

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.015

压缩空气储能电站地下储气库稳定性分析

臧东升^{1,2}, 刘安荣^{1,2}, 田孟^{1,2}, 崔博浩^{1,2}, 檀永杰^{1,2}, 陈健^{1,2}, 靳小虎^{1,2}

(1. 中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050031;

(2. 河北省新型储能集成应用技术创新中心, 河北 石家庄 050031)

摘要: 为了探究压缩空气储能电站地下储气库的稳定性, 以某隧洞式地下储气库工程为工程背景, 首先进行储气库抗抬稳定性分析, 求解最小设计埋深, 然后基于 midas GTS NX 有限元计算软件开展储气库洞径、洞间距布置及钢衬密封层厚度的方案比选分析, 最后针对相应设计工况分析循环充放气荷载作用下围岩、支护及密封结构的安全稳定性。结果表明: 基于刚体圆锥型抗抬稳定性计算模型得出储气库最小设计埋深满足抗抬稳定计算要求; 受循环荷载作用, 钢衬密封层 Mises 应力最大值位于洞顶及洞底, 应力值几乎不变; 储气洞净间距布置宜大于 1.5 倍洞径; 圆形开挖断面结构稳定性及工程利用率优于马蹄形隧洞布置。

关键词: 地下储气库; 抗抬稳定性; 数值模拟; 循环荷载; Mises 应力

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0129-07

Stability Analysis of Underground Gas Storage in Compressed Air Energy Storage Power Station

ZANG Dongsheng^{1,2}, LIU Anrong^{1,2}, TIAN Meng^{1,2}, CUI Bohao^{1,2}, TAN Yongjie^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, JIN Xiaohu^{1,2}

(1. Power China Hebei Electric Power Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

2. Hebei New Energy Storage Integrated Application Technology Innovation Center, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: To investigate the stability of the underground gas storage of the compressed air energy storage power station, taking a tunnel-type underground gas storage project as the engineering background, this work firstly analyzed the uplift stability of the gas storage to solve the minimum design buried depth. Then, based on the midas GTS NX finite element calculation software, the scheme comparison and analysis of the hole diameter, hole spacing layout and steel lining sealing layer thickness of the gas storage are carried out. Finally, the safety and stability of surrounding rock, support and sealing structure under cyclic charging and discharging load are analyzed according to the corresponding design conditions. The results show that the minimum design buried depth of gas storage meets the requirements of uplift stability calculation based on the rigid cone-shaped uplift stability calculation model. Under cyclic loading, the maximum Mises stress of the steel lining seal layer is located at the top and bottom of the hole, and the maximum stress is almost unchanged. The net spacing of the gas storage cavern should be greater than 1.5 times the diameter of the cavern; the structural stability and engineering utilization rate of circular excavation section are better than that of horseshoe tunnel.

Keywords: underground gas storage; anti-lift stability; numerical simulation; cyclic loading; Mises stress

新型压缩空气储能工程的建设, 对于构建新型电力系统、保障国家能源安全、实现“双碳”目标具有极其重大的战略意义^[1-2]。上覆岩体的稳定性及

储气库密封结构的密封性是设计的核心问题^[3-4]。上覆岩体受储气库内压上抬力作用, 充足的埋深对岩体抵抗围岩上抬具有重要的作用, 但埋深过大将

收稿日期: 2025-09-16

修稿日期: 2025-11-21

基金项目: 中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司重大科技项目(23-KJFD-05)

作者简介: 臧东升(1997—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事深部岩体力学数值模拟等方面工作。E-mail: 15690860626@163.com

造成设计成本过高,因此合理的埋深设计对储气库的设计至关重要。现有储气库安全埋深的常用计算模型,根据计算破裂面的不同可分为竖直滑面模型、刚体圆锥模型、对数螺旋模型、复合模型等;其中竖直滑面模型计算最为保守,计算所需参数较少;刚体圆锥模型基于极限平衡理论与被动土压力理论,简化了实际破坏模型,降低了计算工程量,在工程中广泛应用;对数螺旋模型、复合模型更符合围岩实际破坏,但计算工程量极大增加,工程应用较少^[5-9]。

储气库的运行期间受内压循环荷载、外水压、围岩应力等复合作用的影响,对衬砌及密封结构的结构稳定性提出巨大挑战,而密封性、稳定性对储气库的安全运行至关重要。在储气库结构力学特性、影响因素方面的研究,饶虎等^[10]、张国华等^[11]基于现有规范与数值计算法,研究了储气库开挖断面尺寸、布置、洞间距、埋深、支护设计选型因素的影响;王其宽等^[12]基于正交试验设计,研究了多因素影响下满足结构稳定的最优设计布置方案。何灏典等^[13]基于原位试验和数值分析法分析了内压加载下围岩及支护结构的联合承载特性及失效过程。Damasceno等^[14]研究了高内部压力下最大岩洞壁切向应变。在储气库密封性分析方面,Qin等^[15]、周瑜等^[16]基于室内试验分析了不同充气速率对储气库气密性的影响,并在两个储气项目中得到了验证,同时针对储气洞径、储气压力等对储气库气密性进行了显著性分析,提出了相应的气体泄漏及防止改善措施。周瑜等^[17]提出了一种迭代计算方法,可同时求解洞室空气泄漏率、围岩应力及位移。在储气库的长期稳

定性方面,基于现场监测数据、室内试验、数值模拟技术及理论计算等对岩体及结构的长期损伤特性开展了研究,其中,蒋中明等^[18-19]基于已建储气库的10次完整循环充放气的监测数据及数值模拟试验,研究了循环荷载累积作用下结构变形密封性的影响。赵凯等^[20]通过建立循环加卸载下的蠕变本构模型,更准确的反应储气库的长期力学响应。孙冠华等^[21]针对循环荷载下钢筋混凝土支护衬砌开裂控制方面进行了研究。

综上,现有的储气库的理论及计算方法很成熟,考虑到地质环境及构造条件等诸多因素的影响,针对如何根据现场实际围岩条件,得到适合工程施工的储气库系统布置方案还需进一步开展研究。本文将基于理论计算及数值模拟的方法,以某压缩空气储能地下储气库工程设计为研究背景,分析储气库从选址到设计方案确定。本文研究可为地下储气库的设计、循环荷载加压下支护结构提供参考。

1 工程概况

某压缩空气储能示范项目区为低中山、平原丘陵地貌,海拔约 1 650 ~ 2 100 m,山体相对高差约 450 m。工程区山体坡度整体约 10° ~ 30°,相对高差约 250 m,无地表水,依据勘测结果,地下水取值为地表下 30 m。站址岩性主要为花岗岩,块状构造,结构坚硬致密。根据现场踏勘,未发现大型滑坡、大型崩塌及岩溶塌陷等不良地质的发育,岩石的基本物理力学参数表参见表 1。

表 1 岩石的基本物理力学参数

| 类别 | 厚度 <i>h</i> /m | 密度 ρ_s /($g \cdot cm^{-3}$) | 变形模量 E_0 /GPa | 泊松比 μ | 内摩擦角 φ /(°) | 黏聚力 <i>c</i> /MPa |
|-----------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------|------------------------|----------------------|
| 覆盖层 | 7.5 | 1.95 | 35.00 | 0.30 | — | — |
| 强风化花岗岩 | 4.5 | 2.55 | 0.75 | 0.28 | 27.0 | 0.23 |
| 弱风化花岗岩 | 17.6 | 2.63 | 5.60 | 0.24 | 44.0 | 1.10 |
| 微风化-新鲜花岗岩 | — | 2.65 | 15.00 | 0.23 | 52.4 | 1.74 |

通过初步设计计算,本工程拟建储气库运行内压设计工况 8.5 MPa,压力范围 6.0 ~ 10.5 MPa。

2 储气库抗抬理论计算

储气库抗抬计算采用近似吻合实际破坏模式且计算相对简便的刚体圆锥模型,计算模型参见图 1。模型破裂面角度取岩体被动土压力破裂角 $45^\circ - \varphi/2$ (φ 为岩体的内摩擦角)。

AB 面上的静止土压力合力 F' :

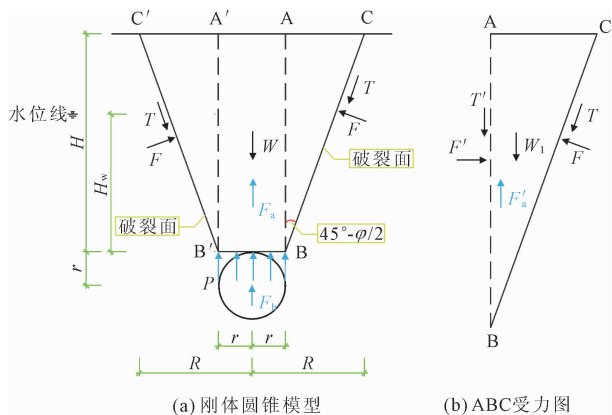
$$F' = \int_0^H \lambda \gamma z dz = \frac{1}{2} \lambda \gamma H^2 \quad (1)$$

块 ABC 在水平方向的力学平衡方程:

$$F' = F \cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) + T \sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (2)$$

BC 面上的剪应力 T :

$$T = F \tan \varphi + c H \sec(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (3)$$



注: T 为破裂面 BC 剪阻力; F 为破裂面 BC 受压应力; W 为上覆岩体区域 $BCC'B'$ 自重; W_1 为三角区域 $BCC'B'$ 岩体自重; F_a 为上覆岩体受浮力; F_b 为储气库受浮力; P 为储气库内压; F' 为面 AB 静止土压力合力; T' 为面 AB 剪阻力。

图 1 稳定性分析计算模型

联立式(1)一式(3):

$$F = \frac{\frac{1}{2}\lambda\gamma H^2 - cH\cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2})\sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{\cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) + \tan\varphi\sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2})} \quad (4)$$

上覆岩体上抬区域自重 W :

$$W = \gamma[2r + H\tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})]H \quad (5)$$

上覆岩体上抬区域浮力 F_a :

$$F_a = \gamma_w \cdot [2r + H_w \cdot \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})] \cdot H_w \quad (6)$$

储气库浮力 F_b :

$$F_b = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma_w \quad (7)$$

对上覆区域 $BB'C'C$ 竖向受力分析:

$$W + 2T\cos(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) = P \cdot 2r \cdot F_{safe} + 2F\sin(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) + F_a + F_b \quad (8)$$

联立式(3)一式(8)得,根据上述工程勘察结果,依据《压缩空气储能电站地下储气库设计规范》要求^[22],该工程储气容积小于 30 万 m^3 ,储气库结

构安全级别为二级,安全系数取 2.5。储气库上限压力为 10.5 MPa,计算得出不同设计断面直径下储气库的设计最小埋深参见图 2,随着设计洞径的增加,所需最小设计埋深增大。

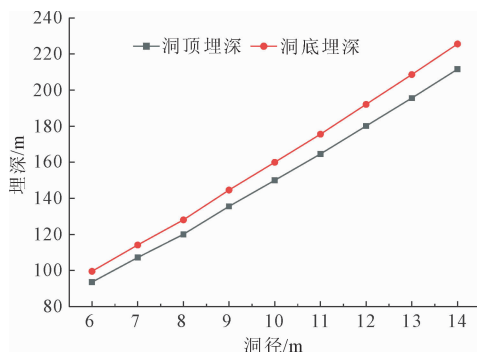


图 2 洞径-最小埋深关系图

3 数值模拟

3.1 支护设计

采用钢筋混凝土支护及钢衬密封层为主,在地质条件较差的区域进行局部加固。其中,混凝土结构厚度参照规范要求,取 600 mm 厚^[22-23],密封层采用最为常用的钢衬材料,钢衬的厚度通过对钢衬外壁施加外水压,内壁施加循环荷载作用的数值分析法确定,参照《水工隧洞设计规范》表 E.0.2,外水压力折折减系数 β 。取 0.4^[24]。钢衬的壁厚需依据抗内压、外压稳定性确定,支护及密封结构的设计参数如表 2、表 3 所示。

表 2 混凝土参数表

| 混凝土 | 弹性模量 /GPa | 泊松比 μ | 抗压强度标准值 f_{ck} /MPa | 抗拉强度标准值 f_{tk} /MPa |
|-----|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|
| C30 | 30 | 0.2 | 20.1 | 2.01 |

3.2 三维地质模型建立

依据《水电站压力钢管设计规范》^[25]要求,钢衬内径与管壁最小厚度的对应关系参见表 4,考虑到腐蚀要求,模拟时取 2 mm 腐蚀余量。

表 3 钢板的抗力限值 σ_R 表

| 钢种 | 厚度 t /mm | 强度设计值 f_s /MPa | 强度标准值 f_{sk} /MPa | 抗力限值 σ_R /MPa | | | 弹性模量 E /GPa | 泊松比 | 密度 ρ /($kg \cdot m^{-3}$) |
|-----------|------------|------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|---------------|-----|----------------------------------|
| | | | | 持久 | 短暂 | 偶然 | | | |
| 07Mn-MoVR | 10~60 | 380 | 425 | 304 | 337 | 422 | 206 | 0.2 | 7850 |

表 4 洞径与钢衬最小壁厚对应表

| 钢管内径/m | <1.6 | 1.6~3.2 | 3.3~4.8 | 4.9~6.4 | 6.5~8.0 | 8.1~9.6 | 9.7~11.2 | 11.3~12.8 | 12.9~14.4 |
|-----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
| 钢衬最小厚度/mm | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |

为计算储气库抗内压稳定性所需最小壁厚,采用有限元分析软件 midas GTS NX,洞室群模型包括两条平行长条型储气洞室,竖直方向范围包括从地表延伸至储气库底标高以下 5—10 倍洞径。洞室埋深参照上述图 2 设计最小抗抬稳定埋深建立三维数值计算模型,储气库三维数值计算模型如图 3 所示(模型及分析结果均以 10 m 洞径展示),模型网格以六面体为主,单元数 166 409,节点数 93 687 万。模型中对模型四周施加法向约束、底部施加固定约束,顶部自由作为边界条件。模型水平方向(垂直洞轴线)为 X 方向,水平方向(平行洞轴线)为 Y 方向,竖直方向为 Z 方向(向上为正),洞室轴向作为 Z 方向的笛卡尔坐标系。

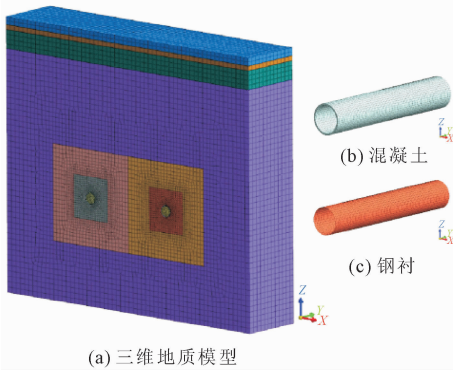


图 3 三维数值计算模型

3.3 计算结果与分析

考虑该区域用电量高峰时间点,设定发电周期为 1 d,单天压缩 4 h,发电 4 h。观测 10 个运行周期的衬砌变形情况,在不检修情况下该储气库内压与时间的关系参见图 4。设计过程中考虑 1.1 的系数,即本工程地下储气库内压设计最大值 $P = 11.55$ MPa。

模拟模型区域在含地下水环境下的初始地应力场,模拟隧洞开挖支护过程,通过对钢衬密封层内壁施加图 3 所示荷载,模拟地下储气库循环充放气过程,模拟得出钢衬及围岩的 Mises 应力、总位移、塑性区云图参见图 5—图 7。可见钢衬充放气运行期间整体受拉应力作用,且 Mises 应力最大值出现在储气洞顶部及底部,最大值 263 MPa,查表 3 可知低于钢板的极限抗力值 304 MPa,满足钢材强度设计要求;位移最大值出现在洞室腰部,最大位移值 4.39 mm,在工程控制范围内;围岩塑性区深度最大值 17.1 m。同时通过提取储气库正上方地表位移为 0 mm,反向验证了刚体圆锥型计算模型计算出储气库抗抬稳定性符合设计要求。

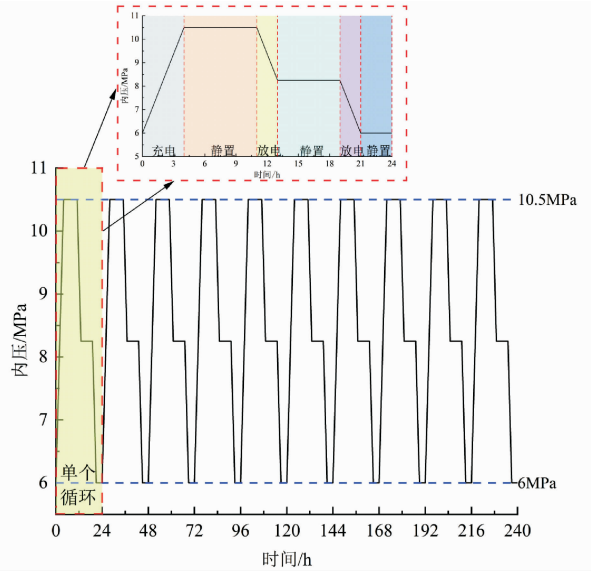


图 4 储气库内压与时间的关系图

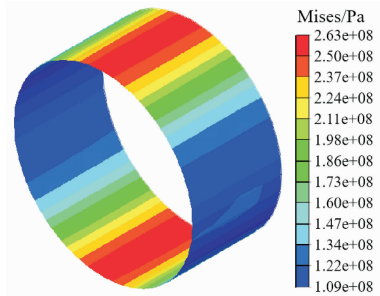


图 5 钢衬 Mises 应力云图

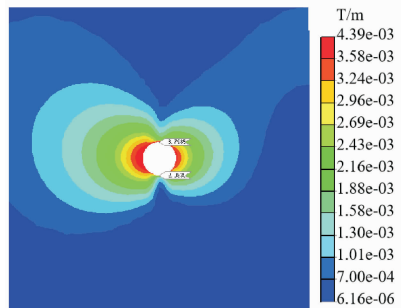


图 6 总位移云图

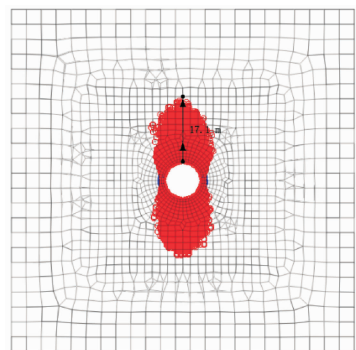


图 7 围岩塑性区云图

提取充放气过程中钢衬顶部、底部及腰部 Mises 应力值见图 8,从监测数据可以看出,不同监测部位 Mises 应力值随钢衬内部循环充放气呈周期性变化,顶部及底部最大值近 260 MPa,腰部最大值近 223 MPa,周期循环充放气下钢衬 Mises 应力最值几乎不变。

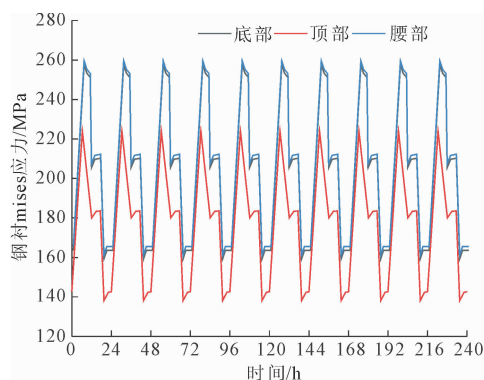


图 8 钢衬 Mises 应力监测值

依据表 4 中对应管壁最小埋深及上述抗内压数值分析计算结果,得出不同洞径对应密封钢板所需壁厚,同时参照水电站压力钢管设计规范抗外压稳

定性计算要求,需设计加劲环以抵抗外压,加劲环尺寸:200 mm×20 mm,加劲环布置间距 1 200 mm,同时计算出抗外压所需最小壁厚。抗内压、外压所需最小钢衬厚度如表 5 所示。

表 5 洞径与需抗内压、外压钢衬最小壁厚对应表

| 直径/m | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|----|----|----|----|----|
| 抗内压壁厚/mm | 18 | 20 | 20 | 22 | 24 |
| 抗外压壁厚/mm | 16 | 17 | 18 | 18 | 19 |

综合上述支护结构尺寸设计参数、计算工程量、施工组织条件、投资等要求,工程设计直径为 10 m。

3.4 稳定性分析

3.4.1 洞间距布置

基于 Mohr-Coulomb 准则,储气洞室在不同间距下的塑性区分布特征分别如图 9 所示。洞室净间距 $L = 1D_0$ (D_0 为储气库直径)时相邻洞室围岩塑性区均出现贯通,而在洞室间距 $L = 1.5D_0$ 时,相邻洞室之间的围岩塑性区则均未出现贯通现象。因此基于塑性区贯通判据,采用 $L = 1.5D_0$ 作为临界间距。

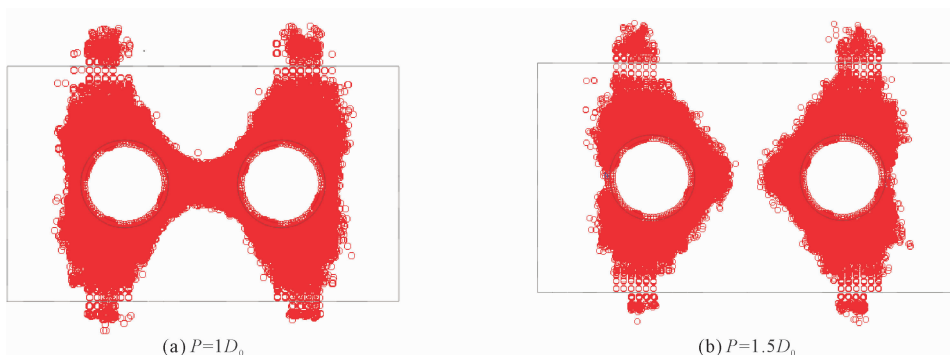


图 9 塑性区随洞间距变化特征

3.4.2 开挖断面

圆形与马蹄形断面是最常见的洞室断面类型,其中圆形断面能够提供均匀的支撑力,并且在结构上具有较好的稳定性,施工相对较为简单,且空间利用率较高;马蹄形断面同样能够提供较好的结构稳定性,能够承受较大的外部压力和荷载,截面形状则可以更好地适应车辆和施工设备的通过,提供更大的通行空间。

图 10—图 12 为圆形断面与马蹄形断面对应的开挖断面图最大主应力、水平及竖向云图,两者围岩均未出现拉应力,且洞周围岩所受的压应力大小相当,受力最大部位均是洞室腰部,两种断面类型在结构稳定性上均较优,但圆形断面洞室的整体变形相对较小,且空间利用率更高,能减少在土石方开挖以

及混凝土回填上的投入,因此洞室开挖断面宜选择圆形断面。

4 结论

以某压缩空气储能电站岩石内衬储气库工程为研究对象,模拟了储气库设计埋深及支护结构设计。主要得出以下结论:

(1) 基于刚体圆锥型模型抗抬稳定性计算,储气库设计最小埋深 150 m,后基于数值计算提取地表沉降为 0 mm,反验证了储气库埋深满足抗抬稳定性计算要求。

(2) 储气库钢衬受循环荷载作用 Mises 应力最值几乎不变,充放气期间钢衬整体受拉应力,顶部、底部 Mises 应力最值近 260 MPa,腰部 Mises 应力最值近 223 MPa,低于钢种 07Mn-MoVR 持久抗力限值

要求,满足设计要求。

(3)考虑工程岩性及开挖应力重分布的影响,

储气洞净间距布置宜大于两倍洞径;圆形开挖断面结构稳定性及工程利用率更高。

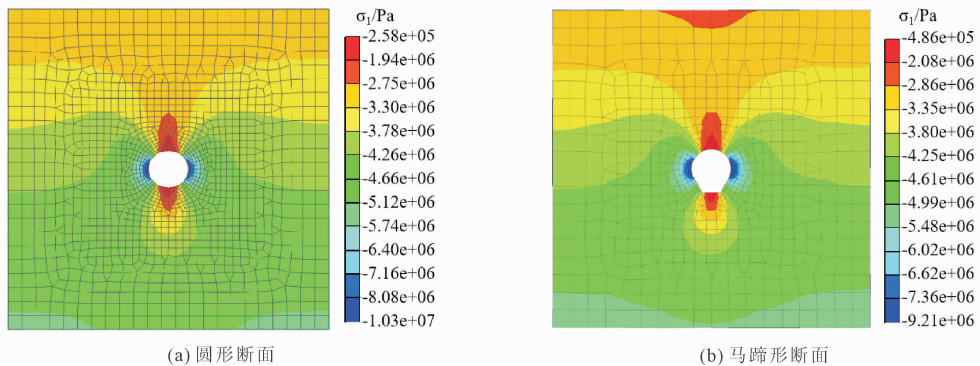


图 10 围岩最大主应力云图

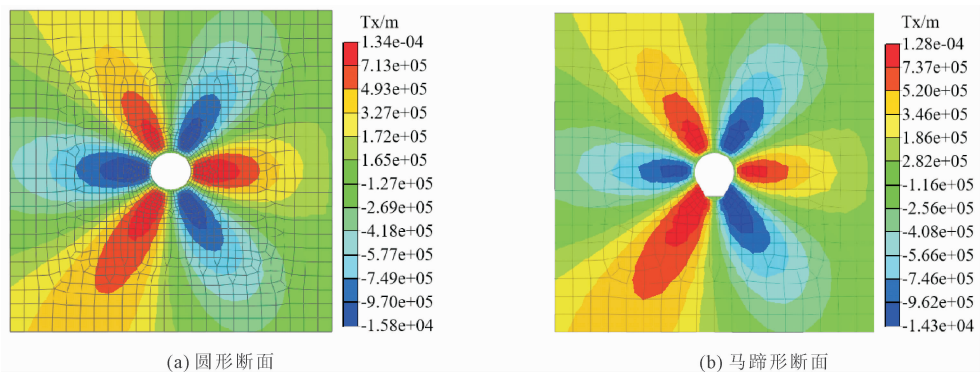


图 11 水平方向位移云图

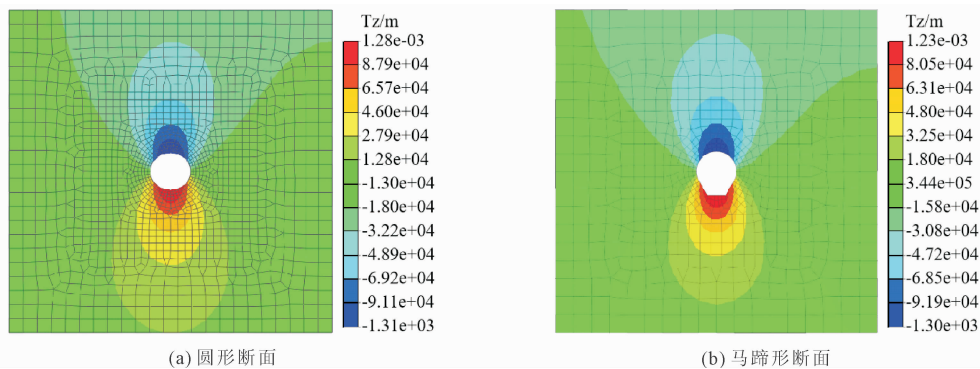


图 12 竖直方向位移云图

参考文献:

- [1] 南 雄,张国强,刘文毅.多视角下典型蓄电系统参与调峰对电力市场的经济性影响分析[J].热力发电,2019,48(11):13-21.
- [2] 葛鑫博,黄 俊,赵同彬,等.基于知识图谱的地下压缩空气储能研究进展[J].煤炭科学技术,2025,53(4):80-103.
- [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] 杜冬梅,段树洋,蒋志容,等.压缩空气储能系统地下人工洞室技术及其评价技术研究[J].热力发电,2024,53(10):1-10.
- [5] 孙冠华,王章星,王 娇,等.压缩空气储能电站地下洞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.
- [6] 杨雪雯.压气储能电站地下人工洞室上覆岩体抗抬稳定影响因素分析[J].内蒙古电力技术,2024,42(6):8-13,2.
- [7] 蒋中明,刘宇婷,陆 希,等.压气储能内衬洞室储气

- 关键问题与设计要点评述[J]. 岩土力学, 2024, 45(12):3491-3509.
- [8] 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, 54:2377-2391.
- [9] 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.
- [10] 饶虎, 王瑞. 压缩空气储能电站人工洞室储气库选址及主要设计原则[J]. 电力勘测设计, 2024(S2):64-71.
- [11] 张国华, 相月, 王薪锦, 等. 压气储能地下内衬储气库结构荷载分担解析解及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S2):3633-3650.
- [12] 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.
- [13] 何灏典, 唐欣薇, 严振瑞, 等. 复合式衬砌结构联合承载的原位试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3):560-568.
- [14] 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.
- [15] Qin Shikang, Xia Caichu, Zhou Shuwei. 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):2015-2116.
- [16] 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.
- [17] 周瑜, 夏才初, 赵海斌, 等. 压气储能内衬洞室的空气泄漏率及围岩力学响应估算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2):297-309.
- [18] 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, 252.
- [19] 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.
- [20] 赵凯, 马洪岭, 施锡林, 等. 基于蠕变疲劳本构模型的压气蓄能盐穴长期稳定性评估[J]. 岩土力学, 2025, 46(S1):1-12.
- [21] 孙冠华, 王娇, 于显杨, 等. 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[J]. 岩土力学, 2025, 46(1):1-25.
- [22] DL/T 5893—2025 压缩空气储能电站地下储气库设计规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2025.
- [23] GB/T 50086—2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2016.
- [24] NB/T 10391—2020 水工隧洞设计规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2021.
- [25] NB/T 35056—2015 水电站压力钢管设计规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.

(上接第118页)

- [13] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3):833-845.
- [14] 许晓静, 宋战平, 李辉, 等. 考虑拱效应的隧道管棚力学模型与参数分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1):95-106, 132.
- [15] Heng Chaoyang, Sun Song, Zhang Jiantao, et al. Calculation method of underground passage excavation on interactive effects among pipe-roof, steel bracing and foundation soil[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 26(1):448-459.
- [16] Su Kai, Zhang Yanjun, Chang Zhihui, et al. Transverse extent of numerical model for deep buried tunnel excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84:373-380.
- [17] Vitali O P, Celestino T B, Bobet A. Construction strategies for a natm tunnel in São Paulo, Brazil, in Residual Soil[J]. *Underground Space*, 2022, 7(1):1-18.