

# 压缩空气储能——让电能穿越时空\*

刘畅<sup>1</sup> 徐玉杰<sup>1,2</sup> 陈海生<sup>1,2,†</sup>

(1 中国科学院工程热物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

2021-08-12收到

† email: chen\_hs@iet.cn

DOI: 10.7693/wl20220603

## Compressed air energy storage enables electricity to travel through time and space

LIU Chang<sup>1</sup> XU Yu-Jie<sup>1,2</sup> CHEN Hai-Sheng<sup>1,2,†</sup>

(1 Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**摘要** 电能的利用已经有数百年的历史,电力的发输配用长久以来有效地支撑着人类的社会经济生活。当今社会,人们提倡绿色的能量生产与消费模式,电力的存储作为使电力行业价值链闭环和实现能源结构调整的重要技术,在人类碳中和使命中担任重要角色。压缩空气储能是大规模电力存储技术中最具发展潜力的技术之一。文章以压缩空气储能的科学研究和技术发展作为主线,概述了该技术的原理、现状,及未来的发展前景。

**关键词** 压缩空气储能, 电能, 技术发展

**Abstract** Electric energy has been used for hundreds of years, and all this time its transmission, distribution and utilization has been supporting our social and economic life. But now we need to advocate environment-friendly energy production and consumption. Electrical energy storage is an important technology to complete the industry's value chain and contribute to its restructuring, thus it plays a pivotal role in the mission of carbon neutrality. Compressed air energy storage is one of the most promising technologies in large-scale energy storage. This paper focuses on the research and development of compressed air energy storage, and summarizes the principle, current status and future development prospects of this technology.

**Keywords** compressed air energy storage, electric energy, technology development

## 1 导语

电能是人类生产、生活所必需的一种最重要的能量形式,已被广泛应用在动力、照明、化学、纺织、通信、广播等各个领域,是科学技术发展和经济飞跃的主要动力。随着用电需求范围的扩大和电力需求总量的增加,电能的生产和利用产

生了时间和空间的矛盾。时间维度上,白天的城市非常活跃,用电量很大,早晚还会出现用电高峰。到了夜晚,随着人们生产活动的停止,用电量也随之减少,但承载大部分城市用电的煤电机组却无法在一天内跟随人类日出而作、日落而息。空间维度上,我国西北部风能和太阳能丰富的地区往往能够产生大量的可再生能源电力,但经济发达的中东部地区却是用电的高需求地区。这种电力在生产和利用上的时空错位问题迫切呼唤新的能源技术来提供解决方案。

\* 国家杰出青年科学基金(批准号:51925604)、中国科学院国际合作局国际伙伴计划(批准号:182211KYSB20170029)资助项目

压缩空气储能将用电低谷时段或可再生能源电力丰富地区的过剩电能转化成空气的压力势能,在用电高峰时段或电力贫瘠且电能消耗大的地区将空气的势能转化成电能,并且是一种大规模储能技术。它以绿色、丰富、取用方便的空气作为介质,将电能利用的时空矛盾问题巧妙解决,同时还能将可再生能源发出的间歇性电力拼接起来,改善电能的质量。压缩空气储能技术安全、高效、低碳,且不受自然条件的限制,是能源和电力领域的一项重要应用技术。

## 2 储能古已有之,如今正担重任

储能是指通过介质或设备把能量存储起来,在需要时再释放出来的过程。古代,人们在地下建造冰窖,通过隔绝阳光和空气可以很好地保持冬季冰块的温度,到了炎热的夏季,再将冰块取出,食用或降温俱佳。冰窖就是一种历史悠久的储能技术,其利用了地理环境的特点来存储冷能。此外,民间还有很多类似的储能妙方。我国北方冬季寒冷,在科技不发达的古代和近代,没有电热器、空调等高效、实用的取暖技术,人们就用火炕进行保温取暖。将秸秆、树枝等可燃物燃烧产生的热量通过烟道传递给土坯,由于土坯是热的不良导体,蓄热性能较好,一旦受热后温度上升,其自身温度的持久性很好,因此民房室内空间的热量就可以得到维持。火炕是一个非常典型的储能装置,其利用储热材料的特性,对建筑室内环境进行保温。

现代储能技术已经在飞速发展,储能的形式和门类层出不穷,应用的情景和发挥的作用也得

到细致的划分,各行各业各取所需。储能的主要用途包括可再生能源消纳、电网峰谷差调节、电能质量管理、电动汽车的动力电池、可穿戴电子产品和移动电源等。常见的储能技术主要分为物理储能和化学储能<sup>[1-3]</sup>。物理储能主要包括利用水的重力势能储能的抽水蓄能、利用空气的势能储能的压缩空气储能等。化学储能技术在近年则更为公众所熟知,例如电动汽车用的锂电池储能、铅炭电池储能,工业上常用的铅酸电池储能,以及电子产品手机、笔记本电脑和各种人工/机器智能产品所用的门类繁多的各类电化学电池,等等。

储能技术对于现代科技和工业的发展意义非凡。著名经济学家杰里米·里夫金提出的“第三次工业革命”的五大支柱产业分别为可再生能源、分布式/微网、智能电网/新能源、新能源汽车和储能,而储能技术贯穿全部五大支柱产业,是能源革命的支撑技术<sup>[4,5]</sup>。储能技术是解决可再生能源间歇性和不稳定性问题,提高常规电力系统和区域能源系统效率、安全性和经济性的迫切需要,是发展“安全、高效、低碳”的能源技术、占领能源技术制高点的“战略必争领域”。如图1所示,储能技术在能源和电力行业中贯穿一次能源、发电、输电、配电到用电的全过程,被称为“电力行业的第六价值链”<sup>[1]</sup>。

## 3 将空气压缩,为电网侧大规模储能“对症下药”

随着科技的发展,储能技术可以应对不同应用场景的需求,技术发展也越来越精细化。对于电网侧峰谷差调节、可再生能源消纳的技术问题,必须用大规模的储能技术来解决。目前的各类储能技术中,能够实现100 MW及其以上功率等级应用的技术,主要包括抽水蓄能和压缩空气储能两种技术门类<sup>[6]</sup>。但抽水蓄能技术存在天然的地理条件限制,需要上下两个大型水库作为蓄水池,才能实现水的重

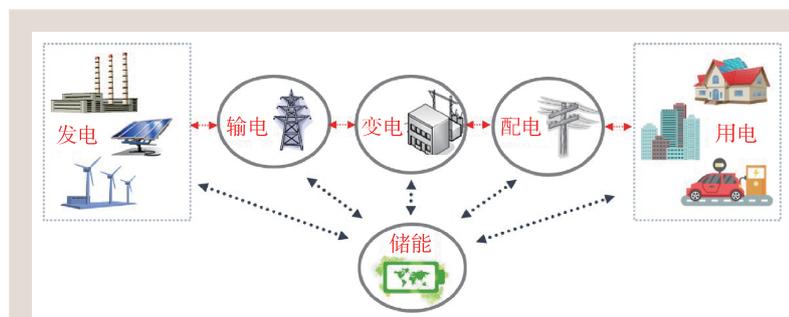


图1 储能技术贯穿电力行业的所有环节,被称为“电力行业的第六价值链”

力势能的存储与释放。地理条件的特殊要求和移民等问题使得抽水蓄能电站无法自由建设。此外,在我国抽水蓄能用于电网侧进行可再生能源电力消纳时,存在地域能源储备的匹配问题。我国的西北部地区风、光资源丰富,迫切需要大规模储能技术对可再生能源发电产生的过剩电力进行有效的消纳,但中东部地区因水力资源丰富更适合建设抽水蓄能电站,这种天然的地理资源的不匹配在一定程度上限制了抽水蓄能的发展。因此,压缩空气储能技术的发展和已应用已成为行业发展的迫切需要。

压缩空气储能具有储能容量大、储能周期长、比投资小等优点,被认为是最具有广阔发展前景的大规模储能技术之一<sup>[1]</sup>。如图2所示,传统压缩空气储能技术的原理是在用电低谷或电力过剩时,消耗电力将空气压缩,并将高压空气存储于储气室中;在用电高峰或电力缺乏时,将高压空气从储气室中释放出来,进入燃烧室参与燃料的燃烧反应,燃烧后的高温气体带有较高的能量可以驱动透平膨胀机等发电装置进行发电并利用。传统压缩空气储能系统目前已在德国(Huntorf 290 MW 压缩空气储能电站)和美国(McIntosh 110 MW 压缩空气储能电站)得到了规模化商业应用(图3)<sup>[1]</sup>,日本、以色列、芬兰等国家也开展了有关研究<sup>[1, 7]</sup>。但传统压缩空气储能系统存在如下技术瓶颈<sup>[1-3]</sup>:一是仍然依赖燃烧化石燃料提供热源,特别不适合我国这类“缺油少气”的国家,同时燃烧化石燃料还会带来环境污染;二是需要特殊的地理条件建造大型储气室,如高气密性的岩石洞穴、盐洞、废弃矿井等;三是系统效率较低,从而严重限制了压缩空气储能的应用和发展<sup>[1, 7, 8]</sup>。

近年来,先进压缩空气储能技术快速发展,目前国际上发展较快的主要包括以美国为代表的

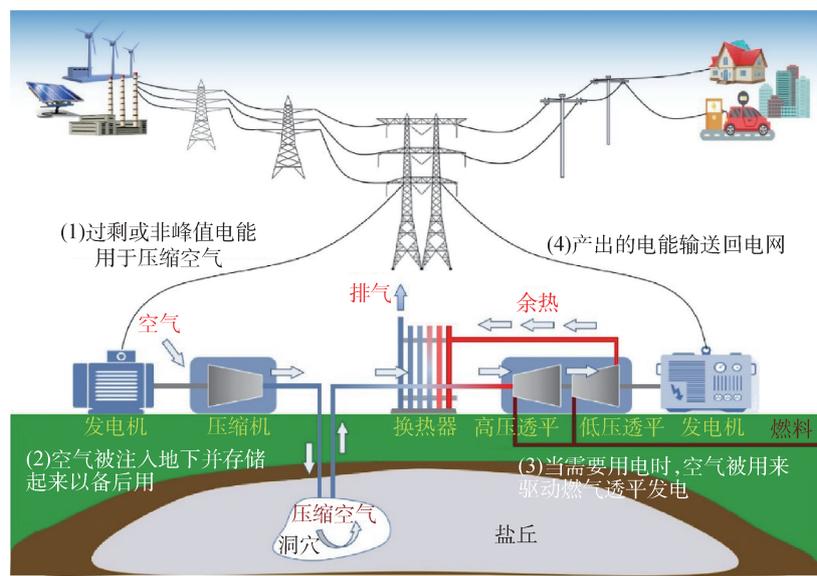


图2 传统压缩空气储能技术原理图<sup>[1]</sup>

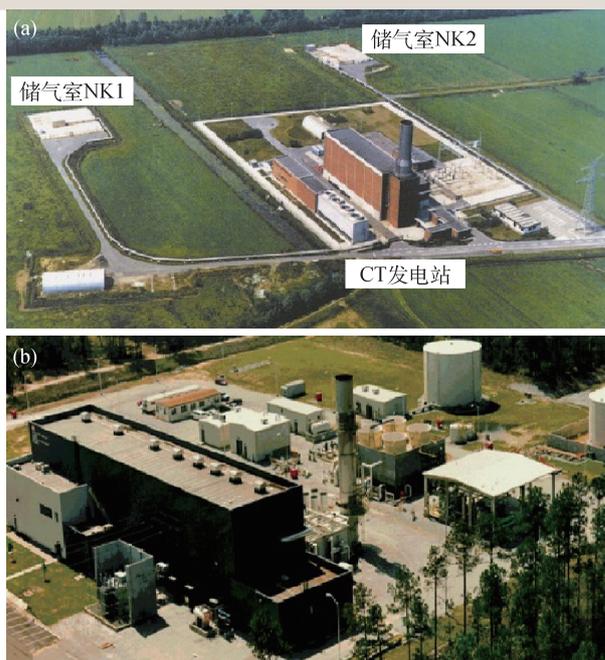


图3 实现商业应用的两座传统压缩空气储能电站 (a)1978年投入商业运行的德国Huntorf电站; (b)1991年投入商业运行的美国McIntosh电站

蓄热式压缩空气储能,以英国和日本为代表的液态空气储能<sup>[1, 6-8]</sup>。美国研发的兆瓦级蓄热式压缩空气储能系统,摆脱了化石燃料,但仍依赖大型储气洞穴。液态空气储能系统现已研制出兆瓦级系统,虽然摆脱了对储气洞穴的依赖,但系统效率低于25%<sup>[1, 9]</sup>。目前国外相关技术均未能同时解

决传统压缩空气储能的三个主要技术瓶颈。中国科学院工程热物理研究所先后开展了蓄热式压缩空气储能系统、液态空气储能系统和超临界压缩空气储能系统等,通过空气的液态或高压储存,消除对大型储气洞穴的依赖;通过压缩热回收再利用,摆脱化石燃料依赖;通过高效压缩、膨胀、超临界蓄冷蓄热提高系统效率,从而同时解决了传统压缩空气储能系统的主要技术瓶颈<sup>[1, 6-10]</sup>。

如图4所示,先进压缩空气储能系统利用电网低谷电或可再生能源的间歇式电能将空气压缩(同时存储压缩热),并将空气高压或液化储存(储能);在用电高峰或电力资源短缺时,高压/液态空气加压,并进一步吸收压缩热后通过透平膨胀机驱动电机发电(释能),在此过程中一些废热可以被回收以提高系统效率<sup>[8]</sup>。先进压缩空气储能系统具有很多优势:首先,由于空气的高压/液态存储,空气储罐的体积大大缩小,可以缩短建设周期,更重要的是可以不受地理条件限制,克服了传统压缩空气储能系统的一个主要瓶颈;第二,由于采用必要的储热储冷设备,将空气压缩过程的压缩热存储回收,从而不再需要燃烧燃料提供热源,解决了传统压缩空气储能系统的另一个主

要瓶颈;第三,由于超临界传热/冷却过程中冷热源之间的温差可以做到很小,同时由于采用储热、储冷设备,系统储能和释能过程的热和冷均能很好地回收;第四,先进压缩空气储能系统不涉及化石燃料的燃烧,不排放任何有害物质,而且空气压缩过程中很容易去除其中的有害物质如 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 等,从而改善大气质量<sup>[1, 8, 10]</sup>。

#### 4 十年磨一剑今朝试锋,万事破零难来日方长

中国科学院工程热物理研究所自2005年开展压缩空气储能技术研发,在多方的大力支持下已经取得了一系列科技成果。首先,我们揭示了压缩空气储能系统过程耦合与能量传递机理,并提出了多种先进压缩空气储能系统。压缩空气储能系统包含压缩、膨胀、蓄热、蓄冷、节流等复杂热力学过程,是典型的多过程非线性耦合的系统;同时它又不同于传统热力学循环系统,压缩空气储能系统的储能与释能过程分时工作,并不形成封闭的热力循环;而且,其输入输出负荷不稳定,导致系统常处于变工况运行状态,传统的热力学方法不能完全适用。针对系统的多过程非线性耦合问题,我们阐明了系统过程的能流图和焓损失机理<sup>[11-15]</sup>;针对压缩空气储能系统不形成封闭热力循环的问题,创新性地利用压缩—膨胀、蓄热—释热、液化—气化等过程的对应性特征。如图5所示,储能与释能过程的各级压缩机与各级膨胀机、级间冷却器与级间再热器等方面具有物理过程的对应性,建立了适用于压缩空气储能系统的“对应点”热力学分析方法<sup>[14-17]</sup>,提出并推导了系统机械焓—热焓复合函数<sup>[15-17]</sup>,初步建立了“过程对应—参数匹配”的压缩空气储能系统设计理论,通过采用对应点分析优化算法,将进一步提升系统效率达9.2%<sup>[16]</sup>;针对压缩空气储能系统的变工况运行难题,建立了压缩与膨胀、蓄热与释热、蓄冷与释冷等关键过程的全工况动态分析和优化方法,获得了各关键过程的动态特性和能量耦合机理<sup>[18-21]</sup>,实现了系统能量的全工况优化

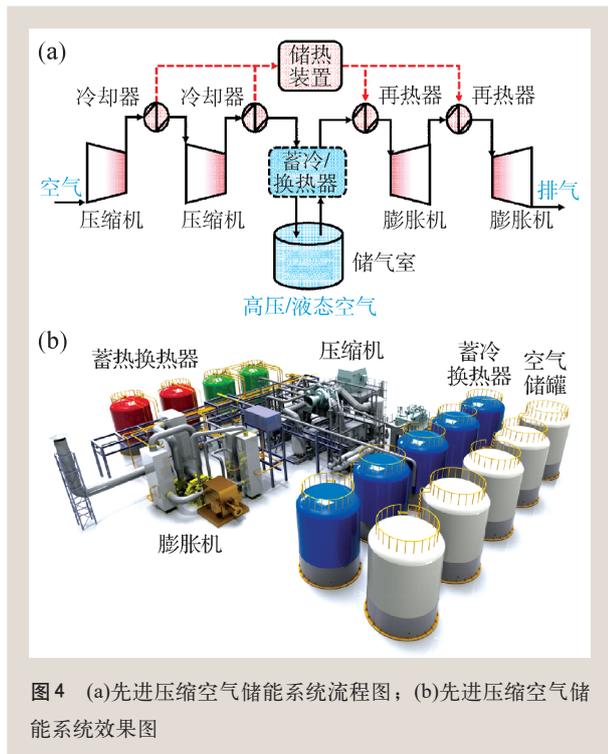


图4 (a)先进压缩空气储能系统流程图; (b)先进压缩空气储能系统效果图

与调控；构建了系统全工况热力学分析与设计体系<sup>[18-23]</sup>。在以上工作的基础上，我们提出了蓄热式压缩空气储能系统，采用回收压缩热替代了化石燃料热源，可大幅提高系统的效率5%—8%<sup>[17-25]</sup>；首次提出并研发了一种新型液态空气储能系统，摆脱对大型储气室的依赖，并开展了部件和MW级系统集成试验<sup>[26-29]</sup>；首次提出并研究了基于超临界过程的压缩空气储能系统新原理<sup>[16-19]</sup>，综合了超临界工质、蓄热/冷和液态空气存储的优点，储能密度为传统压缩空气储能(CAES)的约20倍，效率比传统CAES提高10%—30%，且不需要燃烧燃料，从而解决了传统CAES的主要技术瓶颈<sup>[11-15]</sup>。

第二，我们提出了叶轮机械内部流动、损失机理与三维设计方法，并设计发明了多种新型压缩空气储能的多级高负荷压缩机和膨胀机。压缩机和膨胀机是压缩空气储能系统的核心部件，采用径流或者轴流叶轮机械，其内部为三维、粘性、非定常流动，本身已非常复杂；而压缩空气储能系统的工作压力可达10 MPa以上，远高于常规压缩机和膨胀机，这将涉及多级、高/超高负荷压缩机/膨胀机的研究与设计难题；同时，先进压缩空气储能系统的压缩/膨胀同蓄热/蓄冷过程相互耦合，这又涉及流动与传热的耦合问题；并且，压缩机和膨胀机需经常工作在变工况和非稳态状态，其内部流动和损失机理将更加复杂且难于控制。针对单排叶栅内部流动和损失，我们系统地揭示了不同负荷叶栅流道内二次流动和损失发展的规律与机理<sup>[30-34]</sup>，首次发现了尾缘涡的发展规律及其损失机理，系统地分析了通道涡、尾缘涡、角涡、泄漏涡、二次涡的结构、发展过程及其相互作用机理；发现了高负荷下旋转叶轮叶顶间隙、背部间隙、篦齿间隙、轮毂间隙内部流动漩涡结构及其损失机理(图6显示了高负荷叶轮内部的流线以及流道的泄露流结构示意图)<sup>[34-37]</sup>，并进而提出抑制向心膨胀机顶部间隙泄漏损失的新型叶片型线和抑制背部间隙泄漏损失的叶轮结构；揭示了高负荷压缩机和膨胀机内部动静叶非定常流动

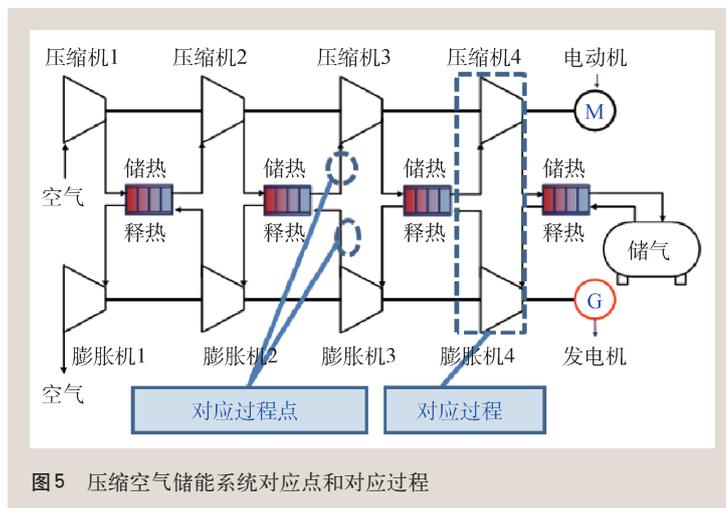


图5 压缩空气储能系统对应点和对应过程

特性及其熵增机理<sup>[38-40]</sup>，首次实验研究了液体膨胀机内部流动与相变传热机理<sup>[41]</sup>，首次将场协同理论引入叶轮机械内部流动与传热耦合分析，揭示了CAES高负荷压缩机和膨胀机内部流动与传热耦合特性及其机理<sup>[34-37]</sup>。在以上工作的基础上，我们引入多孔介质和相变换热模型，研究获得了多级压缩机和膨胀机不同工况下的级与级、级与换热器之间相互作用的规律<sup>[38, 39]</sup>，提出并研究了多级导叶—扩压器(压缩机)和喷嘴配气(膨胀机)耦合联调扩稳方法，创新性地发展了基于两区域模型和BP(back propagation)神经网络耦合优化算法，开发了适用于CAES多级复杂气动系统的全三维非稳态计算和设计方法<sup>[40, 41]</sup>。我们还设计发明了多种新型压缩空气储能的多级高负荷压缩机和膨胀机，授权或公开专利60余项，且已在工业示范中应用。特别是设计发明的CAES八级多轴离心压缩机和四级多轴向心轴流组合式膨胀机，在国内外属于首次，其测量多变效率分别达到87%和89%<sup>[34, 35, 38, 39]</sup>；而且采用多级导叶—扩压器耦合联调方法，压缩机的变工况工作范围提高了65%，采用喷嘴配气耦合联调方法，膨胀机的变工况级平均比功提高了8.0%。

第三，我们揭示了限制空间尺度内的流动、传蓄热特性与机理。先进压缩空气储能系统要求在高压、相变和超临界条件下工作，特别是蓄热器、蓄冷器、换热器等限制空间尺度内存在复杂的流动、传热和蓄热现象；同时流体在近临界点

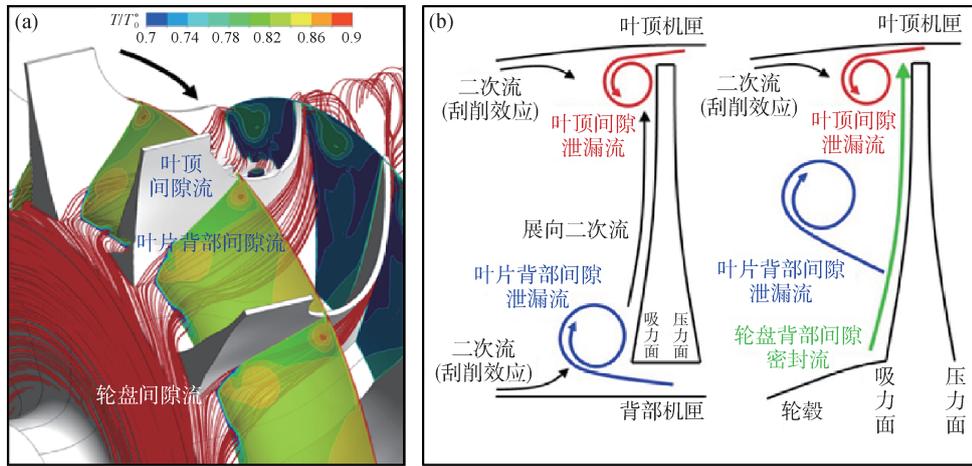


图6 高负荷旋转叶轮流场(a)及泄露流结构图(b)



图7 填充床蓄热/蓄冷及换热器 (a)实物图; (b)内部结构图

存在拟沸腾、拟冷凝、热流振荡等特殊现象，其机理尚不完全清楚；而且，蓄热和蓄冷过程同压缩和膨胀过程相互耦合，且常处于非稳态工作状态，使其机理更加复杂。针对传热和蓄热介质本身的流动与传蓄热问题，我们系统地开展了多种纳米流体、微尺度相变悬浮流体、离子流体、超临界流体等功能流体在限定空间内的流动与传蓄热特性的研究<sup>[42-49]</sup>，获得了多种功能流体的流变、层流、湍流、导热、对流和相变传热特性及其机理，从微观角度对实验现象的机理给出了理论解释，并在国际上首次提出一种联系微观结构与宏观特性的理论模型<sup>[42-47]</sup>；系统地开展了超临界空气、超临界氮气、超临界水蒸汽、超临界氟里昂等流动与传蓄热特性的研究<sup>[48-52]</sup>，首次揭示了近临界点流体热物性急剧变化对拟沸腾和拟冷

凝现象影响的机理<sup>[48-50]</sup>，发现了密度对热流振荡的决定性影响<sup>[48]</sup>；针对传热和蓄热介质之间的相互作用规律和机理，开展了填充床内部超临界蓄热/冷的实验研究，填充床蓄冷/热及换热器如图7所示，

图中显示了填充床实验台及内部结构图，发现在超临界条件下气固两相流动压力损失可用修正的Ergun方程描述，首次发现了自然对流对储热过程的强化/阻滞效应和提出了气固相间超临界强迫对流传热特征关系式，分析揭示了其内部热活塞效应及其机理<sup>[51-54]</sup>，提出了基于循环颗粒和喷淋流体的强化传热过程，揭示了气固液多相流动损失和强化传热的机理，并给出定量修正模型，很好地解释了经典文献中存在不同结果的机理<sup>[50-52]</sup>；详细研究了蓄热器和换热器的非定常流场和温度场特性，得到了填充床蓄冷换热器内部斜温层的非定常特性，发现了蓄热器内低能流体产生和流动发展的规律及其机理，揭示了其微观结构和关键参数对宏观性能影响的规律；获得了超临界气体在紧凑型换热器内的阻力因子和传热因子的修正关系式，进而提出了提高超临界工质蓄热/冷性能的设计新方法<sup>[55-59]</sup>。在以上研究的基础上，设计发明了内保温—外承压蓄热器、多股流耦合换热器、喷淋式填充床蓄热器等多种蓄热/换热器，其中内保温—外承压蓄热器和喷淋式填充床蓄热器的蓄热效率达到98%以上，多股流耦合换热器在高温环境下的换热温差小于2 K，并均成功应用于工业级项目。

在以上基础理论和关键技术突破的基础上，原创性地提出了先进压缩空气储能技术新原理，突破了1—100 MW级压缩空气储能系统关键技

术,率先形成了1—100 MW级先进压缩空气储能的系统解决方案。于2013年在河北廊坊建成了国际首个1.5 MW先进压缩空气储能系统(图8),系统效率达到了52.1%,被评价为“我国压缩空气储能的一项重要突破,达到国际领先水平”。于2016年在贵州毕节建成目前国际首套10 MW级新型压缩空气储能系统(图9),系统效率达60.2%,是全球目前系统效率最高的压缩空气储能系统。于2017年启动100 MW先进压缩空气储能系统研发及产业化工作,目前已完成100 MW先进压缩空气储能系统及部件的研发,系统设计效率达70.4%,并于2021年底完成100 MW示范项目并网(图10)。100 MW先进压缩空气储能系统的整体研发进程及系统性能均处于国际领先水平。已通过技术入股率先实现产业化,技术总作价约18亿元,吸引投资超过34亿元。已经建成示范项目共5台套,国内市场占有率约95%,正在建设及列入规划的项目共计2070 MW,总投资超过100亿元,技术成果转化收益位列2018年全国第一。已形成完善的自主知识产权体系,申请压缩空气储能相关专利400余项,授权专利300余项,专利群保护体系已覆盖中国、美国、日本、南非、欧盟等40余个主要国家和地区。

## 5 展望

未来,随着人类对碳中和、气候与环境变化的关注,我们必将减少化石能源的使用与消费,提高新能源和可再生能源比例,促进能源结构的深化改革,因此必将对大规模储能技术提出重大的需求,储能装机容量将会快速增长。据国际能源署预测,到2050年,仅美国、欧洲、中国及印度四个地区就需要增加至800 GW的储能装机,储能系统的容量从现在占发电总量的2.7%增加至10%—15%。我国电力储能系统容量将达到200 GW以上,市场规模将达数万亿人民币,市场需求迫切而巨大。压缩空气储能具有高效率、低成本、长寿命和大规模的特点,其作为最具发展潜力的大规模储能技术之一,已经被编写进《国



图8 国际首套1.5 MW先进压缩空气储能系统(中国廊坊)



图9 国际首套10 MW先进压缩空气储能系统(中国毕节)

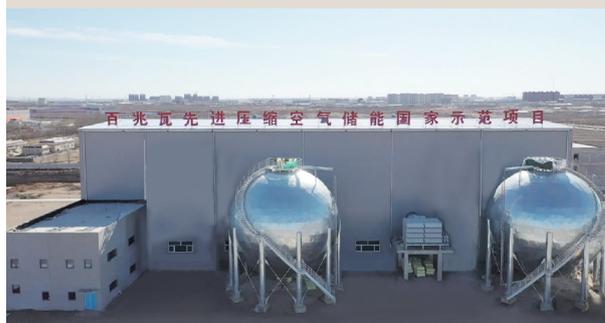


图10 国际首套100 MW先进压缩空气储能系统(中国张家口)

民经济与社会发展十四五规划》等国家级重要规划中。压缩空气储能技术的发展对能源结构的变革和能源技术发展的推动意义重大,也为智能电网、能源互联网和智能城市的建设与发展奠定了坚实的基础。

## 参考文献

- [1] Chen H S, Cong N T, Tan C Q *et al.* Progress in Natural Sciences, 2009, 19(3): 291
- [2] 陈海生, 凌浩恕, 徐玉杰. 中国科学院院刊, 2019, 34(04): 450
- [3] 李先锋, 张洪章, 郑琼 等. 中国科学院院刊, 2019, 34(04): 443
- [4] Rifkin J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World. 中信出版社,

2012

- [5] 陈海生,刘畅,齐智平. 中国科学院院刊,2016,31(02):224
- [6] 张新敬,陈海生,刘金超等. 储能科学与技术,2012,1(1):26
- [7] 中国能源研究会储能专委会,中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书2012,2012
- [8] 陈海生,谭春青,刘佳等. 超临界空气储能系统,公开号:CN102052256
- [9] Limited H E, Chen H S, Ding Y L *et al.* A Method of Storing Energy and a Cryogenic Energy Storage System. WO2007096656A1
- [10] 中国能源研究会储能专委会,中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书2021. 2021
- [11] Guo H, Xu Y J, Zhang Y *et al.* International Journal of Energy Research, 2019, 43(1): 475
- [12] Guo H, Xu Y J, Zhang Y *et al.* Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 262
- [13] Guo H, Xu Y J, Guo C *et al.* Journal of Thermal Science, 2020, 29(2): 445
- [14] Guo H, Xu Y J, Chen H S *et al.* Energy Conversion and Management, 2016, 115: 167
- [15] Guo H, Xu Y J, Chen H S *et al.* Applied Energy, 2017, 199: 96
- [16] Guo H, Xu Y J, Chen H S *et al.* Energy, 2018, 143(15): 772
- [17] Chen H S, Li Y L, Zhang X J *et al.* Applied Energy, 2011, 88(1): 337
- [18] Guo C, Xu Y J, Zhang X J *et al.* Energy, 2017, 135: 876
- [19] Guo C, Xu Y J, Zhang X J *et al.* Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 684
- [20] Sciacovelli A, Li Y L, Chen H S *et al.* Applied Energy, 2017, 185: 16
- [21] Zhang Y, Xu Y J, Zhou X Z *et al.* Applied Energy, 2019, 239: 957
- [22] Luo X, Wang J H, Krupke C *et al.* Applied Energy, 2016, 162: 589
- [23] Zhang Y, Xu Y J, Guo H *et al.* Renewable Energy, 2018, 125: 121
- [24] Zhang X H, Wang X, Li W *et al.* Energy Reports, 2021, 7: 2316
- [25] Zhang X J, Chen H S, Xu Y J *et al.* Applied Energy, 2017, 204: 1251
- [26] He F J, Xu Y J, Zhang X J *et al.* International Journal of Energy Research, 2015, 39(13): 1807
- [27] Liu J C, Zhang X J, Xu Y J *et al.* Journal of Thermal Science, 2014, 23(6): 535
- [28] Li Y L, Chen H S, Ding Y L *et al.* International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(6): 941
- [29] Zhang X J, Xue H B, Xu Y J *et al.* Energy Conversion and Management, 2014, 85: 784
- [30] Zhang X J, Xu Y J, Zhou X Z *et al.* Applied Energy, 2018, 225: 955
- [31] Zhang X J, Xu Y J, Xu J *et al.* Journal of Energy Institute, 2016, 89(3): 400
- [32] Tan C Q, Zhang H L, Chen H S *et al.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2011, 225: 131
- [33] Tan C Q, Zhang H L, Xia H D *et al.* Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(3): 604
- [34] Sun J T, Zhou X, Liang Q *et al.* Energies, 2019, 12(5): 906
- [35] Li W, Wang X, Zhang X H *et al.* Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, 2018, 14(10) : 102502
- [36] He P, Sun Z G, Chen H S *et al.* Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME, 2013, 135(2): 021002
- [37] Wang X, Li W, Zhang X H *et al.* Renewable Energy, 2019, 138: 1214
- [38] Wang X, Li W, Zhang X H *et al.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2018, 232(6): 622
- [39] Zhang X H, Chen H S, Yan X H *et al.* Entropy, 2013, 15(4): 1186
- [40] He Y, Chen H S, Xu Y J *et al.* Energy, 2018, 165: 349
- [41] Zhang X J, Xu Y J, Xu J *et al.* Applied Energy, 2017, 186: 347
- [42] Wang L, Zhang J, Wang Y F *et al.* Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 583
- [43] Wang L, Zhang J, Liu L *et al.* Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 2015: 137(9): 0910109
- [44] Wang L, Chen H S, Witharana S. Recent Patents on Nanotechnology, 2013, 7(3): 232
- [45] Li S Q, Lu T, Wang L *et al.* Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 99
- [46] Witharana S, Weliwita J A, Chen H S *et al.* Recent Patents on Nanotechnology, 2013, 7(3): 198
- [47] Bai Y, Wang L, Zhang S *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 191
- [48] Yang Z, Cheng X, Zheng X H *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 875
- [49] Bai Y, Wang L, Zhang S *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 354
- [50] Yang Z, Chen H S, Wang L *et al.* Journal of Energy Engineering, 2017, 143(6): 04017061
- [51] Liu J, Wang L, Yang L *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 883
- [52] Chai L, Liu J, Wang L *et al.* Applied Thermal Engineering, 2014, 63: 439
- [53] Chai L, Wang L, Liu J *et al.* Energy, 2014, 77: 871
- [54] Dou N L, Wang C, Song Y C *et al.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 536
- [55] Yang Z, Chen H S, Wang L *et al.* Journal of Energy Engineering, 2017, 143(6): 04017067
- [56] Yang Z, Chen H S, Wang L *et al.* Renewable Energy, 2016, 85: 31
- [57] Ling H S, Wang L, Chen C *et al.* Energy, 2019, 172: 1187
- [58] Wang Y F, Wang L, Chen H S *et al.* Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2016, 230(1): 126
- [59] Wang Y F, Wang L, Xie N N *et al.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99: 770