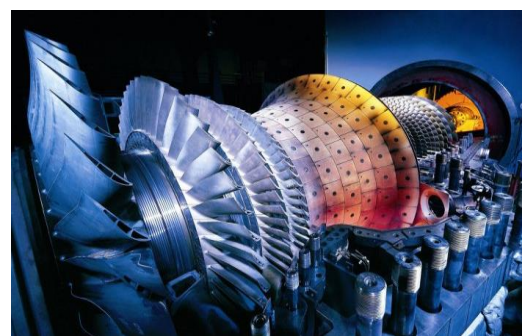


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- IEA：天然气崛起迫使煤炭产量大幅下滑
- DOE 评估电力市场和电力系统可靠性
- 市场研究机构预测 2024 年全球海上风电装机容量超过 60 GW
- 英科学家预测 2022 年电动汽车成本或与传统汽车相当

主管：中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组

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

联系人：赵晏强 zhaoyq@whlib.ac.cn

郭楷模 guokm@whlib.ac.cn

电 话：（027）87197630

目 录

决策参考

IEA: 天然气崛起迫使煤炭产量大幅下滑.....2
DOE 评估电力市场和电力系统可靠性.....5
市场研究机构预测 2024 年全球海上风电装机容量超过 60 GW.....8
英科学家预测最早到 2022 年电动汽车成本或与传统汽车相当 ... 10

项目计划

ARPA-E 资助 3000 万美元开发高性能电力电子变换器..... 11
ARPA-E 资助 2000 万美元研发高效分布式发电系统..... 12
DOE 资助 1740 万美元加速推进稀土元素回收研究工作 13

能源资源

脉冲激光外延新工艺增强氧化钒电极性能稳定性..... 14
新型 3D-2D 混合异质结钙钛矿太阳电池稳定性取得重大突破.... 15
激光诱导双面催化功能石墨烯实现高效电解水制氢..... 16
新型氢氧化钙隔膜增强锌锰电池循环寿命..... 17

本期概要

国际能源署 (IEA) 发布《世界能源平衡报告 2017》报告, 详细分析了全球 150 多个国家和地区的能源供需情况: 2015 年全球能源需求量达到 136 亿吨油当量, 较 2014 年微弱增长 0.3%。2015 年, 全球能源产量达到了 137.9 亿吨油当量, 较 2014 年增长了 0.6%。过去的四十年 (1971-2015 年), 全球一次能源供应量增加了一倍多, 且能源结构发生了显著变化: 2015 年, 尽管石油仍是最主要的燃料来源, 但其在一次能源供应中的占比已经下降到了 32%, 较 1971 年 (44%) 下降了 12 个百分点; 同期, 除石油和天然气外, 其他类型的燃料在全球能源需求中的份额自 1971 年以来几乎没有变化。2015 年全球天然气强劲需求致使 2016 年全球煤炭产量大幅下滑 4.58 亿吨; 受到煤炭、油气产量下降的影响, 2016 年 OECD 美洲国家能源自给率降到 100% 以下。与此相反, 受益于澳大利亚产量增加, OECD 亚洲大洋洲地区的能源自给率继续稳步增长, 自给水平大致与 OECD 欧洲国家相当。

美国能源部 (DOE) 发布《电力市场可靠性评估》报告指出, 随着时代的变化, 美国的电力资源、电力市场发生了显著变化, 但现有的电力市场架构、政策、监管措施能否保障电网的灵活性和可靠性。为了一探究竟, DOE 对电力市场、电力系统可靠性开展了详细评估, 主要探讨了三大问题, 包括: (1) 批发电力市场的演变, 批发电力市场自构建以来已经发生了显著的变化, 当前的电力市场设计方案可能难以满足未来的电力市场演变带来的挑战, 电力市场需要进一步改革, 以解决未来电力服务对可靠性和灵活性需求。(2) 批发电力市场能否充分利用所有电力资源特点, 燃料资源保障是电力系统日益增长的重要因素, 电力系统需要重新设计来处理高影响、低概率破坏性事件。(3) 电力行业监管问题, 可再生能源的增加, 电力需求增长放缓以及国家和州层面的一系列政策、法规和补贴问题, 都给传统的基础负荷发电带来了负面影响, 尤其是燃煤电站和核电站。详见正文。

市场研究机构 Global Market Insights 发布《全球海上风电市场展望》报告指出, 到 2024 年全球海上风电累计装机容量预计将超过 60 GW, 复合增长率将超过 17%: 德国海上风电市场将在 2017-2024 年间出现强劲增长。2017 年, 德国政府与丹麦和比利时政府共同设立了目标, 到 2027 年共同增加 60 GW 的海上装机容量。美国海上风电市场预计将在 2024 年之后大幅增长。中国海上风电行业在清洁能源消费和发电的严格目标推动下, 到 2024 年装机容量将达到 12 GW 以上。此外, 不断增长的城市化和经济发展推动了电力需求, 在加速海上风电市场发展方面也发挥了重要作用。各国均积极部署可再生能源的利用方向以满足其能源需求并实现可持续发展。预计到 2020 年, 海上风电能满足英国 8%-10% 的电力需求。

英国帝国理工学院格兰瑟姆气候变化与环境政策研究所研究指出, 随着合理的资金投入和技术的进步, 电池等储能技术成本将会持续下降, 电动汽车成本预计最早可能在 2022 年降至与传统内燃机汽车相当的水平: 到 2022 年, 无论哪种储能技术, 电池组的容量配置一旦达到 1 TWh, 固定式储能系统 (如充电桩) 的成本将达到 340 ± 60 美元/kWh, 电池组的成本达到 175 ± 25 美元/kWh, 而便携式电池模块成本将降至 135 美元/kWh。

IEA：天然气崛起迫使煤炭产量大幅下滑

8月8日，国际能源署（IEA）发布《世界能源平衡报告 2017》¹指出，2015 年全球能源需求量达到 136 亿吨油当量，较 2014 年几乎没有变化，仅微弱增长 0.3%。此外，随着化工行业的发展和以气代煤的盛行，全球天然气需求日益增长，受此冲击，2016 年全球煤炭产量大幅下滑 4.58 亿吨。报告详细分析了全球 150 多个国家和地区的能源供需情况，要点如下：

2015 年，全球能源产量达到了 137.9 亿吨油当量，较 2014 年增长了 0.6%。其中石油产量增加最多，增幅 2.3%；紧随其后的是可再生能源（+1.9%）；而天然气和核能均增加 1.4%，位列第三。化石能源占能源总产量的 81.7%，较 2014 年低了 0.2 个百分点，主要原因是煤炭产量大幅下降抵消了天然气和石油的增加。非化石能源中，生物燃料和生物质废弃物共占全球能源产量的 9.6%；水电产量下滑了 0.5%，是 1989 年以来的首次下降，尽管如此，水电仍然占全球能源产量的 2.4%；风能、太阳能热利用、太阳能光伏和地热能继续保持了强劲增长势头，依次增加了 16.8%、6.8%、29.7%和 4.1%，但非水电无碳可再生能源在全球能源产量的占比依旧少于 2%。核能占比略微增加，达到 4.9%。

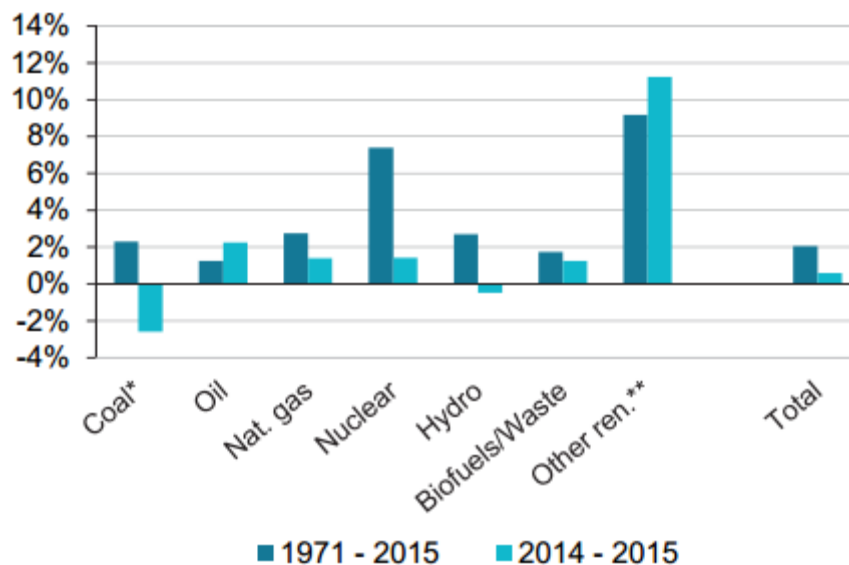


图1 1971-2015年和2014-2015年全球能源产量增长变化趋势

过去的四十年（1971-2015年），全球一次能源供应量增加了一倍多，且能源结构发生了显著变化：2015年，石油仍然是最主要的燃料来源，但其在一次能源供应中的占比已经下降到了32%，较1971年（44%）下降了12个百分点。煤炭占比为

¹ Coal falls as gas rises: World energy balances in 2016.
<http://www.iea.org/newsroom/news/2017/august/coal-falls-as-gas-rises-world-energy-balances-in-2016.html>

28%，仅微弱增加了2个百分点。天然气和核能则显著增加，前者从16%增加到22%，后者从1%增加到5%。

过去的四十年，全球终端能源消费量已经翻了一番。其中，交通运输部门能源用量在终端能源消费量中的份额从1971年的23%增加到2015年的29%，除此之外，其他部门能源使用份额几乎没有太大变动。

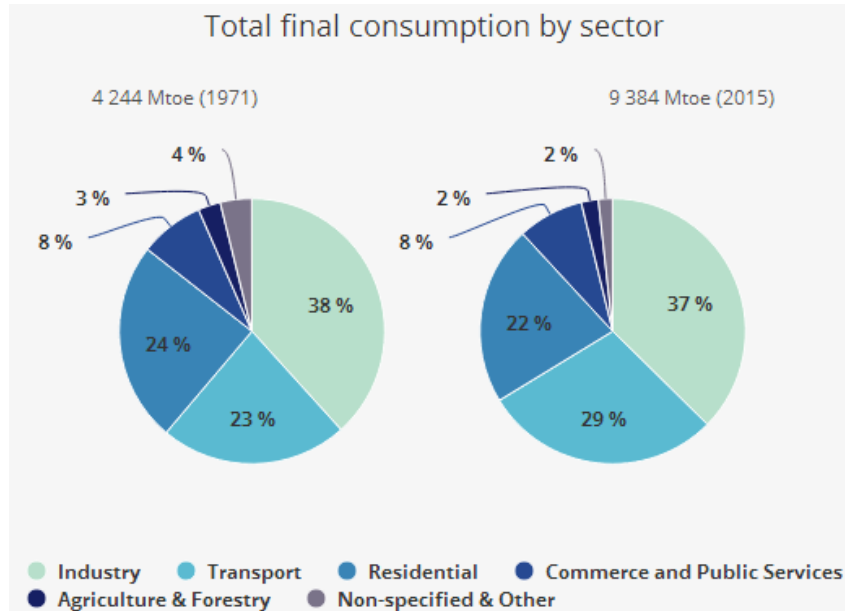


图 2 1971 和 2015 年全球不同用能部门能源使用量在终端能源消费量中的占比

2015 年不同燃料在能源需求中的份额几乎与 2014 年的情况一样，基本没有变化。事实上，在过去四十年间，除石油和天然气外，其他类型的燃料在全球能源需求中的份额自 1971 年以来几乎没有变化。石油仍然是最主要的燃料，主要应用于交通运输领域；其次是煤炭，主要用于发电。然而过去的四十年却见证了一个重大的变化，那就是非 OECD 国家的能源消费量已经上升到与 OECD 国家相当的水平。

由于电力部门的煤炭需求下降，2016 年中国煤炭产量大幅减少 3.2 亿吨(-9%)，这一数值相当于全球第五大煤炭出口国南非的年度总产量。与此同时，美国和澳大利亚的煤炭产量也出现下滑。受到上述几个主要产煤国产量下滑的影响，2016 年全球煤炭产量大幅减少 4.58 亿吨。

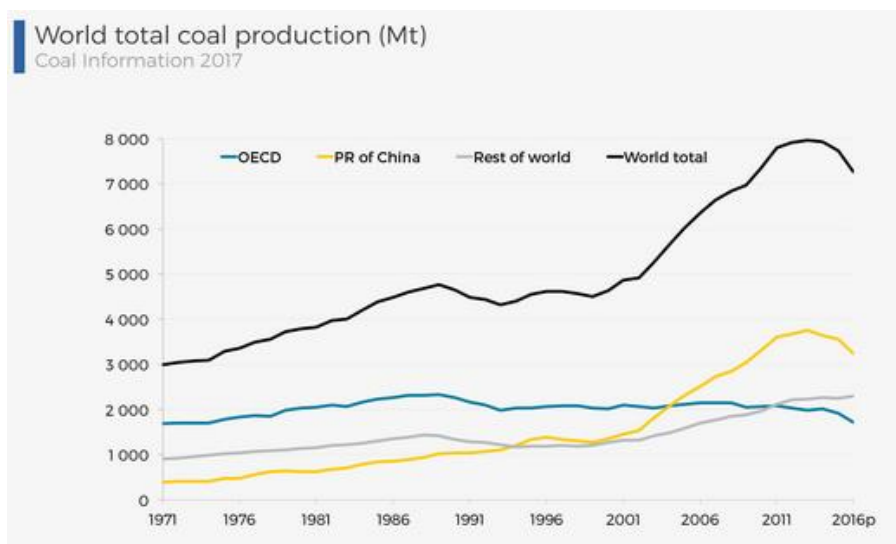


图 3 1971-2016 年全球煤炭产量变化趋势（单位：百万吨）

由于天然气发电大量取代燃煤发电，导致全球的煤炭消费量下滑。上述情况在 OECD 国家体现得更为显著，2016 年 OECD 国家天然气发电量首次与煤炭发电量持平。除了天然气发电量增加，2016 年 OECD 和中国等国家的可再生能源发电量也持续增长。OECD 国家可再生能源发电量增长了 3.8%，占全部发电量的 23.8%，创历史新高；可再生能源增长的主要驱动力是风能和太阳能光伏，过去 16 年（2000-2016 年）两者的年均增长率分别达到了 21% 和 43%。

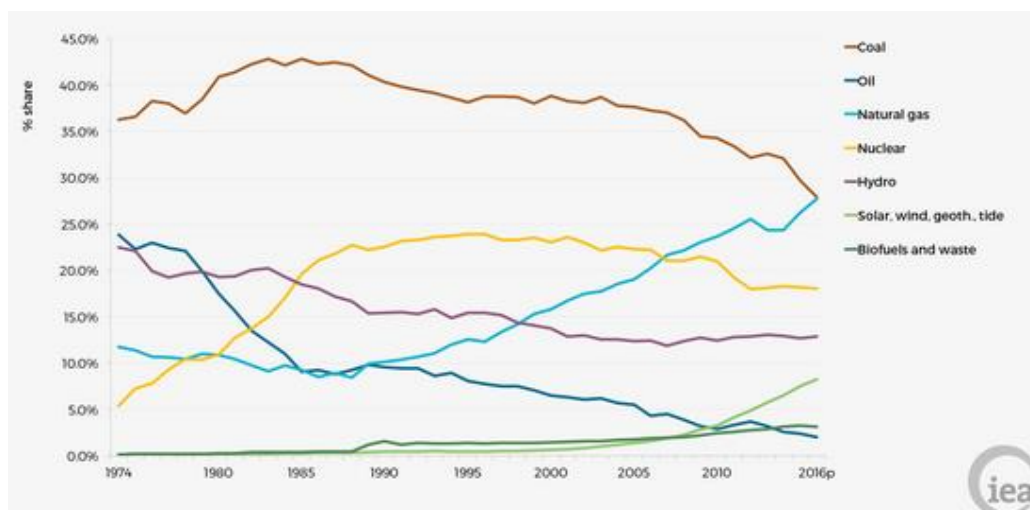


图 4 1971-2016 年 OECD 国家不同电力资源发电量占比变化趋势

受到天然气需求走强的影响，OECD 管道天然气贸易和亚洲液化天然气贸易均显著增加，使得 2016 年全球天然气进口总额增加约 470 亿立方米，较 2015 年增长了 4.5%。

受到煤炭、油气产量下降的影响，2016 年 OECD 美洲国家能源自给率降到 100% 以下，失去了完全自给的能力。与此相反，受益于澳大利亚产量增加，OECD 亚洲

大洋洲地区的能源自给率继续稳步增长，自给水平大致与 OECD 欧洲国家相当。

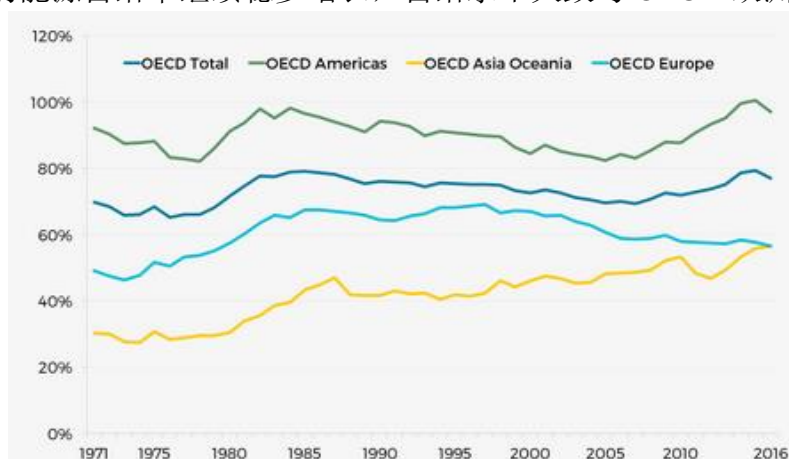


图 5 1971-2016 年 OECD 国家能源自给率变化趋势

(郭楷模)

DOE 评估电力市场和电力系统可靠性

8 月 30 日，美国能源部（DOE）发布《电力市场和可靠性评估》报告²指出，电力市场、电网的灵活性和弹性不仅与全美人民的日常生活息息相关，更是美国国家和经济安全的重要保障。随着时代的变化，美国的电力资源、电力市场发生了显著变化，但现有的电力市场架构、政策、监管措施能否保障电网的灵活性和可靠性还未可知。为了一探究竟，DOE 对电力市场和电力系统可靠性开展了详细评估，主要探讨了三大问题，包括：批发电力市场的演变、批发电力市场能否充分利用所有电力资源特点以及电力行业监管问题。关键结论如下：

1、批发电力市场的演变

(1) 虽然集中式电力市场模式在短期运营中实现了可靠的批发电力供应，但环境的变化会对集中式电力市场模式和市场的垂直整合带来挑战。

当前，批发电力市场面临着诸多挑战，包括需求增长、联邦政府和各州政策干预等。批发电力市场自构建以来已经发生了显著的变化，当前批发电力市场设计的原则就是要确保批发电力的可靠性和短期成本最小化。由此产生的低平均批发能源价格，有利于批发电力的买家减少成本支出，这对许多现有的基础设施资源来说非常关键，也是维护电力系统可靠性和灵活性的重要手段。

当前的电力市场设计方案可能难以满足未来电力市场演变带来的挑战。因为如果具有近零边际成本的波动性可再生能源能够实现高比例并网，能够有效地拉低批发电力价格，且不受当前低天然气价格的影响。这将给传统基荷（以及非基荷）电厂带来额外的经济压力，因此需要针对持续动态变化的电力市场做出及时的响应。

² Staff Report to the Secretary on Electricity Markets and Reliability. <https://www.energy.gov/downloads/download-staff-report-secretary-electricity-markets-and-reliability>

电力市场需要进一步改革，以解决未来电力服务对可靠性和灵活性的需求。电力系统运营商正在致力于识别、定义不同的电力资源，以针对不同属性的电力资源制定合适的补偿机制，从而提高电力系统可靠性和灵活性。然而，增强可靠性和灵活性迫切需要进一步的努力，并迅速建立市场价值手段或提供监管手段。

(2) 随着市场状况不断变化和波动性可再生能源的发展，电力资源和电网资源的运行更加灵活。

最初设计用作基荷电源的一些发电厂并不适合灵活运行（例如核电厂），缺乏让其灵活运行的监管制度。波动性可再生能源在一天的时间内变化很大，需要可调度的发电厂更加灵活地运行。综合来看，这些趋势对灵活的电力产出产生了溢价，而不是传统基荷电厂的稳定产出。这种灵活性通常由发电资源提供。然而，作为提高系统灵活性的方法，人们正在探索灵活需求、增加传输和能量存储技术等非替代性的灵活来源。

(3) 社会对电力供应属性的重视超过了当前批发电力市场设计所提供的补偿价值。

人们重视发电厂提供的各种利益，如就业、社区经济发展、低排放、地方税支支出、灵活性、能源安全或与核工业基地相关的国家安全利益。但这些益处大多没有得到电力批发市场的认可或补偿，从而导致政府和私营部门采用了各种各样的努力措施，包括保持开放或关闭已有的电力基础设施，以及鼓励可再生能源发电。

2、批发电力市场能否充分利用所有电力资源特点

(1) 必须不断改进市场认可度以持续补偿可靠性，但需要采取更多的工作来应对灵活性。

可靠和可负担的电力对包括制造业、服务业和金融部门在内的现代经济至关重要。北美电力可靠性公司（NERC）的年度可靠性评估报告指出，在 2016 年期间，大容量电力系统仍然在努力提高可靠性。NERC 在 2013-2015 年度报告中得出了相同的结论。这些问题表明目前电力部门的技术和制度正在变化，处理这些问题将需要部门之间的协调合作。

(2) 燃料资源保障是电力系统日益增长的考虑因素。

维持当地的燃料资源是改善燃料保障程度的一种方式，但是大多数发电技术在过去都经历了燃料可供应能力的挑战。虽然煤炭设施通常在现场储存足够的燃料以持续 30 天或更长时间，但极端寒冷的天气可导致冷冻燃料储存和火车运输中断。天然气根据需要由管道输送。而现有管道能力面临的挑战加上选址和建设新天然气管道的困难，以及诸如家庭供热的天然气竞争用途，在过去造成了供应紧张。供应限制可能会造成价格上涨的风险，在极端情况下可能会影响可靠性。

(3) 潜在的破坏性事件范围很广泛，需要系统设计来处理高影响、低概率事件。

制定具有成本效益的计划来提高区域、州或公用事业层面电力系统的灵活性是非常有挑战性的。在发生重大事件的情况下，基于全面危害进行规划、实践和协调，并配备可用的资源和燃料，对于快速反应至关重要。需要阶段性的定期演习，以便政府机构和公用事业有效地应对紧急情况。也需要更多的工作来了解在未来几年电网发生变化的情况下，可以采取哪些措施来维持各种状况下的电网恢复能力。

此外，较低的天然气价格使得天然气的用途扩大，使天然气价格风险与可利用性相关。寻求提供更多就业机会、减少污染或降低风险的政策可能需要更多的前期投资，而不是成本最低的体系。政策制定者必须清楚了解电力服务的真正成本和收益，并了解可靠性、灵活性和可购买性等属性之间的权衡。

3、电力行业监管问题

作为优良发电资源的天然气价格近期出现了前所未有的上涨，可再生能源的增长，电力需求增长放缓以及国家和州层面的一系列政策、法规和补贴问题，都影响了传统的基荷发电，尤其是燃煤电厂和核电厂。2002-2016年期间，新增装机容量达390.5 GW；而与此同时共有132 GW的发电装机容量退役，约占2002年总装机容量的15%，其中退役的燃煤发电机组有531个，发电容量约59 GW。此外，在2015年退役的18 GW发电装机容量中，燃煤电厂也占到80%以上。虽然发电厂退役的原因多种多样，但以下几个因素导致了最近的退役和不断增加的退役压力：

(1) 天然气发电得天独厚的经济效益是迫使燃煤电厂和核电厂退役的最大推动因素。

低成本、丰富的天然气和高效率天然气联合循环发电厂的开发，使其成为现有煤炭、核电和水力发电厂的新竞争对手。2016年，天然气成为美国最大的发电来源，是有记录以来首次超过煤炭。电力部门天然气使用量的增加导致电力批发市场价格持续低迷，降低了对电网至关重要的其他发电资源的盈利能力。与煤炭和核电相比，新的高效天然气发电厂建设周期短。煤炭和核电厂的生产成本仍然保持在一定的水平，而新建和现有的、更灵活和相对较低运营成本的天然气发电厂压低了电力批发市场价格，以至于一些以前有利可图的核电和煤矿设施开始亏损运营。页岩革命使开发美国丰富的国内天然气资源成为可能，也为消费者和整体经济带来了巨大的价值。

(2) 造成电厂退役的另一个因素是电力需求增速放缓。

从20世纪90年代末开始，美国总用电量的年均增长率为2.5%，而2000-2008年年均增长率减缓为1.0%，此后一直保持平稳。电力需求的变化，尤其是经济产出和电力需求明显脱钩，在一定程度上是能效政策所导致的。2002-2016年，电力需求增长缓慢，而新增发电装机容量390.5 GW，使得大量老旧、高成本的产能过剩。

(3) 可再生能源的调度对基荷发电厂的经济性产生了负面影响。

自 2007 年以来，由于政府的政策激励，风能和太阳能的总发电量快速增长。可再生能源配额标准（RPS）政策是自 2000 年以来最大的贡献因素，其次是联邦税收抵免和政府相关研究（导致了风能和太阳能技术成本的急剧下降）。由于这些资源的运行成本比传统的基荷发电要低，所以它们首先被调度，并在可用时替换基荷资源。受到上述补贴政策的影响，传统的基荷电力公司的收入减少了，批发电力价格下降。

（4）监管合规所需的投资也对基础设施经济性产生了负面影响，基荷发电厂的退役高峰（2015 年）与发电厂规定的最后期限以及未来监管的强烈信号相关。

一套定于 2011-2022 年实施的环境法规对发电成本产生了不同程度的影响。例如，2015 年是煤炭和石油工厂为汞和空气毒性标准（MATS）添加污染控制设备的最后期限，是燃煤电厂退役数量最多的一年。同年，美国环境保护总局（EPA）最终公布了清洁电力计划，如果全面实施将对燃煤发电造成更大的压力。核电厂也面临着监管成本。有三家宣布关闭的核电站都未能满足各自州的冷却水规定，也是核电站退役的原因之一。

报告最后总结，继续关闭传统的基荷发电厂需要制定一个全面的战略，以保证电力市场长期的可靠性和灵活性。各州和地区正在面临可能会影响消费者未来电力供应可靠性和灵活性的风险。水电、核能、煤炭和天然气提供了多种的电力资源，这对保障电力系统的弹性（恢复能力）至关重要。需要对地区和国家层面电力市场进行持续、全面的综合评估，开发国内能源资源组合，确保电网的可靠性和灵活性。

（吴勘 郭楷模）

市场研究机构预测 2024 年全球海上风电装机容量超过 60 GW

8 月 3 日，市场研究机构 Global Market Insights 发布《全球海上风电市场展望》报告指出³，2016 年全球海上风电装机总容量达到 14.4 GW，市场规模达到 626 亿美元。随着世界银行、国际金融公司和绿色投资银行等金融机构不断增加对海上风电的投资，海上风电行业将得到进一步的推动。且随着全球众多地方政府和监管机构陆续出台多项可再生能源相关举措，到 2024 年全球海上风电累计装机容量预计将超过 60 GW，复合增长率将超过 17%。

能源需求的指数级增长以及微电网快速发展，将会使海上风电市场的增长更加迅速。风力发电技术的发展加之对供应安全关注的增加，也将促进海上风电产业发展。美国能源部能源信息署（EIA）预计，非经合组织国家的强劲经济发展将使其电力消费量全球占比增加到 50% 以上。到 2040 年，非经合组织国家将占据全球电力生产份额的 61%。相较于陆上风电，政府对能源效率的要求将推动海上风电市场份额

³ Offshore Wind Market growing at over 17% CAGR by 2024. <http://www.gwec.net/news/wind-industry-news/?rkey=20170803MN56416&filter=1818>

的增加。为支持开发可靠的风能技术而增加研发投资也会对其商业前景产生积极的影响。2017 年，欧盟委员会在“地平线 2020”计划框架下向海上风电技术资助 1783 万美元，旨在通过整合先进的监测和控制技术来减少海上风电运营及维护成本。

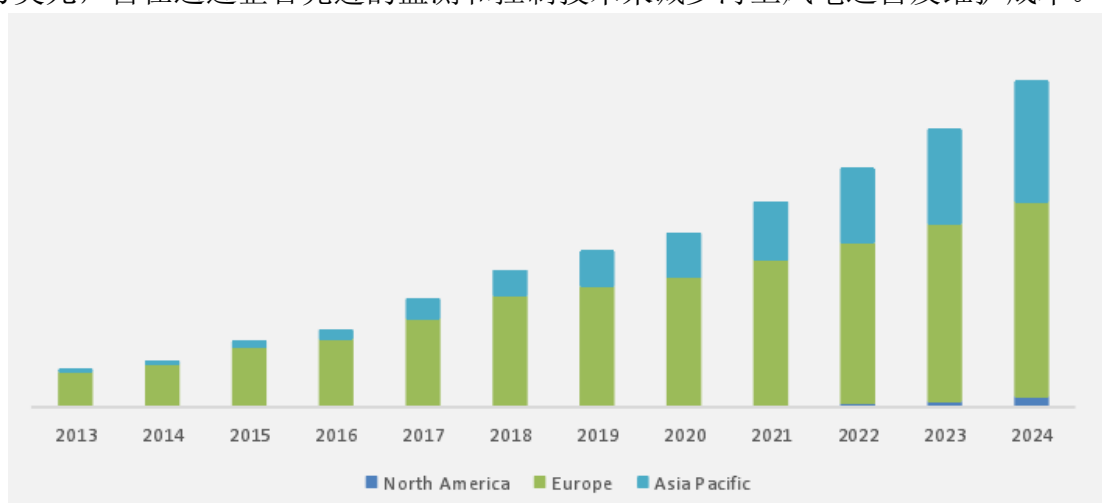


图 1 至 2024 年海上风电市场发展趋势预测

在组件方面，2016 年风力涡轮机占海上风电市场份额达到 30% 以上。随着先进风力发电技术的不断发展，以及越来越多大容量风力涡轮机的采用，增加的投资将会对整体成本产生重大影响。挪威海上石油天然气集团公司于 2016 年在苏格兰阿伯丁郡海岸开发了世界上首个 30 MW 的浮动式海上风电站，总投资为 199 亿美元。由于能够减少对渔船和航道的影响，浮动式风力涡轮机在亚太和欧洲海上风电市场正强劲增长。

在区域发展趋势方面，近年来欧洲海上风电市场一片欣欣向荣。2016 年，欧洲海上风电装机占全球海上风电装机总量的 88%，而其余 12% 则分布在美国、中国、日本和韩国。海上风电的大规模扩张归功于私营和政府机构日益强调的能源优化。德国由于制造商之间的激烈竞争、严格的产能增加目标，以及零部件成本价格持续下降，其海上风电市场将在 2017-2024 年间出现强劲增长。2017 年，德国政府与丹麦和比利时政府共同设立了目标，到 2027 年共同增加 60 GW 的海上装机容量。荷兰海上风电市场受到满足能源需求的严格规定，在未来六年内将进一步强势增长。该国在北海建立了最大的近海风电场，每年能够生产 2.6 TWh 的清洁能源。美国在 2016 年其首个海上风电场装机容量达到 30 MW，美国政府为满足清洁能源需求而采取了强有力的措施，其海上风电市场预计将在 2024 年之后大幅增长。中国海上风电行业在清洁能源消费和发电的严格目标推动下，到 2024 年装机容量将达到 12 GW 以上。

此外，不断增长的城市化和经济发展推动了电力需求，在加速海上风电市场发展方面也发挥了重要作用。各国均积极部署可再生能源的利用方向以满足其能源需求并实现可持续发展。预计到 2020 年，海上风电能满足英国 8%-10% 的电力需求。

(吴勘 郭楷模)

英科学家预测最早到 2022 年电动汽车成本或与传统汽车相当

7 月 10 日，英国帝国理工学院格兰瑟姆气候变化与环境政策研究所 Oliver Schmidt 教授带领的研究团队在《*Nature Energy*》期刊上发表了题为《基于经验曲线的储能技术未来成本预测》论文指出⁴，随着合理的资金投入和技术的进步，电池等储能技术成本将会持续下降，电动汽车成本最早可能在 2022 年降至与传统内燃机汽车相当的水平。

储能技术在未来的低碳电力系统中将发挥关键作用，了解储能技术未来的价格走势，既可以增加投资者的信心，也有助于政策制定者设计科学合理的部署策略，但目前储能技术的相关价格数据还很缺乏。论文通过构建经验曲线这一分析工具来对数十种储能技术的未来价格走势进行了预测，包括：抽水储能、铅酸电池、锂离子电池（移动电子设备用）、锂离子电池（电动汽车用）、锂离子电池（住宅用）、锂离子电池（公用事业用）、镍-金属氢化物、钒液流电池、钠硫电池和燃料电池等。研究人员利用分析工具量化了降低成本的潜力和累积投资需求，能带来最大产能的技术可能最具有成本竞争力。这是模块化技术的优点，例如可用于多种应用场景的锂离子电池。

通过对材料和生产成本开展自下而上的评估表明，到 2022 年，无论哪种储能技术，电池组的容量配置一旦达到 1 TWh，固定式储能系统（如充电桩）的成本将达到 340 ± 60 美元/kWh，电池组的成本达到 175 ± 25 美元/kWh，而便携式电池模块成本将降至 135 美元/kWh。任何技术要达到 1 TWh 的容量，需要累计 1750-5100 亿美元的投资，基于对市场增长的预测，上述情况要到 2027-2040 年才能实现。随着新技术在环保和高容量储存方面的不断增强，或将加速成本的降低。

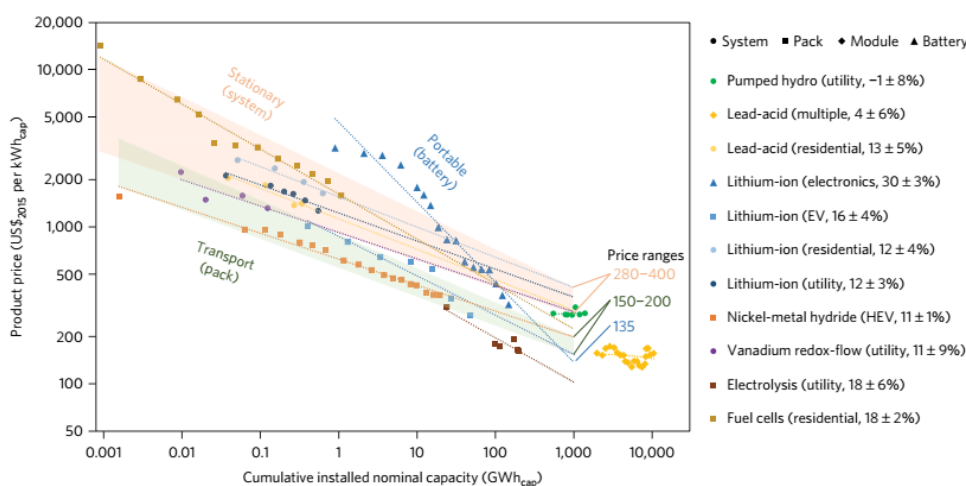


图 1 1TWh 容量不同储能技术未来价格成本走势（单位：美元/千瓦时）

论文最后探讨了如何有效降低储能技术的未来成本，使储能能在运输和住宅应用

⁴ O. Schmidt, A. Hawkes, A. Gambhir, et al. The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Nature Energy*, 2017, doi:10.1038/nenergy.2017.110.

中更具经济竞争力。为了实现上述目标，未来的储能技术研究应包括进一步的电力容量增长和价格发展，并及时更新分析的经验数据。依托数据更新，有助于明确研发资金对编制双因素经验曲线的影响，以进一步完善和改进储能技术的经验曲线。未来的研究还可以将发布的数据作为一个健全的统计基础纳入特定的分级存储成本分析，以全面评估储能技术未来的价格走势。

(吴勘 郭楷模)

项目计划

ARPA-E 资助 3000 万美元开发高性能电力电子变换器

8月23日，美国能源部先进能源研究计划署(ARPA-E)宣布资助3000万美元，用于支持“利用独创的拓扑结构和半导体材料制造创新可靠的电路”(CIRCUITS)主题研究计划下遴选的21个新研发项目⁵，旨在利用宽禁带半导体开发新型高效、轻量化、可靠的电力电子变换器，并结合全新的电路拓扑结构、数字化控制、热管理和半导体封装技术实现电力电子变换器性能的重大突破，从而实现基于半导体组件的各类电子器件的性能最大化、能耗最小化，为交通、信息、电力等行业带来变革性影响。本次资助项目具体内容参见表1。

表1 CIRCUITS 主题计划新资助的21个项目研究内容

承担机构	研究内容
科锐费耶特维尔公司	利用基于碳化硅半导体的固体变换器来开发电动汽车用的500 kW 智能、便携、高效的快速充电器
伊顿集团	开发基于碳化硅半导体的新型高效、低能耗的无线电力变换器，将其应用于计算机数据中心，减少数据中心能耗，减低运营成本
Empower 半导体公司	针对集成电路（如计算机的微处理器）开发全新的谐振电压调节器架构，实现对集成电路功率的更优控制，减少能耗
佐治亚理工学院	针对中压范围（4-13 kV）的电网应用，利用碳化硅半导体开发小尺寸、模块化、高性能的固态电力转换器
伊利诺伊理工大学	利用氮化镓基的晶体管开发超快、自驱动、自动运行双向固态断路器，以便在发生故障时更好地保护电网，降低电网保护成本和响应时间
印象能源公司	基于碳化硅半导体的紧凑型发动机驱动系统，以实现更加有效地控制高速永磁同步电机的功率，减少能耗
美国英飞凌科技公司	利用氮化镓半导体替代传统的硅基半导体制备全新的开关，结合全新开发的低成本高载流子迁移率的晶体管门驱动集成电路，改善各种不同速率的电机性能，降低其能耗和制造成本

5 DEPARTMENT OF ENERGY ANNOUNCES 21 NEW PROJECTS TO DEVELOP HIGH-PERFORMANCE CIRCUITS FOR INDUSTRIAL, CONSUMER USE. <https://arpa-e.energy.gov/?q=news-item/department-energy-announces-21-new-projects-develop-high-performance-circuits-industrial>

马凯特大学	针对电动汽车，利用碳化硅基的金属-氧化物半导体场效应晶体管开发小体积、轻量化、高性能的交流到直流超快充电器，减少充电时间
西北大学	基于碳化硅半导体开关为直流、交流系统开发通用的变流器，以减少系统的质量、体积、成本和故障率
Opcondys 公司	为电网储能系统开发一个全新的双向、高压功率变换器，改善储能系统效率，减少系统尺寸和成本
特利丹科技公司	为 480 V 交流电动机开发一个 14 kW 功率变换器，让电动机获得更高的效能和功率密度
美国联合技术研究中心	开发一种基于碳化硅半导体的单极 15 kW 交流到交流电力变换器
美国联合技术研究中心	开发高效、高功率密度的电力变换器以满足超高功率密度的千瓦级电力管理需求
阿肯色大学	利用碳化硅电子器件为重型设备和其他大型的交通工具（如卡车、公交车等）开发一个 500 kW 功率逆变器，减少转换过程的能量损失
科罗拉多大学博德分校	开发全新的碳化硅基功率变换器，以在小电池组模块下实现高功率、高电压的转换，减少电动汽车电力系统的尺寸
伊利诺伊大学芝加哥分校	利用宽禁带半导体为电动车快速充电设施开发高功率变换器的拓扑结构，减小充电设施体积
伊利诺伊大学香槟分校	利用氮化镓基飞跨电容多电平变换器来开发全新的紧凑型、轻量化、高能量密度的车载双向充电器，以缩短充电时间
伊利诺伊大学香槟分校	基于氮化镓电子器件开发数据中心用交流到直流高效电力变换器，减少转换过程的能量损失
威斯康星大学	为集成的电机驱动器开发宽禁带电流源逆变器，以节省能耗
弗吉尼亚理工大学	为中压范围的应用（如电机驱动、电网用的功率逆变器、微网用的直流到直流转换器）开发高功率、高电压的交流到直流、直流到直流功率变换器
弗吉尼亚理工大学	开发单电源级联型多电平直流-交流逆变器，同时结合现有的中压交流-直流逆变器开发双向的固态变压器，以将低压交流电高效转换为高压交流电

（郭楷模）

ARPA-E 资助 2000 万美元研发高效分布式发电系统

7 月 26 日，ARPA-E 宣布资助 2000 万美元用于支持“高效天然气分布式发电系统”（INTEGRATE）主题研发计划下遴选的项目⁶，以开发天然气燃料电池和发动机混合动力系统概念和相关使能技术，从而开发出发电效率超过 70% 的天然气高效分布式发电系统（发电量为 100 kW），以降低发电成本，为商业和工业终端用户节约能源成本，减少碳排放，增强国家能源安全。INTEGRATE 研发项目将分为两个阶段开展，第一阶段侧重于开发组件和子系统技术，第二阶段重点是开发和验证完整的

⁶ ARPA-E ANNOUNCES NEW FUNDING OPPORTUNITY FOR HIGH-EFFICIENCY DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS. <https://arpa-e.energy.gov/?q=news-item/arpa-e-announces-new-funding-opportunity-high-efficiency-distributed-generation-systems>

系统集成技术。其中，第一阶段将获得 400 万美元资助，第二阶段将获得 1600 万美元资助。整个项目主要关注四大核心技术，包括：（1）先进发动机/燃料电池混合动力系统；（2）先进天然气燃料电池堆概念和制造方法；（3）先进系统平衡组件（例如高温热交换器）；（4）先进控制系统技术。

该新型天然气分布式发电系统工作原理是利用燃料电池和传统内燃机之间的协同作用，即通过将燃料电池的一些残余燃料用于发动机，从而产生额外的功率提高整体系统效率。由于发动机可以同时使用并充当燃料电池的平衡装置，因此可以节省系统成本。

INTEGRATE 计划致力于克服关键的技术障碍，以实现高效的分布式能源替代方案，实现所需的能源、经济和排放优势，从而大大提高分布式能源技术的采用率，提高美国发电行业的整体效率，同时降低成本和提高灵活性。据统计，INTEGRATE 开发的技术预计可节省 30 亿美元的燃料成本，并消除电力生产和分配所需的 1 万亿英热单位的一次能源。此外，与当前众多公用事业规模的热电厂中使用的水冷却系统形成鲜明的对比，这套混合动力系统能够自动生成运行所需的任何水，能够有效地节约水资源，大约每天可以节省 40 亿加仑的水（约占美国淡水总量的 1%）。

（吴勘 郭楷模）

DOE 资助 1740 万美元加速推进稀土元素回收研究工作

8 月 16 日，美国能源部（DOE）化石能源局宣布于 2017-2022 年间资助 1740 万美元用于支持稀土元素（REE）回收系统研究⁷，旨在开发和验证经济、高效、环保的稀土回收技术，以支撑和强化美国电力电子、计算机和通信系统、交通运输、医疗和国防等广泛需求稀土元素的研究领域。本次项目招标选取了两个主题，包括：

（1）开发从煤炭及副产品中分离、提取和浓缩稀土元素的实验平台技术；（2）从煤炭及副产品中分离、提取和浓缩稀土元素的中试规模技术开发。具体内容参见表 1。

表 1 稀土元素回收系统两大主题技术研究内容

主题	研究内容	资助金额/ 万美元
实验平台技术	<ul style="list-style-type: none"> •使用北达科他州的次烟煤、褐煤等相关材料作为原料来测试稀土元素回收系统。除了生产稀土元素之外，还将从褐煤原料中回收其他材料，以生产一种或多种高附加值的其他化学品 •使用来自西弗吉尼亚州阿巴拉契山脉中北部矿井煤层中的酸性排水及固体废弃物作为稀土元素和其他高附加值材料回收的原料 	540

⁷ DOE Invests \$17.4 Million in Projects To Advance Recovery of Rare Earth Elements From Coal and Coal Byproducts. <https://energy.gov/articles/doe-invests-174-million-projects-advance-recovery-rare-earth-elements-coal-and-coal>

中试规模技术	<ul style="list-style-type: none"> •将肯塔基州物理加工处理过的燃煤飞灰原料运输到宾夕法尼亚州中试工厂进行后续处理，以从中回收稀土元素和其他高附加值的化学品 •在肯塔基州的佩里县以及伊利诺伊州盆地的洗煤厂分别建立一座中试规模的示范工厂，以验证从洗煤的副产物中回收稀土元素的中试技术 	1200
--------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

(郭楷模)

前沿与装备

脉冲激光外延新工艺增强氧化钒电极性能稳定性

氧化钒 (VO_2) 具有来源丰富、价格低廉、无毒、易于制备以及极高的理论电容值等优点，成为备受关注的高性能电极材料。然而氧化钒自身的不稳定性严重制约其商业化应用。橡树岭国家实验室 Ho Nyung Lee 教授课题组牵头的联合研究团队利用脉冲激光外延 (PLE) 方法沉积制备了高结晶质量、高导电性的 VO_2 薄膜，将其作为正电极应用于锂离子电池。随后在不同的放电电流下对电池进行恒电流充放电测试：在 1.5-3.2V 电压区间，0.6C (1C=323 mA/g) 的倍率下，放电比容量高达 311 mAh/g；随后逐步增大充放电倍率，从 1.5C 到 3.1C 再到 6.2C，电池仍然保持了较高的放电比容量，依次为 267 mAh/g、247 mAh/g 和 230 mAh/g，表现出极其优异的倍率性能。接着研究人员在 500 mA/g 放电电流下对电池进行循环伏安测试，结果显示，循环 200 次后，电池比容量维持在了 265 mAh/g 左右，几乎没有衰减，库伦效率接近 100%，表现出极其优异的循环稳定性。该电池的稳定性远远优于目前已知的各种 VO_2 锂离子电池电极。对 VO_2 晶体结构的密度泛函理论 (DFT) 研究、扫描透射电子显微镜 (STEM) 研究表明，采用 PLE 方法制备的 VO_2 薄膜原子层间距较宽，形成了独特的传输通道，使得电解液中锂离子嵌入和脱嵌变得容易；同时这种开放的多通道结构可以有效缓冲氧化钒在充放电时产生的形变应力，从而减小形变应力对 VO_2 结构的损坏，防止材料的崩塌。正是上述两个因素使得 PLE 制备的 VO_2 薄膜电极具备了高比容量和长循环寿命的特性。该项研究开发了全新的薄膜制备工艺，成功制备出了具有多孔道结构的 VO_2 薄膜电极，缓解了材料形变的应力，同时让锂离子嵌入和脱嵌过程变得愈加通畅，增强了电池的循环稳定性和容量保持率，为设计和制备高性能的 VO_2 锂电池提供了新路径。相关研究成果发表在《*Nano Letters*》⁸。

(郭楷模)

⁸ Shinbuhm Lee, Xiao-Guang Sun, Andrew A. Lubimtsev, et al. Persistent Electrochemical Performance in Epitaxial $\text{VO}_2(\text{B})$. *Nano Letters*, 2017 (4), 2229-2233.

新型 3D-2D 混合异质结钙钛矿太阳能电池稳定性取得重大突破

有机无机杂化钙钛矿太阳能电池光电转换效率在短短几年时间内已突破了 22%，被认为是最有希望替代晶硅电池的新一代薄膜电池技术。然而，稳定性不佳、寿命短成为了该电池技术走向商业化应用的一大障碍。英国牛津大学 Henry J. Snaith 教授课题组通过对钙钛矿前驱体、制备工艺的调控，成功制备了新型的 3D-2D 混合异质结钙钛矿，表现出优异的空气稳定性，采用该新型 3D-2D 异质结钙钛矿光敏层的未封装薄膜电池在空气环境中连续工作 1000 小时，仍可维持初始效率的 80%，呈现出前所未有的稳定性。研究人员在 3D 相结构的双阳离子双卤素铅钙钛矿 ($\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$) 前驱体中引入微量的丁胺 (BA) 溶液，通过旋涂和高温退火制备出了 3D-2D 混合异质结钙钛矿薄膜 ($\text{BA}_x(\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17})_{1-x}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$, X 表示引入的 BA 摩尔量)。扫描电镜测试结果显示，未添加 BA 的双阳离子双卤素铅钙钛矿薄膜晶粒尺寸在 2-5 微米之间，且晶粒均呈现 3D 形貌；而引入 BA 后，钙钛矿薄膜晶粒增大，且在原有的 3D 钙钛矿晶粒的晶界处出现了垂直于基底的高度取向性的 2D 片状结构钙钛矿，并且随着 X 的增大，2D 片状的钙钛矿数量增多。时间相关的光致发光光谱表征显示，含有 BA 的钙钛矿荧光寿命要长于无 BA 的钙钛矿薄膜，即 2D 片状钙钛矿形成能够有效地减少晶体缺陷，抑制非辐射的载流子复合。随后研究人员将制备的钙钛矿薄膜用于组装电池器件并测试 BA 对电池性能的影响。研究发现，基于无 BA 添加剂的钙钛矿 $\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$ 的电池稳态平均转换效率为 14.1%，效率最优可达 15.3%；而采用含有 BA 的 3D-2D 钙钛矿 $\text{BA}_{0.09}(\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17})_{0.91}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$ 薄膜电池稳态平均转换效率为 15.8%，最高值可达 17.3%；随后研究人员对含有 BA 钙钛矿前驱体组分的进一步优化，制备了带隙更窄的 3D-2D 异质结钙钛矿 $\text{BA}_{0.05}(\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.8}\text{Br}_{0.2})_3$ ，发现电池性能得到进一步提高，平均效率可达 19.5，最大值可达 20.6%，这主要是由于经过优化后，钙钛矿薄膜的带隙变窄，光吸收能力增强。更为关键的是，采用新型 3D-2D 异质结钙钛矿 $\text{BA}_{0.05}(\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.8}\text{Br}_{0.2})_3$ 呈现出极其优异的空气稳定性，在 1 个标准太阳光模拟光源照射下，未封装电池在室温空气环境中连续工作 1000 小时后仍可保持初始效率的 80%，而封装后的电池工作寿命达到了惊人的 4000 小时，相当于 5 个多月，这是迄今为止钙钛矿电池在空气环境中工作寿命最长的值。相关研究工作发表在《*Advanced materials*》⁹。

(郭楷模)

⁹ Robert L. Z. Hoyer, Lana C. Lee, Rachel C. Kurchin, et al. Strongly Enhanced Photovoltaic Performance and Defect Physics of Air-Stable Bismuth Oxyiodide (BiOI). *Advanced Materials*, 2017, 1702176.

激光诱导双面催化功能石墨烯实现高效电解水制氢

目前，制备氢气的手段主要是化石燃料制氢，然而该方法会产生大量的温室气体二氧化碳，对环境气候不利。因此，开发全新的绿色制氢方法（如利用可再生能源电解水制氢）成为近年来制氢研究领域的热点方向。莱斯大学 James M. Tour 教授课题组利用激光诱导生成了具有双面催化活性的石墨烯薄膜电极，能够高效地实现光解水产氢和氧。研究人员首先通过激光加热聚酰亚胺（PI）表面来制造 3D 多孔石墨烯（LIG）薄膜，其边缘含有催化活性物质。LIG 本身是惰性的，所以把它变成一个高效地电解水薄膜需要经过一系列化学处理：首先，用于催化析氢反应（HER）的一面，用 Pt 掺杂 PI，然后用激光加热 Pt 掺杂的 PI 表面制得 LIG-Pt；用于催化析氧反应（OER）的一面，先制备 LIG，然后用电化学沉积方法负载活性材料铁（Fe）和镍（Ni），制得 LIG-NiFe；综合上述过程，便获得了具有双面催化活性的石墨烯薄膜。在电解水反应过程中，在接近 0 V（相对可逆氢电极）的极低起始电位，LIG-Pt 面能够有效地催化析氢，且随着电位升高，电流密度迅速增加。当电流密度达到 100 mA/cm²，过电位 256 mV，催化活性与商用的 Pt 电极相当。但 LIG-Pt 的优点在于 Pt 使用量只有商业催化剂中的四分之一。对于 LIG-NiFe 薄膜面，其能够有效地催化析氧，起始电位约为 230 mV，电流密度达到 10 mA/cm² 和 100 mA/cm² 的过电位分别为 292 mV 和 380 mV，且 LIG-NiFe 在经过 1000 次循环实验后，电流密度达到 10 mA/cm² 的过电位只是略微由 292 mV 提高到 302 mV。为了进一步降低成本，研究人员提出了新的设计方案，即利用聚酰亚胺开发一种含有钴（Co）和磷（P）的 LIG 催化剂薄膜（LIG-Co-P），LIG-Co-P 可取代 LIG -Pt 或 LIG -FeNi，以电解水制氢或氧。新型 LIG-Co-P 电解水也获得了较好的效果，然而过电位却高达 1.66V，因此有待进一步的优化。该项研究利用激光诱导制备了具有双面催化功能石墨烯薄膜，实现了电解水制氢和产氧高效同步进行，为设计和开发高效制氢催化剂提供了全新的思路。相关研究工作发表在《*ACS Applied Materials & Interfaces*》¹⁰。

（朱妤婷 郭楷模）

¹⁰ Jibo Zhang, Chenhao Zhang, Junwei Sha, et al. Efficient Water Splitting Electrodes Based on Laser-Induced Graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, DOI: 10.1021/acsami.7b06727

新型氢氧化钙隔膜增强锌锰电池循环寿命

锌锰电池以其价格低廉、环境友好、具有较高的理论比能量密度和可用作电网的储能设施等优点得到了科研人员的广泛关注。然而，由于活性材料的不可逆性，使得该类型电池循环寿命短于锂离子电池，严重阻碍了其商业化进程。纽约城市大学能源研究所 Gautam G. Yadav 教授及其团队对传统的锌锰电池进行了改造，将多壁碳纳米管、二氧化锰 (MnO_2) 与铜离子嵌入的氧化铋 (Bi_2O_3) 混合形成了新型的复合层状材料 $\text{Bi}-\delta\text{-MnO}_2$ ，将该新型层状材料作为正极，与锌负极、氢氧化钾溶液电解质组装成电池。随后研究人员对电池进行循环伏安测试，结果显示，锌电极在 15% 放电深度 (DOD) 下，电池的放电比能量密度约 160Wh/L ，然而电池循环寿命只有 100 次，超过上述循环次数后电池容量和放电比容量大幅衰减，这主要是放电过程锌负极发生了不可逆的形变和以及在正极处形成不可逆的氧化锌 (ZnO)，而部分 ZnO 溶解产生的 Zn 离子与 MnO_2 的相互作用，在循环初期形成电阻性的锌-水钠锰矿化合物，在循环末期则形成高阻抗性的 ZnMn_2O_4 ，导致了电池能量密度的下降。为解决上述问题，研究人员将氢氧化钙 (Ca(OH)_2) 多孔层作为隔膜引入电池中（锌离子会与氢氧化钙反应生成锌酸钙），以阻隔锌离子扩散，防止电池性能衰减。循环伏安测试显示，锌电极在 15% 放电深度 (DOD) 下，含有 Ca(OH)_2 隔膜电池循环寿命大幅提升，超过 900 次，容量保持率大于 80%，是迄今为止循环性能最为优异的锌锰电池。该项研究利用通过对对隔膜的改进，克服了锌离子与正极的负面反应，大幅改善了电池的循环寿命和稳定性，对开发高性能锌锰电池具有重要的参考价值。相关研究工作发表在《*J. Mater. Chem. A*》¹¹。

(罗卫 郭楷模)

¹¹ Gautam G Yadav, Xia Wei, Jinchao Huang, et al. A conversion-based highly energy dense Cu_2 intercalated Bi-birnessite/Zn alkaline battery. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5 (30): 15845.

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

电话：（027）87199180

电子邮件：jjance@whlib.ac.cn

微信公众号：CASEnergy

