

欧阳明高： 以储能创新推进能源变革

中国能源结构正在发生革命性变化。截至2022年底，中国可再生能源装机达12.13亿千瓦，历史性超过全国煤电装机；截至今年4月底，中国风电装机3.8亿千瓦，光伏发电装机4.4亿千瓦，风电、光伏发电总装机达到8.2亿千瓦，占全国发电装机的30.9%，约为36个三峡电站的总装机容量。

历史告诉我们，每次能源革命都是先发明了新动力装置和交通工具，进而带动对新能源的开发利用并引发工业革命。我们有理由相信，以可再生能源为基础、电和氢为能源载体，以电池（光伏、锂离子、氢燃料）为动力、电动车为交通工具，以“绿色”和“智能”为特征的新的工业革命正加速到来。

新能源发展面临瓶颈

理想的能源必须同时满足三个标准，即供应安全、价格便宜、绿色环保。

用上述标准来衡量，不难发现：绿色环保方面，风电、光伏等新能源具有先天优势；价格方面，随着风机技术和光电转化效率的提高，发电成本不断下降，价格优势正日益显现出来；安全性方面，由于受自然条件的影响很大，风电、光伏发电可谓“靠天吃饭”，具有随机性、波动性等特点，容易引发电网波动，造成安全风险，甚至可能导致停电事故。

如何提高风电、光伏等新能源接入电网的安全性，使其满足能源“三好生”标准呢？答案是“储能”，就是针对可再生能源的随机性和波动性等特点，把富余的可再生能源储存起来，当可再生能源不足的时候，再把存储的电能补回去，保障电网稳定运行。这样就可以有效弥补风电、光伏等新能源在安全性方面的不足，促进中国能源结构的变革。

电池储能形成“电力海绵”

锂离子电池是一种非常好的储能装置，能够与电力系统、通信基站、数据中心、轨道交通、电动汽车、智能电网等有机融合发展，用途很广，性能优异。此类电池可分为两类，一类是集中式储能电站，另一类是分布式储能电池。

集中式储能电站把很多大容量电池集中在一起对电力进行存储，在需要用电时释放出来。由于存在自放电现象和热失控问题，锂离子电池储能电站不能长期储能，也不能大规模储能。近

年来，随着技术的进步和电池正负极材料性能的改善等，集中式储能电站的应用安全性得到提升，应用范围和场景不断扩大。2021年，中国用于储能的锂离子电池产量达32吉瓦，增长了146%。

分布式储能电池其实就是电动汽车，让电动汽车与电网形成“车网互动”。在用电低谷时，电力系统给电动汽车充电；在用电高峰时，让电动汽车给系统放电。这样，电动汽车不仅是交通工具，而且可以成为以储能回馈能源的终端。随着汽车动力电池技术的进步，其价格不断降低，储能密度和使用寿命持续提升，单次储能成本将继续下降。

到2022年底，我国新能源汽车保有量约1310万辆，其中，纯电动汽车保有量1045万辆，占比近八成。如果这些汽车都参与进来，与充电桩、电网有机融合与协同，能够形成巨大的“电力海绵”网络，实现大规模、跨时空、低成本和高安全性的灵活储能。

制氢储能具有存储优势

氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源，具有能量密度大、零污染、零碳排等优点。氢储能是把太阳能、风能等清洁能源发出的电能，或夜间电网的过剩电能，通过电解水制取氢气，用储氢罐存储，需要的时候，利用燃料电池或氢燃气轮机发电返回电网的一种储能方式。目前，我国正在建和筹建一批风电、光伏制氢项目，该领域市场前景广阔。

氢储能发展的关键在于继续降低储能成本。与电池直接储能相比，氢储能经济性看起来并

不好，因为氢要用电解水制成，效率大打折扣。但是我们计算的是储能全链条的经济性，包括制备、储存、运输、加气、使用等环节。据计算，氢气在存储方面具有独特优势，成本远远小于电池储能成本。

储能种类繁多，有高频的、有低频的，有小功率、有大功率，有短周期、有长周期，不同种类和应用场合需要不同的储能方式。电池储能和氢能储能各有特点，正好与其他储能方式相互配合，形成良好的储能生态。

选择储能方式要因地制宜

选择储能方式要因地制宜。我国东北、华北北部、西北、西南地区是主要的风电、光伏、煤电、水电能源基地，适宜通过建设电化学储能电站，配合特高压输电，将电送到东部沿海经济发达地区。东南部、中东部和南部，火电厂密集，适宜抽水蓄能，配合高压输电网进行输送。东部人口密集地区，适宜分布式光伏、低压配电网配合“车网互动”来储能和发电。

为促进中国储能领域的发展，提出如下建议：第一，鉴于储能是实现“碳中和”的关键之一，要进一步明确主流储能技术的战略地位；第二，明确储能在新能源发展中的角色定位，进一步促进能源结构变革；第三，加强储能相关的关键技术研发，特别是加强大数据、云计算等电网智慧调控技术攻关，在电解水和燃料电池的核心材料，高效氢气制备、储运、加注等方面取得实质性突破；第四，建设“车网互动”车联万物（V2X）的基础设施；第五，健全多层次统一电力市场体系。（国电）

人物

谢和平院士： 煤炭开采利用 可望实现“自身碳中和”

6月21日，在新疆乌鲁木齐召开的第二十二届全国科学采矿与矿压理论会议上，中国科学院谢和平院士首次提出“负碳高效充填开采”全新技术构想，构建了负碳矽石快速高效胶结高孔隙混合物充填体、多面并采的负碳高效充填开采技术与工艺等全新理念与技术路线，构建了基于CO₂、矽石与快速胶结剂混合物“CGIF”充填体的“近零生态损害、近零冲击地压及负碳开采”的矿山充填全新技术体系，可望在全球率先形成“煤炭负碳开采、低碳利用”的煤炭开发利用全过程“自身就实现碳中和”的新格局。

矿山安全高效低碳开采是永恒的主题，当前仍面临一系列挑战。煤炭开采过程中如何实现近零冲击地压发生的安全开采？如何实现近零生态损害以及低碳、零碳、负碳的绿色开采？一直是全球采矿界的热点和难点。破解这些难题，谢和平院士提出的负碳高效充填开采全新理念和技术体系是实现千米深井和千万吨产能矿井高效开采（“两个一千”），同时保障“近零生态损害和近零冲击地压”（“两个近零”）唯一根本途径。

我国目前的充填开采技术推广还存在很多阻力和难处，主要挑战是：充填作业影响采煤速度、影响出煤量、影响煤炭生产效率；充填材料不够，大规模充填开采所需矽石量严重不足；充填作业成本高；也不能实现低碳、零碳、负碳的绿色开采要求。为此，谢和平院士提出“负碳高效充填开采”全新技术构想，及实现“两个一千、两个近零、一个负碳（负碳开采）、两个解放（生态薄弱区煤炭资源解放、冲击危险区煤炭资源解放）”的技术路线和战略目标，构建出了“近零生态损害、近零冲击地压及负碳煤炭开采”的矿山充填4大全新技术体系：

一是研究攻关矽石快速高效胶结高孔隙充填体，破解大规模充填开采充填材料不足难题。采用复杂系统科学方法，精确描述复杂结构力学系统中的应力、位移和变形，建立数学模型。采用分形几何方法，定量表征三维高孔隙材料几何拓扑结构，研究出新型高孔隙矽石-胶体复合材料，实现充填材料低密度、高孔隙率框架式承载，高孔隙充填体矽石用量将减少20%~40%，力学强度与密实充填体相当。

二是研究攻关负碳矽石快速高效胶结高孔隙混合物“GCIF”充填体，破解大规模CO₂封存固化的负碳开采难题。高孔隙材料用于储氢储能是国际科研热点，据SCIENCE报道利用化学原理设计了原子排列十分精确的多孔材料（金属有机框架化合物MOF），1克材料可以铺满1.3个足球场。如果我们以常态或超临界的CO₂作为气体或液体，与矽石快速高效胶结高孔隙充填体来构建CO₂与矽石及快速胶结剂混合物“CGIF（CO₂ Gangue Inorganic Framework）”，这样就形成一个全新的混合充填体理念，既能快速高孔隙低密度强力充填，又能大规模固CO₂，其中CO₂还能起到支撑承压作用；是一个负碳高效充填开采全新的技术路径，可望在全球率先创造煤炭负碳开采、低碳利用，在煤炭开发利用全过程自身实现碳中和新路径。

三是研究攻关快速粘凝胶结材料，破解矿山充填开采影响采速度的难题。研究快速胶凝作用机理，在胶结材料中添加无机类早强剂/纳米晶体材料，提供更多形核点位，降低凝胶成核势垒，极大提高水化凝固反应速率；引入扰动场加速分子反应速度，添加交联剂促进聚合反应，攻克胶体凝胶化的分子动力学调控方法，最终开发出粘强度高、固化速度快、固结强度大的快速粘凝胶结材料。

四是研究攻关多面并采的负碳高效充填开采技术与工艺，破解矿山充填开采影响煤炭产量的难题。攻关新型充填开采技术，创新负碳高效胶结高孔隙充填体工艺方法，来提高单面充填开采产能（100~500万t/a）。在此基础上，构建实施2~3个工作面同时并采的技术方案思路，就可实现千万吨级矿井负碳高效充填开采。同时探索攻关单层采区多面并采和立体空间多面并采的负碳高效开采工艺和相应的负碳高效充填技术及装备，突破充填开采影响煤炭生产效率的瓶颈，可望实现千万吨级以上产能的矿山负碳高效充填开采。

（倪珺）

舒印彪：发展新型电力系统 助力“双碳”目标

力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和，事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。党的二十大报告提出，“积极稳妥推进碳达峰碳中和”“加快规划建设新型能源体系”。在我国，能源活动碳排放占二氧化碳排放总量的88%左右，而电力行业碳排放又占能源行业碳排放的42%左右。因此，实现“双碳”目标，能源是主战场，电力是主力军，新型电力系统则是其中的关键载体。

近年来，随着绿色发展步伐的加快，中国电力低碳转型取得显著成效。

建成世界上规模最大的清洁能源供应体系，电源结构发生根本性改变。截至2022年底，全国发电装机容量达到25.6亿千瓦、发电量8.7万亿千瓦时，占全世界总发电量的30%；非化石能源的发电装机容量占比49%、发电量占比36%，煤电装机占比2020年以来历史性降至50%以下。过去10年，中国非化石能源消费比重从9.7%提高到

17.4%，增幅是世界同期平均水平的2.1倍。

节能降碳成效明显。煤电实现清洁高效利用，94%的煤电机组完成超低排放改造，高参数30万千瓦以上的机组占比超过80%。2022年，全国平均供电煤耗降至301.5克/千瓦时，百万千瓦机组的发电煤耗降至249.7克/千瓦时。过去10年，中国以年均3.1%的能源消费增长支撑了年均6.7%的GDP增长，单位GDP能耗下降了26%，碳排放强度下降34%，单位发电量碳排放减少22%。

新型电力系统是实现“双碳”目标的枢纽平台。实现“双碳”目标，根本上要减少化石能源消费、大幅增加非化石能源消费。到2060年，中国能源电力转型将实现“70/80/90”目标，即电能消费比重、非化石能源消费比重与清洁能源发电比重分别达到70%、80%、90%以上，其中，新能源发电量占比超过

60%。随着化石能源发电逐步被新能源替代，新型电力系统形态特征发生显著改变，将以数字信息技术为驱动，在保障能源电力供应安全、实现绿色可持续发展等方面发挥重要作用。

新型电力系统具有“广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控”等技术特征。构建新型电力系统的主要途径是两端发力推进“两个替代”，即电力生产侧实施清洁替代、能源消费侧实施电能替代，实现源端减碳、终端脱碳。在电力生产侧，我国发电用煤占煤炭消耗的一半、约17亿吨标煤，产生二氧化碳排放45亿吨。减碳的根本途径在于清洁能源对煤炭发电的稳步替代，形成以新能源、水电、核电、生物质发电等为主的电力供应体系。在能源消费侧，工业、建筑、交通领域电气化率分别为26%、44%、4%，合计二氧化碳排放70亿吨，要提升工业、建筑、交通电气化水平，实现电能对化石能源的深度替代。

（未完待续）