

# 压缩空气储能技术研究进展

傅昊, 张毓颖, 崔岩, 张璐路, 姜彤

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206

**摘要** 压缩空气储能是目前大规模电力储能技术研发的热点,是支撑可再生能源发展的关键技术之一,在新能源并网发电、电网调峰等领域有广泛的应用空间。介绍了空气压缩设备的发展状况,总结了绝热压缩设备效率的不足,分析了螺杆式空压机提升能效的关键因素。比较了压缩空气储能所经历的传统燃气补热压缩、非燃气补热的绝热压缩、等温压缩等阶段不同类型的储能原理和效率,介绍了等温压缩空气储能的实现方法和进展,并结合当前专利情况展望了未来压缩空气储能的技术发展方向。

**关键词** 等温压缩;空气压缩机;压缩空气储能;大规模电力储能

近年来,随着传统化石燃料的过度使用,气候环境日益遭到破坏,如何发展绿色低碳经济成为全球各国所面临的共同难题。在此趋势下,中国进行能源结构调整势在必行,逐渐缩小燃煤电厂所占比重,大幅提升以风、光为主的新能源发电比重,成为未来电力发展的主要方向。由于新能源存在随机性、间歇性、波动性等问题,使得寻求一种可实现低成本调峰和平衡电力负荷的方法成为当前研究热点<sup>[1]</sup>。在此需求下,大规模电力储能技术以其具有分时储/释能的特点受到越来越多关注,它使实时平衡的“刚性”电力系统变得更加“柔性”,提高电网运行的安全性、经济性和灵活性<sup>[2]</sup>。

目前已有的电力储能技术包括以抽水蓄能、压缩空气储能及飞轮储能为代表的物理储能技术,以电池储能为代表的化学储能技术和以超导储能及以超导储能和超级电容为代表的电磁储能技术,但由于技术难度或者成本等原因,现可实现商业化大规模运行的只有抽水蓄能和压缩空气储能技术<sup>[3-4]</sup>。两者相比而言,抽水蓄能电站地理位置受限程度大、建设工期长、工程投资较大<sup>[5]</sup>,而压缩空气储能电站选址较灵活、对地理环境等客观条件要求宽松,因而受到越来越广泛的重视,有可能成为未来大规模储能技术的主要发展方向。

压缩空气储能技术复杂,实现技巧上与抽水蓄能有很大不同。抽水蓄能只是将电能以水的势能形式存储起来,目标固定,原理清楚,设备制造技术和运行技术成熟。而压缩空气储能在运行过程中除了气体势能变化外,还有大量热量交换,可能导致气体温度剧烈波动,又反过来影响到气体压强。一般来讲,等物质的量的气体在同体积下,温度与压强成正比,压缩时一旦温度上升,就要比等温变化消耗更多的

能量,而发电时一旦温度下降,就要比等温过程少发能量。另一方面温差过大导致的热量传递也会造成不可逆的能量损失,从而导致储能效率下降。对于电力储能这样的大型工程来说,储能发电效率的下降就意味着成本的快速增长,因此运行过程中的温度控制策略就显得尤为重要。由此产生了各种温度控制技术,也带来了完全不同的应用效果,使得压缩空气储能的原理和相关设备得到了更多样化的发展。

## 1 压缩空气储能技术关键设备及发展历程

### 1.1 压缩空气储能技术关键设备发展

由于压缩空气在工业生产中应用广泛,因此相关压缩设备和配套技术发展迅速。其中压缩空气储能时用到的空气压缩机种类繁多,商用设备已经可以达到很高的技术指标。发电类商用设备则主要是各种透平类机械,其他技术还在概念机阶段或者实验室研制阶段。

目前常用的空气压缩机主要分为透平式空气压缩机、活塞式空气压缩机及螺杆式空气压缩机。透平式空气压缩机(又称叶片式空气压缩机)可分为离心式、轴流式及其组合式3种,其工作原理是利用叶片和气体的相互作用,提高气体的压力与动能,并利用相继的通流元件使气体减速,将动能转变为压力的提高。透平式设备结构简单,在高压下表现出很高的效率。在现代空压机生产企业中,Atlas Copco公司颇负盛名,其空压机生产技术成熟,全球占有率最高,旗下透平式空压机最大排气压力可达20 MPa<sup>[6]</sup>。

活塞式空气压缩机可分为无油型和油润滑型两种,其工作原理是由电动机直接驱动压缩机,使曲轴产生旋转运动,

收稿日期:2016-08-31;修回日期:2016-10-31

作者简介:傅昊,博士研究生,研究方向为大规模电力储能,电子信箱:835854112@qq.com;姜彤(通信作者),教授,研究方向为大规模电力储能,电子信箱:jiangtong@ncepu.edu.cn

引用格式:傅昊,张毓颖,崔岩,等.压缩空气储能技术研究进展[J].科技导报,2016,34(23):81-87;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.23.008

带动连杆使活塞产生往复运动,引起气缸容积变化<sup>[7]</sup>。活塞式设备通过选择合适的密封方式,可以达到较高的压力,CompAir公司旗下活塞式空压机最大排气压力可达41.4 MPa。

透平式空压机和活塞式空压机本身的机械效率可以达到80%~90%,但当其工作于绝热压缩状态时,由于内部气体温度在短时间内迅速升高,所消耗的能量有很大一部分都以热量的形式被散掉,与等温压缩过程相比,当把气体压缩到相同压强后,由于最终所存储的能量相同,耗能增大,导致了设备的综合效率降低,一般活塞式空压机工作效率只有60%,透平式空压机工作效率更低。

螺杆式空气压缩机是一种工作容积作回转运动的容积式气体压缩机械,可分为单螺杆和双螺杆两种,工作循环可分为进气、压缩和排气3个过程。螺杆式空压机采用高容量压缩组件进行油气混合压缩,油既起到密封作用,又可以通过吸收压缩空气的热量使压缩机工作过程中气体升温减小,降低压缩耗能,显著提高了压缩机的工作效率,故螺杆式压缩机在压缩机领域逐渐占据了主导地位。但由于螺杆式压缩机随着压强不断升高,密封处理愈发困难,目前尚无法实现较高压力等级<sup>[8]</sup>。美国SullAir公司是全球最大的螺杆式空气压缩机制造厂,其旗下螺杆式空压机最大排气压力仅为1.3 MPa<sup>[9]</sup>。

目前压缩空气储能的发电类商用设备主要是燃气轮机,包括重型(发电)燃气轮机、各类动力燃气轮机及各类微型燃气轮机。其中,重型燃气轮机是迄今商用设备中效率最高的热—功转换类发电设备。重型燃气轮机主要燃料为天然气和燃油,同时也在大力开发燃料为富氢燃气乃至纯氢燃气的燃气轮机,以扩大重型燃气轮机燃料的范围。目前最先进重型燃气轮机的单循环和联合循环的燃气发电效率已分别达到40%和60%。重型燃气轮机制造和发电产业在全球发展迅速,目前基于燃气轮机及联合循环电站的发电量约占全球发电总量的22%,且仍在稳步增加<sup>[10-11]</sup>。

## 1.2 压缩空气储能的发展历程

随着压缩空气相关设备和技术的不断换代与发展,压缩空气储能技术也在不断进步与革新,其相关研究已经历了3个阶段。

第1阶段始于20世纪70年代,是以燃气发电为基础展开的。燃气发电是用电驱动空压机产生高温高压气体,再混合天然气燃烧驱动燃气轮机发电,当将压缩过程和发电过程分离,不同时进行,就可以实现压缩空气储能应用。之前已有德国和美国的两个大型电站采用这种方法实现了商业化运行,但储能效率只有50%左右,且由于空气压缩时温度升高,存储时温度下降能量散失,而发电时还需对气体进行补热升温,真实发电效率更低,以致没有得到进一步推广<sup>[12]</sup>。

第2阶段始于20世纪90年代,是以避免无谓热量散失,提高发电效率为基础展开的。新方法摒弃燃气补热方式,利用分级压缩并增加中间热交换介质等手段将压缩过程中产

生的热量储存于介质中,在发电过程中为气体补热升温所用,减少额外热量需求,从而提高整体运行效率<sup>[13]</sup>。但国外试验项目表明该方案的效率通常不足50%。中国在芜湖也建设了一个示范项目,发电效率只有35%~40%。为了提高效率,还需进一步改良空压机和燃气轮机的设计,提高压缩和发电过程中的温度控制能力,而改良技术的大型化设计却遇到困难,成本也大幅度上升,因此这种技术并没有成功的商业化运行示范。

第3阶段始于21世纪,以等温压缩空气储能技术为代表的新一代压缩空气储能技术被提出,通过液体活塞、液压活塞配合液压马达等技术来替代传统的燃气轮机和空压机技术发电,通过液体比热大的特点抑制气体温度变化,理论上可以大幅度提升效率<sup>[14]</sup>。美国的SustainX、General Compression、Lightsail Energy等公司在相关技术领域有很多成果,相继获得了多项美国政府基金和盖茨基金的支持。但由于新技术引入了大范围学科交叉,技术复杂尚未成熟,目前均在建设示范项目过程中,还没有大型化商业成功案例。中国科学家也进行了相关方向的研究,华北电力大学研究团队自主研发的压缩空气储能技术,已获得美国和中国的多项专利授权,该方案融合了抽水蓄能与压缩空气储能二者的优点,通过液体活塞等技术手段,为水轮机提供了稳定水头发电,有效提高了系统的工作效率,为实现大规模储能发电提供了技术支持<sup>[15]</sup>。目前已经通过了原理实验验证,正向工程化目标推进。

## 2 燃气补热的传统压缩空气储能

### 2.1 燃气轮机发电原理

压缩空气储能系统基于燃气发电原理工作,如图1所示为燃气轮机发电系统示意,燃气发电系统由空气压缩机、燃烧室、燃气透平和发电机等组成,系统运行时压缩机连续地从大气中吸入空气并进行压缩,压缩后的高压气体进入燃烧室,与燃料混合燃烧后变为高温高压燃气进入透平机中膨胀做功,将化学能转换为机械能推动透平叶轮旋转并带动发电机发电。但由于透平机输出功率要用来供给压缩机消耗,因此燃气轮机的净输出功率远小于透平机的输出功率<sup>[16]</sup>。

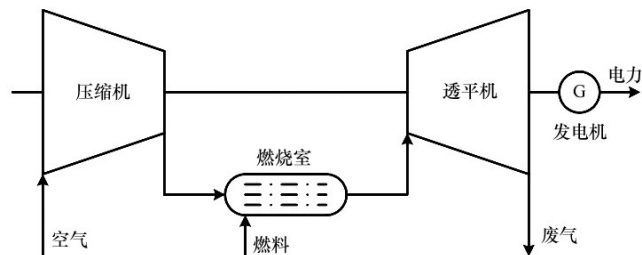


图1 燃气轮机发电系统示意

Fig. 1 Gas turbine power generation system

## 2.2 燃气补热的传统压缩空气储能原理

燃气补热的传统压缩空气储能系统是基于燃气轮机发电系统改造而成的,在其基础之上将压缩与膨胀过程拆开,可分时完成,压缩后产生的高压气体可存储于储气室中,如图2所示。储能时空气通过压缩机被压缩为高压气体存储于储气室中。发电时储气室中的高压气体进入燃烧室与燃料混合燃烧,形成高温高压燃气,在透平机中推动涡轮转动,从而带动发电机发出电能。

由于燃气补热的传统压缩空气储能系统储能发电两个过程可分时完成,所以可将具有此特征的储能系统用作调峰工具。当用电低谷时,可利用多余的电能(来自于热电厂、核电厂或者可再生能源电站)驱动压缩机,产生高压气体并存储在储气装置中;当用电高峰时,压缩空气通过燃烧室获得热能,然后进入透平膨胀做功,产生电力<sup>[17]</sup>,由于空气压缩过程已经在之前完成,系统输出到电网的功率要大于简单燃气发电的功率,进一步增强了调峰效果。

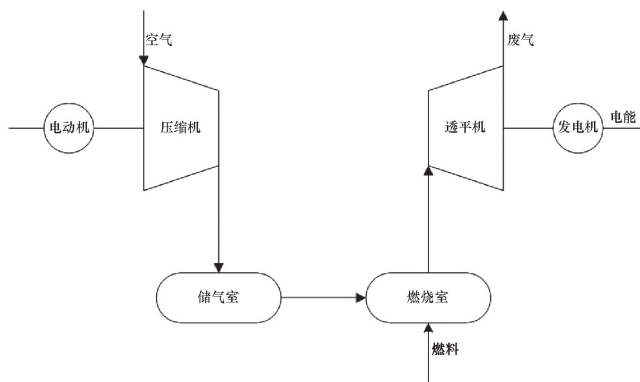


图2 燃气补热的传统压缩空气储能系统原理示意

Fig. 2 Illustration of supplementary fired CAES system

## 2.3 商用及其他情况

自1949年压缩空气储能技术被Stal Laval提出至今,世界上已有2个实现商业化运行的压缩空气储能电站,第1座是位于德国洪托夫的Huntorf电站,第2座是位于美国奥拉巴马州的McIntosh电站。日本也在北海道空知郡建成一座压缩空气储能试验电站。目前国外建成的压缩空气储能电站基本上属于此种类型,在发电环节采用燃气补热的方式提高发电效率,而储气室多利用可溶性盐层形成的地下洞穴。

## 2.4 燃气补热的缺陷及问题

传统压缩空气储能系统大规模应用主要存在3方面障碍:一是需要大型储气装置,如果以洞穴作为储气容器,对地质结构要求高,不同时段气体压强和温度的剧烈变化很容易引起洞穴不稳定甚至塌陷;二是采用大型透平机械的空压机和燃气轮机运行效率不高;三是存储在储气装置中的高压气体因温度降低而损失能量。当进入发电过程时,需燃烧化石燃料对其进行补热,浪费能源的同时还会增加碳排放<sup>[18]</sup>。

## 3 非燃气补热的先进绝热压缩空气储能系统

### 3.1 非燃气补热的基本原理

非燃气补热系统与燃气补热的传统压缩空气储能系统相比,原理上的主要区别在于,通过增加回热利用环节实现对压缩热的回收利用,摒弃了燃气补热环节,使得系统运行过程中无燃烧、零碳排。其工作原理为:用电低谷时,多余电力驱动压缩机连续地从大气中吸入空气并将其压缩,压缩后的高压气体通过换热器冷却,降温后的高压气体进入储气装置中,压缩产生的热量在回热利用环节被储存;用电高峰时,压缩气体在膨胀机中做功发电,并通过换热器吸收在回热利用环节储存的热量对气体进行补热<sup>[19]</sup>。

### 3.2 先进绝热压缩空气储能系统

近年来在国内备受关注的先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)是非燃气补热压缩空气储能系统的典型代表。与一般非燃气补热的压缩空气储能系统相比,AA-CAES系统设计为多级压缩/膨胀运行方式,并在各级之间加装级间换热装置,通过在各级压缩/膨胀机以及级间换热装置中进行快速热交换,控制气体温度变化范围,从而提高系统整体运行效率。

AA-CAES工作原理如图3所示,储能过程中,电动机驱动多级压缩机将空气压缩,在每一级压缩后都通过换热器对压缩气体进行冷却,散热后的高压气体被存储于储气室中,同时交换的热量被存储到蓄热器中;在发电过程中,储气室中的高压气体在每一级次膨胀前先通过换热器,吸收蓄热器中的热量后变为高温高压气体,然后膨胀并驱动透平机做功,从而带动发电机发电<sup>[20]</sup>。

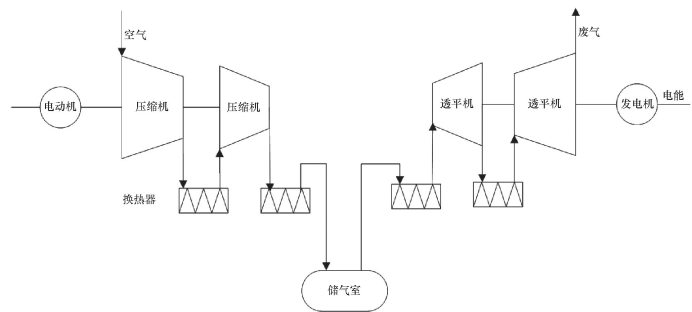


图3 AACAES原理示意

Fig. 3 Illustration of AACAES

AA-CAES系统采用多种导热技术,在一定程度上限制了气体温度波动范围,提高了效率,但由于原理及设备限制,发展遇到瓶颈,存在以下不足之处:1) 压缩气体需要在各级压缩/膨胀机中进行快速热传导,可以控制气体温度不至于过高,但当单级压缩/膨胀机功率较大时,需传导的热量较多,很难实现高效的温度控制;2) 复杂的传导设计使设备成本相应提高,且由于设备级联过多也会降低效率,压缩/膨胀机正常工作级数不可能无限制增多,通常只有3~5级,温度抑制能力不强,最终造成整体效率的降低,故AA-CAES系统现阶段更

适合向小型化储能系统发展;3) 建设初期一次投入的成本较高,为适应绝热过程中剧烈的压强变化,避免采用地下洞穴作为储气室面临的塌陷危险,通常采用建设大容量金属压力容器来储存高压气体,增大了投资成本。

### 3.3 先进绝热压缩空气储能系统的研究现状

21 世纪初期,随着热存储技术的广泛应用,ACAES 系统再次受到欧洲科学界的关注。2003 年,欧洲 Alstom 公司联合其他 18 所高校与科研机构,启动了“ACAES 系统示范工程”项目,旨在研发一种循环效率为 70% 的先进绝热压缩空气储能系统。该工程提出了功率等级为 30、140 和 300 MW 的 ACAES 系统概念,对 ACAES 系统的部件特性、应用领域进行了分析。2004 年,Bullough 等对工程工作进行了中期总结,介绍了不同规模 ACAES 系统的可能性应用领域,并对 ACAES 系统在欧洲地区的利用潜力进行了评价。德国最大的电力公司 RWE Power 于 2010 年启动了一项名为 ADELE 的项目,采用绝热压缩技术,以期将系统效率提高至 70%<sup>[21]</sup>。

近年来,中国也开始关注压缩空气储能技术。2009 年,中国科学院工程热物理研究所开始研究超临界压缩空气储能技术,综合了常规压缩空气储能和液化空气储能技术。目前,该研究所已基本建成 1.5 kW 的储能实验系统,正在建设 1.5 MW 的示范系统。2012 年 7 月,国家电网公司设立重大科技专项,由清华大学牵头,联合中国电力科学研究院、中国科学院理化技术研究所开展大规模压缩空气储能发电系统关键技术研究,建设了 500 kW 非补燃式压缩空气储能示范系统<sup>[22]</sup>。

## 4 等温压缩空气储能技术

针对绝热类压缩空气储能技术由于温度波动导致效率下降的问题,以气水高速热交换为手段的等温压缩空气储能技术开始出现,极大提升了系统整体的发电效率。

### 4.1 等温压缩空气储能原理

等温压缩空气储能系统在压缩空气环节中增加控温环节,并以水作为介质进行势能传递,通过水封作用减少了损耗。同时利用水比热容大的特点为系统运行提供近似恒定的温度环境,使得压缩空气储能系统可以近似工作在等温状态下<sup>[23]</sup>。

等温压缩空气储能系统在理论上比其他绝热储能技术无法比拟的优势,国外现有的等温压缩空气储能技术已有多种可行方案,利用活塞、喷淋、底部注气等方式增大气液接触面积与接触时间,从而实现快速热交换达到气体缩放时等温的目的,将热损失降到最低,理论上不会造成额外损耗。现阶段等温压缩空气储能的实验室运行效率已经可以达到 70% 以上。

### 4.2 SustainX 公司的主要技术

美国的 SustainX 公司是著名的以压缩空气储能技术为特色的公司<sup>[24]</sup>,提出了多种压缩空气储能方向的核心技术,已获

得多项美国专利,涵盖范围广,涉及恒温压缩空气储能技术(ICAES)相关的关键领域,在等温压缩空气储能领域处于领先地位<sup>[24]</sup>,甚至将 ICAES 注册成了该公司商标。SustainX 通过活塞式结构进行压缩,压缩空气可以在压缩过程中持续进行热交换,并增加了喷淋水等环节来进一步控制气体温度。该公司还摒弃了传统的地下盐洞储气的做法,采用标准钢罐储存压缩空气。

近年来,SustainX 公司进一步发展了等温压缩空气储能的概念,通过向气体容腔中喷射液滴来起到等温压缩膨胀的效果,该系统可以通过两级压缩膨胀实现高达 200 的压缩膨胀比,整个过程中气体温度变化小于 50℃,等温效率高达 95%。2013 年,SustainX 已建成世界首台兆瓦级等温压缩空气储能电站,并开始并网发电。SustainX 还率先提出用泡沫替代雾状液滴控制气体温度以进一步提高等温压缩膨胀的效果,为等温压缩空气储能系统提供了新的研究发展方向<sup>[25]</sup>。

SustainX 公司提出了等温压缩空气储能技术的多种实施方案,提出一种实现压缩空气储能系统中气体快速等温缩放的方法和装置(图 4)。压缩缸由气体缸和液体缸组成,二者通过活塞隔开,内部的气体和液体可通过活塞来相互传递能量和动力。其中液体缸连接到外部的以液体为动力的驱动设备,以液体为介质利用活塞进行空气压缩。气体缸与气体补热环节相连。补热环节中有热水通路,热水通路中的热量可以传递给气体,从而对气体缸中的气体进行补热处理,使其近似处于等温状态<sup>[26]</sup>。该方案的局限在于采用外部热源及设备进行温控,活塞内气体温度快速变化时不能得到实时控制,会影响整体效率。

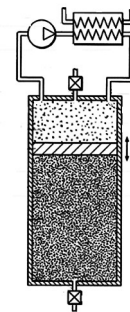


图 4 液体驱动装置示意

Fig. 4 Illustration of liquid-driven device

SustainX 公司还提出了另一种实现压缩空气等温缩放的方法和装置(图 5)。活塞缸被活塞分隔成底部液体缸和上部气体缸,在气体缸部分中,顶部设有喷淋单元,在气体压缩和膨胀过程中不断向气体喷淋液体,通过液体对缸中的气体实现补热处理,使其近似处于等温状态。流下的液体可以通过活塞杆内部的液体通道流出,循环使用<sup>[27]</sup>。SustainX 公司还提出可以通过在压缩缸内填充金属材料的方式,进一步抑制了运行过程中气体温度的波动。该方案有效地提升了控温效果,但在活塞设计上和运行控制上都增加了难度。

SustainX 公司技术的主要问题在于,地面金属容器造价

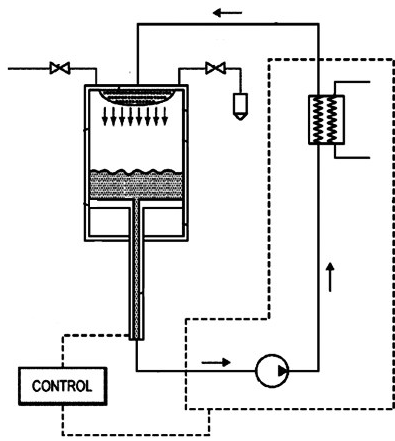


图5 喷淋控温装置示意

Fig. 5 Illustration of temperature controlled spray device

远远超过地下岩洞成本,虽然利用液体控制气体缩放过程可以很好地控制气体温度的波动,但液体压强随气体压缩膨胀过程剧烈使得很难采用大型水轮机进行发电,而采用的液压马达也很难实现大型化,成本和技术问题制约了项目的推广。

#### 4.3 General Compression 公司的主要技术

通用压缩(General Compression, GC)公司主要尝试开发一种可以实现液体压强稳定控制的压缩空气储能技术。其方案通过一系列的活塞装置,减小了发电时面临的液体水头的巨大波动,为实现压缩空气储能的大规模应用做出了努力<sup>[28]</sup>。

与其他设计方案相比,GC公司采用的活塞方案主要不同点在于,装置设计有多组不同面积的活塞缸,利用不同面积的活塞组合,在储能时可以根据气体压强的变化进行切换,持续对气体进行压缩,而在发电时可以形成相对压强差范围比较固定的液体压强,用来推动液压马达发电,如图6<sup>[29]</sup>所示。该技术缺点在于气体压强会在储能容器中大幅度变

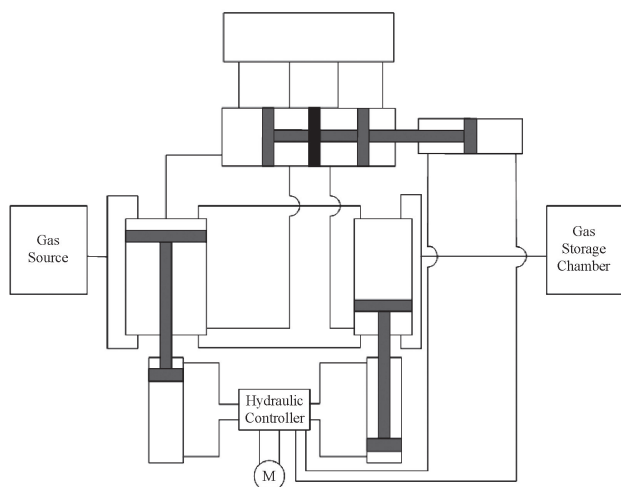


图6 多级活塞压缩装置示意

Fig. 6 Multistage piston compressor

化,对容器承受变压能力有较高的要求,另外虽然针对发电水头波动的问题做了一些努力,但并没有彻底实现发电水头的稳定控制。

该公司于2011年完成“可再生能源无燃料地质压缩空气储能技术”项目,该项目在德克萨斯州西部的天然地质盐丘一带建立了第二代商业化先进通用压缩空气储能系统。先进通用压缩空气储能(general compression advanced energy storage, GCAES)系统是一系列2 MW可快速跟踪可再生能源输出功率的等温压缩/膨胀机,系统效率可达75%<sup>[30]</sup>。此外,GC公司计划建立并整合3 MW或等容量的风电机组与GCAES系统的压缩/膨胀机技术,向外界证明GC公司有能力利用风能调度电力(包括基荷、腰荷和峰荷),并为德克萨斯州辅助供电<sup>[31-33]</sup>。

#### 4.4 LightSail Energy 公司的主要技术

LightSail Energy公司同样是一家致力于能源储存技术的公司,该公司努力尝试通过不同的方法实现更好的控温效果,设计方案如图7所示,由压缩缸、压力室及气罐组成,一方面,气体在压缩缸内压缩和膨胀时通过管道及喷嘴将压力室内的水以水雾形式喷射到压缩缸内,以增加压缩膨胀过程中气液之间的热交换;另一方面,在压缩过程时,压缩缸内气体达到压力室压强后,压缩气体通过喷嘴,以小气泡的形式从压力室下方进入,增加气液接触时间与面积,从而达到控制气体温度变化的目的。压力室设有换热装置,可以保证罐内液体温度基本维持恒定,为整个压缩膨胀过程提供一个恒温环境。通过上述手段,可以使气体在整个运行过程中近似保持等温状态<sup>[34]</sup>。但该方案管道设计较为复杂,导致设备成本较高,在大型化设计方面也有很多困难需要克服。

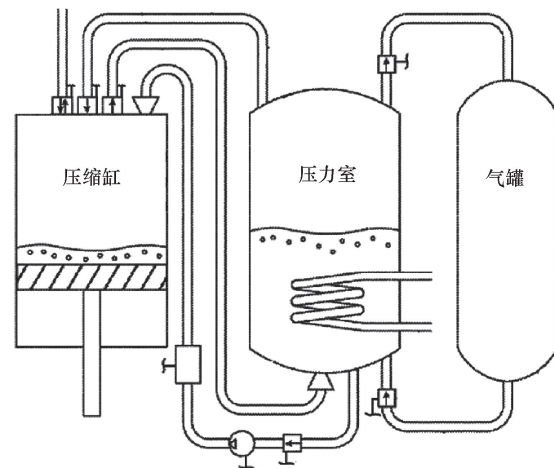


图7 LightSail Energy 公司技术方案设计

Fig. 7 Technical design of LightSail Energy Company

#### 4.5 存在的不足和发展的方向

SustainX、General Compression、LightSail Energy 等公司提出的几种控温方案,由于技术以及设备原因,并非实现了绝对意义上的等温过程,但相比于绝热压缩空气储能效率要

高。并且 SustainX、LightSail Energy 公司现阶段主要研究的等温压缩空气储能系统将气体势能转成液体势能运行,设计偏向于小型化,不适应大规模电力储能的发展方向,General Compression 公司现阶段主要研究大型等温压缩空气储能系统,但其水头不稳定问题仍未得到解决,需要变速水泵和变速水轮机配合,发电效率受到影响。可以预测,未来压缩空气储能的发展在现有各种压缩空气储能技术以及其附属技术基础上,朝着效率更高、稳定性更高、成本更低的等温压缩空气储能方向继续发展,不断实现技术革新,将压缩空气储能技术推向新纪元。

## 5 其他类型的压缩空气储能

### 5.1 液化压缩空气储能

液化压缩空气储能技术,是将电能转化为液态空气的内能以实现能量存储的技术。储能时,利用富余电能驱动电动机将空气压缩、冷却、液化后注入低温储槽储存,液化过程中消耗的大部分电能被转化成低温冷能存储起来;发电时,液态空气从储槽中引出,加压后送入热交换器气化并加热到一定温度,最后高压气体进入膨胀机做功,带动发电机发电<sup>[35]</sup>。

液化压缩空气储能技术最早出现在 20 世纪 70 年代欧美国家利用液态空气进行能量储存的专利,日本近年也积极开展液化空气储能技术的研究,如三菱公司和日立公司等,但传统液化压缩空气储能效率太低,并没有太大的实用价值<sup>[36]</sup>。近年来英国提出了新型液化空气储能系统,通过充分利用工质状态变化过程中能量形式的转化以及冷量回收,大幅改善了储能效率,现已达到 40%~50%。液化存储的储能密度高,综合成本有下降的空间。但由于液化压缩空气储能在空气压缩/膨胀过程的基础上增加液化冷却和气化加热过程,相比较等温压缩空气储能的等温压缩/膨胀过程,增加了额外损耗。因此与相似压缩空气储能技术相比,液化压缩空气储能效率较低,并没有明显优势。

### 5.2 外源补热型压缩空气储能

采用外部热源加热压缩空气以实现更高能量输出,是一种行之有效的办法。太阳能补热型压缩空气储能系统是一种将太阳能与压缩空气储能系统结合,利用太阳聚光形成高热替代燃料燃烧对压缩气体进行补热,从而提高运行效率的储能系统。在该系统中,利用多余电能将空气压缩至高压,并储存在储气罐中,当需要时,将高压气体通过太阳能补热升温然后在透平中膨胀做功。该系统由压缩机、膨胀机、太阳能集热/蓄热装置、储气装置组成<sup>[37]</sup>。

太阳能集热/蓄热装置由太阳能集热器、太阳能吸收与输送热量装置、蓄热/换热器等组成。太阳能集热器将太阳能聚集成高能流密度的中高温热能,加热来自蓄热/换热器的蓄热介质,高温蓄热介质将热量提供给透平进口的高压空气,以增加动力输出。水、油或者熔融盐通常会作为高温蓄热介质使用,三者的沸点依次升高,更高的补热温度可以为压缩空气带来更高的压强,产生更好的发电效率,故熔融盐被广泛

应用于太阳能热发电领域<sup>[38]</sup>。与燃气补热相比,太阳能补热型压缩空气储能大幅度减少了储能发电系统的碳排放,但仍然属于外源补热型储能系统,就发电效率而言与燃气补热型压缩空气储能系统没有本质区别。

## 6 结论

随着可再生能源发电份额的不断增加,大规模电力储能需求会越来越迫切。在现有的储能技术中,压缩空气储能以其储能密度大、存储周期长、投资成本较少等优势受到人们的青睐。自 20 世纪 40 年代以来,在其相关设备不断发展更新的基础上,压缩空气储能技术在不断发展中形成了基于燃气补热的压缩空气储能技术、非燃气补热的先进绝热压缩空气储能技术及等温压缩空气储能技术。传统压缩空气储能技术在压缩空气膨胀做功时需要燃气补热,能耗大且效率低,地下洞穴方案不稳定,造成寿命下降;先进绝热压缩空气储能技术通过换热器对压缩热的回收利用实现了无燃烧、零碳排放,但采用了地上金属容器存储,有储气装置投资大而发电效率较低等不足。等温压缩空气储能技术借助液体比热容大的特点使气体和液体接触进行充分的热质交换,将气体在压缩或者膨胀时温度的变化控制在一个较小的范围内,大幅度减少了额外能量损失,使高发电效率成为可能,但配套的液体控制和低成本储气系统仍有待改进。随着国内外学者在压缩空气领域的不断创新,相信未来大规模储能一定可以伴随着可再生能源发电的发展迎来更辉煌的明天。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈海生. 压缩空气储能技术的特点与发展趋势[J]. 高科技与产业化, 2011(6): 55-56.
- [2] 荆平, 徐桂芝, 赵波, 等. 面向全球能源互联网的大容量储能技术[J]. 智能电网, 2015, 3(6): 486-492.
- [3] Chen H S, Cong T N, Yang W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review[J]. Progress in Nature Science, 2009, 19(3): 291-321.
- [4] 程时杰, 李刚, 孙海顺, 等. 储能技术在电气工程领域中的应用与展望[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 1-8.
- [5] 骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 71-79.
- [6] GT 系列: 适用于气体和空气应用的整体齿轮离心式压缩机, 排气压力最大为 200 巴, 驱动功率最大为 40 千瓦[EB/OL]. [2016-08-31]. <http://www.atlascopco.com/cnzh/products/空气和气体压缩机/1401256/1521439/>.
- [7] 韩杰, 谢元华, 李拜依, 等. 活塞式压缩机的研究进展[J]. 节能, 2014 (12): 17-23.
- [8] 徐军. 15T2 半无油活塞式空气压缩机设计和开发[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [9] 寿力双端变容螺杆式空气压缩机 100-600HP[EB/OL]. [2016-08-31]. <http://www.sullair.com/asia/sites/sullair.com.asia/files/TS.pdf>
- [10] 蒋洪德, 任静, 李雪英, 等. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5096-5102.
- [11] 刘大易, 张宏鹏. 燃气轮机的发展前景及其发电技术[J]. 应用能源技术, 2008(1): 5-8.

- [12] 糜洪元. 国内外燃气轮机发电技术的发展现况与展望[J]. 电力设备, 2013, 7(10): 8-10.
- [13] 张远, 杨科, 李雪梅, 等. 基于先进绝热压缩空气储能的冷热电联产系统[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 1991-1996.
- [14] 高朋艳. 风力发电厂压缩空气蓄能的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [15] 姜彤. 基于压缩空气储能的虚拟抽水蓄能电站及储能发电方法: CN103114564A[P]. 2013-05-22.
- [16] 陈海生, 刘金超, 郭欢, 等. 压缩空气储能技术原理[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(2): 146-151.
- [17] 张新敬. 压缩空气储能系统若干问题的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [18] 张磊. 压缩空气储能系统效率分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [19] 薛小代, 梅生伟, 林其友, 等. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 164-171.
- [20] 刘畅, 徐玉杰, 胡珊, 等. 压缩空气储能电站技术经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 158-168.
- [21] Ekman C K, Jensen S H. Prospects for large scale electricity storage in Denmark[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(6): 1140-1147.
- [22] Bi J, Jiang T, Chen W, et al. Research on storage capacity of compressed air pumped hydro energy storage equipment[J]. Energy & Power Engineering, 2013, 5(4): 26-30.
- [23] 王海霞. 大规模储能技术新突破[N]. 中国能源报, 2012-3-26.
- [24] 薛皓白. 多级单阀膨胀机的理论与实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2014.
- [25] SustainX begins startup of world's first grid-scale isothermal compressed air energy storage system [EB/OL]. [2016-08-31]. <http://www.sustainx.com/e9c13ca1-134c-49e9-9031-036592clb37a/about-us-news-events-detail.htm>
- [26] Bollinger B R. System and method for rapid isothermal gas expansion and compression for energy storage: US 7802426[P]. 2010-09-28.
- [27] McBride T O, Bollinger B R. Increased power in compressed-gas energy storage and recovery: US8104274[P]. 2012-01-31
- [28] General compression[EB/OL]. [2016-08-31]. <http://www.gclimited.co.nz/>.
- [29] Matthew Blieske. Systems and methods for optimizing thermal efficiency of a compressed air energy storage system: US,2013/8387375 B2[P]. 2013-03-5.
- [30] Steve Muller. General compression moves ahead with unique energy storage technology[J]. Power Daily, 2010, 8(71): 1.
- [31] Marcus D. Fuel-free geologic compressed air energy storage from renewable power (Task #1) [R]/New Technology Implementation Grant Program. State of Texas, 2011-10-24 .
- [32] Marcus D. Fuel-free geologic compressed air energy storage from renewable power (Task #2-3) [R]/New Technology Implementation Grant Program. State of Texas, 2011-11-25 .
- [33] Lyman R J. Fuel-free geologic compressed air energy storage from renewable power (Task #4) [R]/New Technology Implementation Grant Program. State of Texas, 2013-11-18.
- [34] Stahlkopf K E, Crane S E, Berlin Jr E P, et al. Compressed air energy storage system utilizing two-phase flow to facilitate heat exchange: US, 2011/0115223 A1[P]. 2011-05-19.
- [35] 曹广亮, 陈曦. 液化空气储能技术的优势分析及发展现状[J]. 真空与低温, 2016, 22(1): 11-15.
- [36] 刘佳, 夏红德. 新型液化空气储能技术及其在风电领域的应用[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(12): 1993-1996.
- [37] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳, 等. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 88-95.
- [38] 薛小代, 陈晓波, 梅生伟, 等. 采用熔融盐蓄热的非补热压缩空气储能发电系统性能[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 11-20.

## Research progress of compressed air energy storage systems

FU Hao, ZHANG Yuying, CUI Yan, ZHANG Lulu, JIANG Tong

School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

**Abstract** Currently, compressed air energy storage (CAES) is a topic of general interest in the field of large-scale power storage technology research and development, because it has a broad application prospect in both grid-connection of new energy power generation and peak-load regulation of power grid. The research and development of air compressor is reviewed in this paper. Due to the fact that it is difficult for adiabatic process based equipment to improve working efficiency, screw air compressor has been proposed to reduce gas temperature by compression of mixed oil and gas, further lowering down the energy consumption. For the different evolution periods of CAES, including traditional gas-heating compression, non-gas-heating adiabatic compression and isothermal compression, different principles and variable efficiency are analyzed and compared. Realization methods and the latest development of isothermal CAES are introduced in detail. Finally, combined with the current situation, the future development direction of CAES technology is prospected.

**Keywords** isothermal compression; air compressor; compressed air energy storage; large-scale power energy storage

(责任编辑 刘志远)