

# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- IRENA 研究提出高比例可再生能源并网创新解决方案
- 欧洲光伏技术与创新平台：光伏建筑助推欧洲能源转型
- IEA：亚洲市场强劲需求推动全球 LNG 市场向多样化发展
- DOE 资助 1.21 亿美元推进小企业创新和技术成果转化
- 铅氧盐薄膜保护层显著提升钙钛矿太阳能电池稳定性

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](mailto: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

IRENA 研究提出高比例可再生能源并网创新解决方案 .....2  
欧洲光伏技术与创新平台：光伏建筑助推欧洲能源转型 .....5  
IEA：亚洲市场强劲需求推动全球 LNG 市场向多样化发展 .....7

### 项目计划

DOE 资助 1.21 亿美元推进小企业创新和技术成果转化 .....9  
DOE 推进先进低排放化石燃料发电大规模试点项目 .....12  
日本启动能源管理系统示范项目实证研究 .....13

### 前沿与装备

铅酸盐薄膜保护层显著提升钙钛矿太阳能电池稳定性 .....14  
分子催化剂实现二氧化碳的高效高选择性还原 .....15  
硅氧烷/锡纳米颗粒复合负极提升锂电池倍率性能和循环稳定性 ·16  
离子液体电解质助力安全不易燃的钠离子电池 .....17

## 本期概要

国际可再生能源机构（IRENA）发布《高比例波动性可再生能源并网的解决方案》报告，总结了部分 G20 国家通过高比例太阳能和风能电力并网以促进电力系统脱碳的经验，并提出了推动能源系统集成高比例波动性可再生能源的**创新技术、解决方案和政策建议**：创新是进一步提高能源系统灵活性的关键，下一阶段推动能源转型的三大创新趋势将是：终端用能部门电气化、电力系统分散化和电力部门数字化。报告从使能技术、商业模式、市场设计、系统运营 4 个维度，列举了 30 种有助于高比例波动性可再生能源并网的创新技术，并基于这些技术提出了 11 种实用的解决方案。报告强调，可再生能源与电气化相结合能够推动能源服务转型，有利于提高能源系统灵活性，促进可再生能源发展和技术创新。针对处于能源转型早期阶段的国家，报告为决策者提出了促进能源系统集成高比例波动性可再生能源的八大政策建议。详见正文。

欧洲光伏技术与创新平台（ETIP PV）和欧洲光伏产业协会（SolarPower Europe）联合发布了《太阳能皮肤：绿色城市的机会》报告，概述了光伏建筑一体化（BIPV）技术在助力欧洲建筑脱碳、加速城市清洁能源转型并创造新的就业机会方面所能做出的贡献，并提出了推进 BIPV 应用的政策建议：（1）通过应用 BIPV 将现有公共建筑转换为产能建筑，从而进行最佳实践；（2）推广新的私人业主融资计划，如 BIPV 设施的能源承包和租赁模式；（3）制定有效的政策、电网法规和激励措施，以实现建筑、供暖和制冷以及运输领域的系统电气化。

国际能源署（IEA）发布《LNG 市场发展趋势及影响》报告，分析了全球液化天然气（LNG）市场的发展现状和趋势：未来五年，亚洲市场将继续引领全球 LNG 需求增长，到 2022 年亚洲将占全球 LNG 需求的 75%。中国已成为仅次于日本的第二大 LNG 进口国，将成为近期亚洲天然气需求增长的主要推动力。2016 年到 2022 年，预计全球 LNG 产能将增加近 2000 亿立方米，将超过 LNG 需求的增长（近 1000 亿立方米）。美国已经成为继卡塔尔、澳大利亚和马来西亚之后的第四大 LNG 出口国，到 2022 年美国 and 澳大利亚将分别占全球 LNG 产能增量的 40% 和 35%，且美国将成为全球第三大 LNG 出口国。

美国能源部（DOE）宣布在“小企业创新研究与技术转让（SBIR/STTR）”计划框架下资助 1.21 亿美元，支持 2019 财年第二阶段第二批小企业研发创新项目，主要包括八大主题领域：国防核不扩散、电力、环境管理、能效和可再生能源、化石能源、聚变能、高能物理以及核裂变能。详见正文。

北卡罗来纳大学教堂山分校的 Jinsong Huang 教授课题组通过离子反应在金属铅卤化物钙钛矿薄膜表面生长了一层不溶于水的铅氧盐薄膜，显著提升了钙钛矿电池性能和稳定性：该项研究通过离子反应在钙钛矿薄膜表面转化生成一层铅盐薄膜，充当保护膜防止了空气水分与钙钛矿薄膜直接接触，同时有效地抑制了非辐射的复合，在提高电池性能的同时也提升了器件的稳定性，为设计开发高效长寿命的钙钛矿太阳电池提供了全新的技术路径。

# IRENA 研究提出高比例可再生能源并网创新解决方案

6月17日，国际可再生能源机构（IRENA）发布《高比例波动性可再生能源并网的解决方案》报告<sup>1</sup>，总结了部分G20国家通过高比例太阳能和风能电力并网以促进电力系统脱碳的经验，指出终端用能部门电气化、电力系统分散化和电力部门数字化是下一阶段推动能源系统转型的三大创新趋势。对此，报告提出了通过创新实现能源系统经济高效转型的解决方案，以及推动高比例可再生能源并网的政策建议。报告要点如下：

## 一、G20 国家提高电力系统灵活性以集成可再生能源的实例

**1、意大利。**意大利从本世纪初开始开发太阳能和风能，2018年其光伏和风电装机容量分别超过20GW和10GW，但大部分主要安装在南部地区，而其主要用电负荷则集中在中北部城市，供需不平衡导致对可再生能源发电量的削减。对此，政府采用动态提高输电线路容量（DLR）技术减少了由于传输限制导致的发电量削减。此外，还扩容了输电线路，并推进智能电网的开发以管理分布式光伏发电，逐步淘汰大型燃煤电厂，同步补偿器也有助于抑制火电机组的投运。

**2、中国。**在一些部署了波动性可再生能源发电项目的地区，发电量的不足由燃煤电厂补充，但由于其灵活性较差限制了可再生能源发电量。政府通过对现有燃煤电厂进行改造，在短期内提高灵活性以容纳更多的可再生能源，其成本和交付时间均低于投资开式循环燃气轮机或抽水蓄能等。另外，还为发电厂提供了灵活的激励措施，如辅助服务和现货市场试点项目，以补偿其因运营时间减少而造成的损失。区域电网的备用容量共享、实时平衡和电网交易中心（国家级、省级）等措施也有助于促进波动性可再生能源的发展。

**3、德国。**德国通过如下措施提升电力系统灵活性：电网协议促进了区域电网之间的合作，降低了电力储备要求，增加了可再生能源发电量；调整国家电网运营规范，使电网在保持可靠性的同时集成更多可再生能源；扩大和强化输电网络使再调度成本进一步减少；其他措施还包括整合电动汽车、电制热和氢能等。

## 二、创新是进一步提高能源系统灵活性的关键

IRENA认为，创新可以提高电力系统全价值链的灵活性，包括供应、输电、配电和需求等环节，同时能够降低系统的总体成本。下一阶段，推动能源转型的三大创新趋势将是：终端用能部门电气化、电力系统分散化和电力部门数字化。可再生能源驱动的电气化是终端用能部门（交通、建筑和工业）脱碳的基石；与终端用户

<sup>1</sup>Solutions to integrate high shares of variable renewable energy.  
<https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Solutions-to-integrate-high-shares-of-variable-renewable-energy>

连接的分布式能源（如屋顶太阳能光伏、微型风力发电机、用户侧储能、热泵和插电式电动汽车）的发展正在推动电力系统分散化；数字技术以多种方式支持电力部门的转型，如更好地监控电力设施、更精细地操作和控制、部署新的市场设计、促进新的商业模式等。IRENA 从 4 个维度列举了 30 种有助于集成高比例波动性可再生能源的新技术，并基于这些技术提出了 11 种实用的解决方案。

### 1、有助于能源系统转型的新技术

（1）使能技术：公用事业规模储能电池、用户侧储能电池、电动汽车智能充电、可再生能源供热、可再生能源电力制氢、物联网、人工智能与大数据、区块链、可再生能源小型电网、超级电网、提高传统电厂灵活性的技术。

（2）商业模式：集成商、端到端交易、能源即服务、社区所有权模式、现收现付模式。

（3）市场设计：增加电力市场的时间粒度、增加电力市场的空间粒度、创新辅助服务、重新设计容量市场、区域市场、分时电价、分布式能源的市场整合、净计费电价。

（4）系统运营：配电系统运营商的新功能、输配电系统运营商的合作、波动性可再生能源发电的先进预测方法、抽水蓄能电站的创新运行方式、虚拟电厂输电网络、动态提高输电线路容量。

### 2、通过创新实现经济高效能源转型的解决方案

（1）供应侧灵活性解决方案：通过先进的发电预测减少波动性可再生能源发电的不确定性；灵活发电以适应波动性变化。

（2）电网灵活性解决方案：通过互连及区域市场提升灵活性；通过超级电网匹配远间距的可再生能源发电和需求；大规模储能和增强电网运营。

（3）需求侧灵活性解决方案：为电网服务集成分布式能源；需求侧管理；可再生能源供应的小型电网；利用分布式能源优化配电系统运行。

（4）系统侧储能灵活性解决方案：公用事业规模储能电池；电力转换为其他能源载体（Power-to-X）技术。

### 三、可再生能源与电气化推动能源服务转型

可再生能源与电气化相结合（即“再电气化”）是能源系统转型的重要路径<sup>2</sup>。再电气化将产生一个不同的系统，其中交通、建筑和工业的总电力需求将大幅增加，可再生能源电力将成为其主要的供应来源。同时，通过在这样的系统中调动所有的灵活性可以应对高比例可再生能源的运行挑战，如电动汽车充电可以在时间上灵活调控以调整峰值负荷。此外，还需通过智能设备和其他信息技术实现更好的系统调控，降低运行风险。可再生能源与电气化结合形成了一个良性循环，电气化增加可

<sup>2</sup> IRENA 在 2019 年 1 月发布了名为《可再生能源与电气化：推动能源服务转型》的报告，阐述了可再生能源驱动的再电气化对能源转型的促进作用，详见本刊 2019 年第 4 期。

再生能源的用途，提高了灵活性，从而促进了可再生能源的进一步发展和技术创新，还可降低成本并促进投资。

#### **四、促进能源系统集成高比例可再生能源的政策建议**

一些国家正在进行的创新措施表明，电力系统可以在容纳高比例波动性可再生能源的同时，以可靠和经济的方式运行。然而，在转型的早期阶段，决策者可以参照如下建议行动：

**(1) 制定有远见的政策框架。**各国应预测未来的电力系统需求，确保可再生能源经济高效地大规模并网需要权衡当前需求与未来需求，决策者应进行长远考虑，围绕未来大量部署可再生能源的情景来设计市场和系统。短期内需要采取的措施是尽量释放当前系统的灵活性，改革市场和运营方式，同时出台更合适的监管政策。

**(2) 采用系统性的方法。**集成高比例波动性可再生能源需要采取系统性的方法，包括扶持政策、法规和措施、新技术和商业模式。应从技术、市场、商业和运营各方面创新，并且充分利用所有部门及参与者的协同创新作用。

**(3) 通过实践促进学习。**支持试验和示范项目，在实践中探索，这对于降低风险至关重要。监管要为进行试验预留空间，允许参与者能够在不受监管限制的情况下试验和测试创新技术。

**(4) 转变关键参与者的角色。**随着分布式能源的日益普及，以及产消合一者等新市场参与者的出现，政府和企业应更好地了解消费者和社区的需求和意愿，制定相应的解决方案。配电系统运营商需调整角色定位，转变业务模式，从网络规划者转变为系统运营商，应与输电网运营商加大合作，促进分布式能源的连接，并为系统提供服务。

**(5) 将市场的设计创新作为优先事项。**一些能源市场和法规正在展示如何调整市场以反映具有较高比例波动性可再生能源的电力系统需求，并应对数字化、分散化和电气化的趋势。市场的定价应体现灵活性的价值，平衡能源服务，以适应更低成本的波动性可再生能源，市场设计应考虑到长期内能源系统的转型。

**(6) 将电力部门和终端用能部门结合起来。**在可再生能源供应和电动交通、供暖和制冷之间创造协同效应，各部门的电气化战略应与加速推广可再生能源的战略密切联系，并考虑更广泛的社会变化。

**(7) 将智能创新技术转化为智能解决方案。**人工智能、物联网、区块链等数字创新技术已经开始以多种方式显著影响电力系统，但对其可能的影响和风险理解不足，应用仍然有限。能源系统应该更多地利用数字创新所带来的“智能”，其他工业部门也应探索数字技术的应用，然后将其经验用于电力部门。

**(8) 加强开放合作。**更广泛分享知识和经验，加强公私合作，发挥能源与工业部门的协同效应，发展中国家向发达国家学习，G20 国家间加强经验交流。（岳芳）

## 欧洲光伏技术与创新平台：光伏建筑助推欧洲能源转型

6月27日，欧洲光伏技术与创新平台(ETIP PV)和欧洲光伏产业协会(SolarPower Europe)联合发布了《太阳能皮肤：绿色城市的机会》报告<sup>3</sup>，概述了光伏建筑一体化(BIPV)技术(即“太阳能皮肤”)在助力欧洲建筑脱碳、加速城市清洁能源转型并创造新的就业机会方面所能做出的贡献，并提出了推进BIPV应用的政策建议。报告要点如下：

### 一、BIPV 将为欧洲能源脱碳转型发挥关键作用

在全球范围内，城市消耗了世界上超过三分之二的能源，并且排放了差不多比例的二氧化碳。建筑物占全球终端能源消耗的36%，占直接和间接二氧化碳排放总量的近40%。目前，建筑部门占欧盟能源需求的49%和温室气体排放量的36%。为了实现“巴黎气候协定”的目标，到2050年欧盟建筑行业需减少约90%的碳排放。因此，欧盟城市需加快可再生能源的部署，并增加能效投资，尤其是在建筑领域。

当前，可再生能源仅为欧盟城市建筑提供24%的能源，其发展受到与城市规划、建筑要求和保护文化遗产相关的特定地理、美学和物理限制。虽然屋顶太阳能装置越来越具备市场竞争力，但屋顶仅占建筑物可用表面积的一小部分，因此在建筑外墙上利用可再生能源的大部分潜力尚未开发。BIPV技术能够充分利用建筑物外墙，直接进行发电，用于供暖、制冷和电动汽车等。它减少了大规模扩张电网的需求，并提高了正逐步“电气化”的城市电网稳定性。本地光伏发电、储能和供需管理的结合使建筑物成为智能电网中最小的单元，连接多个智能建筑将有助于智能电网技术的广泛部署。BIPV模块可以与隔热和其他元件组合以提高建筑物的能效，其模块化特性适用于几乎任何城市环境：屋顶、外立面、窗户、隔音屏障、道路等，其灵活的设计使城市能够保持建筑特征并保护文化遗产。

目前，BIPV的技术成熟度已经很高，欧盟各地的众多建筑也充分证明了其设计灵活性。欧洲是BIPV技术的全球领导者，发展BIPV能够推广和培育配套工业，改变欧洲的城市能源格局，改善城市居民的生活条件并创造就业机会。这个新兴产业是减少城市碳足迹的关键先决条件。此外，PV模块的制造可以为欧洲工业拓展巨大的全球市场。在近零能耗建筑(NZEB)政策和未来的产能建筑(PEB)的推动下，开发新的BIPV材料和概念以及将节能建筑材料与BIPV相结合进行设计和创新，成为光伏部门和建筑部门发展战略的重要组成部分。这要求开展多学科研究与开发计划，包括光伏制造业、建筑材料业以及认证机构。需要在技术、应用和商业模式方面取得突破，将今天的BIPV利基市场转变为未来的大众市场。

### 二、BIPV 是欧洲未来绿色城市的理想配置

---

<sup>3</sup>How 'solar skins' can decarbonise Europe's cities and create new jobs.  
<http://www.solarpowereurope.org/how-solar-skins-can-decarbonise-europes-cities-and-create-new-jobs/>

## **1、BIPV 是美观、经济、多功能的新建筑材料和改造方法**

BIPV 适用于各种表面（屋顶、窗户和外墙），并为实现近零排放建筑提供集成解决方案：BIPV 为建筑物提供隔热、隔音等保护性皮肤；BIPV 可生产直接用于建筑物的可再生能源电力，有助于更可持续的供暖和电力消耗；BIPV 还可以补充建筑物的智能功能，如实时的热量或照明调节，这是传统建筑材料无法实现的。总之，BIPV 提供了一个经济高效的集成系统，使用户能够使用脱碳电力，并通过其隔热功能进一步节省能源。

对于新建筑材料，BIPV 的创新设计理念结合了灵活性、多功能性和美观，完全符合零碳建筑和产能建筑的要求。与新建太阳能发电厂生产的标准光伏组件相反，BIPV 解决方案在尺寸、形状和颜色方面具有灵活性，这意味着可以适应建筑物的外形和设计。它们可以增强屋顶、外墙甚至半透明窗户的能量获取。因此，其产生清洁能源的可用面积大于传统光伏技术。对于空间日益稀少的历史街区和城市来说，它将成为新建筑的“必备品”。因此，通过一次性投资，BIPV 技术能够充分发挥建筑的潜力，实现清洁能源发电、温度调节和隔热的功能。

另外，欧洲现有建筑的脱碳需要在能效以及供暖和制冷设施方面进行复杂投资，BIPV 可以在这方面发挥决定性作用。BIPV 技术可以降低深度翻新的总体投资成本，并通过节省材料（用 PV 替代传统建筑材料）和现场发电带来的额外收入，实现真正的商业应用。虽然 BIPV 材料比典型建筑材料成本更高，但在大多数情况下，所增加的成本能够被发电产生的额外收入抵消。

## **2、BIPV 能够推动欧洲清洁能源行业发展，并增加就业**

BIPV 是一项具有巨大工业潜力的尚未开发的技术，BIPV 市场是聚集了中小企业和本地能源供应商的智慧生态系统，从原材料到产品通常都集中在本地范围内。BIPV 价值链是实现欧洲能源转型的一种途径，城市可以从发展 BIPV 大众市场带来的竞争力和创造就业机会中获益。BIPV 技术是改善欧洲城市生活条件的重要资产，能够提供更清洁和更便宜的电力、减少空气污染、增加现有建筑能效和节约能源。由于尚未得到大规模部署，BIPV 在提高能源独立性和弹性、实现在城市规划限制下的高效和多功能建筑等方面的优势尚未得到体现。

## **三、推进 BIPV 应用的政策建议**

尽管有潜力在城市建筑中普及 BIPV，但还有几个障碍需要克服，如建筑翻新率低、可再生能源整合进展缓慢，以及缺乏对 BIPV 优势的认识等。市政当局应通过如下举措积极推动 BIPV，并加快走向绿色城市的道路：

**(1) 通过应用 BIPV 将现有公共建筑转换为产能建筑，从而进行最佳实践。**传统建筑行业的现场可再生能源发电设备的安装基于客户所有权业务模式，建筑物所有者承担与运行、维护和退役相关的风险，这阻碍了 BIPV 的应用。目前欧盟已经

出现了几种新的商业模式，可减轻投资风险，能够适应 BIPV 的发展，并得到了欧盟法规的认可，如可再生能源电力购买协议(PPA)、租赁合同和合同能源管理(EPC)。此外，城市管理者还可改进采购流程，以支持向低碳产品过渡。

(2) 推广新的私人业主融资计划，如 BIPV 设施的能源承包和租赁模式。政府可以推广更适合城市需求的激励措施，以推进私人建筑的低能耗转型。如在税收和电费方面激励可再生能源电力，以及通过合适的碳价释放 BIPV 的潜力。此外，应采取创新融资方式以资助 BIPV 项目，如地方税收优惠政策、房产税和绿色债券、能效贷款、循环基金、软贷款、公私合作伙伴关系（第三方融资）、私营部门的合同能源管理、公共能源服务公司（ESCO）、上网电价、公民合作社或众筹等。

(3) 制定有效的政策、电网法规和激励措施，以实现建筑、供暖和制冷以及运输领域的系统电气化。市政当局应设计正确的监管激励措施，积极鼓励试点项目和实践案例以展示 BIPV 的益处，通过智能城市灯塔项目等为其他城市的应用提供经验，并根据当前状况和城市自身需求制定合适的能源和气候计划，并确定相应的财政政策等。

(岳芳)

## IEA：亚洲市场强劲需求推动全球 LNG 市场向多样化发展

6月20日，国际能源署（IEA）发布《LNG 市场发展趋势及影响》报告<sup>4</sup>，指出亚洲液化天然气（LNG）的强劲需求正发挥日益重要的作用，全球 LNG 消费和供应结构正发生巨大变化，在亚洲市场的主导下，到 2022 年全球 LNG 市场将持续扩大。此外，报告还对亚洲主要 LNG 市场的自由化进程以及 LNG 的定价机制发展趋势进行了分析。报告要点如下：

### 一、亚洲市场的强劲需求推动 LNG 市场持续扩大，市场结构愈加多样

1、未来五年亚洲将继续引领全球 LNG 需求增长，中国将成为主要推动力。由于能源消费持续增长和强有力的政策支持，中国已成为仅次于日本的第二大 LNG 进口国，增强了亚洲在 LNG 需求方面的主导地位，到 2022 年，亚洲将占全球 LNG 需求的 75%。中国已经签署了到 2022 年总量为 670 亿立方米的 LNG 长期进口合同，将成为近期亚洲天然气需求增长的主要推动力。其他更成熟的亚洲市场的发展趋势可能各有不同：随着核电的进一步重启，日本的 LNG 进口量将在长期内逐渐减少；受益于能源政策的变化、淘汰核电措施的实施以及对新建和现有燃煤电站的削减，韩国的天然气需求将进一步增加；其他亚洲发展中经济体人口的持续强劲增长将推动电气化的发展，尽管政策和价格对天然气市场的影响仍不确定，但电力需求的增长将为其 LNG 需求增长创造机会。

<sup>4</sup>LNG Market Trends and Their Implications: Structures, drivers and developments of major Asian importers. <https://webstore.iea.org/lng-market-trends-and-their-implications>

**2、LNG 产能将持续增加，LNG 供应多样化初现端倪。**受到充足市场需求支持，全球 LNG 产能持续增加，且市场至今并未出现供过于求的迹象，主要原因是亚洲市场的强劲需求。2016 年到 2022 年，预计全球 LNG 产能将增加近 2000 亿立方米，超过 LNG 需求的增长（近 1000 亿立方米）。美国在 LNG 供应方面的重要性日益增加，2018 年已经成为继卡塔尔、澳大利亚和马来西亚之后的第四大 LNG 出口国。美国墨西哥湾和东海岸在建的 LNG 项目将影响全球市场动态，预计到 2022 年美国 LNG 出口量将超过 800 亿立方米。传统供应国和新供应国都开发了新的液化项目，尽管卡塔尔准备扩大其出口能力以保持领先地位，但美国和澳大利亚将取代卡塔尔的 LNG 产能增量第一的地位。预计 2016 年至 2022 年全球 LNG 产能将从 4520 亿立方米增加至 6460 亿立方米，其中美国和澳大利亚将分别占增量的 40% 和 35%。到 2022 年，卡塔尔、澳大利亚和美国将成为全球前三大天然气出口国。

## **二、亚洲主要 LNG 市场呈现多样的自由化道路**

**1、日本 LNG 市场已完全自由化。**天然气是日本能源结构的重要组成部分，2017 在其一次能源中占比约为 1/4，且基本由进口 LNG 满足。日本于 1995 年开始天然气市场改革，并在 2017 年实现了 LNG 市场的完全自由化，不同细分市场中共有 200 多个参与者。然而，国内有限的 LNG 管道互连仍然限制了新的市场参与者，当第三方准入的基础设施完全运营时，这些限制可能会得到缓解。

**2、韩国 LNG 市场正处于开放初期阶段，发展方向尚不明朗。**韩国面临类似的供应形势，但其能源结构中天然气的占比较低，并处于市场开放的早期阶段。韩国燃气公司（KOGAS）主导韩国天然气上游，其进口 LNG 占 LNG 需求的 90%，是向大型消费者和城市燃气公司提供天然气的唯一批发供应商，主要依靠长期合同和备用基础设施来调节季节性需求。韩国政府希望逐步淘汰其电力供应结构中的煤电和核电，天然气需求将进一步增加，LNG 进口企业可能会逐渐变得更加多元化。韩国大型天然气消费者能够直接进口 LNG，但仅限于满足自身需求或与其他直接进口商交换。2005 年至今，韩国电力、钢铁和石化行业的 8 家公司成为了直接进口商，但仅占其 LNG 批发量的 10% 左右。2016 年，前任韩国政府设定了到 2025 年私营公司能够进口 LNG 并在国内出售的目标，现任政府并未对此进行确认或表示放弃。

**3、中国正通过改变定价制度和发展天然气交易中心加速天然气市场改革。**中国的天然气供应结构有所不同，尽管中国已成为全球第二大 LNG 进口国，LNG 仍然只是其国内生产和进口管道天然气的补充，后两者占 2017 年天然气总供应量的 80%。中国的“十三五”规划支持能源结构调整，导致天然气需求激增，并加速了基础设施建设。市场结构的这种变化将鼓励新的市场参与者进入天然气价值链的不同环节，如勘探、生产和市场。随着定价制度的连续变化和天然气交易中心的发展，中国的天然气市场改革正在取得进展，为进一步改革铺平了道路。

### 三、LNG 定价机制更为全球化

多样化的供应来源和强劲的国内生产为北美和欧洲等成熟 LNG 市场基于市场的定价机制提供了坚实的基础。与之相反，亚洲天然气市场依赖 LNG 作为其主要供应来源，大部分进口 LNG 仍采用传统的价格公式定价。截至 2017 年，超过 70% 的天然气销售受到油价指数的影响。2011 年东日本大地震造成的需求冲击导致亚洲 LNG 现货市场的出现。LNG 现货市场首先是以紧急、高价的补充供应来源形式存在，随着新买家数量的增加导致其供应量增加，进而逐步发展到能够平衡市场。LNG 贸易向更灵活的全球市场转型可能会对亚洲天然气定价产生溢出效应，引入混合定价方式和当地贸易指数。这有助于建立一个更具竞争性的环境，并鼓励生产商和进口商加强该地区的市场流动性。然而，只有在整个价值链中引入更多竞争，才有可能在天然气交易中心的支持下全面过渡到区域市场定价。

(岳芳)

## 项目计划

### DOE 资助 1.21 亿美元推进小企业创新和技术成果转化

7 月 15 日，美国能源部 (DOE) 宣布在“小企业创新研究与技术转让 (SBIR/STTR)”计划框架下资助 1.21 亿美元<sup>5</sup>，向 103 家小企业的 113 个项目提供资助，开展国防核不扩散、电力、环境管理、能效和可再生能源、化石能源、聚变能、高能物理以及核裂变能八大主题领域的研发创新工作，旨在推进美国科学技术的创新和技术成果转化，创造新的就业机会，以增强美国在具有竞争优势领域的领先地位和经济实力。SBIR/STTR 计划通常每年选择一定数量的小企业研发项目，进行第一阶段和第二阶段资助，每阶段的资助项目均分两批进行招标。其中，第一阶段资助的项目主要进行概念的可行性验证，资助期限为 6 至 12 个月，通过评估考核将获得下一财年的第二阶段资助申请资格；第二阶段资助的项目从上一财年已通过第一阶段考核的项目中选择，进行原型或工艺研发以验证第一阶段的研发成果，资助期限最长为两年。此次公布的为 2019 财年第二阶段的第二批资助计划，资助项目的具体内容如下：

#### 1、国防核不扩散

DOE 将资助 745 万美元支持国防核不扩散相关研究，包括：国家安全保障，如使用创新激光分析技术快速分析核武器或其他大规模杀伤性武器的核材料；近场探

---

<sup>5</sup> Department of Energy Announces \$121 Million for Small Business Research and Development Grants.

<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-121-million-small-business-research-and-development-grants>

测技术，如便携式伴随粒子成像（API）中子发生器、便携式先进中子成像技术、基于微通道板的粒子探测器；辐射探测技术，如用于  $\gamma$  射线光谱的高性能闪烁体、钾冰晶石型闪烁晶体用于辐射探测；核爆炸监测优化技术，如用于放射性氙同位素  $\beta$ - $\gamma$  符合监测系统的可消除记忆效应的涂层。

## 2、电力

DOE 将资助 414 万美元支持电网相关研究，包括：先进电网技术，如混合现实/虚拟现实（MR/VR）远程协作系统、集成光纤分布式传感器、智能电网自动化应用与通信平台；用于电网储能的智能氮化镓（GaN）逆变器。

## 3、能效和可再生能源

DOE 将资助 4375 万美元支持如下关键领域研究：

（1）太阳能，主要包括：网络安全相关技术，如低成本即插即用数据二极管、入侵检测系统；灵活性相关技术，如预测优化先进能量转换平台、P2P 交易、交互式能源和需求响应能源互联网平台；设备安装相关技术，如太阳能阵列支架系统、抛物槽式太阳能集热器的机器人精密装配。

（2）风能，主要包括：减少雷电损害的风力涡轮机叶片表面涂层；海洋大气边界层表征设备，如低功率海洋大气边界层风廓线多普勒雷达、微波辐射计。

（3）地热能，如  $\text{CO}_2$  地热发电系统工程分析与设计，以及地热井非侵入式操作工具。

（4）生物质能，主要包括：水热催化工艺；利用发酵和点还原将生物质高效转化为化学品；开发衣藻生产菌株；高通量陶瓷/金属膜用于微藻浓缩和脱水。

（5）水能，主要关注水力发电用环保润滑剂的开发，如酯化丙氧基化甘油制润滑油、生物润滑油等。

（6）燃料电池，主要包括：高效智能储氢罐；非线性波混频检测微米级缺陷；用于磁热制冷的低成本合金。

（7）建筑，主要包括：轻质和隔热纳米材料；用于有机发光二极管（OLED）的高性能基板嵌入式微电极；高效可弯曲 OLED 照明面板；集成 CAD 的基于 Web 的建筑性能仿真平台；能效模拟平台。

（8）车辆，主要包括：动力电池相关技术，如安全的高能量密度锂离子电池负极、锂金属电池、低成本长寿命尖晶石正极材料、新型库伦法分析锂电池耐久性、锂电池用高品质天然石墨；燃油系统的低能量纳秒脉冲点火系统；适用于多模式、共享和自动化的下一代智能交通信号系统。

（9）先进制造，主要包括：开发炼油厂先进催化剂；实时快速测量原油及炼油厂产品中化学元素的便携式分析仪器；开发用于大分子催化剂、原子级精密薄膜的智能系统；通过机器学习加速改进多相催化剂；电脱水技术，如纤维素纳米材料的

电脱水、介电泳增强脱水；集成膜反应器以降低乙烷转化为乙烯的成本。

#### **4、环境管理**

DOE 将资助 105 万美元支持创新地下监测概念，如用于污染场所粉尘管理的智能、低成本、环保固定剂。

#### **5、化石能源**

DOE 将资助 1425 万美元重点关注如下技术领域：（1）传感及控制技术，如自动化态势感知平台；（2）先进制造及材料，如用于硅基陶瓷复合材料的先进隔热涂层、用于熔盐储热的碳化硅泡沫、将煤作为原料制造导电油墨、用于耐火板及屋顶材料的煤基复合材料；（3）油气相关技术，如预防、检查和修复管道泄漏防止甲烷排放的在线机器人，以及用于井筒完整性诊断的声学智能水泥。

#### **6、核裂变能**

DOE 将资助 2042 万美元支持核裂变能相关技术领域：

（1）先进核裂变能技术，包括：超材料空泡传感器；在线电磁信号监测系统；数字仪表和控制系统故障监测系统；先进核燃料制造；事故容错型核燃料组件定位格架；优化核电厂模拟预测；风险指引服务集成平台；多学科综合数据管理工具；超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的多层碳化硅管道；超临界 CO<sub>2</sub> 循环的超高温磁轴承系统；金属零件制造的实时无损检测；核反应堆用耐高温流量传感器；先进反应堆材料腐蚀试验台。

（2）核废料先进技术，主要包括：乏燃料干式储存罐监测的无线传感器；新型冷喷涂方法修复和减轻乏燃料储罐的裂纹；乏燃料干式储存罐远程监测用自供电无线传感器。

（3）核科学用户设施，如高辐射材料的先进机械测试系统。

#### **7、聚变能科学**

DOE 将资助 1150 万美元重点关注如下技术领域：（1）聚变能系统的先进技术和材料，如聚变示范堆新型高温超导电缆的设计和加工方法、高温超导磁体的实时分布式淬火检测、高温超导磁体的稳定低损耗接头；（2）聚变能科学相关技术，如用于燃烧等离子体诊断的 700 吉赫兹高频回旋管、用于等离子体加热的直接耦合回旋管、虚拟现实/增强现实（VR/AR）可视化工具、高频丘克（Cuk）变换器；（3）高能量密度等离子体及惯性约束聚变能技术，如新型边缘泵浦盘式激光器、用于超快诊断的多路复用信号技术；（4）等离子体应用技术，如新型燃油喷射器等离子体驱动的稀薄燃烧静态和动态稳定性控制、超高温环境下的低温等离子压力动态传感器。

#### **8、高能物理**

DOE 将资助 1825 万美元重点关注如下技术领域：（1）粒子加速器先进理念及

技术，如超高梯度行波管电子枪、下一代等离子体加速器的毛细管放电等离子体设计与仿真、新型束团长度诊断技术；（2）高能物理探测器及仪器，如低成本高性能互补金属氧化物半导体（CMOS）光子计数传感器、耐辐射热界面材料、商用耦合馈线多色跃迁边缘传感器（TES）偏振计、低放射性碘化钠晶体制造暗物质探测器；

（3）高性能高速电子探测器的增材制造技术；（4）加速器激光技术，如梯度掺杂高功率陶瓷圆盘激光器、高可靠性任意脉冲模式激光放大器；（5）量子信息科学（QIS）支持技术，如超导四分之一波长谐振器；（6）射频加速器技术，如电隔离混合两相冷却系统、加速器全自动形状优化设计程序、多波束技术；（7）超导技术，如铋-2212粉末生产下一代磁体用超导线材、用于高场磁体的铋-2212/银带材、采用铋-2212的超高场混合超导磁体、用于高场磁体的抗辐射导热树脂。

（岳芳）

## DOE 推进先进低排放化石燃料发电大规模试点项目

7月9日，美国能源部（DOE）化石能源局宣布<sup>6</sup>，将提供1470万美元支持6个先进低排放化石燃料发电大规模试点项目，旨在实现灵活、弹性、经济且近零排放的下一代燃煤电厂。第一阶段资助公告于2017年8月发布，主要进行可行性研究。本次宣布的是第二阶段的资助项目，将完成前端工程设计（FEED）研究以及国家环境政策法（NEPA）相关流程，选定的技术接近或等同于“Coal FIRST”计划<sup>7</sup>中支持的技术。第三阶段将最终选定2个试点项目进行建设和运营。本阶段资助的项目具体内容参见表1。

表1 先进低排放化石燃料发电大规模试点第二阶段项目具体内容

项目名称	具体内容	资助金额 /万美元
林德/巴斯夫先进燃烧后碳捕集技术在燃煤电厂的大型试点测试	设计、建造和运行燃煤电厂的先进胺基燃烧后碳捕集系统。项目将与美国及其他地区的燃煤电厂进行知识共享，从而实现更大规模的运营，以降低能源成本并限制排放	300
超临界二氧化碳发电大规模试点	燃煤电厂超临界二氧化碳发电的大规模试点，完成前端工程设计研究、NEPA 审查和施工许可流程，以证明超临界二氧化碳动力循环在燃煤发电中的经济和技术优势	246
膜技术和研究（MTR）公司的膜用于燃烧后碳捕集的大规模试点测试	MTR 公司将在第二阶段对其膜系统进行设计准备，并进行 FEED 研究，以减少施工时间和成本，并提高使用该系统的性能	295

<sup>6</sup> Energy Department Invests \$14.7M in Large-Scale Fossil Fuel Pilot Projects.

<https://www.energy.gov/fe/articles/energy-department-invests-147m-large-scale-fossil-fuel-pilot-projects>

<sup>7</sup> “Coal FIRST”计划的目的是开发灵活（Flexible）、创新（Innovative）、弹性（Resilient）、小型（Small）、变革（Transformative）的适用于未来能源系统的先进燃煤电厂，具体情况详见本刊2019年第9期内容。

无焰增压富氧燃烧大规模试点的设计、建造和运行	对使用无焰增压富氧燃烧技术的大型燃煤试点电厂进行基础工程、设计、规范、成本和进度指标等方面的工作，完成FEED研究。项目总体目标是降低这一技术在商业化过程中的风险	300
挑战性的环境中模块化煤气化合气/发动机热电联产的小规模应用	完成第二阶段的设计、NEPA和环境许可流程，以确定能否在校园建造试点电厂，示范小型模块化煤气化装置提供低成本燃料用于往复式发动机发电的潜力	115
燃煤电厂热集成变压碳捕集工艺	肯塔基大学研究基金会将继续推进其新型碳捕集方法的应用，第二阶段将进行施工准备工作。该系统的成功应用将为开发商业规模的碳捕集与封存设备提供明确的途径	223

(岳芳)

## 日本启动能源管理系统示范项目实证研究

7月24日，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）宣布在中国广东省启动能源管理系统示范运行实证研究<sup>8</sup>，项目执行期是2019-2021年，旨在通过引入能源管理系统和运用节能技术设备，对能源需求和电网电力供应系统进行综合高效管理，实现对工厂节能减排与提高运行效率的目标。本次实证项目选取广东省两家能源消耗较大的工厂作为试点——广东华昌铝厂有限公司和互太（番禺）纺织印染有限公司，进行现场示范运行。

NEDO将利用实证研究期间收集到的数据来验证技术的有效性，并对相应设备与技术的推广提供数据上的支持，最终让得到验证的设备与系统在中国高能耗产业（石化、造纸、纺织等行业）进行推广。本次实证研究主要开展两大主题研究内容：

### 1、掌握生产状况改善能源供需

将能源管理系统引入到工厂，以收集生产活动过程的能源消耗数据、监控和分析不同生产阶段能源消耗的变化，并更新两个工厂的现有设施，优化能源的供需，从而实现改进生产过程的能源消耗。主要开展的研究工作包括：（1）高效节能设备运用（如高性能热泵设施的改进）；（2）改善能源供应，最大限度地提高发电机、蒸汽发生器等运行效率；（3）通过生产过程的能耗分析，改进生产过程，提高生产效率；（4）优化生产过程的的管理，提升管理效率。

### 2、工厂需求响应研究

针对在中国实施的电力供需调整计划（该项目中主要由中国南方电网有限公司启动对工厂电力供需的调整要求），根据安装在每个工厂的能源管理系统，汇总各工厂的电力需求，制定一个优化整体能源效率的计划。以此为基础通过仿真模拟验

<sup>8</sup> 中国广东省でエネルギーマネジメントシステムの実証運転を開始。  
[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101160.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101160.html)

证各工厂实现复杂需求响应的可能性，使各工厂的生产效率和能耗达到最优化，实现节能增效。

**编者按：**本次示范实证研究隶属于“广东省电力供需调节适用的能源管理系统实证项目”，该项目于 2017 年由国家发展和改革委员会与 NEDO 签订并启动，旨在引入日本先进的能源管理系统以及节能技术和设备，改善工厂的能耗，提升生产效率，实现节能减排。中方项目参与机构包括南方电网综合能源有限公司、互太(番禺)纺织印染有限公司、广东华昌铝厂有限公司；日方参与机构包括横河电机有限公司、日本综合研究所、东京电力有限公司。

(郭楷模)

## 前沿与装备

### 铅氧盐薄膜保护层显著提升钙钛矿太阳能电池稳定性

有机金属卤化物钙钛矿太阳能电池效率已经突破 25%，逼近了商用的晶硅电池，且具有制备工艺简单、光电转换效率高、成本低廉等优点，被视为最有希望替代晶硅太阳能电池的下一代光伏技术。然而器件的长程稳定性问题制约了该电池技术的商业化应用，因此改善钙钛矿太阳能电池器件不稳定性是当前的研究热点之一。北卡罗来纳大学教堂山分校的 Jinsong Huang 教授课题组通过离子反应在金属铅卤化物钙钛矿薄膜表面生长了一层不溶于水的铅氧盐薄膜，有效保护钙钛矿免受空气水分的侵袭，同时抑制了载流子复合，从而实现了性能和稳定性的双提升。研究人员首先制备了三阳离子双卤素的铅钙钛矿  $\text{Cs}_{0.05}\text{FA}_{0.81}\text{MA}_{0.14}\text{PbI}_{2.55}\text{Br}_{0.45}$  (CsFAMA)，随后将其浸润于硫酸盐溶液中进行离子反应，接着进行退火处理获得最终的产物。产物表面的 X 射线衍射表征显示出了新的特征衍射峰，分别对应硫酸铅 ( $\text{PbSO}_4$ )，即形成了一层  $\text{PbSO}_4$  薄膜。横截面扫描电镜显示，薄膜厚度不到 5 nm。X 射线光电子谱测试发现，没有经过离子反应处理的钙钛矿薄膜表面封端材料的化学组分为  $\text{PbI}_2$  (易溶于水)，离子反应处理的则为  $\text{PbSO}_4$  (难溶于水)，可以充当保护层。随后以上述制备的钙钛矿薄膜作为吸光层制备钙钛矿太阳能电池器件并进行电化学测试，结果显示采用无离子反应处理的钙钛矿薄膜电池器件的光电转换效率为 19.1%，而采用离子反应处理后的薄膜电池器件的效率提升到了 21.1%，且没有出现回滞现象。光致发光谱测试发现，无离子反应处理的钙钛矿薄膜载流子寿命为 3.2 纳秒，而离子处理的薄膜寿命提升了近 7 倍至 24.7 纳秒，表明了离子反应处理有效地抑制了薄膜表面缺陷态，减少了非辐射的复合。随后研究人员将上述的钙钛矿薄膜分别直接浸入清水当中，发现无离子处理钙钛矿薄膜在 10 秒之内便从黑色变成了黄色，即钙钛矿分解成了碘化铅；而离子处理后的薄膜浸滞 60 秒后依旧保持黑色，表现出良好

的抗湿特性。最后在 65°C 室外空气环境中开展长程稳定性测试，封装后的无离子处理钙钛矿电池经过 474 小时的连续运行后，效率出现大幅下降，从原始的 18.2% 降至 8.54%；相反，离子处理后的电池器件经过 1200 小时的连续运行后，依旧可以保持 97% 的初始效率，展现出优异的长程稳定性。该项研究通过离子反应在钙钛矿薄膜表面转化生成一层铅盐薄膜充当保护膜，防止了空气水分与钙钛矿薄膜直接接触，同时有效地抑制了非辐射的复合，在提高电池性能的同时也提升了器件的稳定性，为设计开发高效长寿命的钙钛矿太阳电池提供了全新的技术路径。相关研究成果发表在《*Science*》<sup>9</sup>。

(郭楷模)

## 分子催化剂实现二氧化碳的高效高选择性还原

催化还原二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 制备碳氢燃料或者高价值的化学品，不仅有助于减少温室气体排放改善环境问题，也有助于应对能源危机，吸引了全球科研人员的广泛关注。然而当前高效催化剂主要采用贵金属（如金、银等），成本高昂；另外产物的选择性仍然较低，这些不利因素阻碍该技术的规模化应用。由加拿大不列颠哥伦比亚大学 Curtis P. Berlinguette 教授课题组牵头的国际联合研究团队成功展示了一种将 CO<sub>2</sub> 分子催化剂集成到液流电池中的策略，能够在电池提供较低过电位下实现 CO<sub>2</sub> 稳定催化还原，且产物选择性高达 95% 以上。研究人员将全氟磺酸树脂 (Nafion) 和磷酸钴 (CoP) 滴涂在玻璃碳电极表面，作为离子交换膜应用于液流电池当中。随后在电池的阴极注入 CO<sub>2</sub> 气体，在阳极一端注入氢氧化钾液体，通过控制上述进入电极的物质流量，使得电池获得恒定的电流密度，随后采用气相色谱法来分析产物随不同电流密度的变化情况，结果显示电流密度在 25-150 mA/cm<sup>2</sup> 之间时，CO<sub>2</sub> 催化还原成 CO 反应的法拉第效率始终维持在 95% 以上，表现出优秀的产物选择性，且过电位始终维持在 2.7 V 以下的水平（过电位越小，能耗越小，活性也越高）。而采用传统贵金属银催化剂的同样架构电池的反应过电位则要大于 2.9 V。但当电流密度超过 150 mA/cm<sup>2</sup>（小于 200 mA/cm<sup>2</sup>）时，产物的法拉第效率会逐步下降到约 60% 的水平，主要原因是高电流密度下抑制了质子浓度的提升；为此研究人员采用苯酚对 CoP 进行修饰以克服上述问题，结果显示在 200 mA/cm<sup>2</sup> 高电流密度下产物的法拉第效率仍可高达 88%，且过电位依旧不超过 2.7 V（为 2.52 V）。随后对催化剂的稳定性进行研究，在 50 mA/cm<sup>2</sup> 电流密度下，可以稳定连续催化反应 8 小时，法拉第效率始终维持在 90% 以上的水平；而当电流密度增长到 100 mA/cm<sup>2</sup> 时，可以稳定连续催化反应 3 小时，法拉第效率同样可以维持在 90% 以上的水平，表现出优

<sup>9</sup> Shuang Yang, Shangshang Chen<sup>1</sup>, Edoardo Mosconi, et al. Stabilizing halide perovskite surfaces for solar cell operation with wide-bandgap lead oxysalts, *Science*, 2019, DOI: 10.1126/science.aax3294.

秀的电化学稳定性。该项研究将 CO<sub>2</sub> 电催化剂集成到液流电池当中，实现了在较低过电位下对 CO<sub>2</sub> 高效稳定的催化还原，为低成本高效还原 CO<sub>2</sub> 开辟了新路径。相关研究成果发表在《Science》<sup>10</sup>。

（郭楷模）

## 硅氧烷/锡纳米颗粒复合负极提升锂电池倍率性能和循环稳定性

锡（Sn）基材料具备高理论质量比容量（994 mAh/g）、高体积比容量（7246 mAh/cm<sup>3</sup>）以及较低的放电平台（0.6V vs Li<sup>+</sup>/Li），被视为有望取代传统石墨的新一代高能量密度锂电池负极材料，引起了广泛的关注。然而，该材料体积过度膨胀（体积变化率高达 260%）和纳米颗粒聚集等问题导致电池性能和循环稳定性不佳，阻碍了电池的商业化应用。瑞士联邦材料科学与技术研究所 Maksym V. Kovalenko 教授课题组设计合成了一种硅氧烷（SiOC）/Sn 纳米颗粒复合的负极材料，替代传统的石墨应用于锂离子电池，得益于 SiOC/Sn 材料独特的结构特性，电池获得了优异的倍率性能和循环长程稳定性。研究人员将聚甲基氢硅氧烷（PMHS）与二乙烯基苯（DVB）混合使其发生氢化硅烷化反应，得到具有非极性侧链的 PMHS-DVB 聚合物前体；接着，将上述 PMHS-DVB 与乙基己酸亚锡（Sn(Oct)<sub>2</sub>）混合凝胶化获得硅氧烷（SiOC）；最后在 1000°C 下热解获得 SiOC/Sn 复合物。X 射线衍射测试显示，上述产物均为纯相结构；扫描透射电镜测试显示 Sn 纳米颗粒平均粒径在 5-30 nm，均匀分布在 SiOC 聚合物框架里面。接着基于 SiOC、SiOC/Sn 和传统石墨电极分布制备电池器件，并在 18.6 mA/g（C/20）放电电流密度、0-3V 窗口电压下进行循环测试，初次循环两种电池的库伦效率基本相同，但在第三次循环后开始发生变化，基于 SiOC 电极电池的放电比容量为 683 mAh/g，库伦效率为 97%，而采用 SiOC/Sn 复合电极的电池放电比容量和库伦效率分别增大到 756 mAh/g 和 99%。接着对电池进行倍率性能测试，当放电电流提升到 C/5 时，SiOC/Sn 复合电极电池放电比容量依旧高达 644 mAh/g，传统石墨电极电池比容量为 362 mAh/g，而 SiOC 电极电池的放电比容量最小仅为 92 mAh/g；而当放电电流进一步提升到 6C 时，石墨电极电池比容量降至 44-51 mAh/g，SiOC/Sn 复合电极电池仍可获得 553 mAh/g 的放电比容量，展现出优异的倍率性能。循环稳定性测试显示，在 C/12.5 电流下循环 100 余次后，SiOC/Sn 复合电极电池仍可保持 81% 的初始容量，表现出优秀的循环稳定性。为了探明 SiOC/Sn 复合电极潜在的工作机理，原位 X 射线衍射测试表明，首次放电过程金属 Sn 在 31° 和 32.5° 衍射峰逐渐消失，38.5-39° 的 Li-Sn 合金峰 Li<sub>22</sub>Sn<sub>5</sub> 峰逐渐出现；充电过程 Li<sub>22</sub>Sn<sub>5</sub> 逐渐消失，金属 Sn 再次出现。表明此反应为可逆性较高的合金化

<sup>10</sup> Shaoxuan Ren, Dorian Joulié, Danielle Salvatore, et al. Molecular electrocatalysts can mediate fast, selective CO<sub>2</sub> reduction in a flow cell. *Science*. 2019, DOI: 10.1126/science.aax4608

反应。锂化和去锂化后材料的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜图像显示，金属 Sn 纳米颗粒未发生明显的团聚，仍然呈现均匀的分散状态，这归因于高导电性的 SiOC 基体对颗粒的良好限域作用，从而改善了电池性能。该项研究设计制备了 SiOC/Sn 纳米颗粒复合电极，通过聚合物 SiOC 框架结构有效地限制了 Sn 纳米颗粒团聚，从而增强了电池的倍率性能和循环稳定性，对设计开发高比容量、高倍率性能的新型负极材料提供了新思路。相关研究成果发表在《Advanced Science》<sup>11</sup>。

(郭楷模)

## 离子液体电解质助力安全不易燃的钠离子电池

相比锂元素，钠元素更加资源丰富、价格更加低廉，因此钠离子电池被认为是锂离子电池强有力的替代品。然而与锂电池类似，目前高性能钠离子电池主要还是采用易燃的有机电解质，存在安全隐患，因此亟需开发安全不易燃的新型电解质。斯坦福大学 Hongjie Dai 教授研究团队设计制备了一种基于氯化钠 (NaCl) 缓冲三氯化铝 (AlCl<sub>3</sub>) /1-甲基-3-乙基咪唑氯化物 ([EMIm]Cl) 的安全不易燃离子液体电解质，用于钠离子电池，实现了可逆稳定的钠金属电镀/剥离，从而构建了安全高效的钠离子电池。研究人员按照一定的摩尔比将 AlCl<sub>3</sub> 和 [EMIm]Cl 溶于溶剂当中，接着加入 NaCl 将上述酸性溶液缓冲成中性液体，随后再依次注入乙基二氯化铝 (EtAlCl<sub>2</sub>) 和 1-乙基-3-甲基咪唑双(氟磺酰基)酰亚胺 ([EMIm] FSI) 形成最终的 NaCl 缓冲的氯铝酸盐离子液体电解质 (Na-Cl-IL)。离子导电性测试结果显示，Na-Cl-IL 电解质在室温下的离子导电性达到了 9.2 mS/cm，是已报道的同类型钠离子电解质的 2-20 倍，与传统的有机液态电解质相当。热重曲线显示，传统有机电解质在 132°C 时质量开始发生衰减，即此时出现物质分解；Na-Cl-IL 电解质分解温度则高达 400°C，意味着其具备了更加优秀的热稳定性，即具备了不易燃特性。随后将上述电解质与 Na 金属、Pt 电极组成电池器件进行扫描循环伏安测试，发现 [EMIm]FSI 添加剂是 Pt 电极表面实现稳定可逆 Na 电镀/剥离的关键。接着在 0.5 mA/cm<sup>2</sup> 电流密度下对上述电池进行恒电流循环测试，结果显示电池稳定循环 100 余次后库伦效率达到 95%，扫描电镜显示循环后的 Pt 电极表面依旧光滑，没有出现明显的枝晶。接着研究人员对 Na-Cl-IL 电解质进行优化，并采用石墨烯包覆的磷酸钒钠 (NVP@rGO) 作为正极组装电池。循环测试显示，电池的放电电压达到~4V，经过 460 余次稳定循环后库伦效率高达 99.9%，且可以保持 96% 的初始比容量，700 次循环后仍可保持 90% 以上的初始容量，表现出极其优异的稳定性，且器件最大能量密度和功率密度分别

<sup>11</sup> Romain J. -C. Dubey, Pradeep Vallachira Warriam Sasikumar, Frank Krumeich, et al. Silicon Oxycarbide-Tin Nanocomposite as a High-Power-Density Anode for Li-Ion Batteries. *Advanced Science*. 2019, DOI:10.1002/advs.201901220

为 420 Wh/kg 和 1766 W/kg。相反，采用传统有机电解质的电池经过 450 次循环后容量便下降至初始容量的 75%。该项研究设计了 NaCl 缓冲的氯铝酸盐离子液体电解质，具备了高离子导电性和安全不易燃的特性，为设计开发高能量密度、高安全性的长寿命钠离子电池提供了新的技术路径。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》<sup>12</sup>。

（郭楷模）

---

<sup>12</sup> Hao Sun, Guanzhou Zhu, Xintong Xu, et al. A safe and non-flammable sodium metal battery based on an ionic liquid electrolyte, *Nature Communications*, 2019, DOI: 10.1038/s41467-019-11102-2

## 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](mailto:energy@whlib.ac.cn)

微信公众号：CASEnergy

