

专家讲坛

# 发展地下水储能 为碳减排提供中国方案

■肖业立 潘教峰

随着可再生能源装机量的日益增长,我国对大规模储能系统的需求迅速增加。传统抽水储能的经济性和综合技术性方面是其他长时储能系统发展的标杆,但其资源却十分有限。

发展地下水储能是破解传统抽水储能资源不足的优选方案,既可促进可再生能源大规模消纳,也可释放我国过剩产能,并带动经济发展。

为此,笔者建议将发展地下水储能系统列入国家中长期重大发展战略。

## 解决大规模储能难题迫在眉睫

2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上,向世界作出实现“双碳”目标的中国承诺。2021年3月,中央财经委员会第九次会议进一步指出:要构建清洁、低碳、安全、高效的能源体系,实施可再生能源替代行动,构建以新能源为主体的新型电力系统。

为实现碳中和目标,2060年我国太阳能和风能发电装机预计将达到80亿千瓦左右。由于太阳能和风能发电的出力具有随机性和波动性,光伏发电的出力具有昼夜周期性,为实现可再生能源规模化利用,我国必须大力发展储能系统,特别是削峰填谷的长时储能系统。研究表明,为实现对80亿千瓦太阳能和风能发电的有效消纳和利用,需要配置32亿~40亿千瓦的长时储能系统装机。

抽水储能具有削峰填谷、调频、调相、平移功率、事故备用和黑启动等多种功能,且经济性十分优越,因而被认为是建设以新能源为主体的新型电力系统的理想储能方式。研究表明,如果具有足够的抽水储能资源,建设支撑碳中和的新型能源电力系统就不存在较大的技术经济障碍。然而,我国传统抽水储能资源却难以满足发展需求。调查表明,我国具有较好经济开发价值的传统抽水储能装机约为4亿千瓦,经济性稍差但可以纳入储备开发的另有4亿千瓦,共计约8亿千瓦。因此,未来长时储能系统装机仍有很大缺口。

近年来,其他形式的储能技术发展迅速,但在规模、成本、技术成熟度、可靠性等方面很难与抽水储能形成竞争优势。锂离子电池安全性仍是业界关注的重大问题,随着其使用寿命陆续到期,今后大量电化学电池的报废处理将造成环境负担。因此,化学电池将主要定位于辅助调频服务或分布式储能。压缩空气储能是一个重要的发展方向,但要想具有经济开发价

值就需要依赖廉价的储气室,目前主要利用废弃盐穴来保障储气室的经济性,但盐穴资源是有限的。

伴随火电机组的减负荷乃至部分退出,新能源装机容量占比不断提高,所需储能系统容量与新能源装机容量之比将大幅提升;同时,为了满足昼夜能量转移和削峰填谷的需求,储能系统的储能量也将大幅提升。

可以预见,在没有找到大规模储能的有效解决方案之前,今后可再生能源发展将面临瓶颈。此外,我国大型清洁能源基地主要分布在西北地区,如内蒙古、青海、新疆等,这些地区建设大规模传统抽水储能电站的资源十分稀缺,从而制约了当地电源侧储能的发展和清洁能源的外送。

## 发展地下水储能是破解难题的优选途径

既然抽水储能是最为理想的储能方式,那么只要我们设法解决传统抽水储能的资源不足问题,就消除了实现“双碳”目标的重障碍。为此,笔者经过系统研究和调查,提出利用硬岩掘进机在地下1000米左右埋深挖掘隧道作为下库、依托地面水库建设上库的方式发展地下水储能系统的方案。我国地下1000米深度大多为岩石结构,除地震带外,地质结构相对稳定,适合发展地下水储能的资源十分丰富。

建设地下水储能系统涉及的工程和技术难点主要包括地下埋深约1000米的地下工程建设施工、1000米级的高水头水泵水轮机以及用于调频的变速抽水储能用电动机/发电机。

自本世纪以来,我国地下挖掘技术和地下工程建设技术取得了长足发展,为建设地下水储能电站奠定了坚实基础。例如,我国自主研发的大口径硬岩掘进机(TBM)总体上已处于国际领先水平,价格与以前从国外进口的同类装备相比大幅下降。2021年9月7日,中国制造的全球最大直径全断面硬岩掘进机“高加索号”在格鲁吉亚组装完毕并投入使用,表明我国在TBM方面已经达到一个新高度。在我国隧道引水工程建设中,如引汉济渭等工程,采用硬岩掘进机开挖引水隧道已成为主要施工方案。这些工程装备制造和实际工程建设的成果充分说明,利用地下空间建设地下水储能电站不存在技术和施工障碍。

当前,在1000米级高水头水泵水轮机方面,美国通用电气公司和奥地利安德鲁茨公司均具备生产此类设备的能力;我国东方电气和

哈尔滨电气也具备了制造700~750米级高水头水泵水轮机的能力。在变速抽水储能用电动机/发电机方面,日本已经实现了30万~40万千瓦机组的产业能力。我国虽与国际领先水平有所差距,但随着对相关机组的技术攻关以及需求的不断增长,可以迎头赶上。

在经济性分析方面,日本的研究证明了在800米以上高水头的情况下,地下水储能系统的经济性与传统抽水储能基本相当。新加坡设想利用废弃采石场作为上库,在花岗岩地层人工挖掘下库和厂房,建造地下水储能电站。经核算,其投资与相同规模的燃油电厂相当,用于电网调峰很有竞争力。为了解决莫斯科市的供电问题,俄罗斯提出在莫斯科市修建地下水储能电站的方案,其总功率为100万千瓦,投资预算为700美元/千瓦,与传统抽水储能电站建设成本基本相当。加拿大北岸电力公司联合AECOM咨询公司,对美国威斯康西特地下水储能工程进行了可行性论证。该工程装机容量100万千瓦,地下水库和厂房位于地下600米深处,容量约为560万立方米。评估研究表明,该工程实施具有可行性。

我们的研究表明,建设一座200万千瓦/4~5小时的地下水储能电站,假设其埋深约为1000米,其地下水库和厂房的基础设施建设周期大约为5~6年,总的建设周期大约为8年,与传统抽水储能电站建设周期基本相当。经估算,整个地下水储能电站的地下土木工程造价约55亿元,工程总造价约为150亿元,平均投资约为7500元/千瓦,与传统抽水储能系统造价的中高位数相当。由此可见,我国地下水储能电站建设的经济性和建设工期,均可达到与传统抽水储能电站相当的水平,为大规模发展地下水储能提供了保障。

## 对新能源产业和实体经济影响重大

按照现有新能源装机容量的增长趋势和电网对规模化储能系统的需求,保守估计,到2060年,我国实现碳中和所需规模化储能系统将不低于新能源装机总容量的40%,甚至可能达到50%,这意味着我国将有32亿~40亿千瓦的大规模储能系统需求量。

如前所述,我国有一定经济性的传统抽水储能资源约为8亿千瓦。考虑到水电站、集中式风电场和灵活水电解水制氢站等可部分用作储能,最多相当于10亿千瓦储能装

机。因而,还有14亿~22亿千瓦以上的储能容量需求空缺需要通过其他储能方式来弥补。地下水储能系统可以很好地为填补这一缺口提供解决方案。

按照一座地下水储能电站地下隧道总长40公里、每座电站装机200万千瓦计算,我国大概需要建地下水储能电站700~1100座。按照地下水储能工程7500元/千瓦的建设成本估计,可以直接带动10万亿~16万亿元投资。这既能促进可再生能源的大规模消纳,又可大量释放我国过剩的传统产能,让传统产能和中国基建优势为“双碳”目标的实现作出重大贡献。这在当前需要提振内需以拉动经济增长的背景下,具有重大战略意义。

全面实现地下水储能系统关键技术、装备制造和工程设计、建设、运维等成套技术体系,促进地下水储能系统在我国乃至全世界的推广应用,可为我国打造高铁之外又一张新名片。

## 加快实施地下水储能工程的建议

为加快实施地下水储能系统工程,笔者提出以下建议。

首先,设立地下水储能重大科技项目,由国家综合性权威科研机构牵头会同有关部门和企业对地下水储能系统进行进一步的详细工程可研论证,并系统调查分析我国地下水储能的资源分布和未来需求,为合理布局地下水储能电站奠定基础。在以上论证基础上,进一步提升地下工程建设装备的制造能力和水平;经过10年左右的攻关,全面攻克高水头地下水储能系统的关键技术和关键材料,形成关键设备的制造能力、地下工程设计和施工以及地下水储能电站运维能力,建设规模适度的示范工程,为全面推广地下水储能系统奠定基础。

其次,结合我国可再生能源资源分布和负荷资源分布,确立地下水储能系统建设中长期规划方案,在源侧、网侧、负荷侧构建地下水储能系统网络,支撑大规模新能源消纳和新型电力系统建设。同时,还可根据已有地下引水工程和国家水网工程发展规划,因地制宜开展地下水储能电站建设和灌溉工程有机结合;积极拓展地下水储能的国际业务,输出相关技术、装备和劳务,为全球碳减排提供中国方案。

(肖业立系中国科学院电工研究所原所长、研究员;潘教峰系中国科学院科技战略咨询研究院院长、研究员)

集装箱

## 超级电容器多孔炭首个国际标准正式发布

本报讯(记者李清波)近日,由中国科学院山西煤炭化学研究所(以下简称山西煤化所)主持,宁波中车新能源科技有限公司、深圳市标准技术研究院及国家纳米科学中心共同参与制定的国际标准——电化学电容器多孔炭(以下简称电容炭)空白详细规范,经国际电工委员会(IEC)纳米电工产品与系统技术委员会通过,正式对外发布。该标准由山西煤化所709组技术团队承担制定工作。

这一电容炭领域首个国际材料空白详细规范,全面梳理了材料对器件性能的影响因素,包括电容炭的化学、物理、结构及电化学关键控制特性23项,其中电化学关键控制特性除了比容量、倍率性能等一些短期性能指标外,还包括下游用户更加关心的长期稳定性、温度耐受性等指标。

电化学电容器以其超快的充放电能力、长循环寿命、宽工作温度范围、高安全性和低维护成本,广泛应用于电力监测通信终端、电网调频和规模储能等领域,拥有广阔的市场前景。然而,我国电化学电容器的关键活性材料——电容炭,却长期依赖进口。为此,山西煤化所科研人员自2019年向IEC提出制定电容炭空白详细规范国际标准和超级电容器电极片空白详细规范的标准提案,旨在助力国内尽快打破国外技术封锁。

## 中国科学院西北高原生物研究所司法鉴定所揭牌成立

本报讯(见习记者叶满山)近日,中国科学院西北高原生物研究所(以下简称西北高原所)司法鉴定所揭牌,标志着青海省首家动植物损害鉴定机构继今年2月份获准司法鉴定许可后迈入了新阶段。

西北高原所党委书记张景光表示,司法鉴定所的成立是西北高原所“将论文写在祖国大地上”的最好践行,是将科研成果助力地方生态文明建设的有力行动,不仅填补了青海省动植物损害司法鉴定领域的空白,还将助力青海省筑牢生态文明高地的法治保障,为相关行政案件的办理提供强有力的技术支持。

目前,司法鉴定所共有13位司法鉴定人,执业范围为生态系统环境损害鉴定,重点关注生态破坏行为致植物损害鉴定、生态破坏行为致动物损害鉴定,以及生态破坏行为致草原生态系统损害鉴定3个领域。

## 2023年北海区海洋灾害应急演练在青岛举行

本报讯(记者廖洋 通讯员王琳琳)根据《2023年北海区海洋观测预报和防灾减灾工作方案》要求,近日,由自然资源部北海局牵头组织的2023年北海区海洋灾害应急演练在青岛举行。

本次演练采取海区—省—市三级联动的方式,模拟台风穿越山东省并在辽宁省登陆后消亡,山东省潍坊市发布风暴潮红色警报。根据修订的应急预案,北海局启动二级海洋灾害应急响应,各省、市同步启动海洋灾害应急响应,相关单位按照应急预案开展加密观测、滚动会商、信息报送等灾害应对工作。

在各部门、各单位的高效配合下,本次演练有效检验了灾害应急期间海洋观测、数据传输、海洋灾害预警预报制作、研判会商和预警信息发布、应急响应全流程各环节,达到了预期效果。

据悉,本次演练是《自然资源部北海局海洋灾害应急执行预案》修订后的首次演练,对于做好北海区海洋灾害防御工作、安全平稳度过2023年汛期具有重要意义。

## 我国首台矿用液态二氧化碳输送设备研制成功

本报讯(见习记者严涛)日前,西安科技大学教授文虎团队研制出我国首台取得矿用产品安全标志证书并应用于煤矿井下环境液态二氧化碳输送的关键设备——矿用液态二氧化碳输送泵,使在煤矿井下特殊环境中,液态二氧化碳长距离、稳定、直接、连续、快速的输送成为现实。

矿用液态二氧化碳输送泵能够实现泵注作用下液态二氧化碳低压3.8MPa、中压10MPa、高压15MPa向煤层的恒压、稳流输送,以及井下二氧化碳恒压长距离液相输送。该设备为我国高瓦斯矿井应用煤层压注液态二氧化碳驱替瓦斯核心技术,以及开采自燃/容易自燃煤层矿井应用液态二氧化碳防火技术的实施提供了重要装备保障。

在此基础上,该团队研制了煤矿液态二氧化碳相变驱替瓦斯成套装备和煤矿长距离液态二氧化碳直注防火成套装备,并配合国家矿用产品安全标志中心制定了《矿用液态二氧化碳输送泵安全技术要求(试行)》和《矿用液态二氧化碳输送泵安全技术管理方案(试行)》。

## 第15届湖南省青少年太空机器人竞赛闭幕

本报讯(记者王昊昊)近日,由湖南省科学技术协会、省教育厅、省科技厅、省财政厅、团省委联合湘江新区管理委员会共同主办的第15届湖南省青少年太空机器人竞赛在长沙颁奖闭幕。

大赛除保留机器人传阅闯关赛、机器人综合能力比赛、机器人智能接力赛、无人编程竞赛等传统赛事外,还增设太空足球挑战赛、太空星际对抗赛等4项新赛事。比赛采用“竞赛+科普”相融合的形式,同步开展科普演讲、科普讲座、共绘科普画等系列活。

大赛期间,湖南省14个市州共333支队伍580人齐聚赛场,经过紧张激烈的角逐,最终决出一等奖33个、二等奖68个、三等奖99个以及优秀指导教师15名。

按图索技

## 新“斗篷”让电动汽车电池“延寿”

本报讯 当电动汽车停在室外时,其温度会随外部环境变化而波动,这会导致电池性能退化。近日,上海交通大学材料科学与工程学院副教授崔可航与合作者设计出一款可以让电动汽车冬暖夏凉的“斗篷”,它可以在炎热的白天为汽车降温7.8℃,在夜间使其升温6.8℃,从而延长电池使用寿命。相关研究日前发表于《设备》。

“这种斗篷就像车辆、建筑物、航天器的衣服一样,可以保持冬暖夏凉。”崔可航说。该斗篷外层可以有效反射阳光,从而不易吸收热量,内层则可以储存热量。这种设计让汽车与周围环境隔离开来,使得汽车不受自然温度变化的影响。

为了评估这种斗篷的性能,研究人员在

上海典型环境条件下对停在室外的电动汽车进行了测试。正午时分,无斗篷遮挡的车辆,车厢温度达到50.5℃;有遮挡的车辆,车厢温度比无遮挡车辆低22.8℃~27.7℃,比室外温度低7.8℃。午夜时分,车内温度比室外温度高6.8℃,并且从未低于0℃。

“这是我们第一次在冬季夜间实现车内温度比环境温度高出近7℃。”崔可航说,“这让我们感到惊讶——没有能量输入或阳光照射,我们仍然可以让汽车变暖。”

该斗篷外层由薄的二氧化硅纤维制成,纤维上涂有一种类似石墨的陶瓷材料——六方氮化硼薄片,可以增强纤维的太阳光反射率。然后研究人员将这些纤维编织在一起



形成织物,并粘在由铝合金制成的内层上。该斗篷重量轻、耐用、阻燃,并且所使用的铝、二氧化硅和氮化硼等材料的成本很低,

未来更容易扩大生产规模。(冯丽妃) 相关论文信息: <http://doi.org/10.1016/j.device.2023.100008>

「斗篷」新材料具有耐用、轻质、可伸缩等特点。崔可航团队供图

# 干细胞应用需研究监管双重发力

■本报记者 韩扬眉

干细胞研究有望解决人类面临的重大医学难题,帮助人类实现修复创伤和病理组织、治愈终末期疾病的梦想。目前,全球进入人体实验的干细胞研究超8000项,但我国至今尚未有干细胞产品或技术上市。

近日,香山科学会议第Y8次学术讨论会在北京召开。青年专家学者在会上深入探讨了干细胞研究前沿热点和转化应用亟待解决的关键技术难题,呼吁我国在干细胞应用研究和监管方面双重发力。

## 推动应用需多方发力

干细胞由于其强大的自我更新和定向分化特性,被称为“万能细胞”。其在组织修复、器官再生和疾病干预等多情景中发挥出传统药物无法比拟的优势,有望引领医药模式变革。干细胞疗法是再生医学的基石,旨在通过补充体内受损细胞从而修复器官。2015年,我国出台了初步的监管政策,推进了干细胞应用研究的有序发展。

但干细胞疗法在走向应用的过程中,遇到的难题如让科研人员和临床医生感到望而却步且长。

“目前,大多数干细胞产品制剂长期疗效并不理想。其有效性取决于干细胞产品制剂的细胞替换能力、旁分泌能力和器官定向分化能

力等。”中山大学孙逸仙纪念医院主任医师苏士成表示,异质性是干细胞应用的疗效障碍。

苏士成指出,我国高水平原创成果和具有自主知识产权的核心专利技术仍旧缺乏。在分离提取、大规模扩增、干性维持、变异性调控、质量筛选标志物和疗效提升等各个环节亟待核心技术突破和专家人才储备。

除此之外,记者在会上了解到,我国尚无针对基因和细胞治疗产品的法律法规,而是采用“双轨制”的框架进行监管,即卫生监管部门对在医疗机构开展的体细胞研究进行备案管理,药品监管部门对企业研发的细胞治疗产品按照药品进行监管。

中国药科大学基础医学与临床药学院院长杨勇建议:“基于干细胞产品的类型和特点,我国应确定影响有效性、安全性、质量可控性的风险因素,制订风险控制计划,明确风险最小化措施;尽可能避免在研究过程中发生重大变更;将研究质量和合规性放在重要位置。”

## 亟待开发新技术工具

干细胞具有自我更新和分化潜能,在各种组织器官的发育和损伤修复中发挥着极其重要的作用。因此,开发干细胞新技术与新工具对消除由器官损伤、衰老等导致的器官功能

障碍至关重要。

中国科学院分子细胞科学卓越创新中心研究员高栋介绍,近年来,类器官技术、空间谱系示踪技术、单细胞时空组学测序技术、单分子技术、微量蛋白质组学分析技术、邻近分子标记技术等飞速发展,极大推动了干细胞研究的进展,为实现功能性器官重构奠定了良好的技术储备。

例如,遗传谱系示踪技术是揭示特定类型细胞在发育、疾病和再生过程中决定细胞命运的有效研究方法。“细胞命运的调控一直以来都是干细胞与发育生物学的核心问题。”西湖大学生命科学学院研究员裴唯珂表示,细胞命运不仅由基因表达、转录因子和表观遗传这些细胞内的分子网络所调控,还受细胞所处的微环境影响。

然而,当下的谱系示踪和单细胞技术通常需要将细胞所处的三维组织打破,因而丢失了细胞所处的空间信息。

在裴唯珂看来,随着生命科学进入空间组学时代,整合转录组、表观遗传状态、时空信息和细胞命运等多维信息空间谱系示踪技术,将是启动新一轮生物学重要发现的颠覆性技术之一。

此外,目前类器官技术也广受关注。类器官能在多个方面再现体内相应组织或器官的结构与功能,在器官发生、疾病模拟、药物筛选、精准医疗等多个领域具有重大意义。