我国内陆复杂地形情况，开展了叶片低载、高效、变工况气动设计技术、叶片结构布局与优化设计技术、叶片自适应耦合降载优化设计技术、柔性大变形叶片气弹稳定性分析技术等关键问题研究，对提升我国大型风电叶片的设计水平,进一步提高相应效率、可靠性,降低成本具有重要意义。



叶片挂机图



叶片功率曲线

[中国科学院工程热物理研究所 石可重]

中深层地热资源基于超长重力热管的开发利用技术取得系列突破进展

以干热岩为主体的深部地热资源具有资源量大、分布广等特点，是未来地热能的重要发展方向。目前主流的增强型地热系统（EGS）技术存在热储工程难度大、管道/设备腐蚀结垢、运维成本高等技术难题。广州能源所先进能源系统研究室创新性提出了完全不同于 EGS 的单井超长重力热管地热开采技术。超长重力热管技术相对于 EGS

的优势在于不需要或者较少需要人工造储，热储工程难度低、技术（及投资）风险小；工质仅在封闭腔体内流动，不与地下岩体直接接触，没有工质流体漏失及管道或设备腐蚀结垢等问题；热管工质流体自驱动，没有额外的泵功消耗。

项目团队在雄安新区、山西综改示范区等开展了多处示范工程建设。雄安示范工程用热管经进一步研发升级，热管长度大于 4000 m，工质选用较水更适宜的氨工质。目前已经初步完成示范工程建设，采热结果显示：在地层平均温度约为 83°C 的条件下，地面可获得温度接近 80°C 的饱和氨蒸汽，瞬时最高采热功率可达 1.5 MW，预计长期采热功率可超过 800 kW，地热能采热量大幅提升，达到河北唐山首次场地试验的 4 倍，是目前采热量最高的单井取热不取水工程实施案例，系统性能接近商业应用要求。目前，该示范工程正在开展地热发电工程示范，与热管取热系统适配的透平发电系统已研制完成并在现场进行安装调试，预计 2023 年 1 月可获得初步发电数据。



雄安示范工程现场照片（2022.12）

山西综改示范区科创城一号能源岛中深层地热能无动力取热系统，由项目团队设计并参与建设，已于 2022 年 7 月中下旬采用空气源热泵制冷运行完成了第三方测试。两口深度 2000-2200 m 井（井底温度约 65°C），合计采热量约 1 MW，可为 2.5 万平米的能源岛建筑供暖，已在 2022-2023 采暖季投运，是世界首个超长重力热管取热的地热供暖示范工程，项目将争取为我国实现双碳目标提供可复制的清洁供暖新策略。



太原超长重力热管供暖系统现场照片（2022.07）



清洁供暖数字云平台

[中国科学院广州能源研究所 蒋方明]

国内首套全国产化农业秸秆生物天然气示范工程实现高效 稳定运行

由青岛生物能源与过程研究所自主开发的干黄秸秆高浓度厌氧发酵技术和工业化核心装备与整体反应器，在黑龙江克东县建设了我国寒冷地区规模最大的“生物天然气与有机肥循环综合利用工业示范”。项目以东北干秸秆为主要发酵原料，目前实现高效稳定运行，秸秆产气率达 $423\text{m}^3/\text{tTS}$ 、容积产气率约 $1.6\text{v}/\text{v}\cdot\text{d}$ ，提纯后的生物天然气各项指标优于国家标准，生物天然气产品和有机肥产品均实现了商品化销售。

项目在秸秆高效产气的同时大幅降低了工程能耗，突破了高寒条件下沼气工程运行效益差的难题。项目作为《中国沼气行业双碳发展报告》的封面工程被广大同行获知，用户企业也对该项目高度认可，并增加投资在黑龙江克山县和甘南县复制推广了另两处规模相同的产业化工程，基于其大型牧场布局形成了产业集群。这三处项目每个项目每年不仅能解决 10 万亩农田秸秆回收和万头奶牛场粪污的无害化处理，还年产 700 万方生物天然气、5 万吨有机肥，让 1.4 万亩黑土地的有机质含量增加 1%。用户企业对循环产业集群项目在腾讯、新浪、搜狐、南方周末等大型新闻网站进行了广泛宣传，并计划进一步扩大产业集群的规模。



克东示范工程实现高效稳定运行并得到大力宣传推广

项目为农业秸秆生物天然气产业在全国的推广提供了高效益的解决方案，对国家实现“双碳”目标和美丽乡村建设具有重要的的科技支撑与引领作用。

[青岛生物能源与过程研究所 郭荣波]

全球最大 100MW 级液流电池储能调峰电站正式并网发电

10 月 30 日，由中国科学院大连化学物理研究所（以下简称“大连化物所”）李先锋研究员团队提供技术支撑的全球功率最大、容量最大的百兆瓦级液流电池储能调峰电站正式并网发电。该电站由大连恒流储能电站有限公司建设和运营，电池系统由大连融科储能技术发展有限公司设计制造。该项目是国家能源局批准建设的首个国家级大

型化学储能示范项目，总建设规模为 200 兆瓦（MW）/800 兆瓦时（MWh）。本次并网的是该电站的一期工程，规模为 100 兆瓦（MW）/400 兆瓦时（MWh）。



本次并网的大连液流电池储能调峰电站使用大连化物所自主开发的全钒液流电池储能技术，相当于大连市的“电力银行”，实现电网系统的削峰填谷。主要功能为电网提供调峰、调频等辅助服务。在一定程度上缓解大规模可再生能源并网带来的稳定性问题，并促进电力系统针对可再生能源发电的消纳，改善电力系统运行经济性。大连液流电池储能调峰电站将提升可再生能源并网率、平衡电网稳定性并提高电网可靠性，对加快推进我国大规模储能在电力调峰及可再生能源并网中的应用具有重要意义。

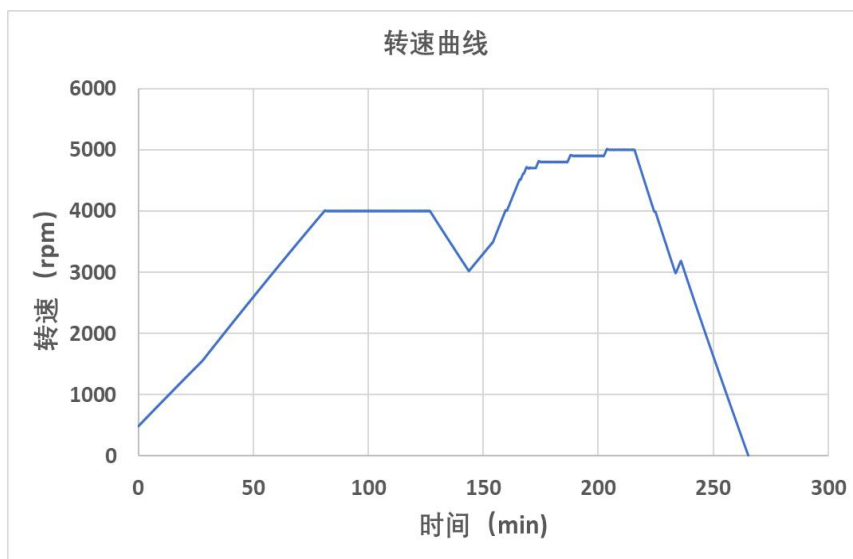
[中国科学院大连化学物理研究所 刘慧颖]

500kW/50kWh 飞轮储能单机系统集成

中科院工程热物理所完成了 500kW/50kWh 飞轮储能单机系统集成，调试转速达到了 5000rpm，调试功率实现 300kW，储能达到 35kWh。



500kW/50kWh 飞轮储能单机装置



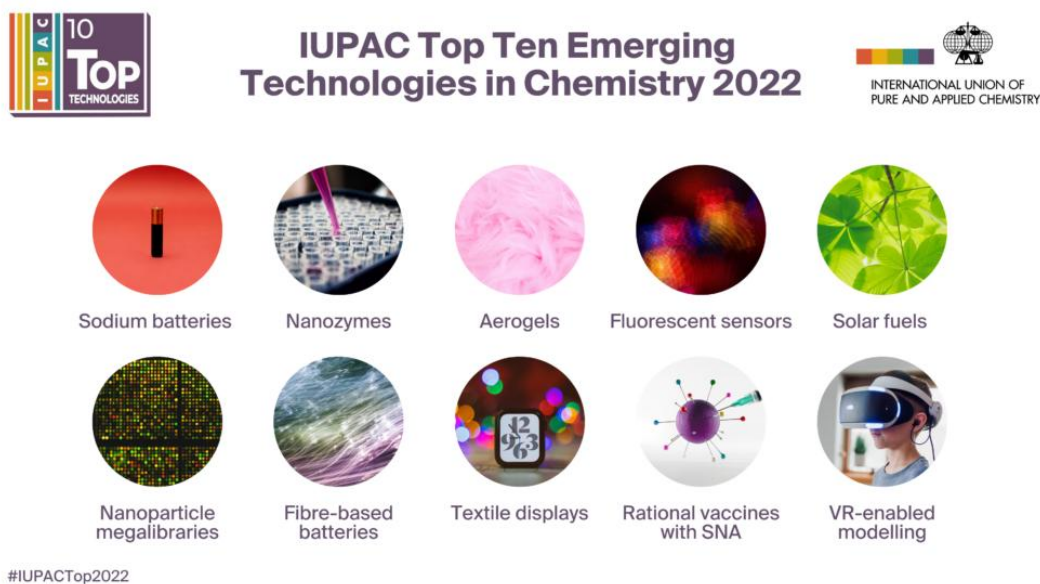
机组调试中的功率和转速时间历程

[中国科学院工程热物理研究所 赵钢炜]

液态太阳燃料技术入选“2022 年度 IUPAC 化学领域十大新兴技术”

11 月 28 日，在第四届世界科技与发展论坛闭幕式上，国际纯粹与应用化学联合会（International Union of Pure and Applied Chemistry，以下简称“IUPAC”）公布了最新评出的“2022 年度 IUPAC 化学领域十大新兴技术”，项目 9 课题 2 子课题 2-固溶体催化二氧化碳加氢制甲醇申报的“液态太阳燃料”（Liquid solar fuels）技术名列其中。

IUPAC 执委会委员帅志刚教授表示，“化学领域十大新兴技术”每年全球性提名、评选一次，展示了化学及交叉领域中从新兴的科学发现到已经被充满冒险精神的初创企业和大胆的工业所采用的可行技术。很高兴能看到不断有中国化学家领衔的研究选入其中。



2022 年度 IUPAC 化学领域十大新兴技术

IUPAC 主席 Javier García-Martínez 教授指出，化学领域十大新兴技术的发布，可展示不同的化学技术对于改善人类福祉、促进工业发展、应对气候变化、保障人民健康的重要意义，以及通过化学科学与技术应对的重要性。

2019 年，IUPAC 以成立 100 周年为契机，联合了包括中国化学

会在内的来自世界各个国家和地区的化学学术组织，共同发起了“年度化学领域十大新兴技术”这一全球性活动，希望能在全世界范围内遴选出具有巨大潜力的创新技术，以此来改变当前的全球化学与工业界格局，推动实现联合国可持续发展目标。

液态太阳燃料技术是模拟自然光合作用的“人工光合成”过程，利用太阳能、水和二氧化碳生产甲醇等富含能量物质，从而有望替代当下的化石衍生燃料。另一方面，液态太阳燃料同电池一样，可提供间歇性可再生能源储存的新机会。IUPAC 认为液态太阳燃料技术是“瓶装可再生能源”和生产绿色化学品的战略。

[中国科学院大连化学物理研究所 王集杰]

专项过程管理

9个项目组织完成2022年度总结交流汇报

根据专项总体工作安排，洁净能源先导专项总体组办公室于2022年12月组织各项目陆续完成了2022年度总结交流汇报。

各任务分别从年度目标完成情况、重要工作进展、存在问题与举措以及下阶段工作计划进行了汇报。会议组织情况如下：

项目号	项目名称	时间	形式及地点
项目1	战略研究与专项总体	12月26日（上午）	视频
项目2	合成气下游及耦合转化利用	12月20日（上午）	视频
项目3	甲醇下游及耦合转化利用	12月26日（下午）	视频
项目4	高效清洁燃烧关键技术与示范	12月22日（下午）	视频
项目5	张家口黄帝城小镇100%可再生能源示范	12月23日（上午）	视频
项目6	可再生能源关键技术与示范	12月17日（上午）	视频
项目7	大规模储能关键技术与应用示范	12月10日（下午）	视频
项目8	核能非电综合利用	12月18日（上午）	视频
项目9	可再生能源制氢/液体燃料关键技术与应用	12月17日（下午）	视频

院重大任务局、专项监理部及监理组专家、责任专家、各项目负责人、专项办及各项目承担单位科研管理骨干等参加了相关会议。

[中国科学院大连化学物理研究所 卫小芳]

洁净能源先导专项完成2022年年度工作交流暨总体组会议

洁净能源先导专项2022年年度工作交流会议暨总体组会议于2022年12月30日通过视频形式召开。

一、2022年项目交流与讨论

会议听取了 9 个项目总体目标完成情况、重要工作进展及亮点成果等方面的工作报告，与会人员就项目推进过程重大产出及存在问题进行了深入交流。专项办对 2022 年专项主要管理工作及下年度工作计划做了汇报，根据专项办的汇报总体组对绩效评价工作安排及成果宣传工作做了部署。

二、2023 年绩效评价工作计划：

1) 1-3 月份：对照绩效评价工作重点，梳理总结亮点成果，解决存在问题

2) 4-5 月份：各项目完成课题/子课题层绩效实施报告

3) 6 月份：各项目联合专项办组织完成课题/子课题绩效评价

4) 7 月份：各项目完成项目层绩效实施报告，并向院规划局提交绩效评价工作申请

5) 8-10 月份：根据院规划局的安排，完成项目和专项层绩效评价工作

三、加强亮点梳理与成果宣传

各项目应进一步加强梳理满足国家重大需求且具有重要国内国际影响的亮点成果，商专项办于 2023 年组织策划碳中和系列丛书及专项重大成果发布会等宣传活动，加强对专项成果的第三方评估评价，体现“用得上，有影响”。

[中国科学院大连化学物理研究所 卫小芳]

国内视点

2023 年全国能源工作会议部署能源重点工作任务

2022 年 12 月 30 日，2023 年全国能源工作会议在北京召开¹。会议以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的二十大精神，认真落实中央经济工作会议部署和全国发展改革工作会议要求，总结 2022 年重点工作和新时代十年发展成就，谋划当前和今后一段时期能源发展思路，部署了 2023 年重点任务，包括：

1、全力提升能源生产供应保障能力

(1) 发挥煤炭兜底保障作用：加快实施“十四五”煤炭规划，积极推进智能化煤矿核准建设，推动在建煤矿尽快投产达产，全面增强煤炭安全增产保供的能力和韧性。

(2) 夯实电力供应保障基础：进一步提升跨省跨区电网错峰支援和余缺互济能力。

(3) 推进跨省区输电通道规划建设：推动驻马店—武汉、武汉—南昌、张北—胜利、川渝特高压、陇东—山东、宁夏—湖南等工程建设。

(4) 推动油气增产增供：保持“五油三气”重点盆地及海域稳产上产，加快非常规油气快速上产，推进西气东输三线中段等重大管道工程和油气储备能力建设，预计 2023 年原油产量达到 2.05 亿吨、天然气增产 60 亿立方米以上。

(5) 加强电网运行安全风险管控。

2、着力调整优化能源结构

(1) 加强风电、太阳能发电建设：2023 年风电装机规模达到 4.3 亿千瓦左右、太阳能发电装机规模达到 4.9 亿千瓦左右；

(2) 统筹水电开发和生态保护：推动主要流域水风光一体化开发建设，2023 年水电装机规模达到 4.23 亿千瓦；

¹ 深入学习贯彻党的二十大精神 为全面建设社会主义现代化国家提供坚强能源保障 2023 年全国能源工作会议在京召开. http://www.nea.gov.cn/2022-12/30/c_1310687421.htm

(3) 积极安全有序发展核电：2023 年新增核电装机 289 万千瓦，在运规模达到 5846 万千瓦；

(4) 加强民生用能工程建设：开展农村能源革命试点，抓好北方地区冬季清洁取暖。

3、着力加快科技自立自强

(1) 加强补短板锻长板：重点推进燃气轮机、绿色低碳转型等领域关键核心技术攻关，加快能源领域 5G 推广应用，促进能源产业数字化智能化转型。

(2) 加强试点示范应用：推进能源领域首台（套）重大技术装备评价推广，适时发布第三批清单。

(3) 推进重大创新平台建设。

(4) 加强标准体系建设。

4、着力深化重点领域改革

(1) 加快全国统一电力市场体系建设：研究制订全国统一电力市场发展规划，明确各类市场功能定位，确保市场基础制度规则统一。

(2) 加强能源法治建设：加快《能源法》立法进程，推动《核电管理条例》立法，做好《可再生能源法》《煤炭法》《电力法》《石油储备条例》制修订工作。

5、着力加强能源监管

(1) 加强电力市场监管：规范电力市场建设和市场规则制修订程序，加强电网垄断环节监管，巩固提升“获得电力”成效。

(2) 加强能源行业监管：抓好煤电上网价格上浮政策落实情况监管，完成可再生能源补贴核查，加强油气管网设施公平开放监管。

(3) 加强电力安全监管：实施水电站大坝、海上风电、电力二次系统等专项监管。

(4) 加强行政执法：发挥 12398 能源监管热线作用，严肃查处违法违规行为。

6、着力加强能源国际合作

(1) 积极推进能源安全国际合作：推动构建全球大宗能源商品合作伙伴关系。

(2) 深入推进清洁能源国际合作：推动建立中国-东盟清洁能源合作中心，共建中阿清洁能源合作中心，纵深推进氢能、储能、风电、智慧能源等重点领域对欧合作。

(3) 构建更高质量的能源国际合作体系：统筹做好大国能源合作，建设运营好“一带一路”能源合作伙伴关系，积极参与能源领域重要多边机制合作。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据国家能源局新闻 编辑]

《关于进一步完善市场导向的绿色技术创新体系实施方案 (2023—2025年)》解读

12月13日，国家发展改革委 科技部印发《关于进一步完善市场导向的绿色技术创新体系实施方案（2023—2025年）》（以下简称《实施方案》）²，提出到2025年，市场导向的绿色技术创新体系进一步完善，绿色技术创新对绿色低碳发展的支撑能力持续强化。企业绿色技术创新主体进一步壮大，培育一批绿色技术领军企业、绿色低碳科技企业、绿色技术创新领域国家级专精特新“小巨人”企业。绿色技术供给能力显著提升，形成一批基础性、原创性、颠覆性绿色技术创新成果。要点解读如下：

一、《实施方案》出台的背景

构建市场导向的绿色技术创新体系是党的十九大报告明确提出的任务要求。2019年4月，经中央深改委审议通过，国家发展改革委、科技部联合印发了《关于构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》（发改环资〔2019〕689号），明确了到2022年构建市场导向的绿色技术创新体系的主要目标和重点任务，文件出台后对推动

² 国家发展改革委 科技部印发《关于进一步完善市场导向的绿色技术创新体系实施方案（2023—2025年）》的通知. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-12/28/content_5733971.htm

绿色技术创新与产业发展、生态文明建设现实需求相结合发挥了重要作用。

随着“双碳”目标的提出，我国生态文明建设进入以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型的关键时期，绿色技术创新对绿色低碳发展的关键支撑作用愈加凸显。党的二十大报告明确提出，要完善科技创新体系，加快实施创新驱动发展战略，加快节能降碳先进技术研发和推广应用。中央经济工作会议强调，要加快绿色低碳前沿技术研发和推广应用。为进一步完善市场导向的绿色技术创新体系，持续强化绿色技术对绿色低碳发展的支撑作用，国家发展改革委、科技部在充分总结绿色技术创新工作进展基础上，对绿色技术发展面临的新形势新问题进行了深入调研，研究发布了《实施方案》，对未来3年完善市场导向的绿色技术创新体系工作进行了系统部署。

二、完善市场导向的绿色技术创新体系的主要目标

《实施方案》锚定2025年提出了主要目标：企业绿色技术创新主体进一步壮大，培育一批绿色技术领军企业、绿色低碳科技企业、绿色技术创新领域国家级专精特新“小巨人”企业。各类绿色技术创新主体创新活力不断释放，协同创新更加高效。绿色技术供给能力显著提升，形成一批基础性、原创性、颠覆性绿色技术创新成果。绿色技术交易市场更加规范有序，先进适用的绿色技术创新成果得以充分转化应用。绿色技术评价、金融支持、人才培养、产权保护等服务保障全面优化。绿色技术领域国际交流和对外开放持续深化。

三、完善市场导向的绿色技术创新体系的工作原则

完善市场导向的绿色技术创新体系，既要充分考虑绿色低碳发展的现实要求，又要突出市场导向、强化体制机制建设，推动绿色技术创新和成果转化应用。《实施方案》提出了4项工作原则：一是**目标引领，创新驱动**。聚焦实现发展方式绿色转型目标，着力解决绿色低

碳发展科技支撑不足的问题，把体制机制创新作为重要驱动力。二是**市场主导，政府引导**。充分发挥市场在绿色技术创新中的主导作用，增强市场在配置资源和连接创新各环节中的功能，吸引创新要素向绿色领域集聚，加大政策支持力度，强化绿色技术创新保障。三是**研用并举，突出应用**。组织开展绿色技术攻关，增加绿色技术供给，加大绿色技术成果转化综合服务平台建设，加快推进创新成果转移转化和产业化发展。四是**压实责任，系统推进**。加强部门间配合，推动形成工作合力，协调解决重大问题，加大对地方推进绿色技术创新工作的评估指导力度。

四、完善市场导向的绿色技术创新体系的重点任务

《实施方案》从9个方面提出了进一步完善市场导向的绿色技术创新体系的重点任务：

一是强化绿色技术创新引领。明确绿色技术创新方向，引导各类主体参与绿色技术创新。组织实施重点专项技术攻关，研发一批具有自主知识产权、达到国际先进水平的关键核心绿色技术。

二是壮大绿色技术创新主体。在培育绿色技术创新企业方面，主要是培育绿色技术创新领军企业、遴选发布绿色低碳科技企业、培育专精特新中小企业和“小巨人”企业。在加强创新平台基地建设方面，主要是优化创新平台基地布局，持续整合优化国家科技资源共享服务平台，进一步完善绿色技术资源共享服务体系。在激发科研单位创新活力方面，主要是加大绿色技术创新成效在事业单位工作人员考核评优中的比重，继续实施相关激励政策，提高科研人员绿色技术创新积极性。

三是促进绿色技术创新协同。引导绿色技术创新企业、高校、职业院校、科研院所等主体与中介机构、金融资本等联合，促进共性技术研发和成果转化应用。发挥好绿色技术融资合作中心（原绿色技术银行）在推进金融资源与绿色技术创新融合方面的协同作用，以及绿

色技术创新联盟对绿色技术推广应用中的作用。

四是加快绿色技术转化应用。根据区域绿色技术发展优势和应用需求，布局建设若干国家绿色技术交易平台，健全绿色技术交易平台管理制度，提升绿色技术交易服务水平。适时遴选先进适用绿色技术，发布绿色技术推广目录，加强目录内绿色技术跟踪管理，建立动态调整机制，加快绿色技术推广应用。推动绿色技术首台（套）装备应用和产业化，加大政府绿色产品采购力度，完善绿色产品认证与标识体系。

五是完善绿色技术评价体系。加强绿色技术创新与标准化工作联动，强化重点领域共性绿色技术标准制修订。推动加快制定发布各领域绿色技术评价方法，建立绿色技术验证服务平台，为绿色技术创新和转化应用提供定制试制、检验检测、认证评价等服务。

六是加大绿色技术财税金融支持。在加大金融支持力度方面，主要是引导各类股权投资支持绿色技术创新和成果转化，进一步扩大绿色技术领域创业投资子基金托管银行范围，综合应用绿色信贷、绿色债券、绿色基金、绿色保险等方式支持绿色技术创新。在强化财税政策保障方面，主要是鼓励有条件的地区对绿色技术创新成果推广应用予以财政支持，落实有关税收优惠政策。

七是加强绿色技术人才队伍建设。持续加大对对高校、职业院校、科研院所设置绿色技术相关专业的指导支持力度，鼓励地方政府联合高校、职业院校、科研院所、骨干企业共同实施绿色技术领域产学研合作协同育人项目。培养专业、高效的绿色技术经纪人队伍。

八是强化绿色技术产权服务保护。提高绿色技术创新领域专利、商标审查业务精细化管理水平，加强知识产权保护中心建设，建设绿色低碳发展重点领域知识产权专题数据库。加强绿色技术知识产权保护，严厉打击不以保护创新为目的的非正常专利代理行为，组织开展打击侵犯知识产权专项行动。

九是深化绿色技术国际交流合作。推动绿色技术“引进来”，积极引进境外先进技术、管理理念和商业模式，鼓励外资投向绿色技术高端装备制造。鼓励绿色技术“走出去”，积极开拓先进绿色技术和装备的国际市场，延伸绿色技术创新成果的领域和应用场景。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据发改委答记者问新闻编辑]

《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》要点

9月20日，国家能源局印发《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》（以下简称《行动计划》）³，提出到2025年，初步建立起较为完善、可有力支撑和引领能源绿色低碳转型的能源标准体系，能源标准从数量规模型向质量效益型转变，标准组织体系进一步完善，能源标准与技术创新和产业发展良好互动，有效推动能源绿色低碳转型、节能降碳、技术创新、产业链碳减排。《行动计划》要点解读如下：

一、《行动计划》出台背景

为深入贯彻党中央、国务院关于碳达峰碳中和的重大战略决策和标准化发展重要部署，充分发挥标准推动能源绿色低碳转型的技术支撑和引领性作用，国家能源局制定了《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》。《行动计划》紧密结合能源领域推动碳达峰碳中和工作主要任务，针对能源绿色低碳转型领域标准供给不足、标准体系不完善、标准化与技术创新和产业发展协同不够等问题，坚持需求导向、系统布局，强化示范引领、协同联动，重点推进能源绿色低碳转型、技术创新、能效提升和产业链碳减排等相关领域标准化。

二、《行动计划》工作目标

到2025年，初步建立起较为完善、可有力支撑和引领能源绿色低碳转型的能源标准体系，能源标准从数量规模型向质量效益型转变，标准组织体系进一步完善，能源标准与技术创新和产业发展良好互动，

³ 国家能源局关于印发《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》的通知。
http://www.nea.gov.cn/2022-10/09/c_1310668927.htm

有效推动能源绿色低碳转型、节能降碳、技术创新、产业链碳减排。

——建立完善以光伏、风电为主的可再生能源标准体系，研究建立支撑新型电力系统建设的标准体系，加快完善新型储能标准体系，有力支撑大型风电光伏基地、分布式能源等开发建设、并网运行和消纳利用。

——制定一批新兴技术和产业链碳减排相关技术标准，健全相关标准组织体系，实现能源领域碳达峰产业链相关环节标准全覆盖。

——修订一批常规能源生产转化和输送利用能效相关标准，提升标准要求水平，助推和规范资源综合利用、能效提升。

到 2030 年，建立起结构优化、先进合理的能源标准体系，能源标准与技术创新和产业转型紧密协同发展，能源标准化有力支撑和保障能源领域碳达峰、碳中和。

三、《行动计划》重点任务

《行动计划》主要包括六方面重点任务：

一是大力推进非化石能源标准化。加快完善风电、光伏、水电、各类可再生能源综合利用以及核电标准，组织开展风电光伏标准体系完善行动、水风光综合能源开发利用标准示范行动、抽水蓄能专项标准完善和示范行动、先进三代压水堆核电标准应用实施行动。

二是加强新型电力系统标准体系建设。完善新型电力系统安全稳定运行相关标准，进一步优化完善输变配电领域相关标准，加快电源结构转型升级相关配套标准研制，推动电力需求侧和电能替代领域标准研究制定，推进电力市场标准体系建设。组织开展新型电力系统标准体系专项研究和示范行动。

三是加快完善新型储能技术标准。根据新能源发电并网配置和源网荷储一体化发展需要，完善新型储能标准管理体系和技术标准体系，推动各类储能技术研发、示范和标准制定协同发展。组织开展新型储能标准体系建设行动。

四是加快完善氢能技术标准。完善氢能标准顶层设计和标准体系建设，围绕可再生能源制氢、电氢耦合、燃料电池及系统等领域，增加标准有效供给。组织开展全产业链绿氢标准完善行动。

五是进一步提升能源领域能效相关标准。组织推动煤炭、石油和天然气绿色高效生产、转化利用相关标准制修订，进一步提升煤炭和油气相关资源综合利用标准水平，完善和提升电力输送能效标准，加快推动综合能源服务标准体系建设及基础性标准研制。组织开展煤电、煤炭深加工、石油炼化能效标准提升专项行动。

六是健全完善能源产业链碳减排标准。加快构建能源领域碳减排、二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）、能源产业链数字化、能源装备碳足迹等领域标准体系，组织开展相关领域标准体系完善和试点示范行动。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

《扩大内需战略规划纲要（2022—2035年）》能源要点

近日，中共中央、国务院印发《扩大内需战略规划纲要（2022—2035年）》（以下简称《纲要》）⁴，提出到2035年的远景目标：消费和投资规模再上新台阶，完整内需体系全面建立；新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化基本实现，强大国内市场建设取得更大成就，关键核心技术实现重大突破，以创新驱动、内需拉动的国内大循环更加高效畅通；人民生活更加美好，城乡居民人均收入再迈新的大台阶，中等收入群体显著扩大，基本公共服务实现均等化，城乡区域发展差距和居民生活水平差距显著缩小，全体人民共同富裕取得更为明显的实质性进展；改革对内需发展的支撑作用大幅提升，高标准市场体系更加健全，现代流通体系全面建成；我国参与全球经济合作和竞争新优势持续增强，国内市场的国际影响力大幅提升。《纲要》能源要点如下：

⁴ 中共中央 国务院印发《扩大内需战略规划纲要（2022—2035年）》。
http://www.gov.cn/xinwen/2022-12/14/content_5732067.htm

（八）持续提升传统消费

释放出行消费潜力。优化城市交通网络布局，大力发展智慧交通。推进汽车电动化、网联化、智能化，加强停车场、充电桩、换电站、加氢站等配套设施建设。

（十一）大力倡导绿色低碳消费

积极发展绿色低碳消费市场。健全绿色低碳产品生产和推广机制。促进居民耐用消费品绿色更新和品质升级。大力发展节能低碳建筑。完善绿色采购制度，加大政府对低碳产品采购力度。建立健全绿色产品标准、标识、认证体系和生态产品价值实现机制。加快构建废旧物资循环利用体系，规范发展汽车、动力电池、家电、电子产品回收利用行业。

倡导节约集约的绿色生活方式。深入开展绿色生活创建。推进绿色社区建设。按照绿色低碳循环理念规划建设城乡基础设施。倡导绿色低碳出行，发展城市公共交通，完善城市慢行交通系统。

（十三）持续推进重点领域补短板投资

加强能源基础设施建设。提升电网安全和智能化水平，优化电力生产和输送通道布局，完善电网主网架布局 and 结构，有序建设跨省跨区输电通道重点工程，积极推进配电网改造和农村电网建设，提升向边远地区输配电能力。优化煤炭产运结构，推进煤矿智能化、绿色化发展，优化建设蒙西、蒙东、陕北、山西、新疆五大煤炭供应保障基地，提高煤炭铁路运输能力。加快全国干线油气管道建设，集约布局、有序推进液化天然气接收站和车船液化天然气加注站规划建设。大幅提高清洁能源利用水平，建设多能互补的清洁能源基地，以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点加快建设大型风电、光伏基地。统筹推进现役煤电机组超低排放和节能改造，提升煤电清洁高效发展水平。推动构建新型电力系统，提升清洁能源消纳和存储能力。

加大生态环保设施建设力度。全面推进资源高效利用，建设促进

提高清洁能源利用水平、降低二氧化碳排放的生态环保设施。

（十四）系统布局新型基础设施

全面发展融合基础设施。推动 5G、人工智能、大数据等技术与交通物流、能源、生态环保、水利、应急、公共服务等深度融合，助力相关行业治理能力提升。

（十八）加快发展新产业新产品

壮大战略性新兴产业。发展壮大新能源产业。

（二十二）加快建立公平统一市场

加快构建全国统一大市场。推进能源、铁路、电信、公用事业等行业竞争性环节市场化改革。

（二十四）完善促进消费的体制机制

持续释放服务消费潜力。对于电力、油气等行业中具有自然垄断属性的服务领域，根据不同行业特点实行网运分开，放宽上下游竞争相对充分服务业准入门槛。

（二十七）发挥对外开放对内需的促进作用

稳步推进多双边贸易合作。促进我与周边国家地区农业、能源、服务贸易、高新技术等领域合作不断深化。

扩大重要商品和服务进口。拓宽优质消费品、先进技术、重要设备、关键零部件和重要能源资源进口渠道。

十、提升安全保障能力，夯实内需发展基础

把安全发展贯穿扩大内需工作各领域和全过程，着力提升粮食、能源和战略性矿产资源等领域供应保障能力，有效维护产业链供应链稳定，不断提高应对突发应急事件能力，为国内市场平稳发展提供坚强安全保障。

（三十二）强化能源资源安全保障

增强国内生产供应能力。推动国内油气增储上产，加强陆海油气开发。推动页岩气稳产增产，提升页岩油开发规模。引导和鼓励社会

资本进入油气勘探开采领域。稳妥推进煤制油气，规划建设煤制油气战略基地。深入实施找矿突破战略行动，开展战略性矿产资源现状调查和潜力评价，积极开展现有矿山深部及外围找矿，延长矿山服务年限。持续推进矿山智能化、绿色化建设。

（三十三）增强产业链供应链安全保障能力

保障事关国计民生的基础产业安全稳定运行。聚焦保障煤电油气运安全稳定运行，强化关键仪器设备、关键基础软件、大型工业软件、行业应用软件和工业控制系统、重要零部件的稳定供应，保证核心系统运行安全。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

工信部等五部门开展第三批智能光伏试点示范活动

11月8日，工信部办公厅、住建部办公厅、交通运输部办公厅、农业农村部办公厅、国家能源局综合司五部委联合印发《关于开展第三批智能光伏试点示范活动的通知》⁵，提出支持培育一批智能光伏示范企业以及建设一批智能光伏示范项目。优先考虑方向如下：

1、光储融合

应用新型储能技术及产品提升光伏发电稳定性、电网友好性和消纳能力，包括多能互补、光伏制氢、光伏直流系统、自发自储自用等方向。

2、交通应用

包括在高速公路和国省道服务区（停车场）、加油站、货运场站等场景采用智能光伏，实现充电桩、周边设施等应用。

3、农业应用

包括在设施农业、规模化种养、渔业养殖、农产品初加工等生产场景发展农光互补、生光互补、渔光互补等生态复合模式，建立“光

⁵ 工业和信息化部办公厅 住房和城乡建设部办公厅 交通运输部办公厅 农业农村部办公厅 国家能源局综合司关于开展第三批智能光伏试点示范活动的通知。
http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/14/content_5726816.htm

伏+农业”互补分布式有效供应机制。

4、信息技术

面向智能光伏系统的电力电子、柔性电子、信息系统、智能微电网、虚拟电厂及有关人工智能、工业软件、工业机器人等方向。

5、产业链提升

包括废旧光伏组件回收利用、退役组件资源化利用技术研发及产业化、光伏“碳足迹”评价认证、智能光伏供应链溯源体系等方向。

6、先进技术产品及应用

包括高效智能光伏组件（组件转换效率在 24%以上）、新型柔性太阳能电池及组件、钙钛矿及叠层太阳能电池、超薄高效硅片等方向，以及相关智能光伏产品在大型光伏基地、数据中心、海洋光伏等领域应用。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

海水原位直接电解制氢技术取得重大突破

使用可再生能源作为输入的电化学盐水电解是大规模生产绿色氢气的一个非常理想和可持续的方法。由于海水复杂成分引起的电极副反应和腐蚀问题，其实际可行性受到耐久性不足的严重挑战。近半个世纪以来，国内外多个研究团队通过催化剂工程、膜材料科学等手段进行了大量探索研究，旨在破解海水直接电解制氢面临的析氯副反应、钙镁沉淀、催化剂失活等难题，但仍未有突破性的理论与原理彻底避免海水复杂组分对电解制氢的影响，可规模化的高效稳定海水直接电解制氢原理与技术仍是世界空白。

中国工程院院士谢和平与其指导的深圳大学/四川大学博士团队联合南京工业大学邵宗平教授提出了一种直接电解海水制氢的方法，从根本上解决了副反应和腐蚀问题。其关键技术是将自透气防水膜和润湿电解质（SDE）加入电解槽中。由于海水和 SDE 之间的水蒸气压力差异，水从海水中穿过膜到 SDE 的迁移是通过液-气-液相变机制

自我驱动的。这种独特的水净化机制确保了 100% 的离子阻断效率，膜的疏水性导致了防污能力，微米级的气体扩散路径使水的迁移率很高。在实际应用条件下以 250mA cm^{-2} 的电流密度稳定地运行了 3200 多个小时，没有出现故障。这一策略以类似于淡水分离的方式实现了高效、尺寸灵活和可扩展的直接海水电解，不会显著增加操作成本，具有很高的实际应用潜力。重要的是，这种配置和机制有望进一步应用于同时进行的水基污水处理和资源回收以及一步到位的制氢。

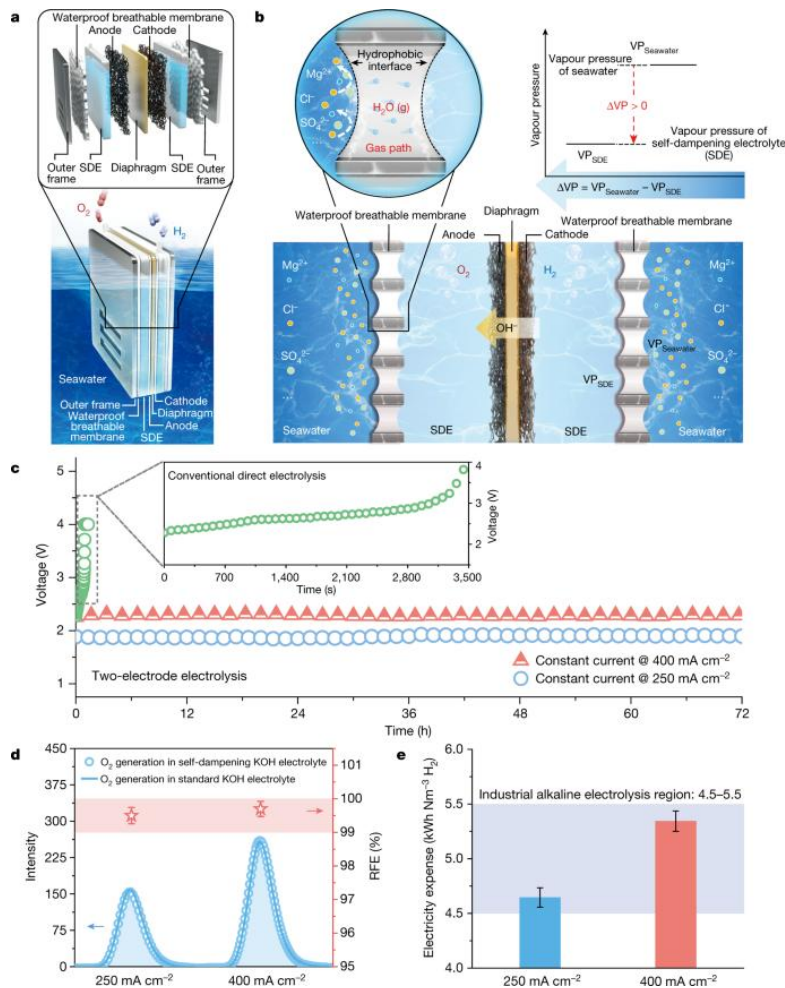


图 1 海水电解系统设计示意图

该项研究通过将分子扩散、界面相平衡等物理力学过程与电化学反应巧妙结合，建立了相变迁移驱动的海水直接电解制氢理论模型，揭示了微米级气隙通路下界面压力差对海水自发相变传质的影响机制，形成了电化学反应协同海水迁移的动态自调节稳定电解制氢方法，破解了有害腐蚀性这一困扰海水电解制氢领域的半世纪难题。相关研

究成果发表在《*Nature*》⁶。

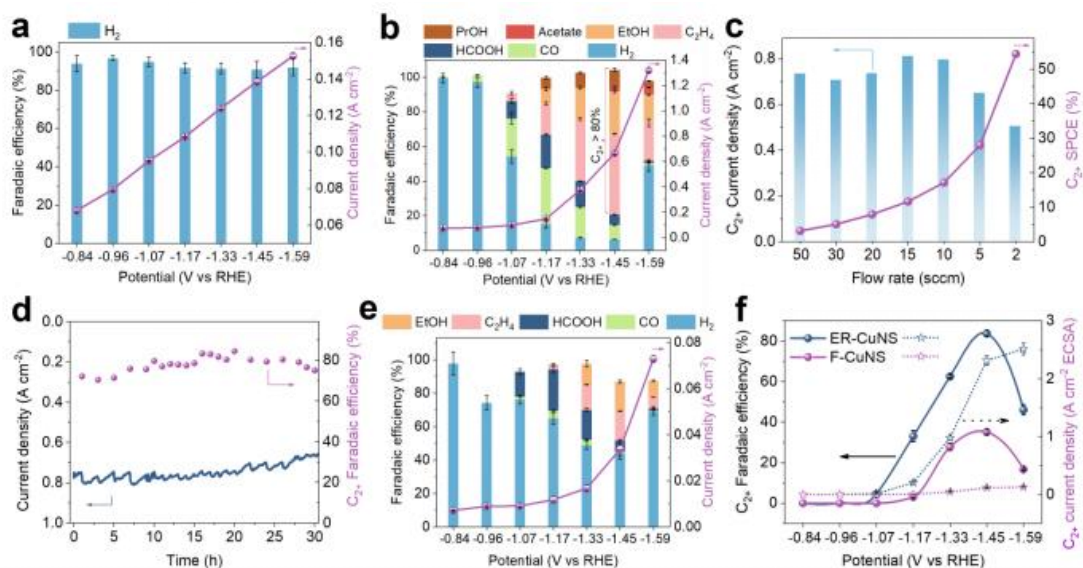
[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据中国能源报新闻编辑]

协同调控反应微环境促进强酸环境 CO₂电还原制备多碳产物

CO₂ 电催化还原制备多碳产物具有重要的意义，有望减少温室气体排放，并将清洁电力间接存储于具有高附加值的碳氢化合物中。为了抑制析氢副反应同时促进 C-C 偶联反应，当前 CO₂ 电还原体系主要采用碱性电解液，但面临着低选择性/活性，以及由碳酸盐积累所导致低碳利用率和稳定性欠佳等问题，严重阻碍了碱性 CO₂ 电解体系的应用前景。

湖南大学黄宏文课题组基于催化剂设计与微环境工程耦合的策略，合成了一种具有丰富纳米孔结构的二维铜片催化剂，通过阳离子效应和孔结构限域效应调控局部微环境，开发了一个在强酸性环境下有效抑制析氢副反应、并高效高选择性制备多碳产物的 CO₂ 电还原催化体系。利用孔结构限域效应和阳离子效应协同调控电催化反应的局部微环境，从而在强酸性（pH≤1）环境下在多孔铜纳米片催化剂上实现了高效制备多碳产物，在流动池中选择性可达 83.7%，分电流密度达 0.56 A cm⁻²，单程碳利用率达 54.4%，并实现了 30 小时的稳定电解。机理研究表明，亥姆霍兹平面上累积的物种（K⁺，OH⁻）通过降低界面质子浓度在动力学上抑制析氢副反应，并通过非共价作用在热力学上推动 CO₂ 转化，从而促进多碳产物的生成。

⁶ Xie H, Zhao Z, Liu T, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation. *Nature*, 2022, DOI: 10.1038/s41586-022-05379-5

图 1 酸性介质中电催化 CO₂ 还原性能

该项研究基于催化剂设计与微环境工程耦合的策略，合成了一种具丰富纳米孔结构的二维铜片催化剂，利用孔结构限域效应和阳离子效应协同调控电催化反应的局部微环境，开发了在强酸性环境下有效抑制析氢副反应、并高效高选择性制备多碳产物的 CO₂ 电还原催化体系。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》⁷。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据妍之成理新闻编辑]

热交联空穴导体实现 23.9%效率的稳定反式钙钛矿电池

聚[双(4-苯基)(2, 4, 6-三甲苯基)胺] (PTAA) 代表了反式钙钛矿太阳能电池 (PSCs) 中最先进的空穴传输材料 (HTM)。然而, PTAA 不令人满意的表面性质以及体膜中的高能无序阻碍了器件性能的进一步提高。

厦门大学张金宝、杨丽和南方科技大学郭旭岗联合研究团队开发了一种简单的小分子 10-(4-(3, 6-二甲氧基-9H-咪唑-9-基)苯基)-3, 7-双(4-乙烯基苯基)-10H-吩恶嗪 (MCz-VPOZ), 用于通过简单的低温交联技术原位交联聚合物空穴导体 (CL-MCz)。所得聚合物 CL-MCz

⁷ Ma Z, Yang Z, Lai W, et al. CO₂ electroreduction to multicarbon products in strongly acidic electrolyte via synergistically modulating the local microenvironment. *Nature Communications*, 2022, DOI: 10.1038/s41467-022-35415-x.

提供了高能量有序性、改善的导电性以及适当的能级排列，使得能够在器件中有效收集电荷载流子。同时，CL-MCz 同时提供了令人满意的表面润湿性和界面功能化，有助于形成具有较少碘空位和抑制载流子复合的高质量钙钛矿薄膜。值得注意的是，具有 CL-MCz 的器件产生了 23.9% 的转换效率，以及低至 0.41 eV 的极低能量损耗，这代表了反式 PSC 中非 PTAA 基聚合物 HTM 的最高报道效率。此外，相应的未封装器件在长达 2500 小时的各种操作压力下表现出具有竞争力的寿命稳定性，反映了 CL-MCz 在可扩展 PSC 应用中的巨大前景。该项研究强调了交联方法在制备低成本、稳定和高效的聚合物 HTMs 以实现可靠的 PSC 方面的潜力。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》⁸。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据能源学报新闻编辑]

双功能预钠化实现超稳定钠离子电池硬碳材料制备

钠离子电池被认为是一种有前景的高性价比大规模电力储能和智能电网技术，但其电化学性能受电极材料及其与电解质的界面结构的制约。负极与固体电解质界面（SEI）的破裂和重组，导致了低的初始库仑效率（ICE），甚至形成钠枝晶。硬碳（HC）由于其成本低、比容量大而广泛应用于钠离子电池。然而，碳缺陷和含氧官能团的钠化是不可逆的，也会影响 SEI 的形成。这导致了低 ICE、循环降解和 HC 负极的安全问题。

南开大学李福军教授团队采用二苯酮钠（Na-DK）对 HC 阳极进行双功能预处理，补偿了含氧官能团对钠的不可逆吸收，并与五/七元环的碳缺陷反应，在 HC 中形成准金属钠。在 1.0M NaPF₆ 的 DME 电解液中，形成的钠在 HC 上诱导了强大的富含 NaF 的 SEI，有利于界面反应动力学和稳定的 Na⁺插入和提取。这使得预钠化的 HC(pHC) 在 6800 次循环后具有约 100% 的高 ICE 和 82.4% 的容量保留率。最终

⁸ Yu S, Dong X, Zhao P, et al. Decoupled temperature and pressure hydrothermal synthesis of carbon sub-micron spheres from cellulose. *Nature Communications*, 2022, DOI: 10.1038/s41467-022-31352-x

HC 与 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 正极组成的全电池在 700 次循环后显示出约 100% 的高容量保持率。

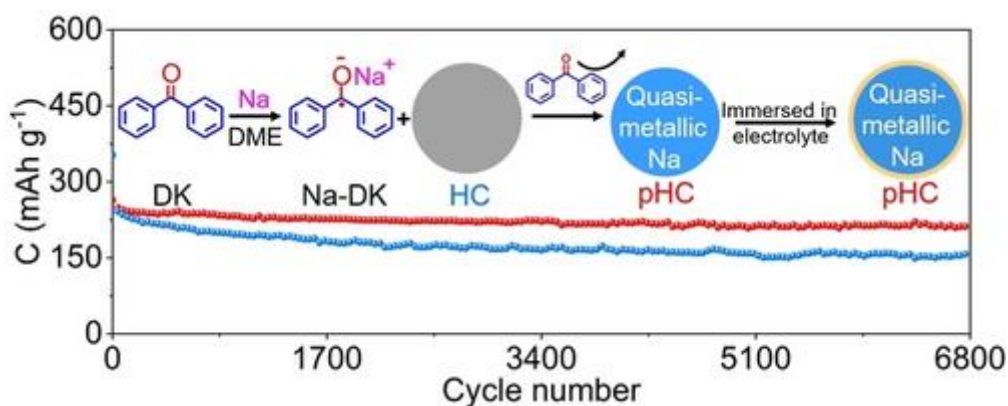


图 1 预钠化提升钠离子电池循环稳定性示意图

该项研究采用 Na-DK 作为还原剂实现了 HC 的双功能预钠化，具有 99.2% 的高 ICE，循环 6800 圈后具有优异的容量保持能力，为高度稳定的钠离子电池提供了新的策略。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》⁹。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳 根据电化学能源新闻编辑]

⁹ Fang H, Gao S, Ren M, et al. Dual-Function Presodiation with Sodium Diphenyl Ketone towards Ultra-stable Hard Carbon Anodes for Sodium-Ion Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, DOI:10.1002/anie.202214717

国际瞭望

国际能源署发布《世界能源展望 2022》

10月27日，国际能源署（IEA）发布《世界能源展望 2022》报告¹⁰指出，全球能源危机或将成为迈向更清洁、更安全未来的历史性转折点。报告基于全球最新政策设置的既定政策情景显示，到2030年新措施将有助于推动全球清洁能源每年投资超2万亿美元，比目前增长50%以上。随着对核电和可再生能源的支持，煤炭使用量将在未来几年内回落，天然气需求将在2020年代末期达到平稳，石油需求将在2035年左右趋于平稳，到2050年略微下降。报告要点如下：

一、全球能源危机的起因和影响

1、能源进一步中断和地缘政治分裂的风险依然较高

俄乌冲突引发的能源危机对全球家庭、企业和整个经济都产生了深远的影响，促使各国政府做出应急措施，以降低未来本国能源中断风险和增强能源安全。高能源价格导致消费者需向生产商支付更多的财富，无法使用现代能源的人数十年来首次上升，全球大约7500万人可能无法支付电费，1亿人将会重新使用传统生物质能进行烹饪。这场能源危机将如何演变，化石燃料价格将在高位停留多久，仍存在巨大的不确定性，能源进一步中断和地缘政治分裂的风险依然较高。

2、解决能源危机的长期策略是发展低排放能源

这场危机在短期内将提升对石油和煤炭的需求，但长期来看，解决危机的长期策略仍来自低排放能源，主要是可再生能源，在某些情况下还包括核能，以及在效率和电气化方面取得更快进展。在既定政策情景中，到2030年全球能源需求每年将增长约1%，几乎全部可由可再生能源予以满足。煤炭需求在未来几年将达到顶峰，天然气需求在十年末达到平稳，石油需求在2030年代中期达到高点，然后略微下降。化石能源在全球能源结构中的份额将从目前的80%降到2030

¹⁰ World Energy Outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

年的 75%，到本世纪中叶将下降至略高于 60%。

3、发展弹性和多样性的清洁能源供应链是未来趋势

由于供应链的持续紧张以及关键矿物、水泥和钢铁等基础建筑材料价格上涨，整个能源行业都感受到了成本压力。但预计当前清洁能源技术成本的上涨只是暂时，并且会在制造业完成创新改造前有所回落。然而，当前的趋势正在促使政府更加关注清洁能源供应链的弹性和多样性。

二、到 2050 年实现净零排放的最新路线图

1、到 2050 年实现净零排放仍具有可实现性

2021 年全球碳排放量创纪录增加了 19 亿吨，达到 366 亿吨。尽管这一现状不尽如人意，但到 2050 年实现净零排放仍具有可实现性。在净零排放情景中，从 2021 年到 2030 年低排放能源供应将增加约 125 艾焦耳，相当于过去 15 年世界能源供应的增量。在低排放能源种类中，现代生物质能和太阳能增加最多，到 2030 年将分别增加约 35 艾焦耳和 28 艾焦耳。但到 2050 年，低排放能源供应的最大增长将来自太阳能和风能，用于能源用途的化石燃料仅占能源供应总量的 5%。

2、在净零排放情景中，电力将成为全球能源系统转型的关键

到 2050 年，电力将提供超过一半的终端能源消费量，总发电量将以每年 3.3% 的速度增长，涨幅高于同时期全球经济增长速度。所有可再生能源的年新增装机容量将翻两番，从 2021 年的 290 吉瓦增加到 2030 年的 1200 吉瓦左右。到 2030 年，可再生能源在发电总量中的占比将超过 60%；到 2050 年每年新增核电装机容量将是目前平均水平的 4 倍。

3、在净零排放情景中，节能措施将有助于增加清洁能源供应

在净零排放情景中，到 2030 年能源强度改善速度几乎是过去十年的 3 倍，能源效率、材料利用率和行为改变所带来的能源节约量约

为 110 艾焦耳，相当于目前中国终端能源消费总量。到 2050 年，终端能源部门碳排放量都将减少 90% 以上。其中，氢和氢基燃料将用于重工业和长途运输领域，到 2050 年其在终端能源消费总量中的份额将达到 10% 左右。为了可持续发展，生物质能的使用量将保持在 100 艾焦耳左右，到 2050 年其在终端能源消费总量中的份额将达到 15% 左右。2030 年 CO₂ 捕集总量将达到 12 亿吨，2050 年将增至 62 亿吨，其中 60% 以上来自工业和其他能源转型部门。

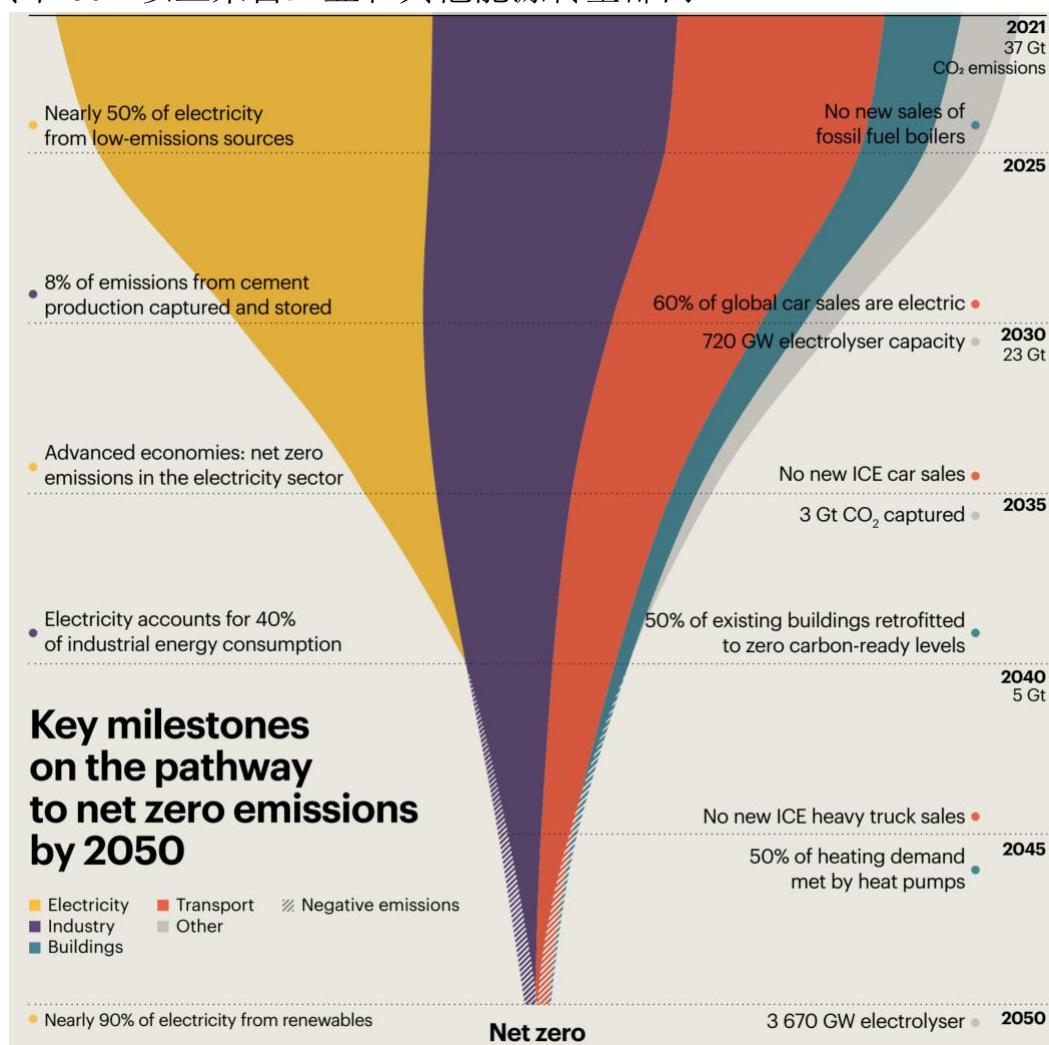


图 1 到 2050 年实现净零排放的关键里程碑

注：①到 2025 年，无新增化石燃料锅炉销售，近 50% 的电力来自低排放能源；②到 2030 年，电动汽车销量占全球汽车销量的 60%，电解槽装机容量达到 720 吉瓦，8% 的水泥生产将配置碳捕集和封存技术；③到 2035 年，不再销售新的内燃机小型汽车，全球 CO₂ 捕集量达到 30 亿吨，发达经济体电力部门实现净零排放；④到 2040 年，将 50% 的现有建筑物改造成零排放水平，电力占工业相关能耗的 40%；⑤到 2045 年，不再销售新的内燃机重型卡车，热泵满足 50% 的供热需求；⑥到 2050 年，电解槽装机容量达到 3670 吉瓦，近 90% 的电力来自可再生能源。

4、在净零排放情景中，清洁能源投资将明显增加

2017-2021 年间，清洁能源投资每年占全球 GDP 的 2% 左右。在净零排放情景中，到 2030 年这一比例将上升至近 4%。可再生能源发电领域的投资增幅最大，将从目前的 3900 亿美元增加到 2030 年的 13 000 亿美元。此外，清洁能源技术正在迅速推广。已公布的 2030 年全球电动汽车电池产能仅比净零排放情景中电池需求低 15%；已公布的太阳能光伏产能基本达到净零排放情景中设置的部署水平。若部署的项目能如期完成，到 2030 年电解槽累计装机容量将达到 380 吉瓦，高于净零排放情景中 2030 年需求的一半。然而，在许多领域的进展还远远低于净零排放情景中的设想。政策制定者应加快采取措施，将清洁能源供应链作为一个整体，确保供应链的多样性和弹性，并促使供应链不同环节、不同部门的协调发展。

三、能源转型中的能源安全

俄乌冲突后，化石燃料价格震荡上涨，凸显了当今能源系统固有的风险以及能源安全对经济和日常生活的重要性。能源转型提供了建立一个更安全、更可持续的能源系统的机会，在减少燃料价格波动风险的同时降低能源费用。在能源转型中需重点采取十大措施，以确保“中期能源转型”过程中的能源安全，即清洁能源和化石燃料共存系统，并提供经济可行的能源服务。

1、扩大清洁能源技术应用规模，减少化石燃料使用量

投资清洁能源是在减少碳排放的同时避免能源危机的关键。在 2050 净零排放情景中，到 2030 年每在化石燃料上花费 1 美元，就有大约 9 美元用于清洁能源领域。在扩大清洁能源投资之前削减对化石燃料的投资将会推高能源价格，可能不利于能源转型的安全过渡。高昂的化石燃料价格可能会使化石燃料进口国实现气候目标的成本增加 10%-25%。

2、优先促进能源效率的提升

能源危机凸显了能源效率和行为措施在缓解供需不匹配问题方面的关键作用。自 2000 年以来，节能措施明显降低了单位能耗，但近年来节能改善的进度有所放缓。发布促进能效提升改造的政策至关重要，因为到 2050 年使用的建筑中，一半以上已经建成。

3、优先推进贫困社区发展新能源经济

由于新冠疫情和能源危机，全球约 7500 万人失去支付延长电力服务的能力，1 亿人失去了清洁烹饪解决方案的能力。在新兴市场和发展中经济体，最贫穷的家庭能耗较最富有的家庭低 9 倍，但收入中用于能源花费占比却比最富有家庭高得多。扭转这些日益恶化的能源贫困趋势对于安全、以人为本的能源转型至关重要。

4、推进全球合作，降低新兴市场和发展中经济体的投资成本

2021 年，主要新兴经济体的太阳能光伏发电厂的投资成本比发达经济体和中国要高 2-3 倍。解决相关风险并将新兴和发展中经济体的投资成本降低 200%，到 2050 年实现净零排放的累计融资成本将减少 15 万亿美元。

5、推进基础设施报废与再利用

即使在快速的能源转型中，现有化石燃料基础设施某些部分在一段时间内仍将正常运转。其中包括用于电力保障的燃气电厂（在欧盟，到 2030 年天然气的峰值需求仍将持续上升）或炼油厂（为剩余的内燃机车队提供燃料）。这类基础设施在计划外或过早退役可能会对能源安全产生负面影响。

6、发展多元化能源种类对于降低能源风险至关重要

一些国家将其从石油和天然气获得的巨额资金投资于可再生能源和低排放的氢能。氢能潜在出口收入虽无法替代石油和天然气，但低成本的可再生能源和碳捕集、利用与封存可以通过吸引能源密集型行业的投资来提供持久的外汇优势。

7、推进投资灵活性是保障电力供应的核心

可靠的电力是能源成功转型的核心因素，这是因为电力在终端能源消费中的份额将从目前的 20% 上升到 2050 年净零排放情景中的 50%。电力供需的不断变化意味着到本世纪中叶，在净零排放情景下对电力灵活性的要求会翻两番。电池储能和需求侧响应变得越来越重要，在 2050 年，在承诺目标情景下电池储能和需求侧响应将分别满足四分之一的灵活性需求。

8、确保清洁能源供应链的多样化和弹性

在承诺目标情景和净零排放情景中，到 2050 年清洁能源技术的矿产资源需求将翻 4 倍，贸易额将达到 4000 亿美元。高昂且波动的关键矿物价格和高度集中的供应链将会延迟能源转型或使转型成本更高。要将这种风险降至最低，需要采取行动扩大供应规模，并使供应多样化，同时采取回收再利用等其他措施来缓和矿物需求的快速增长。

9、促进能源基础设施的气候适应性

全球极端气候事件的频率和强度不断增加，对保障能源供应造成重大风险。IEA 分析表明，截至 2050 年洪水对基础设施的潜在影响将达到资产总价值的 1.2%。政府需要及时预测风险并确保能源系统有能力应对不利的气候灾害并从气候灾害中恢复过来。

10、政府应积极指明能源发展战略方向

政府需要解决市场能源体系失衡问题，带头确保能源安全转型。如果仅在自上而下的基础上进行管理，转型可能不太有效。政府需要利用巨大的市场资源，激励私营部门发挥自己的作用。实现能源成功转型大约 70% 的投资需要来自私人资本。

四、能源需求展望

1、当前全球经济危机、能源价格高昂、能源安全问题等导致本展望中对能源需求增长的预测低于去年报告预测

在既定政策情景中，到 2030 年全球能源需求年均增长将放缓至

0.4%，低于 2010 年至 2019 年的 2.3%。由于天然气价格上涨，一些地区的电力和工业部门对煤炭需求暂时激增。可再生能源，尤其是太阳能光伏和风电，到 2030 年将占全球发电总量的 43%，高于目前的 28%。石油需求将以每年 0.8% 的速度持续增长到 2030 年，达到峰值 1.03 亿桶/天。但由于电动汽车和能效的提高，石油需求将在之后停止增长。

2、在承诺目标情景下，若各国履行国家净零排放承诺，到 2030 年化石燃料使用量将比既定政策情景进一步下降

与既定政策情景相比，在承诺目标情景下所有行业都加快了电气化转型和提升能源效率的步伐。其中，交通运输领域中的电动汽车和建筑领域中的供暖最为显著。与此同时，可再生能源在电力部门占比不断扩大，到 2030 年将占发电总量的近 50%。这些变化最终将导致终端用户在承诺目标情景中，在高效和低排放设备上花费更多的是前期费用，但由于规模经济，承诺目标情景中这些设备的成本下降速度将比既定政策情景中更快。

3、在既定政策情景中，与能源相关的碳排放在未来两年将继续增加，到 2020 年代中期开始下降

到 2030 年全球碳排放将降至 362 亿吨，略低于当前水平。在承诺目标情景中，随着各国政府积极采取行动，到 2030 年全球碳排放量将下降至 315 亿吨。私营部门在承诺目标情景中发挥重要作用，全球近 800 家公司承诺实现净零排放，包括钢铁、水泥、航空、海运等多个行业。然而，即使是承诺目标情景中采取积极行动也远低于到 2050 年实现净零排放目标。

4、在发展中国家，高价格和通货膨胀将阻碍能源现代化转型

2022 年无法支付电力开销的人数可能会增加，这种现象近几十年来首次出现。与此同时，液化石油气价格的飙升可能会促使多达 1 亿使用现代烹饪技术的用户转向传统燃料。这些不利因素意味着，今

年既定政策情景中到 2030 年无法获得电力服务的人数预计将高于去年预测结果。到 2030 年全面实现能源现代化将需要采取更加雄心勃勃的行动，进行更高水平的投资。

5、提高能源效率将有助于缓解建筑供冷用电需求

当今约有 50 亿人生活在对建筑物供冷有强烈需求的地区，然而，其中只有三分之一的家庭拥有空调，且这些家庭大部分分布在发达经济体。到 2050 年，随着气候变化和人口增长，对建筑物供冷有需求的人数将增至 70 亿。在既定政策情景中，到 2050 年建筑物供冷的电力需求接近 5200 太瓦时，其中 90% 增长将来自新兴市场和发展中经济体。由于空调能效的提高，以及在建筑物中使用被动冷却措施，在承诺目标情景中对建筑物供冷的电力需求将较既定政策情景减少 50% 以上。

6、电动汽车的快速普及将促使石油需求提前达到峰值

由于电动汽车的快速普及，石油需求峰值将从既定政策情景中的 2030 年代中期提前到承诺目标情景中的 2020 年代中期。在承诺目标情景中，到 2030 年电动汽车将占全球汽车销量的 35% 以上，而在中国、欧盟和美国的销量占比将超过 50%。因此，到 2030 年全球电动汽车市场规模将是 2021 年的 6 倍。

五、电力展望

1、在所有情景中，电力在终端能源消费中的份额将越来越大

到 2030 年，在既定政策情景中全球电力需求将增至 5900 太瓦时，在承诺目标情景中将超过 7000 太瓦时，相当于美国和欧盟当前整体需求水平。在发达经济体，到 2030 年电动汽车的市场份额将从 2021 年的 8% 左右上升至既定政策情景中的 32% 和承诺目标情景中的近 50%，交通运输成为电力需求增长的最大贡献者。在新兴市场和发展中经济体，人口增长和建筑物供冷需求的增加将导致电力需求增加。在中国，到 2030 年空调保有量将比当前的既定政策情景和承诺目标

情景增加约 40%。在所有经济体中，电力在终端能源消费中的比例将越来越大。到 2050 年，在既定政策情景中全球电力需求较目前将增加 75% 以上，在承诺目标情景中将增加 120%，而在净零排放情景中将增加超过 150%。

2、目前多国能源行业煤炭使用量出现上升趋势是暂时的

由于需求旺盛、天然气价格高和能源安全问题，许多国家的能源行业煤炭使用量出现上升，但预计这只是暂时现象。即使在既定政策情景中，煤炭在发电量中的占比也将从 2021 年的 36% 下降到 2030 年的 26% 和 2050 年的 12%，与之相反太阳能光伏和风电为主导的可再生能源所占份额将不断增长。在承诺目标情景中，可再生能源在发电总量中的占比将从 2021 年的 28% 上升到 2030 年的约 50% 和 2050 年的 80%。到 2050 年，未减排煤炭占比将降至仅 3%。太阳能光伏装机容量将从 2021 年的 151 吉瓦增长到 2030 年的 370 吉瓦，到 2050 年将增长到近 600 吉瓦，而风电装机容量到 2030 年将翻一番，达到 210 吉瓦，到 2050 年将增长至 275 吉瓦。近期全球局势正在改变人们对天然气的看法，同时也突显核能在减少排放和加强电力保障方面的应用潜力。

3、2021 年全球电力系统的可负担性和安全性遭遇诸多挑战

预计市场状况和能源危机将造成 2022 年全球平均电力供应成本提高近 30%。2022 年上半年批发电价比上一年同期翻了三倍，欧盟正面临巨大的成本压力。这主要是由于天然气价格创历史新高导致，与此同时煤炭、石油价格上涨，而核电和水电的可用性下降加剧了这一情况。与气候相关的风险，包括热浪、干旱、极端寒冷和极端天气事件，已经使全球电网供应紧张并导致多次大规模停电。不断优化的电力结构将会部分缓解气候变化带来的影响，但也会加剧其他方面。

4、发电产生的碳排放量在不久将达到峰值

2021 年，能源行业碳排放量达到 130 亿吨，占全球能源相关 CO₂

排放总量的三分之一以上。在所有的情景中，能源行业的 CO₂ 排放在不久将达到峰值。到 2050 年，在既定政策情景中电力生产的碳排放量将急剧减少 40%；在承诺目标情景中将减少 80%以上；在净零排放情景中，到 2040 年电力相关净排放将达到零。在发达经济体，能源行业的排放自 2007 年以来一直在下降，由于新冠疫情，能源行业碳排放量在 2021 年出现暂时上升。在新兴市场和发展中经济体，电力相关碳排放很快就达到峰值，在既定政策情景中到 2050 年每年碳排放量将下降 1%以上，在承诺目标情景中将下降 6%。能源行业不断增加的投资金额将加速电力相关碳减排速度，在既定政策情景中，2022-2050 年能源行业投资金额将从 2017-2021 年的年均 8600 亿美元增加到约 1.2 万亿美元，在承诺目标情景中将增至 1.6 万亿美元，而在净零排放情景中将增至 2.1 万亿美元。

5、电力系统灵活性是电力保障的基石

到 2030 年，随着电力系统需求模式的不断变化和太阳能光伏、风电应用的不断增长，在承诺目标情景中对电力系统灵活性需求将翻一番，而到 2050 年将增加近 4 倍。在既定政策情景中对电力系统灵活性需求也迅速增加，到 2050 年将增加 2 倍多。如今，电力系统的灵活性主要由未进行减排措施的煤炭、天然气和水电提供，但在未来，电力系统将越来越依赖储能电池、需求响应、生物能源和其他波动性可再生能源、集成碳捕集功能的化石燃料、氢和氨。

6、电网现代化将有效支撑能源成功转型

到 2030 年，既定政策情景中电网现代化建设的年均投资将从近几年的约 3000 亿美元增加到 5500 亿美元，到 2050 年平均每年达到 5800 亿美元。在承诺目标情景中，到 2030 年电网现代化建设投资将进一步上升至 6300 亿美元，到 2050 年将达到 8300 亿美元。然而，复杂的项目可能需要十年或更长时间才能交付，大多数情况下这是开发太阳能光伏、风电或电动汽车充电基础设施所需时间的两倍。因此，

政府长期规划至关重要，必须考虑到需求增长、波动性可再生能源份额的增加以及数字化技术等诸多因素。

7、关键矿产资源是能源和电力保障领域的关键组成部分

由于可再生能源、电池储能和电网部署的增加，在既定政策情景中，与能源行业相关的关键矿产资源需求将从 2021 年的每年 700 万吨上升到 2030 年的 1100 万吨和 2050 年的 1300 万吨。在承诺目标情景和净零排放情景中关键矿产资源的需求增长更快，到 2050 年将达到每年 2000 万吨。用于电网中的金属铜、太阳能光伏中的硅、风力涡轮机中的稀土元素和电池中的锂，这些都将是关键矿产资源。未来需要进行更多的研发，以降低矿产资源强度，并在关键应用中实现资源替代，同时进行电动汽车电池的回收利用和终端应用中提高能源效率等措施。

六、液体燃料展望

1、当前全球石油市场正在面临巨大的不确定性

经济衰退严重影响近期石油市场需求，对俄罗斯的制裁和备用容量的不断减少给全球市场带来了巨大的不确定性。虽然当前石油和天然气价格陡增，但考虑到未来几十年石油消费结构性转变的可能性，投资者对如何最好地进行投资依旧犹豫不决。在既定政策情景中，尽管油价居高不下，全球石油需求仍将在 2023 年前反弹并超过 2019 年水平；需求在 2030 年代中期将达到峰值，为 1.03 亿桶/天。在承诺目标情景中，更强有力的政策行动将会使石油需求达峰时间提前至 2020 年代中期。在 2050 年净零排放情景中，更快的全球减排行动意味着石油需求永远不会回到 2019 年的水平，到 2030 年将降至 7500 万桶/天。

2、长期来看交通运输部门石油需求量将减少

2021 年全球汽车销售中，电动汽车占比约为 10%。到 2030 年，在既定政策情景中这一比例将上升至 25%，在净零排放情景中将上升

至 60%。电动卡车和燃料电池重型卡车在既定政策情景中难以获得市场份额，但在净零排放情景中，它们将占 2030 年卡车总销量的 35%。航空和海运在 2021 年石油消耗量为 1000 万桶/天，比新冠疫情之前减少了 20%。在既定政策情景中，经济增长推动了全球贸易和国际旅行，2021 至 2030 年间石油需求将增长 400 万桶/天。在承诺目标情景中，为实现政府和行业组织的气候目标，增加替代燃料的使用，到 2030 年石油需求将增加 300 万桶/天。在净零排放情景中，低排放液体燃料的选择，将使到 2030 年石油需求几乎不增加。

3、在所有情景下化工行业石油需求将持续增加

化工行业是 2020 年唯一石油消费量增加的行业，在每种情景下其在石油消费量中的占比都将上升。目前，作为石化原料的石油中约有 70% 用于生产塑料。一些国家目前已宣布禁止或减少一次性塑料生产、提高回收率和推广替代原料的政策。到 2050 年，在既定政策情景中全球塑料平均回收率将从目前的 17% 增加至 27%，在承诺目标情景中将增加到 50%，在净零排放情景中将增加至 54%。

4、加大石油生产上游投资，确保石油供需保持平衡

在既定政策情景中，现有石油生产来源的需求上升和产量下降意味着需要增加新的常规上游项目来确保供需保持平衡。到 2030 年，每年石油生产上游投资的平均支出约为 4700 亿美元，较目前支出高 50%。在承诺目标情景中，尽管石油需求较低，但仍然需要新的常规项目，到 2030 年平均每年将投资 3800 亿美元。在净零排放情景中，化石能源需求的下降可以在不需要开发新石油项目的情况下得到满足，但需要继续投资现有资产，而这需要在 2030 年前进行每年平均 3000 亿美元的上游投资。

5、2021 年全球炼油产能 30 多年来首次下降

随着 2022 年需求反弹以及俄罗斯和中国的石油产品出口下降，炼油利润率飙升至历史新高。在既定政策情景中，对柴油和煤油需求

的上升意味着市场可能会在数年内保持非常紧张的供需局势。在承诺目标情景中，抑制液体燃料需求的强有力政策措施将显著缓解这种能源紧张局面。承诺目标情景和净零排放情景要求炼油厂调整目前的结构配置和商业模式，加大在减少排放、氢和生物燃料方面的投资。

6、未来液体生物燃料需求将不断增加

食品供应链的中断和高昂的肥料价格意味着液体生物燃料的成本飙升。与此同时，对可持续性的日益关注，促使人们越来越关注先进的液体生物燃料，这种生物燃料不直接与粮食和饲料作物竞争，并避免对可持续性的不利影响。在既定政策情景中，液体生物燃料将从2021年的220万桶石油当量/天增长到2030年的340万桶石油当量/天，在承诺目标情景中将增加至550万桶石油当量/天，在净零排放情景中将增加至570万桶石油当量/天。

七、气体燃料展望

1、全球天然气需求快速增长的时代即将结束

当前全球能源危机的深度和广度引发天然气未来成本和可用性的担忧，严重削弱了将其作为过渡燃料的坚定想法。在既定政策情景中，天然气需求在2021年至2030年期间增长不到5%，而在过去十年这一增长速率为20%。从2030年到2050年，全球天然气需求将保持在约4.4万亿立方米的水平，新兴市场和发展中经济体需求的增长被发达经济体需求减弱所抵消。在承诺目标情景中，全球天然气需求将很快达到峰值，2030年需求将较2021年水平低10%。在净零排放情景中，到2030年需求将较2021年水平下降20%，到2050年需求下降75%。

2、能源危机将促使欧盟天然气需求持续降低

当前，俄罗斯向欧盟输送的管道天然气出口量较去年减少了一半以上，预计2022年总出口量为600亿立方米。在承诺目标情景中，到2030年将再减少450亿立方米，而在既定政策情景中则降至零。

额外的液化天然气进口和非俄罗斯管道天然气这两个方案将发挥重要作用。在承诺目标情景中，风电和太阳能产能的涨幅会更加明显，并会更多地推动建筑物的改造和热泵的安装，这些措施将有助于欧盟天然气需求在 2021 年至 2030 年之间下降 40%，即 1800 亿立方米。

3、全球天然气价格将在 2020 年代中期开始逐渐下降

欧洲由于减少了对俄罗斯天然气进口，以及缺乏新的天然气进口项目，意味着在未来几年，在既定政策情景和承诺目标情景中，欧洲天然气进口价格仍然较高。在净零排放情景中，全球所有地区的天然气需求都将迅速减少，全球天然气供应压力缓解，天然气进口价格会迅速下跌。随着天然气需求的平缓和目前正在建设的新供应项目的投产，在既定政策情景和承诺目标情景中，天然气价格将在 2020 年代中期开始逐渐下降。美国国内天然气需求的下降为增加液化天然气出口创造了机会，在既定政策情景和承诺目标情景中，美国将很快超过俄罗斯成为世界上最大天然气出口国。在既定政策情景中，中国的天然气需求增长将明显放缓，2021 年至 2030 年期间需求减幅速度为每年 2%，而过去十年间，天然气需求的年均增长率为 12%。中国未来 15 年已签订大量液化天然气合同，加上现有管道和新的国内项目的预期供应，这些产能都超过了在既定政策情景中到 2035 年中国对天然气的需求量。

4、高昂的天然气价格削弱了煤改气大规模应用前景

在亚洲的新兴市场和发展中国家，价格与石油挂钩的长期天然气进口合同为消费者提供了部分保护，使其免受高涨和波动的天然气价格影响，在某些情况下，这还会得到国内补贴的支持。不断增长的人口和强劲的经济发展为这些地区天然气需求增长提供了坚实的基础：到 2030 年，在承诺目标情景中亚洲这些新兴市场天然气需求将增长 20%，至 120 亿立方米，其中约 70% 的增长来自进口液化天然气。亚洲部分地区不断增长的天然气需求以及欧盟进口非俄罗斯天然气的

措施支撑了 2020 年代中期之前所有情景中的液化天然气需求的增长，但此后将出现巨大变化。在既定政策情景中，到 2050 年除了已经在建的项目外，每年还需额外增加 2400 亿立方米的出口能力。而在承诺目标情景中，仅需要当前正在建设的项目。在净零排放情景中，全球天然气需求的急剧下降意味着当前在建项目在许多情况下将不再需要。这促使大型资本密集型液化天然气项目的投资者面临一个关键困境：即在短期内天然气强劲的需求增长与长期天然气需求可能降低不确定性之间的不平衡问题。

5、俄罗斯将面临寻找新的天然气出口市场的艰难选择

制裁削弱了俄罗斯新建大型液化天然气项目的前景，而与天然气出口替代市场的距离很远，使得新建管道连接变得困难。在承诺目标情景中，俄罗斯在国际天然气交易中的份额将从 2021 年的 30% 下降到 2030 年的 15% 以下，其天然气出口净收入将从 2021 年的 750 亿美元下降到 2030 年的 250 亿美元。

6、低排放气体的应用前景光明

在承诺目标情景中，到 2030 年低排放氢生产将从目前的低水平上升至年产超过 3000 万吨，相当于超过 1000 亿立方米的天然气。在承诺目标情景中，生物甲烷产量也将增加。各国政府在低排放气体的增长方面应发挥关键的协调作用，特别是在制定标准和确保可靠的长期需求方面。

八、固体燃料展望

1、当前煤炭需求增长强势，但长期趋势仍取决于世界应对气候变化的决心

随着全球从疫情中复苏，全球煤炭需求在 2021 年强劲反弹，达到 56.4 亿吨，燃煤发电量在 2021 年达到历史最高水平。中国和印度都加大了对国内煤炭生产的投资，但全球产量难以跟上需求增长的步伐，导致煤炭价格飙升。世界第三大煤炭出口国俄罗斯因俄乌冲突使

得煤炭市场变得复杂，并给煤炭价格带来了额外的压力。煤炭的应用前景在很大程度上取决于世界应对气候变化的决心。在既定政策情景中，煤炭需求将逐渐下降。在承诺目标情景中，到 2030 年煤炭需求较目前水平将下降约 20%，到 2050 年将下降 70%；中国和印度的煤炭需求分别在 21 世纪 20 年代初和 21 世纪 20 年代末达到峰值。在 2050 年净零排放情景中，到 2030 年需求较目前将下降 45%，到 2050 年将下降 90%。

2、未来碳捕集、利用与封存技术将得到广泛应用

在既定政策情景中，对煤炭的碳捕集、利用与封存的应用非常有限。在承诺目标情景和净零排放情景中，到 2050 年消耗的约 5 亿吨标煤将配备碳捕集、利用与封存设施，相当于 2050 年承诺目标情景中约 30% 的煤炭需求和净零排放情景中 80% 以上的煤炭需求。在净零排放情景中，2021 年至 2050 年间未实施减排措施的煤炭用量将减少 99%。

3、在承诺目标情景中，到 2050 年煤炭消费量将大幅减少

在欧盟禁止从俄罗斯进口煤炭之后，欧洲煤炭消费的短暂增长来自包括非洲和哥伦比亚在内的多个地区。2021 年亚洲占全球煤炭进口量的四分之三以上，而且这一份额还将上升。尽管印度努力增加国内产量，但在既定政策情景中，印度将在 2020 年代中期成为全球最大的煤炭进口国，而迄今为止，中国仍然是全球最大的煤炭生产国和消费国。在承诺目标情景中，到 2050 年中国煤炭消费量将下降 60%，而在净零排放情景中将下降 90%。

4、净零排放情景中，到 2030 年传统生物质利用将被完全淘汰

2021 年，传统烹饪和取暖消耗了近 25 艾焦耳的生物质（相当于 8.3 亿吨标煤），这主要发生在非洲和亚洲的发展中经济体。在既定政策情景中，到 2030 年这一消耗将下降 20%，但仍会有大约 20 亿人无法获得清洁烹饪燃料。在承诺目标情景中，到 2030 年传统生物质

利用量将下降 60%以上。在净零排放情景中，到 2030 年将实现清洁烹饪的普及，传统生物质利用将被完全淘汰。2021 年消耗了大约 35 艾焦耳的现代固体生物质能，主要用于加热、发电以及转化为液态和气态生物燃料。到 2030 年，在三种情景下现代固体生物质能的使用量都会增加：既定政策情景下将增加 30%，承诺目标情景下增加 50%，净零排放情景下将增加 60%以上。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

美国能源部发布《工业脱碳路线图》

9 月 7 日，美国能源部（DOE）发布《脱碳工业路线图》¹¹，确定了减少美国制造业工业排放的四个关键途径及其研发和示范需求，针对 5 个碳密集型重点行业（钢铁、化工、食品、炼油和水泥）提出了到 2050 年实现净零排放的关键要点以及研发和示范行动计划，并为研发示范资助和政府及行业行动提出了 6 项行动建议。根据该路线图，DOE 在同日发布了 1.04 亿美元的资助公告以支持工业减排技术研发，重点关注 6 个领域：化工脱碳；钢铁脱碳；粮食和饮料产品脱碳；水泥和混凝土脱碳；造纸与林木产品脱碳；交叉领域脱碳技术。关键要点如下：

一、工业脱碳关键路径

DOE《工业脱碳路线图》提出了美国工业脱碳的 4 个关键途径：

（1）提高能效。该途径为短期脱碳解决方案的实施提供了最好的机遇，无需对工业过程进行重大改变，能够立即减少排放。关键目标包括：①提高系统效率、工艺产量和热能回收；②扩大能源管理；③加大部署智能制造以降低能耗。

（2）工业电气化。制造业用能中超过 50%用于热处理，而其中只有不到 5%实现了电气化。工业电气化包括过程热电气化或过程用

¹¹ DOE Industrial Decarbonization Roadmap.
<https://www.energy.gov/eere/industrial-decarbonization-roadmap>

氢电气化，关键目标包括：①提高现有电气技术或混合系统的能源效率；②创新的电气系统或混合系统；③克服在基于化石燃料的现有工艺系统中实施电气化技术的经济障碍和技术障碍。

(3) 低碳燃料、原料和能源替代。该途径主要包括灵活燃料工艺、清洁氢燃料和原料、生物燃料和生物原料、核能、聚光太阳热能和地热能。

(4) 碳捕集、利用和封存（CCUS）。前三个关键途径可先于CCUS部署，三者共可贡献约40%的目标碳减排。CCUS可作为实现长期减排的最有力途径，其重点在于提高效率、经济可行性和安全性，催化剂和工艺设计改进对于提高效率、降低成本和减少材料消耗或废物产量至关重要。

通过上述关键途径，到2050年共可使5个重点行业的碳排放减少87%，要实现净零排放还需使用替代方法及负排放技术，主要包括：①土地利用生态系统管理活动，如造林/再造林、使用生物炭、进行土壤碳管理等；②结合CCS的生物能源技术（BECCS）、从空气中捕集CO₂（直接空气碳捕集）等。

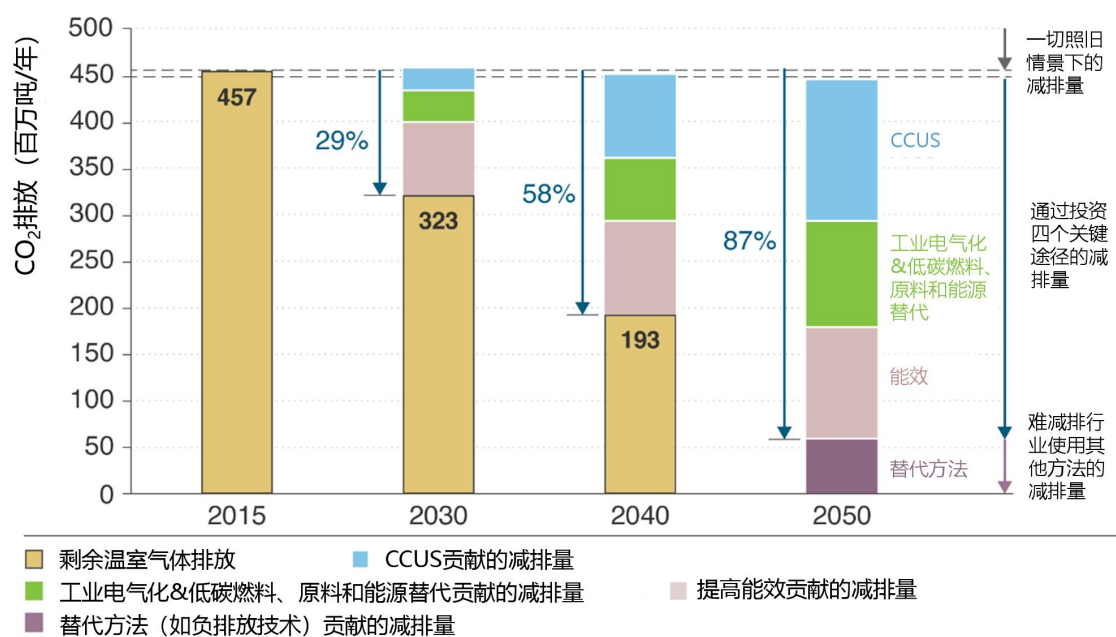


图1 美国5个碳密集型重点行业到2050年实现净零排放的关键途径及各途径的减排贡献（单位：百万吨CO₂/年）

2、研发及示范需求

上述 4 个关键途径需同时进行短、中、长期研发和示范投资，以实现工业脱碳所需的转型，从而实现净零排放目标。各途径分阶段研发和示范需求如表 1 所示，相应的特定研发投资技术领域如图 2 所示。

表 1 促进部门转型以实现工业脱碳的分阶段研发及示范需求

关键途径	2020-2025 年	2025-2030 年	2030-2040 年	2040-2050 年
能效	最大化现有工艺和流程的效率；扩大智能、可持续、高效的新兴技术的市场份额	广泛采用最先进的材料效率、循环经济以及清洁和分布式能源发电技术	广泛实现变革的生产力效益	最小化能源消耗和排放；近零废物
工业电气化	扩大现有电气化工艺和流程，并同时使用清洁电力；继续研发替代化石燃料的新型电气化技术	新型电气化提供热量、材料及动力的技术实现商业规模示范	变革型电气化工艺广泛部署	最大程度采用电气化
低碳燃料、原料和能源替代	通过研发和示范以促进下一代工艺和供应链发展，包括清洁或低碳燃料，并为工业部门提供更大灵活性、弹性和价值	示范和扩大使用低碳/无碳工艺和原料的生产技术	低碳/无碳产品获得市场认可	清洁工艺及产品成为主导
CCUS	确定并推进短期碳捕集和利用机会	开发 CO ₂ 基础设施；在工业场地通过 CCU 技术回收利用附近可用的 CO ₂	在难以减排行业部署 CCUS	在难以减排行业普及应用 CCUS

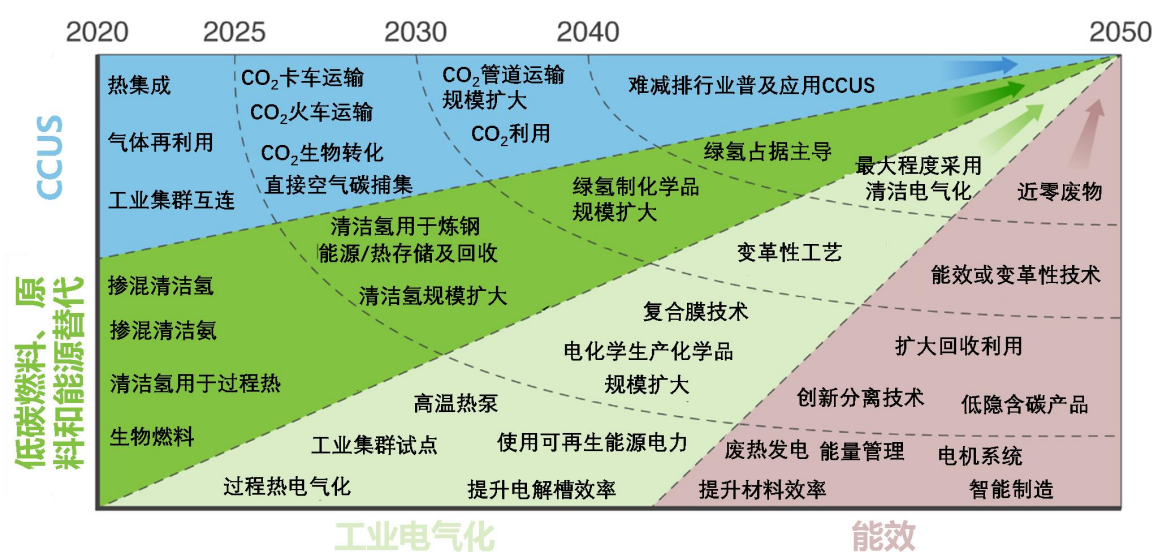


图 2 促进部门转型以实现工业脱碳的分阶段研发投资技术领域

二、工业部门碳密集型重要行业实现净零排放的脱碳路径

1、实现净零排放的脱碳路径关键点

路线图提出了钢铁、化工、食品、炼油和水泥这 5 个碳密集型行业到 2050 年实现净零排放的关键要点，如表 2 所示。

表 2 工业部门碳密集型重要行业到 2050 年实现净零排放的脱碳路径关键点

碳密集型行业	关键点
钢铁	<ul style="list-style-type: none"> • 在近零温室气体排放情景下，美国钢铁行业的温室气体排放量在 2050 年可减少到几乎为零的水平，而钢铁产量可增加 12% • 能效提高、向低碳和无碳燃料转型以及电气化可贡献超过三分之二的温室气体减排量 • 对于氢冶金、铁矿石电解和 CCUS 等变革性技术，需要进行积极的研发及示范 • 到 2050 年，炼钢过程对清洁氢和低碳电力的需求将大幅增加。需致力于研发与验证，提高电解槽效率
化工	<ul style="list-style-type: none"> • 化工脱碳需要多种途径相结合，包括：过程热；分离；使用氢、生物质和废物作为燃料或原料；CCUS；热能和电能存储；材料循环和提升材料利用效率 • 与工艺相关的脱碳途径包括非接触式能量传输（如热声学等声能传输和等离子体能量传输）、电力传输和电化学过程 • 以有效且经济的方式推进波动性能源（如太阳能和风能）的使用，从现有能源转型到低碳能源是一个早期机遇 • 需提高电解槽效率，推进电化学过程 • 系统效率和智能制造研究需扩展到综合化学设施的各个工艺
食品饮料	<ul style="list-style-type: none"> • 过程热电气化（尤其是烘箱和炸炉）、电锅炉和混合锅炉以及蒸发和巴氏杀菌过程电气化都需要进行研发与示范 • 需支持研究技术变革对最终产品的影响，从而缓解食品饮料制造涉及的安全和质量问题 • 为减少废物，需要研发和示范食品饮料工艺和技术，以延长产品的保质期。还需研究如何减少包装废物、增加回收利用机会、提高供应链可见性
炼油	<ul style="list-style-type: none"> • 五种能源密集型炼油工艺（加氢裂化、常压蒸馏、催化裂化、蒸汽甲烷重整和再生催化重整）占美国炼油业碳排放的大部分，是降低炼油排放最具成本效益的研发与示范机遇 • 炼油厂和交通燃料市场高度整合，美国能源相关碳排放总量的 35% 来自于炼油厂生产的交通燃料产生的汽车尾气碳排放 • 需开发碳密集度较低的新型炼油工艺，以生产低 / 净温室气体排放的液态烃燃料，有助于交通和化工脱碳
水泥	<ul style="list-style-type: none"> • 在温室气体排放接近于零的情景下，美国水泥制造业的温室气体排放到 2050 年可减少到几乎为零的水平，而水泥产量可增加 46% • CCUS 可为 2050 年达到近零排放贡献约 65% 的温室气体减排量 • 需对 CCUS 与创新化学组分水泥（主要是水泥生产中用辅助胶凝材料代替熟料）开

展积极的研发与示范、试点、部署和采购工作，以实现 2050 年温室气体净零排放

2、研发与示范优先事项

(1) 钢铁行业。包括：①炉气回收、大规模使用低碳氢用于直接还原炼铁、加热炉电气化、电解炼钢、氢等离子熔炼还原和顶气回收方面取得突破；②为钢铁设施开发成熟的战略能源管理系统提供技术援助，为部署现有低成本能源效率、余热回收（包括余热发电）和其他脱碳技术提供技术援助；③示范并快速采用智能制造和物联网技术，以提高能源生产率；④促进和加速向低碳燃料和过程热解决方案过渡的技术部署活动，包括具有成本竞争力的规模化示范和技术经济性分析（如感应炉、高炉使用清洁氢）；⑤重点投资降低 CCS 技术成本并提高效率的技术，以促进钢铁生产路线脱碳，例如使用 CCS 在高炉中回收顶煤气。

(2) 化工行业。包括：①从传统的氨、甲醇和乙烯生产路线转变为使用以低碳能源和/或 CCUS+甲烷蒸汽重整（SMR）制取的氢气为原料的工艺；②提高低能耗分离方法（如声场和电场低温技术）的效率、成本和耐用性，并开发非平衡技术来驱动反应或避免进行分离（如聚合物的直接合成、高选择性转化技术；③开发更有效的方法来识别、分类和回收材料，同时保持材料的特性；④支持研发、改进化学转化过程的催化剂，通过提高产量减少碳足迹；⑤改进化学回收；⑥探索生物质和废物用作化学品生产原料和为化工生产过程提供热量和能源的技术；⑦增加使用生物质并与 CCUS 相结合以降低排放；⑧开发利用废气生产生物合成燃料和将 CO₂ 转化为高价值产品（如生物聚合物和食品蛋白）的工艺。

(3) 食品饮料行业。包括：①在可能的情况下，转向电热烘箱、炸炉、锅炉和其他电气化技术；②通过生命周期评估确定的方法和制造商之间的合作，减少整个供应链中的食物浪费；③增加热泵研发，以回收和供应食品和饮料制造过程中的工艺热；④通过替代包装和减

少包装废物等方法促进回收和材料效率；⑤投资研发变革性技术，如深冷分离、防结冰先进涂层、高级酶和低产乙醇酵母。

(4) 炼油行业。包括：①研发可提升能源、材料、系统效率的技术，以及创新的蒸馏和分离技术以降低成本；②将无组织甲烷排放量降至接近零；③通过吸附剂、氧化脱硫和电化学脱硫的研发，实现零氢脱硫工艺；④为持续推动提高工艺能效、消除浪费和降低产品含碳量提供研发支持；⑤开发利用低净碳原料（如 CO₂ 和清洁氢、生物质和其他废物流）生产低净碳排放液体运输燃料的技术，其规模与当前炼油厂相当；⑥开发将过剩釜馏气转化为化学原料的技术；⑦开发集中式碳捕集技术；开发使用氢燃烧提供高温工艺热的技术。

(5) 水泥行业。包括：①利用低成本解决方案，如能效、能量管理和减少余热或余热回收技术；②探索继续提高材料效率和灵活性的途径，包括再利用、再循环和翻新，以及低能源消耗和碳排放的新型水泥；③扩大基础设施、集成能力和知识，以尽可能捕集、运输和再利用 CO₂；④减少浪费的先进方法，包括混凝土施工中使用循环经济方法；⑤增加低碳胶结材料和天然辅助胶凝材料的使用；⑥开发利用 CO₂ 的其他途径，包括全面部署新型碳捕集技术。

3、研发与示范行动计划

(1) 钢铁行业

短期（2020-2025 年）：①支持资金成本相对较低的解决方案，如能效、能量管理和减少余热/余热回收解决方案；②实现向低碳燃料和工艺热解决方案的转型，如再热炉和下游炉电气化、清洁氢用于工艺供热、生物燃料；③继续推进 CCUS 与难以减排的来源整合。

中期（2025-2030 年）：①探索继续提高材料效率和灵活性的途径，包括再利用、回收利用和翻新；②投资低碳工艺改造路线，如熔融氧化物电解、扩大感应电炉规模、清洁氢直接还原铁电弧炉；③扩展基础设施和整合能力及知识，尽可能以最高效率和最佳经济效益捕

集难减碳源的 CO₂；④探索使用低碳、净零碳或负碳方法生产碳还原剂的创新途径，例如使用清洁电力共电解 CO₂ 和水生成合成气用于直接还原铁。

长期（2030-2050 年）：①推进模块化制造方法，扩大市场规模和占比；②降低变革性炼钢方法的技术和经济挑战性，加快开发进度；③开发在现场或附近设施利用废气（H₂、CO、CO₂ 等）的其他途径，提高气体分离效率，显著降低其能源和资源需求，降低部署门槛。

（2）化工行业

短期（2020-2025 年）：①推动低成本解决方案的研发与验证，如能源/材料/系统效率、分离和干燥技术创新、传热效率、高碳能源向低碳能源转换、智能制造、低温工艺电气化；②推进工艺用热脱碳，低温推进到中温，在适当的情况下以高温过程热为目标；③研究行业如何与合作伙伴一同更有效地利用波动性能源和储能，开发和部署路线，实施能源转换和混合能源解决方案；④开发更有效的制氢电解槽、化学过程、新型能量传输、创新分离技术；⑤在有利的地点（如产业集群）进行试验，降低应用门槛；⑥研究工艺整合，降低 CCUS 实施成本；⑦推进低碳解决方案有效性、生命周期评估、系统效率和其他分析相关数据的存储、编目和可达性，以支持评估技术在减少能源使用、温室气体排放和产品碳含量方面的有效性；⑧进行碳基化学品的生物制造，使用生物催化剂以显著减少工艺用热需求，并开发多种化学转化的集成工艺以减少反应容器；⑨使用生物质和废物原料生产碳基化学品，降低石油投入，生产净排放或负排放化学品。

中期（2025-2030 年）：①支持使用低碳氢（如电解）生产氨、甲醇和塑料的研发与示范；②支持利用电气化和低碳能源进行工艺和原料改造以及 CO₂ 利用技术的研发与示范；③启动示范与投资，支持变革性工艺技术（如复合膜）；④开发通过氢燃烧提供高温过程热的技术；⑤研究快速扩大变革性技术规模的改进途径；⑤支持研发与验

证，持续推动提高工艺能源效率、消除浪费并降低产品碳含量；⑥开发新型途径和反应器设计，扩展能够利用生物途径生产化学品的种类。

长期（2030-2050年）：①支持研发与示范，发现能够实现变革性化学工艺的基础科学；②研究变革性技术的连接策略，以便与未来的基础设施无缝连接；③预测前体、原料和材料的市场可用性；④加深对快速扩展技术关键因素的理解，在其他方案不可行的情况下提高改进效率；⑤研究具有性能优势的生物产品，其性能优于石油基产品，可减少材料总用量，大幅减少温室气体排放；⑥开发更高效和强化的生物制造工艺设计，包括无细胞生物制品生产，实现连续生物化学生产工艺。

（3）食品饮料行业

短期（2020-2025年）：①如有可能，开发电热烘箱、炸炉、锅炉等其他技术，尤其是在电价下降时；②通过生命周期评估确定的方法和制造商之间的合作，减少整个供应链中食品浪费，如废物流再利用、源头减量、供应链可见性、加工和包装的改进等；③投资智能制造战略，如系统优化、热系统整合和制冷优化；④支持将低碳燃料和生物燃料用于食品制造原料的研发与示范，以减少排放；⑤研发和示范将CO₂作为原料的技术，减少燃料燃烧和发酵过程中的排放，进一步挖掘CCUS的应用潜力。

中期（2025-2030年）：①研发并示范更好地共享和存储低品位余热的方式，加强废物流再利用，包括废热；②增强研发和示范自动化和模块化技术；③增强对热泵的研发与示范，以回收和供应食品饮料制造过程中的工艺用热；④通过替代包装和减少塑料废物等方法，促进回收和材料效率；⑤推进对深冷分离、防结冰先进涂层、高级酶、低产乙醇酵母等潜在变革性技术的研发与示范；⑥支持研发和示范可再生天然气、利用核能生产合成天然气以及将清洁氢用于中温工艺热。

长期（2030-2050年）：①开发将清洁氢用于食品制造过程的技术；②加深对快速推进变革性技术所需条件的理解；③大规模整合新工艺、新燃料和新技术。

（4）炼油行业

短期（2020-2025年）：①推动低成本解决方案的研发与验证，如能源/材料/系统效率、蒸馏和分离技术创新、传热效率、高碳能源向低碳能源转换、低温过程热电气化；②通过进一步开发供应链数据、支持技术研发和示范部署、开发温室气体核算机制以提高低碳解决方案和供应链系统效率等方式，推进采用低温室气体排放的替代燃料；③研发和示范吸附剂、氧化脱硫和电化学脱硫，以推进零氢脱硫工艺；④将无组织甲烷排放量降至近零水平；⑤研究行业如何与合作伙伴一同更有效地利用波动性能源和储能，开发和部署路线，实施能源转换和混合能源解决方案；⑥开发更有效的制氢电解槽、化学过程、新型能量传输、创新分离技术；⑦在有利的地点（如产业集群）进行试验，降低应用门槛；⑧开发热集成技术，降低CCUS实施成本。

中期（2025-2030年）：①支持研发和示范电气化和低碳能源技术，以实现工艺和原料转化；②支持研发和示范可再生能源和核能制氢工艺，以及用于液体燃料原料的碳捕集技术；③开发使用氢燃烧提供高温工艺热的技术；④研究快速扩展变革性技术的改进路线；⑤支持研发和示范提高工艺能源效率、消除浪费和降低产品碳含量的技术。

长期（2030-2050年）：支持研发与示范，以实现到2050年用新的低碳方式生产液态烃燃料、润滑剂和其他炼油产品，从而实现炼油行业转型，如：①以高能效和高成本效益的方式将CO₂还原为可行的原料，以转化为符合现有基础设施和最终产品用途的烃类燃料和产品；②应用先进核反应堆产生的高品位热能；③研究与未来基础设施相符的变革性技术的连接策略，包括现有碳氢化合物管道、未来CO₂管道、脱碳电网和清洁氢的可用性；④预测前体、原料和材料的市场可用性；

⑤加深对快速扩展技术关键因素的理解，在其他方案不可行的情况下提高效率。

（5）水泥行业

短期（2020-2025年）：①支持利用低成本解决方案，如能效、能量管理和减少余热或余热回收技术；②实现向低碳燃料和工艺热的转型，如使用清洁氢、生物燃料；③继续推进在难减排碳源整合 CCUS 技术，如在水泥厂进行燃烧后碳捕集的试点。

中期（2025-2030年）：①探索继续提高材料效率和灵活性的途径，包括再利用、回收利用和翻新；②投资低碳工艺改造和路线，如预热煅烧炉电气化、太阳能或核能供热，以及大规模使用氢作为燃料；③扩大基础设施、集成能力和知识，以尽可能捕集、运输和再利用 CO₂。

长期（2030-2050年）：①开发减少浪费的方法，包括混凝土施工中使用循环经济方法、开发低碳胶结材料和天然辅助胶凝材料；②干燥装置全面电气化，使用 100%清洁能源，或大规模使用清洁氢作为替代燃料；③开发利用二氧化碳的其他途径，包括全面部署新型碳捕集技术。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

美国能源部发布国家清洁氢能战略和路线图草案

9月22日，美国能源部（DOE）发布《国家清洁氢能战略和路线图（草案）》¹²，指出到2050年清洁氢能将贡献约10%的碳减排量，到2030、2040和2050年美国清洁氢需求将分别达到1000、2000和5000万吨/年。该草案确定了美国清洁氢能价值链的近、中、长期行动，关键点如下：

一、关键战略方向

¹² DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap Draft.
<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>

该路线图草案优先考虑三个关键战略方向，以确保清洁氢能作为有效的脱碳工具被开发和利用，并为美国带来最大利益。包括：

1、明确清洁氢能的战略性地位及高影响力用途。这将确保清洁氢能用于价值最高的应用场景。在这些应用场景中，通常深度脱碳替代方案有限。具体包括工业部门、重型卡车和实现清洁电网的长期储能。长期机遇包括出口清洁氢或氢载体的潜力，以及为美国的盟友实现能源安全。

2、降低清洁氢能成本。“氢能攻关计划”已于 2021 年启动，将促进氢能创新和规模化发展，刺激私营部门投资，促进整个氢能供应链发展，并大幅降低清洁氢能成本。还将努力解决关键材料和供应链的脆弱性，并针对效率、耐用性和可回收性进行设计。

3、专注于区域网络建设。包括区域清洁氢能中心，以实现区域大规模清洁氢能生产和终端应用，建设关键基础设施，推动规模化发展，促进市场腾飞。优先事项将包括短期影响，创造工作机会，以及快速启动国内制造业和私人投资。

二、近、中、长期行动时间表

路线图草案制定了清洁氢能的近、中、长期行动时间表，如图 1 所示。

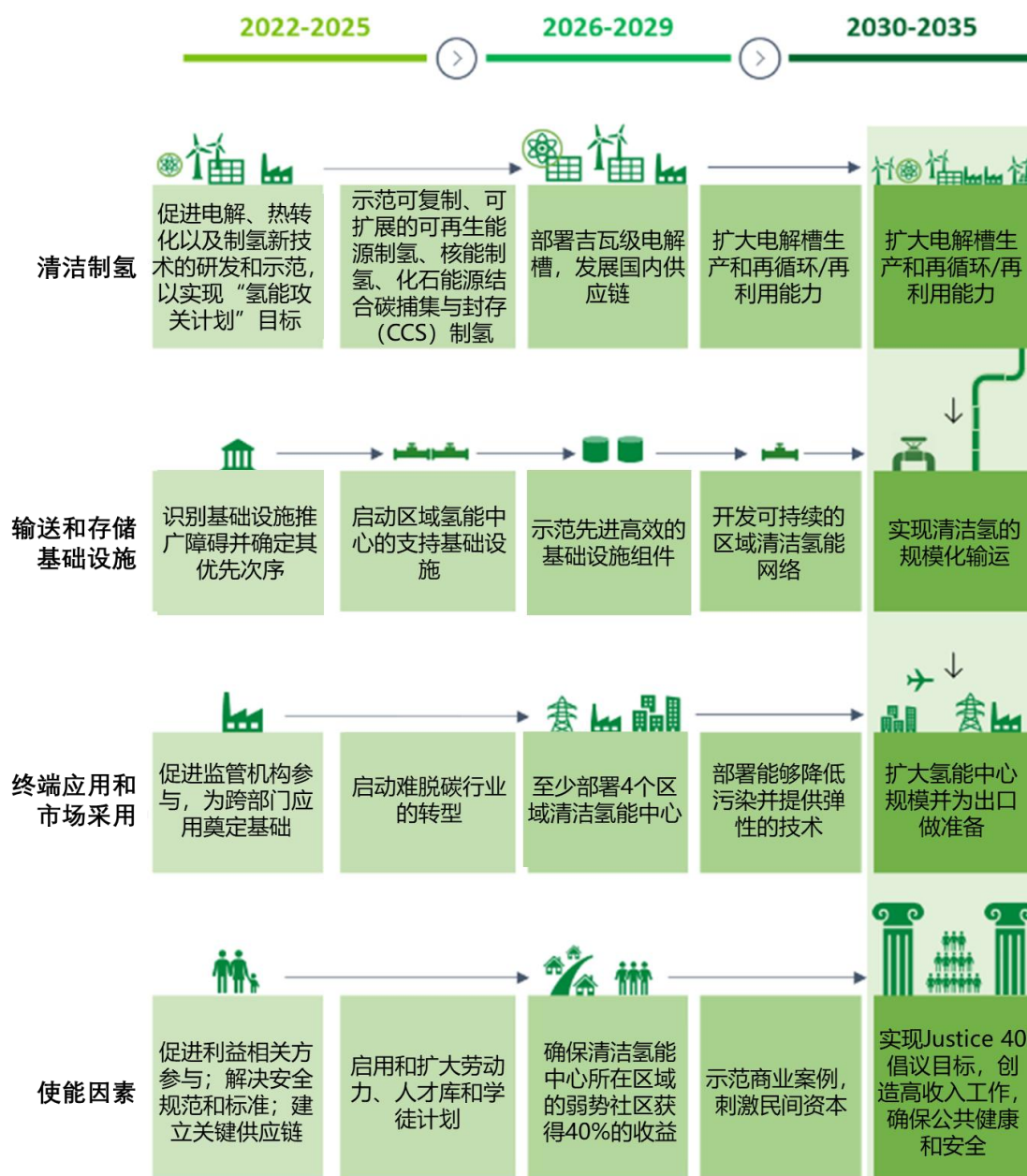


图 1 美国清洁氢能战略和路线图近中长期行动时间表

三、各阶段支持行动

1、清洁制氢

近期（2022-2025 年）：①从生命周期、可持续性、成本、区域和公平角度评估路径，以优先考虑策略，确定差距；②建立清洁氢标准；③示范热解制氢、废物制氢、可再生能源制氢和核能制氢等清洁技术；④通过对制造工艺、电堆、辅助系统组件的研发、示范和部署，大规模降低电解槽成本；⑤通过模块化设计和过程强化的研发、示范

和部署，降低热解制氢技术成本；⑥开发低成本、耐用的膜和分离材料；⑦促进组件标准化，减少对关键材料的依赖，并建立稳健的供应链；⑧设计并实施加速应力试验技术以评估和改善耐久性；⑨发布关于路径、排放和成本的个案研究；⑩为今后的部署制定严格的数据收集和监测框架。

中期（2026-2029年）：①实现电解制氢成本2美元/千克；②实现国内吉瓦级规模电解槽生产能力；③可最大限度地减少关键材料用量，同时实现性能和耐久性有竞争力的催化剂和组件；④优化电解槽和清洁能源供应之间的集成，以降低成本，提高效率和弹性；⑤提出目前实验室规模下最有前景的制氢概念，如热化学、光电化学或生物法制氢；⑥从真实环境的示范中收集数据，为研发、示范和部署提供信息，并持续改善性能和耐久性；⑦细化和更新路径评估，以确保以最可持续、公平、弹性和可负担的方法为目标；⑧通过分析经验教训、最佳做法和利益相关方反馈来确定扩大规模的途径和好处。

长期（2030-2035年）：①大规模部署可再生能源制氢、核能制氢和化石能源结合CCS制氢；②到2030年，清洁氢产能至少达到1000万吨/年；③不同来源的清洁氢成本达到1美元/千克；④示范可最大限度地减少关键材料使用，并达到目标性能和耐久性的电解电堆；⑤利用不同原料（如废水或高温热）大规模生产氢的商业可行方法；⑥确保建设弹性和可持续的国内供应链，适用于所采用的所有制氢途径，并能够不依赖于进口；⑦从真实环境的部署中持续收集数据，为研发、示范和部署提供信息，确定差距并完善战略；⑧应用最佳做法、经验教训和分析，包括通过全球合作和可持续性框架，确保提出最可持续、公平、弹性且经济的办法，以最大限度地发挥效益。

2、输送和存储基础设施

近期（2022-2025年）：①开发和更新分析模型和工具，以评估输送和存储技术路径、确定差距并确定策略的优先顺序；②开发严格

监测和减少氢泄漏和汽化损耗的技术；③评估管道和组件材料与氢气和氢气/天然气混合物的相容性；④提出低成本、高效的氢液化和降低汽化损耗的新方法；⑤发现和开发用于大量存储和分配的氢载体材料；⑥识别可用于大量储氢的地质地层，以及相关的开发和运行要求；⑦开发和优化关键应用中的氢基础设施设计，如工业和储能；⑧制定和协调氢用于重型卡车和越野车辆的燃料协议；⑨加快研发、示范和部署，以降低高压和液氢储罐成本，包括碳纤维复合材料容器；⑩建立数据监测和收集框架，评估上游和现场排放。

中期（2026-2029年）：①验证和改进分析模型和工具，以确定各种应用的输送和存储优先顺序；②示范高效可靠的氢气管道压缩机运行；③量化气氢和液氢基础设施损耗，为大规模部署提供信息；④开发商业规模的新型高效氢气液化系统设计；⑤提出有前景的氢载体系统概念，设计可靠、低成本的系统；⑥启动区域大规模储氢示范，包括地下储氢，并确保当地利益；⑦示范新型、高效、低成本的大规模氢气输送方法；⑧部署可扩展的加氢站，以支持氢能交通早期市场，如重型卡车和公共汽车；⑨部署针对潜在的氢气和其他排放/释放的监测系统，确保数据收集；在关键地点设计可持续和公平的区域清洁氢能网络，以最大限度地发挥效益，确保能源正义、环境的正义和公平。

长期（2030-2035年）：①与当地社区和利益相关方合作，设计针对区域供需优化的氢能基础设施网络，以最大限度地发挥效益，确保实现能源、环境和公平目标；②示范先进液化技术，比当前概念的效率提高一倍；③制定长期储氢计划/氢战略储备，以确保供应弹性；④部署至少4个拥有先进低成本清洁氢存储和基础设施的区域清洁氢能中心；⑤从实际环境中的氢分配示范（如通过管道或载体）收集数据，包括排放数据，为研发、示范和部署提供信息，从而降低成本并提高可靠性；⑥持续收集数据，为扩大最佳输送和存储技术部署以

及研发、示范和部署提供信息；⑦确保在不同的利益相关方之间共享与氢能基础设施相关的任何安全或其他最佳实践，以实现持续改进；⑧通过氢能基础设施的全球合作，为长期投资计划和氢出口机会提供信息。

3、终端应用和市场采用

近期（2022-2025年）：①为清洁氢的生产、加工、输运、存储和终端应用的大规模部署奠定监管基础；②开展跨领域工作（如核能、可再生能源、化石燃料、CCS、储能），确定监管和政策差距，以及解决这些差距的关键战略，以最大限度地减少影响；③制定氢气管道和大型项目的最新指南，促进利益相关方参与并解决环境、能源和公平优先事项；④启动难脱碳行业向清洁氢过渡，并确定可能扩大规模的具体场景（如氨、炼油厂、钢铁）；⑤推进有效的终端应用技术并扩大规模；⑥通过建模和改进数据采集，量化氢气泄漏的气候影响；⑦制定最佳做法和指南，以评估实际部署的清洁氢的生命周期排放，并为“原产地保证”和认证计划提供信息。

中期（2026-2029年）：①使氢能技术相关的规范和标准能够实现国际协调；②开发市场模式以加快部署进展，克服监管障碍，促进可再生能源电力用于电解槽；③通过公开访问的平台分享安全最佳做法以及从早期部署中汲取的经验教训；④部署至少两个清洁氢能中心，示范氢在难脱碳行业（如工业和重型卡车）中的使用；⑤制定国家对氢掺混限制的指南；⑥供应清洁氢，使得到2030年利用生物质和废物生产至少30亿加仑的可持续航空燃料；⑦提高电解槽、燃料电池和氢价值链中其他部件的原料回收和循环利用的效率和成本效益，以使其能够不依赖于进口。

长期（2030-2035年）：①开发市场模式监管指南，以实现清洁氢的出口；②利用从大规模部署中获得的经验教训，确定未来增长的优先领域，重点是支持最有效、经济、与气候目标一致的整体方法，

最大限度地改善公共健康安全和环境；③示范和量化氢能在改进未来清洁能源系统的弹性和避免中断供应方面的益处；④到 2030 年示范用于发电的纯氢燃料超低氮氧化物排放燃气轮机和低铂族金属含量燃料电池；⑤启动至少一个清洁氢能中心，示范氢在清洁电网储能中的应用，并量化氢支持到 2035 年实现零碳电网的机会，包括区域因素。

4、使能因素、能源及环境正义

近期（2022-2025 年）：①制定和实施广泛和包容性的利益相关方参与框架，并收集反馈；②为团队和组织以及联邦资助的示范项目的地理/社区选址确定多样性、公平性、包容性和其他关键优先事项的衡量标准；③推出工具和平台，以促进伙伴关系、包容性和市场部署；④为工人制定再培训计划，使其能够获得近期和长期的高薪工作；⑤为学生制定招聘和职业计划，并促进多样性、公平性和包容性；⑥制定和实施可持续性框架以及环保最佳做法；⑦开发教育资源，以支持氢能中心社区推广和参与战略；⑧改进区域优先事项数据收集并确定应用，为清洁氢的部署提供参考。

中期（2026-2029 年）：①完善和不断改进利益相关方的参与和包容性，并应用所学到的经验；②促进公私合作关系，以实现包容性并加速进展；③与氢能中心所在地区的弱势社区制定和执行社区获利协议；④部署氢能技术以减少未达标地区的排放，并为当地和弱势社区提供弹性、工作和其他关键利益；⑤评估氢能技术对区域水供应和其他资源的影响；⑥进行环境和风险评估，总结经验教训，包括通过全球和区域协作；⑦与工会合作，发展和扩大氢能技术的注册学徒计划；⑧利用氢能安全中心和其他平台，分享最佳做法和经验教训。

长期（2030-2035 年）：①量化部署氢能的益处，并确定额外的政策或计划优先事项，以加快进展；②在弱势社区部署清洁氢能技术的制造设施；③评估区域清洁氢能中心的技术-社会-经济影响；④开

发和完善市场结构，以公平分配新技术的成本和收益；⑤确保将适应性、网络、弹性和其他缓解方法纳入扩大规模的战略计划；⑥更新和完善可持续性框架和最佳做法，为未来部署提供信息；⑦利用全球合作和倡议，最大限度地取得研发、示范和部署的成功，并确保清洁能源转型公平。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

美国能源部投入 4 亿美元支持能源科学前沿基础研究

10月4日，美国能源部（DOE）宣布投入4亿美元基础研究经费¹³，以支持DOE清洁能源、经济发展和国家安全目标。该项资金将推进DOE科学办公室在基础能源科学、生物和环境研究、核物理等方面的科学研究。具体包括：

一、先进科学计算研究

先进科学计算研究（ASCR）的任务是推动应用数学和计算机科学的发展；与各学科合作，提供最复杂的计算科学应用；提升先进的网络和计算能力；与包括美国工业界在内的研究界合作开发用于科学和工程的下一代计算硬件和软件工具。优先研究事项包括：①开发数学模型、方法和算法，以准确描述和预测涉及跨越不同时间和/或空间尺度过程的复杂系统的行为；②完成超大规模计算系统的设计和开发及其在科研上的高效使用；③将大量来自实验和模拟的数据转化为科研成果；④开发和提供最前沿的计算、网络和协作工具与设施。

涉及交叉研究领域包括应用数学、计算机科学、先进计算技术。

二、基础能源科学

基础能源科学（BES）的任务是支持基础研究，以了解、预测并最终在电子、原子和分子水平调控物质和能量。优先研究事项包括：①清洁能源的基础科学：通过研究加深对清洁能源的认知和科学基础，

¹³ DOE Announces \$400 Million in Research Funding to Advance Scientific Frontiers.
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-400-million-research-funding-advance-scientific-frontiers>

包括电能和热能储存、直接空气碳捕集；氢气的生产、储存和使用；太阳能转化为电能和燃料；地下科学。②关键材料/矿物：通过研究了解稀土和铂族元素的基本特性，以改进分离和提取过程，设计开发关键材料的替代品。③制造领域基础科学：通过研究了解可循环、清洁和可扩展的合成、加工和制造的基础化学和材料工艺；推进表征与多尺度模型和工具开发；在设计材料、工艺和产品的时候同时考虑功能和用途。④人工智能和机器学习（AI/ML）：通过研究推进数据科学和 AI/ML 的方法及应用以加速基础研究。⑤量子信息科学（QIS）：通过研究推动对可用于量子信息科学系统中的量子现象的理解，同时推动量子计算在化学和材料科学研究中的应用。

涉及交叉研究领域包括材料化学、生物分子材料、合成与加工科学、凝聚态物理、材料的物理行为、机械行为与辐射效应、X 射线散射、中子散射、电子和扫描探针显微镜、光学科学、气相物理化学、计算与理论化学、界面分子科学、催化科学、分离科学、地球科学、光合作用系统、物理生物科学、加速器和探测器研究。

三、生物和环境研究

生物与环境研究（BER）的任务是支持革命性科学和科学用户设施，以实现清洁和气候创新的复杂生物、地球和环境系统的预测性理解。

涉及交叉研究领域包括生物系统科学、地球与环境系统科学。

四、聚变能源科学

聚变能源科学（FES）的任务是增加对极高温度和密度物质的基本理解，并建立开发聚变能源所需的科学基础。这是通过对等离子体、物质的第四态以及它如何与周围环境相互作用展开研究来实现的。优先研究事项包括：①解决聚变试验工厂（FPP）设计所需的科学和技术。②支持专注于基础和低温等离子体科学（应用于微电子学）和实验室高能量密度等离子体前沿研究的等离子体科学。③投资于包括人

人工智能和机器学习（AI/ML）、改变先进制造业的基础科学和量子信息科学（QIS）在内的转型技术。

涉及交叉研究领域包括燃烧等离子体科学、先进托卡马克、球形托卡马克、长脉冲托卡马克、长脉冲材料、等离子体科学与技术、基础理论与模拟。

五、高能物理

高能物理（HEP）的任务通过发现物质和能量的基本成分，探索它们之间的相互作用，以及探索空间和时间的基本性质，理解宇宙在最基本层面上的内在运行。重点关注三个实验科学前沿：①能量前沿：使用强大的加速器创造新粒子，揭示它们的相互作用，并研究基本力。②强度前沿：利用强粒子束和高灵敏度探测器寻找替代路径，通过研究自然界中很少发生的事件来研究基本力和粒子相互作用，并提供这些现象的精确测量。③宇宙前沿：通过非加速器实验观察宇宙并探测宇宙粒子，对自然现象进行测量，可以提供关于宇宙加速本质的信息，包括暗能量和宇宙微波背景；寻找暗物质粒子；研究物质和能量对宇宙的影响。

涉及交叉研究领域包括理论粒子物理学、高能物理理论研究、高能物理计算研究、加速器科学和技术的研究和开发、探测器研发、高能物理研究的量子信息科学。

六、核物理

核物理（NP）的任务是探索宇宙中一个永恒的谜团，即物质的本质：它的基本成分以及它们如何相互作用形成元素和观察到的特性。尽管目前已经可以很好地理解构成核物质的基本粒子夸克和胶子，但它们是如何相互作用和结合形成今天宇宙中所观察到的不同类型的物质，以及在宇宙演化过程中是如何形成的，在很大程度上仍然是未知。优先研究事项包括：①探索质子的质量和自旋是如何在质子内部动态产生；②探索夸克和胶子的约束机制；③探寻新的奇异粒子和自

然对称性破缺机制；④了解核子（质子和中子）如何结合形成原子核，以及自然界中核存在的极限；⑤自宇宙起源以来，重核是如何出现的，它们是如何在宇宙中形成的；⑥研究多体系统中强大力量的本质；⑦建立空间、能源和研究的高级核数据；⑧寻找未发现的核物质形式；⑨设计、建设和运行国家科学用户设施，开发新型探测器和加速器仪器。

涉及交叉研究领域包括中能核物理学、重离子核物理学、核结构与核天体物理学、核数据管理、核物理学计算、核物理加速器研发、量子信息科学。

七、同位素研发和生产

同位素研发和生产的任务包括：①生产或分配美国供应短缺或无法获得的稳定同位素和放射性同位素，以及提供相关的同位素服务；②保持特别研究团体对制造同位素所需的关键国家基础设施和核心能力的准备状态，并确保国家做好准备，应对国家紧急情况期间供应链的缺口；③发展变革性同位素生产、分离和富集技术；④培养独特的、具有世界领先核心竞争力的多元化、包容性的国内研究队伍；⑤减少美国对外国同位素供应的依赖，构建强大的弹性供应链。

涉及交叉研究领域包括同位素生产研究、同位素加工、提纯、分离和放射化学合成、生物示踪和成像、同位素浓缩技术、核与放射化学、核物理、加速器和反应堆科学、材料科学和工程、分离科学、核数据等。

八、加速器研发和生产

加速器研发和生产（ARDAP）的任务是帮助协调科学加速器研发办公室，推动与 DOE、其他联邦机构和美国工业相关的加速器科学技术发展，促进加速器技术的发展和应用程序，支持和发展一支技术熟练、多元化和包容性的劳动力队伍，并提供加速器设计和工程资源。优先研究事项包括：①开发超导加速器系统：射频加速器和高磁场磁

体，包括超导材料、工程和低温技术的研究。②进行束物理和高保真计算机建模，以及先进的诊断和控制系统，包括理论和模拟，以精确建模下一代粒子加速器；能更好地诊断较复杂和自动化的控制系统；发展粒子对撞机束物理学，包括先进冷却技术等。③开发更高亮度和更大电流的电子源、高强度的质子和离子源和更强大的兆瓦级目标，用于二次光束生产。④开发高平均功率射频和超快激光源，包括功率处理设备的改进，如用于射频系统的波导窗和耦合器，以及用于激光系统的高功率光学和涂层。⑤进行加速器科学技术的高风险高回报进展研究，包括新粒子源、先进束流动力学、新加速技术和下一代材料。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

澳大利亚投入 1.6 亿澳元支持清洁能源及工业减排技术

近期，澳大利亚可再生能源署（ARENA）宣布多项资助，共计投入 1.6 亿澳元支持储能、氢能、工业减排等技术发展，详情如下：

1、储能技术

（1）压缩空气储能。10 月 21 日，ARENA 宣布投入 4500 万澳元¹⁴，支持利用新南威尔士州布罗肯希尔的废弃矿山，建设 200 兆瓦/1600 兆瓦时的先进绝热压缩空气储能设施，该项目建成后将成为世界最大的压缩空气储能项目之一，可提供至少 8 小时的储能时间。

（2）电站储热改造。10 月 21 日，ARENA 宣布提供 42 万澳元资金¹⁵，支持将储热系统集成到南澳大利亚的托伦斯岛 B 电站的可行性研究，包括通过存储的热量为工业供电的经济可行性，以及中试规模的热电联产解决方案。

2、负荷灵活性技术

10 月 14 日，ARENA 宣布向澳大利亚壳牌能源公司提供 910 万

¹⁴ Repurposing Broken Hill mine for renewable energy storage using compressed air.

<https://arena.gov.au/news/repurposing-broken-hill-mine-for-renewable-energy-storage-using-compressed-air/>

¹⁵ Repurposing power stations for renewable thermal energy storage solutions.

<https://arena.gov.au/news/repurposing-power-stations-for-renewable-thermal-energy-storage-solutions/>

澳元¹⁶，在至少 40 个商业和工业场所实施负荷控制，以示范约 21.5 兆瓦的灵活性需求容量。该项目将建立一个整体解决方案以优化能源系统，包括供暖、通风和空调、制冷、电动汽车充电控制以及现场太阳能光伏和储能集成。

3、工业碳减排

9 月 29 日，ARENA 宣布启动 4300 万澳元的“工业能源转型研究计划”¹⁷，旨在支持可行性研究和工程研究，建立可复制商业案例，示范工业能效和可再生能源技术解决方案。重点关注如下主题：①可减少现有工艺能耗的能效技术，如用于过程热的热泵、改进过程控制、高效的工业设备、废热和能量回收；②可再生能源或使能技术，可显著减少工业过程的温室气体排放，包括可再生能源电气化技术、可再生燃料（如生物燃料或可再生氨）、太阳能、地热能、储能（包括储热）、负荷灵活性技术。

10 月 6 日，ARENA 宣布投入 150 万澳元，支持开发海上风电场用于炼铝厂脱碳项目的第一阶段研究¹⁸，进行风能资源评估以加速该项目的早期开发。该项目计划开发 1000 兆瓦的海上风电，为波特兰炼铝厂提供可再生能源电力以实现脱碳，并通过其变电站连接到国家电力市场，以示范波动性可再生能源发电与大规模、持续性工业负荷的直接整合。此次资助的第一阶段研究将部署陆基光探测和测距设备，以验证拟建海上风电场的风力资源。

4、清洁氢/氨技术

9 月 16 日，ARENA 宣布投入 4750 万澳元支持 ENGIE 公司建设可再生能源电解制氢工厂¹⁹，包括 10 兆瓦电解槽、18 兆瓦光伏系统和 10 兆瓦/5 兆瓦时的锂离子电池系统，预计建成后将成为澳大利亚

¹⁶ Unlocking flexible demand at commercial and industrial sites.

<https://arena.gov.au/news/unlocking-flexible-demand-at-commercial-and-industrial-sites/>

¹⁷ \$43 million to help industry to reduce emissions.

<https://arena.gov.au/news/43-million-to-help-industry-to-reduce-emissions/>

¹⁸ Offshore wind could power Portland aluminium smelter.

<https://arena.gov.au/news/offshore-wind-could-power-portland-aluminium-smelter/>

¹⁹ Australia's first large scale hydrogen plant to be built in Pilbara.

<https://arena.gov.au/news/australias-first-large-scale-hydrogen-plant-to-be-built-in-pilbara/>

最大的电解槽设施，年产量达到 640 吨。

10 月 7 日，ARENA 宣布投入 1370 万澳元支持对可再生氨项目进行前端工程设计研究²⁰，以开发大型电解制氢生产装置并改造现有制氨工厂，实现 100%可再生氨。该项目将部署一个 500 兆瓦电解槽，预计产能达到 7 万吨/年，如成功实施将成为全球最大电解槽设施之一。项目还将改造位于吉布森岛的制氨工厂，实现年产 40 万吨可再生氨，将成为该国首个完全使用可再生氢助力现有制氨厂脱碳的大型项目。

[中国科学院武汉文献情报中心 岳芳]

调节表面电势实现全钙钛矿叠层电池创纪录 2.19 V 开路电压

金属卤化物钙钛矿因其宽带隙（约 1.2-3.0 eV），使其能够与硅、铜铟镓硒（CIGS）和有机太阳能电池构建叠层太阳能电池。目前，由叠层的宽带隙（WBG）~1.8 eV 和窄带隙（NBG）~1.2 eV 制备成的全钙钛矿叠层电池光电转换效率超过了单结钙钛矿太阳能电池的最高纪录。然而，钙钛矿层与电荷传输层发生接触时，光致发光量子产率（PLQY）会发生大幅下降，从而降低转换效率。

美国托莱多大学 Yanfa YAN 和加拿大多伦多大学 Edward H. Sargent 牵头的研究团队通过调整钙钛矿/C₆₀ 界面的表面电势，减少钙钛矿和 C₆₀ 之间的能带偏移和减少界面载流子的数量来抑制这种跨界面复合。此前研究表明，短链二铵配体、强路易斯碱可诱导钙钛矿太阳能电池 n 型掺杂以及改变混合 Pb-Sn 钙钛矿中表面能，经过研究者对比研究多种二铵配体后，最终选择用 1, 3-丙烷碘化二铵（PDA）处理钙钛矿表面，在 C₆₀ 沉积后，光致发光量子产率没有显著下降。紫外光电子能谱（UPS）表明 PDA 诱导费米能级升高，从而促使强和更弱的表面 p 型掺杂，表面电势的变化证明了界面处产生了较少载流

²⁰ World's biggest hydrogen plant could power Australia's first fully decarbonised ammonia facility in Brisbane. <https://arena.gov.au/news/worlds-biggest-hydrogen-plant-could-power-australias-first-fully-decarbonised-ammonia-facility-in-brisbane/>

子。同时，钙钛矿和 C_{60} 之间的能带偏移减少了 60 meV。飞行时间二次离子质谱 (ToF-SIMS) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 表明, PDA 配体存在于薄膜表面。随后, 态密度 (DOS) 计算结果可以看出, 在 PDA 处理后, 价带最大值 (VBM) 区域附近的带内表面态被抑制, 这与 UPS 测量中观察到的相对于 VBM 的费米能级升高一致。为了研究 PDA 如何影响纳米尺度上的薄膜, 研究人员进行了准费米能级分裂 (QFLS) 测量, 使用高光谱成像生成了含有 C_{60} 和不含有 C_{60} 的钙钛矿薄膜的 QFLS 图。结果表明, 薄膜空间波动明显大于带隙较窄 (<1.65 eV) 的钙钛矿, 其 QFLS 的典型标准偏差 (σ) 约为 10 meV。然而, PDA 处理后, σ 显著降低 (从 61 meV 至 24 meV), 表明 PDA 处理后的膜更均匀。 C_{60} 沉积后, 对照的 QFLS 下降 (从 1.32 eV 至 1.25 eV) 并进一步变宽 ($\sigma=77$ meV), 而 PDA 膜的 QFLS 保持在 1.33 eV, 分布稍窄 ($\sigma=22$ meV)。开尔文探针力显微镜 (KPFM) 表明, 这种效应与控制膜的不均匀接触电势有关, 当与 C_{60} 接触时, 控制膜的接触电势将扩大界面电子状态, 导致电荷复合增加。PDA 处理显著缩小了接触电位分布 ($\sigma=2.9$ mV, 而对照组为 11.1 mV), 这表明电荷重组减少和载流子提取改善。由此研究人员制备了器件结构为 ITO/NiOx/Me-4PACz/钙钛矿/ C_{60} /ALD SnOx/Ag 的宽带隙太阳能电池。对照组和 PDA 处理的 1.79 eV 宽带隙钙钛矿太阳能电池的正向和反向 J-V 曲线显示开路电压 (V_{oc}) 从 1.23 V 增加到 1.33 V, PDA 处理的钙钛矿太阳能电池其 V_{oc} 约为 1.33V, 光电转换效率突破 27%。并且测试结果得到美国能源部国家可再生能源实验室的验证。

本项研究将 1,3-丙烷碘化二铵 (PDA) 结合到全钙钛矿叠层器件中, 获得了创纪录的 2.19 V (V_{oc} 极限值的 89%) 开路电压和 $>27\%$ 的效率 (26.3% 认证准稳态)。这些叠层器件在运行 500 小时后仍保留其初始效率的 86% 以上。因此, 经过 PDA 修饰的器件具备高稳定性、高开路电压和转换效率, 是全钙钛矿叠层太阳能电池应用的重要一步。

研究结果发表在《Nature》²¹。

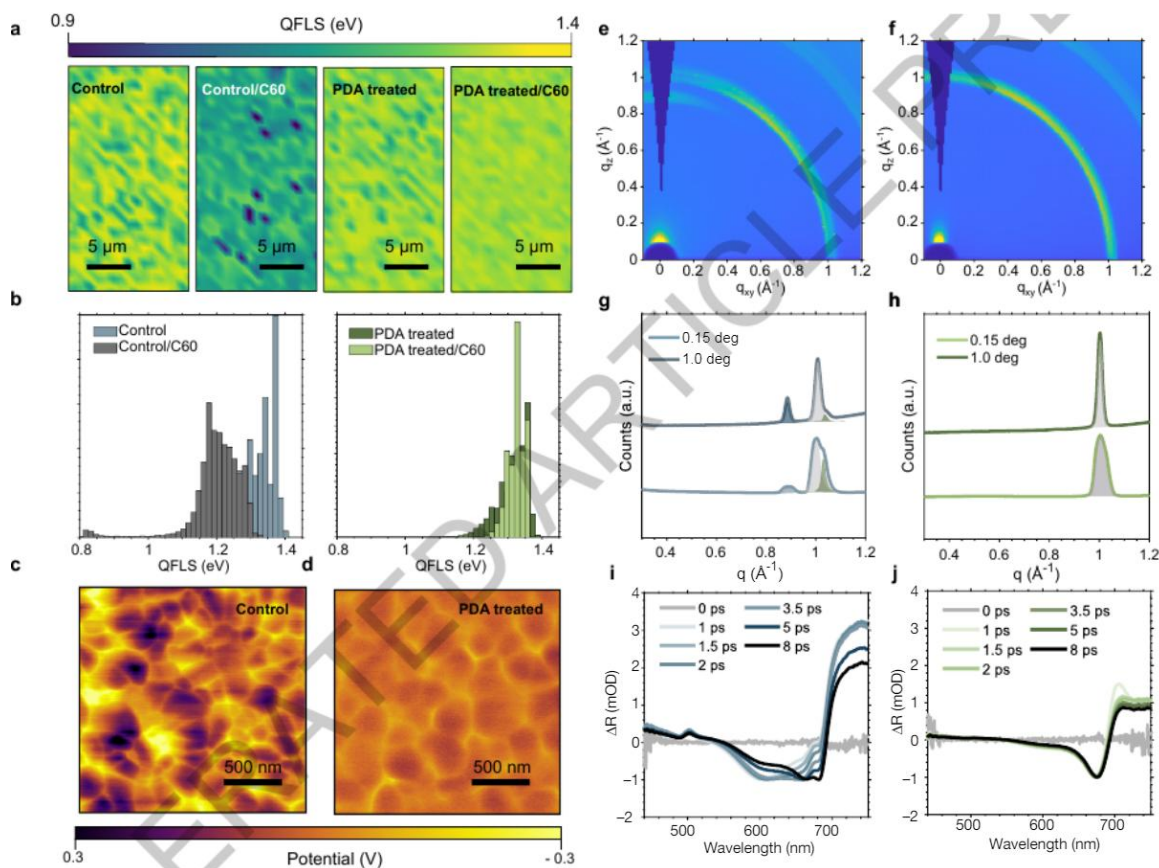


图 1 PDA 结合到全钙钛矿叠层期间过程中形貌及元素表征

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

CO₂ 原位出溶流动电解池用于高效电催化 CO₂ 还原

工业规模的 CO₂ 电解可以利用可再生能源将 CO₂ 转化为高价值的燃料和化学品。然而，CO₂RR 的工业应用需要加快反应速率（即电流密度超过 1 A cm⁻²），并需要大规模的经济电解池（电极尺寸超 100 cm²）以最大限度地降低成本。

加拿大滑铁卢大学 Zhongwei Chen、Aiping Yu 和 华南师范大学 Xin Wang 牵头的研究团队报道了一种电解槽，该电解槽使用含水 CO₂ 饱和和阴极液在多孔电极中的强制对流，利用 CO₂(g)-液体-催化剂界面

²¹ Chen H, Maxwell A, Li C, et al. Regulating surface potential maximizes voltage in all-perovskite tandems. *Nature*, 2022, DOI: 10.1038/s41586-022-05541-z

的原位形成来改善 CO_2 、电子、质子和产物 (CEPP) 传输转移来达到高电流密度。使用 Ag 基催化剂实现了 3.37 A cm^{-2} 的最大电流密度, 并组装形成按比例放大的 $4 \times 100 \text{ cm}^2$ 电解池, 以 90.6 L h^{-1} 的速率产生 CO。首先, 本研究建立了一种电解模型, 通过使用泵来输送 CO_2 饱和的水系电解液到多孔电极上, 从而增强物质的转移效率。当流体被迫在多孔电极内流动时, 局部压力降低, 推进 $\text{CO}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$ 和 $\text{HCO}_3^-(\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{aq})$ 的平衡方向, 促进 CO_2 的出溶, 加快了 CO_2 的充分提取, $\text{CO}_2(\text{g})$ 的出溶发生在多孔电极内, 从而导致了三相界面的原位形成。随着反应的进行, 三相界面会动态再生。这种具有流动动态三相界面的 CO_2RR 电解槽, 称为 FTDT 电解槽。由于扩散层厚度减少了十倍, 极大消除了物质运输的限制。接着, 采用二维 (2D) 反应/扩散模型来模拟流经结构电极表面周围的局部微环境。在阴极反应中, 在电极上产生了 OH^- 离子, 电极/电解质界面附近的局部 pH 值升高。而薄的扩散层可通过降低浓度梯度来加速缓冲反应, 将局部 pH 值维持在 9 左右, 并有助于 CO_2 的还原。本文又进一步扩展这种水相流动结构, 通过原位电沉积与催化剂前体的强制对流来实现彻底的催化剂涂层, 通过 Ag 纳米粒子 (NPs) 的原位电沉积和随后的 L-半胱氨酸配体修饰, 在碳毡 (CFs) 上生长得到阴极催化剂 (Ag-TE 和 Ag-TEL)。其中 Ag-TEL 表现出更高的 CO 法拉第效率和电流密度。这种通过电解槽本身进行原位合成的方法, 为纳米催化剂的大规模生产提供了一种实用的途径, 保证了活性位点的充分暴露, 提高了生产效率。本研究还使用 Ag-TEL 催化剂组装了 5 种具有 1 cm^2 电极的电解槽并观察到, FTDT 电解槽不仅具有明显更高的电流密度, 而且在更宽的电位窗口具有更高的 CO 法拉第效率, 表明使用 Ag-TEL 催化剂在 FTDT 电解槽中促进了 CEPP 的传输和反应的动力学。最后, 组装了具有四个模块化单元的按比例放大的 $4 \times 100 \text{ cm}^2$ 的电解槽堆, 在 14 V 的堆叠电压下, 总电流为 $59.0 \pm 2.6 \text{ A}$, 在最初的 120 分钟内,

CO 产量保持在 90 L h^{-1} 左右，并在第三个小时内保持在 70.6 L h^{-1} 以上。这样的生产速度打破了工业 CO_2 利用的界限，并提供了一个有前途的途径来减少大气 CO_2 含量的急剧上升。这种电极和电解池结构的设计策略具有广泛的适用性，并为其他液-气电化学转换装置提供了合理的解决方案，在商业级别的电流密度下具有高选择性。

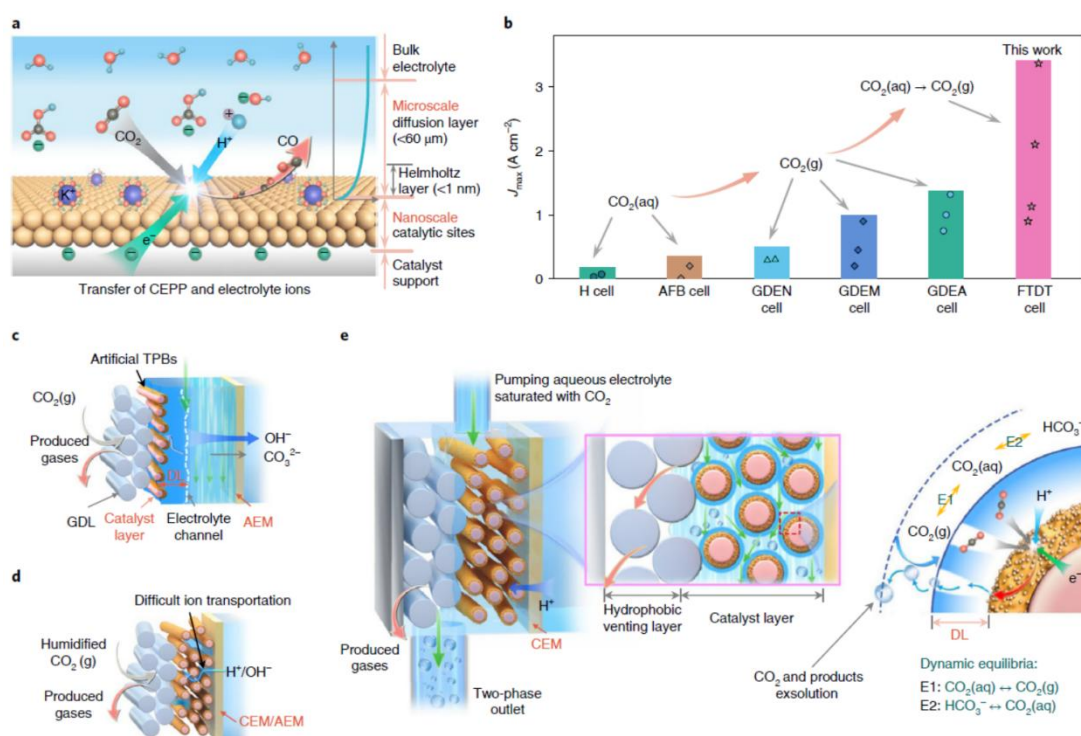


图 1 CEPP 传递转移不同的 CO_2RR 电解池和动态三相界面的概念

本研究开发了一种电解池，使用饱和 CO_2 的水溶液在多孔电极中的强制对流，并利用原位形成的 $\text{CO}_2(\text{g})$ -液体-催化剂界面来改善高电流密度下的物质转移效率，实现了以 90.6 L h^{-1} 的速率产生 CO。该研究为环境 CO_2 电解技术的商业化扩大提供了一个有前途的电极结构，并可扩展到电化学合成和储能系统的工业应用。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》²²。

[中国科学院武汉文献情报中心 朱丹晨]

新型非钌基催化剂实现电解制氢稳定运行超 1000 小时

目前，主要商业水电解技术是质子交换膜（PEM）电解和碱性电

²² Wen G, Ren B, Wang X, et al. Continuous CO_2 electrolysis using a CO_2 exsolution-induced flow cell. *Nature Energy*, 2022, DOI:10.1038/s41560-022-01130-6

解。铱 (Ir) 基电催化剂由于其在酸性析氧反应 (OER) 下优异稳定性, 仍然是 PEM 水电解中唯一使用的阳极催化剂, 但其大规模使用从根本上受到铱金属产量低的阻碍。因此, 开发非铱基催化剂实现 PEM 高效稳定电解制氢对实现低成本清洁氢能生产至关重要。

美国莱斯大学 Haotian Wang、匹兹堡大学 Guofeng Wang 和弗吉尼亚大学 Sen Zhang 牵头的研究团队报道了一种镍稳定的二氧化钌 (Ni-RuO₂) 催化剂, 其在 PEM 电解水的酸性 OER 过程中具有高活性和耐久性。结果表明, 在 200 mA cm⁻² 电流密度下, Ni-RuO₂ 基电解槽可以稳定运行 1000 小时以上, 表明其具备实际应用潜力。研究者通过将 Ni 加入 RuO₂ 晶格中以制备 Ni-RuO₂ 催化剂。在炭黑载体上采用金属前驱体的湿法浸渍, 然后进行 H₂/Ar 退火还原, 获得负载在炭黑上的 Ru₃Ni 纳米颗粒 (Ru₃Ni/C); 将获得的 Ru₃Ni/C 在空气中退火, 以将 Ru₃Ni 纳米颗粒转化为 Ru₃NiO_x, 并去除碳载体; 最后, 通过酸浸去除不稳定的 Ni 物种并获得平均直径约为 4.0 nm 的 Ni-RuO₂ 催化剂。随后, 研究人员在酸性电解液中的旋转圆盘电极 (RDE) 电化学测试。线性扫描伏安法 (LSV) 曲线表明, 相比于商业的 RuO₂ 纳米颗粒 (Com-RuO₂), Ni-RuO₂ 催化剂具有更好的 OER 活性。Ni 的加入显示出 RuO₂ 的 OER 活性的明显增强, Ni-RuO₂ 达到 10 mA cm⁻² 的过电位为 214 mV, 低于 RuO₂ (227 mV)。此外, Ni-RuO₂ 的 Tafel 斜率为 42.6 mV dec⁻¹, 低于 RuO₂ (52.9 mV dec⁻¹) 和 Com-RuO₂ (60.7 mV dec⁻¹)。在 1.45 V 电位下 Ni-RuO₂ 的电化学阻抗 (EIS) 显示出最低的电荷传输电阻, 表明该催化剂增强了 OER 动力学。在连续运行 200 h 后, Ni-RuO₂ 表现出可忽略不计的电位增加, 表明该催化剂在酸性 OER 条件下表现出优异稳定性, 优于此前报道的大多数非铱基酸性 OER 催化剂。密度泛函理论结合动态原位微分电化学质谱分析, 证实 Ni-RuO₂ 上的吸附质演化机制, 计算表明 Ni-RuO₂ (110) 表面的 OER 极限电位为 1.70 V, 比 RuO₂ 低 0.2 V, 表

明其具有更高的 OER 活性。以上现象表明 Ni 掺杂在稳定表面 Ru 和亚表面氧以提高 OER 耐久性方面的关键作用。为了研究 Ni-RuO₂ 催化剂在水电解中的实际应用潜力，研究者采用 Ni-RuO₂ 作为 OER 的阳极催化剂，商用 Pt/C 作为 HER 的阴极催化剂，Nafion 117 质子交换膜构建了 PEM-WE 电解槽。与 RuO₂ 和 Com-RuO₂ 电解槽相比，Ni-RuO₂/PEM/Pt/C 电解槽具有更优异的水电解活性。在 200 mA cm⁻² 电流密度下，对比了 Ni-RuO₂ 和 RuO₂ 电解槽的稳定性，在电解 120 小时后，RuO₂ 电解槽的电压明显增加，这表明在实际操作条件下 OER 稳定性较差。而 Ni-RuO₂ 催化剂运行了 1000 小时，电压仅增加少许。尽管 Ni-RuO₂ 催化剂的稳定性能与典型的工业要求之间仍存在差距（在 80°C 下运行超过 10 年，电流大于 1 A cm²），但本研究使用的钌基催化剂实现的高稳定性表明了未来利用钌基催化剂替代铱基催化剂的应用潜力。

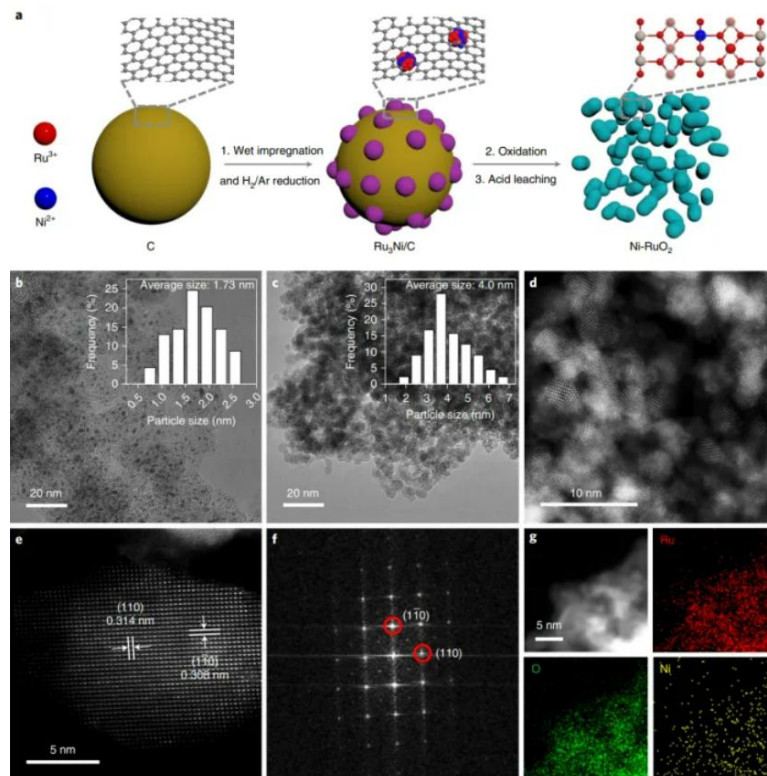


图 1 镍稳定的二氧化钌 (Ni-RuO₂) 材料的合成与表征

本研究设计并开发了一种镍稳定的二氧化钌 (Ni-RuO₂) 质子交换膜电解水的新型催化剂，在 200 mA cm⁻² 电流密度下，Ni-RuO₂

基电解槽可以稳定运行 1000 小时以上，具备实际应用的潜力。研究结果发表在《*Nature Materials*》²³。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

双盐电解质体系与热调控协同策略实现锂离子电池稳定快充

目前，商业化具有富镍层状氧化物正极和石墨负极的锂离子电池比能量已达到 250-300 Wh kg⁻¹。由于原材料供应有限，在不降低电池比容量的基础上开发 10 分钟快速充电的电池能有效缩小电动汽车电池尺寸，既经济又可持续，且将极大避免里程焦虑。然而，高能电池（超过 250 Wh kg⁻¹）的快速充电仍然是一个巨大的挑战。

美国宾夕法尼亚州立大学 Chao-Yang Wang 和 EC Power 公司 Brian D. McCarthy 牵头的研究团队通过将非对称温度热调控（ATM）方法与双盐电解质相结合的策略有效改善锂离子传输过程，展示了一种快充可行的解决方案。当充电至 75% 的剩余电量时，锂电池寿命将超过 900 次循环，而充电至 70% 的剩余电量时，锂电池寿命达到约 2000 次循环。该充电时间和循环寿命是目前所有报道的电池材料最高水平。研究人员首先探究非对称温度调制作用，使用高能量密度的 NMC811 电池正极材料，负载分别为 3.4 mAh cm⁻² 和 4.2 mAh cm⁻² 两种类型。通过分析两种类型锂离子电池（LIBs）的 ATM 循环结果，发现当面积容量或电荷电流变大时，电池容量出现下降的拐点更早，这种容量衰减极有可能是由锂电镀引起的。实际循环结果表明，4.2 mAh cm⁻² 和 3.4 mAh cm⁻² 电池分别不能承受高于 1 C 和 1.5 C 的充电速率。在连续老化的电池中，由于动力学和质量输运特性的衰减，镀锂进程可能延后，参数结果表明：①不镀锂的高能电池不能通过单独使用 ATM 实现 15 分钟/4 C 快速充电；②电解液中导电离子的传输速率有待进一步加强。为了改进离子传输速率，研究人员采取两种方

²³ Wu Z, Chen F, Li B, et al. Non-iridium-based electrocatalyst for durable acidic oxygen evolution reaction in proton exchange membrane water electrolysis. *Nature Materials*, 2022, DOI: 10.1038/s41563-022-01380-5

法，一是使用 $\text{LiPF}_6\text{-LiFSI}$ 双盐电解质，相对于基准电解质，在高倍率 6C 放电条件下，相对容量从 70% 增加到 90%；二是根据孔隙率和麦克马林数之间的石墨经验关系，选择了较高孔隙率的负极来降低弯曲度和麦克马林数。由于需要更多的电解质，孔隙率从 0.26 增加到 0.35，有效输运性能提高了 40%，而能量密度只降低了 2%。数值模拟和实验电压松弛结果表明，具有双盐电解质和更高孔隙率负极的新电池最大无镀锂充电率为 4C，并在这个速率进行实验循环测试，结果显示，面积容量为 3.4 mAh cm^{-2} 的电池经过 ATM 循环后，达到 70% 电量大约需要 11 min，达到 75% 电量大约需要 12 min。最后为了评估 ATM 策略在电池封装水平上对电池冷却性和安全性的影响，研究人员建立一个 1/8 比例的数字封装模型，结果表明，ATM 启用的电池组可以实现安全的 4C 充电，同时也能取代传统的液体制冷冷却与被动空气热管理策略。安全性能测试结果表明，167 小时内电解质加速降解导致的容量损失远低于 20% 的总损失界限，这意味着电池经过 ATM 循环不存在安全问题。此外，测试表明，经过 ATM 循环的电池对热失控表现出较强的抵抗力，在高温下充电可以消除锂镀层，同时也提高了电池的安全性。

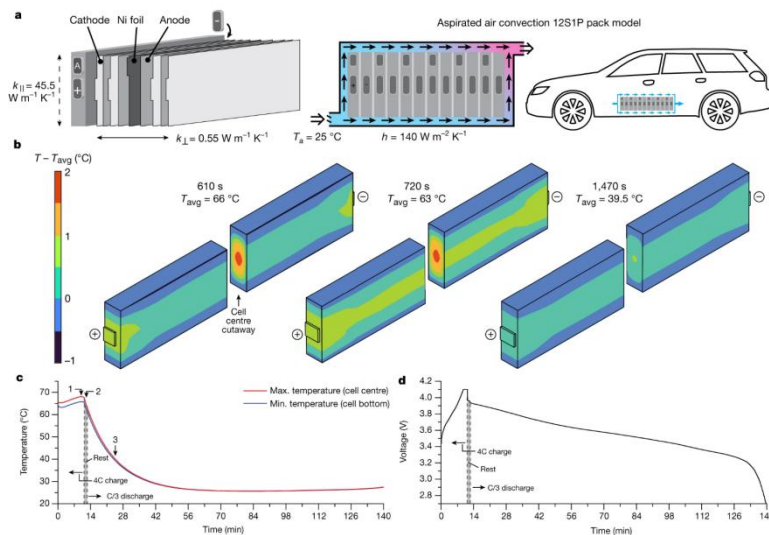


图 1 数字封装电池模型的电化学-热力学耦合仿真

本研究首次制备出具有热稳定的双盐 ($\text{LiFSI}+\text{LiPF}_6$) 电解质体系取代传统的电解液体系 (LiPF_6)，相比于传统 LiPF_6 体系具有更

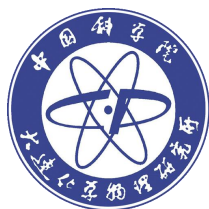
高的锂离子迁移数、降低电解液浓差极化、提高电极厚度、嵌锂反应的均匀性、以及减小析锂风险。充电时间和循环寿命是目前所有报道的电池材料最高水平。该项研究利用结合电池材料和热调控结构协同的创新设计,对开发稳定和快速充电的下一代电极材料具有重要的潜力。研究结果发表在《*Nature*》²⁴。

[中国科学院武汉文献情报中心 汤匀]

²⁴ Wang C, Liu T, Yang X, et al. Fast charging of energy-dense lithium-ion batteries. *Nature*, 2022, DOI: 10.1038/s41586-022-05281-0

版权及合理使用声明

《变革性洁净能源关键技术与示范研究发展动态》（简称《洁净能源专项动态》）由中国科学院A类战略性先导科技专项资助、中国科学院大连化学物理研究所和中国科学院武汉文献情报中心合办，洁净能源先导专项管理办公室负责编辑出版。《洁净能源专项动态》反映中国科学院“变革性洁净能源关键技术与示范”A类战略性先导科技专项的研究成果以及国际发展动态。《洁净能源专项动态》遵守国家知识产权法的规定，保护知识产权，保障著作权人的合法权益，并要求参阅人员及研究人员认真遵守中国版权法的有关规定，严禁将《洁净能源专项动态》用于任何商业或其他营利性用途。未经中国科学院大连化学物理研究所同意，用于读者个人学习、研究目的的单篇信息报道稿件的使用，应注明版权信息和信息来源。未经中国科学院大连化学物理研究所允许，院内外各单位不能以任何方式整期转载、链接或发布相关内容。任何单位要链接、整期发布或转载《洁净能源专项动态》内容，应向中国科学院大连化学物理研究所发送正式的需求函，说明其用途，征得同意，并中国科学院大连化学物理研究所签订协议。欢迎对《洁净能源专项动态》提出意见与建议。



中国科学院大连化学物理研究所

地址：大连市中山路457号
电话：0411-84379960



中国科学院武汉文献情报中心

地址：武汉市武昌区小洪山西25号
电话：027-87199180