

# 二氧化碳储能，储能界的“新质生产力”

- 二氧化碳储能技术成为解决可再生能源大规模并网挑战的关键技术之一，能满足“长时储能”、“安全环保”和“快速落地”。
- 博睿鼎能作为一家由中国科学院理化技术研究所走出的科技公司，以其独创的“新型二氧化碳储能”解决方案，不仅成功实现了二氧化碳的高效利用，还推动了相关技术的规模化、标准化和商业化进程。

00 引言

在刚刚落幕的全国两会上，“新质生产力”成为了当仁不让的高频词，并被列为2024年十大工作任务之首。

新质生产力，区别于传统生产力，是生产力“质的跃迁”。

回望人类生产方式的演进史，从狩猎时代到农耕时代，从机械化、电气化再到信息化的三次工业革命，能源转型均发挥了极为重要的作用。

目前，全球电力行业处于从“化石能源”转型为“可再生能源”的关键时期。然而，新的挑战出现了——以“风电和太阳能”为代表的可再生能源，其发电的随机性、间歇性、波动性对现有发电系统造成了巨大的结构性压力。

一种同时满足“大容量、长时间”的新型储能技术迫在眉睫。

今年“两会”上，全国政协委员、中国科学院理化技术研究所研究员张振涛表示：“二氧化碳压缩储能和空气压缩储能，是解决可再生能源大规模发电并网的最佳新型储能技术之一，建议给予新型长时物理储能技术非歧视性政策，真正做到以实际行动支持新质生产力发展。”

张振涛提及的“二氧化碳储能”是何种技术？又该如何实现大规模的商业化应用？

## 01 新型长时储能技术登上舞台

1746年，荷兰莱顿大学的马森布罗克教授用两片金属箔和一块玻璃组成了一个电容器，这就是人类最早的储电装置——“莱顿瓶”。彼时的“莱顿瓶”只能存放“有限”电荷；今天，人们开始寻找一个能够储存巨量电能的“莱顿瓶”。

首先进入大众视线的是风电、光伏储能。多年来，我国风电、光伏的装机总量快速增长，连续多年位居世界第一，但是由于风光发电不稳定，以及风光发电曲线与电力消费曲线的差异，导致调峰难度越来越大，进而影响风光消纳。

从数据中我们也可以略窥一二。据《中国能源报》不完全统计，截至2023年7月，一年之内，山西、陕西、安徽、江西、河北等地陆续公布最新风光项目废止名单，拟废止的项目总装机规模已超过1000万千瓦。

一方面是能源不够用；另一方面是“一哄而上”的产能“过剩”……这背后的矛盾如何调节？

能否制造出一个巨大的“莱顿瓶”，将消纳不掉的风光发电量储存起来，在用电高峰时放电，不仅可以有效地调节电网供需，还能提升电力系统的运行效率，同时做到绿色低碳？

由此，“新型储能”登上了历史舞台。但面对“百花争艳”的新技术，谁能担此重任？

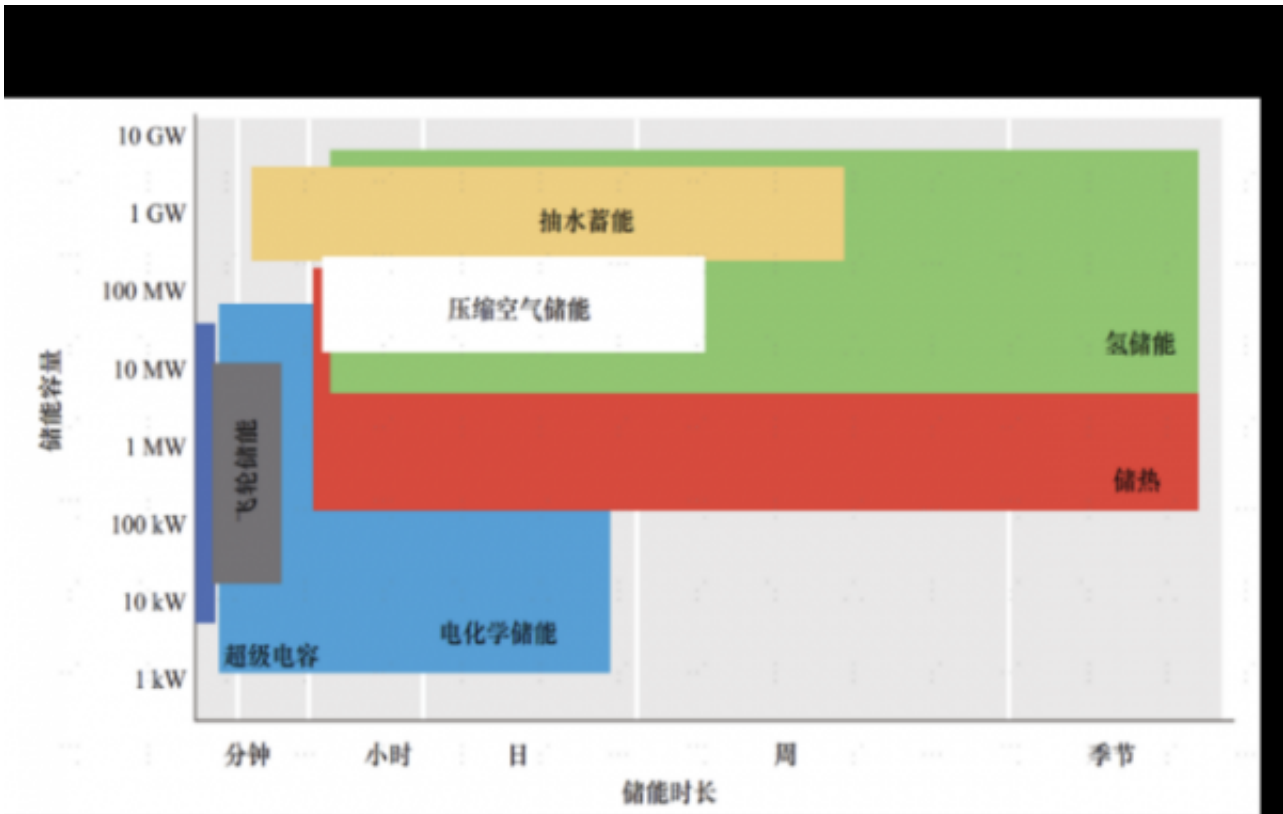
第一个条件，要能满足“长时储能”。

长期以来，行业之外都存在一个误区——增加储能可以解决风光消纳95%以上的问题。

这个观点非常片面。举个例子，如果你想一次性存放3吨水，是选择“矿泉水瓶”，还是选择一个游泳池？

同样的道理，想要消纳巨量的风光发电，用再多的“矿泉水瓶”——“短时储能”也不够。

根据充放电时长，国内一般将储能技术划分为“短时储能”（<4小时）和“长时储能”（≥4小时）。



图片来源：《新型电力系统发展蓝皮书》（国家能源局，2023.06）

长时储能——以抽水蓄能、压缩空气储能、二氧化碳储能、液流电池为代表；

短时储能——以锂离子电池、铅蓄电池、钠硫电池、超级电容为代表。

我们可以将“短时储能”想象为一个迷你“充电宝”，灵活性高、可应急，也能满足小时级别的调峰调频需求。但因为容量有限，系统在充电时很快就会饱和。

“长时储能”更像是露营用的“户外电源”。储能容量大，在风光消纳中起到了“乾坤大挪移”的作用，实现跨天、跨月，乃至跨季节的充放电循环，满足新型电力系统负荷增加的需求。

想要消纳庞大的风光发电量，迷你“短时储能”显然不够用，大体格“长时储能”则能将其“吞下”，并适用于长时段电网调峰、可再生能源并网等场景。

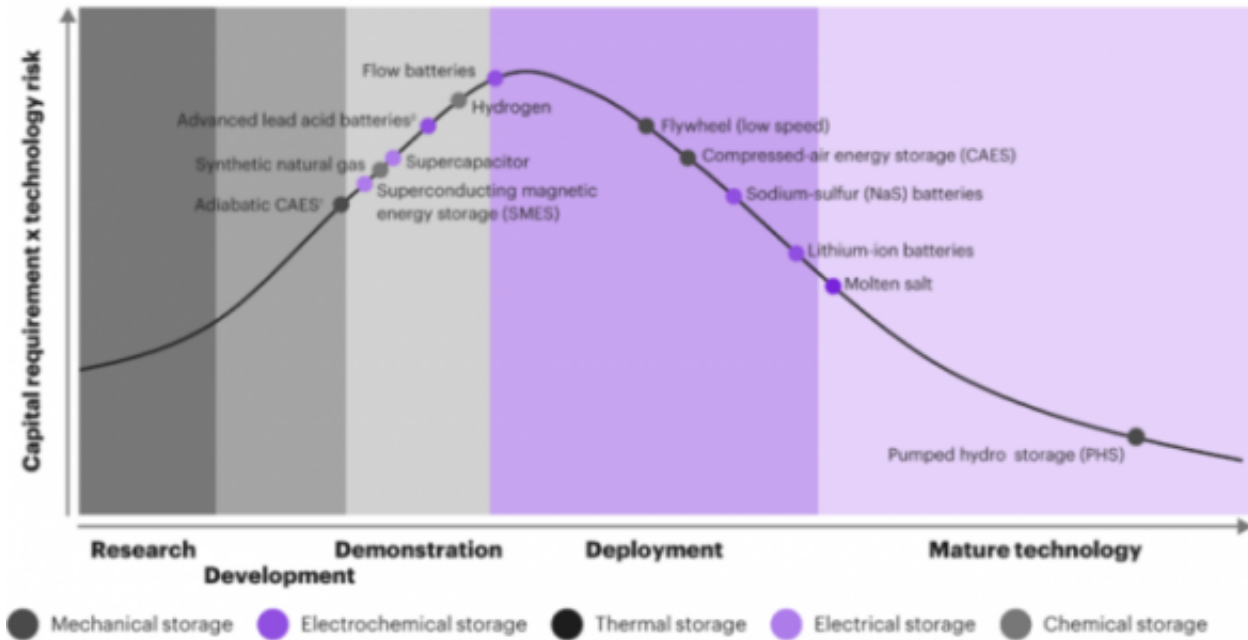
而且，从“双碳”的长周期路径来看，越到后期越需要“长时储能”。据预测，当风光发电占电力系统比例达50%-80%时，储能时长需要满足10小时以上。

第二个条件，要能满足“安全环保”。

储能技术大致可以分为电化学储能和物理储能两大类，不同技术的成熟度也不尽相同：

Figure 3  
**Electricity-storage technologies are at very different levels of maturity, but many face significant risk and extensive capital requirements**

Technology maturity curve



<sup>1</sup> CAES is compressed-air energy storage.  
<sup>2</sup> Valve regulated lead acid batteries is a mature technology.  
Source: A.T. Kearney Energy Transition Institute analysis

图片来源：A.T. Kearney Energy Transition Institute Analysis

在电化学储能中，锂离子电池技术最为成熟，已经成为全球电能存储的主流；以铅酸电池为代表的液流电池发展较晚。

在物理储能中，除了传统的抽水蓄能之外，压缩空气储能最为成熟，且在全国范围内已有多个示范项目落地。

虽然目前来看，锂离子电池以超90%的市场份额，成为了储能市场当之无愧的“王”，为电化学储能路线拔得头筹。但其背后的安全问题不容忽视——2011-2021年间，全球共报道了22起储能电站起火爆炸事故，其中25起都与锂离子电池相关。

一方面，电池系统存在本征缺陷，过充容易出现内部短路；另一方面，储能装置多被安装在远郊地区，诸如荒漠、山地、海边，昼夜温差引发反复冷凝现象并加剧灰尘，进而损坏接地部分的绝缘层，引起火灾。

虽然我们可以通过补齐安全标准，尽量避免悲剧发生。但从本质上讲，锂离子电池的“安全”只是“相对意义”。

因为锂离子电池采用的有机电解质不具备可逆分解与复原，当电池被重复充电或受外力作用时，锂离子会在负极表面析出，不可逆地形成固态金属锂。而金属锂是导致锂电安全问题的罪魁祸首，这些问题在大容量动力电池上会更加严重，即便采用BMS（电池管理系统）也无法从根本上解决。

再来看看以铅酸电池为代表的液流电池，虽然能够做到“安全”，但和锂离子电池类似，其原料涉及化学污染、电化安全问题，更关键的是系统初装成本还是居高不下。其电解液使用量较大，储能系统退役后也将涉及回收处理链条冗长复杂的问题。

由此，同时满足“大规模、长时、安全、环保”的物理储能路线则优势凸显。

例如“抽水蓄能”和“压缩空气储能”，储能介质为“水”和“空气”，绿色安全。

尤其是“压缩空气储能”家族中的“二氧化碳储能”，能够将二氧化碳“变废为宝”，深度嵌入“碳捕集、封存与利用”（CCUS）各个环节，进一步促成“双碳”目标。

第三个条件，要能满足“快速落地”。

虽然，抽水蓄能满足“长时储能”和“物理储能”，且发展最为成熟，已经被广泛投入建成，但其限制条件颇多——选址困难，能量密度较低，总投资较高，且建设周期长（5-10年）。

当建设速度赶不上新型电力系统的发展速度，抽水蓄能留下的市场空缺就开始逐渐被新型长时储能系统填补——同时满足建设周期短、环境影响小、选址要求低等特点，适于在短期内增加规模，能够快速投入使用。

在此背景下，压缩空气储能“家族”被视为最具发展潜力的物理储能技术。

压缩空气储能方面，我国总体实现了从跟跑、并跑到领跑。首先，研发进程遥遥领先，我国率先研发了十兆瓦、百兆瓦项目；其次，系统效率位列全球首位，300MW级压缩空气储能电站储能效率已上升至70%以上。

二氧化碳储能方面，早于2013年，我国已有研发团队成功研发了移动式二氧化碳压缩储能装置；近些年更是突破性研发了新型二氧化碳储能技术。该技术具有循环效率高、建设难度低、运行寿命长、系统成本低、契合碳捕捉技术，和不受地理条件限制等特点，在全球位列前沿。

据悉，该研发团队自研自产的二氧化碳储能系统储能电-电效率最高可达75%，可以实现30年以上的使用寿命，度电成本低至0.25元/KWh左右。

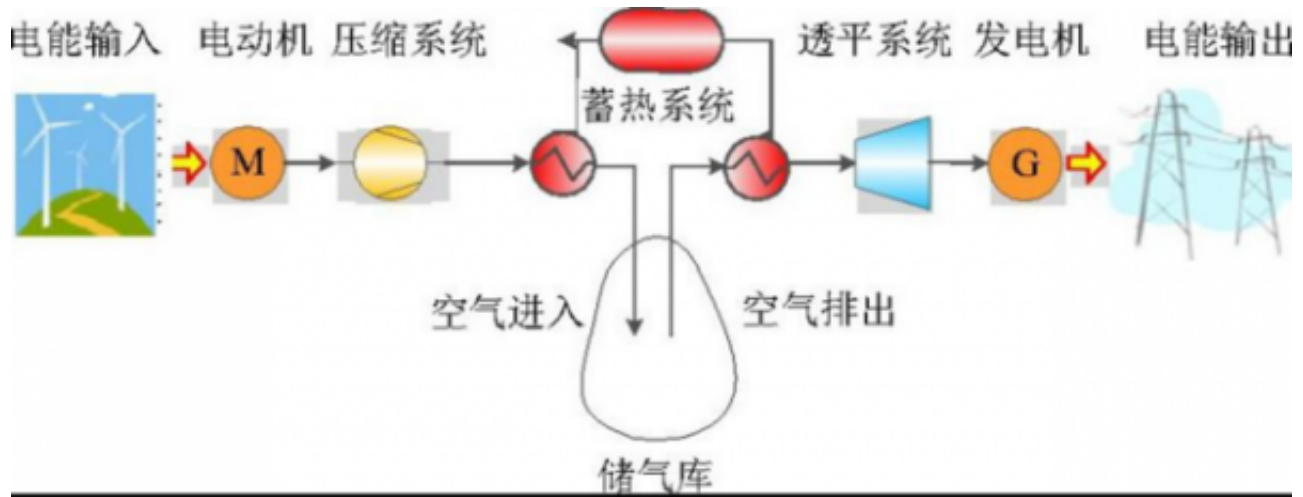
从项目进展看，2023年8月，我国已建成国内首套百千瓦级二氧化碳储能示范验证项目；10月完成项目系统联调联试；12月立项备案国际首套100MW/400MWh二氧化碳储能商业化电站……

可以预见，前方有我国研究人员的持续攻关，压缩空气储能和二氧化碳储能将在储能市场上大放异彩。

那么，我们纵深对比，这两种储能技术各自有什么特点？谁更胜一筹？

02 长时+安全+商业化，如何“既要、又要、还要”？

压缩空气储能（CAES）在用电低谷，通过压缩机把空气压缩成高压空气，在用电高峰，释放高压空气，驱动膨胀机就可以驱动发电机发电。

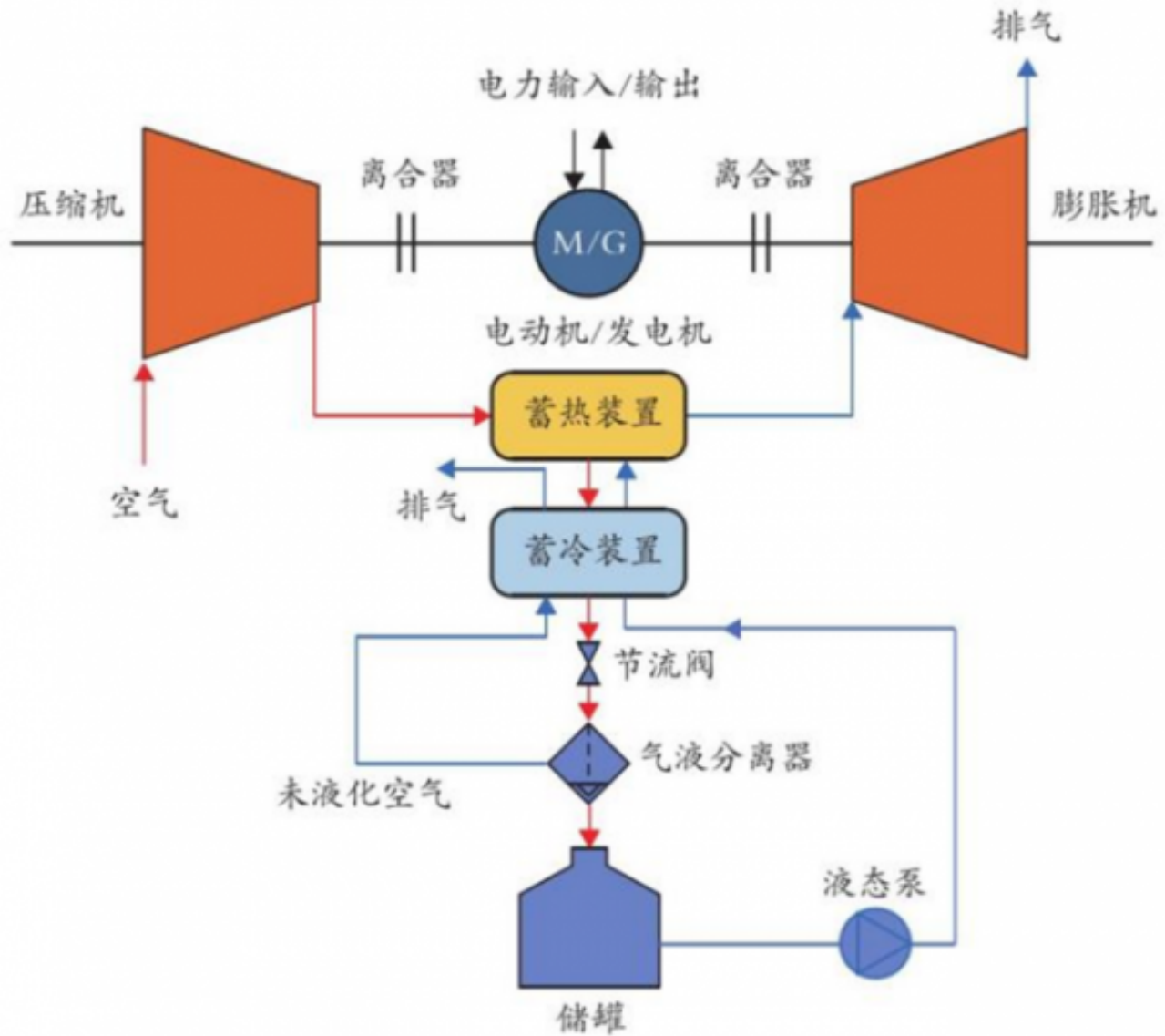


压缩空气储能（CAES）原理图

图片来源：中国知网，《中国电机工程学报》

随着时代的发展，压缩空气储能（CAES）也在不断进化。

1.0版本 补燃式压缩空气储能（D-CAES）——热量回收率低，需要燃烧大量化石燃料辅助发电，已经被时代淘汰；2.0版本 非补燃式压缩空气储能（AA-CAES）——实现了无燃烧、零碳排，但对系统热效率要求高，实现难度相对较高；2.5版本 液化空气储能（LAES）——直接进入“液化单元”储能，减少热能浪费，降低储存空间要求。但空气的液化条件过于苛刻，导致建设成本较高、实现难度大，影响进一步批量落地。



液化空气储能 (LAES) 原理图

图片来源：中国知网，《油气与新能源》

当前我国实现商业化落地的压缩空气储能系统，主要还是2.0版本AA-CAES。

然而，技术的革命性突破有时只需转一个弯——将液化“空气”换成更容易液化的气体，是否可以“鱼和熊掌得兼”，一举实现“高效+易落地”？

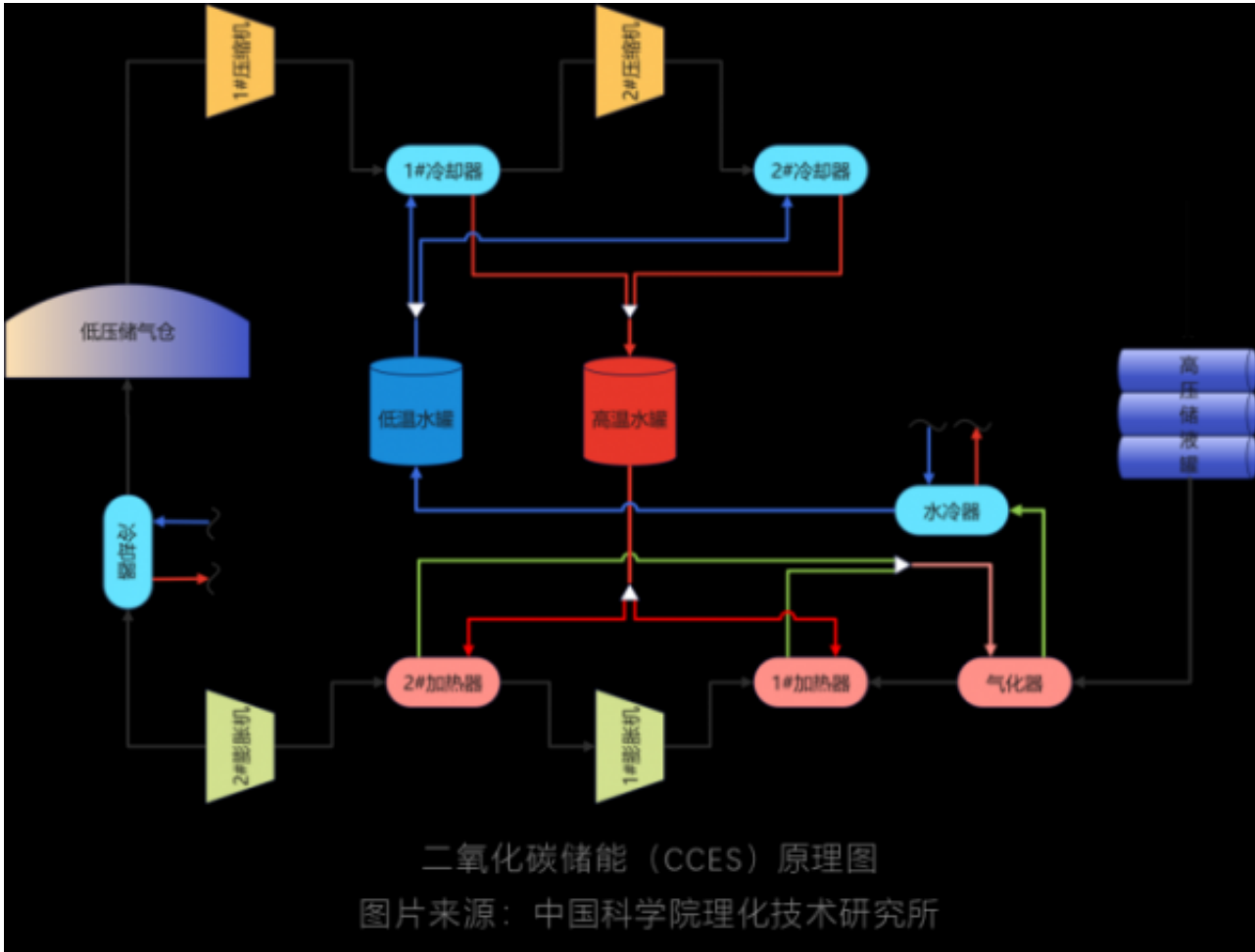
于是，压缩空气储能家族的3.0版“黑科技”——二氧化碳储能（CCES），登上了历史舞台。

将空气换成二氧化碳有哪些好处？

首先，安全第一。二氧化碳无毒、不易燃、安全等级达到A1，泄漏风险低，用起来大胆放心。

其次，液化条件简单。二氧化碳在常温31℃以下，70个标准大气压下，即可液化保存。其存储条件相较于液态空气（-193℃）简单很多，也便宜很多；

再次，临界二氧化碳（S-CO<sub>2</sub>）具备优良的热力学性质。二氧化碳在31℃，74个标准大气压以上进入超临界区，会变成兼具液态高密度气态低粘度特性的超临界状态，黏度小、密度大、导热性能好，有利于系统运行过程中的高效传热和换热，明显优于当前用于火电发电的高压水蒸汽。



从数据来看，二氧化碳储能（CCES）的电效率最高可达70%以上，液态储存温度仅为常温，没有其他能量损失，这两项关键参数明显优于液态空气储能(LAES)。这意味着，二氧化碳储能（CCES）同时具备“更小的身板拥有更大的能量”。

从成本来看，二氧化碳储能（CCES）系统虽然需要配备额外配置低压气体储存装置，产生了一定的原料和用地成本；但得益于二氧化碳的大分子量，系统所涉及的设备如压缩机、膨胀机等尺寸也更小、更紧凑，实际加工成本也随之降低。目前，由国内公司博睿鼎能开发的二氧化碳储能系统，全生命周期度电成本最低可达0.25元/KWh，已逼近抽水蓄能的度电成本，未来的成本优化空间也将更加明显。

而更为关键的是，二氧化碳储能系统（CCES）是一个典型的二氧化碳利用场景，可以深度嵌入“碳捕集、封存与利用”（CCUS）各个环节，为“双碳”目标提供了一条可行的思路。

我们以一套100MW/600MWh的二氧化碳储能系统为例。短短几小时，该系统就能完成一次充放电，一次完全放电高达80万度。按我国人均每日用电2度计算，可以满足30万人口，也就是一个小县城居民一天的用电需求。

正是出于更高的储能密度、更低的储能压力、更优的环境兼容性，二氧化碳储能（CCES）展现出了其无可替代的成本效益，以及可再生资源调度能力。

接下来，商业化也就成了一件顺其自然的事情。

### 03 二氧化碳储能：大规模商业化的先行尝试

2022年6月，意大利Energy Dome公司成功建成了一套4MWh的“二氧化碳电池”试点项目，这也是世界上首个二氧化碳储能示范项目。

几乎是相同的时间，2022年4月，一家名为“博睿鼎能”的中国公司从中国科学院理化技术研究所走出，并以其独有的“新型二氧化碳储能”解决方案，成为“双碳”背景下的优秀答卷人。

不同于全球其他二氧化碳储能“玩家”，博睿鼎能是唯一一家中国人控股的公司，也是该技术领域国内唯一一家科研产业一体化团队。

在“双碳”方面，博睿鼎能二氧化碳储能技术能够契合CCUS技术趋势，实现二氧化碳“变废为宝”。

例如，在用户侧，博睿鼎能和中科院理化所团队不仅将二氧化碳制冷、热泵与储能耦合，打造了某央企综合零碳电厂示范项目等；同时将工业园区的余热、废热与二氧化碳储能系统耦合，进一步研究综合性能源系统优化，提高了二氧化碳储能系统综合能源效率。

在产品开发方面，博睿鼎能采用矩阵式二氧化碳储能技术，高压侧二氧化碳能以超临界态或高压液态形式储存，膨胀后和低压侧能以气态或液态形式储存。

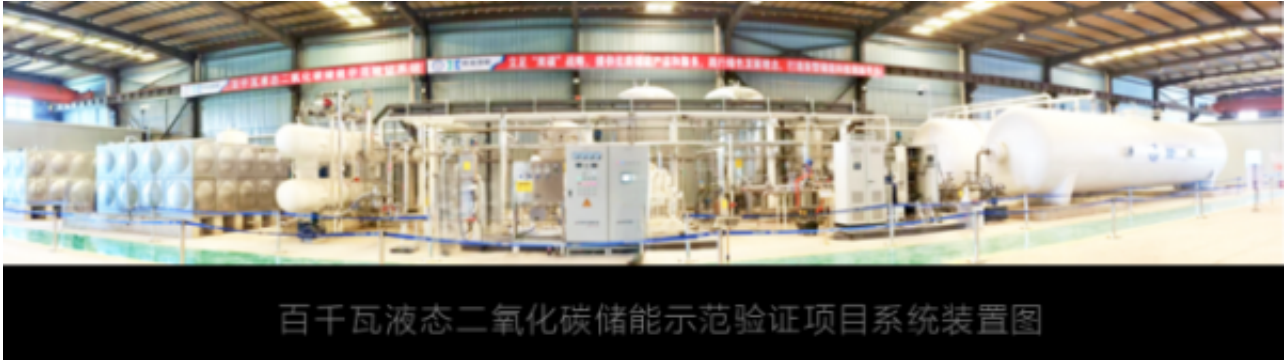
一套“组合拳”下来，博睿鼎能的二氧化碳储能系统，电效率最高可达75%，可以实现30年以上的使用寿命，度电成本低至0.25元/KWh左右。与此同时，相较于其他二氧化碳储能技术路线，博睿鼎能二氧化碳储能组合形式更为多样，可以不依赖盐穴与人工洞室，灵活满足不同场景。

虽然公司创立不到两年，但博睿鼎能的“技术护城河”在十几年前就已经悄然建成。

作为中国科学院成果转化科技公司，早在2011年，博睿鼎能的研究团队就依托国家重点研发计划等科研课题创新性地开展二氧化碳储能系统的实验研究，掌握二氧化碳液化蓄冷、热泵蓄热、动力装备及协同控制等关键技术，学术论文和专利硕果累累。

然而，眼见为实，无论技术有多么先进，如果没有一套装置去验证，一切都是空中楼阁。

基于“从科研小试到大规模应用”的愿景，2023年8月，博睿鼎能建成了国内首套百千瓦级二氧化碳储能示范验证项目；10月完成项目系统联调联试；12月立项备案国际首套100MW/400MWh二氧化碳储能商业化电站。



随着博睿鼎能将技术转化为现实，该公司也成为了“新型长时储能”赛道中的中坚力量。据了解，未来博睿鼎能还将持续推进技术创新，挖掘应用场景，开拓西北、华北、华中、华东等区域市场，推进二氧化碳储能技术规模化、标准化、商业化。

#### 04 结语

据预测，2030年起，长时储能容量将达到2亿-3亿千瓦，需求约占新能源发电量的10%-20%，将成为维持系统平衡的重要调节手段。

在长时储能的解决方案中，压缩空气储能（CAES）最为成熟，但其受地质条件影响较大；液化空气储能（LCES）虽然摆脱地理条件限制，但系统循环效率大幅降低，而且空气液化难度较大，建设成本较高。

相比之下，二氧化碳储能（CCES）因其在环境效益和经济可行性方面的双重优势，预计将成为一个革命性的升级解决方案。

二氧化碳储能不仅提高了系统的循环效率和多场景的适应性，其利用温室气体作为储能介质的特点，也为“减碳”提供了一个创新的途径。

或许，它将带领压缩气体储能（CGES）产业迎接新的产业拐点。

（本文发布于微信公众号“适通”，作者：郝佳豪、赵云凯）

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/news/208595.html>