

地球科学与测绘



移动扫码阅读

赵同彬, 刘淑敏, 马洪岭, 等. 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 163-176.

ZHAO Tongbin, LIU Shumin, MA Hongling, *et al.* Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 163-176.

## 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势

赵同彬<sup>1</sup>, 刘淑敏<sup>1</sup>, 马洪岭<sup>2,3</sup>, 梅东升<sup>4</sup>, 魏振鑫<sup>1</sup>, 梅城玮<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 北京京能能源技术研究有限责任公司, 北京 100022)

**摘要:** 压缩空气储能具有建设成本低、设备占地面积小、储能周期长以及环保等优点, 探索地下空间压缩空气储能技术发展是实现我国“双碳”目标的创新途径之一, 地下空间储能库可分为盐穴、含水层、枯竭油气田、废弃煤矿及岩洞储能库。随着国内废弃煤矿数量逐年增多, 直接将资源枯竭的煤矿关闭不仅造成巨大的地下空间资源浪费, 还极有可能诱发一系列的安全、环境等问题, 利用废弃煤矿地下空间作为压缩空气储能电站储能库具有很好的应用前景。基于此, 系统梳理了我国废弃煤矿地下空间资源利用情况, 阐述了废弃煤矿地下储能库建设、地下储能库密封性和稳定性的研究现状, 着重介绍了废弃煤矿地下空间压缩空气储能的研究进展与存在问题。分析表明: ①废弃煤矿有大量可利用空间, 总结了废弃煤矿地下空间的 8 种再利用模式: 农林用地、建设用地、场地绿化、水域利用、水热联用、湿地公园、矿山公园、空间再利用; ②我国废弃煤矿压缩空气储能的研究起步晚, 基础理论研究薄弱, 关键技术不成熟, 且煤矿地质条件复杂, 相关应用基础研究不足, 尚未实现商业化、规模化推广应用; ③总结提出了应对废弃煤矿压缩空气储能的三项关键技术, 即废弃煤矿储能库建设选址评估方法、废弃煤矿储能库密封性关键技术、废弃煤矿储能库稳定性与安全评价; 建立了废弃煤矿压缩空气储能库建设选址流程图。

**关键词:** 压缩空气储能; 废弃煤矿; 地下储能库; 密封性; 稳定性

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)10-0163-14

### Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines

ZHAO Tongbin<sup>1</sup>, LIU Shumin<sup>1</sup>, MA Hongling<sup>2,3</sup>, MEI Dongsheng<sup>4</sup>, WEI Zhenxin<sup>1</sup>, MEI Chengwei<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geomechanical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Beijing Jingneng Energy Technology Research Co., Ltd., Chaoyang District, Beijing 100022, China)

**Abstract:** Compressed air energy storage (CAES) has the advantages of low construction cost, small equipment footprint, long storage cycle and environmental protection. Exploring the development of CAES technology in underground space is one of the innovative approaches to achieve China's "dual-carbon" goal. Underground energy storage reservoirs can be classified into salt caverns, aquifers, depleted oil and gas fields, abandoned coal mines, and caverns. With the increasing number of abandoned coal mines in China, the direct closure of resource-depleted coal mines not only cause a significant waste of underground space resources, but also induce a series of safety, environmental and other issues. Therefore, utilizing the underground space of abandoned coal mines as CAES reservoirs holds great application prospects. The analysis shows that, ① There is a large amount of usable space in abandoned coal mines, and eight reuse modes of underground space in abandoned coal mines have been summarized: agricultural and forestry land, construction land, site greening, wa-

收稿日期: 2023-02-09

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2023-0131

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204226); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QE243); 泰山学者工程专项资助项目(tstp20221126)

作者简介: 赵同彬(1975—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授。E-mail: ztbwh2001@163.com

通讯作者: 刘淑敏(1991—), 女, 河南开封人, 讲师。E-mail: sminliu@126.com

tershed utilization, water-heat combination, wetland park, mine park, and space reuse. ② The research on CAES in abandoned coal mines in China started late, the basic theoretical research is weak, the key technologies is immature, and geological conditions in coal mines are complex, the relevant applications of basic research is insufficient, and the commercialization, large-scale promotion and application have not yet been achieved. ③ Three key technologies are summarized and proposed to cope with the CAES in abandoned coal mines, i.e., the evaluation method of site selection for the construction of abandoned coal mine energy storage reservoirs, the key technology for the sealing of abandoned coal mine energy storage reservoirs, and the stability and safety evaluation of abandoned coal mine energy storage reservoirs. A flowchart for siting the construction of CAES reservoirs in abandoned coal mines has been established.

**Key words:** compressed air energy storage (CAES); abandoned coal mine; underground gas storage; tightness; stability

## 0 引言

我国煤炭资源开采历史悠久,受煤层自然赋存条件特征影响,井工开采是煤矿的主要开采方式。对于煤矿而言,随着煤炭资源的不断开采,达到生产服务年限后必将面临矿井关闭退出的局面,我国在20世纪70年代前后集中开发建设的一批煤矿,目前已经陆续进入关闭阶段,在未来5~10a我国东部矿区将出现更多的煤矿关井闭坑。

如今,国内外针对关闭煤矿进行转型利用的类型主要是将矿区地面建设成矿山公园,利用沉陷区修建人工湖或将土地修复治理再利用,并未实现关闭煤矿的最大化利用,造成地下空间资源的极大浪费<sup>[1-2]</sup>。因此,废弃煤矿再利用刻不容缓,怎样把废弃煤矿地下空间更好地开发与进一步利用是社会持续关注和研究的关键问题<sup>[3]</sup>。近年来,利用废弃矿井进行压缩空气储能受到广泛关注<sup>[4-7]</sup>,其不仅可以有效利用资源,还可以为电网的稳定健康发展提供关键支撑<sup>[8]</sup>。国内外已存在将废弃矿井地下空间作为储能库进行压缩空气储能的实例,如德国于1978年利用盐穴构建了额定功率为290 MW,发电能力为4 h的Huntorf压缩空气储能电站,美国于1991年利用地下盐穴建成McIntosh商运电站<sup>[9]</sup>。我国卢强院士团队将研发的零排放压缩空气储能技术应用于大同云冈矿,搭建了全球首个煤矿巷道压缩空气储能电站<sup>[10-11]</sup>。针对利用层状盐岩地层大规模储能存在的关键理论和技术难题,杨春和院士领导的研究团队经过多年的持续攻关,在实验装置研发、层状盐岩力学特性研究、储能库建造技术、注气排卤关键技术和运行压力优化方法等方面取得了突破,并在国内多座已建和在建的盐穴储能库中得到推广与应用<sup>[12-14]</sup>。夏才初等<sup>[5,15]</sup>通过数值模拟对压缩储能洞室的空气泄漏量、围岩应力以及变形等进行了系统研究,为后续研究提供了指导。王建国等<sup>[6,16]</sup>针对废弃煤矿地下洞室压缩空气储能中的多物理场耦合问题,详细研究了空气泄漏、地下洞室温度和压力变化的热力

学规律。目前比较成功的是利用废弃盐矿井建设地下储气库,如对金坛、云应、淮安、平顶山等地的盐矿及含山石膏矿空区进行改造构建储气库<sup>[17-18]</sup>。

然而,由于地质赋存、采掘条件的复杂性,废弃煤矿压缩空气储能技术整体处于初级阶段,关键技术与工程示范方面均需进一步研究。基于此,本文对压缩空气地质储能分类、废弃煤矿储能及地下空间利用现状、地下空间容量估算方面进行了综述,系统梳理了压缩空气储能在废弃煤矿中应用的主要研究方向及现状,分析总结了现有研究存在的不足,针对性的提出了废弃煤矿压缩空气储能关键技术以及拟解决的科学问题,为压缩空气储能技术在废弃煤矿中应用提供借鉴。

## 1 压缩空气储能技术及废弃煤矿储能空间

### 1.1 压缩空气地质储能概念及储能库分类

电力储能技术主要包括机械储能技术、电气储能技术、电化学储能技术等<sup>[19-20]</sup>,2021年我国各储能技术装机规模占比如图1所示,其中以机械储能和电化学储能应用较广,这两类储能技术特点见表1。综合图1与表1可知,由于受能量密度、充放电效率、储能周期与容量、运行费用与寿命等问题所限,虽然目前抽水储能是最常用的物理储能方式,但相比之下,CAES具有建设成本低、设备占地面积小、储能周期长以及环保等优点,被认为是最具发展前景的大规模储能技术之一<sup>[21-22]</sup>。CAES在装机容量上可达几百兆瓦,规模与抽水蓄能相当,便于大规模商业化的应用和推广,并且CAES的能源转化效率高,理论最高可达70%左右<sup>[21]</sup>。

压缩空气地质储能是采用电网负荷低谷时的剩余电力或可再生能源的电力对空气进行压缩,将高压压缩空气注入并储存到地质储能库(如地下岩石洞室、盐穴、含水层等)中;当用电高峰时将高压压缩空气释放出来,推动汽轮机膨胀做功发电<sup>[23-28]</sup>,其工作原理如图2所示。

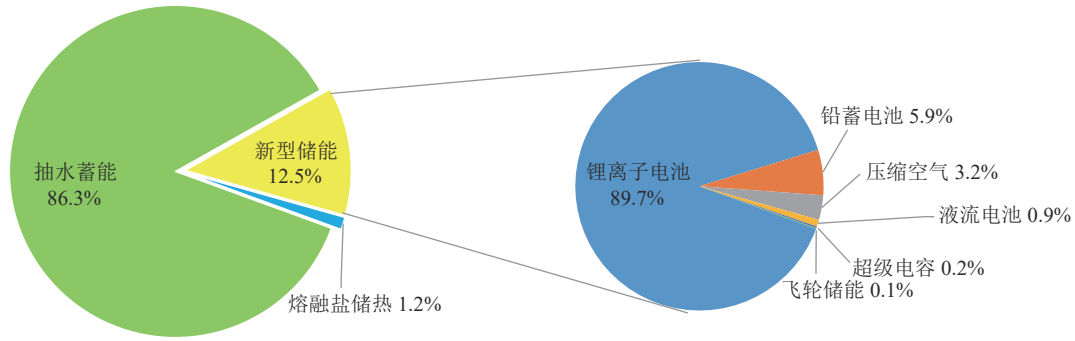


图 1 2021 年中国各储能技术装机规模占比

Fig.1 Proportion of installed capacity of each energy storage technology in China in 2021

表 1 各类储能技术特点

Table 1 Characteristics of various energy storage technologies

储能技术类型	效率/%	寿命/a	容量等级	优点	缺点	
抽水蓄能	70 ~ 75	40 ~ 60	数百兆瓦时	寿命长, 高效率, 低成本	建设时间长, 难选址, 启动慢	
机械储能	压缩空气储能	50 ~ 70	30 ~ 40	数百兆瓦时	环保, 低成本, 大容量, 用地少	大型储能库选址困难
锂离子电池	85 ~ 98	5 ~ 10	数十兆瓦时	能量密度大, 自放电小	高成本、有风险	
全钒液流电池	75 ~ 85	5 ~ 15	数十兆瓦时	安全性好	能量密度小	
电化学储能	钠硫电池	75 ~ 90	10 ~ 15	数十兆瓦时	响应快	运行温度高, 有风险
铅碳电池	70 ~ 90	3 ~ 8	百兆瓦时	高性价比、技术成熟	寿命短、存在污染	

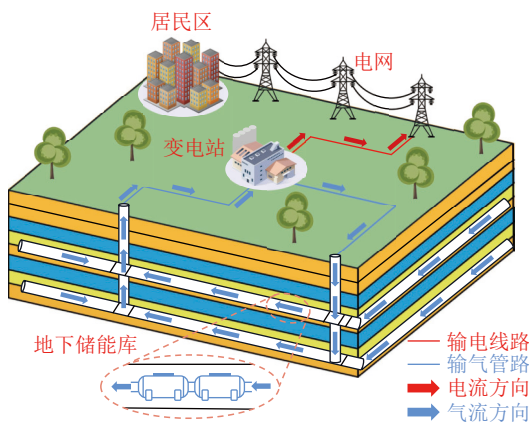


图 2 压缩空气地质储能技术原理

Fig.2 Principle of compressed air geological energy storage technology

储能库是 CAES 系统重要的组成部分, 通常地下储能库多选在层状盐穴或盐丘、含水层、枯竭的油气井或硬岩矿山等的地质体中。每种地质条件存储压缩空气的地层示意图如图 3 所示。按照地质条件可将储能库分为以下 4 类:

1) 盐穴储能库(图 3a)。将高压空气储存于水溶法开采的地下盐层或盐丘形成的地下空穴中, 这种储能库有许多优点是其他类型的储能库不可比拟的, 如成本低、密封性好、寿命长, 缺点是受地域限制, 只能在盐矿赋存地区建设。各国将具有巨大岩盐矿

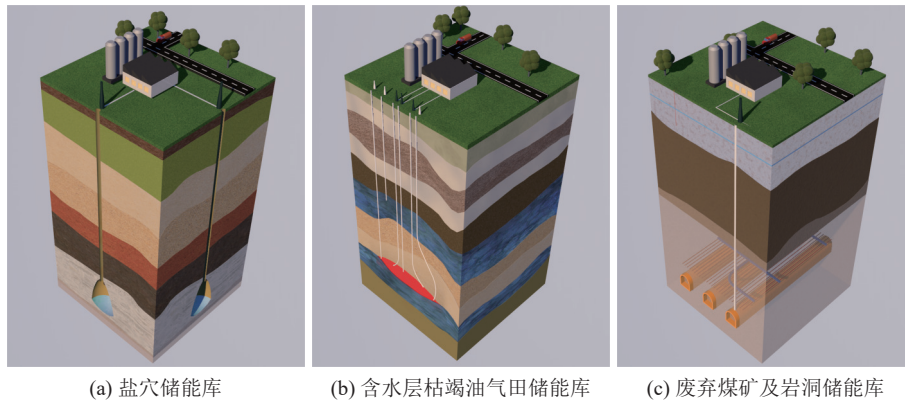
床地质构造的区域改建成了盐穴储能库电站, 如德国 Huntorf(290 MW, 2007 年扩容至 321 MW)<sup>[25]</sup>, 美国 McIntosh(110 MW), 江苏金坛(60 MW)和山东泰安(10 MW)压缩空气电站均属于此类储能系统<sup>[9]</sup>。

2) 人工洞室储能库。在地下 100 ~ 300 m 范围内的岩石区域, 人工开挖隧道式或大罐式洞室, 洞室内加密封层(钢或橡胶)保证高压气体的密封。该方式的特点是不受地域限制, 目前处于工程示范与试验阶段。湖南平江压缩空气储能试验洞、辽宁朝阳压缩空气储能电站和宁夏中宁压缩空气储能电站均属于此类储能系统<sup>[10-11]</sup>。

3) 含水层储能库(图 3b)。地下含水层封存 CO<sub>2</sub>(埋深 800 m 以下含水层)和天然气的实施应用, 证实了含水层能够作为储存气体的地质体。相较于盐穴储能库, 地下含水层作为储能库具有成本低、分布广泛, 可降低储能系统对地质条件的限制等优点。美国匹兹菲尔德(Pittsfield)场地的实践案例充分验证了含水层构建储能库的可行性<sup>[27]</sup>。含水层储能库类型与岩石洞穴储能库类型相似, 目前处于工程示范与试验阶段。

4) 枯竭油气田储能库(图 3b)。在油气藏开采过程中已获取较丰富的储能库建库相关地质信息





(a) 盐穴储能库 (b) 含水层枯竭油气田储能库 (c) 废弃煤矿及岩洞储能库

图3 储存压缩空气的地层示意

Fig.3 Stored compressed air formation diagram

(如地层岩性、圈闭性信息、油(气)藏面积、储层均质性及厚度、原始地层压力和温度、储气层孔隙度、渗透率等),大幅降低了储能库的选址建设成本,有力推动了在枯竭油气田中CAES的开展<sup>[28]</sup>。但此类储能库只能基于已有枯竭油气田进行开发利用,范围相对比较局限。目前,清华大学薛小代团队和胜利油田在孤东22-3井、垦东642-7井开展1kW枯竭油气藏压缩空气储能的验证试验,真正形成稳定的规模化枯竭油气田压缩空气储能,还面临很大挑战。真正形成稳定的规模化枯竭油气田压缩空气储能,还面临很大挑战。

5)废弃煤矿及岩洞储能库(图3c)。废弃煤矿及岩洞储能库是一种利用符合储气条件的废弃矿井或洞穴改建的地下储能库。在建的大同云冈矿废弃巷道压缩空气储能电站属于此类储能系统。

## 1.2 废弃煤矿地下空间现状分析

### 1.2.1 废弃煤矿数量

近年来我国关闭煤矿数量快速增加,截止到2020年底,“十三五”期间我国累计关闭煤矿7448处<sup>[29-30]</sup>(图4)并且随着资源枯竭,累计关闭煤矿会越来越多。关闭/废弃煤矿数量增多一方面带来了土地资源破坏,生态环境恶化问题<sup>[31-32]</sup>,另一方面关闭/废弃煤矿仍赋存大量可利用资源(如废弃煤矿生产区还有很多闲置厂房和设备,大量的土地资源及矿井地下空间得不到充分利用)<sup>[33-35]</sup>,开发利用空间巨大。

### 1.2.2 废弃煤矿的开发利用现状

关闭煤矿再利用主要体现在以下方面:开发与转化非常规天然气,搭建抽水蓄能电站,利用地下空间开发工业旅游,处理中低放废料,储存农作物种子及军事物资,搭建国家级科研平台等<sup>[3]</sup>。虽然我国在晋城寺河矿成功建设了工业旅游园,将峰峰五矿改造成地下储物室,顺利建成神华地下水库,但我国

在关闭煤矿地下空间再利用方面起步较晚,在综合化、高端化、智能化开发与利用方面仍然存在很大距离。

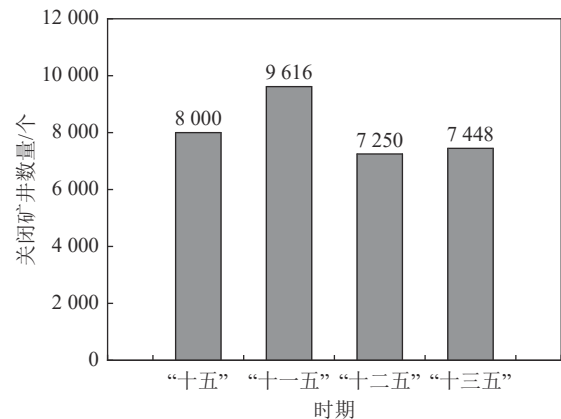


图4 “十五”以来我国已关闭煤矿数量统计

Fig.4 Statistics on the number of closed coal mines in China since the Tenth Five-year Plan

国外自20世纪中叶就开始研究关闭矿井的再利用,在煤矿瓦斯采集与利用、矿井水资源利用、地下空间博物馆、物资储存库以及矿山地质公园等方面积累了丰富的开发与实践经验,形成了瓦斯利用、水热联用、地下空间利用、矿山公园等一系列关闭煤矿资源化利用模式<sup>[1,36]</sup>。例如,德国在鲁尔工业区建设了博物馆和公共游憩地,将风力发电项目建设在废弃矿山的排土场上<sup>[37]</sup>,荷兰运用水热联用模式将放射性废物放置在奥兰治纳苏I、III和IV3座大型煤矿中<sup>[38]</sup>;美国第一个地下文件存储中心建立在关闭矿井地下空间<sup>[39]</sup>;英国对关闭的30座废弃煤矿进行瓦斯开发利用<sup>[40]</sup>。

近年来,基于环境保护和资源能源转型升级的新要求,综合利用技术、措施和手段不断更新,信息化、科技化、产业化和商业化模式不断创新,一些资

源枯竭型城市更加重视资源开发与再利用,出现了多种新型再利用模式(如农林用地<sup>[41]</sup>、建设用地、水域综合利用<sup>[42-43]</sup>、空间再利用等<sup>[44-46]</sup>),为我国废弃煤矿空间资源的综合利用提供了充足的经验<sup>[1,47-48]</sup>。

国内外关闭煤矿空间资源再利用的案例很多,对其进行归纳总结可知,主要存在如图5所示的8种再利用模式:农林用地、建设用地、场地绿化、水域利用、水热联用、湿地公园、矿山公园、空间再利用。



图5 废弃煤矿资源再利用的主要模式

Fig.5 Statistics of main modes of resource reuse in abandoned coal mines

### 1.2.3 废弃煤矿地下空间容量估算

在全国典型煤矿地下空间可利用量的调研数据基础上,根据雷明星等提出的地下空间估算模型,并结合矿井井巷断面的经验值(小型矿井  $10 \text{ m}^2$ , 中型矿井  $14 \text{ m}^2$ , 大型矿井  $16 \text{ m}^2$ , 特大型矿井  $18 \text{ m}^2$ ),对重点产煤省份的矿井地下空间进行统计估算<sup>[49-50]</sup>,最终得到见表2和表3所列的重点产煤省份矿井(大巷和井筒)空间容量的估算值。

根据表2和表3可知,大巷空间容量近  $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,井筒空间容量超过  $5.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。其中,小型矿井可利用井巷空间容量主要分布在贵州、云南、黑龙江等省份,中、大型矿井可利用井巷空间容量主要分布在山西、内蒙古、陕西、宁夏等,且占比超60%。矿井地下空间的开发模式在未来一段时间内将成为这些资源型城市转型发展的巨大动力。

我国对煤矿地下空间容量存在统计不足,废弃煤矿地下空间开发再利用模式仍处于探索阶段,相关核心技术不成熟,无法形成可推广的开发利用模式。并且废弃煤矿的开发与利用在国家层面并未开展顶层设计,地方政府、企业对废弃煤矿地下空间利用的相关技术研发与应用的重视程度较低,使废弃煤矿地下空间开发与利用受到严重制约。

废弃煤矿地下空间作为压缩空气储能电站大规模地下储能库的类型之一,越来越多的国内外学者关注废弃煤矿地下储能库建设的相关问题,并且从地下储能库封闭层的气密性和稳定性、气体泄漏率、储能库腔体变形及收缩率等方面展开了研究与讨论,取得了一定成果,为压缩空气储能能在废弃煤矿中的应用提供了理论支撑。

## 2 废弃煤矿压缩空气储能研究现状

### 2.1 地下储能库建设研究现状

CAES 电站储能库多采用地下空间作为能源存储库。将废弃煤矿中已有的巷道和硐室改造成储能库,既节约土地资源,又环保安全,还节省大量的前期建设投资。但储能库的建设对地层有特别要求,一般来说,储能库的地层应该具有较高的结构强度,渗透率低于  $0.12 \sim 0.13 \mu\text{m}^{2[51]}$ 。

1978年,德国将2个地下盐穴改造成了储能库,建立了第一座额定功率为290 MW的Huntorf压缩空气储能商业电站;1991年,美国运用一个地下盐穴建设了McIntosh电站,这两座传统压缩空气储能电站至今仍在商业运行<sup>[9]</sup>,具体技术参数见表4。

1990年,日本在一座已开采完的煤矿内研究建

表2 重点产煤省份矿井大巷空间估算

Table 2 Estimation of mine roadway space in key coal-producing provinces

省份	产量9万~30万t/a		产量45万~90万t/a		产量120万~240万t/a		产量300万~900万t/a		产量≥1 000万t/a	
	煤矿数量/个	空间/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	煤矿数量/个	空间/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	煤矿数量/个	空间/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	煤矿数量/个	空间/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	煤矿数量/个	空间/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
山西	18	17.6	518	1 936.3	291	2 030.0	81	864.4	10	164.0
内蒙古	13	12.7	183	684.1	150	1 046.4	63	672.3	16	262.4
陕西	41	40.0	105	392.5	47	327.8	26	277.5	11	180.4
河北	29	28.3	16	59.8	16	111.6	8	85.4	0	0
安徽	0	0	6	22.4	23	160.4	16	170.8	1	16.4
山东	17	16.6	58	216.8	22	153.5	13	138.7	0	0
江苏	0	0	2	7.5	5	34.9	1	10.7	0	0
河南	123	120.0	70	261.7	40	279.0	8	85.4	0	0
四川	253	246.7	30	112.1	6	41.9	0	0	0	0
贵州	319	311.3	129	482.2	19	132.5	0	0	0	0
宁夏	6	5.9	15	56.1	6	41.9	18	192.1	1	16.4
甘肃	22	21.5	12	44.9	14	97.7	5	53.4	0	0
云南	243	237.2	21	78.5	1	7.0	2	21.3	0	0
辽宁	4	3.9	8	29.9	14	97.7	3	32.0	0	0
吉林	23	22.4	8	29.9	4	27.9	1	10.7	0	0
黑龙江	189	184.4	14	52.3	22	153.5	6	64.0	0	0
新疆	8	7.8	67	250.4	11	76.7	11	117.4	2	32.8
总计/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	1 308	1 277.6	1 262	4 717.4	691	4 820.4	262	2 796.1	41	672.3

表3 重点产煤省份矿井井筒空间估算

Table 3 Estimation of shaft space in key coal-producing provinces

区域分布	空间/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>					
	产量9万~30万t/a	产量45万~90万t/a	产量120万~240万t/a	产量300万~900万t/a	产量≥1 000万t/a	
西北部地区	内蒙古	7.8	153.7	144.0	90.7	25.9
	陕西	24.6	88.2	45.1	37.4	17.8
	宁夏	3.6	12.6	5.8	25.9	1.6
	甘肃	13.2	10.1	13.4	7.2	0
	新疆	4.8	50.4	10.6	15.8	3.2
	山西	28.8	1 160.3	745.0	311.0	43.2
	河北	46.4	35.8	40.9	30.7	0
	安徽	0	13.4	58.9	61.4	0
中东部地区	山东	27.2	129.9	56.3	49.9	0
	江苏	0	4.5	12.8	3.8	0
	河南	196.8	1 568.0	102.4	30.7	0
	辽宁	6.4	17.9	35.8	11.5	0
	吉林	36.8	17.9	10.2	3.8	0
	黑龙江	302.4	31.4	56.3	23.0	0
西南地区	四川	253.0	42.0	9.6	0	0
	贵州	319.0	180.6	30.4	0	0
	云南	243.0	29.4	1.6	4.8	0
井筒空间总计	1 513.8	2 135.0	1 379.2	708.0	96.1	

表4 2座传统压缩空气储能电站运行技术参数对比  
Table 4 Comparison of technical parameters of operating CAES plants

参数	Huntorf电站	McIntosh电站	
压缩机组性能	循环效率/%	42	54
	最大输入功率/MW	60	50
	最大空气流速/(kg·s <sup>-1</sup> )	108	约90
	注气时间/h	约8	约38
储气腔体	腔体压力范围/MPa	4.3~7.0	5.1~7.9
	腔体深度/m	650~800	457~720
	腔体总体积/m <sup>3</sup>	31×10 <sup>4</sup>	约54×10 <sup>4</sup>
膨胀机组性能	最大输出功率/MW	321	110
	最小输出功率/MW	100	10
	满负荷运行时间/h	约2	约24
	最大空气流速/(kg·s <sup>-1</sup> )	455	154

造了一座 35 MW 的压缩空气试验电站<sup>[52]</sup>。美国于 2001 年开始将地下废弃石灰岩矿洞改造为储能库，建设了一座 2 700 MW 的大型压缩空气蓄能商业电站。韩国于 2011 年在地下 100 m 深的石灰岩中建设压缩空气储能电站，证实内衬洞室作为压缩空气储能地下储能库是可行的<sup>[53]</sup>。何秋德等<sup>[4]</sup>以徐州权台煤矿为例，从理论上证明了将煤矿废弃巷道与压缩空气蓄能技术相结合完全可行。牛文进等<sup>[54]</sup>提出了在废弃矿山地下空间布置瓦斯抽采装置与储水槽以保证储气空间安全的废弃矿山空气压缩蓄能电站技术。2019 年，我国第 1 个利用废弃煤矿巷道改造成压缩空气储能库的项目在云冈矿开工<sup>[55]</sup>。但由于煤矿地质条件复杂、阶段性废弃煤矿数量大、基础研究相对薄弱、关键技术还不成熟等因素影响，压缩空气储能在废弃煤矿中的应用(如储存压缩空气的矿井遴选、密封性能、储存空间大小、储存时间等)亟需开展深入研究，以便形成适合中国国情、自然地质条件的废弃煤矿压缩空气储能的保障理论与技术。

## 2.2 地下储能库的密封性研究现状

良好的密封性是 CAES 地下储能库长期稳定运行的保障之一。由于储能库密封性影响压气储能电站运行效率，ALLEN 等<sup>[56]</sup>针对压缩空气储能电站地下储能库的气体泄漏情况进行分析，研究提出储能库每天的空气泄漏量应低于 1% 才能保证压气储能电站的运行效率，若空气泄漏量达到每天 2% 将会造成每年约 100 万美元的损失。因此，通常需要增加工程措施(如施加内衬)来保证储能库的气密性。目前，国内外学者主要通过现场试验、解析解计算和数值模拟的方法来评估压缩空气储能电站地下储能库

的空气泄漏情况。ISHIHATA<sup>[57]</sup>于 1990 年尝试在已采煤矿的硬岩洞室增加内衬密封层，成功开展了压气储能试验且获取了现场空气的泄漏数据。通过现场试验能够获得实际的空气泄漏率，但该方法成本较高，因此，有关学者采用解析解算法对储能库的空气泄漏量进行估算。叶斌等<sup>[58]</sup>借助解析解算法研究了衬砌渗透率、衬砌厚度和洞室形状对洞室中空气泄漏量的影响规律。周瑜等<sup>[59-60]</sup>研究表明 CAES 无衬砌洞室的空气泄漏率的迭代估算方法可以直接应用在压气储能内衬洞室研究的初始阶段。夏才初等<sup>[61]</sup>针对空气泄漏率的影响因素(衬砌渗透率、衬砌厚度与储气压力)进行了分析探讨，结果表明：随着衬砌厚度的增大，衬砌厚度对空气渗透的控制效果逐渐减弱，且渗透率越低；衬砌厚度与初始压强越大，空气渗透百分比越小；通过基于多孔介质渗流力学理论构建的空气渗透量估算公式，计算得到的空气泄漏量小于传统基于稳态径向渗流理论解析计算得到的空气渗透量<sup>[62]</sup>。为评估无衬砌洞室的空气泄漏情况，WU 等<sup>[63]</sup>提出了热-流-固耦合模型，并运用现场测试、解析解计算和数值模拟相结合的方法综合探讨了空气泄漏对无衬砌洞室的温度和压力变化以及围岩气体渗流的影响。相较解析解计算方法，国内外学者发现通过数值模拟更容易获取高精度的空气泄漏率，如 KIM 和 RUTQVIST 等<sup>[64-65]</sup>通过 TOUGH-FLAC 软件数值模拟了衬砌洞室的热力学和变形特性，研究认为在混凝土衬砌洞室中储气压力在 5~8 MPa，可以控制内衬洞室每天的气体泄漏率在 1% 以下。LI 等<sup>[66]</sup>提出了一种考虑气体温度的热-流-固耦合模型，并模拟了 CAES 洞室内的空气泄漏和力学行为。NAKAGAWA 等<sup>[67]</sup>通过连续两相流模型模拟计算了一个特定储能库的空气泄漏量。ZHOU 等<sup>[68]</sup>通过 COMSOL Multiphysics 软件模拟得到了采用橡胶密封的衬砌岩石洞室的空气泄漏量。

在压缩空气地下储能库储能运行过程中，频繁充气与放气将引起储能库内温度和压力发生变化，进而影响储能库的空气泄漏情况。因此，地下储能库的气密性问题涉及了储能库热力学、渗透和力学的复杂多场耦合问题。目前，国内外学者对废弃煤矿地下储能库受扰动时的气密性研究较少。

## 2.3 地下储能库的稳定性研究现状

压气储能系统运行时，频繁地充气、放气过程将导致地下储能库各结构层的受力、变形和渗透率发生变化，影响地层稳定性。因此，对地下储能库不同



受载条件下的稳定性研究是十分有必要的。

在地下储能库稳定性研究过程中, KIM 等<sup>[69-71]</sup>针对韩国地下储气实验库进行了数值模拟, 研究了开挖扰动作用下储能库的受力情况及变形特征, 并探讨了衬砌力学性能变化对储能库气体渗透的影响规律。RUTQVIST 等<sup>[65]</sup>综合考虑了储能库内衬洞室运行时的温度与压力因素, 通过 TOUGH-FLAC 软件模拟研究了韩国 CAES 地下储能库内衬洞室的热力学问题。ZIMMELS 等<sup>[72]</sup>运用 FLAC 模拟研究了储能库内部压力作用下单洞和群洞的稳定性。SERBIN 等<sup>[73]</sup>进行热力耦合模拟分析了洞室热力学效应对洞室收敛的影响。夏才初等<sup>[5,74-75]</sup>针对压气储能洞室稳定性开展了一系列试验与模拟研究, 提出了综合考虑洞室的组成结构、气压和温度联合作用引起的应力计算方法, 得出了充气与放气过程中洞室的受力变化规律, 并通过热-力-压缩空气耦合求解的数值模型验证了应力结果的正确性, 阐述了洞室总应力的温度效应<sup>[76]</sup>。周瑜等<sup>[59]</sup>提出了估算洞室空气泄漏率和围岩应力、位移的方法, 为压气储能库内衬洞室的围岩稳定性与安全性评价提供借鉴。蒋中明等<sup>[77]</sup>结合我国建造的第一个花岗岩洞室储能库, 模拟分析了循环动载下储能库的受力、变形特性以及热力学变化过程, 研究发现围岩在气体压力 (8.7 MPa) 作用下仅发生 4 mm 以下的变形量, 且压力影响区小于 10 m<sup>[78-79]</sup>。王其宽等<sup>[80]</sup>基于正交设计理念, 采用 ABAQUS 有限元模拟研究了储能库主要布局参数 (洞室埋深、间距及内径) 对围岩变形和稳定性的影响, 提出了洞室群的最优布置方案。

压缩空气地下能源储备是一个复杂的系统工程, 其建造和运营过程中存在多种影响稳定性的因素 (如地应力、埋深、围岩性质、温度、采掘活动等), 国内外学者围绕压缩空气地下储能库的围岩稳定性以及影响因素开展了一系列研究工作, 研究结论对指导工程实践具有重要的意义, 但我国废弃煤矿储能库的建设尚处于起步阶段, 需要更广泛、深入的研究多因素作用对废弃煤矿储能库稳定性的影响。

### 3 废弃煤矿压缩空气储能关键技术

盐穴压缩空气储能发电在国外已商业运行了二十多年, 技术成熟, 经验丰富。我国在压缩空气地下储能库储能方面进行了诸多研究, 并成功建设了金坛盐穴压缩空气储能电站和泰安盐穴压缩空气储能电站, 但目前我国废弃煤矿压缩空气储能的发展仍较为缓慢。

针对废弃煤矿压缩空气储能机理和储能库稳定性方面的研究仍面临诸多挑战, 亟待实现理论和技术突破, 这也是制约废弃煤矿压缩空气储能技术发展的关键因素。随着“碳达峰、碳中和”目标的提出, 诸多政策导向的激励, 废弃煤矿压缩空气储能的规模化、商业化势必要加快步伐, 而在此过程中, 必须实现以下三项关键技术的研究突破 (图 6)。

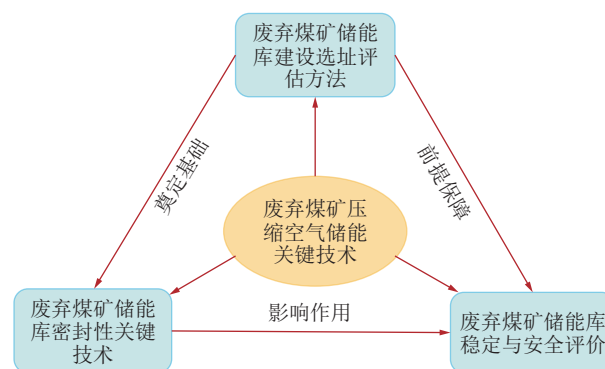


图 6 废弃煤矿压缩空气储能关键技术

Fig.6 Key technologies of CAES in abandoned coal mines

#### 3.1 废弃煤矿储能库建设选址评估方法

虽然我国矿山生命周期临近衰减报废的矿井数量逐年增长, 但这些废弃煤矿只是压缩空气储能地下储能库的潜在可利用对象。由于矿井地下空间分布不规则, 巷道连续性差, 地质条件复杂, 地下水渗流等特点, 同时矿井巷道在几何尺度上还具有断面小、空间狭长、内表面积大等特征, 并非所有废弃煤矿均可改造成压缩空气储能电站的储能库。关于压缩空气储能的地下储能库建设选址, 国内外学者已经展开了诸多研究, 并建立了相关评估方法<sup>[81-84]</sup>。但压缩空气储能在废弃煤矿应用选址评估的研究目前报道较少。因此, 在废弃煤矿中选址建设压缩空气储能库是废弃煤矿压缩空气储能技术面临的首要关键科学问题。针对该问题, 在遵循安全可靠、技术可行性、经济合理性三大原则的同时, 废弃煤矿压缩空气储能库可按照图 7 所示的流程进行建设选址。

首先, 对储能电站的市场需求进行分析, 论证建设 CAES 电站的必要性, 然后从电力负荷、光伏和风能资源分布以及现有设施 (如老井或废井数量、固井环境与质量) 方面, 规划储能电站的区域选址。然后, 针对适合建设储能库的废弃煤矿进行进一步评价, 确定 CAES 电站的废弃煤矿地下储能库类型 (矿井巷道、洞室、井筒储能库), 之后再对选定井下区域的区域地质条件 (主要包括工程和水文地质条件) 进行评价; 如盖层、断层密封性评价, 评价埋深、盖层的岩性、厚度、连续性、平面分布、裂隙发育、盖层封气



能力、孔隙度、渗透率等密封性指标;针对有断层存在的待选区域,可主要进行断层发育程度、储能库与主要断层距离的评价;通过实验室试验与仿真模拟评估废弃煤矿储能库的储量规模。最后,协同考虑地面设施布局、交通运输条件、经济技术指标等,从而优化确定废弃煤矿储能库建设的具体地址。

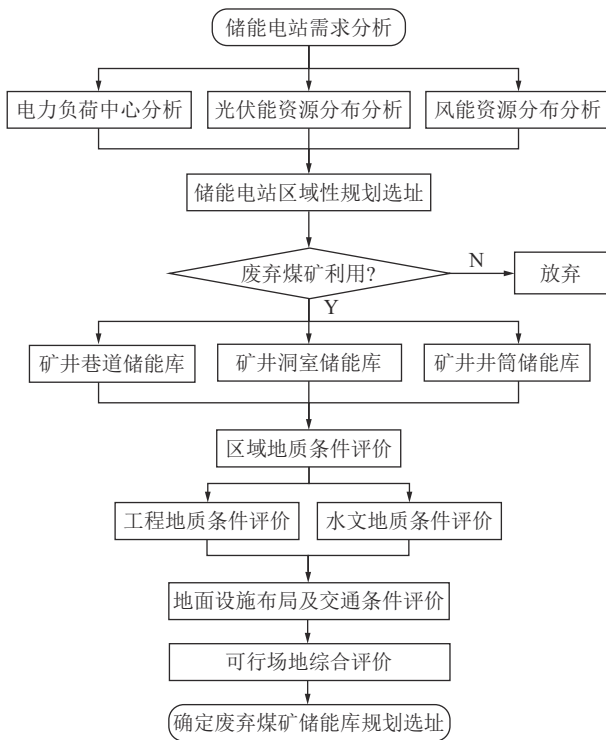


图7 废弃煤矿储能库建设选址流程

Fig.7 Site selection flow chart of abandoned coal mine energy storage

### 3.2 废弃煤矿储能库密封性关键技术

如何保证矿山地下储能库不发生空气泄漏或者将空气泄漏控制在允许值之内是压缩空气储能技术的关键问题之一。随着地下储能库的发展,国内外学者提出利用钢板或高分子材料(丁基橡胶、三元乙丙橡胶、天然橡胶和玻璃钢等)作为密封层防止储能库中压缩空气泄露<sup>[59,84]</sup>。储能库中空气的温度和压力将随着充、放气过程的热力学效应发生变化,地下储能库的气密性问题是储能库热力学、力学和气体渗透的复杂多场耦合问题。为此,可借助数值模拟、相似模拟、现场试验等手段,研究不同废弃煤矿储能库的埋深、地层条件、岩层理化性质、温度等因素以及不同密封材料对废弃煤矿储能库空气泄漏率的影响与作用机制;提出压缩空气储能废弃煤矿储能库空气泄漏的多场耦合控制方程;揭示多场耦合下废弃煤矿储能库空气泄漏规律与影响机理;建立多场耦合作用下考虑废弃煤矿储能库空气泄漏率的热力

学模型,探索空气泄漏率对储能库中压缩空气温度和压力变化的影响规律,从而得到废弃煤矿储能库气密性影响机理与主控因素,研发能够有效解决储能库气密性问题的低成本密封材料。利用氮气泄漏检测方法对待选储能库的全面密封性进行分段测试,明确储能库具体的泄漏位置,采用密封材料对泄漏位置进行封堵,使储能库每天的空气泄漏量控制在1%以下。

### 3.3 废弃煤矿储能库安全稳定性分析

压缩空气储能电站在运行过程中,废弃煤矿储能库存在压力差且频繁的充气与放气,使其长期稳定性面临巨大挑战,因此,针对废弃煤矿储能库稳定性的研究尤为重要。国内外学者在储能库稳定性方面已经开展了诸多研究,并提出最优布置方案<sup>[5,74-76,80]</sup>。但废弃煤矿储能库稳定性机理与安全评价方面的研究目前鲜有报道。针对该问题,运用三维断层扫描、电法勘探、地质雷达等技术对候选储能库地层开展多尺度、全方位地质结构观测,建立三维可视化地质模型,对废弃煤矿储能库地质体结构稳定性进行探测评估;通过实验室试验、理论建模、数值模拟等相结合的方法,研究地质结构(如断层、褶皱)、岩石力学性质、地应力、地下水、蠕变和工程因素(如储能库形态、埋深、方位、支护形式、运行压力、充放气速率)对废弃煤矿储能库稳定性的影响与作用机制;建立压缩空气注入-稳定-释放全周期储能库围岩变形场演化模型,结合废弃煤矿现场监测数据,对所选废弃煤矿储能库已有的围岩变形进行合理的预测,并对储能库压缩空气注入-稳定-释放全周期的围岩稳定性进行数值模拟;根据数值模拟结果分析,当储能库存在最大应力超过围岩的抗拉强度,说明该处应进行加固处理;反之,满足稳定性要求。同样根据数值模拟结果可以给出,在一定的运行压力范围内围岩没有发生剪切塑性区,储能库稳定性较好<sup>[8]</sup>。可通过围岩变形监测、电磁辐射监测、振动波CT监测、微地震监测与地质雷达探测等技术对废弃煤矿储能库进行稳定性监测预警,探明废弃煤矿储能库充放气过程的多元物理效应规律,选取能够更准确表征废弃煤矿储能库稳定性的状态指标,揭示储能库稳定性监测预警原理,同时建立废弃煤矿压缩空气储能全生命周期多尺度多元失稳探测与监测预警方法与准则。

利用以上研究方法可对废弃煤矿储能库岩层结构稳定性与安全性进行评估,对废弃煤矿压缩空气储能全周期潜在的安全风险进行预判,最终实现可

利用废弃煤矿的优选。

#### 4 结论与展望

1) 废弃煤矿储能库建设选址评估方法。废弃煤矿储能库的选址评估对废弃煤矿压缩空气储能的实施起到了决定性作用, 应从废弃煤矿压缩空气储能电站建设的必要性与废弃煤矿的可利用性着手确定地下储能库类型, 根据所选电站场址区域水文地质条件进一步具体化地下储能库的候选区域。

2) 废弃煤矿储能库密封性关键技术。研究废弃煤矿储能库空气泄漏率的影响因素, 及其作用机制, 提出废弃煤矿储能库空气泄漏的多场耦合控制方程, 揭示多场耦合下废弃煤矿储能库空气泄漏规律与影响机理, 确定影响废弃煤矿储能库空气泄漏率的主导因素, 研发解决储能库气密性问题的低成本密封材料。

3) 废弃煤矿储能库稳定与安全评价。利用地质勘探技术对废弃煤矿储能库进行全方位地质结构观测与稳定性评估, 并借助实验室试验、理论建模和数值模拟等手段, 研究地质结构、岩石力学性质、地应力、地下水、蠕变和工程因素等对废弃煤矿储能库稳定性的影响规律, 揭示压缩空气注入-稳定-释放全周期储能库围岩变形失稳机理, 提出加强储能库稳定与安全性实施方案, 通过对废弃煤矿储能库稳定性的监测预警, 确定表征储能库稳定性的状态指标, 得到废弃煤矿压缩空气储能全生命周期多尺度多元失稳探测与监测预警方法与准则。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 高明忠, 高峰, 等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1355-1365.  
XIE Heping, GAO Mingzhong, GAO Feng, *et al.* Strategic conceptualization and key technology for the transformation and upgrading of shut-down coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1355-1365.
- [2] 刘峰, 李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2205-2213.  
LIU Feng, LI Shuzhi. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2205-2213.
- [3] 袁亮, 杨科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 16-24.  
YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 16-24.
- [4] 何秋德, 陈宁, 罗萍嘉. 基于压缩空气蓄能技术的煤矿废弃巷道再利用研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 37-39, 65.  
HE Qiude, CHEN Ning, LUO Pingjia. Research on reuse of abandoned roadway in coal mine based on the compressed air energy storage technology[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(4): 37-39, 65.
- [5] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模气压储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1391-1398.  
XIA Caichu, ZHANG Pingyang, ZHOU Shuwei, *et al.* Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage cavern[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1391-1398.
- [6] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发——未来煤矿转型升级新路径[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59-79.  
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao, *et al.* New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: a new path for transformation and upgrading of coal mines in the future[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59-79.
- [7] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409-4417.  
YANG Chunhe, LIANG Weiguang, WEI Donghou, *et al.* Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4409-4417.
- [8] 王帅, 蒲宝基, 蹇军强, 等. 废弃煤矿压缩空气储能地质安全稳定分析[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 133-137.  
WANG Shuai, PU Baoji, JIAN Junqiang, *et al.* Geological safety and stability analysis on compressed air energy storage of abandoned coal mine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(8): 133-137.
- [9] 郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 等. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 482-492.  
GUO Chaobin, WANG Zhihui, LIU Kai, *et al.* The application and research progress of special underground space[J]. Geology in China, 2019, 46(3): 482-492.
- [10] BROWN LW. Abandoned coal mine stores gas for Colorado peak-day demands[J]. Pipeline Industry, 1978, 49(3): 1-10.
- [11] 常春勤, 邹友峰. 国内外废弃矿井资源化开发模式述评[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(4): 425-429.  
CHANG Chunqin, ZOU Youfeng. Review on resource development mode of abandoned underground space of Mine[J]. resource development and market, 2014, 30(4): 425-429.
- [12] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1729-1759.  
YANG Chunhe, WANG Tongtao. Advance in deep underground energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1729-1759.
- [13] 陈涛, 施锡林, 李金龙, 等. 盐穴储气库水平井造腔模拟试验[J]. 油气储运, 2019, 38(11): 1257-1264.  
CHEN Tao, SHI Xilin, LI Jinlong, *et al.* Simulation test on the horizontal-well leaching of salt-cavern gas storage[J]. Transportation and Storage, 2019, 38(11): 1257-1264.
- [14] 陈祥胜, 李银平, 施锡林, 等. 地下盐穴储气库泄漏原因及防治

- 措施研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 367-373, 389.
- CHEN Xiangsheng, LI Yinping, SHI Xilin, *et al.* Analysis of leakage risks and prevention measures of underground salt cavern gas storage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 367-373, 389.
- [15] 周舒威, 夏才初, 张平阳, 等. 地下压气储能圆形内衬洞室内压和温度引起应力计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2025-2035.
- ZHOU Shuwei, XIA Caichu, ZHANG Pingyang, *et al.* Analytical approach for stress induced by internal pressure and temperature of underground compressed air energy storage in a circular lined rock cavern[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2025-2035.
- [16] CHEN X H, WANG J G. Stability analysis for compressed air energy storage cavern with initial excavation damage zone in an abandoned mining tunnel[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103725.
- [17] 马洪岭, 梁孝鹏, 赵 凯, 等. 山东泰安盐穴储气库地质可行性分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(2): 19-27.
- MA Hongling, LIANG Xiaopeng, ZHAO Kai, *et al.* Geological feasibility analysis of Tai'an salt cavern gas storage in Shandong Province[J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2022, 4(2): 19-27.
- [18] 彭振华, 李俊彦, 杨 森, 等. 利用废弃石膏矿储存原油可行性分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 470-475.
- PENG Zhenhua, LI Junyan, YANG Sen, *et al.* Feasibility analysis of utilization of waste gypsum mine for crude oil storage[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(3): 470-475.
- [19] 吴皓文, 王 军, 龚迦莉, 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.
- [20] 梁丽君, 何军飞. 压缩空气储能技术及其标准现状分析[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 36-37.
- LIANG Lijun, HE Junfei. Analysis of compressed air energy storage technology and its standards status[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(8): 36-37.
- [21] 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.
- CHEN Haisheng, LIU Jinchao, GUO Huan, *et al.* Technical principle of compressed air energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2013, 2(2): 146-151.
- [22] 董 舟, 李 凯, 王永生, 等. 压缩空气储能技术研究及应用现状[J]. 河北电力技术, 2019, 38(5): 18-20.
- DONG Zhou, LI Kai, WANG Yongsheng, *et al.* Research and application status of compressed air energy storage technology[J]. *Hebei Electric Power*, 2019, 38(5): 18-20.
- [23] 郭新生, 傅秦生, 赵知辛, 等. 电热冷联产的新压缩空气蓄能系统[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 170-173.
- GUO Xinsheng, FU Qinsheng, ZHAO Zhixin, *et al.* A new type of compressed air energy-storage system for the cogeneration of electricity, heat and cooling energy[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2005, 20(2): 170-173.
- [24] FAN J, LIU W, JIANG D, *et al.* Thermodynamic and applicability analysis of a hybrid CAES system using abandoned coal mine in China[J]. *Energy*, 2018, 157: 31-44.
- [25] 纪 律, 陈海生, 张新敬, 等. 压缩空气储能技术研发现状及应用前景[J]. 高科技与产业化, 2018(4): 52-58.
- JI LYU, CHEN Haisheng, ZHANG Xinjing, *et al.* Research and development status and application prospect of compressed air energy storage technology[J]. *High Technology and Industrialization*, 2018(4): 52-58.
- [26] CHEN J, LIU W, JIANG D, *et al.* Preliminary investigation on the feasibility of a clean CAES system coupled with wind and solar energy in China[J]. *Energy*, 2017, 127: 462-478.
- [27] LI Y, LI Y, LIU Y, *et al.* Compressed air energy storage in aquifers: basic principles, considerable factors, and improvement approaches[J]. *Reviews in Chemical Engineering*. 2019, 37(5): 561-584.
- [28] 郭朝斌, 李 采, 杨利超, 等. 压缩空气地质储能研究现状及工程案例[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 109-119.
- GUO Chaobin, LI Cai, YANG Lichao, *et al.* Research review and engineering case analysis of geological compressed air energy storage[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(4): 109-119.
- [29] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
- WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, *et al.* development achievements of china's coal industry during the 13 th five-year plan period and implementation path of “dual carbon” target[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(9): 1-8.
- [30] 王 兵, 刘朋帅, 邓凯磊, 等. 二次矿山管理的科学内涵与构想[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(12): 51-58.
- WANG Bing, LIU Pengshuai, DENG Kailei, *et al.* The scientific connotation and conception of secondary mine management[J]. *Coal Economic Research*, 2020, 40(12): 51-58.
- [31] 谢友泉, 高 辉, 苏志国, 等. 废弃矿井地热资源的开发利用[J]. 太阳能, 2020(10): 13-18.
- XIE Youquan, GAO Hui, SU Zhiguo, *et al.* Development and utilization of geothermal resources in abandoned mines[J]. *Solar Energy*, 2020(10): 13-18.
- [32] 谢友泉, 高 辉, 苏志国, 等. 废弃矿井资源的可再生能源开发利用[J]. 可再生能源, 2020, 38(3): 423-426.
- XIE Youquan, GAO Hui, SU Zhigao, *et al.* Exploitation and utilization of renewable energy from waste mine resources[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(3): 423-426.
- [33] 袁 亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2018, 20(1): 3-12.
- YUAN Liang. Strategies of high efficiency recovery and energy saving for coal resources in China[J]. *Journal of China University of Mining and Technology(Social Sciences)*, 2018, 20(1): 3-12.
- [34] 袁 亮, 姜耀东, 王 凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14-20.
- YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, *et al.* Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in



- China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.
- [35] 戴家生, 夏明强, 潘磊, 等. 典型废弃矿井综合治理分析[J]. 煤炭技术, 2020, 39(6): 97-99.  
DAI Jiasheng, XIA Mingqiang, PAN Lei, *et al.* Analysis of comprehensive treatment of typical abandoned mines[J]. Coal Technology, 2020, 39(6): 97-99.
- [36] 霍冉, 徐向阳, 姜耀东. 国外废弃矿井可再生资源开发利用现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 267-273.  
HUO Ran, XU Xiangyang, JIANG Yaodong, *et al.* Status and prospect on development and utilization of renewable energy in abandoned mines abroad[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 267-273.
- [37] CHRISTIAN Melchers, PETER Goerke-Mallet, LAURA Henkel, *et al.* Experiences with mine closure in the European coal mining industry: Suggestions for reducing closure risks[J]. Mining Report, 2016, 52(3): 212-220.
- [38] ILG P, GABBERT S, WEIKARD H P. Nuclear waste management under approaching disaster: a comparison of decommissioning strategies for the German repository Asse II [J]. Risk Analysis, 2017, 37(7): 1213.
- [39] ROSINA E, SANSONETTI A, EEBA S. Focus on soluble salts transport phenomena: the study cases of Leonardo mural paintings at Sala delle Asse(Milan)[J]. Construction & Building Materials, 2016, 136: 643-652.
- [40] 桑逢云, 刘文革, 韩甲业, 等. 英国废弃煤矿瓦斯开发成功经验及对我国的启示[J]. 中国煤层气, 2019, 16(2): 3-5.  
SANG Fengyun, LIU Wenge, HAN Jiaye, *et al.* Enlightenment of China on successful experiences of abandoned mine methane development in Britain[J]. China Coalbed Methane, 2019, 16(2): 3-5.
- [41] 武强, 刘宏磊, 陈奇, 等. 矿山环境修复治理模式理论与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1085-1092.  
WU Qiang, LIU Honglei, CHEN Qi, *et al.* Theoretical study of mine geo-environmental restoration model and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1085-1092.
- [42] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.  
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [43] 陈苏社, 黄庆享, 薛刚, 等. 大柳塔煤矿地下水库建设与水资源利用技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 21-28.  
CHEN Sushe, HUANG Qingxiang, XUE Gang, *et al.* Technology of underground reservoir construction and water resource utilization in Daliuta Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 21-28.
- [44] 谢和平, 高明忠, 刘见中, 等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1487-1503.  
XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, *et al.* Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1487-1503.
- [45] 史箫笛, 康小兵, 罗向奎, 等. 闭坑煤矿井下空间资源开发利用评价[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 112-119.  
SHI Xiaodi, KANG Xiaobing, LUO Xiangkui, *et al.* Development and utilization evaluation of underground space resources in closed pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 112-119.
- [46] 刘钦节, 王金江, 杨科, 等. 关闭/废弃矿井地下空间资源精准开发利用模式研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 71-78.  
LIU Qinjie, WANG Jinjiang, YANG Ke, *et al.* Research on the model of accurate exploitation and utilization of underground space resources in closed/abandoned mines[J]. Coal Geology and Exploration, 2021, 49(4): 71-78.
- [47] 任辉, 吴国强, 张谷春, 等. 我国关闭/废弃矿井资源综合利用形势分析与对策研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(2): 1-6.  
REN Hui, WU Guoqiang, ZHANG Guchun, *et al.* The situation analysis and strategy research of closed/abandoned mine resources comprehensive utilization in China[J]. Coal Geology China, 2019, 31(2): 1-6.
- [48] 王争, 李国富, 周显俊, 等. 山西省废弃矿井煤层气地面钻井开发关键问题与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 86-95.  
WANG Zheng, LI Guofu, ZHOU Xianjun, *et al.* Key problems and countermeasures of CBM development through surface boreholes in abandoned coal mines of Shanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 86-95.
- [49] 杜俊生, 陈结, 姜德义, 等. 中国废弃煤矿压气蓄能潜力与初步可行性研究[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 253-264.  
DU Junsheng, CHEN Jie, JIANG Deyi, *et al.* Study on the potential and pre-feasibility of compressed air energy storage of abandoned coal mines in China[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 253-264.
- [50] 雷明星, 梅灿旗, 王楠. 关闭矿井地下空间资源开发利用思考与建议[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(2): 41-45.  
LEI Mingxing, MEI Canqi, WANG Nan. Thoughts and suggestions on development and utilization of underground space resources in closed mine[J]. Coal Economic Research, 2021, 41(2): 41-45.
- [51] 李宝山, 肖明松, 周志学, 等. 针对废弃矿井的可再生能源综合开发利用[J]. 太阳能, 2019(5): 13-16.  
LI Baoshan, XIAO Mingsong, ZHOU Zhixue, *et al.* Comprehensive development and utilization of renewable energy for abandoned mines [J] Solar Energy, 2019 (5): 13-16
- [52] ISHIHATA T. Underground compressed air storage facility for CAES-GT power plant utilizing an airtight lining[J]. International Society of Rock Engineering, 1997, 5(1): 17-21.
- [53] GUO C B, PAN L H, ZHANG K N, *et al.* Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and caverns based on the Huntorf CAES plant[J]. Applied Energy, 2016, 181: 342-356.
- [54] 牛文进, 王璐, 柳研青. 基于废弃矿井的空气压缩蓄能电站应用研究[J]. 科技风, 2019(22): 186.  
NIU Wenjin, WANG Lu, LIU Yanqing. Research on application of air compression storage power station based on abandoned mine[J]. Science and Technology, 2019(22): 186.

- [ 55 ] 刘汉斌, 张亚宁, 程芳琴. 山西关闭煤矿资源利用现状及开发利用建议[J]. *煤炭经济研究*, 2019, 39(10): 78–82.  
LIU Hanbin, ZHANG Yaning, CHENG Fangqin. Utilization status and development suggestions on closed coal mine resources in Shanxi Province[J]. *Coal Economic Research*, 2019, 39(10): 78–82.
- [ 56 ] ALLEN R D, DOHERTY T J, KANNBERG L D. Summary of selected compressed air energy storage studies[R]. Pacific Northwest Laboratory, Springfield, 1985.
- [ 57 ] ISHIHATA T. Underground compressed air storage facility for CAES-G/T power plant utilizing an airtight lining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 5(1): 17–21.
- [ 58 ] 叶 斌, 程子睿, 彭益成. 压气储能洞室气密性影响因素分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(10): 1526–1532.  
YE Bin, CHENG Zirui, PENG Yicheng. Analysis of influence factors on air tightness of underground cavern for compressed air energy storage[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2016, 44(10): 1526–1532.
- [ 59 ] 周 瑜, 夏才初, 赵海斌, 等. 压气储能内衬洞室的空气泄漏率及围岩力学响应估算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(2): 297–309.  
ZHOU Yu, XIA Caichu, ZHAO Haibin, *et al.* A method for estimating air leakage through inner seals and mechanical responses of the surrounding rock of lined rock caverns for compressed air energy storage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(2): 297–309.
- [ 60 ] ZHOU Y, XIA C, ZHAO H, *et al.* An iterative method for evaluating air leakage from unlined compressed air energy storage (CAES) caverns[J]. *Renewable Energy*, 2018, 120: 434–445.
- [ 61 ] 夏才初, 徐英俊, 王辰霖, 等. 基于非稳态渗流过程的压气储能洞室空气渗透率计算[J]. *岩土力学*, 2021, 42(7): 1765–1773.  
XIA Caichu, XU Yingjun, WANG Chenlin, *et al.* Calculation of air leakage rate in lined cavern for compressed air energy storage based on unsteady seepage process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(7): 1765–1773.
- [ 62 ] GEORGE S, THOMAS S. Transport phenomena through polymeric systems[J]. *Progress in Polymer Science*, 2001, 26(6): 985–1017.
- [ 63 ] WU D, WANG J, HU B, *et al.* A coupled thermo-hydro-mechanical model for evaluating air leakage from an unlined compressed air energy storage cavern[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 907–920.
- [ 64 ] KIM H M, RUTQVIST J, RYU D W, *et al.* Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: a modeling study of air tightness and energy balance[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 653–667.
- [ 65 ] RUTQVIST J, KIM H M, RYU D W, *et al.* Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 71–81.
- [ 66 ] LI X, ZUO Y, ZHUANG X, *et al.* Estimation of fracture trace length distributions using probability weighted moments and L-moments[J]. *Engineering Geology*, 2014, 168(2): 69–85.
- [ 67 ] NAKAGAWA K, KOMADA H, MIYASHITA K, *et al.* Prevention of leakage of compressed air stored in unlined rock caverns[J]. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1986, 370: 233–241.
- [ 68 ] ZHOU S, ZHOU S, XIA C, *et al.* An analytical solution for mechanical responses induced by temperature and air pressure in a lined rock cavern for underground compressed air energy storage[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(2): 749–770.
- [ 69 ] KIM H M, PARK D, RYU D W, *et al.* Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns[J]. *Engineering Geology*, 2012, 135–136: 60–65.
- [ 70 ] KIM H M, RUTQVIST J, JEONG J H, *et al.* Characterizing excavation damaged zone and stability of pressurized lined rock caverns for underground compressed air energy storage[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 46(5): 1113–1124.
- [ 71 ] KIM H M, RUTQVIST J, KIM H, *et al.* Failure monitoring and leakage detection for underground storage of compressed air energy in lined rock caverns[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(2): 573–584.
- [ 72 ] ZIMMELS Y, KIRZHNER F, KRASOVITSKI B. Design criteria for compressed air storage in hard rock[J]. *Energy and Environment*, 2002, 13(6): 851–872.
- [ 73 ] SERBIN K, ŚLIZOWSKI J, URBAŃCZYK K, *et al.* The influence of thermodynamic effects on gas storage cavern convergence[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 79: 166–171.
- [ 74 ] XIA C, ZHOU Y, ZHOU S, *et al.* A simplified and unified analytical solution for temperature and pressure variations in compressed air energy storage caverns[J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 718–726.
- [ 75 ] 夏才初, 赵海斌, 梅松华, 等. 埋深对压气储能内衬洞室稳定性影响的定量分析[J]. *绍兴文理学院学报(自然科学)*, 2016, 36(3): 1–7.  
XIA Caichu, ZHAO Haibin, MEI Songhua, *et al.* Quantitative analysis of impact of cover depth on stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage[J]. *Journal of Shaoxing University*, 2016, 36(3): 1–7.
- [ 76 ] ZHOU S W, XIA C C, ZHOU Y. Long-term stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage: thermo-mechanical damage modeling[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2018, 24(12): 2070–2093.
- [ 77 ] 蒋中明, 李 鹏, 赵海斌, 等. 压气储能浅埋地下储气库性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(1): 235–241.  
JIANG Zhongming, LI Peng, ZHAO Haibin, *et al.* Experimental study on performance of shallow rock cavern for compressed air energy storage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(1): 235–241.
- [ 78 ] JIANG Z, LI P, TANG D, *et al.* Experimental and numerical investigations of small-scale lined rock cavern at shallow depth for compressed air energy storage[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(6): 2671–2683.

- [79] 蒋中明, 郭菁, 唐栋. 压气储能地下储气库压缩湿空气热力学模型[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 638-646.  
JIANG Zhongming, GUO Jing, TANG Dong. A thermodynamic model of compressed humid air within an underground rock cavern for compressed air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 638-646.
- [80] 王其宽, 张彬, 王汉勋, 等. 内衬式高压储气库群布局参数优化及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1123-1131.  
WANG Qikuan, ZHANG Bin, WANG Hanxun, *et al.* Optimization and stability analysis of layout parameters of lined high-pressure gas storage caverns[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1123-1131.
- [81] 蒋中明, 唐栋, 李鹏, 等. 压气储能地下储气库选型选址研究[J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 6-16.  
JIANG Zhongming, TANG Dong, LI Peng, *et al.* Research on selection method for the types and sites of underground repository for compressed air storage[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3): 6-16.
- [82] 完颜祺琪, 丁国生, 赵岩, 等. 盐穴型地下储气库建库评价关键技术及其应用[J]. 天然气工业, 2018, 38(5): 111-117.  
WANGYAN Qiqi, DING Guosheng, ZHAO Yan, *et al.* Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. Natural gas industry, 2018, 38(5): 111-117.
- [83] 金维平, 彭益成. 硬岩地区压缩空气储能工程地下储气洞室选址方法研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(1): 63-67.  
JIN Weiping, PENG Yicheng. Underground gas storage cavern location method for compressed air energy storage engineering in hard rock area[J]. Electric Energy, 2017, 38(1): 63-67.
- [84] 刘澧源, 蒋中明, 王江营, 等. 压气储能电站地下储气库之压缩空气热力学过程分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(2): 232-238.  
LIU Liyuan, JIANG Zhongming, WANG Jiangying, *et al.* Thermodynamic analyses of compressed air energy storage in a underground rock cavern[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(2): 232-238.