

压缩空气储能地下人工洞室的稳定性研究现状

吴朝峰¹, 顾越凡², 王迎超², 王英超²

¹中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州

²中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年11月3日; 录用日期: 2025年11月24日; 发布日期: 2025年12月5日

摘要

本文综述地下人工洞室压缩空气储能稳定性的研究现状, 主要从围岩的稳定性和堵头结构的稳定性两方面入手。揭示了不同力学参数的围岩体的热力学响应和疲劳特性, 围岩初始裂隙及裂隙萌生和上覆岩体抗隆起等方面对围岩稳定性的影响以及由于受压破坏和交界面受剪切破坏而导致的堵头结构失稳。提出了四种常见的堵头结构类型, 其中以楔形堵头的受力性能最为良好。最后指出了研究的不足, 缺少了对于热流固多场耦合下的研究, 为压气储能地下人工洞室稳定性研究提供参考。

关键词

压气储能, 稳定性, 围岩, 堵头

Current Research Status on the Stability of Underground Artificial Caverns for Compressed Air Energy Storage

Chaofeng Wu¹, Yuefan Gu², Yingchao Wang², Yingchao Wang²

¹Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Construction Group, Hangzhou Zhejiang

²School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: November 3, 2025; accepted: November 24, 2025; published: December 5, 2025

Abstract

This paper reviews the current research status on the stability of compressed air energy storage (CAES) in underground artificial caverns, focusing on two main aspects: the stability of the surrounding rock and the stability of the plug structure. It reveals the influences of various factors on the stability of the surrounding rock, including the thermomechanical response and fatigue

characteristics of rock masses with different mechanical parameters, the presence of initial fractures, fracture initiation, and the resistance to uplift of the overlying rock mass. Additionally, it addresses the instability of the plug structure caused by compressive failure and shear failure at the interfaces. Four common types of plug structures are presented, among which the wedge-shaped plug demonstrates the most favorable mechanical performance. Finally, the paper points out research shortcomings, particularly the lack of studies under thermo-hydro-mechanical multi-field coupling conditions, providing a reference for future research on the stability of CAES in underground artificial caverns.

Keywords

Compressed Air Energy Storage (CAES), Stability, Surrounding Rock, Plug

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,为应对全球气候变暖,能源的清洁化发展已经逐渐成为国际共识,在此背景之下,国家提出“双碳”目标,希望在 2030 年实现碳达峰,2060 年前实现碳中和[1]。在众多的清洁能源中,压缩空气储能系统(compressed air energy storage, CAES),因其成本低、布置灵活性、环境友好性等优点,其发展前景不容忽视,已逐渐成为前沿热门的研究课题[2]。据统计,截至 2023 年 12 月底,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,其中人工建设的内衬储气洞室有 8 个。随着示范项目的深入推进、技术的成熟和经济性的提升,预计人工内衬洞室将成为未来广泛应用的大规模储能装置[3]。

CAES 电站主要由压缩系统、透平系统、热交换系统及储存装置等[4][5]部分组成,具体如图 1 所示,整个循环过程主要分为储能与释能两个过程。当电力需求量较少时,CAES 系统利用多余电能驱动空气压缩机将空气进行压缩并储存于储气设备中;当处于用电高峰需求时段,再将储存的压缩空气释放,通过驱动透平机组进行发电[3]。

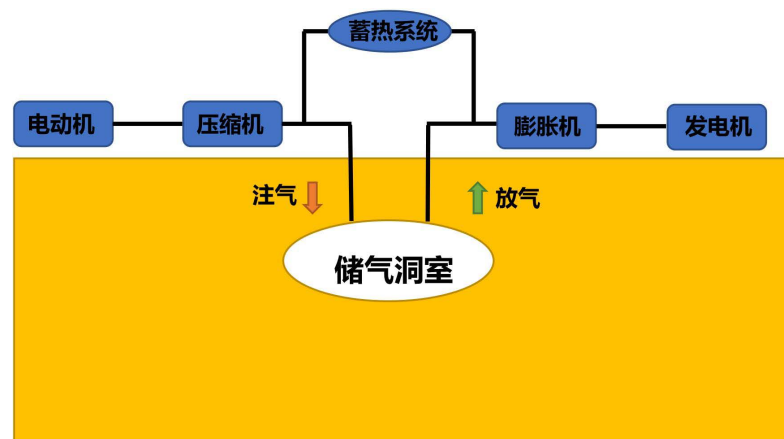


Figure 1. Schematic diagram of a compressed air energy storage system [6]

图 1. 压缩空气储能系统示意图[6]

储气装置作为压气储能电站最重要、最核心的部分，是保证整个系统安全稳定运行的最关键环节，其稳定性一直以来都是研究的重点。目前在地下人工洞室储气库稳定性研究中，主要聚焦于围岩及其上覆岩体的稳定性和混凝土堵头结构的稳定性方面。

2. 围岩稳定性研究

开挖地下人工洞室作为储气库，其洞室围岩的力学响应和变形特征是关键因素[7]。围岩稳定性主要体现在岩体力学强度，在长期循环高温高压下的疲劳强度，围岩的裂隙萌生以及其上覆岩体抗隆起能力等方面。

2.1. 岩体强度与疲劳损伤

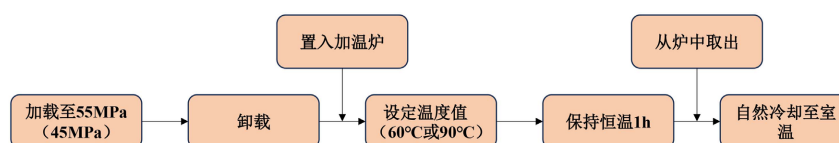
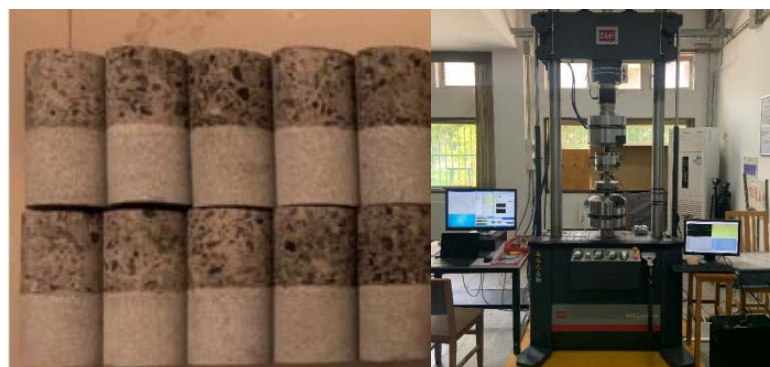


Figure 2. A complete stress-temperature coupling process [9]

图 2. 一次应力 - 温度的变化过程[9]



(a) 岩石 - 混凝土组合体试样

(b) MTS 370.50 试验系统

Figure 3. Mechanical behavior of rock-concrete composite under cyclic loading [11]

图 3. 岩石 - 混凝土组合体疲劳力学特性试验[11]

目前针对岩体强度与疲劳损伤的研究主要是室内的试样试验。不同于其他工程，压气储能系统存在空气频繁、快速地充入和放出的注采模式，导致洞室产生显著的温度变化，且由于变化的空气压力影响，洞室围岩受循环应力作用。长期的循环荷载可能导致岩石的微裂纹扩展，进而影响岩体的整体稳定性。众多学者开展了循环荷载作用下岩石疲劳损伤规律研究。王者超[8]对花岗岩标准试样分组施加不同强度的围压，循环 100 次，分析其不同围压下的应力应变关系以及疲劳特性，认为花岗岩的残余应变和变形模量与循环次数有关，且受岩石体积变形状态的影响，将岩石以疲劳力学性质分为压密区、硬化剪胀区和软化剪胀区 3 个不同区域，其中软化剪胀区岩样发生了破坏。夏才初[9]利用循环应力试验和循环温度试验，分析了玄武岩在循环应力 - 温度下的应力应变特性，由于难以实现真正的应力 - 温度耦合，作者对试验过程进行了简化，如图 2 所示，认为在一定的应力和温度限值内，循环的应力和温度对玄武岩“硬化”作用，超过一定限度则会发生破坏。在相同应力上限时，温度上限越高，岩石越容易发生破坏。在此基础上，张平阳[10]结合 Weibull 分布进一步拓展了岩石损伤软化模型，提出了一种在循环应力作用下的岩石本构模型，并与实验数据进行拟合，验证了该模型的准确性。付强[11]研究了岩石 - 混凝土试样在交变荷载作用下的宏观力学特性与劣化机制，认为上限应力是影响组合体试样疲劳特性的核心因素，主要

发展过程分为裂缝闭合阶段、裂缝扩展阶段和脆性断裂阶段，图 3 为所用的组合体岩样和试验设备。蒋中明[12][13]提出了空气压缩因子的概念，并认为其对储气库压缩空气温度和压力的值都有影响，因此在实际工程中考虑空气压缩因子是不可避免的，最后基于压缩空气热力学理论，结合冷凝水的影响，提出了一种压缩空气热力学模型。目前对于围岩力学响应与疲劳特性的研究还无法做到真正意义上的热力耦合，需开展真实运行工况的岩体三轴疲劳试验；同时还缺少围岩-衬砌-密封层三者相互协同受力机制下的力学响应和疲劳机制研究。并且目前主要以室内试验为主，缺乏实际现场的长期监测数据，目前储气库的稳定性评估大多基于经验或保守假设。

2.2. 围岩裂隙

围岩萌生裂隙会直接破坏岩体的完整程度，导致岩体强度显著下降，使得围岩体更容易被破坏。王卫军[14]运用 3DEC 数值模拟对巷道围岩裂隙分布及失稳机理进行了研究，发现开挖后巷道围岩的裂隙主要呈现蝶形分布，认为围岩的裂隙萌生和不规则分布是导致巷道产生大变形的核心因素。马谕杰[15]采用理论推导、室内试验和数值模拟三者结合的方式，总结出巷道开挖后的围岩裂隙的分布范围及形态主要受侧压系数控制，在侧压系数较低时呈近圆形或椭圆形，较高时则扩展为蝶形；围岩裂隙范围的大小主要取决于埋深与结构面强度。

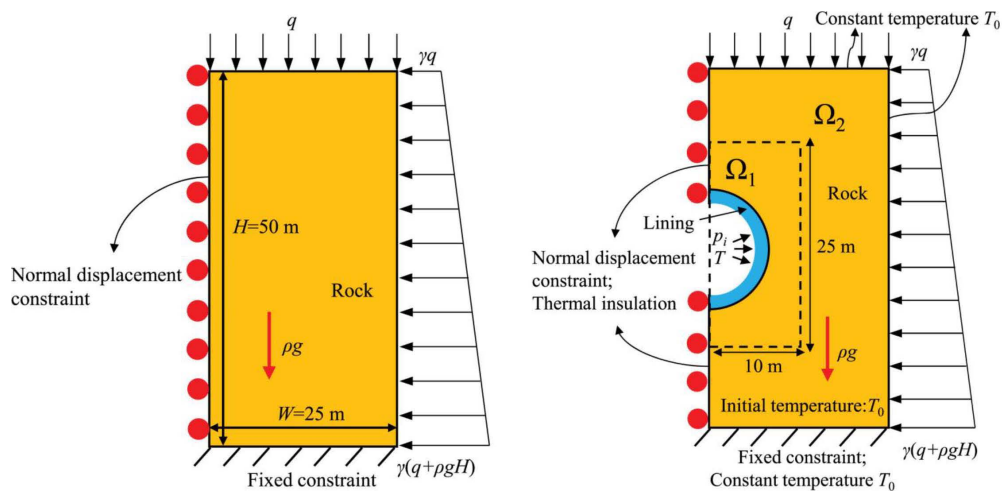


Figure 4. Geometry and boundary conditions of the numerical model [16]

图 4. 数值模拟的几何形状与边界条件[16]

在压缩空气储能地下洞室运营过程中，大量空气的注入会在围岩及混凝土衬砌中会引发较高的拉应力。同时，频繁地充放气会导致洞周温度场发生剧烈波动，这种周期性温度变化进一步加剧了结构的受力状态。高拉应力与变温场的耦合作用，易导致围岩裂隙的萌生和扩展，从而严重威胁 CAES 地下储气洞穴的长期稳定性。因此，深入研究地下人工洞室中裂缝的发展演化机制，对于压气储能系统的安全运行具有重要的理论价值与实践意义。夏才初[16]为研究 CAES 洞室裂隙萌生与扩展的机制，提出了一种考虑开挖的热力相场耦合模型，探究了围岩裂隙模式与侧压系数、临界能量释放速率、岩体弹性模量和埋深等因素的关系，最终发现裂隙发展模式主要与侧向压力系数有关。数值模拟建模如图 4 所示，作者使用对称建模，左边界为绝热条件，其余边界均为恒温 T_0 。Hu [17]基于岩体的损伤方程，建立了流固耦合模型，分析压力扰动作用下围岩初始裂隙对岩体损伤的影响，总结出岩体损伤敏感性程度为气压上限 $>$ 岩体强度 $>$ 洞室埋深，从微观和宏观两个角度阐述了气压、岩体强度、裂缝的长度和倾角对岩体损伤范

围影响最为显著。目前对于围岩裂隙扩展在压气储能领域的研究还尚未成熟, 缺少在热流固三相耦合场中的深入研究, 对于物理模型试验来说, 如何监测裂隙萌生扩展是一个难点, 对于破坏也缺乏有效的预测。同时在围岩-衬砌相互协同作用时, 混凝土衬砌的开裂也会直接影响围岩裂隙的产生发展, 二者的力学响应机制也较为复杂。

2.3. 上覆岩体抗隆起

不同于其他工程, CAES 储气库在充气运行时, 库内的气压会不断增加直至大于洞顶原有的竖向应力, 造成上覆岩体的隆起破坏[18]。不仅如此, 上覆岩体的稳定性可以用来计算安全埋深, 因此研究上覆岩体的稳定性对于地下储气洞室具有实际的工程意义。目前关于 CAES 地下人工洞室的抗抬准则主要借鉴水工隧洞的研究经验, 主要以挪威准则, 水力劈裂准则为主[19]。Kim [20]引入了圆锥模型和对数螺旋模型两种不同的极限平衡模型, 如图 5 所示, 给出了一种数学解法计算安全系数, 研究了气压、洞室结构尺寸以及埋深等因素的影响, 但计算方法偏于保守。徐英俊[21]基于极限分析定理, 结合 Hoek-Brown 准则, 推导了洞室抗隆起破坏函数与极限内压的表达式, 该函数主要与岩体单轴抗压强度、经验参数和埋深有关, 大大降低了抗隆起破坏所需的安全埋深。王者超[22]选用刚性圆锥模型并结合极限平衡法和弹塑性分析法, 推导得出洞室运行的上下限压力的解析解, 发现在极限平衡条件下上限压力与洞室埋深的二次方呈正相关, 而在弹塑性条件下下限压力与埋深呈线性关系, 并总结了不同强度等级的围岩适合的上下限气压。孙冠华[23]构建了考虑摩擦力和黏聚力作用的锥体破坏模型, 并定义了起裂角与破裂角, 认为两者决定了锥体极限平衡的状态。利用被动岩土压力理论建立了埋深与破裂角关系的控制方程, 且黏聚力对二者的影响较为复杂。在此基础上, 孙冠华[24]又对隧道式储气洞室的上覆安全埋深进行研究, 提出地应力系数和内摩擦角对上覆岩体失稳状态的影响最大, 认为当隧道式洞室的轴线垂直于最大水平地应力方向时, 上覆岩体最为稳定。其求解计算流程如图 6 所示。目前来说, 上覆岩体稳定性的求解模型还局限于常规工况, 没有考虑到压气储能循环充放气时的交变荷载对洞顶的具体影响, 所使用的抗抬准则也是借鉴于水工隧道。而相对于水工隧道来说, 压气储能系统存在更高频率的循环内压, 变化幅值更大, 需要考虑疲劳损伤; 同时存在温度场的变化, 需要考虑热应力的影响; 并且压气储能系统更依赖于围岩抗力的承压, 而水工隧道主要依靠衬砌承重, 两者的围岩作用机制也不相同, 因此其对于压气储能系统的安全系数的计算过于保守, 存在一定的局限性。因此对于上覆岩体稳定性的计算还需要更深入更全面的研究, 同时结合实际的工程应用。

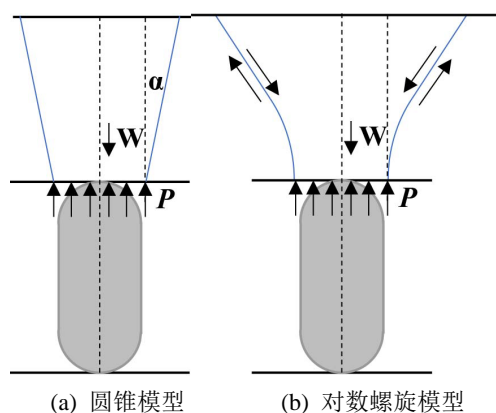


Figure 5. Limit equilibrium model [20]

图 5. 极限平衡模型[20]

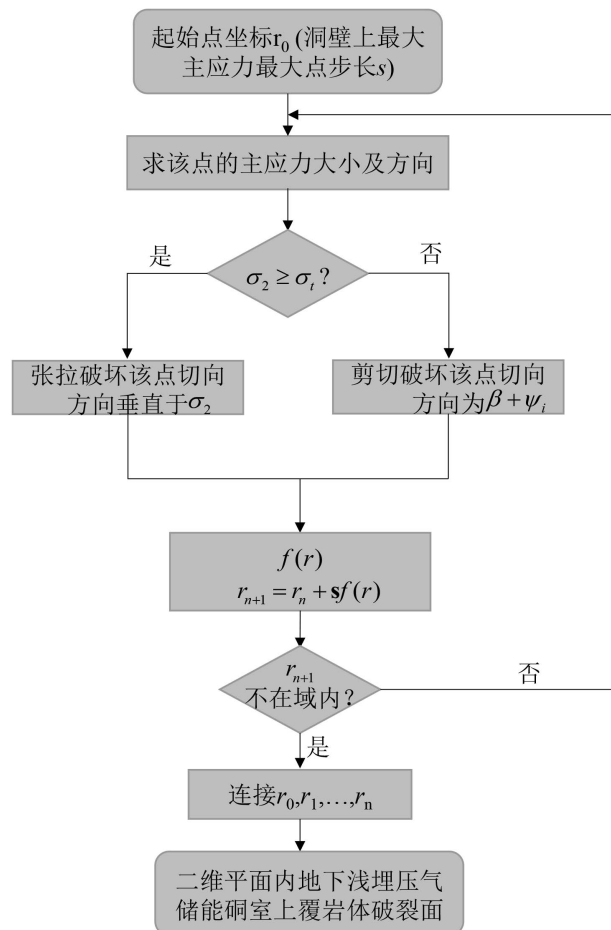


Figure 6. Flowchart of the computational procedure [24]
图 6. 计算流程图[24]

3. 混凝土堵头结构的稳定性

堵头是地下储气洞室的关键承压和密封结构，其核心作用是在压力和温度循环变化的充放气过程中保证自身结构的稳定性，从而安全可靠地封堵高压气体，保证洞室的长期运行的稳定性和密封性。L.Campbell [25]最早对堵头结构的稳定性展开研究，认为堵头主要受到围岩的挤压作用和与围岩交界面的剪切作用，堵头结构的失稳便是由这两种因素导致的结构破坏所引起的。P. Perazzelli [26]采用数值模拟方式分析了混凝土堵头与围岩直接的界面开合变化特点，并总结了堵头锥度、长度和极限压力的函数关系，认为极限压力随着堵头锥度和长度的增加而增大。黄毓成[27]采用数值模拟计算了堵头区的受力情况，对比了分别设置在洞库中间和洞库的端部的两种不同方案的双洞库堵头连接方式，结果说明堵头区域主要以受压为主，在堵头前端与衬砌接触的位置会产生拉应力，端部设置堵头的稳定性更优。Xu [28]利用三维耦合模型，通过对比两种封堵方案，结果发现对竖井采用混凝土封堵可以明显降低应力集中和拉应力水平，证明了堵头能够有效改善应力集中，优化硐室的受力。

混凝土堵头的形状是其稳定性的核心因素，可以优化受力机制，如何使其高效地将压力传递至围岩体，从而避免自身的失稳和过度变形也是研究的重点。如图 7 所示，是几种常见的堵头形状。Auld [29]重点阐述了堵头两种破坏形式，即剪切破坏和滑动破坏，并给出了楔形堵头与圆柱形堵头计算长度公式，为研究其稳定性提供了良好借鉴。Prak [30]提出了一种基于安全系数的强度折减法和体积比方式对圆柱

形、嵌入圆柱形、楔形和锥形堵头进行稳定性评估,结果证明锥形堵头的稳定性最高,而圆柱形堵头前端易发生应力集中现象。SONG [31]使用数值模拟软件分析了不同抗压强度的楔形堵头和锥形堵头,比较了二者的稳定性,认为楔形堵头更容易与围岩体发生分离,而锥形堵头的受力更加均匀,因此,也认为锥形堵头更加稳定。屈杰[32]结合理论分析和数值模拟方法,研究了四种不同结构形式的堵头与围岩交界面的力学响应,认为楔形堵头的受力性能最为良好,堵头区内的围岩未出现塑性区。采用极限平衡方法提出了堵头长度的计算公式,认为其长度与堵头直径、倾角和气压值有关。

总而言之,对于堵头稳定的研究还在起步阶段,现有的经验并不完善,还依赖于水工隧洞的堵头研究。目前对于堵头结构的研究还停留在力学层面的分析,没有考虑其在热力耦合场中的热力响应,对于堵头形状而言,主要以嵌入型和楔形为主,研究范围还不够广泛。同时,随着现代土木工程材料不断发展,也可以从改善混凝土材料的角度对堵头进行优化。

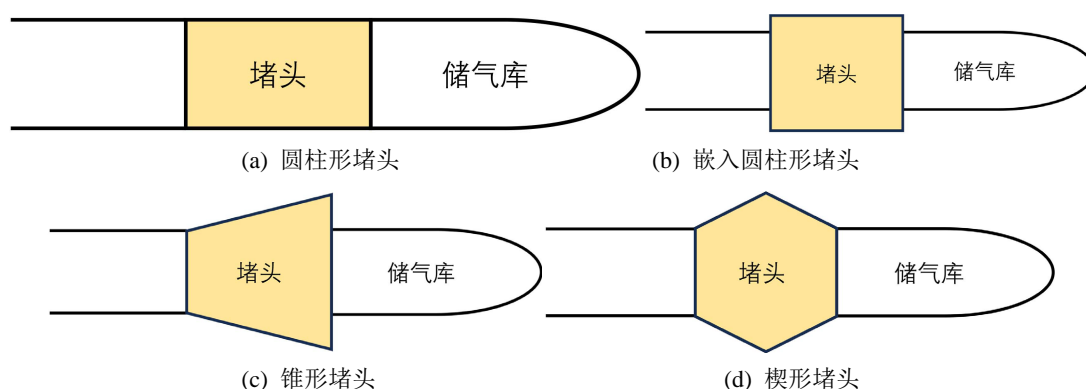


Figure 7. Schematic diagram of plugs with different shapes [33]

图 7. 不同形状的堵头示意图[33]

4. 结论与展望

本文主要从围岩稳定性和混凝土堵头结构稳定性两方面对压气储能地下人工洞室的稳定性进行研究,主要得到以下结论:

针对围岩体热力学响应和疲劳特性的研究,目前研究人员主要以室内试验为主,对试样进行循环加载和循环温度试验,分析其在循环热力作用下的应力应变曲线,并结合已有的岩石本构模型,辅以理论推导,优化模型参数,为预测洞室稳定性提供合理的岩石本构模型。针对围岩裂隙萌生的研究,目前主要的研究手段以数值模拟和理论推导为主,结合少量的试验,基于岩石的损伤模型,分析了热力耦合作用下的围岩裂隙区发展趋势和分布规律,认为围岩的裂隙萌生发展与侧压力系数和初始地应力有关,裂缝的长度和倾角亦会影响损伤区的范围。针对上覆岩体抗隆起稳定性的研究,目前主要以借鉴水工隧道的经验,通过极限平衡法和弹塑性法等多种理论分析的手段,建立了锥体破坏模型和对数螺旋破坏模型等多种破坏模式,提出了安全系数的计算方法和控制标准,为计算安全埋深、降低工程造价提供了实际意义,为 CAES 地下人工储气库的建设提供了理论支撑。针对混凝土堵头结构的稳定性研究,目前主要以理论分析和数值模拟方法为主,研究认为堵头结构的失稳主要由围岩的挤压作用和交界面的剪切作用所引起,合适的封堵位置有利于减小堵头结构的拉应力,使其结构更加稳定。在对比不同形状的堵头时,在稳定性评估中认为锥形堵头的稳定性最优,其交界面不容易与围岩体分离,不少学者在此基础上又结合极限平衡理论给出了堵头计算长度的公式,认为堵头计算长度与堵头直径、倾角和气压值有关。

目前通过理论分析、数值模拟软件和室内试验,地下人工洞室稳定性的研究已经初步形成了体系,

然而目前研究还存在许多不足之处。首先是目前压气储能项目还处于示范起步阶段,没有大量工程项目作为依托,缺少现场长期监测数据,对于储气库稳定性的研究还局限于室内试验,并且室内试验难以做到真正热力耦合,对于围岩-衬砌-密封层三者的协同受力机制研究不够深入;其次物理模型试验难以及时监测裂隙的萌生发展,上覆岩体的抗隆起研究对于安全系数的计算过于保守,且忽略了循环荷载的影响;最后,混凝土堵头结构的研究并未考虑热力耦合效应,对于堵头形状的研究也缺少更为完善的理论系统,仅仅是针对常见的几种形状,还需更加深入的研究。理论分析是研究工作的基础,对于压气储能来说,需要建立包括力学场、渗流场、温度场以及耦合场的控制方程,定义这些物理场之间的相互作用,结合室内三轴压缩试验,可以推导出岩体的本构方程;针对许多复杂的工程实际,可以通过数值模拟计算对模型试验进行补充,也可以验证理论分析的准确性,最终使得三种研究方法成为一个有机整体,让结论和成果更具有权威性。

基金项目

江苏省自然科学基金资助项目(BK20242087),中国电力工程顾问集团有限公司重大科技专项(DG3-G01-2023),中国电力工程顾问集团有限公司科技项目(DG2-G02-2025)。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. 2021-09-22. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm, 2024-06-20.
- [2] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1729-1759.
- [3] 杨雪雯, 任灏, 廖泽球, 等. 压缩空气储能地下人工洞室研究现状与展望[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 54-64.
- [4] 袁照威, 杨易凡. 压缩空气储能技术研究现状及发展趋势[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 146-153.
- [5] 夏晨阳, 杨子健, 周娟, 等. 基于新型电力系统的储能技术研究[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(4): 3-12.
- [6] 张文, 王龙轩, 丛晓明, 等. 新型压缩空气储能及其技术发展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15335-15347.
- [7] 孙冠华, 王娇, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站地下内衬洞库基本原理与分析方法研究进展[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 1-25.
- [8] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1888-1900.
- [9] 夏才初, 周舒威, 胡永生, 等. 循环单轴应力和循环温度作用下玄武岩力学性质初探[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1016-1024.
- [10] 张平阳, 夏才初, 周舒威, 等. 循环加-卸载岩石本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3354-3359.
- [11] 付强. 交变荷载下巷道围岩-衬砌结构体承载特性试验研究[D]: [博士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- [12] 蒋中明, 刘澧源, 胡炜, 等. 考虑空气压缩因子变化影响的地下储气库热力学过程分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 902-907.
- [13] 蒋中明, 郭菁, 唐栋. 压气储能地下储气库压缩湿空气热力学模型[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 638-646.
- [14] 王卫军, 马谕杰, 范磊, 等. 双向极不等压软岩巷道围岩裂隙分布及变形机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3025-3037.
- [15] 马谕杰, 王卫军, 袁超, 等. 软岩巷道围岩裂隙范围形成力学机制及形态特征[J/OL]. 煤炭学报, 1-18. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0202>, 2025-10-22.
- [16] Xia, C., Xu, Y., Zhou, S., Qin, S. and He, X. (2023) Fracture Initiation and Propagation in the Lined Underground Caverns for Compressed Air Energy Storage: Coupled Thermo-Mechanical Phase-Field Modeling. *Computers and Geotechnics*, 157, Article ID: 105329. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105329>
- [17] Hu, R., Zhou, Y., Zhu, C., Xu, Y. and Chen, J. (2025) Damage Characteristics and Parameter Sensitivity of Fracture Caverns under Pneumatic Disturbances. *Energy Science & Engineering*, 13, 4387-4401. <https://doi.org/10.1002/ese3.70180>
- [18] Barton, N., Monsen, K., Chrissanthakis, P. and Norheim, Ø. (2022) Rock Mechanics Design for High Pressure Gas

- Storage in Shallow Lined Caverns. In: Nilsen, B. and Olsen, J., Eds., *Storage of Gases in Rock Caverns*, Routledge, 159-165.
- [19] 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.
- [20] Kim, H., Park, D., Ryu, D. and Song, W. (2012) Parametric Sensitivity Analysis of Ground Uplift above Pressurized Underground Rock Caverns. *Engineering Geology*, **135**, 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.03.006>
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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(S2): 67-77.
- [24] 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.
- [25] Garrett, W.S.L. (1961) Campbell-Pitt Design and Construction of Underground Water Seals and Water Barriers. *Proceedings of Seventh Commonwealth Mining and Metallurgical Conference*, Johannesburg, 1283-1301.
- [26] Perazzelli, P. and Anagnostou, G. (2016) Design Issues for Compressed Air Energy Storage in Sealed Underground Cavities. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**, 314-328. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.09.006>
- [27] 黄毓成. 压气储能地下储气库围岩应力变形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [28] Xu, Y., Zhou, S., Xia, C., Zhao, H. and Xue, X. (2021) Three-Dimensional Thermo-Mechanical Analysis of Abandoned Mine Drifts for Underground Compressed Air Energy Storage: A Comparative Study of Two Construction and Plugging Schemes. *Journal of Energy Storage*, **39**, Article ID: 102696. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102696>
- [29] Auld, F.A. (1996) Design of Underground Plugs. In: Fuenkajorn, K. and Daemen, J.J.K., Eds., *Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock*, Springer Netherlands, 225-266. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1505-3_10
- [30] Park, D.H., Kim, H.M., Ryu, D.W., et al. (2011) Numerical Study on the Optimal Shape of Concrete Plug for Compressed Air Energy Storage Caverns. *Tunnel and Underground Space*, **21**, 164-173.
- [31] Song, W., Ryu, D. and Lee, Y. (2011) Stability Analysis of Concrete Plugs in a Pilot Cavern for Compressed Air Energy Storage. In: Qian, Q.H. and Zhou, Y.X. Eds., *Harmonising Rock Engineering and the Environment*, CRC Press, 1813-1816. <https://doi.org/10.1201/b11646-344>
- [32] 屈杰, 刘形林, 孙冠华, 等. 压缩空气储能地下内衬硐库密封堵头力学模型与优化设计[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(4): 24-33.
- [33] 蒋中明, 刘宇婷, 陆希, 等. 压气储能内衬硐室储气关键问题与设计要点评述[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3491-3509.