



**编者按:**《岩土力学》期刊社自 2021 年起开辟“岩土力学卓越论坛”栏目,主要刊登我国岩土力学与工程界著名专家学者及其研究团队的科研成果和重大项目研究新进展,进一步推动岩土力学与工程领域的学术交流,促进中国岩土力学与工程的健康可持续发展。本期推出孙冠华教授的《压缩空气储能电站地下内衬硐库基本原理与分析方法研究进展》,以飨读者。

DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0705

# 压缩空气储能电站地下内衬硐库基本原理与分析方法研究进展

孙冠华<sup>1,2</sup>, 王 娇<sup>1,2</sup>, 于显杨<sup>1,2</sup>, 易 琪<sup>1,2</sup>, 朱开源<sup>1,2</sup>,  
王章星<sup>1,2</sup>, 耿 璇<sup>1,2</sup>, 屈 杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 地下内衬硐库的压缩空气储能, 以其发电时间长、规模大、建设周期短、选址灵活、工程造价低、运行周期长、环境友好等优势, 在新型储能领域展现了较强的生命力, 将有力地促进新型电力系统的构建和新能源的高质量发展。与传统地下空间的运行特点有较大不同, 在充放气过程中, 储备有压缩空气的地下内衬硐库不仅需要承受交变高内压膨胀压力, 同时伴随着显著的温度变化。围绕地下内衬硐库, 阐述了其工作原理以及柔性密封结构的设计理念, 针对高压、交变应力和温度变化等荷载特征, 系统分析了地下内衬硐库相关理论与分析方法等方面的研究进展, 主要包括库内温压响应与密封结构传热特性、围岩应力路径与力学响应、钢筋混凝土衬砌开裂与控制标准、上覆岩体稳定性与安全埋深、密封层及密封堵头等, 并对地下内衬硐库基本原理与分析方法的发展趋势进行了展望。

**关 键 词:** 压缩空气储能; 岩石内衬硐库; 分析方法

中图分类号: TU93

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 01-0001-25



## Research progress on basic principles and analysis methods of lined rock caverns for compressed air energy storage station

SUN Guan-hua<sup>1,2</sup>, WANG Jiao<sup>1,2</sup>, YU Xian-yang<sup>1,2</sup>, YI Qi<sup>1,2</sup>, ZHU Kai-yuan<sup>1,2</sup>,  
WANG Zhang-xing<sup>1,2</sup>, GENG Xuan<sup>1,2</sup>, QU Jie<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Compressed air energy storage (CAES) in underground lined rock caverns (LRC), with its advantages of long power generation time, large scale, short construction period, flexible site selection, low project cost, long operation period, and environmental friendliness, has demonstrated strong vitality in the field of new energy storage, and will significantly promote the construction of new power systems and the high-quality development of renewable energy. Unlike the operational characteristics of traditional underground spaces, the underground lined rock caverns storing compressed air not only have to withstand alternating high internal pressure expansion during the inflation and deflation process, but also experience significant temperature changes. This

收稿日期: 2024-06-06

录用日期: 2024-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.12302507); 湖北省自然科学基金重点项目 (No.2022CFD031, No.2024AFD361); 宁夏回族自治区重点研发项目 (No.2024ZDYF0965); 湖北省自然科学基金创新群体项目 (No.2024AFA004)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (12302507), the Key Program of Natural Science Foundation of Hubei Province (2022CFD031, 2024AFD361), the Key Research and Development Projects of Ningxia Hui Autonomous Region (2024ZDYF0965) and the Innovation Group Project of Hubei Science and Technology Department (2024AFA004).

第一作者简介: 孙冠华, 男, 1982 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学、地质储能等方面的研究工作。E-mail: ghsun@whrsm.ac.cn

通讯作者: 王娇, 女, 1998 年生, 博士, 主要从事压缩空气储能地下工程、边坡工程等方面的研究工作。E-mail: wangjiao191@mails.ucas.ac.cn

article focuses on underground lined rock caverns, elaborates on its working principle and the design concept of flexible sealing structure; in view of the load characteristics such as high pressure, alternating stress, and temperature changes, it systematically analyzes the research progress in related theories and analysis methods of underground lined rock caverns, mainly including the temperature and pressure response in the cavern and the heat transfer characteristics of the sealing structure, the stress path and mechanical response of surrounding rock, the cracking and control standards of reinforced concrete lining, the stability and safe burial depth of overlying rock mass, the sealing layer and the sealing plug, etc., and provides an outlook on the development trends of the basic principles and analysis methods for underground lined rock caverns.

**Keywords:** compressed air energy storage; lined rock caverns; analytical methods

## 1 引言

“双碳”目标下,我国能源结构将持续调整,新型电力系统以可再生能源为主体的构建成为转型发展的必然趋势。截至 2023 年底,我国可再生能源装机容量已超过 14 亿 kW,首次超越煤电,占总装机容量的 50%。随着新能源比重的持续上升,其固有的间歇性、随机性及波动性,加之电网调节能力的局限,导致了严重的弃风和弃光问题。这表明,新能源的高效消纳将成为我国未来长期需要解决的关键问题。对此,大规模长时储能技术的应用显得尤为关键,已在“十四五”期间通过新增储能装机带动超过 1 000 亿元的经济投资,成为支撑能源电力发展的新动力<sup>[1]</sup>。目前,能够在 100 MW 及以上功率等级进行应用的机械储能技术主要包括抽水蓄能和压缩空气储能。抽水蓄能依赖于特定的天然地理条件,如两个大型水库的垂直布置,以实现水的重力势能存储与释放。这种对地理条件的依赖以及潜在的移民问题限制了抽水蓄能电站的建设自由度。特别是在我国,西北地区虽资源丰富但缺乏适宜的水力资源,而中东部地区的资源条件更适合抽水蓄能电站的建设。这种资源的地域不匹配在一定程度上制约了抽水蓄能技术的广泛应用和发展。因此,探索与开发适应不同地域条件的储能技术方案,特别是加强压缩空气储能(compressed air energy storage,简称 CAES)等技术的研发与应用,将是我国能源转型战略中的一个重要方向。

CAES 是一种利用压缩空气作为介质来储存富余电能的新技术,其主要作用是调节电力峰谷和改善电力品质。CAES 电站的主要组成部分包括压缩系统、透平系统、热交换系统及储存装置等(如图 1 所示),工作原理是在电力需求低谷期间,利用过剩电能驱动空气压缩机将空气压缩并储存于储气设备中;在高峰需求时段,再将储存的压缩空气释放,通过驱动透平机组进行发电。与传统的抽水蓄能技术相比,CAES 具备诸多优势:首先,其主要设施为机械设备,正常维护下设备寿命可以达到 30~50 a,

从全寿命周期来看,度电成本仅次于抽水蓄能;其次,作为一种典型的物理储能方式,其工作介质为空气,具有极高的安全性;再次,CAES 设施的建造周期相对较短;最后,该技术在达到 100 MW 级别以上时即展现出较强的商业潜力,单个项目的投资较小,能够灵活应对不同地理和市场条件,选址更为便利。因此,CAES 被广泛认为是一种具有重要发展潜力的大规模储能技术。

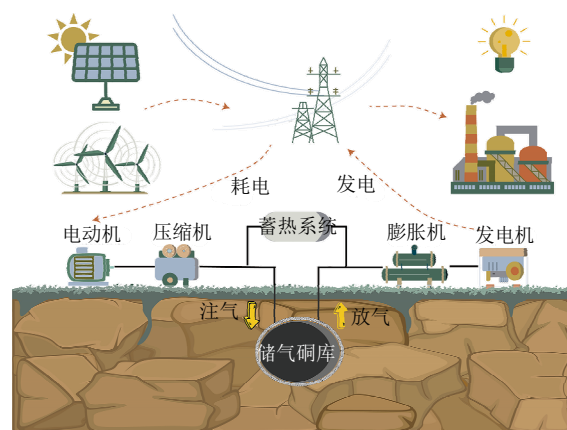


图 1 压缩空气储能系统示意图

Fig.1 Principle of CAES

当前,大规模 CAES 系统主要依赖于地下储能库,其中地下岩体作为主要承载结构,相较于地面储气库具有更高的经济效益。地下储气设施可利用多种地下空间,包括盐层溶浸后形成的盐穴、岩石内衬洞库、废弃矿山、枯竭油气藏以及含水层等。特别是盐岩由于其较好的密封性,已被国际上多个项目采用,如德国的 Huntorf 电站(1978 年建成)、美国的 McIntosh 电站(1991 年建成),以及国内的山东肥城 10 MW(2021 年建成)、江苏金坛 60 MW(2022 年建成)和湖北应城 300 MW(2024 年建成) CAES 电站。尽管盐穴提供了优越的密封环境,但其资源局限性使其无法满足不断增长的需求。为此,自 20 世纪末以来,日本、瑞典等国家已经开始进行人工开挖岩石内衬洞室(lined rock caverns,简称 LRC)的试验研究,专注于探究地下洞室的密封性

能、围岩受压的力学响应及其破坏机制。2017 年，中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司在 110 m 深的硬岩地层中进行了内衬硐室的试验研究，证实了浅埋密封内衬硐室作为压缩空气地下储气库的适用性<sup>[2]</sup>。鉴于我国硬岩地层的广泛分布，人工修建的地下内衬硐库因其选址灵活性、设计参数的可控性，展示了在全国范围内广泛推广应用的潜力。据统计，2023 年 12 月国家能源局公布的全国新型储

能试点示范项目名单中 CAES 项目达 11 个，项目容量占到总容量的 40% 以上，如表 1 所示，其中人工建设的内衬储气硐室有 8 个。此外，全国还有多个 CAES 电站的人工储气硐室正在进行前期工作，显示出人工内衬硐室型储气库已经成为 CAES 项目的优选方案。随着示范项目的深入推进、技术的成熟和经济性的提升，预计人工内衬硐室将成为未来广泛应用的大规模储能装置。

表 1 CAES 试点示范工程  
Table 1 CAES pilot demonstration projects

| 序号 | 示范项目名称                                        | 依托工程项目                                           | 规模                  | 储能方式 |
|----|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|------|
| 1  | 山东省肥城市 300 MW/1 800 MW · h CAES 示范项目          | 山东肥城 300 MW 先进 CAES 示范电站                         | 300 MW/1 800 MW · h | 盐穴   |
| 2  | 江西省铅山县 300 MW/1 200 MW · h CAES 示范项目          | 江西铅山 300 MW 先进 CAES 示范电站                         | 300 MW/1 200 MW · h | 硐库   |
| 3  | 甘肃省玉门市 300 MW/1 800 MW · h CAES 示范项目          | 甘肃酒泉 300 MW CAES 电站示范工程                          | 300 MW/1 800 MW · h | 硐库   |
| 4  | 湖北省应城市 300 MW/1 500 MW · h CAES 示范项目          | 湖北应城 300 MW 级 CAES 电站示范项目                        | 300 MW/1 500 MW · h | 盐穴   |
| 5  | 河南省新县 300 MW/1 200 MW · h CAES 示范项目           | 河南信阳先进 300 MW CAES 项目                            | 300 MW/1 200 MW · h | 硐库   |
| 6  | 湖南省岳阳县 300 MW/1 500 MW · h CAES 示范项目          | 岳阳龙泉山 300 MW 先进 CAES 电站项目                        | 300 MW/1 500 MW · h | 硐库   |
| 7  | 湖南省衡阳市珠晖区 100 MW/400 MW · h CAES 示范项目         | 湖南衡阳百兆瓦级盐穴非补燃式 CAES 创新示范项目                       | 100 MW/400 MW · h   | 盐穴   |
| 8  | 青海省乌兰县 200 MW/800 MW · h CAES 示范项目            | 海西州乌兰县新建储气罐的先进 CAES 示范项目                         | 200 MW/800 MW · h   | 硐库   |
| 9  | 四川省遂宁市船山区 200 MW/1 600 MW · h CAES 示范项目       | 华夏智慧遂宁船山区 200 MW CAES 及综合能源利用项目                  | 200 MW/1 600 MW · h | 硐库   |
| 10 | 黑龙江省宝清县 350 MW/1 750 MW · h CAES 示范项目         | 黑龙江吉能宝清 350 MW/1 750 MW · h CAES 示范项目            | 350 MW/1 750 MW · h | 硐库   |
| 11 | 新疆维吾尔自治区巴里坤哈萨克自治县 100 MW/400 MW · h CAES 示范项目 | 华能新疆能源开发有限公司新能源东疆分公司 100 MW/400 MW · h CAES 示范项目 | 100 MW/400 MW · h   | 硐库   |

注：300 MW/1 800 MW · h 表示功率为 300 MW，电量为 1 800 MW · h，下同。

综上所述，岩石内衬硐库在 CAES 电站的应用中显示出巨大的发展潜力。相较于传统地下空间，岩石内衬硐库的显著特征是需要承受兆帕级的交变膨胀压力，同时伴随温度的显著变化，这些因素引发了一系列新的岩石力学与工程挑战。本文旨在全面阐述 CAES 地下硐库的基本概念，提出密封层-衬砌-围岩协同工作的柔性密封结构设计理念，对库内温压变化、围岩的应力响应、衬砌的开裂控制、上覆岩体稳定性、密封层及密封堵头等关键技术领域的最新成果进行综述。最后，针对现有理论与方法研究的局限性，对 LRC 未来的研究方向进行了展望，旨在为 CAES 电站的设计、建造与维护提供科学依据和实践指导。

## 2 CAES 地下硐库的概念与内涵

### 2.1 基本概念

人工地下储气硐库关键性技术是控制高压气体泄漏。目前，一般采用内衬密封材料层作为密封手段，常用的有刚性密封层（即厚钢板）与柔性密封层（高分子材料、薄钢板、组合式等）<sup>[3]</sup>。

20 世纪 90 年代，瑞典推进了一项采用钢衬作为密封层的内衬硐库技术，成功地建造了一座具有

商业规模的有衬砌的地下压缩天然气储气库<sup>[4]</sup>。经试验和运行验证了其良好的密封效果。钢衬在各类硐室中的应用，如压缩天然气的存储以及水电站的气垫式调压室等，已有多个成功的工程案例。除了刚性密封层，采用复合材料制作的柔性密封层也能被用于人工地下储气硐库的密封。柔性材料具有气密性好、变形能力大、价格低廉等优势，是可行的密封层材料。柔性密封层衬砌洞室在混凝土衬砌内侧设气体密封层，或将衬砌制作成含密封层的多层结构，多层结构中至少设置一层为气体密封层。这样，利用气体密封层起密封气体的作用，其余各层可以分别设置为防腐层，保证其强度要求的结构层等，以降低制作成本。气体密封层可以通过喷涂高分子材料、焊接钢板或采用橡胶、塑料、复合层结构的材料等形成。Salter 等<sup>[5]</sup>最早提出可以在压气储能洞室中使用内衬密封结构实现气体密封，他比较了压气储能洞室传统水幕和内衬等密封技术，认为最经济、可行的密封方式是内衬密封，并提出采用一种不透水柔性薄膜作为密封层。夏才初等<sup>[3]</sup>系统研究了丁基橡胶、天然橡胶、三元乙丙橡胶和玻璃钢这类高分子密封材料的密封性能，采用高压密封试验和拉伸试验、数值模拟手段，分析了柔性材料

的传热、密封泄漏、变形、耐久性等,研究初步表明了柔性材料可以作为储气洞库密封层材料的可行性。尽管这些材料已通过数值模拟和试验验证了结构的密封性和耐久性,但目前尚无相应的工程实例。此外,这些材料在交变荷载和温度变化的复杂环境下的密封性能仍然缺乏系统的研究。

地下空气储存设施的工程构成通常包括:一个或多个洞库、交通隧道以及连接地面工艺系统的通道等。作为储气空间的 LRC,其设计容积一般要求 10 万  $\text{m}^3$  以上。洞库类型包括隧道式、大罐式或厂房式,如图 2 所示<sup>[6]</sup>。其中,隧道式 LRC 一般采用直径 10 m 以上的圆型截面;大罐式 LRC 一般采用 35~45 m 直径、60~100 m 高或更高、半球穹顶的仓筒形式;厂房式 LRC 则是介于隧道式和大罐式之间,其结构类似于水电站的地下厂房,通常采用顶部为拱形、底部为平直壁面的矩形截面。此外,岩石地下洞库的存储压力最大值一般在 10 MPa 以上<sup>[6]</sup>。

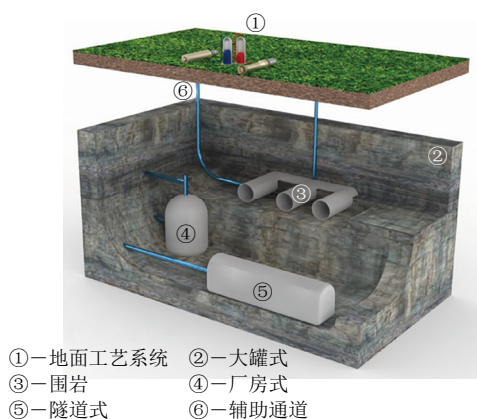


图 2 隧道式、大罐式、厂房式洞库示意图<sup>[6]</sup>  
Fig.2 Schematic diagram of tunnel, large tank and plant-type LRCs<sup>[6]</sup>

LRC 的一大特性是储存空气的压力超过原有地层岩体的压力。在洞库施工过程中,围岩可能产生不同尺度的连通裂隙(或存在原生结构面),若仅依靠岩体,密封性无法得到充分保障,从而引发空气泄漏,如图 3 所示<sup>[6]</sup>。图中  $\sigma_v$  为竖向应力,  $\sigma_h$  为水平应力,  $P$  为储气压力。因此,密封层的完整性对保证洞库的密封性至关重要。此外,由于人工内衬洞库通常是浅埋,而埋深需要确保结构具有足够的抗抬能力,这要求岩体具有足够的强度和完整性。通过以上分析可以看出,洞库面临的主要失效风险包括高压气体可能对地面结构造成的上抬影响以及潜在的空气泄漏。因此,设计工作的核心是围绕确保这两个方面的安全性进行,如图 4 所示。

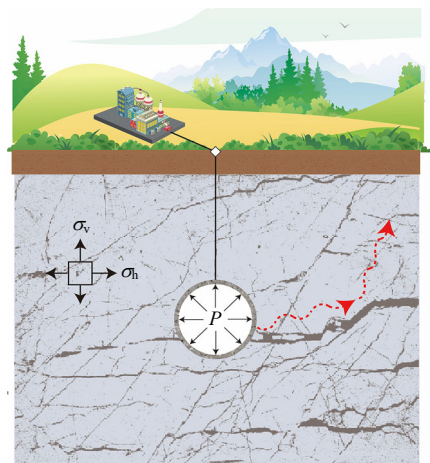


图 3 围岩内气体泄漏示意图<sup>[6]</sup>  
Fig.3 Schematic diagram of air leakage in surrounding rock<sup>[6]</sup>

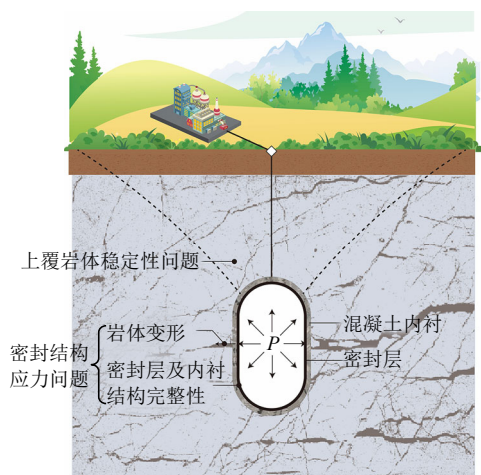


图 4 岩石内衬洞库上覆岩体稳定性问题示意图<sup>[6]</sup>  
Fig.4 Schematic diagram of stability issues of overlying rock mass in LRC<sup>[6]</sup>

## 2.2 主要荷载特征

储气洞库荷载主要包括:空气压力、温度应力、围岩抗力、重力、外水压力、地震荷载等<sup>[7]</sup>。

CAES 电站的主要功能是通过削峰填谷来增强电网的灵活性。因此,要求 CAES 电站一天完成一到多次充放气操作,即荷载交变频率较高,如图 5 所示<sup>[8]</sup>,在充放气过程中,洞库内部的空气压力会经

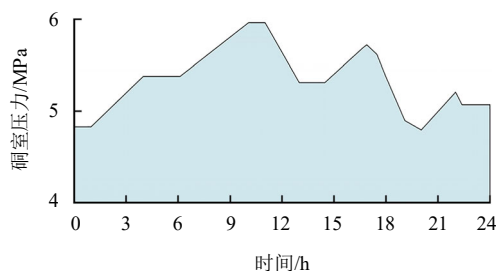


图 5 CAES 地下洞库内压变化图<sup>[8]</sup>  
Fig.5 Variation diagram of CAES underground cavern pressure<sup>[8]</sup>

历周期性的变化,并伴随着温度发生改变<sup>[9]</sup>。这一荷载特征与其他传统地下工程显著不同。

砌库通常位于 100~500 m 深的岩层内,在此范围内岩体受到地表季节变化的影响较小。而在砌库运行期,库内空气温度随着充放气的过程而波动。刘澧源等<sup>[10]</sup>定量分析了 CAES 电站地下储气库内压缩空气热力学过程,其研究成果表明,在充放气过程中,砌库内的平均空气温度在-110~130 °C 之间波动,显示出显著的热力学变化。

在砌库运行期间,库内气体与周围岩体通过热传导形成温度场。当气温低于岩体温度时,衬砌因温降产生拉应力;相反,气温高于岩体时产生压应力。这些温度引起的应力对密封结构的完整性具有重要影响。普通混凝土的极限拉伸应变范围为 0.000 1~0.000 15<sup>[11]</sup>,这意味着混凝土衬砌最多只能承受 7~10 °C 的温差,超过此范围可能导致裂缝。在充气时,径向膨胀引起环向拉应力,温升增加压应力;放气时,径向收缩减少拉应力,温降则增加拉应力。这表明温度荷载并非总对砌库结构不利。然而,由于涉及的温度场、应力场和结构材料的复杂性,应充分研究其多场耦合过程,这对设计密封结构,特别是控制裂缝发展至关重要。

### 2.3 密封结构形式

砌库作为 CAES 电站工艺系统的核心组成部分,主要承担储气功能,并可以利用地下岩体自身强度。基于 CAES 电站的基本需求,针对高压岩石内衬砌库的荷载特点,可采用“柔性密封结构”的设计理念<sup>[6]</sup>。该结构主要由围岩、钢筋混凝土衬砌、滑动层和密封层组成,此外,密封结构还包括辅助系统如排水系统和监测系统等,以保证结构的完整性和功能性,如图 6 所示。密封层的主要功能是保

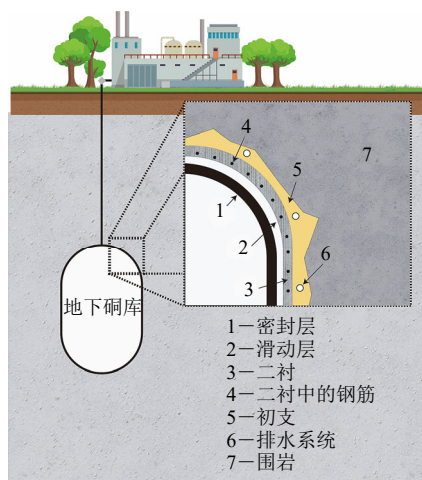


图6 砌库密封结构示意图<sup>[6]</sup>

Fig.6 Schematic diagram of sealing structure for CAES<sup>[6]</sup>

证气密性,它将气体压力径向传递至衬砌和围岩,同时具备高环向柔性以适应较大变形。钢筋混凝土衬砌则负责将气压传递至围岩,并设计为允许带缝的柔性结构。围岩作为核心承载元素,利用其自身的强度和刚度来限制衬砌和密封层的变形,实现高压气体的有效储存。滑动层位于衬砌和密封层之间,用于减少摩擦力,使得两者之间可以相对滑动。总体而言,采用密封层、衬砌和围岩协调变形,并充分利用围岩作为承载体系承担荷载,这是 CAES 电站地下砌库的基本设计理念。

### 2.4 内衬砌库储能系统及需要研究的问题

综上所述,地下内衬砌库型式的储能系统在选定完整岩体的基础上,承受循环内气压和温度变化等荷载,包括围岩、二衬和密封层等主要结构。如图 7 所示,围绕力-热-水等多场耦合作用下的砌库,针对高内压膨胀压力和温度变化等荷载特征,该储能系统需要开展如下几个方面的研究工作:①库内温压响应与密封结构传热特性;②径向压-环向拉条件下的围岩力学模型、应力路径及长期变形响应;③二衬开裂机制和控制措施;④柔性密封层环向变形特征和裂缝搭接机制;⑤上覆岩体稳定分析与安全埋深;⑥堵头型式与受力机制。图 7 中, $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为第一、二、三主应力, $\sigma_0$  为围岩应力。

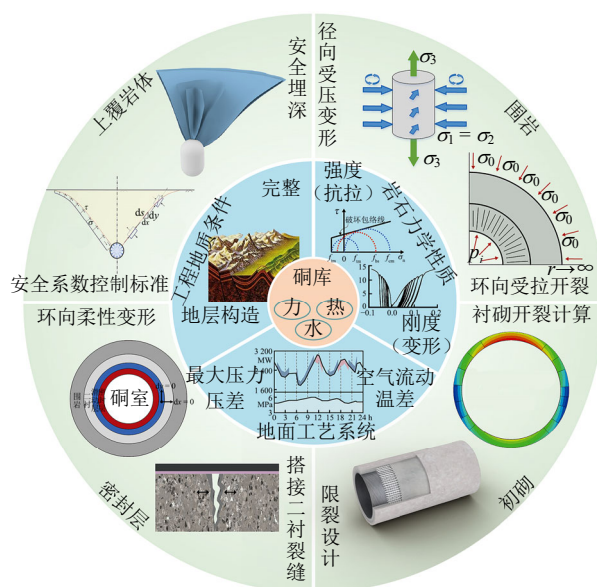


图7 内衬砌库储能系统及需要研究的问题

Fig.7 LRC system and the problems that need to be studied

## 3 库内温压响应与密封结构传热特性

### 3.1 库内温压响应计算

CAES 地下砌库的运营周期以  $d$  为单位,即每

天要完成一次充气、保压、放气、保压的工作循环。频繁、快速的充气 and 放气过程,使得地下硐库内产生显著的温度变化,加上同时变化的库内压力,将对密封结构的安全性、硐库的稳定性产生不可忽略的影响。目前,有关地下硐库方面的热力学分析,已经积累了许多成熟的模型与研究成果。Kushnir 等<sup>[12]</sup>最早基于质量和能量守恒方程,推导了绝热硐库内气体温度和压力变化的近似解析解,并在 3 种不同的气体状态方程下进行了应用,以验证简化气体模型的适用性。在此基础上,Kushnir 等<sup>[13]</sup>展开更进一步的研究,将传热系数假定为一个常值,推导了非绝热硐库内气体温度和压力变化的解析解。与绝热条件相比,硐库壁面的传热对空气的温度和压力变化有很大的影响。硐库内气体温度、压强求解与传热的控制方程如下<sup>[13]</sup>:

$$V \frac{d\rho}{dt} = (F_i + F_e) \dot{m}_c \quad (1)$$

$$V \rho c_v \frac{dT}{dt} = F_i \dot{m}_c \left( h_i - h + Z_{\text{air}} RT - \rho \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) + F_e \dot{m}_c \left( Z_{\text{air}} RT - \rho \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) + \dot{Q} \quad (2)$$

$$p = Z_{\text{air}} \rho RT \quad (3)$$

$$\dot{Q} = h_c A_c (T_{\text{rw}} - T) \quad (4)$$

式中:  $V$  为硐库体积;  $p$  为硐库内气体压力;  $T$  为硐库内压缩空气温度;  $\rho$  为硐库内压缩空气的密度;  $c_v$  为空气等容比热容;  $R$  为空气气体常数;  $Z_{\text{air}}$  为空气压缩因子;  $\dot{Q}$  为硐壁热交换速率;  $h_c$  为硐库内气体与围岩平均传热系数;  $A_c$  为硐库表面积;  $T_{\text{rw}}$  为围岩温度;  $t$  为计算时间;  $u$  为硐库气体内能;  $h_i$  为注入气体焓;  $h$  为硐库内气体的焓;  $F_i \dot{m}_c$  和  $F_e \dot{m}_c$  分别为空气进入和排出的质量流速,下标  $i$  和  $e$  分别表示硐库的入口和出口;  $F_i$ 、 $F_e$  分别为表征硐库充气与放气过程的状态常数,  $F_i$  在充气过程中为 1,在放气过程中为 0,  $F_e$  在充气过程中为 0,在放气过程中为空气排出速率与空气进入速率比值的负值;  $\dot{m}_c$  为空气压缩机总空气流速速率。

随后,众多学者在式 (1) ~ (4) 基础上,提出了不同的方法进行改进,深入了此领域的研究。Xia 等<sup>[14]</sup>假设硐库内空气密度保持恒定并且硐壁的温度不变,提出了一种简单而统一的非绝热解析解,并通过验证定义了误差小于 20% 的建议适用条件。Zhou 等<sup>[15]</sup>应用拉普拉斯变换和叠加原理求解了库

内温压及密封结构间热交换的控制方程,得到了运营期库内温度、压力以及密封结构的温度变化,并采用热弹性轴对称模型,求解了由温度和气压引起密封结构应力和位移的变化。刘澧源等<sup>[10]</sup>假定空气为理想状态气体,提出了基于 FLAC<sup>3D</sup> 平台的、考虑围岩传热影响的压缩空气热力学过程分析的差分计算方法。蒋中明等<sup>[16]</sup>同样利用 FLAC<sup>3D</sup> 平台,提出了求解压缩空气热力学过程及储气库围岩热力耦合数值分析边界条件的确定方法,分析了围岩初始温度、对流换热系数以及热传导系数对边界条件变化过程的影响。此外,Wu<sup>[17]</sup>、Chen<sup>[18]</sup>等依据此热力学控制方程,在 COMSOL Multiphysics 软件中建立了地下储气库相应的热-水-力耦合模型。

除了采用理论解析计算的方法,部分学者还运用数值模拟的技术,研究了硐库内复杂流体行为与热力学变化过程。Rutqvist 等<sup>[19]</sup>采用 TOUGH-FLAC 建立了储气库非等温多相流和地质力学耦合的数值模型,其热力学分析表明,96.7% 压缩过程中注入的能量可以在后续减压过程中回收,3.3% 的能量会通过热传导到周围介质而损失。Prado 等<sup>[20]</sup>分别采用理论解析与三维计算流体动力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD) 数值模型分析了 A-CAES 废弃矿井储气库内热力学性能,结果显示两种方法具有很好的一致性。蒋中明等<sup>[9]</sup>指出理论解析法存在较大的局限性,仅能通过均值描述压缩空气热力学特性变化过程,不能揭示压缩空气热力学特性的空间分布规律。为准确认识地下储气库压缩空气动态热力学特性,蒋中明等<sup>[9]</sup>建立了考虑压缩空气与围岩间共轭传热以及非等温流动的储气库热力学数值分析模型,其研究结果表明,硐库形状对储气库内温度分布规律有显著的影响,隧道式储气库出现了局部高温现象。通过合理布置进出口位置的方法可以实现对库内温度的控制,如图 8 所示。

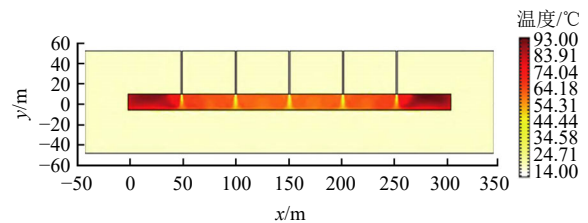


图 8 改变进气方式后隧道式储气库温度空间分布<sup>[9]</sup>  
Fig.8 Spatial temperature distribution in a tunnel-type LRC after changing the inflated method<sup>[9]</sup>

孙冠华等<sup>[21]</sup>采用计算流体力学,对地下硐库首次充气加压过程进行了数值模拟。研究结果发现硐

库闷顶效应与其铜型（长径比）的关系，当铜库长径比较小时，铜内温度分布较为均匀。随着长径比增大，铜库出现闷顶效应，库内局部将发生高温灾害（见图 9）。

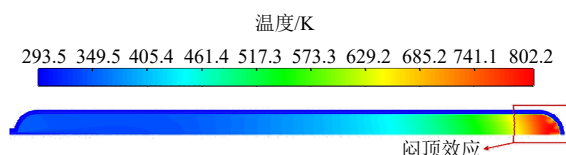


图 9 隧道式储气库闷顶效应示意<sup>[21]</sup>

Fig.9 Stuffy top effect in a tunnel-type LRC<sup>[21]</sup>

针对此现象，孙冠华等<sup>[21]</sup>提出了铜库局部高温解决方法，如图 10 所示，实现了铜内温度的均匀分布。蒋中明<sup>[9]</sup>、孙冠华<sup>[21]</sup>等学者的研究成果，规避了理论解析解的局限性，发现了库内局部高温热害现象，并据此提出了解决方案，为地下储气库的铜型设计提供了有益参考。Geng 等<sup>[22]</sup>还研究了地下内衬铜库在运行期温度场的时空响应规律。

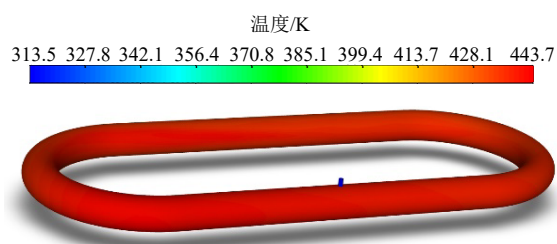


图 10 改进环形隧道式储气库温度空间分布<sup>[21]</sup>

Fig.10 Spatial temperature distribution in a circular tunnel-type LRC<sup>[21]</sup>

### 3.2 密封结构传热特性

关于密封结构的传热特性，Zhou<sup>[15]</sup>、Prado<sup>[20]</sup>、孙冠华<sup>[21]</sup>等通过不同的研究方法均表明，受库内温度变化影响，密封层和混凝土衬砌的温度波动明显，而围岩温度仅在小范围内变化。Prado 等<sup>[20]</sup>还研究了相比于纤维增强塑料（fiber reinforced polymer，简称 FRP）材料，采用钢制密封层时空气温度波动值减小。此研究结论可为密封结构的应力计算提供热边界条件，为设计和评估密封结构的性能提供了基础。

CAES 地下铜库的运行过程可根据其工作条件分为首次充气阶段与正常运营阶段。相比于正常运营阶段，首次充气阶段库内压力将从标准大气压升至运营压力，并伴随着最大的气体量充入，故库内整个运行阶段平均温度的最大值应出现在首次充气阶段结束时。在库内温度分布均匀的条件下，可只

考虑平均温度值的大小，文中所提到的研究工作条件大多考虑的为正常运营阶段，而忽略首次充气阶段温度最大值变化。目前尚未有储能系统首次充气阶段相关运营参数以及其温度大小调控方面的研究。另外，地下储气库具有长久运营的特点，一年要经历 300 次充放气循环。在长久此工作条件下，库内温压及密封结构传热特性全生命周期内的演化规律是我们需重点研究的另一内容。

## 4 围岩应力路径与力学响应

利用新开挖的地下铜室作为 CAES 电站的地下储气结构，铜室围岩的力学响应及围岩变形规律是影响 LRC 稳定性的核心因素。地下铜室在电站运营之中为了满足电网“削峰填谷”的需求，压缩空气储能电站地下铜库的内压变化周期一般为 1 d，空气频繁而又快速地充入和放出，铜库使用寿命内将会循环上万次。如图 5 所示，在电站的运行一个周期之内，铜库内部的内压分为注气、采气及恒载 3 个阶段<sup>[6]</sup>，注气和采气阶段空气对铜库围岩施加周期性疲劳荷载，恒载阶段相当于对围岩施加蠕变荷载，洞室围岩实际上处于疲劳（周期性加卸载作用）和蠕变（单一循环中恒定荷载作用）相结合的荷载。针对疲劳和蠕变荷载共同作用下的围岩，需要进一步完善其本构模型和破坏模式，从而探究围岩的长期力学响应。

### 4.1 高内气压作用下围岩应力环境及应力路径

地下内衬铜库充气前，围岩受压状态节理裂隙闭合；在高内气压作用下铜库膨胀，围岩径向受压，环向受拉，微结构面张开，如图 11 所示。电站运行时铜库内空气频繁、快速地充入和放出，铜库内部气压产生周期性变化，导致围岩受到“径向受压、环向受拉”的循环交变荷载，因此铜库围岩实际上处于“两压一拉”的循环交变荷载环境。

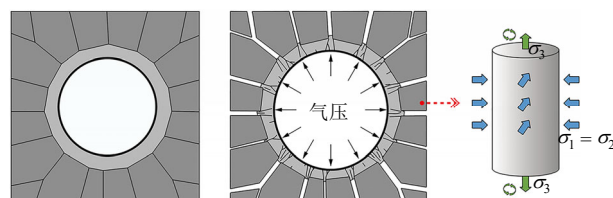


图 11 压缩空气储能内衬铜库围岩应力环境示意图

Fig.11 Schematic diagram of stress environment of surrounding rock of compressed air energy storage lining cavern

针对该围岩应力环境，Damasceno 等<sup>[23]</sup>基于摩尔-库仑模型提出了围岩两种的可能的屈服应力路

径及围岩力学响应。Xu 等<sup>[24]</sup>研究了围岩在硐库运营过程中的应力路径的演化规律,将其演化过程可分为弹塑性阶段、塑性卸载阶段、塑性加载阶段和塑性膨胀阶段,并给出了不同阶段的围岩应力的分布的解析表达式。

#### 4.2 应力路径对岩石物理力学性质的影响

岩石蠕变是指其在外力作用下,应变随时间而变化的现象,变形一般可以分为应变速率逐渐减小的初始蠕变阶段,应变速率趋于常数的稳定蠕变阶段和应变速率不断增大直至破坏的加速蠕变阶段<sup>[25]</sup>。疲劳是指材料在循环加卸载反复作用下力学性能逐渐劣化直至失稳的过程。在岩石细观损伤机制和围岩疲劳本构模型方面取得较大的进展。岩石的疲劳变形一般可以分为初始变形、稳定变形和加速变形破坏阶段,呈现出倒 S 形,这与蠕变变形发展相似。目前针对各类岩石在不同应力路径下的蠕变疲劳变形及其损伤演化特征开展了大量研究,并从微观力学、损伤和能量角度推导了岩石的蠕变疲劳本构方程。任建喜<sup>[26]</sup>通过自行研制的 CT 机专用三轴加载试验设备,进行了单轴压缩荷载作用下的岩石蠕变细观损伤演化的实时 CT 试验,对岩石的蠕变损伤三阶段进行了细观机制分析。Shao 等<sup>[27]</sup>认为岩石内部在荷载作用下逐渐破裂、损伤累积直至微裂纹扩展是蠕变变形出现的本质原因,并据此提出了可以描述岩石塑性变形、损伤、体积膨胀、率相关性等主要特征的本构模型。齐亚静等<sup>[28]</sup>改进了西原模型,提出了岩石在恒应力情况下的三维蠕变本构模型,试验数据拟合表明,该模型可以很好描述岩石蠕变变形的 3 个阶段。葛修润<sup>[29]</sup>指出岩石的疲劳破坏存在一个门槛值,当循环上限应力小于该门槛值,岩石不会发生疲劳破坏。Liu 等<sup>[30]</sup>通过对砂岩开展三轴循环加卸载试验,指出循环荷载引发的塑性变形在循环加载初始阶段和破坏阶段积累速率较快,同时在破坏阶段变形以径向膨胀为主。Li 等<sup>[31]</sup>对中国河南某煤矿采集的砂岩进行了不连续循环加载试验,研究压缩空气储能硐库围岩的疲劳演化特性,试验结果表明,砂岩在非连续疲劳试验之中的疲劳寿命比传统疲劳试验之中的寿命短得多,不同应力循环之间间隔的存在加速了残余应变的累积。Xue 等<sup>[32]</sup>基于不同循环上下限应力和不同频率下的循环荷载巴西劈裂试验,建立砂岩在循环拉伸应力作用下的黏弹塑性模型,如图 12 所示。其中 $\sigma_t$ 为岩石的拉伸强度, $\sigma_s$ 为拉伸应力门槛值, $\sigma_{\max}$ 为上限拉伸荷载, $\varepsilon_e$ 、 $\varepsilon_v$ 、 $\varepsilon_{ve}$ 、 $\varepsilon_{vp}$ 分别弹性、黏性、黏弹性和黏塑性应变, $E_1$ 、 $E_2$ 为 Maxwell 元件和 Kelvin 元

件的弹性模量, $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3(t)$ 分别为 Maxwell 元件、Kelvin 元件和 Bingham 元件的黏滞系数,模型的拟合结果与试验结果吻合良好,这可以适用于描述压缩空气储能硐库围岩拉伸区域在循环荷载作用下的变形规律。Liu 等<sup>[33]</sup>总结了影响岩石疲劳机制的主要因素如图 13 所示,主要包括加载因素、环境因素和岩石本身的因素,图中 $\sigma_d$ 为岩石所受的动荷载。苗胜军等<sup>[34]</sup>开展了粉砂岩的循环加卸载试验,建立了可以表征循环荷载作用下粉砂疲劳流变的损伤模型,该模型不仅可以表征循环加卸载过程之中粉砂

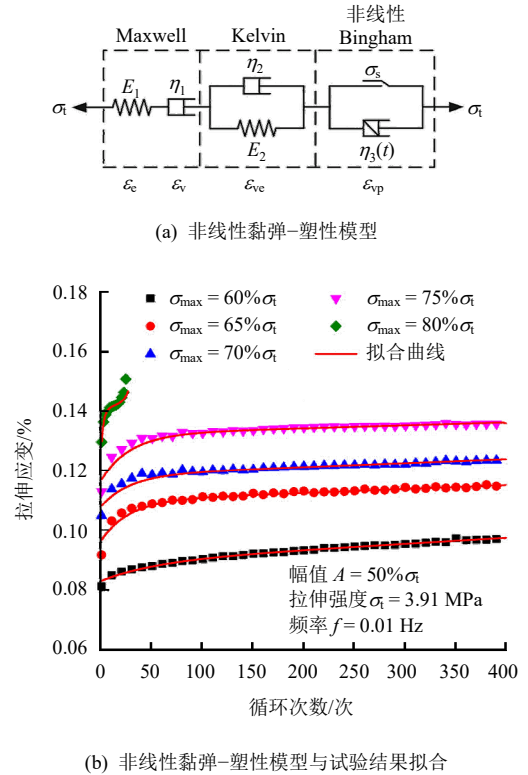


图 12 砂岩在循环拉伸应力作用下的黏弹塑性模型<sup>[32]</sup>  
Fig.12 Viscoelastic-plastic modeling of sandstone under cyclic tensile stresses<sup>[32]</sup>

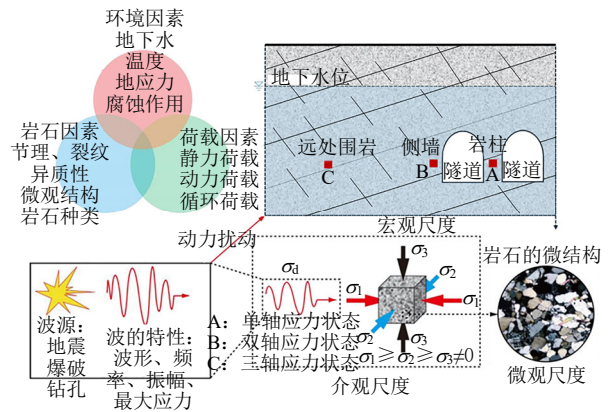


图 13 影响工程结构围岩疲劳变形机制的因素分析<sup>[33]</sup>  
Fig.13 Overview of the influencing factors in rock engineering structures suffering from<sup>[33]</sup>

岩初始、稳定变形阶段,还可以有效描述上限荷载高于疲劳强度之后的加速变形阶段。

### 4.3 CAES 地下硐库围岩力学响应

基于以上实验室尺度研究,众多国内外学者针对 LRC 围岩受力特点,考虑硐库内空气的热力学响应与气体在硐库围岩间的渗流相耦合,建立了 CAES 岩石硐库热力学模型,计算硐库及硐库围岩的温度、压力、速度场分布,研究不同因素对 LRC 的围岩力学响应和稳定性的影响机制,揭示密封层、衬砌和围岩在系统运行时的相互作用机制。Rutqvist 等<sup>[19]</sup>利用 TOUGH-FLAC 进行了基于非等温多相流和地质力学场耦合的数值建模,研究 LRC 在 CAES 电站运营过程之中围岩的复杂热力学和力学响应,并从空气泄漏和能源效率的角度讨论了建设 CAES 地下内衬硐室的可行性。Kim 等<sup>[35]</sup>研究开挖破坏区对 LRC 围岩力学响应的影响,结果表明,减小硐库的开挖破坏区可以有效减少混凝土衬砌的径向位移和切向应力。Zhou 等<sup>[36]</sup>建立了硐库围岩温度和气压的控制方程并求解了 CAES 地下硐库的非稳态温度和内压作用下储气库的弹性应力,实现了多域轴对称问题求解。蒋中明等<sup>[37]</sup>基于损伤理论二次开发了适用于 CAES 内衬硐库的加卸载条件的累积积分分析程序,并研究了不同因素对硐库的围岩累积损伤特性的影响,其结果表明,硐库截面型式、埋深和运行下限压力对硐库围岩的损伤参数影响较为显著。Jiang 等<sup>[38]</sup>为了更好地研究压缩空气储能地下硐库围岩在充气和放气阶段的力学响应,建造了一个带混凝土衬砌和玻璃纤维密封层的小型试验硐库,结果表明,高压对围岩的影响有限,试验之中仅观察到弹性变形,良好的岩体质量可以保证地下洞室在高内压条件下的结构安全。Zhou 等<sup>[39]</sup>利用热力学耦合的损伤模型研究了 CAES 地下硐库的长期稳定性,同时在数值模型之中考虑了围岩的非均质性和结构面的影响,结果表明考虑损伤的热力学耦合模型围岩的最大主应力和最小主应力都会增大,同时结构面的倾角也会对围岩的力学响应产生很大的影响。王其宽等<sup>[40]</sup>以硐库的埋深、内径和间距 3 个参数,采用 ABAQUS 正交试验设计模拟工况,以洞室的关键点位移、塑性面积作为评价指标,研究 3 个参数对洞室稳定性的影响,研究结果表明:埋深是影响洞室变形和稳定性最显著因素,其次为洞室距离和洞室内径。Ma 等<sup>[41]</sup>建立了一个考虑到气体渗流的热-气-力耦合的理论解析解模型,结果表明,不同密封层和衬砌结构硐库的围岩温度场、气体渗流场和应力场的解析解随着时间的变化趋势几

乎相同,但随半径的变化趋势不同。Li 等<sup>[42]</sup>建立了考虑衬砌之中的钢筋的多场耦合有限元模型,并与原位试验结果进行对比,结果表明,围岩是承受内压的主要部分,对围岩进行锚固和注浆是提高硐库稳定性的必要手段,同时数值模型之中的混凝土应力约为钢筋应力的 1/10,说明钢筋和混凝土之间的变形是协调的。

上述研究表明:CAES 地下硐库内部压力会随着注采气的过程发生周期性的加卸载和保载的变化,同时伴随着温度的不断变化,洞室围岩实际受到疲劳、蠕变和高温冷却循环交替作用的影响。而不同的荷载形式及温度会使岩石物理力学性质发生改变,进而影响到岩石的本构模型、长期变形规律及破坏模式。国内外学者在疲劳、蠕变和高温循环作用下岩石的劣化机制、损伤规律方面取得了一系列成果,并基于上述结果,建立了 CAES 地下硐库多场耦合模型,揭示了在频繁注采气条件下洞室围岩的热力学响应及累计损伤效应。但目前关于疲劳、蠕变及高温循环全耦合条件下岩石物理力学性质演化特征及劣化研究较少,同时对考虑三者共同作用下的岩石时效变形规律鲜有涉足,因此利用计算机断层扫描(computed tomography,简称 CT)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope,简称 SEM)及声发射(acoustic emission,简称 AE)等技术对岩石在三者共同作用下的损伤耦合效应进行研究,以探究微观结构和宏观力学性质之间的联系,在此基础上建立考虑三者共同作用下的岩石本构模型,并将其应用于工程尺度的模拟之中将是未来的一个研究方向。

## 5 钢筋混凝土衬砌开裂与控制标准

### 5.1 LRC 衬砌结构

基于 LRC 的相关系列研究工作<sup>[23,35,43-45]</sup>及瑞典 Skallen 天然气储气库的工程案例<sup>[46]</sup>,我国正在开展岩石内衬储气库的研究和技术试验,且正在同步建设多个人工硐室型 CAES 示范项目。相比于传统的隧道工程,LRC 的研究对象仍然是围岩及衬砌结构,但其低周循环、高温高压的荷载形式会显著影响内衬结构,继而影响外部围岩,使得水工硐室或交通隧道设计理念无法适用到内衬储气库。

目前,人工造腔的 LRC 主要是采用了钢筋混凝土作为衬砌层,起到支护、平整围岩、传递内压的作用。硐壁初期支护主要目的是初步稳固围岩,除采用锚喷等柔性支护手段外,同时采用灌浆锚杆等方式对周围天然(或开挖形成)裂隙围岩进行注浆

加固, 进一步提升围岩完整性。洞身二衬一般采用模筑钢筋混凝土, 基于裂缝控制标准配置内外双层(或三层)环向筋及纵向筋。文献[47]报道, 采用钢纤维加筋混凝土浇筑二衬可提高混凝土抗裂能力。衬砌整体结构示意图如图 14 所示。洞室内部的密封层①作为气密层, 不承受主要内压荷载, 目前多采用薄层钢板。此外, 我国学者夏才初<sup>[3]</sup>、蒋中明<sup>[2,48-49]</sup>等研究了橡胶、玻璃钢等高分子、复合材料作为密封层的可行性。在密封层①与二衬③间, 为应对不同材料变形不协调的问题, 需要施加一层滑动层②(一般采用沥青), 以减少相互摩擦接触。

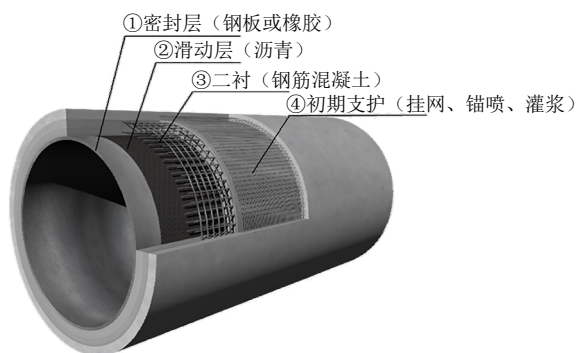


图 14 CAES 地下储气库衬砌密封结构示意图  
Fig.14 Schematic diagram sealing structure of the LRC for CAES

## 5.2 LRC 衬砌开裂机制与影响因素

目前世界上暂无已建成的人工洞室型 CAES 电站, 类似的瑞典 Skallen 天然气储气库也未有相关衬砌开裂的研究报道, 但结合已有水工隧洞的运行经验表明, 仅在 1.0~1.5 MPa 的内压下, 地下洞室中的钢筋混凝土就会发生开裂<sup>[50]</sup>。例如, 重庆中梁水电站引水隧道某洞段<sup>[51]</sup>在小于 100 m 水头压力条件下首次充水运行后衬砌开裂就部分出现了 0.3 mm 宽水平裂缝(图 15(a)), 运行半月后最大贯穿裂缝宽度达到了 1.3 mm(图 15(b))。目前的 CAES 地下储气洞室最大设计内压高达 15~18 MPa, 在数 10 倍于水工洞室的压力条件下, 不论是从经验估计还

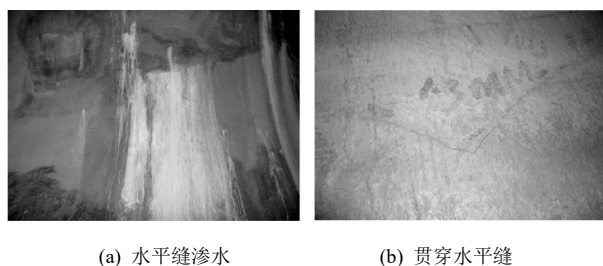


图 15 中梁一级水电站引水隧洞衬砌裂缝<sup>[51]</sup>  
Fig.15 Cracks in the lining of diversion tunnel of the Zhongliang first-class hydropower station<sup>[51]</sup>

是数值计算的结果分析, 混凝土材料必然发生宏观开裂。

LRC 钢筋混凝土衬砌承受高内压力时, 围岩、衬砌钢筋混凝土和钢板密封层作为三元组合结构将协调工作。一般认为, 组合结构中围岩承担主要的内压荷载, 钢筋混凝土衬砌主要传递荷载。在衬砌未开裂时, 由于混凝土与钢筋的黏结作用, 两者共同承担荷载。当内水荷载增大, 并且衬砌环向拉应力超过混凝土抗拉强度, 衬砌混凝土开始出现损伤破坏, 内部微裂纹萌生、扩展并贯通, 直至产生宏观裂缝。由于钢筋、混凝土材料变形不协调, 在开裂处混凝土和钢筋出现相对滑动与脱离, 钢筋独立承担衬砌拉应力, 通过与混凝土之间的摩擦力向衬砌混凝土传递应力<sup>[52]</sup>。因此, 衬砌混凝土与钢筋的联合承载作用模型可采用图 16 表示。

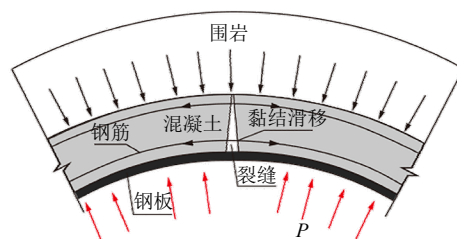


图 16 围岩-钢筋混凝土衬砌-密封层三元组合结构受力示意图  
Fig.16 Schematic diagram of the stress of ternary composite structure of surrounding rock-reinforced concrete lining and sealing layer

## 5.3 LRC 衬砌裂缝宽度的计算

当混凝土开裂后, 将对密封层整体及局部变形造成重大影响。由于密封层仅作为地下洞室密封的气密性保证, 不承受主要的内压荷载, 故密封层一般设计的较薄, 以增加其柔性。目前密封钢板的厚度设计大多在 8~16 mm, 对于混凝土裂缝过宽处, 必然造成局部应力集中(见图 17), 使得钢板屈服进入塑性服役。随着裂缝持续扩展、扩宽, 钢板在高内气压作用下易出现内凹, 最终造成局部破损。因此, 裂缝宽度将直接影响内部密封层设计及运行

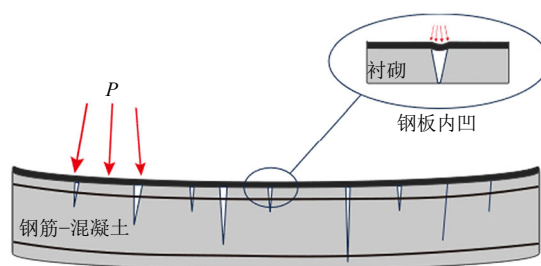


图 17 钢筋混凝土衬砌开裂与密封钢板内凹示意图  
Fig.17 Schematic diagram of cracked reinforced concrete lining and concave sealing steel plate

安全。

由于压力隧洞的环境条件和工作机制复杂,影响裂缝开展的因素很多,与工民建结构有较大差异,部分计算理论基于传统的钢筋混凝土开裂机制,但计算参数均经过了修改和优化,已列入到国家的《水工隧洞设计规范》(SL 279—2016)<sup>[53]</sup>和《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)<sup>[54]</sup>。另有部分专家学者<sup>[55-58]</sup>对水工隧洞混凝土开裂做了专门研究,形成了各具特点的计算方法。总体而言,裂缝宽度计算方法大致有两类:一类是根据两裂缝间结构应变来获得裂缝开度,另一类为通过计算开裂面两端位移进而获得裂缝宽度<sup>[59]</sup>。国内外研究人员在这两种思路下提出了多个裂缝计算理论。

1961 年,山谢夫在第七届国际大坝会议上提出衬砌开裂后裂缝宽度应为常值,已有裂缝宽度不再增加,只产生新的裂缝,但其裂缝宽度不变的假设明显不符合实际<sup>[60]</sup>。1965 年, Broms 和 Lutz 根据受拉钢筋混凝土构件开裂特性提出了最大裂缝开度估算公式<sup>[61]</sup>,将钢筋应力、间距以及保护层厚度作为衬砌裂缝的影响因子,并通过求解钢筋应力来体现裂缝间水压力及围岩对裂缝的影响,但该公式中缺乏对裂缝间距与裂缝宽度关系的体现。潘家铮<sup>[55]</sup>考虑了围岩和内水压力对衬砌裂缝的影响以及混凝土

土的塑性,建立了相应的裂缝计算方法,但未考虑钢筋对衬砌开裂的限制作用。1997 年,瑞士学者 Schleiss<sup>[56]</sup>基于透水衬砌特点提出了一种钢筋混凝土裂缝计算公式,反映了钢筋应力对裂缝宽度的影响和与混凝土的黏结滑移,但该方法不能求裂缝间距,对荷载、围岩对裂缝宽度的影响也反映不足。刘秀珍<sup>[57]</sup>基于弹性地基曲梁提出了衬砌结构开裂后的断面内力计算公式,考虑了钢筋应力对裂缝扩展的影响,但仅适用于围岩不开裂的情况。荣耀等<sup>[58]</sup>提出了控制衬砌结构的微分方程,并计算出裂缝宽度解析解,但需假定围岩具有弹性范围和均匀分布的剪应力,这些假设与实际情况可能不同。此外,我国现行的《水工隧洞设计规范》<sup>[53]</sup>、《水工混凝土结构设计规范》<sup>[54]</sup>给出了混凝土裂缝宽度的近似计算式,但未考虑内外水渗等特点,需进一步完善。Gergely 和 Lutz 基于大量混凝土裂缝试验数据<sup>[62]</sup>,提出了 Z 系数法,综合考虑了混凝土有效截面面积、钢筋数量、保护层厚度和钢筋应力等因素,但当保护层厚度过大时,Z 系数法缺乏精确性,后被 Robert 提出的钢筋间距控制法所替代,并纳入新版《美国混凝土结构建筑规范》(ACI 318-08)<sup>[63]</sup>。上述的有关裂缝宽度计算公式及考虑的参数如表 2 所示。

表 2 有压砌室衬砌裂缝宽度计算公式及参数

Table 2 Formula and parameters for calculating crack width in pressure chamber lining

| 规范或方法                                         | 计算参数 |      |        |      |     |       |        |       |
|-----------------------------------------------|------|------|--------|------|-----|-------|--------|-------|
|                                               | 钢筋应力 | 钢筋直径 | 钢筋黏结性能 | 钢筋间距 | 配筋率 | 保护层厚度 | 构件受力特征 | 混凝土拉伸 |
| 《水工混凝土结构设计规范》<br>(SL191—2008) <sup>[54]</sup> | √    | √    | √      | ×    | √   | √     | √      | ×     |
| 《水工隧洞设计规范》<br>(SL279—2016) <sup>[53]</sup>    | √    | √    | √      | √    | √   | ×     | √      | ×     |
| Z 系数法 <sup>[62]</sup>                         | √    | √    | √      | √    | ×   | √     | √      | ×     |
| Frosch 法 <sup>[64]</sup>                      | √    | √    | √      | √    | ×   | √     | √      | ×     |
| Broms-Lutz 法 <sup>[61]</sup>                  | √    | √    | √      | √    | ×   | √     | √      | √     |
| 潘家铮法 <sup>[55]</sup>                          | ×    | ×    | ×      | ×    | ×   | ×     | √      | √     |
| 刘秀珍法 <sup>[57]</sup>                          | √    | √    | √      | √    | ×   | ×     | √      | √     |

随着计算机技术的发展,数值计算方法逐渐可以模拟压力砌室的裂缝起裂、扩展、交汇、贯通过程,能直接获取裂缝宽度。陈晨等<sup>[65]</sup>采用颗粒单元法(PFC<sup>2D</sup>)模拟了压力隧洞内衬混凝土-环向钢筋的联合承载作用,采用接触形式模拟裂缝,研究了环向配筋率、钢筋位置、隧洞半径等因素对裂缝宽度的影响,发现配筋率、钢筋位置对裂缝宽度的影响较大。周利等<sup>[66]</sup>在 Abaqus 中引入了具有水力耦

合属性的内聚单元模拟衬砌裂缝和衬砌-围岩界面,以反映缝隙的位移非连续特征以及内部压力水体的流动特性,如图 18 所示<sup>[66]</sup>。通过渗流-应力间接耦合方法,提出了水工隧洞钢筋混凝土衬砌水压致裂算法,并探究了衬砌裂缝发展历程、裂缝宽度演化以及缝隙内部水压力传递特征。

蒋中明等<sup>[67]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件针对 CAES 内衬砌库开发了一套基于混凝土 William-Warnker 破坏

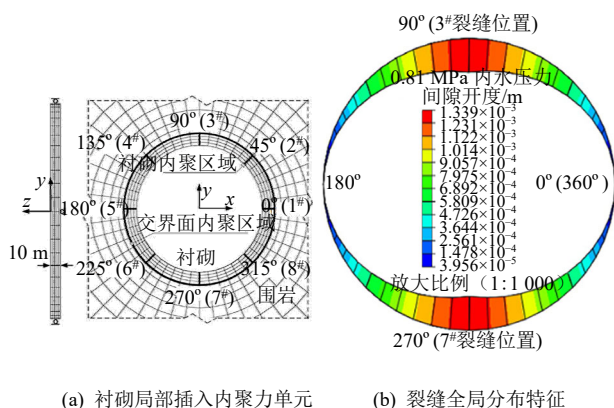


图 18 水力耦合的内聚力衬砌开裂模型及裂缝计算结果<sup>[66]</sup>  
Fig.18 Hydraulic coupling cohesive lining cracking model and crack calculation results<sup>[66]</sup>

准则的分析方法,如图 19(a)所示。针对衬砌配筋方式、配筋率、钢筋保护层厚度、围岩类别和温压循环荷载作用等因素研究了钢板-钢筋混凝土内衬储气库裂缝的分布特征及开裂演化特征,研究成果表明:衬砌的配筋方式和围岩质量是影响衬砌裂缝宽度的主要因素;空气压力和温度同步变化引起的热力耦合效应还有助于减小衬砌中出现的裂缝宽度;衬砌中的裂缝宽度将随充放循环次数增加而增大,在放气阶段有小幅减小,如图 19(b)所示。

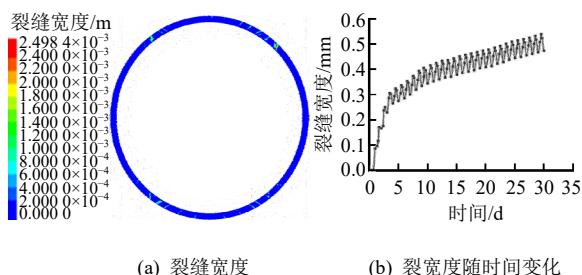


图 19 蒋中明等<sup>[67]</sup>开发的衬砌开裂分析计算结果  
Fig.19 Calculation results of lining cracking analysis developed by Jiang Zhong-ming et al<sup>[67]</sup>

综上所述,国内外目前存在多种计算水工隧洞类压力洞室的混凝土开裂的公式或方法,但尚未发现针对储气用 LRC 钢筋混凝土衬砌裂缝的计算方法,国内外研究论文或工程报告一般使用数值模拟方法对衬砌开裂位置、数量及宽度进行计算或复核。储气洞库的设计理念不同于一般的水工隧洞,其对于密封性能的要求更高,渗漏率过大将对地面电站的发电效率造成较大影响。水工隧洞则可以允许衬砌开裂,但需保证围岩不会发生水力劈裂。上述用于水工隧洞的衬砌开裂计算公式大多考虑了衬砌间的水压力,同时对于裂缝性状的分析或假设与工程

实际不符,且现有公式一般来源于一般钢筋混凝土构件的破坏机制,未能考虑压力隧洞受围岩和内压的内外作用,还有待进一步研究。

#### 5.4 LRC 的衬砌裂缝控制标准

出于工程经济的考虑,LRC 设计的衬砌不足以抵抗内压而不发生开裂,因此,在满足围岩不发生渗透破坏、内部密封层不发生破坏的条件下,对高压隧洞的钢筋混凝土衬砌采用限裂设计已成为工程界的共识。限裂设计不同于抗裂设计,限裂设计需要提出合理的限裂标准,一般是裂缝最大宽度。表 3 总结了我国及其他几个国家和地区对于裂缝限值的规范标准<sup>[54,68-70]</sup>。对于工民建领域的混凝土建筑或水工领域的无压洞室而言,混凝土构件在正常配筋率的条件下基本能满足上述规范限值。对于压力隧洞而言,目前衬砌限裂设计中所采用的公式基本上是普通钢筋混凝土结构的裂缝参数计算公式,其计算结果表明裂缝“密而细”。但是,室内试验与原型观测均表明,水工压力隧洞衬砌出现裂缝的规律与一般钢筋混凝土结构差异显著。水工压力隧洞实际裂缝宽度远较采用《水工混凝土结构设计规范》<sup>[54]</sup>计算值大,但裂缝条数却比计算值少,裂缝呈“稀而宽”的特征。究其原因与隧洞结构特点和衬砌开裂后的应力状态变化有关,当衬砌在洞段围岩某薄弱处出现裂缝后,裂缝处的拉应力立即消除,近处围岩、衬砌的应力重新调整。压力水进入并向着裂缝的两侧壁挤压,使裂缝附近的衬砌拉应力释放,并迅速降低、消退,而裂缝则在压应力的作用下快速扩展。因此,随着压应力的增大且不断扩大影响范围的同时,在裂缝口近侧邻近区域将不可能再出现因拉应力超过混凝土衬砌抗拉强度而引起的新裂

表 3 国内外各类规范规定的混凝土裂缝宽度限值表  
Table 3 Concrete crack width limit stipulated by various domestic and foreign regulations

| 规范名称                                                            | 结构所处条件                                     | 最大裂缝限值/mm   |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------|
| 《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) <sup>[68]</sup>                       | 一类环境(室内干燥环境;无侵蚀性静水浸没环境)对于年均湿度小于 60%,取括号内数值 | 0.30 (0.40) |
|                                                                 | 其他环境                                       | 0.20        |
| 《水工混凝土结构设计规范》(SL 191-2008) <sup>[54]</sup>                      | 一类环境(室内环境)                                 | 0.40        |
|                                                                 | 二类环境(室内潮湿环境;露天环境;水下或地下环境)                  | 0.30        |
|                                                                 | 其他环境                                       | 0.30~0.15   |
| 美国规范 ACI 318-08 <sup>[63]</sup><br>美国规范 ACI 224 <sup>[69]</sup> | 室外环境                                       | 0.55        |
|                                                                 | 室内环境                                       | 0.40        |
| 欧洲规范 (EN 1992-1-1: 2004) <sup>[70]</sup>                        | 潮湿大气环境                                     | 0.40        |
|                                                                 | 氯离子侵蚀环境                                    | 0.30        |

缝。但是对于压缩空气储能隧洞而言,其内压作用形式为气体,不同于水工隧洞,在钢筋混凝土衬砌内层还有一层密封层防止气体泄露。当衬砌开裂后,裂缝处的拉应力会释放,但裂缝两侧壁并未有压力作用,裂缝附近的拉应力并未完全释放,且由于钢筋的存在,裂缝并不能快速扩展,故压缩空气储能内衬砌室衬砌的裂缝分布可能仍呈“密而细”的特点。

随着有压隧洞各项工程的不断实施,将围岩-衬砌作为联合承载构件的设计思路不断得到业界认可,控制裂缝宽度的设计将使得衬砌在满足一定开裂宽度的前提下能够保障压力隧洞的正常工作。然而 CAES 地下 LRC 荷载状态不同于常规水压洞室,原有各项限裂控制标准并不一定适用,一个安全合理的最大裂缝宽度限值将直接影响钢筋混凝土衬砌的结构参数,并最终影响工程造价,这应当成为当前值得研究的方向之一。

## 6 密封层

密封层在 CAES 系统中的主要作用是防止压缩空气从储气洞室中泄漏,从而保证系统效率。一个理想的密封层应具备高气密性、良好的耐久性、抗高压和温度变化的能力以及与洞室衬砌的良好黏合性。在材料选择和密封技术方面存在诸多挑战,特别是如何确保长期稳定性和经济性,以及如何克服高压环境下材料老化和疲劳等问题。

世界上仅有的 2 座商业 CAES 电站都是以盐岩溶腔作为地下储库建造,它们依靠盐岩自身的低渗透性防止储存的空气泄漏<sup>[8]</sup>。但是盐岩的分布具有局限性,未必在新能源富集的地区分布。1984 年,Salter 等<sup>[5]</sup>首次提出在 CAES 洞室中使用内衬密封结构以实现气体密封,提议采用不透水柔性薄膜作为密封层。早期研究主要集中在采用钢板等传统材料作为密封层的方案,但钢板在高温作用下,强度会大幅降低<sup>[71-72]</sup>,而钢结构的腐蚀也是役钢结构的主要损伤<sup>[73-74]</sup>。尽管这些材料具有较好的结构强度,但成本高且不易安装。随着材料科学的进步,更多的研究开始关注于低渗透性混凝土、橡胶和玻璃钢等新型材料<sup>[19,35,75-76]</sup>,研究涉及到这些材料的气密性、耐久性、抗高压能力和对温度变化的适应性。

例如,美国 Soyland 项目采用在混凝土衬砌内侧固定橡胶材料作为密封层。这种设计提供了一种经济有效的密封方式,但研究发现在高压环境中橡胶材料的渗透性是一个不可忽视的问题。Rutqvist 等<sup>[19]</sup>探讨了 CAES 系统在混凝土衬砌岩洞中的耦合热力

学和岩石力学性能,考虑了两种衬砌形式:都使用 50 cm 厚的低渗透性混凝土衬砌,但其中一个还包括了钢或橡胶等材料的密封层。仅用低渗透性混凝土作为主要密封层,可能在经济上更可行,并且安装和维护更简单。加入密封层可以减少最大有效拉应力,但仍处于较大的张拉状态。蒋中明等<sup>[49]</sup>的研究采用热力耦合理论分析了平江浅埋地下储气实验库在充放气循环作用下的力学响应,探讨了密封层材料特性对实验库受力特性的影响,指出密封层材料性能差异对密封层、混凝土衬砌和围岩的受力特性有显著影响,并推荐平江浅埋地下储气实验库密封层材料采用玻璃钢。

在高分子密封材料的可行性方面,Zhou 等<sup>[77]</sup>对橡胶板密封层在 CAES 操作中的气密性进行了数值模拟分析,结果显示,尽管高压下橡胶板有一定的渗透性,但泄漏量通常很小,可以满足 CAES 洞室的气密性要求。周瑜等<sup>[78]</sup>研究了高分子材料如丁基橡胶、三元乙丙橡胶、天然橡胶和玻璃钢等材料的渗透系数,并通过试验验证了这些材料能满足 CAES 洞室的气密性和力学特性要求,结果显示典型运营工况下,除玻璃钢外其余 3 种高分子密封层都会发生一定程度的空气泄漏,但泄漏量都比较小,满足压气储能洞室的气密性和力学特性要求,丁基橡胶和玻璃钢可以作为优先考虑的密封层材料。Qin 等<sup>[79]</sup>对高分子材料密封层在不同气压下的气密性进行了深入分析,特别关注了高分子材料密封层在高压环境下的气密性表现。通过对丁基橡胶密封层进行高压渗透率测试,并建立相应的渗透系数演化方程,研究发现即使在高压条件下,密封层的日气体泄漏百分比仍远低于 1% 的标准,表明在考虑密封层厚度和储气压力的合理选择下,丁基橡胶作为 CAES 洞室的密封材料是有效的。Zheng 等<sup>[80]</sup>采用新型纳米级有机硅聚合物涂料作为人工洞室密封层,并结合 Knudsen 扩散理论提出了适用于该涂层的气体渗流评估模型。试验结果表明,当涂层厚度达到 7~10  $\mu\text{m}$  时岩石试样的渗透性显著降低。

高分子密封层的气密和受力特性问题是涉及到洞室热力学、力学和高分子气体渗透的复杂多场耦合问题,不少学者研究了在高压和变化温度条件下密封层材料的热力学和力学响应。Zhou 等<sup>[15,81]</sup>分别通过解析解法和数值模拟研究了 CAES 内衬砌室的热力学响应,发现在混凝土衬砌和密封层中发生了显著的温度波动,而在围岩中未观察到强烈波动。不同的密封材料(高分子材料、钢、气密混凝土)对洞内空气温度和压力的影响不同,与钢板和

气密混凝土密封相比, 高分子材料密封产生了相对较高的空气温度和压力。Prado 等<sup>[20]</sup>通过研究废弃矿井中的 CAES 储气库的热力学性能也得出了相同的结论, 在模拟中使用了 FRP 材料和钢作为气体的密封层。结果显示在密封层和混凝土衬砌之间有显著的热通量, 但在岩体中未观察到温度波动。当使用钢制密封层时, 空气温度波动减小。Menéndez 等<sup>[82]</sup>开发了一个分析模型来研究 A-CAES 系统在衬砌隧道中的热力学行为。他的研究分析了 100 个循环中高分子材料和钢作为密封层时的空气温度和压力以及密封层、混凝土衬砌和岩石质量中的温度和热传递。结果显示, 当密封层的热传递增加时, 储存容量增加。

根据以往的研究, 发现对于 CAES 地下洞室密封层的研究主要包括材料选择与性能、通过数值模拟与试验验证分析密封层的热力学性能和长期运行中的稳定性和耐久性。CAES 地下洞室密封层的研究显示了从传统材料到现代高分子材料的转变, 不仅提高了气密性和系统效率, 还降低了成本。未来的研究将继续探索更高效、经济、环保的密封材料和技术, 以适应日益增长的能源储存需求。同时, 还需要进一步改进特定材料的规范、连接及安装方法, 以确保 CAES 系统的安全性和效率。

## 7 上覆岩体稳定性与安全埋深

在 CAES 电站地下硐库的典型埋深下, 库内的储气压力要远大于硐顶的原有竖向压力, 因此可能造成硐库上覆岩体隆起破坏。良好的岩体质量和足够的硐库埋深可以避免此失稳情况的发生<sup>[83]</sup>。然而过大的埋深会增加工程的造价, 因此评估上覆岩体稳定性和确定安全埋深是建设地下内衬硐库关键环节。

目前, 有压隧洞的抗抬准则包括应用于水工压力隧洞的挪威准则、水力劈裂准则以及初始应力场最小主应力准则<sup>[7]</sup>。挪威是最早使用无衬砌隧洞的国家, 自 20 世纪 70 年代以来, 挪威的工程界基于工程中倾斜地表下压力隧洞的最小覆盖厚度条件, 用隧洞周边的最小埋深代替岩体垂直覆盖厚度, 提出了以下准则<sup>[7]</sup> (见图 20):

$$h_1 = \frac{F_s \gamma_w h_w}{\gamma \cos \beta_n} \quad (5)$$

式中:  $\beta_n$  为最小岩体覆盖面的坡角,  $\beta_n > 45^\circ$  时取  $45^\circ$ ;  $h_w$  为洞内静水压力水头;  $h_1$  为岩体最小覆盖厚度 (不包括全、强风化厚度);  $\gamma_w$  为水的重度;  $\gamma$

为岩石重度; 安全系数  $F_s$  标准设置为 1.1。

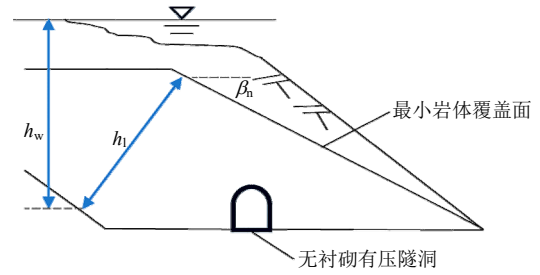


图 20 挪威抗抬准则示意图<sup>[7]</sup>

Fig.20 Schematic diagram of Norwegian uplift resistance criteria<sup>[7]</sup>

水力劈裂准则要求隧洞开挖后周围的裂隙的法向应力大于水头压力, 否则裂隙将张开, 即为水力劈裂, 如图 21 所示。

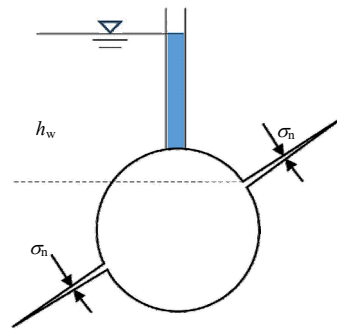


图 21 有压隧洞水力劈裂准则示意图<sup>[7]</sup>

Fig.21 Schematic diagram of hydraulic fracturing criteria for pressurized tunnels<sup>[7]</sup>

上述方法都要求已知围岩裂隙产状, 但实际并没有办法可以控制产状。为了防止围岩被水力劈裂, 1972 年挪威德隆汉姆大学则提出了一种更通用的准则, 即最小应力准则<sup>[7]</sup>, 要求隧洞内的内水压力应小于围岩初始应力场:

$$F_s \gamma h_w \leq \sigma_{\min} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{\min}$  为隧洞围岩初始应力场中最小主应力; 安全系数  $F_s$  标准设置为 1.3~1.5。

挪威准则要求隧洞的上覆岩体重量不小于由硐室内压造成的上抬压力, 水力劈裂准则要求水压力不大于裂隙法向应力, 最小应力准则要求水压力不大于初始应力场最小主应力。上述准则虽简单明了, 但理论上不够严谨, 或忽视了影响压力隧洞安全运行的其他因素, 例如围岩强度等, 或缺乏可靠性, 抑或不能完全防止内水大量外渗。这些方法都属于偏保守的设计准则, 其安全系数标准定义较小,

一般为 1.3~1.5。水工隧洞一般不采取密封措施,且设计原则要求隧洞衬砌与围岩共同承受内水压力。然而,压缩空气储能地下内衬硐库设计理念是采用柔性密封层和衬砌,依靠围岩承担主要内压,对围岩的裂隙要求并不像水工隧洞这么高,因此直接应用上述准则将过于保守。

在地下储气硐库领域,无衬砌天然气储气硐库通过确保围岩中的地下水压力大于硐库中的气体压力来防止气体泄漏,遵循此原则,1978—1991 年间,Åberg<sup>[84]</sup>、Goodall<sup>[85]</sup>、Kjørholt<sup>[86]</sup>概念研究中讨论了岩石硐库的储气容许准则,但没有给出对无衬砌岩石硐库储气库实际设计有用的结果。鉴于此,Liang 等<sup>[87]</sup>使用有限元计算了不同条件下储气的临界压力,并给出了临界压力的表达式,该式与地下水位、洞穴数目、几何形状、面积以及间距等参数相关,对无衬砌硐室气体储存的设计和实施具有重要意义。地下水压是无衬砌硐室安全运行的关键因素,例如地下 1 500 m 的埋深,储存压力才 15 MPa,并不具备经济性,因此无衬砌硐室在选址和工程应用上具有较大局限性,而内衬硐库则具有选址自由灵活的优势。

Barton 等<sup>[83]</sup>利用连续和非连续模型对埋深 50~100 m 的内衬硐库进行变形分析,验证了内衬硐库概念的可行性。而后瑞典开展了一些试验硐的研究,其中 Johansson<sup>[88]</sup>编写了关于隆起安全性的技术报告,给出了内衬硐库埋深的一般确定方法,但项目报告保密。美国国家能源技术实验室(National Energy Technology Laboratory, NETL)与 Itasca 咨询集团于 2001 年签订了关于地下内衬硐库技术的商业化潜力研究项目,Brandshaug 等<sup>[89]</sup>负责的项目研究报告中提出了将刚体圆锥模型和对数螺旋模型两种极限平衡模型作为大罐式硐库的抗抬稳定的评价准则。刚性圆锥模型假设硐库侧壁至地表的破坏面为竖直倾角  $\alpha$  为  $30^\circ \sim 45^\circ$  的斜直线<sup>[90]</sup>,其中较低的锥角适用于松软或风化岩体,该模型不考虑岩体强度,概念简单;对数螺旋模型基于土锚杆在浅层抗拔作用下的响应<sup>[91]</sup>,考虑了岩体破裂面的摩擦力,破裂面形态是一个关于内摩擦角的对数螺旋函数。然而 Mandl<sup>[92]</sup>发现,螺旋线的形状对侧压力系数的大小很敏感,较低的侧压力系数会使破裂面形态呈现为更窄、更陡的螺旋曲线,因此直接使用对数螺旋模型在侧压力系数较小时会过高估计硐库的抗隆起安全性。Kim 等<sup>[93]</sup>提出了一种破裂面为竖直面的模型,给出了大罐式和隧道式两种储气硐库安全系数的计算方法,考虑了地应力系数、岩体强度

等参数,优点是可以忽略破裂面角度的不确定性,使得计算简单,但由于假设的破裂面并不合理,其计算结果偏于保守。这 3 种极限平衡计算模型示意图见图 22,所采取的安全系数标准均为 2.0,该标准是边坡稳定性设计和隧道设计中常见的标准值。

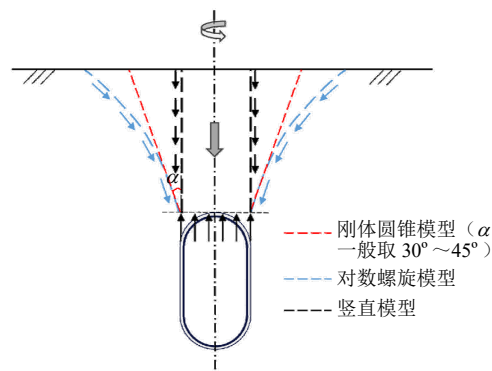


图 22 三种刚体极限平衡计算模型示意图  
Fig.22 Schematic diagram of three rigid body limit equilibrium calculation models

对于破裂面的不确定性问题,一些学者展开了对上覆岩体破裂面形态的研究。Tunsakul 等<sup>[94-96]</sup>结合数值方法和模型试验研究了隧道式和大罐式内衬硐库上覆岩体的开裂模式,其研究结果显示上覆岩体的破裂面形态受到侧压力系数的强烈影响,给出了不同地应力系数下裂纹的起裂压力以及起裂点位置和破坏面形态,为工程设计提供了一定的参考。

Thongraksa 等<sup>[97]</sup>基于模型试验和数值分析,主要考虑岩石的强度特性对破坏形式的影响,其分析结果表明,破坏模式强烈依赖于岩石的强度特性,而与初始地应力条件无关;破坏起始位置则受岩石强度和初始地应力共同影响,但其研究参数是基于岩石尺度的。Perazzelli 等<sup>[98]</sup>利用极限分析上限定理和 Mohr-Coulomb 准则,通过变分法评估了失效面的几何形状,系统分析了几何参数和岩土参数对极限内压的影响。徐英俊等<sup>[99]</sup>基于极限分析上限定律和 Hoek-Brown 准则,推导出了硐室隆起破坏函数与极限内压的表达式,并提出稳定性设计准则为最大运营储气压力小于极限压力,定义安全系数表达式为极限压力与最大运营压力的商,即其安全准则要求安全系数大于 1。孙冠华等<sup>[100]</sup>基于 Mohr-Coulomb 准则,将破裂面的求解转为常微分方程的初值问题求解,其结果与 Thongraksa 等<sup>[94-95]</sup>模型试验的结果吻合得较好,如图 23 所示,结果表明,破裂面的形态与侧压力系数强烈相关,同时受到内摩擦角的影响,对埋深、硐径等参数并不敏感。根据破裂面形态的规律,尽管破裂面是带有弧度的



成一个完整的体系，以此承受人工硐室内的气压。它既要具有一定的强度来承受储气硐室内的高压使结构稳定，又要在承受高压的同时使自身变形满足人工硐室的气密性要求。堵头受力主要是抵抗围岩的挤压、堵头与围岩接触面的剪切破坏，因此，在混凝土堵头设计阶段，应当进行最不利荷载条件下的堵头结构分析以及混凝土设计，以确保所受荷载安全地传递到围岩中。

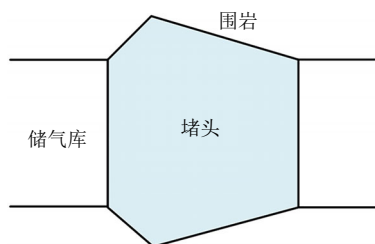


图 26 密封堵头  
Fig.26 Sealing plug

混凝土堵头的稳定性研究最开始是在抽水蓄能发电系统当中进行研究的，Auld<sup>[104]</sup>介绍了 4 种混凝土堵头类型（预防性堵头、控制堵头、应急堵头和临时堵头），并分析了每一种堵头的工作原理。根据混凝土堵头的工作特性，总结了其设计时需考虑的 8 点影响因素，分别是：①建造目的，②堵头的开挖类型，③混凝土堵头根据围岩情况确定的建造位置，④堵头形状，⑤混凝土堵头所承受的荷载，⑥围岩情况和应力，⑦堵头材料强度以及应力，⑧堵头的施工方法。采用极限平衡的方法提出了一个简单的混凝土堵头长度  $l$  计算公式：

$$p_1 \pi r^2 = 2 \pi r l p_{pc} \quad (7)$$

式中： $p_1$  为堵头所受荷载； $p_{pc}$  为堵头围岩界面处的容许冲切应力； $r$  为堵头半径。

Ilyushin<sup>[105]</sup>对嵌入式混凝土堵头和非嵌入式混凝土堵头进行了研究（如图 27 所示），还将嵌入式混凝土堵头分为一级式和多级式堵头。Ilyushin<sup>[105]</sup>根据水工建筑物设计规范所规定的建议取值提出了混凝土堵头长度的取值依据，分别为①根据耐久性确定堵头长度，②根据堵头与衬砌之间放置的密封件确

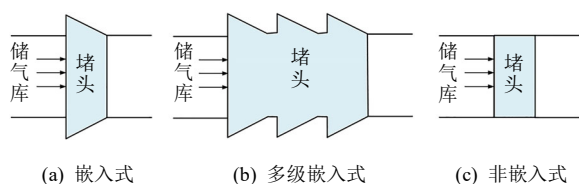


图 27 嵌入式与非嵌入式堵头<sup>[105]</sup>  
Fig.27 Cut-in and noncut-in plug<sup>[105]</sup>

定长度，③根据土的渗透强度确定长度。

Hökmark<sup>[106]</sup>对混凝土堵头的抗渗透性进行了计算，可知堵头的存在可以有效地降低隧道的泄漏。Hökmark<sup>[106]</sup>还就开挖围岩造成的扰动损伤以及引起的应力重分布情况对混凝土堵头性能的影响进行了研究，使用 FLAC 进行连续体数值计算，并采用三维离散单元代码 3DEC 进行不连续体计算，研究结果表明槽开挖引起的应力释放不太可能显著影响塞的性能。

Park 等<sup>[107]</sup>采用 FLAC<sup>2D</sup> 对压缩空气储能堵头进行了数值计算，分别比较了圆柱形、嵌入圆柱形、锥形和楔形堵头（见图 28）在受到 5 MPa 和 8 MPa 荷载时的应力、变形以及塑性区范围，提出将屈服体积比视为安全系数，以评价堵头形状对整个储气系统稳定性的影响，得到如下结论：①若圆柱形堵头安全系数小于 1.0，圆柱形堵头不适合作为堵头形状；②通过比较不同形状堵头在围岩的剪应力分布，对于锥形和楔形堵头来说，剪应力均匀分布在堵头与围岩的接触面中，而嵌入圆柱形堵头的剪应力集中在堵头前表面与围岩的接触面中，这是不利的；③锥形堵头与楔形堵头相比，锥形堵头具有更高的安全系数。因此锥型堵头是堵头形状中稳定性最好的形状。

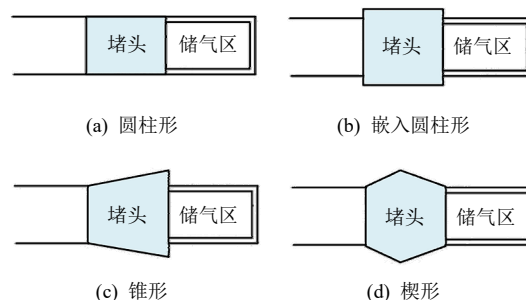


图 28 不同形状堵头<sup>[107]</sup>  
Fig.28 Different plug shapes<sup>[107]</sup>

Song 等<sup>[108]</sup>使用 3D 有限元法（finite element method，简称 FEM）研究了楔形堵头和锥形堵头受力特性，使用抗压强度为 24、30、40 MPa 的混凝土作为建筑材料，作用荷载为 5 MPa，由此得到堵头与围岩接触面的压力分布，并进行了稳定性评价，发现楔形堵头稳定性低，在堵头与衬砌之间的连接区域不稳定可能发生破坏。在堵头与围岩的接触面处，压力很大程度上作用在顶部与底部，说明堵头和围岩可能出现分离现象；而锥型堵头与围岩的接触面处压力均匀地分布在整个接触面上，两者出现分离的可能性较小，由此得出锥形堵头更稳定的结

论。

Usmani 等<sup>[109]</sup>提出堵头可能出现结构破坏以及化学破坏。因此,混凝土堵头的设计分为 3 个阶段:①结构设计,②热分析,③设计灌浆系统。使用 MIDAS Civil 进行混凝土堵头的水热分析以及进行冷却设计,得到混凝土堵头温度变化曲线,以此来设计冷却系统,防止堵头内部出现高温情况。

Perazzelli 等<sup>[110]</sup>使用数值模拟研究了不同尺寸的堵头所能承受的极限荷载,以及堵头与围岩的接触面的应力状态,结果表明:堵头的临界压力随着堵头的长度和扩展角增大而增大。

黄毓成<sup>[111]</sup>使用 FLAC<sup>3D</sup> 计算了双硐型堵头的应力状态以及位移情况,分别考虑了两种布置情况:两个储气库连接(方案 1)和两个储气库不连接(方案 2)。研究结果表明:两种方案储气库堵头区以受压为主,受拉区域分布在堵头前端与衬砌连接部分;堵头区第一主应力沿堵头长度方向逐渐递减。在荷载作用下,两种方案堵头区最大位移方向与被推离堵头方向一致,堵头位移大于围岩位移。在堵头与围岩接触面处,方案 1 堵头顶部和围岩存在一定程度的分离,两侧堵头和围岩接触较好,方案 2 堵头顶部、两侧前端和围岩存在一定程度的分离,但两种方案堵头与围岩的这种分离的位移值都极小。

陈晓虎<sup>[112]</sup>研究了废弃煤矿储气库堵头的渗透性,建立了热-流-固耦合模型,使用 COMSOL 模拟了储气库正常工作状态下堵头受到充气-储气-放气循环荷载产生的应力以及变形,得到以下结论:

(1) 堵头在底部出现最大应力,并且在充气结束时出现最大位移。

(2) 裂缝处气体流速在充气阶段持续增加;在储气阶段硐室维持在高温高压状态,裂缝气体流速增幅较小;放气阶段,气体流速减小;储气阶段(16~24 h),气体流速逐渐减小,在 24 h 时回归最初 0 h 时状态,气体流速整体呈升-升-降-降的趋势,与充气-储气-放气-储气相对应。

(3) 堵头-围岩接触界面处的裂缝开度与气压和温度有关,并且与渗透率沿裂缝轴向距离呈正相关。当硐室内气体为低荷载时裂缝整体开度较低,反之较大。

(4) 当堵头与围岩的交界面的节理粗糙度系数增加时,裂缝的渗透率也会随之增加。

综上所述,目前对于 CAES 人工硐室堵头的研究,主要针对在嵌入式的锥形堵头和楔形堵头两种形状,建立了二维模型以模拟堵头受到最大气压作用下的稳定性,发现堵头在前端与衬砌的连接处出

现局部拉应力,后端压应力沿堵头轴向逐渐减小,楔形堵头在底部和顶部出现高应力状态容易与围岩出现分离,因此锥型堵头的稳定性比楔形堵头的稳定性好。有学者<sup>[109-112]</sup>考虑了混凝土的水化热,使用数值计算和试验两种方式得到堵头建造过程中的温度变化由此设计了冷却系统来防止堵头的开裂,在此基础上建立了堵头的热-流-固耦合二维模型,研究了堵头在一个充放气循环作用下的密封性,发现堵头随着充气-储气-放气-储气循环作用下,其堵头与围岩接触处裂缝中的气体流速呈升-升-降-降的趋势。

当前 CAES 人工硐室堵头的研究难点在于堵头与围岩的接触面的胶结作用问题,以及堵头在长期循环荷载作用下的应力情况和变形情况。堵头的稳定性和密封性研究应当考虑温度、气压在堵头内部空隙中的作用,以及混凝土堵头作为永久构造物在长期工作状态下受到的化学腐蚀情况。因此,进行数值模拟时应当建立三维的热-流-固-化多场耦合模型。

## 9 结论与展望

新型电力系统的构建和新能源的高质量发展,离不开新型储能。基于 LRC 的 CAES 以其发电时间长、规模大、建设周期短、选址灵活、工程造价低、运行周期长、环境友好等优势,在新型储能领域展现出了较强的生命力,将有力地促进我国能源结构转型。LRC 的研究,主要针对高内压膨胀压力和温度变化等荷载特征,在以下理论和方法方面取得了丰富的研究成果,并亟需进一步深入研究。

### (1) 库内温压响应与密封结构传热特性

目前关于库内温度的研究主要集中在运行阶段温度和平均温度。库内整个运行阶段平均温度的最大值出现在首次充气阶段结束时。因此,库内温度分布特征(局部高温)及其与充放气速率、充放气方式、硐库型式与展布的工程尺度研究是今后研究的重点。

### (2) 围岩应力路径与力学响应

运行期硐库围岩处于疲劳、蠕变和高温冷却循环交替作用的环境中。国内外学者在疲劳、蠕变和高温循环作用下岩石的劣化机制、损伤规律方面取得了一系列成果,并建立了地下硐库多场耦合模型,揭示了在频繁注采气条件下洞室围岩的热力学响应及累计损伤效应。但目前关于疲劳、蠕变及高温循环全耦合条件岩石物理力学性质演化特征及劣化研究较少,建立三者共同作用下的岩体本构模型,并

将其应用于工程尺度的模拟之中将是未来重要的研究方向。

### (3) 钢筋混凝土衬砌开裂与控制标准

随着有压隧洞工程的不断实施,将围岩-衬砌作为联合承载构件带缝工作的设计思路不断得到业界认可。然而压缩空气储能地下岩石内衬硐库荷载状态不同于常规水压硐室,原有各项限裂控制标准并不一定适用,如何确定一个安全合理的最大裂缝宽度限值将直接影响钢筋混凝土衬砌和密封层的设计参数并最终影响工程造价,这应当成为当前值得研究的方向之一。

### (4) 密封层

目前密封层的研究主要包括材料选择与性能、通过数值模拟与试验验证分析密封层的热力学性能和长期运行中的稳定性和耐久性。研究成果显示了从传统材料到现代高分子材料的转变,不仅提高了气密性和系统效率,还降低了成本。未来的研究将继续探索更高效、经济、环保的密封材料和技术,以适应日益增长的能源储存需求。同时,还需要进一步改进特定材料的规范、连接及安装方法,以确保 CAES 系统的安全性和效率。

### (5) 上覆岩体稳定性与安全埋深

上覆岩体稳定性的研究正朝着更加综合、精确和实用的方向发展,但仍存在一些不足。主要集中在隧道式硐库和理论研究方面,在大罐式硐库和工程实践方面还需要深入研究。另一方面,上覆岩体的地质结构对稳定性的影响也需要进一步思考。在基于极限平衡理论的安全系数控制标准取值,仍需要根据岩石工程经验进行实用性验证。

### (6) 密封堵头

目前主要集中在嵌入式的锥形堵头和楔形堵头,大多数学者采用数值模拟的方法对堵头的稳定性进行研究,得到了很多有益的结论。堵头的研究难点在于堵头与围岩的接触面的胶结作用,以及堵头在长期循环荷载作用下的应力集中和变形情况。

## 参考文献

- [1] 吴月辉. 新型储能进入大规模发展期[N]. 人民日报, 2024-03-18(19).  
WU Yue-hui. New energy storage enters a period of large-scale development[N]. People's Daily, 2024-03-18(19).
- [2] 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 Zhong-ming, LI Peng, ZHAO Hai-bin, 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.

- [3] 夏才初, 周舒威, 周瑜, 等. 压缩空气储能的地下岩石内衬洞室关键技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2021.  
XIA Cai-chu, ZHOU Shu-wei, ZHOU Yu, et al. Key technologies of underground rock lining caverns for compressed air energy storage[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2021.
- [4] JOHANSSON J. High pressure storage of gas in lined rock caverns[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2003.
- [5] SALTER M DE G, MACFARLANE I M, WILLETT D C, et al. Design aspects for an underground compressed air energy storage system in hard rock[C]//ISRM Symposium: Design and Performance of Underground Excavation. Cambridge: British Geotechnical Society, 1984: 37-44.
- [6] 孙冠华, 朱开源, 纪文栋, 等. 压缩空气储能电站地下硐库的基本概念、设计理念与方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(1): 14-23.  
SUN Guan-hua, ZHU Kai-yuan, JI Wen-dong, et al. Basic concepts, design principles, and methods of compressed air energy storage underground caverns[J]. **Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering**, 2024, 6(1): 14-23.
- [7] 蔡晓鸿, 蔡勇斌, 蔡勇平. 水工压力隧洞与坝下涵管结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 29-34.  
CAI Xiao-hong, CAI Yong-bin, CAI Yong-ping. Calculation of stresses in hydraulic pressure tunnels and culvert structures under dams[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2013: 29-34.
- [8] CROTOGINO F, MOHMEYER K U, SCHARF R. Huntorf CAES: more than 20 years of successful operation[C]//SMRI Spring Meeting. Orlando, USA: [s. n], 2001.
- [9] 蒋中明, 欧阳钰榕, 韩克武, 等. 地下储气库压缩空气温度时空分布与温控方法[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(12): 3433-3444.  
JIANG Zhong-ming, OUYANG Yu-rong, HAN Ke-wu, et al. Study on temporal and spatial distribution and temperature control methods of the compressed air in underground cavern[J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2023, 44(12): 3433-3444.

- [10] 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): 78-85.
- LIU Li-yuan, JIANG Zhong-ming, WANG Jiang-ying, et al. Thermodynamic analyses of compressed air energy storage in a underground rock cavern[J]. **Energy Storage Science and Technology**, 2018, 7(2): 78-85.
- [11] 刘数华, 方坤河. 混凝土的极限拉伸值研究综述[J]. 福建建材, 2007(1): 14-16.
- LIU Shu-hua, FANG Kun-he. Summarization of research on ultimate tension of concrete[J]. **Fujian Building Materials**, 2007(1): 14-16.
- [12] KUSHNIR R, ULLMANN A, DAYAN A. Thermodynamic models for the temperature and pressure variations within adiabatic caverns of compressed air energy storage plants[J]. **Journal of Energy Resources Technology**, 2012, 134(2): 021901.
- [13] 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.
- [14] XIA C C, ZHOU Y, ZHOU S W, 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.
- [15] ZHOU S W, XIA C C, DU S G, 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: 749-770.
- [16] 蒋中明, 刘澧源, 赵海斌, 等. 地下储气库热力耦合数值分析动态边界条件研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1149-1157.
- JIANG Zhong-ming, LIU Li-yuan, ZHAO Hai-bin, et al. Study of dynamic boundary conditions for thermo-mechanical coupling analysis of underground gas storage cavern[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1149-1157.
- [17] WU D, WANG J G, HU B W, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] PRADO L, MENÉNDEZ J, BERNARDO-SÁNCHEZ A, et al. Thermodynamic analysis of compressed air energy storage (CAES) reservoirs in abandoned mines using different sealing layers[J]. **Applied Sciences**, 2021, 11(6): 2573.
- [21] 孙冠华, 耿璇, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站地下硐库首次充气的温度响应与局部高温控制方法[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 29-38.
- SUN Guan-hua, GENG Xuan, YU Xian-yang, et al. Temperature response and local high temperature control method for the first inflation of underground cavern in compressed air energy storage power station[J]. **Thermal Power Generation**, 2024, 53(9): 29-38.
- [22] GENG X, SUN G H, WU K, et al. Thermodynamic analysis of lined rock caverns for initial inflation and cyclic operational conditions in compressed air energy storage[J]. **Journal of Energy Storage**, 2024, 99(Part A): 113253.
- [23] DAMASCENO D R, SPROSS J, JOHANSSON F. Rock mass response for lined rock caverns subjected to high internal gas pressure[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2023, 15(1): 119-129.
- [24] XU Y J, XIA C C, ZHOU S W, et al. An analytical solution for elastoplastic responses of a lined rock cavern for compressed air energy storage considering excavation and high internal pressure[J]. **Computers and Geotechnics**, 2024, 170: 106318.
- [25] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.
- SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [26] 任建喜. 单轴压缩岩石蠕变损伤扩展细观机理CT实时试验[J]. 水利学报, 2002(1): 10-15.
- REN Jian-xi. CT real-time testing on meso-mechanism of creep damage propagation in rock under uniaxial compression[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002(1): 10-15.

- [27] SHAO J F, ZHU Q Z, SU K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(7): 549-555.
- [28] 齐亚静, 姜清辉, 王志俭, 等. 改进西原模型的三维蠕变本构方程及其参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 347-355.
- QI Ya-jing, JIANG Qing-hui, WANG Zhi-jian, et al. 3D creep constitutive equation of modified Nishihara model and its parameters identification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 347-355.
- [29] 葛修润. 周期荷载下岩石大型三轴试件的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11-19.
- GE Xiu-run. Study on deformation and strength characteristics of large triaxial specimens of rock under periodic load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1987, 8(2): 11-19.
- [30] LIU E L, HE S M. Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions[J]. **Engineering Geology**, 2012, 125: 81-91.
- [31] LI Z Z, YANG F, FAN J Y, et al. Fatigue effects of discontinuous cyclic loading on the mechanical characteristics of sandstone[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2022, 81(8): 336.
- [32] XUE X R, ZHANG K, CHEN W M, et al. Experimental investigation and viscoelastic-plastic model for sandstone under cyclic tensile stress[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, 2021, 7(3): 77.
- [33] LIU Y, DAI F. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2021, 13(5): 1203-1230.
- [34] 苗胜军, 杨鹏锦, 王辉, 等. 循环荷载作用下粉砂岩疲劳流变损伤模型研究[J]. 工程力学, 2022, 39(7): 70-80.
- MIAO Sheng-jun, YANG Peng-jin, WANG Hui, et al. Study on fatigue rheological damage model of siltstone under cyclic loading[J]. **Engineering Mechanics**, 2022, 39(7): 70-80.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 蒋中明, 秦双专, 唐栋. 压气储能地下储气库围岩累积损伤特性数值研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 230-238.
- JINAG Zhong-ming, QIN Shuang-zhuan, TANG Dong. Numerical study on accumulative damage characteristics of underground rock caverns for compressed air energy storage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(2): 230-238.
- [38] JIANG Z M, 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.
- [39] 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**, 2020, 24(12): 2070-2093.
- [40] 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 Qi-kuan, ZHANG Bin, WANG Han-xun, 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.
- [41] MA Y, RAO Q H, HUANG D Y, et al. A new theoretical model of thermo-gas-mechanical (TGM) coupling field for underground multi-layered cavern of compressed air energy storage[J]. **Energy**, 2022, 257: 124646.
- [42] LI P, KANG H, ZHU Q, et al. Numerical and experimental investigations of concrete lined compressed air energy storage system[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2023, 390: 136153.
- [43] 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: 573-584.
- [44] 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**, 2013, 46: 1113-1124.
- [45] TENGBORG P, JOHANSSON J, DURUP J. Storage of highly compressed gases in underground lined rock caverns—more than 10 years of experience[C]//Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a Better Life. São Paulo: [s. n.], 2014.
- [46] 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.
- [47] 官林星, 温竹茵, 王晓鹏, 等. 粗合成纤维在排水调蓄盾构法隧洞管片中的应用试验研究[J]. **现代隧道技术**, 2022, 59(6): 258-265.
- GUAN Lin-xing, WEN Zhu-yin, WANG Xiao-peng, et al. Test and study on the application of synthetic macro-fibers in the segments of drainage and storage tunnels built by shield method[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2022, 59(6): 258-265.
- [48] 蒋中明, 李小刚, 万发, 等. 压气储能遂昌地下储气库结构应力变形特性数值研究[J]. **长沙理工大学学报(自然科学版)**, 2021, 18(3): 79-86.
- JIANG Zhong-ming, LI Xiao-gang, WAN Fa, et al. Numerical study on stress and deformation characteristics of structure of underground gas storage for CAES in Suichang[J]. **Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)**, 2021, 18(3): 79-86.
- [49] 蒋中明, 黄毓成, 刘澜婷, 等. 平江浅埋地下储气实验库力学响应数值分析[J]. **水利水电科技进展**, 2019, 39(6): 37-43.
- JIANG Zhong-ming, HUANG Yu-cheng, LIU Lan-ting, et al. Numerical analysis of mechanical response of Pingjiang shallow underground pilot cavern for compressed air storage[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2019, 39(6): 37-43.
- [50] 王玉杰, 陈晨, 曹瑞琅, 等. 高内水压力隧洞钢筋混凝土衬砌裂缝控制标准[J]. **水力发电学报**, 2020, 39(9): 111-120.
- WANG Yu-jie, CHEN Chen, CAO Rui-lang, et al. Study on crack control standards for reinforced concrete linings in high internal water pressure tunnels[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2020, 39(9): 111-120.
- [51] 游志纯, 刘婷, 翟晓斌. 浅谈引水隧洞混凝土衬砌裂缝及结构安全分析[J]. **四川水力发电**, 2017, 36(2): 83-85.
- YOU Zhi-chun, LIU Ting, ZHAI Xiao-bin. Cracks and structural safety analysis of concrete lining in diversion tunnel[J]. **Sichuan Water Power**, 2017, 36(2): 83-85.
- [52] 刘波, 李宁, 郭晓刚. 水工压力隧洞钢筋混凝土衬砌配筋模型与方法探讨[J]. **西北农林科技大学学报(自然科学版)**, 2012, 40(11): 229-234.
- LIU Bo, LI Ning, GUO Xiao-gang. Reinforcement model and methods of reinforced concrete lining of hydraulic pressure tunnel[J]. **Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)**, 2012, 40(11): 229-234.
- [53] 中华人民共和国水利部. SL 279—2016 水工隧洞设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 279 — 2016 Specification for design of hydraulic tunnel[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.
- [54] 中华人民共和国水利部. SL191—2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL191—2008 Design code for hydraulic concrete structures[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [55] 潘家铮. 水工隧洞和调压室—水工隧洞部分[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- PAN Jia-zheng. Hydraulic tunnel and surge chamber—hydraulic tunnel section[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990.
- [56] SCHLEISS A J. Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels and shafts[J]. **International Journal on Hydropower and Dams**, 1997, 4(3). <http://www.researchgate.net/publication/37445734>.
- [57] 刘秀珍. 关于圆形有压水工隧洞衬砌裂缝计算的探讨[J]. **水力发电**, 1983(12): 37-44.
- LIU Xiu-zhen. Discussion on the calculation of lining cracks in circular pressurized hydraulic tunnels[J]. **Water Power**, 1983(12): 37-44.
- [58] 荣耀, 许锡宾, 蔡晓鸿. 基于弹性地基梁法的隧道衬砌裂缝间距和宽度的计算[J]. **重庆建筑大学学报**, 2006, 28(5): 23-26.
- RONG Yao, XU Xi-bin, CAI Xiao-hong. Calculation of crack space and crack width of tunnel lining based on elastic foundation curved beam method[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2006, 28(5): 23-26.
- [59] 沈威. 圆形水工压力隧洞衬砌变形特性与限裂设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- SHEN Wei. Investigation on the deformation feature and

- crack restricting design of circular lining of hydraulic pressure tunnel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [60] 杜小凯, 任青文, 夏宁. 高压引水隧洞若干问题的研究现状和存在的问题[J]. 水力发电, 2007, 33(6): 65-68.
- DU Xiao-kai, REN Qing-wen, XIA Ning. Status quo of the study on the several problems of high pressure diversion tunnel and its existing problems[J]. **Water Power**, 2007, 33(6): 65-68.
- [61] DARWIN D, SCANLON A, GERGELY P, et al. ACI 224.2R Cracking of concrete members in direct tension[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1986: 1-13.
- [62] 李扬, 侯建国. 美国混凝土结构设计规范 ACI 318 的裂缝控制设计方法浅析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(增刊 1): 61-64.
- LI Yang, HOU Jian-guo. Simple analysis of design method of flexural crack control in American design standard of concrete structures ACI 318[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2008, 41(Suppl.1): 61-64.
- [63] ACI Committee. ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary (ACI 318R-08)[S]. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2008.
- [64] 丁旭柳, 伍鹤皋, 朱忠华. 钢筋混凝土压力隧洞裂缝宽度计算方法的探讨[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(2): 24-27.
- DING Xu-liu, WU He-gao, ZHU Zhong-hua. Discussion on calculation method of crack width in reinforced concrete pressure tunnel[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2001, 34(2): 24-27.
- [65] 陈晨, 曹瑞琅, 姚磊华, 等. 高压岔管首次充排水衬砌开裂规律与渗透特征[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 136-142, 171.
- CHEN Chen, CAO Rui-lang, YAO Lei-hua, et al. Cracking law and permeability characteristics of lining for first filling and drainage of high-pressure bifurcated pipe[J]. **Yangtze River**, 2019, 50(8): 136-142, 171.
- [66] 周利, 苏凯, 汪洋, 等. 水工隧洞钢筋混凝土衬砌水压致裂分析方法研究[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 21-33.
- ZHOU Li, SU Kai, WANG Yang, et al. Study on hydraulic fracturing analysis method for reinforced concrete lining of hydraulic tunnel[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2021, 52(1): 21-33.
- [67] 蒋中明, 甘露, 张登祥, 等. 压气储能地下储气库衬砌裂缝分布特征及演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 110-119.
- JIANG Zhong-ming, GAN Lu, ZHANG Deng-xiang, et al. Distribution characteristics and evolution laws of liner cracks in underground caverns for compressed air energy storage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2024, 46(1): 110-119.
- [68] 中国建筑科学研究院. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- China Academy of Building Research. GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [69] American Concrete Institute. ACI 224 Control of cracking in concrete structures[S]. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2001.
- [70] European Committee for Standardization. EN1992-1-1: 2004 Eurocode 2: design of concrete structures—part 1-1 general rules and rules for buildings[S]. [S. l.]: European Committee for Standardization, 1992.
- [71] SAJID H U, KIRAN R. Influence of stress concentration and cooling methods on post-fire mechanical behavior of ASTM A36 steels[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 186: 920-945.
- [72] SAJID H U, KIRAN R. Post-fire mechanical behavior of ASTM A572 steels subjected to high stress triaxialities[J]. **Engineering Structures**, 2019, 191: 323-342.
- [73] NIE B, XU S H, ZHANG Z X, et al. Experimental investigation on corroded cold-formed steel beam-columns under compression and major axis bending[J]. **Journal of Constructional Steel Research**, 2020, 169: 106026.
- [74] ARZAGHI E, CHIA B H, ABAEI M M, et al. Pitting corrosion modelling of X80 steel utilized in offshore petroleum pipelines[J]. **Process Safety and Environmental Protection**, 2020, 141: 135-139.
- [75] HORI M, GODA Y, ONISHI H. Mechanical behaviour of surrounding rock mass and new lining structure of air-tight pressure cavern[C]//10th ISRM Congress. Sandton: [s. n.], 2003.
- [76] ISHIHATA T. Underground compressed air storage facility for CAES-G/T power plant utilizing an airtight lining[J]. **News Journal International Society for Rock Mechanics**, 1997, 5(1): 17-21.
- [77] ZHOU Y, XIA C, ZHANG P, et al. Air leakage from an underground lined rock cavern for compressed air energy

- storage through a rubber seal[C]//ISRM 2015 Proceedings. Montreal: [s. n.], 2015.
- [78] 周瑜, 夏才初, 周舒威, 等. 压气储能内衬洞室高分子密封层的气密与力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2685-2696.
- ZHOU Yu, XIA Cai-chu, ZHOU Shu-wei, et al. Air tightness and mechanical characteristics of polymeric seals in lined rock caverns (LRCs) for compressed air energy storage (CAES)[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(12): 2685-2696.
- [79] QIN S K, XIA C C, ZHOU S W. Air tightness of compressed air storage energy caverns with polymer sealing layer subjected to various air pressures[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2023, 15(8): 2105-2116.
- [80] ZHENG Z Y, WANG G B, YANG C H, et al. A novel nano-grade organosilicon polymer: Improving airtightness of compressed air energy storage in hard rock formations[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2024, 34(3): 305-321.
- [81] ZHOU S W, XIA C C, ZHAO H B, et al. Numerical simulation for the coupled thermo-mechanical performance of a lined rock cavern for underground compressed air energy storage[J]. **Journal of Geophysics and Engineering**, 2017, 14(6): 1382-1398.
- [82] MENÉNDEZ J, LOREDO J, PRADO L, et al. Analytical models for adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) systems in lined tunnels[J]. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2021, 897(1): 012008.
- [83] BARTON N R, MONSEN K, CHRYSSANTHAKIS P, et al. Rock mechanics design for high pressure gas storage in shallow lined caverns[C]//Storage of Gases in Rock Caverns. Trondheim: [s. n.], 1989.
- [84] ÅBERG B. Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock[M]//BERGMAN M. Storage in Excavated Rock Caverns: Rockstore 77. Stockholm: [s. n.], 1978: 399-413.
- [85] GOODALL D. Containment of gas in rock caverns[D]. Berkeley, CA: University of California, 1987.
- [86] KJØRHOLT H. Gas tightness of unlined hard rock caverns[D]. Trondheim, Norway: University of Tromsø, 1991.
- [87] LIANG J, LINDBLOM U. Critical pressure for gas storage in unlined rock caverns[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(4): 377-381.
- [88] JOHANSSON J. Cavern wall design principles[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2003.
- [89] BRANDSHAUG T, CHRISTIANSON M, DAMJANAC B. Technical review of the lined rock cavern concept and design methodology: mechanical response of rock mass[R]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc., 2001.
- [90] LITTLEJOHN G, BRUCE D. Rock anchors-state of the art. Part 1: design[J]. **Ground engineering**, 1975, 8(3): 25-32.
- [91] GHALY A, HANNA A. Ultimate pullout resistance of single vertical anchors[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(5): 661-672.
- [92] MANDL G. Mechanics of tectonic faulting: models and basic concepts[M]. New York: Elsevier, 1988.
- [93] KIM H, PARK D, RYU D, et al. Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns[J]. **Engineering Geology**, 2012, 135-136: 60-65.
- [94] TUNSAKUL J, JONGPRADIST P, SOPARAT P, et al. Analysis of fracture propagation in a rock mass surrounding a tunnel under high internal pressure by the element-free Galerkin method[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 55: 78-90.
- [95] TUNSAKUL J, JONGPRADIST P, KONGKITKUL W, et al. Investigation of failure behavior of continuous rock mass around cavern under high internal pressure[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 34: 110-123.
- [96] TUNSAKUL J, JONGPRADIST P, KIM H, et al. Evaluation of rock fracture patterns based on the element-free Galerkin method for stability assessment of a highly pressurized gas storage cavern[J]. **Acta Geotechnica**, 2018, 13(4): 817-832.
- [97] THONGRAKSA A, PUNYA-IN Y, JONGPRADIST P, et al. Failure behaviors of rock masses around highly pressurized cavern: initiation and modes of failure[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2021, 115: 104058.
- [98] PERAZZELLI P, ANAGNOSTOU G. Upper bound limit analysis of uplift failure in pressurized sealed rock tunnels[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2018, 42(5): 719-735.

- [99] 徐英俊, 夏才初, 周舒威, 等. 基于极限分析上限定理的压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 Ying-jun, XIA Cai-chu, ZHOU Shu-wei, 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.
- [100] 孙冠华, 易琪, 姚院峰, 等. 压缩空气储能电站隧道式地下硐库潜在失稳模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 41-49.
- SUN Guan-hua, YI Qi, YAO Yuan-feng, et al. Study on the potential instability patterns of tunnel type underground caverns for compressed air energy storage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(1): 41-49.
- [101] 孙冠华, 王章星, 王娇, 等. 压缩空气储能电站地下硐库安全埋深计算的极限平衡方法[J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 2): 67-77.
- SUN Guan-hua, WANG Zhang-xing, WANG Jiao, et al. Limit equilibrium method for calculating the safe burial depth of underground caverns in compressed air energy storage[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2023, 56(Suppl.2): 67-77.
- [102] 孙冠华, 易琪, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站大罐式地下内衬硐库上覆岩体稳定性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(12):2377-2391.
- SUN Guan-hua, YI Qi, YU Xian-yang, et al. Analysis of the stability of the overlying rock mass for silo type lined rock caverns in compressed air energy storage[J]. **Scientia Sinica Technologica**, 2024, 54(12):2377-2391.
- [103] PERAZZELLI P, ANAGNOSTOU G, AMBERG J. Uplift analysis for CAES tunnels[M]//Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics. [S. l.]: CRC Press, 2014: 1691-1696.
- [104] AULD F. Design of underground plugs[J]. **International Journal of Mining Engineering**, 1983, 1(3): 189-228.
- [105] ILYUSHIN V. Design of concrete plugs in temporary underground hydraulic structures[J]. **Hydrotechnical Construction**, 1988, 22(6): 327-334.
- [106] HÖKMARK H. Numerical study of the performance of tunnel plugs[J]. **Engineering Geology**, 1998, 49(3-4): 327-335.
- [107] PARK D, KIM H, RYU D, 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.
- [108] SONG W, RYU D, LEE Y. Stability analysis of concrete plugs in a pilot cavern for compressed air energy storage[C]//Harmonising Rock Engineering and the Environment—Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 2012: 676-677.
- [109] 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.
- [110] 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.
- [111] 黄毓成. 压气储能地下储气库围岩应力变形特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- HUANG Yu-cheng. Study on the stress and deformation characteristics of surrounding rock of underground cavern for compressed air energy storage[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2019.
- [112] 陈晓虎. 废弃煤矿压缩空气储能硐室安全性数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- CHEN Xiao-hu. Numerical simulation research on the safety of compressed air energy storage cavern in abandoned coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.