

# 压缩空气储能系统热能储存与利用研究进展

冯慧敏<sup>1,2</sup>, 盛健<sup>1,2</sup>, 张华<sup>1,2</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 压缩空气储能是解决可再生能源大规模并网不稳定的有效途径之一, 是目前大规模储能技术研发的重点。将系统压缩热进行储存和利用是提高其效率和经济效益的重要手段。本文介绍了压缩空气储能技术的发展历程和基本原理, 进一步分析了显热蓄热、潜热蓄热和热化学蓄热3种蓄热方式的技术现状, 发现采用潜热蓄热是提升先进绝热压缩空气储能系统综合性能最有潜力的方式。从蓄热子系统热能利用方面出发, 总结归纳先进绝热压缩空气储能系统耦合其他能源系统的研究进展, 发现先进绝热压缩空气储能系统耦合冷热电联产、煤电机组和太阳能集热系统能进一步改善整体能量梯级利用率、效率性能和经济效益。最后, 总结和展望了压缩空气储能系统热能储存与利用的研究方向。

**关键词:** 压缩空气储能系统; 蓄热技术; 相变材料; 冷热电联产; 煤电机组; 太阳能集热

中图分类号: TK02 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.10.002

[引用本文格式] 冯慧敏, 盛健, 张华. 压缩空气储能系统热能储存与利用研究进展[J]. 热能动力工程, 2024, 39(10): 10-19.  
FENG Huimin, SHENG Jian, ZHANG Hua. Research progress on the thermal energy storage and utilization of compressed air energy storage system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(10): 10-19.

## Research Progress on the Thermal Energy Storage and Utilization of Compressed Air Energy Storage System

FENG Huimin<sup>1,2</sup>, SHENG Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;  
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer, Shanghai, China, Post Code: 200093)

**Abstract:** Compressed air energy storage (CAES) is one of the effective ways to solve the unstable large-scale grid connection of renewable energy, and is the focus of large-scale energy storage technology research and development at present. Rational storage and utilization of system compression heat is important means to improve its efficiency and economic benefit. In this paper, the development history and basic principle of compressed air energy storage technology are introduced, and the technical status of sensible heat storage, latent heat storage and thermochemical heat storage is further analyzed. It is found that latent heat storage is the most potential way to improve the comprehensive performance of advanced adiabatic compressed air energy storage system. From the thermal energy utilization of heat storage subsystem, the research progress of advanced adiabatic compressed air energy storage system coupled with other energy systems is summarized, and it is found that advanced adiabatic compressed air energy storage system coupled with the combined cooling heating and power (CCHP), coal-fired power plant and solar

收稿日期: 2024-01-19; 修订日期: 2024-04-23

基金项目: 上海市2020年度“科技创新行动计划”技术标准项目(20DZ2204400); 上海理工大学本科教学研究与管理项目(2023SLGBK2D001)

**Fund-supported Project:** Technical Standard Project of Shanghai 2020's "Scientific and Technological Innovation Action Plan" (20DZ2204400); Undergraduate Teaching Research and Reform Project of University of Shanghai for Science and Technology (2023SLGBK2D001)

作者简介: 冯慧敏(2000-), 女, 上海理工大学硕士研究生。

通信作者: 盛健(1985-), 男, 上海理工大学副教授。

heat collection technology can further improve the energy cascade utilization, efficiency performance and economic benefits. Finally, the research direction of heat energy storage and utilization in compressed air energy storage system is summarized and prospected.

**Key words:** compressed air energy storage system, thermal energy storage technology, phase-change material, combined cooling heating and power (CCHP), coal-fired power plant, solar heat collection

## 引 言

传统化石能源的大量使用,导致环境污染日趋严重,对人类生存环境造成重大威胁。为减少对化石能源的依赖,实现能源和环境可持续发展,以风、光为代表的可再生能源在世界各国迅猛发展。截至 2023 年 10 月底,我国风电、光伏发电总装机容量达到 9.4 亿 kW,占全国可再生能源发电总装机容量的 67%<sup>[1]</sup>。然而,风能和太阳能利用受到地理、季节和昼夜变化等因素的影响而存在间歇性、波动性和非周期性问题,在并网时导致电网波动,对电网的安全稳定运行造成严重威胁<sup>[2]</sup>。因此,如何高效利用风能和太阳能,减少“弃风”和“弃光”的发生,已成为近几年的热点问题。

大规模储能技术可在时间和空间尺度上实现能量储存和转移,平滑风光发电的波动性是提高可再生能源消纳率和实现“双碳”目标最有效的技术之一。目前,较为成熟的大规模储能技术只有抽水蓄能和压缩空气储能。抽水蓄能具有储能容量大、运行寿命长且效率高的优势,但其选址受到地理条件限制,同时建设周期长、初投资高,甚至会对生态环境造成一定破坏<sup>[3-4]</sup>。而压缩空气储能选址较为容易且初投资低,弥补了抽水蓄能的不足,被认为是最有发展潜力的大规模储能技术之一<sup>[5]</sup>。然而,传统压缩空气储能系统效率低且需化石燃料提供热能,国内外学者将其压缩热进行储存并利用以改善系统效率和环境效益。因此,本文介绍压缩空气储能技术的发展历程和基本原理,进一步分析显热蓄热、潜热蓄热和热化学蓄热 3 种蓄热方式的技术现状,从热能利用角度,归纳与其他能源系统耦合的先进绝热压缩空气储能系统的研究进展,提出压缩空气储能系统热能储存与利用的研究方向。

## 1 传统压缩空气储能系统

### 1.1 压缩空气储能系统

1949 年,Stall Laval 首次提出利用压缩空气储能 (Compressed Air Energy Storage, CAES) 的概念<sup>[6]</sup>,之后引起国内外相关研究人员的广泛关注。CAES 系统由电动机、压缩机、储气室、燃烧室、膨胀机、发电机等部件组成,工作原理如图 1 所示。储能阶段:电动机利用低谷电或弃风弃光电等多余电能驱动压缩机,将空气压缩至设计压力,经冷却后存储至储气室。释能阶段:电网用电高峰期,高压空气从储气室释放,首先进入燃烧室与化石燃料燃烧,形成高温高压气体,然后进入膨胀机膨胀做功,带动发电机发电。

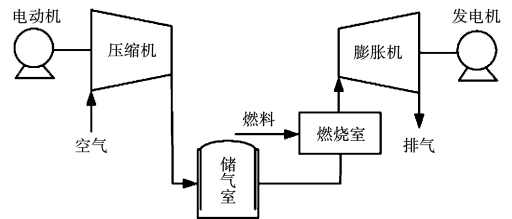


图 1 CAES 系统工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of CAES system

CAES 系统将低谷电或弃风弃光电等多余电能转化为空气压力势能储存至储气室,并在用电高峰期将空气内能转化为电能投入使用。因此,CAES 系统既有效提高了电网对可再生能源发电的消纳率,又对电网起到“削峰填谷”和“调峰调频”的作用。然而,CAES 系统因末级膨胀机排气余热未回收,系统效率不高,约为 42% ~ 46%<sup>[7]</sup>。

### 1.2 带回热的压缩空气储能系统

鉴于 CAES 系统排气热能未回收且效率较低,研究人员引入回热技术,提出带回热的压缩空气储能系统 (Regenerative CAES, RCAES),工作原理如图 2 所示。相较于 CAES 系统,RCAES 系统增设回热器,回收末级膨胀机排气余热用来预热从储气室

释放的高压空气,从而达到提升膨胀机入口空气温度、增强高压空气做功能力的目的。因此,RCAES系统效率有所提高,约为54%~60%<sup>[8-10]</sup>。虽然RCAES系统效率有所提升,但仍需化石燃料补燃,不符合当前控制碳排放量及实现“碳达峰、碳中和”战略目标的发展需求。

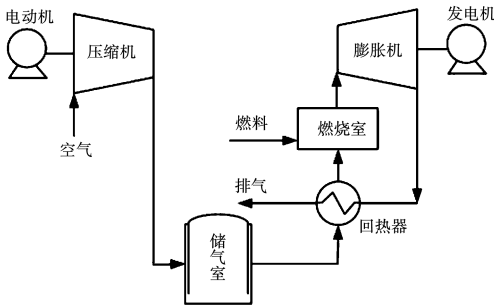


图2 RCAES系统工作原理图

Fig.2 Working principle diagram of RCAES system

### 1.3 先进绝热压缩空气储能系统

为实现“零碳排放”目标,Bullough等人<sup>[11]</sup>摒弃燃烧室,引入蓄热技术(Thermal Energy Storage, TES),首次提出先进绝热压缩空气储能系统(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage System, AA-CAES)。TES技术的引入,使AA-CAES系统拥有冷热电联供、联储及其他能源接入的能力。

AA-CAES系统由电动机、压缩机、换热器、蓄冷罐、低温泵、储气室、节流阀、蓄热罐、高温泵、膨胀机和发电机等部件组成,其工作原理如图3所示。

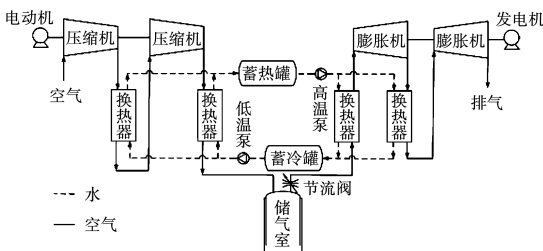


图3 AA-CAES系统工作原理图

Fig.3 Working principle diagram of AA-CAES system

储能阶段:电动机利用多余电能驱动压缩机,将空气压缩至设计压力,同时蓄热介质由低温泵从蓄冷罐泵出,进入各级换热器将各级压缩机出口空气冷却。冷却后的空气储存至储气室,而蓄热介质被空气加热后进入蓄热罐<sup>[12]</sup>。释能阶段:用电高峰期,高压空气从储气室释放,经节流阀节流降压,在

进入各级膨胀机前被蓄热罐中的蓄热介质加热,形成高温高压空气后进入各级膨胀机做功,带动发电机发电,同时蓄热介质被冷却后进入蓄冷罐。

刘明义等人<sup>[13]</sup>对比分析参数相同的CAES系统、RCAES系统和AA-CAES系统的效率性能发现,AA-CAES系统效率为63.17%,而CAES和RCAES系统效率分别为44.95%和49.04%,说明AA-CAES系统具有良好热力学性能。表1列出3种系统技术特点及效率性能对比。由表1可知,AA-CAES系统因对压缩热回收利用,无需燃烧室且无碳排放,总效率提高10%以上<sup>[14]</sup>。

表1 CAES、RCAES及AA-CAES系统技术特点和效率性能对比

Tab.1 Comparison of technical feature and efficiency performance of CAES, RCAES and AA-CAES systems

系统	是否使用 燃烧装置	是否排放 温室气体	是否回 收压缩热	循环 效率/%
CAES	是	是	否	42~46 <sup>[7]</sup>
RCAES	是	是	否	54~60 <sup>[8,10]</sup>
AA-CAES	否	否	是	60~65 <sup>[14]</sup>

提升膨胀机进气温度是提高AA-CAES系统效率和输出功率时使用最广泛的方式。然而,膨胀机进气温度过高将会导致其排气温度较高,若不对这部分热能加以回收利用,将会造成排气热能损失,从而影响系统输出特性。针对AA-CAES系统排气余热损失的问题,孙劲飏等人<sup>[15]</sup>以100 MW级的AA-CAES系统为对象,利用有机朗肯循环对系统余热进行回收,显著提高了AA-CAES系统发电效率。Wen等人<sup>[16]</sup>通过增设一个低膨胀比膨胀机回收AA-CAES系统排气余热,发现该系统比不回收余热的AA-CAES系统输出功率增加了4 713.72 kW,循环效率提升了7.34%,说明对AA-CAES系统余热进行回收利用,能改善系统输出特性和效率性能。

此外,在AA-CAES系统经济效益方面,Zhou等人<sup>[17]</sup>基于全寿命周期成本法,提出一种AA-CAES系统经济计算方法。计算结果表明,AA-CAES系统静态建设成本为6 679万元,平均年收入为2 174万元;该系统可通过降低购电价格或提高年运行小时数获得更高的经济效益。

以上研究表明, TES技术将AA-CAES系统储能

阶段的压缩热储存,并在释能阶段用于再热高压空气,不但提高了 AA-CAES 系统能量利用率,还改善了系统运行特性和经济效益。因此,深入分析不同 TES 方式对系统能量利用和经济性能的影响十分必要。

## 2 TES 方式

TES 子系统包括储/释能阶段的换热器、TES 介质和储存 TES 介质的蓄热器<sup>[18]</sup>。换热器一般采用间壁式,结构简单且换热效果好。此外,不同 TES 方式采用不同的 TES 介质和蓄热器, TES 方式有 3 种:显热蓄热、潜热蓄热和热化学蓄热<sup>[19]</sup>。

### 2.1 显热蓄热

显热蓄热通过 TES 介质的温度变化储存热能,主要采用双罐式蓄热器和填充床蓄热器。双罐式蓄热器以水、导热油、无机盐和熔融盐等作为 TES 介质,而填充床蓄热器以岩石、陶瓷和混凝土等固体作为 TES 介质。

#### 2.1.1 双罐式蓄热器

双罐式蓄热器包括蓄冷罐和蓄热罐两个储罐,分别储存蓄冷介质和蓄热介质。储/释能过程中冷热介质通过间壁式换热器与空气换热,利用高、低温泵提供冷、热介质的循环动力,双罐式蓄热的 AA-CAES 系统与图 3 所示的系统流程一致。双罐式蓄热技术成熟、成本低、系统简单,在实际示范项目中广泛应用,如 TICC-500 系统<sup>[20-21]</sup>和江苏金坛盐穴压缩空气储能电站<sup>[22]</sup>。

#### 2.1.2 填充床蓄热器

填充床蓄热器中填满 TES 介质,在储能阶段,各级压缩机出口空气直接流经填充床,与填充床中的 TES 介质直接接触换热, TES 介质将空气热量储存;在释能阶段,从储气室释放的空气流经填充床, TES 介质被空气冷却,将空气冷能储存,为下次储能阶段做准备。带有两级填充床蓄热的 AA-CAES 系统如图 4 所示。

填充床蓄热器是一种直接接触式换热器,空气与 TES 介质直接接触,换热面积大,热损失小且换热效率高,受到广泛关注。Marti 等人<sup>[23]</sup>采用多目标优化的方法,对 AA-CAES 系统的填充床结构进行设计,结果表明,相比于将填充床顶部和底部设计成圆柱形或正锥形,负锥形能进一步提升系统焓

效率。赵攀等人<sup>[24]</sup>以鹅卵石作为填充床蓄热器的 TES 介质,模拟研究带有两级填充床蓄热的 AA-CAES 系统热力学性能,发现系统循环效率达到 62.4%。Ochmann 等人<sup>[25]</sup>以玄武岩沙砾作为填充床蓄热器的 TES 介质,搭建带有填充床蓄热的 AA-CAES 系统实验台,通过减小填充床直径来增强空气流速,强化空气与玄武岩沙砾之间的传热,系统储能效率和循环效率高达 93.2% 和 83.3%。以上研究表明,与双罐式蓄热相比,填充床蓄热系统结构更简单,无需间壁式换热器、冷热介质和循环泵,而且能提供更高传热系数,使 AA-CAES 系统循环效率高达 83%,但关于填充床蓄热器对 AA-CAES 系统经济性能影响的研究还很少。

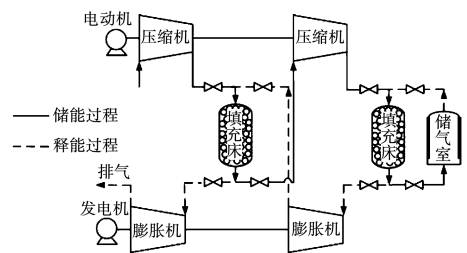


图 4 带有两级填充床蓄热的 AA-CAES 系统  
Fig. 4 AA-CAES system with two-stage packed bed heat storage

### 2.2 潜热蓄热

潜热蓄热利用 TES 介质的相变过程吸收和释放热量,从而实现热能的储存与释放,因此潜热蓄热也称为相变蓄热。潜热蓄热系统结构与填充床蓄热相似,不同之处在于,潜热蓄热以石蜡、共晶盐和脂肪酸等相变材料(Phase-Change Material, PCM)作为 TES 介质<sup>[26]</sup>。与显热蓄热相比,潜热蓄热具有更大的蓄热能力、更小的蓄热体积和更稳定的输出功率<sup>[27]</sup>。因此,将潜热蓄热应用于 AA-CAES 系统受到越来越多的重视。

近几年,国内外研究人员对潜热蓄热应用于 AA-CAES 系统展开大量研究。Li 等人<sup>[28]</sup>使用两种熔点不同的石蜡作为填充床 TES 介质,对比研究填充单层和双层相变材料蓄热器的 AA-CAES 系统性能,结果表明,与填充单层 PCM 的填充床蓄热相比,填充双层 PCM 的填充床蓄热的热损失更小,蓄热量更大,蓄热效率能提高至 91.5%。填充单层和双层相变材料的填充床蓄热器结构如图 5 所示。

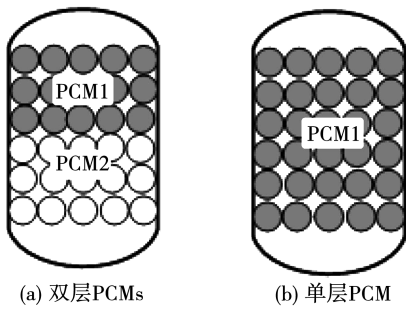


图5 填充单层和双层相变材料的填充床蓄热器<sup>[28]</sup>

Fig.5 Packed bed regenerators filled with single and double phase change materials<sup>[28]</sup>

Mousavi 等人<sup>[29]</sup>以  $\text{NaNO}_3$  作为 PCM1,  $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$  作为 PCM2,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  作为 PCM3 建立填充床蓄热器填充 3 层 PCMs 的 AA-CAES 系统热力学模型,对系统进行能量和焓分析,结果表明,该系统循环效率和焓效率分别高达 61.48% 和 68.21%;该系统与采用间壁式换热器蓄热的系统投资回收期分别为 3.5 年和 4 年。Yang 等人<sup>[30]</sup>选用与 Mousavi 等人<sup>[29]</sup>相同的 TES 介质,通过实验研究填充 3 层 PCMs 的填充床蓄热器对 AA-CAES 系统性能影响,并利用机器学习方法寻找系统最优解,发现合理调整 3 层 PCMs 的粒径和所占体积能使系统循环效率高达 81.67%。以上研究发现,填充多层 PCMs 的填充床蓄热器能为 AA-CAES 系统提供更高的储能密度,进而改善系统输出特性和经济效益。

### 2.3 热化学蓄热

热化学蓄热是利用可逆化学反应或化学吸/脱附反应的吸/放热进行热能储存和释放。热化学蓄热的储能密度是显热蓄热的 8 ~ 10 倍以上,是潜热蓄热的 2 倍以上<sup>[31]</sup>。但由于热化学蓄热系统结构复杂、初投资高、化学反应控制较难且安全性要求高等特点,应用受到限制。因此,将热化学蓄热应用于 AA-CAES 系统尚处于理论研究阶段。Lei 等人<sup>[32]</sup>提出一种热化学和显热蓄热结合的 AA-CAES 系统,利用氧化钡和岩石作为填充床填料,并测试系统性能,结果表明,与填充床蓄热器只填充岩石的 AA-CAES 系统相比,该系统循环效率提升 5%。这是因为热化学蓄热的材料能使 AA-CAES 系统的能量储存时间更长、膨胀机进气温度和输出功率更稳定,从而改善了系统性能。

## 3 压缩空气储能与多能源耦合系统

除从 TES 方式和介质进行优化外,对 TES 子系统进行设计,从而减少蓄热子系统热能损失也是提高 AA-CAES 系统效率与能量利用率的有效方式。目前,国内外学者主要从多能流联供、联储以及与其他能源系统耦合等方面对 AA-CAES 系统热能利用进行研究。

### 3.1 与冷热电联产耦合的 AA-CAES 系统

为提高 AA-CAES 系统能量利用率,满足人们对电力、冷量和热量的需求,研究人员将其与冷热电联产系统耦合,提出与冷热电联产耦合(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)的 AA-CAES 系统<sup>[33]</sup>。经整合后,AA-CAES + CCHP 系统工作原理如图 6 所示。与传统 AA-CAES 系统不同,AA-CAES + CCHP 系统在释能阶段,一部分蓄热介质用于加热高压空气,另一部分被分配给热用户<sup>[34]</sup>,同时高温高压空气在各级膨胀机膨胀做功,输出电能。另外,末级膨胀机排出的低温空气为用户提供冷能。

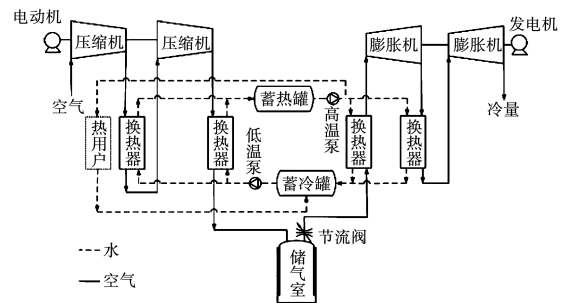


图6 AA-CAES + CCHP 系统工作原理

Fig.6 Working principle of AA-CAES + CCHP system

目前,对于 AA-CAES + CCHP 系统性能的研究主要从经济性和优化设计等方面展开。夏琦等人<sup>[35]</sup>研究一个由 AA-CAES + CCHP 系统供能的生活小区供能成本,并与常规供能方式进行对比,结果表明,由 AA-CAES + CCHP 系统供能的成本比常规供能成本降低 23.1%,年供能成本节省 156 万元,这与 Zheng 等人<sup>[36]</sup>的研究结果一致,说明由 AA-CAES + CCHP 系统供能可显著降低供能成本。Jiang 等人<sup>[37]</sup>对 AA-CAES 热电联产和冷热电联产两种系统的循环效率、焓效率和经济性进行评估,最终确定两种系统的最佳设计,发现当采用 2 级压缩 2 级膨胀时,热电联产的 AA-CAES 系统性能最优;当采用

3级压缩1级膨胀时,冷热电联产的AA-CAES系统性能最优。Han等人<sup>[38]</sup>建立AA-CAES+CCHP系统热力学模型,研究蓄热子系统的热量分配方式对系统输出特性的影响,发现配热比为0时,系统最优烟效率和年利润率分别为61.47%和19.46%;配热比为100%时,系统最优循环效率为54.4%。

综上所述,AA-CAES+CCHP系统不但满足了用户对多种能源的需求,而且提高了AA-CAES系统能量梯级利用率,降低了能源消耗和供能成本,具有较大的实际应用潜力。

### 3.2 与燃煤机组耦合的CAES系统

目前,燃煤电厂发电仍是许多国家的主要发电方式,但其运行时调峰深度有限、调节速率低且自身灵活性有待提高<sup>[39]</sup>。因此,有学者提出将其与CAES系统相结合,以缓解燃煤电厂存在的问题。与燃煤机组耦合(Incorporated with a Coal-Fired Power Plant, CFPP)的CAES系统包括CFPP和CAES两个子系统。CFPP系统由锅炉、低压缸、中压缸、高压缸、除氧器、给水泵、凝汽器、凝结水泵及各级加热器组成;CAES系统由电动机、压缩机、储气室、节流阀、膨胀机、发电机及各级换热器组成,工作原理如图7所示。其中,高加和低加分别为高压加热器和低压加热器;HX1为1号换热器,其他以此类推;序号①~⑨为CFPP系统和CAES系统的对应耦合点。

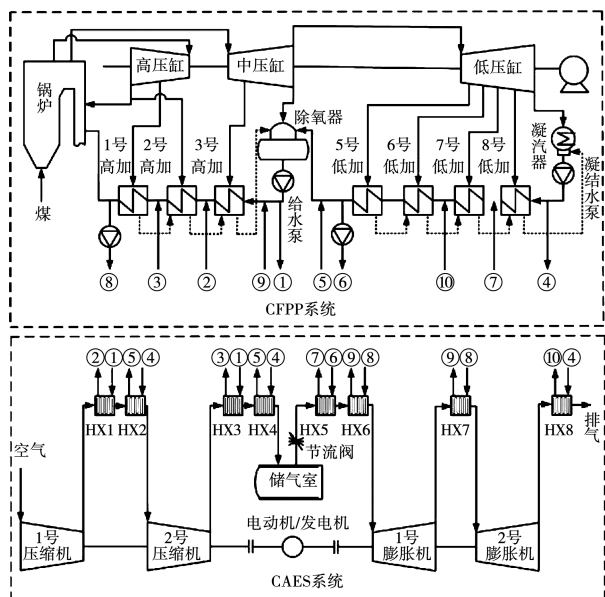


图7 CFPP-CAES系统工作原理<sup>[40]</sup>

Fig. 7 Working principle of CFPP-CAES system<sup>[40]</sup>

储能阶段:压缩机由燃煤机组多余电能驱动,空气先后被1号和2号压缩机压缩并储存至储气室,压缩机出口空气经1号、2号、3号和4号换热器将热量传递至从给水泵和冷凝水泵出口抽取的给水,其中,1号和2号换热器中给水吸收压缩空气热量后分别送至2号高压加热器和除氧器入水口,耦合点分别为②和⑤;3号和4号换热器给水吸收压缩空气热量后分别送至1号高压加热器和除氧器入水口,耦合点分别为③和⑤。

释能阶段:高压空气从储气室释放经节流阀降压至恒定压力,驱动1号和2号膨胀机做功并与燃煤机组联合发电,高压空气在进入膨胀机前先后被5号低压和1号高压加热器出口抽取的给水加热,给水被高压空气冷却后分别送至7号低压和3号高压加热器入水口,耦合点分别为⑦和⑨,2号膨胀机排气余热被从冷凝水泵抽取的给水回收。CFPP-CAES系统去掉了AA-CAES系统的蓄热设备,将其压缩热储存至燃煤机组的蓄热系统,释能阶段利用燃煤机组的给水加热高压空气,并对膨胀机排气余热进行回收利用。

国内外学者针对CFPP-CAES系统的耦合方案、热力学特性和经济性能等问题进行研究。李斌等人<sup>[41]</sup>研究发现,CFPP-CAES系统热效率和能量利用率最佳的耦合方式为,储能阶段从冷凝水泵抽冷凝水,其被压缩空气加热后送至除氧器,释能阶段利用CFPP系统的中压缸少量抽汽加热空气,抽汽被冷却后送至5号低压加热器。Pan等人<sup>[40]</sup>将350 MW超临界燃煤电厂与CAES系统耦合并测试CAES系统热力学特性,结果表明,烟效率和储能密度高达70.01%和4.01 MJ/m<sup>3</sup>。薛小军等人<sup>[42]</sup>对Pan等人<sup>[40]</sup>的CFPP-CAES系统进行改良,通过提高燃煤机组装机容量(630 MW)和CAES系统储气压力等设计参数,使CAES系统烟效率和储能密度分别提升9.01%和0.79 MJ/m<sup>3</sup>。Zhang等人<sup>[43]</sup>研究660 MW燃煤机组的蓄热系统与50 MW CAES系统耦合的最佳配置,在此基础上分析CAES系统热力学性能,发现环境温度为20℃时,CAES系统循环效率和烟效率分别高达78.85%和83.81%。王妍等人<sup>[44]</sup>对比分析CFPP-CAES系统和单独AA-CAES系统运行效率的差异,结果表明,通过将燃煤机组与

CAES 系统进行耦合,可使 CAES 系统运行效率达到 62%,比单独的 AA-CAES 系统提升 5%。

综上所述,CFPP-CAES 系统无需 AA-CAES 系统的蓄热设备,可显著降低总投资成本。此外,通过将燃煤机组与 CAES 系统进行耦合,不仅能降低燃煤机组调节成本、增强其运行灵活性、使其调峰能力提高 10%<sup>[45]</sup>,还实现了 CAES 系统能量梯级利用及综合性能的改善。实际应用该系统还需考虑两系统耦合后动态特性的变化,CAES 系统可能会对 CFPP 系统的控制产生不利影响。此外,CAES 系统需要大型储气装置,两系统耦合后可能会降低 CAES 系统选址的灵活性。

### 3.3 与太阳能耦合的 AA-CAES 系统

近年来,为提高 AA-CAES 系统蓄热温度,改善系统储能密度、循环效率和输出功率,众多学者利用太阳能集热器的热量作为系统外部热源,提出与太阳能耦合(Concentrated Solar Power, CSP)的 AA-CAES 系统,其工作原理如图 8 所示。与传统 AA-CAES 系统不同,在释能阶段,AA-CAES + CSP 系统从储气室释放的高压空气先与太阳能辅热子系统蓄热介质换热,再与蓄热子系统蓄热介质换热,进一步提高空气温度后进入膨胀机膨胀做功,带动发电机发电<sup>[46]</sup>。

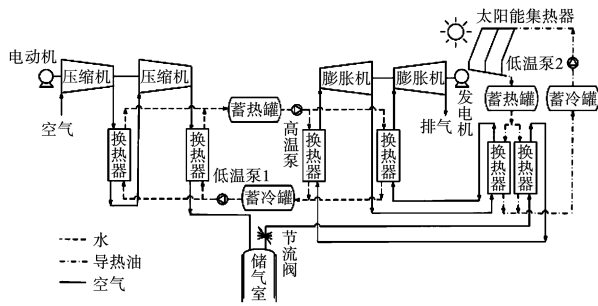


图 8 AA-CAES + CSP 系统工作原理<sup>[46]</sup>

Fig. 8 Working principle of AA-CAES + CSP system<sup>[46]</sup>

目前,主要从优化 AA-CSES + CSP 系统的设计方案和关键参数的角度出发,改善系统热力学特性、效率性能及经济效益。Fu 等人<sup>[47]</sup>设计了一种结构简单、适用于低太阳辐照度的新型光辅热 AA-CAES 系统,对系统焓效率和储能密度进行综合评价,发现太阳辐照度低于  $600 \text{ W/m}^2$  时,该系统的输出功率、焓效率和储能密度优于相同太阳辐照度下的

AA-CAES + CSP 系统。韩中等人<sup>[48]</sup>研究了 AA-CAES 系统和 AA-CAES + CSP 系统的运行特性,结果表明,稳定工况下,与 AA-CAES 系统相比,AA-CAES + CSP 系统循环效率和储能密度分别提高 7.9% 和 4.46%,循环效率达到 64%,说明太阳能辅热子系统能显著提升 AA-CAES 系统效率。李鹏等人<sup>[49]</sup>对释能过程进行改进,将一部分蓄热介质输送至热用户,末级膨胀机排出的低温空气用于制冷,以降低系统排气热能损失,并从热力学和经济学角度分析改进系统的运行特性,发现改进系统的能量利用率和年利润率得到显著提升。

综上,AA-CAES 系统运行中压缩机排气温度约为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,仅用压缩热再热膨胀阶段的高压空气,不能使膨胀机进口空气温度达到理想状态,进而限制了高压空气在膨胀机中的做功能力。而利用太阳能辅热子系统为 AA-CAES 系统提供热能,蓄热温度能达到  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,解决了 AA-CAES 系统蓄热温度不高的问题,优化了 AA-CAES 系统运行特性,同时也弥补了太阳能发电的固有缺陷。因此,AA-CAES + CSP 系统对太阳能资源丰富地区的综合能源利用有重要意义。

## 4 总结与展望

压缩空气储能是一种规模大、存储时间长的储能技术,是缓解可再生能源发电不稳定,提升电网对可再生能源发电消纳率的重要手段。而压缩空气储能系统的热能储存与利用是影响其综合性能的关键因素,因此本文详细介绍压缩空气储能系统的基本原理和发展现状,对比分析 3 种 TES 方式的技术特点,从 TES 子系统热能利用角度出发,总结与其他能源系统耦合的 AA-CAES 系统的运行特性,提出了今后压缩空气储能系统热能储存与利用的发展方向。

(1) 通过对比 CAES, RCAES 和 AA-CAES 系统的优缺点发现,AA-CAES 系统解决了 CAES 和 RCAES 系统碳排放的问题,并对压缩热进行回收利用,使系统能量利用率及循环效率得到显著提升。

(2) TES 子系统作为 AA-CAES 系统的重要组成部分,其蓄热效率和投资成本影响着 AA-CAES 系统的效率和经济效益。关于优化 TES 子系统中换

热器结构、材料和换热性能以提升其蓄热效率,降低投资成本的研究还较少,未来需开发高效、紧凑且成本低廉的 TES 子系统。

(3) 与显热蓄热和热化学蓄热相比,相变蓄热的 AA-CAES 系统具有更优异的蓄热效率、储能密度及循环效率。目前对填充床蓄热器填充多层 PCMs 的 AA-CAES 系统的研究集中在热力学计算和特性分析方面,未来应平衡该系统的效率性能和经济效益。

(4) 除对 TES 方式和介质进行优化外,将 TES 子系统与其他能源系统耦合不仅使 AA-CAES 系统实现多能流供应,还能降低投资成本,提高整体能量利用率和综合性能。未来将 AA-CAES 系统与地热、海水淡化、电解水制氢、燃料电池和生物质气化等系统进行耦合是重要研究方向。

#### 参考文献:

[1] 国家能源局. 可再生能源发电总装机超过 14 亿千瓦[EB/OL]. (2023-12-11) [2024-01-19]. [http://www.nea.gov.cn/2023-12/11/c\\_1310754581.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-12/11/c_1310754581.htm).  
National Energy Administration. The total installed capacity of renewable energy generation exceeded 1.4 billion kilo-watts [EB/OL]. (2023-12-11) [2024-01-19]. [http://www.nea.gov.cn/2023-12/11/c\\_1310754581.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-12/11/c_1310754581.htm).

[2] 岑彬. “双碳”背景下可再生能源发展中“弃风弃光”的问题及消纳措施[J]. 中阿科技论坛,2022(10):60-63.  
CEN Bin. Study on the “forced abandonment of wind and light” in the development of renewable energy under the background of “dual carbon” and its mitigation measures [J]. China-Arab States Science and Technology Forum,2022(10):60-63.

[3] 陈海生,李泓,马文涛,等. 2021 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术,2022,11(3):1052-1076.  
CHEN Haisheng, LI Hong, MA Wentao, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3):1052-1076.

[4] 吴皓文,王军,龚迎莉,等. 储能技术发展现状及应用前景分析[J]. 电力学报,2021,36(5):434-443.  
WU Haowen, WANG Jun, GONG Yingli, et al. Development status and application prospect analysis of energy storage technology [J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(5):434-443.

[5] 李阳海,徐万兵,张彪,等. 压缩空气储能技术与应用[J]. 湖北电力,2022,46(4):1-7.  
LI Yanghai, XU Wanbing, ZHANG Biao, et al. Compressed air energy storage technology and its application [J]. Hubei Electric

Power, 2022, 46(4):1-7.

[6] TER-GAZARIAN A. Energy storage for power systems [M]. London: Peter Peregrinus Ltd, 1994.

[7] CROTOGINO F. Druckluftspeicher-Kraftwerke zum ausgleich fluktuierender windenergie/Stand der technik und neue entwicklungen [J]. Flensburger Windenergie-Forums, 2006, 20(4):25.

[8] NAKHAMKIN M, CHIRUVOLU M, DANIEL C. Available compressed air energy storage (CAES) plant concepts [J]. Energy, 2010, 4100:81.

[9] ZHANG Y, YANG K, LI X, et al. The thermodynamic effect of thermal energy storage on compressed air energy storage system [J]. Renewable Energy, 2013, 50:227-235.

[10] WOLF D, BUDT M, PRUMPER H J. LTA-CAES a low-temperature approach to adiabatic compressed air energy storage [J]. Applied Energy, 2014, 125:158-164.

[11] BULLOUGH C, GATZEN C, JAKIEL C, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage for the integration of wind energy [C]. London, UK: EWEC, 2004.

[12] 李鹏, 李国能, 苏航, 等. 不同运行方案下 AA-CAES 系统性能分析及优化[J]. 动力工程学报, 2022, 42(9):843-851.  
LI Peng, LI Guoneng, SU Hang, et al. Performance analysis and optimization of AA-CAES system under different operation schemes [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(9):843-851.

[13] 刘明义, 朱勇, 曹传钊, 等. 压缩空气储能系统性能分析研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(9):67-72.  
LI Mingyi, ZHU Yong, CAO Chuanshao, et al. Performance analysis of compressed air energy storage system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9):67-72.

[14] 王富强, 王汉斌, 武明鑫, 等. 压缩空气储能技术与发展[J]. 水力发电, 2022, 48(11):10-15.  
WANG Fuqiang, WANG Hanbin, WU Mingxin, et al. Compressed air energy storage technology and development [J]. Water Power, 2022, 48(11):10-15.

[15] 孙劲彪, 姚少勇, 周新军, 等. 先进绝热压缩空气储能系统的优化研究[J]. 电力勘测设计, 2023(7):89-94.  
SUN Jinbiao, YAO Shaoyong, ZHOU Xinjun, et al. Optimization research of advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. Electric Power Survey & Design, 2023(7):89-94.

[16] WEN X, YANG D, ZHONG J, et al. Research on recovery and utilization of waste heat in advanced compressed air energy storage system [J]. Energy Reports, 2022, 8:1436-1445.

[17] ZHOU Q, HE Q, LU C, et al. Techno-economic analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system based on life cycle cost [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 265:121768.



- [18] MEI S, WANG J, TIAN F, et al. Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system; TICC-500 [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(4): 600–611.
- [19] ZHOU Q, DU D, LU C, et al. A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system [J]. *Energy*, 2019, 188: 115993.
- [20] 贾祥, 崔凝. TICC-500 储能阶段的建模和热力特性[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(1): 135–140.  
JIA Xiang, CUI Ning. TICC-500 energy storage phase of modeling and thermal properties [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(1): 135–140.
- [21] 赵豫晋. TICC-500 系统储能阶段动态热力特性分析[J]. *分布式能源*, 2017, 2(6): 72–77.  
ZHAO Yujin. Dynamic thermal characteristics of TICC-500 system during energy storage [J]. *Distributed Energy*, 2017, 2(6): 72–77.
- [22] 国内首台金坛盐穴压缩空气储能国家示范项目性能试验顺利完成[J]. *东方汽轮机*, 2022(4): 41.  
The performance test of the first national demonstration project of Jintan salt cave compressed air energy storage was successfully completed [J]. *Dongfang Turbine*, 2022(4): 41.
- [23] MARTI J, GEISSBÜHLER L, BECATTINI V, et al. Constrained multi-objective optimization of thermochemical packed-bed thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 694–708.
- [24] 赵攀, 王佩姿, 许文盼, 等. 两级填充床蓄热式绝热压缩空气储能系统变工况特性研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 294–299.  
ZHAO Pan, WANG Peizi, XU Wenpan, et al. Off-design performance analysis of A-CAES system with two-stage packed bed heat storage unit [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(1): 294–299.
- [25] OCHMANN J, RUSIN K, RULIK S, et al. Experimental and computational analysis of packed-bed thermal energy storage tank designed for adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118750.
- [26] VENKATESWARLU K, RAMAKRISHNA K. Recent advances in phase change materials for thermal energy storage – A review [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 44(1): 6.
- [27] RAHMAN M A, KIM J H, HOSSAIN S. Recent advances of energy storage technologies for grid: A comprehensive review [J]. *Energy Storage*, 2022, 4(6): e322.
- [28] LI R, ZHANG Y, CHEN H, et al. Exploring thermodynamic potential of multiple phase change thermal energy storage for adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 33: 102054.
- [29] MOUSAVI S B, ADIB M, SOLTANI M, et al. Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 243: 114379.
- [30] YANG X, CUI J, LI Y, et al. Multi-factor analysis and optimization design of a cascaded packed-bed thermal storage system coupled with adiabatic compressed air energy storage [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 300: 117961.
- [31] 王智辉, 湟田光宏, 杨希贤, 等. 热化学蓄热系统研究进展[J]. *新能源进展*, 2015, 3(4): 289–298.  
WANG Zhihui, KUBOTA Mitsuhiro, YANG Xixian, et al. Research progress on thermochemical heat storage system [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2015, 3(4): 289–298.
- [32] LEI F, KORBA D, HUANG W, et al. Thermochemical heat recuperation for compressed air energy storage [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 250: 114889.
- [33] SI S, DOU Z, WANG Z, et al. The analysis of time-sharing economic exergy efficiency of the CCHP system using planetary search algorithms [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2023, 23(4): 2205–2224.
- [34] 韩中合, 胡庆亚, 李鹏. 基于压缩空气储能的 CCHP 系统特性研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 409–415.  
HAN Zhonghe, HU Qingya, LI Peng. Research on characteristics of CCHP system based on compressed air energy storage [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(10): 409–415.
- [35] 夏琦, 何阳, 徐玉杰, 等. 绝热压缩空气储能系统冷热电联供与负荷匹配特性[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1494–1502.  
XIA Qi, HE Yang, XU Yujie, et al. Matching performance between the trigeneration of an adiabatic compressed air energy storage system and load [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1494–1502.
- [36] ZHENG C, QI X, YANG H, et al. Discharging strategy of adiabatic compressed air energy storage system based on variable load and economic analysis [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104403.
- [37] JIANG Runhua, CAI Zhuodi, PENG Kewen, et al. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of polygeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113724.
- [38] HAN Z, SUN Y, LI P. Thermo-economic analysis and optimization of a combined cooling, heating and power system based on advanced adiabatic compressed air energy storage [J]. *Energy Con-*

- version and Management,2020,212;112811.
- [39] 李佳佳,李兴朔,魏凡超,等.耦合火电机组的新型压缩空气储能系统技术经济性评估研究[J].中国电机工程学报,2023,43(23):9171-9183.
- LI Jiajia,LI Xingshuo,WEI Fanchao,et al. Research on techno-economic evaluation of new type compressed air energy storage coupled with thermal power unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(23):9171-9183.
- [40] PAN P Y,ZHANG M Y,PENG W K,et al. Thermodynamic evaluation and sensitivity analysis of a novel compressed air energy storage system incorporated with a coal-fired power plant [J]. Entropy,2020,22(11):1316.
- [41] 李斌,陈吉玲,李晨昕,等.压缩空气储能系统与火电机组的耦合方案研究[J].动力工程学报,2021,41(3):244-250.
- LI Bin,CHEN Jiling,LI Chenxin,et al. Research on coupling schemes of a compressed air energy storage system and thermal power unit [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021,41(3):244-250.
- [42] 薛小军,李云飞,田煜昆,等.与燃煤电站耦合的压缩空气储能系统性能分析[J].动力工程学报,2022,42(9):835-842,880.
- XUE Xiaojun,LI Yunfei,TIAN Yukun,et al. Performance analysis of compressed air energy storage system coupled with coal-fired power plant [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2022,42(9):835-842,880.
- [43] ZHANG L,CUI J,ZHANG Y,et al. Performance analysis of a compressed air energy storage system integrated into a coal-fired power plant [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225:113446.
- [44] 王妍,吕凯,马汀山,等.与煤电机组耦合的压缩空气储能系统分析[J].热力发电,2021,50(8):54-63.
- WANG Yan,LYU Kai,MA Tingshan,et al. Analysis of compressed air energy storage system coupled with coal-fired power unit [J]. Thermal Power Generation,2021,50(8):54-63.
- [45] 赫广迅,余海鹏,孙嘉.燃煤发电机组与压缩空气储能耦合热力系统分析及调峰特性研究[J].电站系统工程,2023,39(2):53-54.
- HE Guangxun,YU Haipeng,SUN Jia. Analysis of coupling thermal system and study of peak shaving characteristics of coal-fired generating units and compressed air energy storage [J]. Power System Engineering,2023,39(2):53-54.
- [46] 韩中合,王珊,胡志强,等. AA-CAES + CSP 系统运行策略研究[J].太阳能学报,2021,42(1):423-430.
- HAN Zhonghe,WANG Shan,HU Zhiqiang,et al. Study on operation strategy of AA-CAES + CSP system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2021,42(1):423-430.
- [47] FU H,HUA Q,SHI J,et al. Photothermal-assisted scheme design and thermodynamic analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. Renewable Energy,2023,215:118927.
- [48] 韩中合,王珊,胡志强,等. AA-CAES + CSP 系统性能及关键参数分析[J].太阳能学报,2021,42(2):322-329.
- HAN Zhonghe,WANG Shan,HU Zhiqiang,et al. Analysis on performance and key parameters of AA-CAES + CSP system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2021,42(2):322-329.
- [49] 李鹏,胡庆亚,韩中合.两种AA-CAES + CSP 系统的热经济性研究[J].太阳能学报,2022,43(11):424-432.
- LI Peng,HU Qingya,HAN Zhonghe. Thermo-economic research on two AA-CAES + CSP systems [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022,43(11):424-432.

(刘颖编辑)