

我国已构建完整自主的压缩空气储能技术供应链

——访中储国能(北京)技术有限公司总经理纪律

■本报记者 王林



地下1000米处的盐穴,变身新型储能“聚宝盆”——新型储能代表技术压缩空气储能,正悄然站上储能行业风口。该技术从实验室走向规模化应用,中国科学院工程热物理研究所及其压缩空气储能技术产业化公司中储国能(北京)技术有限公司(以下简称“中储国能”)是关键推动者。

什么是压缩空气储能技术?优势是什么?在新型电力系统中的战略定位如何?中储国能总经理纪律给出了答案。

产学研用结合推动技术规模应用加速

中国能源报:作为全球已运行的单机规模最大、技术最先进、单位成本最低的新型压缩空气储能电站,山东肥城300兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目(以下简称“肥城项目”)一直备受关注。这个项目运行表现如何?对后续大规模商业化推广意味着什么?

纪律:肥城项目于2024年4月30日首次并网发电,装机容量300兆瓦/1800兆瓦时,是电网侧独立储能电站,采用中国科学院工程热物理研究所自主研发的先进压缩空气储能技术,中储国能是项目投资建设方。

目前,肥城项目核心设备已完成第三方测试,性能表现卓越,标志着我国300兆瓦先进压缩空气储能技术已处于国际领先。该项目总投资约15亿元,设计寿命30年,单位投资成本每千瓦约5000元,全寿命周期度电成本约为每千瓦时0.2至0.3元,全投资收益率接近7%,是较为稳定且具备较好投资回报的项目;根据第三方检测数据,压缩机效率达88.14%,膨胀机效率达92.1%,高效紧凑型换热器97.08%,大容量蓄热装置的蓄热效率为99.22%,电动机效率为98.82%。值得一提的是,电动机为自主研发的国产兆瓦级大电机,除压

缩空气储能外,还可用于电气化改造、石化等多个领域。

此外,多项运行性能实现优化。经第三方测试,系统从冷态启动到发电的最快时间为5分52秒,具备较快响应能力;变工况运行范围目前达到40%至110%,调节能力强、调节范围宽;爬坡率方面,项目实际可达到每分钟15%,调节速率较高。

可以说,肥城项目意义远超本身,已成为推动先进压缩空气储能这一“前沿技术概念”加速产业成熟化的重要实践,为后续我们快速部署和推广吉瓦级先进压缩空气储能项目积累可复制的商业经验。目前,我们在全国有多个在建项目。

中国能源报:近几年,压缩空气储能项目越来越多,面对后者,中储国能如何保持持续领先地位?

纪律:作为中国科学院工程热物理研究所兆瓦级先进压缩空气储能技术的产业化平台公司,我们期望依托在压缩空气储能方面的核心技术优势和长期的积累,成长为长时大规模储能系统全链条解决方案的牵头单位,国家战略科技力量的产业化先锋。

目前,我们已掌握先进压缩空气储能技术系统工艺设计与集成能力,实现核心设备自主研发与制造。从关键技术、核心

装备到标准体系,构建了完整的自主知识产权与供应链,确保技术自主安全与核心设备100%国产化。

实际上,压缩空气储能领域的参与者愈来愈多,相关项目部署加快,说明技术方向获得行业广泛认可,有利于整体发展。但压缩空气储能技术也具有一定的“护城河”或技术壁垒,需要较长时间的积累。目前压缩空气储能技术刚刚逐步成熟,正处于产业化初期,此时正需要行业“拧成一股绳”,共同努力提升压缩空气储能的性能和经济性,推动整个产业链协同发展。

站在中储国能的角度,一方面,我们坚持“应用一代、示范一代、预研一代”,推动技术不断迭代升级,力求在新技术研发上保持行业领先。另一方面,我们不断加强能力建设,包括建设自有生产线,对已成熟且定型的产品通过规模化生产进一步降低成本,从而在技术领先的同时形成成本优势。此外,我们还将持续积累工程实践能力与电站运行维护能力。产学研用相结合,是将实验室技术转化为具备大规模储能应用所需的成熟优质产品的必经之路。

中国压缩空气储能技术处于国际领先水平

中国能源报:全球范围内,我国在新型压缩空气储能技术领域处于什么位置?优势是什么?

纪律:当前,全球多国都在开发新型压缩空气储能技术,主要包括蓄热式压缩空气储能、绝热压缩空气储能、等温压缩空气储能、水下压缩空气储能、液态空气储能、超临界压缩空气储能等多种技术路线。

虽然技术路径存在差异,但核心思路高度一致。其一,摒弃化石燃料燃烧,将压缩过程中原本浪费的压缩热加以回收利用,替代化石燃料为发电环节供热;其二,

采用地上储罐、地下盐穴或人工硐室等多元化储气方式,突破地理条件限制;其三,通过回收压缩热、核心设备性能提升等多种途径来提升系统整体效率。

在新型压缩空气储能研究方面,我国与发达国家同时起步,不管是技术水平还是产业规模,均已位于国际领先地位。

压缩空气储能技术的主要难点在于系统及核心设备的研发设计,其生产制造环节并不依赖特种金属或特殊工艺,国内主流机械制造厂家均可完成生产,不存在“卡脖子”问题。目前,我国在该领域已实现核心技术100%自主知识产权,所有核心设备(肥城项目)已建成并网,更大单体规模的技术正在研发中,对比之下,国外已建成新型压缩空气储能机组最大规模为5兆瓦,在建最大规模为50兆瓦。

我国在压缩空气储能技术领域处于国际领先水平,主要得益于四方面优势,即国家政策支持、较高的研发投入强度和工作效率、较低的研发成本、市场规模优势。一方面,压缩空气储能是典型的硬科技,具有研发周期长、投入规模大的特征,需要持久、稳定的经费和政策支持;另一方面,我国幅员辽阔,资源禀赋分布不均,优质的新能源资源集中于西北,用电负荷中心则位于东南沿海,对大规模长时储能存在迫切需求,应用场景丰富,市场规模巨大。

“十五五”新型储能装机将超300吉瓦

中国能源报:新型储能被国家列为六大新兴支柱产业之一,在您看来,在构建新型电力系统中,新型储能拥有哪些独特优势?

纪律:在构建新型电力系统进程中,储

能承担着不可或缺的战略支撑角色,是保障系统安全稳定运行、促进新能源高效利用的关键环节。从功能作用来看,储能的多重价值贯穿电力系统各环节,促进新能源开发消纳,提升新能源可调控能力,增强电力系统应对极端情况的韧性等。

从整体储能市场看,截至2025年底,我国新型储能(不含抽水蓄能)累计装机规模达144吉瓦,占储能总装机比重接近70%。

事实上,储能技术门类众多,不同技术具有不同特点,目前没有一种技术能够“一统江山”。短时高频储能技术如飞轮、超导、超级电容,主要用于电能质量管理及调频服务;中短时长储能如锂电池,主要应用于1至2小时场景,目前正向4至6小时方向发展,适用于顶峰调节;长时储能如抽水蓄能、压缩空气、液流电池,适用于4至10小时的调峰及日间的能量管理;超长时储能如化石能源的战略储备、跨季节储能、氢氨储能等,用于月度甚至季度的能量储备。不同的应用场景对应不同的储能技术赛道。

新型储能作为构建新型电力系统的关键技术和基础设施,已成为推动能源革命、实现“双碳”目标的重要支撑,也是典型的能源领域的新质生产力,增强国际竞争新优势的战略方向。“十四五”时期,新型储能规模增长了45倍,产业发展迅猛。

当前,新型储能产业正处于从规模扩张向质量效益提升的关键转型期。“十五五”规划纲要及近期政策文件提出要扎实推进新型储能等关键技术创新,大力发展新型储能,将新型储能定位为新型能源体系的核心支撑,正式纳入国家战略性新兴产业布局,据中关村储能联盟预测,到“十五五”末,新型储能装机规模将超过370吉瓦,乐观估计可达450吉瓦,未来市场空间十分广阔。

二季度全球供应缺口约90万吨

新能源“铝口粮”如何保障?

■本报记者 杨沐若

随着中东地缘冲突的影响持续外溢,风险向铝供应链加速蔓延。近期在霍尔木兹海峡航运受阻、中东多铝生产设施停产影响下,铝价持续上升。行业预计,今年第二季度全球铝市场将出现约90万吨供应缺口,全球铝库存可用天数降至仅45天。

我国是全球重要的铝生产国,铝价上涨让企业开足产能,业绩持续提升。近年来,多家铝企主动将产能迁移到水电富集地区,积极布局风电、光伏等清洁能源,让绿电融入铝业生产。也有多个铝业基地和新能源制造深度耦合,让铝材附加值持续提升。但业内人士也提醒,我国对进口铝矿仍较依赖,未来国际供应不稳或仍对我国产生影响。持续推进汽车、电池和光伏等回收体系建设,让铝资源循环利用,不仅能减少外部供应风险影响,也可进一步降低铝业生产的能耗和排放。

■供应不稳抬高铝价

铝易塑形、耐腐蚀且散热好,是光伏支架、边框和散热的重要材料,到2040年,光伏行业铝需求量预计将达到近460万吨。而凭借轻量化特性,铝合金也成为汽车车身的重要材料,并被用于电池包和电池热管理系统,以减轻组件重量并提高散热性能。行业预计,到2030年,新能源汽车单车用铝量将超过350千克。此外,铝也因导电性好成为电网建设不可或缺的材料。

近期中东冲突持续,掐断了新能源铝资源供应的重要通路。据摩根大通统计,2025年中东实现500万吨原铝的净流出盈余,占全球产量的近7%。当前,因霍尔木兹海峡关闭,巴林铝业公司暂停发货,卡塔尔铝业停止生产。

随着近期冲突升级,中东两大铝厂遭袭击,其中,遇袭的阿尔塔维拉工厂全面恢复原铝生产可能需要12个月。该工厂2025年生产160万吨铝锭,氧化铝厂生产240万吨氧化铝,满足阿联酋全球铝业总氧化铝需求的46%。阿联酋全球铝业是中东地区最大的铝生产企业之一,也是全球市场的重要供应商。

铝资源供应不稳不仅在中东,也在更上游的铝土矿出口国。今年以来,全球第一大铝土矿生产国几内亚铝土矿价格不断下降,3月该国表示将计划限制铝土矿出口,以提振铝价。几内亚或限制铝土矿出口消息传出后,氧化铝期货价格直线拉升,加之中东冲突影响,铝价持续走高。伦敦金属交易所3个月期铝价一度达到每吨3531.50美元,创4年来新高。

■产能释放提升铝企业绩

从铝土矿储量看,几内亚、澳大利亚和越南是世界总储量占比最高的三个国家,分别达到25.52%、12.07%和10.69%。我国铝土矿储量较低,仅占全球2.34%,却是世界最大的铝产品生产国及消费国之一。2024年,中国占全球原铝产量比例已达59%,消费量则占全球55%。

近年来,我国首创多种氧化铝生产技术,建成全球最大单条氧化铝生产线,伴生资源综合利用水平领先。氧化铝加工为电解铝,浇铸成铝锭或直接加工成线材、

型材用于工业利用。2025年我国电解铝产量预计在4400万吨左右,产量虽受产能“天花板”约束,但仍延续全球领先地位。

今年铝价上升,国内铝企开足产能,业绩持续增长。明泰铝业公告,预计一季度实现归母净利润6.5亿元至7亿元,同比增长48%至59%;神火股份预计一季度归母净利润22.5亿元,同比增长217.68%;天山铝业预计一季度归母净利润22亿元,同比增长107.92%。

而从需求看,摩根大通报告指出,以往铜、铝等金属需求主要受房地产周期影响,但随着近年全球数据中心建设加速,电力基础设施升级以及新能源产业扩张,工业金属需求日益多元化。

新兴产业需求带动下,我国铝产业链不断延长,初级铝材“变身”轻量化材料、合金制品甚至复合新材料。在江西上饶,传统铝加工升级光伏配套制造,光伏铝型材、铝边框生产高度自动化,革新了传统铝加工生产模式。而在广西百色,电池铝壳、电池箔、正极材料等构成的电池产业,让这座铝业重镇的资源附加值不断提升。

■国内铝企生产格局谋变

全球铝市场的变化为中国带来机遇,也带来挑战。中国矿业大学(北京)能源与矿业学院副教授徐文彬表示,几内亚、澳大利亚等主要产国的铝硅比普遍较高,利于后续加工。“相比之下,我国铝土矿含铁、钛等杂质较多。”

公开信息显示,2025年中国铝土矿进口量预计达2.2亿吨,同比增长28%。其中,几内亚为最大进口来源国,全年进口量占比达77.2%,同比增长41.3%。

近年来,一批中国铝企在几内亚的矿山项目稳步推进,保障国内铝资源供应。其中,中铝几内亚博法矿2023年资源量达到17.58亿吨,剩余开采年限超过60年,生产铝土矿主要供给中铝位于广西和山东的氧化铝企业。充实海外“粮仓”的同时,国内铝资源内循环体系正逐渐形成。旧家电、汽车铝材等社会回收渠道逐步完善,未来新能源汽车、光伏设备等报废更新,有望在带动用铝需求上涨的同时,让资源回收的“城市矿山”不断充盈。

据国际能源署统计,生产每吨原生铝的排放量可达16吨二氧化碳当量,而每吨再生铝生产排放仅约为0.5吨二氧化碳当量。增加再生铝的使用,是减少铝行业碳排放的明确途径。

铝生产的排放源于大量耗电,我国主动设立电解铝全年产能4500万吨的“天花板”,防止产能无序扩张。近年来,绿电也逐渐融入我国电解铝生产,约1300万吨的电解铝产能从北方煤炭产区迁至云南、四川等水电富集区域。

近年来,国内一批企业积极实践,助力铝工业碳达峰。其中,全球第三大铝业公司国家电投465万吨电解铝产能中,可再生资源消纳占比已达46%。此外,魏桥创业集团已向云南转移电解铝产能218万吨,开展风光等清洁能源项目建设及消纳。云铝股份绿电占比达85%以上,并成为率先在铝行业开展“厂内分布式光伏”项目企业。

固态电池迎量产「冲刺期」

■本报记者 姚美娟

近日,固态电池领域动态频传,国轩高科、欣旺达等企业相继披露相关产品研发及量产进展;与此同时,多个地方项目投产、开工或签约,市场整体呈现火热发展态势。有业内人士指出,一系列积极信号反映出固态电池发展正快步迈向工程验证及产业化备战阶段。凭借宽温域、高安全性、高能量密度等优势,固态电池已在人形机器人、低空飞行器与新能源汽车等场景展现出较高适配性,未来随着技术瓶颈突破及成本逐步下探,其有望从能源供给层面为多领域产业升级发展注入强劲动力。

■产业化热潮涌动

今年以来,国内固态电池产业化进程显著提速,多家企业纷纷推进技术验证、中试产线投产与量产布局。日前,国轩高科在投资者互动平台表示,公司的固态电池正按计划推进,2吉瓦时全固态电池量产线的具体建设则受技术、研发、市场等多项因素影响。国轩高科于3月披露,公司2吉瓦时全固态电池量产线设计工作已基本完成。

2月,广汽集团表示,公司正积极推进全固态电池的自主研发与产业化落地,2025年11月广汽全固态电池中试线已投产,计划于2026年进行小批量装车实验。

与此同时,固态电池迎来新一轮产能建设热潮,多个项目密集签约、开工。2月,广东劲恒固能新能源科技有限公司固态电池项目签约仪式在湖北黄冈高新区举行。消息显示,该项目聚焦全固态大容量固态电池研发与生产,规划布局10吉瓦时固态电池产线,将分阶段实施建设并逐步投产。

同月,上海临港集团2026年首批重点产业项目签约仪式举行,临港蓝湾园区企业德加能源(上海)有限公司、上海源辰航能科技发展有限公司的固态电池项目同步签约。其中,德加能源临港项目计划分两期建设3吉瓦时固态电池产线;上海源辰航能项目聚焦固态电解质核心技术,预计2026年底前完成设备调试并投产。

伊维经济研究院院长吴辉表示,2024年半年固态电池出货量迈入吉瓦时量级,应用领域从高端消费、无人车等特殊应用领域开始渗透,乘用车装车试验也已进行;全固态电池规划的产业化节点从2030年提前至2027年,部分企业已着手全固态电池产线设计工作,标志着全固态电池即将从实验室走向产业化。研究机构EVTank预计,到2030年,全球固态电池的出货量将达到614吉瓦时,其中全固态电池占比将接近30%。

■多路径并行发展

固态电池产业化进程提速,也带动材料体系迭代升级。根据固态电解质的不同,固态电池技术主要呈现硫化物、氧化物、聚合物等多方向并行发展态势。从企业布局层面看,近日多氟多在互动平台表示,公司在固态电池领域的主要布局为聚合物/凝胶固态电池体系,已开发出新型含氟

高分子聚合物电解质。

奥特维方面则表示,技术储备方面,公司已布局固态电池产线核心工艺环节,涵盖硫化物电解质制备、叠片等关键设备。未来公司将持续跟踪固态电池技术发展,研发适用于不同技术路线的设备,满足更多客户的需求。

有分析指出,目前来看,硫化物路线因离子电导率接近甚至超越液态电解液、适配锂金属负极等优势占据主导。不过,硫化物、氧化物、聚合物路线尚未完全定型,押注单一技术路线存在风险,各路线之间的竞赛与融合或成趋势。

值得注意的是,固态电池应用潜力正不断释放,除新能源汽车、储能外,已有多家锂电产业链企业涉足人形机器人、低空经济领域,且多以固态电池技术切入。在业内人士看来,下游市场对高能量密度、高安全性电池的需求扩大,是固态电池发展提速的关键催化因素。以低空经济为例,固态电池的高能量密度特性能够使低空飞行器在相同体积或重量下携带更多电能,从而支持长时间飞行。

东莞证券指出,固态电池高度适配新能源汽车、高端储能、低空eVTOL、人形机器人、商业航天等新兴领域。新能源汽车领域国内外主流车企规划2027年实现全固态电池装车,储能领域半固态电池率先切入数据中心、工商业等安全需求场景;低空飞行、人形机器人、商业航天有望成为固态电池价值弹性最高的场景。多元化的应用场景需求为固态电池打开广阔的市场空间。

■机遇与挑战并存

不过,虽然企业及研究机构普遍看好固态电池发展前景,但仍面临技术、制造、工艺、成本等多道待解难题。中国化学与物理电源行业协会动力电池应用分会秘书长、电池中国网创始人及CEO张雨近日接受《中国能源报》记者采访时提及,现阶段固态电池仍处于技术验证、协同开发和产业链建设阶段,从技术维度来看,仍然面临电解质性能、固固界面兼容、高比能电极匹配等多重挑战。

此外,固态电池属于资本密集型行业,技术门槛较高,产品研发及量产需要大量资金投入,并且短期内难以看到显著回报。同时,部分头部企业已凭借自身技术体系、全链条研发能力、规模化量产优势抢占先机,而技术储备不足、缺乏资金实力的中小企业可能面临淘汰风险。

整体来看,固态电池赛道对锂电池企业而言,既是机遇也是挑战,新入局企业需提前充分评估自身实力和风险承受能力,避免陷入发展困境。有分析人士指出,固态电池从实验室小试、中试到最终的规模化量产,每个阶段都需要海量资金支持。技术优势固然是企业的核心竞争力,但若缺乏资本加持,技术也难以转化为生产力。联合研发与共享资源的模式能够有效分摊研发成本,加速技术突破,中小企业可积极与资金实力雄厚的企业开展合作,携手投入固态电池相关项目,实现优势互补、共赢发展。