

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405112

# 压缩空气储能系统地下人工硐室技术及其 评价技术研究

杜冬梅<sup>1</sup>, 段树洋<sup>1</sup>, 蒋志容<sup>2</sup>, 胡中波<sup>2</sup>, 何青<sup>1</sup>

(1.华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206;  
2.中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611100)

**[摘要]** 压缩空气储能是大规模长时间的新型物理储能形式。储气库是压缩空气储能系统中至关重要的组成部分。对常用储气装置特点进行分析与总结, 针对地下人工硐室进行比较详细的讨论; 对压缩空气储能系统地下人工硐室相对于其他类型储气库的优势进行了归纳; 对地下人工硐室承载结构、密封系统、传热管理系统等自身设计因素进行了分析; 分析讨论了影响地下人工硐室运行过程中的选址、埋深以及压力设计准则等关键技术; 对影响人工硐室稳定运行的相关因素提出了评价方法以及评价指标。在此基础上, 对压缩空气储能地下人工硐室未来发展方向进行了展望, 为地下人工硐室的结构合理性设计与稳定性运行提供参考。

**[关键词]** 储能; 压缩空气; 储气库; 人工硐室; 评价技术

**[引用本文格式]** 杜冬梅, 段树洋, 蒋志容, 等. 压缩空气储能系统地下人工硐室技术及其评价技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 1-10. DU Dongmei, DUAN Shuyang, JIANG Zhirong, et al. Underground artificial chamber technology and its evaluation technology of compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 1-10.

## Underground artificial chamber technology and its evaluation technology of compressed air energy storage system

DU Dongmei<sup>1</sup>, DUAN Shuyang<sup>1</sup>, JIANG Zhirong<sup>2</sup>, HU Zhongbo<sup>2</sup>, HE Qing<sup>1</sup>

(1.School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2.Chengdu Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Chengdu 611100, China)

**Abstract:** Compressed air energy storage is a new form of large-scale and long-term physical energy storage. Gas storage is a crucial component of compressed air energy storage system. The characteristics of common gas storage devices are summarized, and the underground artificial chamber is discussed in detail. The advantages of underground artificial chamber of compressed air energy storage system compared with other types of gas storage are summarized. The design factors such as bearing structure, sealing system and heat transfer management system of underground artificial chamber are analyzed. The key technologies affecting operation of the underground artificial chamber such as site selection, buried depth and pressure design criteria are analyzed and discussed. The evaluation method and evaluation indexes of the factors affecting stable operation of the artificial chamber are put forward. On this basis, the future development direction of compressed air energy storage underground artificial chamber is prospected, which provides a reference for rational design and stable operation of the underground artificial chamber.

**Key words:** energy storage; compressed air; gas storage; artificial chamber; evaluation technique

收稿日期: 2024-05-20 网络首发日期: 2024-08-28

基金项目: 国家自然科学基金企业联合基金重点项目 (U23B20145)

Supported by: Key Project of National Natural Science Foundation of China Enterprise Joint Fund (U23B20145)

第一作者简介: 杜冬梅 (1964), 女, 教授, 主要研究方向为压缩空气储能技术, ddongm@ncepu.edu.cn.

通信作者简介: 段树洋 (1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为压缩空气储能技术, shuyangd191114@163.com.

储能作为一项重要的灵活性调节资源，不仅能实现电力系统的削峰填谷，而且可以对风光等低品位电能进行升级，在电力系统发-输-配-用各环节的应用得到国内外业界广泛认可和高度关注。储能系统将是未来能源结构转变和电力生产消费方式变革的战略支撑。目前，存在的大规模物理储能包括压缩空气储能和抽水蓄能<sup>[1]</sup>。压缩空气储能可在容量、功率等级、放电时间、成本等方面都与抽水蓄能技术相近，在需要大规模储能但不具备应用抽水蓄能条件的情况下，压缩空气储能展现了巨大的应用潜力<sup>[2]</sup>。

压缩空气储能（compressed air energy storage, CAES）技术具有储能容量大、储能周期长、安全性能高等优点，能够满足大规模、长时间的储能需求。CAES 系统示意如图 1 所示。储能系统主要包括压缩机、膨胀机、冷却器、补热器、储热装置、储气装置、电动机和发电机。工作原理是：在用电低谷期，压缩空气储能将电网中多余的电量通过压缩机将空气压缩，以高压空气的形式进行储存；在用电高峰期，压缩空气驱动膨胀机做功发电。

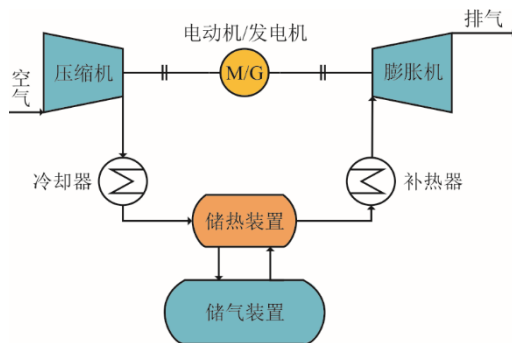


图 1 CAES 系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the CAES system

早期的压缩空气储能系统，通过燃烧燃料的方式对压缩空气进行加热，这个过程不仅增加了 CAES 系统的整体成本，同时也增加了二氧化碳排放量。针对目前 CAES 系统的热量管理方式对于整体性能的影响，衍生出多种不同类型的 CAES 系统技术路线，具体见表 1。

我国在建和拟建的 CAES 系统多采用目前处于国际领先水平的绝热技术。百兆瓦 CAES 系统效率约 70%，在效率和成本方面存在一定上升空间<sup>[9]</sup>。可通过改进能量储存或提高储能密度的方法进行系统提效。

CAES 系统储气装置起重要作用，根据储能系统的规模选择与之相适应的储气方式，有助于提升

系统整体经济性和适应性。根据储气装置所处位置将储气装置分为地上储气装置、地下储气装置、水下储气装置等多种储气方式，具体见表 2。

表 1 压缩空气储能技术类型及典型项目  
Tab.1 Types and typical projects of compressed air energy storage technology

类型	技术特点	典型项目	规模	效率/%
传统压缩空气储能 D-CAES	基于燃气轮机技术，存在燃烧室	德国 Huntorf 储能电站 <sup>[3]</sup>	290 MW×4 h	42.0
		美国 McIntosh 储能电站 <sup>[4]</sup>	110 MW×26 h	53.0
先进绝热压缩空气储能 AA-CAES	有蓄热装置，无燃烧室；膨胀机代替燃气轮机	河北廊坊先进绝热压缩空气储能系统	1.5 MW	52.1
		贵州毕节 10 MW 示范项目 <sup>[5]</sup>	10 MW×4 h	60.2
		江苏金坛国家试验示范项目	60 MW×5 h	60.0
液态压缩空气储能 LAES	有空气液化装置，空气以低温液态形式存储	英国 Highview Power 公司 <sup>[6]</sup>	5 MW×3 h	65.0
等温压缩空气储能 I-CAES	无蓄热装置和燃烧室	加拿大 Hydrostor 公司安大略湖 UCAES 项目 <sup>[7]</sup>	0.7 MW	
水下压缩空气储能 UCAES	储气装置位于水下，定压存储	加拿大 Goderich 市休伦湖商用 UCAES 项目 <sup>[8]</sup>	2.2 MW	

地下人工硐室相对于其他类型的储气库具有显著优势。地下人工硐室可以充分利用地下空间，不占用地表面积，这对城市或有限用地的地区具有重要价值。地下人工硐室对于一些极端天气和自然灾害具有抗干扰性，有助于提高储能系统的可靠性和稳定性，同时地下储气库可以容纳大容量的气体，通过高效气体压缩和释放过程，可以在能量转换中实现较低的能量损失，因此适用于长时间能量存储。由于地下人工硐室可以弥补大部分地下储气库在面对大规模储气时在选址问题上的局限性，因此，人工硐室在未来压缩空气储能系统中具有广阔的应用前景。

## 1 人工硐室技术

地下人工硐室环境可控，且可储存大量的压缩气体，在能源需求高峰时释放这些气体，以平衡能源供应。地下人工硐室的结构和部件设计旨在提供高效、稳定的气体储存环境。地下人工硐室的构成可分为硐室承载结构、硐室密封系统以及硐室热管理系统 3 部分。地下人工硐室结构示意图如图 2 所示。

围岩稳定性、硐室密封性、温度场分布是地下人工硐室稳定运行的 3 个重要因素。

表 2 压缩空气储能储气装置类型及示范项目  
Tab.2 Storage device types and demonstration projects of compressed air storage

储气装置分类	特点	工程应用
地上储气装置	钢制储气罐或钢瓶组	使用灵活, 选址方便, 价格低廉, 强度较高, 便于维护; 效率较低, 不利于散热, 泄露概率较大, 不适合大规模储气
	管道	中国科学院工程热物理研究所 1.5 MW 和 10 MW 项目 <sup>[10]</sup>
地下储气装置	盐穴储气库	储存能力大, 能量密度高, 地质稳定性好; 选址受限, 符合地质条件的盐穴较少
	地下无衬隧洞	天然密封性好, 无需进行二次构造, 地质工程干预需求低, 地质构造危险小, 建造成本低; 符合密封条件并达到储气强度要求的隧洞较少
	地下含水层	大规模储气经济型较好; 岩体要求比较高, 垫气层耗气较大, 含水层渗透性较难控制
	地下人工硐室	美国 IMAU 在建项目; 意大利 Sesta25 MW 多孔岩层 CAES 系统 <sup>[14]</sup>
水下储气装置	刚性混凝土储气库	易于控制储气库的内部压力, 理论效率较高; 对操作工艺要求较高, 交变载荷产生脆性破坏
	柔性复合材料储气库	北卡罗来纳大学 Lim 等人 <sup>[15]</sup> 设计的混凝土储气库
		多伦多 600 kW 水下压缩空气储能示范工程 <sup>[16]</sup>

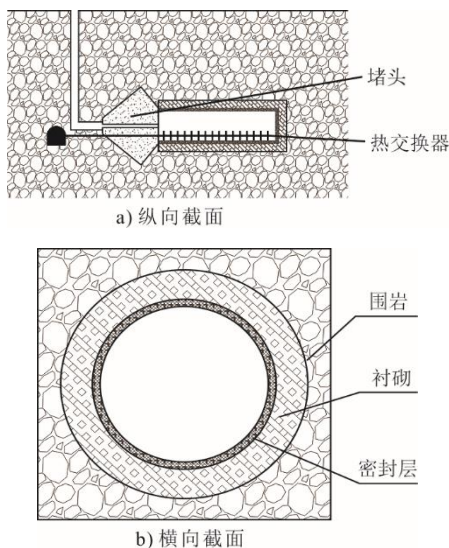


图 2 地下人工硐室结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of underground artificial chamber

### 1.1 硐室承载结构

地下人工硐室通常采用埋藏于地下的巨大洞穴或开采而成的硐室结构。这些硐室具有坚固的岩石墙壁, 以承受储存气体的高压力。地下人工硐室往往需要 1 层混凝土衬砌位于围岩与气体之间, 保证硐室结构足以承受充放气过程中的受力变化。影响硐室承载结构稳定性的因素很多, 如硐室自身形状、硐室衬砌材料等。

#### 1.1.1 硐室形状

硐室形状对于压缩空气储能系统地下人工硐室的设计和性能有重要影响。不同形状的硐室在受力分布、建造难度、空间利用效率以及系统稳定性等方面都有所不同。张建国等<sup>[17]</sup>利用 FLAC 3D 软件对不同截面形状隧道的开挖进行了数值模拟仿真计算, 通过分析隧道四周围岩的应力分布、塑性区范围, 比较了不同截面形状的影响。何伟珺等<sup>[18]</sup>通过使用 FLAC 3D 软件, 充分考虑埋深、侧压力系数、硐室截面形状对围岩塑性因子的影响, 指出圆形截面变形量最小。王来贵等<sup>[19]</sup>对多种不同截面形状的硐室进行了拉张破裂有限元仿真, 得出了各种截面形状的硐室破坏形式。表 3 为不同硐室截面形状的特点。针对不同截面形状硐室的受力、建造、变形特点, 以及目前实践工程所采用的方案效果, 圆形截面硐室在结构稳定性、施工便利性以及环境适应性等方面表现最好。

表 3 地下人工硐室截面形状及特点  
Tab.3 Section shape and characteristics of underground artificial chamber

硐室截面	特点
圆形	受力沿壁面均匀分布, 稳定性高, 变形量小; 容易施工, 减少了地下挖掘和支护过程的复杂性
椭圆形	适应地下岩层形状, 复杂地质环境适应性强; 结构均匀性差, 长轴侧容易出现应力集中
方形/矩形	空间利用效率高, 方便规整布局; 施工复杂, 拐角处支护和受力分布复杂, 可靠性低
直墙拱形	顶部受力均匀, 稳定性高, 空间利用率大; 底部容易出现应力集中, 可靠性低, 支护施工复杂
不规则形状	根据具体地质条件设计, 适应复杂的地下环境; 施工难度较大, 经济性较低

#### 1.1.2 硐室衬砌

常见内衬型人工硐室基本结构包括密封层、衬砌和围岩等。衬砌位于密封层与围岩之间作为支撑结构, 将储气硐室内部的高压传递到围岩, 同时为了保证硐室密封性, 衬砌为后续的密封层安装提供便于施工的表面。

王其宽等<sup>[20]</sup>通过数值仿真计算验证了衬砌约束作用对硐室围岩塑性区发育存在明显抑制作用。压缩空气储能电站通常采取日循环的方式运行,衬砌与围岩会受到累积的循环载荷影响,应结合所选材料的强度、韧性和蠕变特性等,考虑重复压力循环导致的衬砌材料疲劳影响<sup>[21]</sup>,防止围岩发生失稳破坏。蒋中明等<sup>[22]</sup>分析了衬砌与围岩间的接触面在循环工况下的开合度,指出储气库在循环应力作用下,混凝土堵头可能会产生张拉开裂变形,衬砌存在开裂以及衬砌与围岩发生分离的情况。

## 1.2 硐室密封系统

在硬岩中建设人工硐室时,天然岩石的裂隙和混凝土内衬的高渗透性会对硐室密封性造成影响,从而降低储气库运行效率。为此,需要采取密封措施来确保人工硐室密封性。硐室密封措施主要包括 2 部分:一部分为硐室内部密封层设计;另一部分为储气库堵头设计。

### 1.2.1 密封层设计

在硬岩地下人工硐室内部添加 1 层人工屏障来提高硐室气密性,是目前采用较多的密封方案。这种方法旨在有效填补或封闭天然岩石裂隙和节理,以减少气体泄漏可能性,从而确保储气库稳定运行<sup>[23]</sup>。但往往混凝土材质内衬不足以保证储气库密封性,因此还需在衬砌内侧添加 1 道密封层。

现有的硬岩地层储气库一般采用钢板作为密封材料,除了钢板还使用玻璃钢和高分子材料等作为密封层,材料不同对施工难度以及密封效果影响不同。Hori 等人<sup>[24]</sup>以合成橡胶为密封材料在日本北海道建立了内压为 8 MPa 的储气硐室,测试气体泄漏量为 0.2%,满足气体泄露要求,验证了高分子材料作为密封材料的可行性。目前,国内外采用的密封材料主要类型及特点见表 4。

表 4 不同密封材料特点  
Tab.4 Characteristics of different sealing materials

材料	优点	缺点
钢板	加工和安装标准化,施工方便,具有高强度和刚性,能够提供有效结构支撑;抗腐蚀性好,使用寿命长	钢材价格相对较高,钢板密封层的建设较为昂贵
玻璃钢	相对轻便,适应性强,施工条件宽松;质量轻,强度高,使用寿命长,耐腐蚀性能好	制作工艺复杂,制造成本较高;耐高温性能差,适用工况苛刻
高分子材料	材料柔软性好,适应性强,安装容易;耐腐蚀性好,适应地下环境;成本较低,适于较大规模的使用	材料耐久性差,寿命周期短;耐高温性能差,条件要求高。

### 1.2.2 堵头设计

地下人工硐室的堵头多采用混凝土设计,混凝土堵头作为保证储气库密封的重要部件之一,需要保持足够的强度来确保储气库内部空间的封闭性与结构的稳定性。Perazzelli 等人<sup>[25]</sup>通过数值仿真软件模拟储气库堵头区域受力,考虑了作用在堵头上的荷载,得到堵头区与围岩的分离状况。Kannan 等人<sup>[26]</sup>从储气库堵头的施工设计要求角度对堵头受力进行研究。Park 等人<sup>[27]</sup>运用 FLAC 2D 软件对不同形状的压缩空气储能硐室堵头进行研究,发现楔形堵头与锥形堵头的稳定性优于柱形堵头与嵌入式堵头。Hökmark<sup>[28]</sup>通过研究储气库堵头与围岩接触槽形状之间的力学相互作用,对围岩机械稳定性进行了研究。王祥峰等<sup>[29]</sup>采用 FZFX 3D 软件对混凝土施工过程进行了全过程仿真计算,比较了不同混凝土对堵头温度场和应力场的影响。

### 1.3 传热管理系统

国内外许多学者对储气库内部热力学特性进行了研究。Raju 等人<sup>[30]</sup>以 Huntorf 电厂为例,建立了岩洞内压缩空气储能的精确动态仿真模型,采用硐室真实传热数据,与绝热和等温的结果进行了对比,探究了传热系数对储气库的影响。刘澧源等<sup>[31]</sup>使用 FLAC 3D 软件,考虑了围岩传热的影响,研究了压缩空气储能地下人工硐室的热力学过程,得出了压缩空气与围岩进行对流换热而温度降低的结论。

在压缩空气储能系统的运行过程中,地下人工硐室的内部温度和压力会随着 CAES 系统运行呈现出周期性变化。Kushnir 等人<sup>[32]</sup>基于质量和能量守恒方程,推导了气穴温度的数值解和近似解析解,并通过进行敏感性分析确定影响储存温度的主要参数,发现与绝热条件相比,洞壁的传热对空气温度和压力变化有很大影响,并推导出了硐室内部气体温度与压力之间的关系偏微分方程:

$$V\rho_c \frac{dT}{dt} = F_i(t)\dot{m}_c \left[ h_i - h + ZRT - \rho \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_T + \frac{v_i^2}{2} + g\Delta z_i \right] + F_e(t)\dot{m}_c \left[ ZRT - \rho \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_T + \frac{v_e^2}{2} + g\Delta z_e \right] \quad (1)$$

式中:  $v^2/2$  和  $gz$  分别为单位质量的动能和势能;  $V$  为硐室体积,  $m^3$ ;  $\rho$  为硐室内气体密度,  $kg/m^3$ ;  $T$  为硐室内部气体温度,  $K$ ;  $t$  为计算时间,  $s$ ;  $F_i$  与  $F_e$  为具有周期时间的无量纲周期函数; 下标  $i$  和  $e$  分别表示硐室充、放气状态;  $\dot{m}_c$  为气体流量,  $kg$ ;

$c_v$  为比定容热容;  $h_i$  为注入气体焓值, J;  $h$  为硐室气体焓值, J;  $Z$  为空气压缩因子;  $R$  为气体常数;  $u$  为硐室气体内能。由式(1)可见, 硐室充放气循环情况下, 内部气体温度与硐室内能之间的变化关系。

硐室内气体温度变化对系统整体效率存在一定影响, 为了使得储气过程中气体温度保持在一定范围内, 有必要对气体进行补热。国内关于硐室内温度补热系统鲜有提及。蒋中明<sup>[22]</sup>在进行浅埋储气库实验时, 创造性地引入了一种水循环换热系统对硐室内气体进行补热, 有效缓解了储气过程中气体温度下降的影响, 可为压缩空气储能设计提供参考。

## 2 影响人工硐室设计主要因素

在进行储气库建造之前, 首先根据储气硐室的储气要求, 确定储气库的储气规模, 进行储气库的选址, 并选择合适的埋深等。

### 2.1 选址条件

地下人工硐室选址对于人工硐室建造非常重要。需要考虑地下岩石的类型, 不同类型的岩石强度和透水性不同。硬岩(如花岗岩)具有岩体质量好、强度高、变形模量大等优点, 因此通常更适合用于硐室建设<sup>[15]</sup>。Curtis 等人<sup>[33]</sup>通过数值仿真软件对瑞典某储气库进行仿真计算, 研究围岩受力变形情况, 通过与实测数据进行对比分析, 论证了在岩体强度较好的情况下采用轻质支护的可行性, 并建议在建设储气库时应避开软弱结构面。当储气库的结构处于岩体结构较弱的区域时, 需要更加复杂的支护结构, 同时增加了硐室在面对循环加载工况下, 围岩受力变形的不确定性。

地下人工硐室在长期运行状态下稳定性及安全性与岩石流变特性紧密联系<sup>[34]</sup>, 对于岩石进行流变特性测试实验是研究选址地点岩石稳定性有效手段之一。Tillerson 等人<sup>[35]</sup>通过进行盐岩长期蠕变试验获得了盐岩蠕变规律, 并采取数值仿真计算方法分析了美国墨西哥海湾盐岩储气库的长期稳定性。Zhang 等人<sup>[36]</sup>采用物理模拟试验和数值模拟方法, 研究了层状盐岩在不同倾角下的力学特征, 分析了地下储气库层状围岩的破坏机理。

地下水位是影响硐室选址的重要因素, 会对硐室结构产生重要影响。硐室轴线的设计应尽量避免穿越沟谷、山脊鞍部以及大型喀斯特汇水洼地等负地形<sup>[37]</sup>, 这些地方通常具有较高的地下水位并存在土壤侵蚀等潜在问题, 可能会导致涌水问题。万发

等<sup>[38]</sup>采用数值仿真方法, 分析了地下水对 CAES 系统地下人工硐室稳定性的影响, 为选址、设计工作提供了科学依据。

### 2.2 硐室埋深

硐室深度是影响硐室建设和运营的重要因素, 直接关系到建设成本和难度<sup>[39]</sup>。硐室埋深越深, 建设成本随之增高, 同时获得更高的储气能力。设计硐室结构时需要考虑地下岩体对硐室的力学作用, 确保硐室具有足够的强度以抵抗岩体的压力。Perazzelli 等人<sup>[25]</sup>的研究指出, 在抗压强度为 5~60 MPa, 内摩擦角为 30°~40°的岩层中建设洞径为 4 m 的隧道式储气库, 只需要 60~120 m 的埋深便足以保证硐室的稳定性运行。

储气库内部所受压力和变形会随着埋深的增加而增大, 在储气库设计阶段, 综合考虑地面活动影响以及地层压力对硐室内部的压迫, 需要选择合适的埋藏深度来建设人工硐室。夏才初<sup>[40]</sup>采用数值仿真计算方法, 对不同埋深情况下储气库的受力变形情况进行研究, 得到了埋深对硐室稳定性的影响情况。梁光川等<sup>[41]</sup>使用 FLAC 3D 软件模拟了不同埋藏深度情况下的储气库变形情况。

不同类型岩石往往结构强度存在差异, 像页岩等软岩地质进行储气库建造, 埋藏深度一般需要高达 500 m, 而像石灰岩、花岗岩等硬岩地层则可进行深埋, 考虑到经济性, 也可进行浅埋。近年来, 国内外学者对于硐室埋深试验进行了大量研究。国外对于浅埋地下储气试验库的研究多集中在理论分析与数值模拟等<sup>[42]</sup>。徐英俊等<sup>[43]</sup>采用极限内压法, 选用更大的抗隆起稳定性安全系数, 计算得出所需岩体覆盖厚度更小, 为浅埋硐室提供了理论参考。蒋中明等<sup>[22]</sup>通过进行浅埋储气库试验, 证明了 CAES 系统地下人工硐室的实践可行性, 并为国内浅埋储气库的设计提供了参考。

在人工硐室埋深方面, 选择合理的埋深和人工硐室容量对于储气库高效运行尤为重要。从经济性角度出发, 根据选址所在地地质情况、硐室容量要求以及运行工况, 选择合理的埋深将会极大地影响 CAES 系统地下人工硐室建设及运维成本。在此基础上, 针对特定的埋深及地质情况, 选择出最具经济性与稳定性的埋深将会极大地降低硐室的成本。

### 2.3 硐室压力设计准则

在进行地下人工硐室设计之前, 首先对储气能力进行设计。将硐室围岩假定为理想弹塑性材料,

采用 Mohr-Coulomb 强度准则<sup>[44]</sup>:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c \cos \varphi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \quad (2)$$

式中:  $\sigma_1$  为最大主应力, MPa;  $\sigma_3$  为最小主应力, MPa;  $c$  为岩石的黏聚力, MPa;  $\varphi$  为岩石内摩擦角, °。

地下人工硐室在运营期间储气压力在规定范围内波动, 上限压力与下限压力是影响储气库建设的重要指标, 对建设地下人工硐室的可行性与经济性具有重要指导意义<sup>[45]</sup>。硐室满负荷储气时的最高储气压力为上限压力  $p_{\max}$ 。硐室能够稳定运行的最小待储压力下限压力  $p_{\min}$ 。根据静平衡原理分析硐室在全运行周期内的各种破坏状态, 确保上限压力小于或等于上覆岩体的压力, 进而求得上限压力的方法为极限平衡法。常见的计算模型为直线破坏模型<sup>[46]</sup>和刚性锥模型<sup>[46]</sup>, 上覆岩体破坏模型示意如图 3 所示<sup>[47]</sup>。

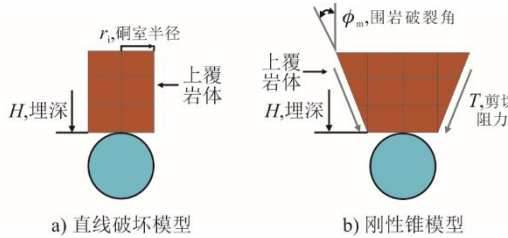


图 3 上覆岩体破坏模型示意

Fig.3 Schematic diagram of overlying rock mass failure model

直线破坏模型仅仅计算了硐室正上方的覆盖岩体压力, 忽略了上覆岩石的抗剪强度, 不能有效计算出硐室的抗隆起能力。刚性锥模型相对直线破坏模型添加了抗剪强度和抗压强度等因素, 将上侧岩体简化为圆台状, 充分考虑了侧面岩体对于储气库的影响。硐室上覆岩体重量不小于作用于硐室围岩面积上的垂直上抬压力<sup>[48]</sup>, 这就是挪威设计准则。该理论不仅应用于圆形硐室, 也适用于其他形状的人工硐室。

Damasceno 等人<sup>[49]</sup>将上覆岩体等效为圆台体, 用来抵抗人工硐室上抬的阻力, 并使得该压力大于硐室上限压力:

$$p_{\max} \leq R_w = \frac{H \rho g [r_i^2 + (r_i + H \tan \phi_m)^2 + r_i (r_i + H \tan \phi_m)]}{6r_i^2} \quad (3)$$

式中:  $H$  为埋深, m;  $\rho$  为岩体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $r_i$  为硐室半径, m;  $\phi_m$  为围岩破裂角, 取  $45^\circ - \varphi/2$ 。

徐英俊<sup>[43]</sup>结合极限分析上限定理, 采用较大的

安全系数, 推导出了硐室抗隆起破坏函数和极限内压表达式, 有效降低了硐室埋深。

$$p_{\max} = \rho g H + \frac{1}{r_i} \left( \frac{1}{2} k \rho g H^2 \tan \varphi + c H \right) \quad (4)$$

式中:  $k$  为侧压力系数,  $k = \nu / (1 - \nu)$ ,  $\nu$  为泊松比;  $c$  为围岩内聚力, MPa;  $\varphi$  为围岩内摩擦角, °。

王者超等<sup>[44]</sup>将围岩假定为弹塑性材料, 服从 Mohr-Coulomb 强度准则, 利用弹塑性理论给出了上限压力与下限压力的解析解:

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

$$R_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

$$p_{\max} = \begin{cases} (\lambda + 1)q_0 + 2(1 - \lambda)q_0, & \lambda \leq 1 \\ (\lambda + 1)q_0 - 2(1 - \lambda)q_0, & \lambda > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$p_{\min} = \begin{cases} \frac{(\lambda + 1)q_0 - 2(1 - \lambda)q_0 - R_c}{\xi + 1}, & \lambda \leq 1 \\ \frac{(\lambda + 1)q_0 + 2(1 - \lambda)q_0 - R_c}{\xi + 1}, & \lambda > 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $p_{\max}$  为上限压力, MPa;  $p_{\min}$  为下限压力, MPa;  $q_0$  为上覆岩体施加的重力, N。上述的弹塑性理论, 针对围岩进行设计, 忽略衬砌的影响。

### 3 地下人工硐室评价

地下人工硐室对于 CAES 系统的安全可靠运行至关重要, 为全面了解储气库储气性能, 需要 1 套完善的评价系统。

#### 3.1 评价技术

##### 3.1.1 现场评价方法

现场评价方法是通过对选址地地质条件进行精细地质勘测, 了解岩石的分布特点和岩石类型。在金坛、平顶山储气库建设过程中, 开发了高精度三维地震解释、盐层岩性识别等独特技术<sup>[47]</sup>。应用这套理论, 可以对岩石进行精确评价。

##### 3.1.2 稳定性评价

对人工硐室进行稳定性评价, 合理设计人工硐室许用应力范围, 以保证人工硐室在长期交替注采工况下的稳定安全, 降低破坏风险。稳定性评价的方法包括地质测试和稳定性数值模拟。

1) 地质测试主要包括采取单轴和三轴抗压强度试验、拉伸试验、剪切试验和蠕变试验等, 通过

准确研究岩石的损伤过程,得到岩石断裂机理和蠕变机理<sup>[50]</sup>。为了准确研究人工硐室运行过程,可以采用小型化试验,在一定程度上缩小硐室规模,研究岩石物理特性与运行情况<sup>[22]</sup>。

2) 稳定性数值模拟采用岩石弹塑性理论与数值计算方法,建立人工硐室数值模型,利用该模型可以对特定工况的人工硐室进行注采仿真模拟,进而评估人工硐室的结构稳定性。

### 3.1.3 密封性评价

对人工硐室进行密封性评价,合理规划人工硐室的允许泄漏率,以保证硐室运行过程中的运行效率,提高系统水平。密封性评价方法包括材料试验和数值模拟方法。

1) 材料试验主要包括三轴试验、压水试验、原位渗透实验和封孔试验等,可获得密封材料的孔隙度和渗透率等<sup>[51]</sup>。为了准确研究密封材料的密封性,可以进行材料成分分析,使用 X 射线研究内部矿物成分对岩石密封性的影响;进行材料微观结构分析,了解材料微观结构,研究密封材料孔隙分布和裂隙发育情况。

2) 密封性数值模拟仿真使用渗流模拟软件,模拟流体在不同材料中的流动情况,评估材料密封性对人工硐室的影响。使用流体仿真软件,建立不同工况下的仿真模型,研究不同人工硐室密封材料的密封性效果。

### 3.1.4 人工硐室运行评价

由于气体存在各向同性,在流体运行过程中对于人工硐室运行影响最大的因素是温度,因此传热管理是人工硐室的重要评价指标。地下人工硐室的传热管理包括材料热力学试验和传热数值模拟。

1) 材料热力学试验包括岩样热传导实验和热响应测试等。岩样热传导实验通过采集人工硐室所在地层岩石样品,测量其传导率。热响应测试则是通过进行小型化试验评估各种类型硐室的传热性能。

2) 通过数值仿真模拟,可以更准确定量讨论人工硐室的形状、大小以及布置形式等因素对流场内部传热的影响,分析人工硐室内部流体与密封层,不同结构所选用的材料之间,硐室材料与地层之间的传热影响,从而得到评估人工硐室的传热影响。

## 3.2 评价指标

地下人工硐室的评价系统包括储气密封性评价、结构稳定性评价、传热稳定性等,具体内容见表 5。

表 5 地下人工硐室评价指标  
Tab.5 Evaluation indexes of underground artificial chamber

名称	因素	内容
结构稳定性 <sup>[57]</sup>	1) 围岩稳定性 2) 载荷承载部件受力变形	1) 围岩的抗压、抗震、防滑坡能力 2) 衬砌和堵头的受力类型、受力大小、受力方向等 3) 衬砌和堵头的变形类型、变形程度、变形速度等 4) 衬砌和堵头受力变形相互作用,堵头对衬砌的支撑作用,衬砌对堵头的约束作用
储气密封性 <sup>[57]</sup>	1) 密封层气密性 2) 堵头气密性 3) 堵头和衬砌连接气密性	1) 储气库内部密封层和堵头的气密性问题导致空气泄露 2) 储气库衬砌产生裂隙,产生压力损失 <sup>[51]</sup> 3) 合理的堵头结构,与围岩连接部分的裂隙
传热管理 <sup>[28]</sup>	1) 硐室热传导能力 2) 硐室热稳定性	1) 储气库与周围地层的热传导能力,周围地层温度对储气库内部温度影响 2) 储气库衬砌、堵头等所用材料的热应力、热膨胀影响 3) 储气库内部气体的热应力、热膨胀影响

## 4 结论与展望

本文研究了 CAES 系统的工作原理及构成,简要分析了几种不同技术路线的 CAES 系统区别以及目前 CAES 系统存在的问题,针对不同 CAES 系统储气库进行了简单分析,并对地下人工硐室储气方式进行详细介绍与讨论。目前,CAES 系统储气方式多样,随着 CAES 系统规模的加大,储气要求日益提高,人工硐室的优越性十分明显。本文从地下人工硐室的设计考虑因素与具体参数以及技术评价指标方面,对地下人工硐室进行了讨论。

1) 地质条件是影响地下人工硐室的关键因素,选址需要考虑当地地质是否具有开挖条件,对岩石进行稳定性评估,充分考虑硐室的容量以及埋深。硐室运行工况将极大地影响硐室围岩结构稳定性,应结合压力设计准则对地下人工硐室的规模进行开发。

2) 硐室截面形状、硐室埋深、硐室衬砌材料、密封材料与密封堵头设计以及热管理系统等设计因素对地下人工硐室的稳定性运行至关重要,在进行设计时,应该结合各因素综合考虑。

3) 地下人工硐室结构稳定性、储气硐室密封性以及传热稳定性等关键指标都是影响地下人工硐室稳定运行的重要因素。在进行人工硐室的建造时,应该针对上述指标对于人工硐室的整体性能进行综合评价。

未来,人工硐室技术应该在以下几个方面进行深入的理论研究和应用技术探索。

1) 对不同类型的岩层以及相应深度进行结构强度与储能效率仿真模拟,并对施工经济性进行定量计算,得出针对相应储能规模的最优方案。

2) 采用控制变量法对于影响地下人工硐室的因素逐个进行讨论,综合所有因素得出地下人工硐室最优布置方案。采用数值仿真计算方法并结合实际工况对所得结果进行仿真模拟,验证方案的准确性与经济性。

3) 建立数值仿真试验,对特定工况下的内部流场情况进行模拟,观测湿空气对于内部流场的影响,并制定出现问题后的排水处理方案。本文认为应该结合对湿空气的除湿成本与排水处理方案之间的经济性问题以及储气效率等因素,定量分析压缩气体含湿量对于CAES系统的整体影响。

#### [参考文献]

- [1] 王强,张雪辉,王喆,等. 储能实验中心建设管理对储能技术发展的影响——以毕节国家能源大规模物理储能技术研发中心为例[J]. 科技和产业, 2022, 22(11): 367-373.  
WANG Qiang, ZHANG Xuehui, WANG Zhe, et al. The influence of the construction and management of energy storage experimental center on the development of Energy storage technology: taking national energy large scale physical energy storage technologies R&D center of Bijie as an example[J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(11): 367-373.
- [2] 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.
- [3] 罗宁,何青,刘文毅. 压缩空气储能系统储气装置研究现状与分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(3): 489-494.  
LUO Ning, HE Qing, LIU Wenyi. The development status and energy storage characteristic of gas storage device of compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(3): 489-494.
- [4] RABI A M, RADULOVIC J, BUICK J M. Comprehensive review of compressed air energy storage (CAES) technologies[J]. Thermo, 2023, 3(1): 104-126.
- [5] 吴全,孙春良,郭海涛,等. 压缩气体储能技术经济特点和发展方向探析[J]. 油气与新能源, 2023, 35(6): 90-98.  
WU Quan, SUN Chunliang, GUO Haitao, et al. Analyzing the technological and financial features and prospects for compressed gas energy storage technologies[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(6): 90-98.
- [6] 孙晓霞,桂中华,张新敬,等. 压缩空气储能与可再生  
能源耦合研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9224-9242.  
SUN Xiaoxia, GUI Zhonghua, ZHANG Xinjing, et al. Research progress on compressed air energy storage coupled with renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9224-9242.
- [7] CARUSO B. Modular undersea compressed air energy storage (UCAES) system[C]//Peer Review and Update Meeting 2012: US department of energy storage systems program (ESS), Washington DC. September 27, 2012. 2012.
- [8] 王志文. 水下压缩空气储能系统设计与能效分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2018: 1.  
WANG Zhiwen. Design and energy analysis of underwater compressed air energy storage system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018: 1.
- [9] 李季,黄恩和,范仁东,等. 压缩空气储能技术研究现状与展望[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(2): 86-89.  
LI Ji, HUANG Enhe, FAN Rendong, et al. Research status and development prospects of compressed air energy storage technology[J]. Turbine Technology, 2021, 63(2): 86-89.
- [10] GUO C, XU Y, GUO H, et al. Comprehensive exergy analysis of the dynamic process of compressed air energy storage system with low-temperature thermal energy storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 684-693.
- [11] CHEN H, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.
- [12] 刘金超,徐玉杰,陈宗衍,等. 压缩空气储能储气装置发展现状与储能特性分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(35): 148-156.  
LIU Jinchao, XU Yujie, CHEN Zongyan, et al. The development status and energy storage characteristic of gas storage device of compressed air energy storage system[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(35): 148-156.
- [13] 刘笑驰,梅生伟,丁若晨,等. 压缩空气储能工程现状发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47.  
LIU Xiaochi, MEI Shengwei, DING Ruochen, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47.
- [14] ECKROAD S, GYUK I. EPRI-doe handbook of energy storage for transmission & distribution applications[R]. Electric Power Research Institute, Inc, 2003: 3-35.
- [15] LIM S D, MAZZOLENI A P, PARK J, et al. Conceptual design of ocean compressed air energy storage system[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(2): 70-81.
- [16] KESSELI J, EVERBECK C, CARUSO W. Modular undersea compressed air energy storage (UCAES) System[R]. Brayton Energy, LLC, Hampton, NH (United States), 2014: 20.
- [17] 张建国,张营,陈允斌,等. 基于FLAC3D在不同断面形状下隧道围岩的稳定性分析[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(6): 136-138.  
ZHANG Jianguo, ZHANG Ying, CHEN Yunbin, et al. Stability analysis of tunnel surrounding rock under different cross-section shapes based on FLAC 3D[J]. Building Technology Development, 2021, 48(6): 136-138.

- [18] 何伟珺, 杨玉顺, 许磊, 等. 不同断面形状硐室围岩稳定性模拟研究[J]. 煤炭科技, 2024, 45(1): 110-116.  
HE Weijun, YANG Yushun, XU Lei, et al. Simulation study on stability of surrounding rock of chambers with different cross-section shapes[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2024, 45(1): 110-116.
- [19] 王来贵, 初影, 赵娜. 不同形状硐室拉张破裂有限元数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(3): 462-466.  
WANG Laigui, CHU Ying, ZHAO Na. Finite element numerical simulation of tension fracture with different shape chamber[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, 25(3): 462-466.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 蒋中明, 李鹏, 赵海斌, 等. 压缩空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.
- [23] 叶斌, 程子睿, 彭益成. 压缩空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.
- [24] HORI M, GODA Y, ONISHI H. Mechanical behaviour of surrounding rock mass and new lining structure of air-tight pressure cavern[C]//ISRM Congress. ISRM, 2003: ISRM-10CONGRESS-2003-088.
- [25] PERAZZELLI P, ANAGNOSTOU G. Design issues for compressed air energy storage in sealed underground cavities[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(3): 314-328.
- [26] USMANI A, KANNAN G, NANDA A, et al. Analysis and design approach for concrete plugs for underground storage caverns[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2016, 21(1): 04015004.
- [27] PARK D H, KIM H M, RYU D W, et al. Numerical study on the optimal shape of concrete plug for compressed air energy storage caverns[J]. Tunnel and Underground Space, 2011, 21(3): 164-173.
- [28] HÖKMARK H. Numerical study of the performance of tunnel plugs[J]. Engineering Geology, 1998, 49(3/4): 327-335.
- [29] 王祥峰, 林云, 李洋波, 等. 溪洛渡导流洞堵头混凝土温控设计研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 14-18.  
WANG Xiangfeng, LIN Yun, LI Yangbo, et al. Study of river diversion tunnel plugging concret temperature control of Xiluodu Hydropower Station[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2012, 34(5): 14-18.
- [30] RAJU M, KHAITAN S K. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 474-481.
- [31] 刘澧源, 蒋中明, 王江营, 等. 压缩空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): 232-239.  
LIU Liyuan, JIANG Zhongming, WANG Jiangying, et al. Thermodynamic analyses of compressed air energy storage in an underground rock cavern[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(2): 232-239.
- [32] KUSHNIR R, DAYAN A, ULLMANN A. Temperature and pressure variations within compressed air energy storage caverns[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22): 5616-5630.
- [33] GLAMHEDEN R, CURTIS P. Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(1): 56-67.
- [34] 何田. 基于围岩长期稳定性的地下罐式储气硐室结构形式研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023: 5.  
HE Tian. Research into the structural form of underground gas storage chambers based on the long-term stability of the surrounding rock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023: 5.
- [35] TILLERSON J R. Geomechanics investigations of SPR crude oil storage caverns[R]. Sandia Labs, Albuquerque, NM (USA), 1979: 5.
- [36] ZHANG G, WANG L, WU Y, et al. Failure mechanism of bedded salt formations surrounding salt caverns for underground gas storage[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76: 1609-1625.
- [37] 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]. Power & Energy, 2017, 38(1): 63-67.
- [38] 万发, 蒋中明, 廖峻慧, 等. 地下水对 CAES 地下储气库气密性和围岩稳定性影响[J/OL]. 岩土工程学报, 1-10 [2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240326.1804.006.html>.  
WAN Fa, JIANG Zhongming, LIAO Junhui, et al. Study on the influence of groundwater on air tightness and surrounding rock stability of CAES underground gas storage[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1-10 [2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240326.1804.006.html>.
- [39] 蒋中明, 唐栋, 李鹏, 等. 压缩空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.
- [40] 夏才初, 赵海斌, 梅松华, 等. 埋深对压力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(9): 1-7.
- [41] 梁光川, 李庆, 彭星煜, 等. 埋藏深度对盐岩储气库溶腔变形的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016,

- 12(10): 74-80.  
LIANG Guangchuan, LI Qing, PENG Xingyu, et al. Research on influence of buried depth to cavity deformation of salt rock gas storage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(10): 74-80.
- [42] KIM H, RUTQVIST J, JEONG J, 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, 2013, 46(5): 1113-1124.
- [43] 徐英俊, 夏才初, 周舒威, 等. 基于极限分析上限定理的压缩空气储能洞室抗隆起破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 1971-1980.  
XU Yingjun, XIA Caichu, ZHOU Shuwei, et al. Anti-uplift failure criterion of caverns for compressed air energy storage based on the upper bound theorem of limit analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(10): 1971-1980.
- [44] 王者超, 贾文杰, 冯夏庭, 等. 隧洞式内衬储气库极限储存压力解析解[J]. 力学学报, 2023, 55(3): 710-718.  
WANG Zhechao, JIA Wenjie, FENG Xiating, et al. Analytical solution of limit storage pressures for tunnel type lined gas storage caverns[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(3): 710-718.
- [45] 王者超, 李嘉祥, 郝薛将, 等. 压缩空气储能地下内衬洞室建设中若干关键问题研究进展[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(1): 1-13.  
WANG Zhechao, LI Jiaxiang, HAO Xuejiang, et al. A review of several issues for compressed gas energy storage in lined rock cavern[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(1): 1-13.
- [46] GHALY A, HANNA A. Ultimate pullout resistance of single vertical anchors[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(5): 661-672.
- [47] WANYAN Q, RAN L N, HAN B J, et al. Study on site selection and evaluation of underground gas storage in salt cavern[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(1): 57.
- [48] BASNET C B, PANTHI K K. Analysis of unlined pressure shafts and tunnels of selected Norwegian hydropower projects[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 486-512.
- [49] DAMASCENO D R, SPROSS J, JOHANSSON F. Reliability-based design methodology for lined rock cavern depth using the response surface method[C]//ISRM EUROCK. ISRM, 2020: ISRM-EUROCK-2020-163.
- [50] WANYAN Q, DING G, ZHAO Y, et al. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. Natural Gas Industry B, 2018, 5(6): 623-630.
- [51] 赵春, 贺梦琦, 陈显学, 等. 储气库井水泥环密封性失效试验研究[J]. 石油机械, 2024, 52(6): 78-85.  
ZHAO Chun, HE Mengqi, CHEN Xianxue, et al. Experimental study on sealing failure of cement sheath in gas storage wells[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 25(6): 78-85.

(责任编辑 杨嘉蕾)