

压缩空气储能电站内衬洞室极限稳定性的影响因素分析

王天宇

中国电建集团吉林省电力勘测设计院有限公司, 中国·吉林 长春 130000

摘要: 压缩空气储能 (CAES) 电站地下洞室的极限稳定性是影响储能系统安全运行的关键因素。本文基于围岩力学理论和数值模拟方法, 系统分析了围岩级别、地应力条件、洞室埋深、洞形空间展布及运行内压等对人工开挖洞室稳定性的影响规律。以吉林省某花岗岩地层为研究对象, 通过 COMSOL 软件对比了圆形、城门洞形及马蹄形洞室在开挖及 10MPa 内压作用下的应力重分布特征。结果表明: (1) I - II 级花岗岩围岩可满足高内压 (5-10MPa) 储能需求, 圆形洞室相较于其他洞形具有更优的应力分布特性, 最大切向应力降低 18%-25%; (2) 当侧压力系数为 0.6-1.5 时, 洞室埋深应满足挪威准则 (上覆岩体重量 ≥ 1.3 倍内压) 以避免水力劈裂; (3) 混凝土衬砌可使围岩应力水平降低 40%-50%, 显著提升抗反复荷载能力。研究成果为压缩空气储能电站地下洞室的优化设计提供了理论依据。

关键词: 压缩空气储能; 人工洞室; 极限稳定性; 数值模拟

Analysis of the Influencing Factors on the Limit Stability of Inner Lining Caverns in Compressed Air Energy Storage Power Stations

Wang Tianyu

Jilin Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd. of China Power Construction Corporation, China Jilin Changchun 130000

Abstract: The limit stability of underground caverns in compressed air energy storage (CAES) power stations is a key factor affecting the safe operation of the energy storage system. Based on the theory of rock mechanics and numerical simulation methods, this paper systematically analyzes the influence laws of rock mass grade, in-situ stress conditions, cavern burial depth, spatial distribution of cavern shape, and internal pressure during operation on the stability of artificially excavated caverns. Taking a certain granite stratum in Jilin Province as the research object, the stress redistribution characteristics of circular, arch-shaped, and horseshoe-shaped caverns under excavation and 10 MPa internal pressure were compared using COMSOL software. The results show that: (1) Grade I-II granite rock mass can meet the high internal pressure (5-10 MPa) energy storage requirements, and circular caverns have better stress distribution characteristics than other shapes, with the maximum tangential stress reduced by 18%-25%; (2) When the lateral pressure coefficient is 0.6-1.5, the cavern burial depth should meet the Norwegian criterion (the weight of the overlying rock mass ≥ 1.3 times the internal pressure) to avoid hydraulic fracturing; (3) Concrete lining can reduce the rock mass stress level by 40%-50%, significantly improving the ability to resist repeated loads. The research results provide a theoretical basis for the optimal design of underground caverns in compressed air energy storage power stations.

Keywords: Compressed air energy storage; Artificial cavern; Limit stability; Numerical simulation

0 引言

压缩空气储能是一种利用压缩空气作为介质来储存能量和发电的技术^[1]。压缩空气储能技术特别适合我国北方风能资源富集而水资源稀缺的地区。压缩空气储能电站的地下储气库是压缩空气储能电站的主要组成部分, 即是电站选址的决定因素, 也是电站运行性能和可靠性的技术关键, 一般是利用已开采完的贮气和贮油的地质构造、地下含水层、已开采或专门开凿的盐岩溶腔、硬岩中人工开挖的地下洞室等^[2]。前三种是利用特殊的地质构造, 经过勘

探后可直接用于储存压缩气体, 但是, 由于地质条件比较特殊, 在风能富集或用电需求量大而需建设压缩空气储能电站的地区不一定能找到这样的地质构造, 因此, 在岩石中人工开挖地下洞室便成为这些地区压缩空气储能电站最可能选择的地下构造物方案。压缩空气储能电站地下洞室的规模大 (数十万立方米到数千万立方米)、空气压力高 (5~10MPa 或更大)、密封性要求严 (24 小时泄露率不大于 0.5%~1%)^[3]。此外, 压缩空气储能电站在储能和发电过程中, 压缩空气反复循环作用在洞室内壁, 并且还有温

度的变化,因而与一般的地下岩石洞室在建设理念和设计方法上都有很大的不同。采用人工洞室的作为压气储能电站的地下结构时,地下洞室的形式应根据压气储能需求、地质条件等影响因素综合确定^[4]。压气储能地下洞室选型的前提是洞室围岩的极限稳定性。本文从围岩级别、地应力条件、洞室埋深、洞形和洞室空间展布以及运行内压方面对人工洞室进行极限稳定性分析。以吉林省某研究区域作为算例,通过对吉林省某研究区域进行分析评价,对圆形、城门洞形、马蹄形洞室进行数值模拟,分析其洞室开挖后及施加 10MPa 空气压力后,洞室围岩应力重分布状态,对今后类似工程开展提供参考。

1 围岩级别

压缩储能洞室要承受很高的内部压力,所以得选岩石强度高、岩体比较完整、洞室不容易变形破坏的地方来建压气储能洞室,尽量避开地质条件不好的区域。按照《水利水电工程地质勘察规范(2022版)》(GB 50487-2008)里对围岩的分级标准来看,Ⅰ级和Ⅱ级围岩的地质情况是能符合要求的^[5]。

2 地应力条件

围岩初始应力场包含自重应力和构造应力两部分,水平方向与竖直方向应力的比值(也就是侧压力系数)会对洞室的稳定状态产生很大影响。从内压作用下圆形洞室的弹性解出发,能够推导出洞壁切向应力的计算公式:

$$\sigma_{\theta} = -p_0(1 + \lambda) - 2p_0(1 - \lambda)\cos 2\theta + p \quad 2-1$$

式中:

σ_{θ} - 洞壁切向应力值;

p_0 - 上覆岩石自重应力;

λ - 上覆岩石自重应力;

θ - 从水平轴起始,逆时针为正,顺时针为负,

(°);

p - 作用在洞壁上的内压;

3 洞室埋深

对于内压洞室的合理埋深,水工隧洞领域积累的研究经验具有一定参考价值,目前主要有挪威准则、水力劈裂准则和最小主应力准则这三类常用标准。挪威准则是挪威学者在 1970 年结合工程实践提出的,核心思路是确保压力隧洞洞身上方的岩体重量,不低于作用在洞身围岩面积上的垂直上抬压力。将这一经验准则应用到压气储能洞室时,可以用特定公式表示:

$$H = \frac{pF}{\gamma_R \cos \alpha} \quad 2-2$$

式中:

H - 岩体最小覆盖厚度, m;

p - 洞内气压, kPa;

F - 经验参数,一般取 1.3~1.5;

γ_R - 岩体重度, kN/m³;

α - 地面倾角, $\alpha > 60^\circ$ 时取 $\alpha = 60^\circ$

岩体中的渗流现象大多发生在裂隙或节理部位,假设与隧洞相交的裂隙法向应力为 n ,当水压超过该法向应力时,裂隙就会张开,这种现象被称为水力劈裂。为避免水力劈裂问题而确定合理埋深的方法就是水力劈裂准则,把其中的水压替换为洞内气压后,就能作为压气储能洞室的设计依据。1972 年,挪威德隆汉姆大学的学者提出了更具通用性的设计准则——无衬砌压力隧洞的内水压力应小于围岩初始应力场中的最小主应力,这一准则其实包含了挪威准则,将内水压力改为洞内气压后可用公式表示:

$$pF \leq \sigma_{min}$$

式中:

p - 洞内气压, kPa;

F - 安全系数,一般取 1.3~1.5;

σ_{min} - 隧洞周边围岩初始应力场最小主应力, kPa;

把公式中的 σ_{min} 定义为初始应力场最小主应力和裂隙法向应力中的较小值,就能同时涵盖上述三条准则。水工隧洞通常不采取特殊密封措施,主要依靠围岩自身防止渗漏水;而压气储能洞室采用内衬密封,对围岩密封性要求不高。因此直接采用上述公式作为设计准则会过于保守,而且该公式没有考虑围岩强度和衬砌强度等有利因素,计算得出的埋深往往偏大。

采用圆形洞室的弹性解,要求围岩始终处于受压状态,可以推导出满足这一要求的围岩自重应力:

$$p_0 \geq \begin{cases} \frac{p}{3\lambda - 1}, & \frac{1}{3} < \lambda < 1 \\ \frac{p}{3 - \lambda}, & 1 \leq \lambda < 3 \end{cases}$$

若要求围岩完全不出现拉应力,当侧压力系数接近 1/3 或 3 时,所需的埋深会非常大,从经济角度来看并不可行。

4 洞形和洞室空间展布

压气储能地下洞室的选址需要地质构造简单、岩体完整稳定。洞线走向最好与岩层层面、构造断裂面及软弱带垂直,或者形成较大夹角;夹角过小时则要采取相应工程措施。若洞室处于高地应力地区,需考虑地应力对围岩稳定性的影响——宜使洞室轴线与最大水平地应力方向一致,

或保持较小夹角。相邻洞室的间距需参考《水工隧洞设计规范》(NB/T 10391-2020)，通常不小于2倍开挖洞径。

压气储能地下岩石内衬洞室主要有两种布置形式：隧道式和大罐式。隧道式洞室以美国 Soyland 项目和韩国压气储能项目为代表，均采用一系列平行水平隧洞作为地下构造物，断面形式分别为城门洞形和圆形。大罐式洞室由一个或多个储气洞室、连接储气洞室的竖井及施工隧道组成，一般采用钢衬密封；这类形式目前多用于储存压缩天然气，内压可高达几十兆帕。每个大罐式洞室的开挖形状类似煤气罐，通常从底部螺旋向上开挖，顶部基本呈半球形，底部为椭球形。在岩石条件较好时，大罐式洞室直径一般在35~45m之间，高度为60~100m。

5 运行内压

压气储能洞室周围岩石要满足最小地应力的相关要求——也就是压缩空气的气压得小于初始地应力场里最小主应力，可表示为：

$$p < \frac{\sigma_{min}}{F}$$

式中：

p- 压缩空气气压，kPa；

σ_{min} - 洞室围岩初始地应力场的最小主应力，kPa；

F- 安全系数，一般取 1.3~1.5。

现在分析洞室受力变形的解析方法，大多是针对圆形洞室设计的，对于形状不规则的洞室，分析起来就比较困难^[6]。而且这种解析方法在处理先开挖再充气这类多步骤工况时，也很难实现。在实际工程应用时，往往会采用数值分析的办法来研究具体方案^[7-8]。

6 算例

吉林省某研究区域，地貌单元为冲击平原区，基岩埋深较浅，基岩岩性为花岗岩，地表下10米埋深即可见中风化花岗岩，岩体基本质量等级为II级，区域及附近无活动断裂通过，区域稳定性相对较好，该区域设计地震分组为第一组，场地类别为I1类，地震动峰值加速度调整值为0.04g（相对对应抗震设防烈度为6度），地震动反应谱特征周期调

整值为0.25s。不存在地震液化问题，同时也不会产生地基土震陷问题。研究区域及附近无活动断裂通过，区域稳定性相对较好，且安全距离满足规定，适宜建设压缩空气储能电站。围岩及混凝土物理参数取值参照《工程岩体分级标准》(GB/T 50218-2014)及《工程地质手册》(第五版)中建议取值，混凝土衬砌假定为线弹性，参数详见表1。

洞室形态采用圆形、马蹄形、城门洞形三种截面，洞室埋深选择为100m。采用 comsol 软件进行数值模拟，洞室开挖后及施加10MPa围压后围岩应力分布见图1、图2；城门洞形洞室开挖后及施加10MPa围压后围岩应力分布见图3、图4；马蹄形洞室开挖后及施加10MPa围压后围岩应力分布见图5、图6。

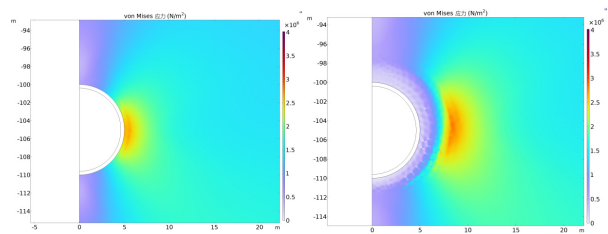


图1 圆形洞室开挖后应力重分布云图

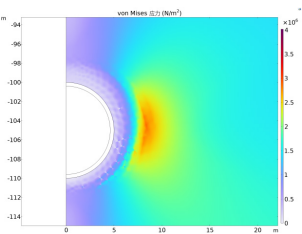


图2 施加围压后圆形洞室应力重分布云图

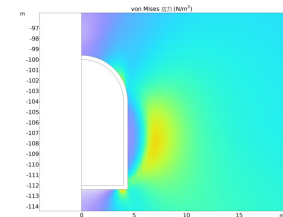


图3 城门洞形洞室开挖后应力重分布云图

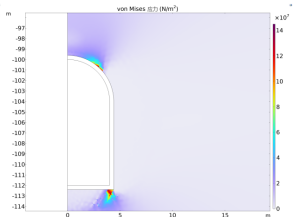


图4 施加围压后城门洞形洞室应力重分布云图

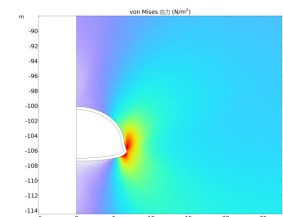


图5 马蹄形洞室开挖后应力重分布云图

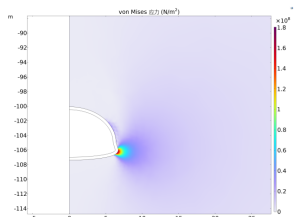


图6 马蹄形洞室开挖后应力重分布云图

表1 围岩和混凝土物理力学参数

地层	深度	弹性模量	重度	泊松比	粘聚力	内摩擦角
耕土	0-0.6	2.0MPa	16	0.35	5kpa	12
粉质黏土	0.6-3.3	3.6MPa	17.6	0.3	18kpa	16
粗砂	3.3-3.9	18MPa	19	0.3	0	30
全风化花岗岩	3.9-5.1	20MPa	20	0.35	0	20
强风化花岗岩	5.1-8.4	5GPa	22	0.3	0.2MPa	27
中风化花岗岩	8.4-23.7	20GPa	26	0.26	0.7MPa	39
微风化花岗岩	23.7-200	30GPa	26	0.22	1.5MPa	50
C40混凝土衬砌	-	32.5GPa	25	0.2		

根据数值模拟分析结果可知,洞室开挖之后,三种形态的洞室均有不同程度的应力集中区域,其中圆形主要集中在半径深度侧壁方向,城门洞形主要集中在侧壁及角点,而马蹄形洞室主要集中在角点。当施加围压后,应力集中区域会有不同程度的放大,当运行期间进行反复充放气,洞室应力集中区域会发生张拉破坏,产生张拉裂隙。对比三种洞室形态,圆形洞室应力集中区域较小,应力水平较其他两种洞室低,所以洞室形态应首选圆形洞室。

以圆形洞室为例,当施加混凝土衬砌后,洞室围岩应力水平对比见图7、图8。施加混凝土衬砌后,洞室围岩应力水平大幅降低,安全储备明显提高。

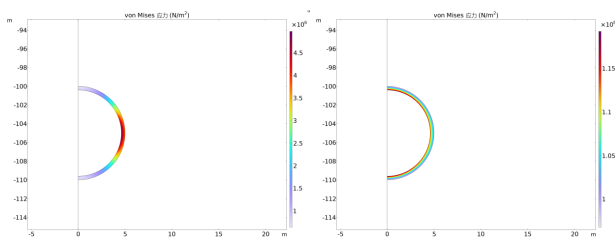


图7 混凝土衬砌施加前围岩应力水平

图8 混凝土衬砌施加后围岩应力水平

7 结语

本文总结了压缩空气储能电站内衬洞室的极限稳定性分析的影响因素,并对吉林省某区域拟建电站进行了数值模拟分析,根据分析结果,Ⅱ级及以上花岗岩围岩是建设高压储能洞室的理想介质,其中圆形洞室在10MPa内压作用下的应力集中程度最低(最大主应力22.3MPa),较城门洞形和马蹄形分别减少23%和19%,且应力分布对称性更优,是人工开挖洞室的首选断面形式。

洞室稳定性受初始地应力场控制显著,侧压力系数 $\lambda = 1.0$ 时稳定性最佳。当 λ 偏离1.0时,建议最小埋深按修正挪威准则($H \geq 1.4p/\gamma R$)确定,算例中100m埋深可满足10MPa内压需求,但需结合三维地应力实测数据校核。

C40 混凝土衬砌可显著改善围岩受力状态,使关键区

域的拉应力从4.2MPa降至0.8MPa,压应力峰值降低45%,且能有效抑制反复充放气导致的疲劳裂隙扩展。

优先采用圆形断面并确保洞轴线与最大水平主应力方向夹角 $< 15^\circ$,对于高地应力区($\lambda > 2.0$),建议采用“衬砌+围岩灌浆”复合支护体系,需建立考虑内压-温度耦合作用的长期监测系统,以评估围岩时效变形特性。

参考文献:

[1] 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: 1-2.

[2] 万发,蒋中明,廖峻慧等. 地下水对CASE地下储气库气密性和围岩稳定性影响[J]. 岩土工程学报. 2024,46(9):1989-1908.

[3] 夏开宗,向欣,缪秀秀等.硬岩内衬地下洞室大规模压缩空气储能关键问题与技术[J].华中科技大学学报(自然科学版). 2025, 53(8): 106-125.

[4] 徐明,李展涛,李博文等. 压缩空气储能人工洞室技术发展及挑战性问题[J]. 节能, 2025, 44(10): 157-160.

[5] GB 50487-2008(2022年版)水利水电工程地质勘察规范[S].

[6] 孙冠华,耿璇,姜长飞等. 压缩空气储能电站地下内衬洞库围岩破坏区解析模型及演化规律. 岩土力学, 2026, 47(2): 1-15.

[7] 朱杰,崔萌,杨晨等. Mohr-Coulomb与Hoek-Brown强度准则下大罐式洞库压缩空气储能对围岩稳定性影响的对比[J]. 南方能源建设, 2025, 12(6): 43-52.

[8] 潘家鹏,葛苏瑾,徐震. 100MW级压缩空气储能电站建模和热力特性分析[J]. 热能动力工程, 2025, 40(11): 101-109.

作者简介: 王天宇(1989-),男,汉族,吉林长春人,硕士,高级工程师,研究方向:岩土工程勘察及设计。