

压缩空气储能地下储气库椭圆形断面最佳轴比 及运行压力区间确定方法

张国华^{1,2}, 郭 辉², 张世殊³, 周芝仪⁴, 相 月¹, 熊 峰⁴, 华东杰⁴

(1. 中国地质大学(武汉)深层地热富集机制与高效开发全国重点实验室 新能源学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)先进技术研究院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;

4. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 压缩空气储能电站地下储气库断面形状关乎其受力状态, 影响储气库的密封性和稳定性。目前普遍认为圆形断面受力最合理, 但在不等向地应力条件下, 圆形断面洞周环向应力受力不均匀, 易诱发衬砌裂缝集中与局部渗漏。为此, 在弹性力学框架下, 围绕椭圆形断面储气库开展理论与数值研究。首先, 从弹性力学下椭圆形断面受力状态出发, 提出气密性保障的判据, 给出椭圆形断面的最佳轴比解析解; 其次, 提出了不等向地应力条件下的储气库稳定性保障判据, 建立椭圆形断面运行压力区间的判别方法, 并与圆形断面情形进行对比; 进一步, 结合 FLAC3D 数值模拟开展参数敏感性分析, 评估不同因素对椭圆形断面储气库最佳轴比及运行压力区间的影响; 最后, 整合形成最佳轴比-压力区间的一体化计算流程。研究结果表明: (1) 在不等向地应力条件下, 椭圆断面按照最佳轴比设计可使得洞周环向应力处处相等; (2) 椭圆形断面储气库按照最佳轴比设计时, 压力运行区间最大; (3) 侧压力系数、地应力和储气内压是影响椭圆形断面储气库最佳轴比的主要因素; (4) 侧压力系数和地应力是影响椭圆形断面储气库运行压力区间的主要因素。该研究成果可为储气库椭圆形断面设计及其运行压力区间提供参考。

关 键 词: 压缩空气储能; 储气库; 椭圆形断面; 最佳轴比; 运行压力区间

中图分类号: TU93

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2026)02-515-16

Method for determining the optimal axial ratio of elliptical section and operating pressure range in CAES underground gas storage facility

ZHANG Guo-hua^{1,2}, GUO Hui², ZHANG Shi-shu³, ZHOU Zhi-yi⁴, XIANG Yue¹,
XIONG Feng⁴, HUA Dong-jie⁴

(1. State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, School of Sustainable Energy, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Advanced Technology Research Institute, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China;

4. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The cross-sectional shape of an underground gas storage in a compressed air energy storage (CAES) power plant significantly influences its stress state, thereby affecting gas tightness and stability. It is conventionally considered that a circular cross-section yields the most favorable stress distribution. However, under anisotropic in-situ stress conditions, the hoop stress around a circular cavern is uneven and can induce localized lining cracking and gas leakage. To address this issue, this study investigates elliptical cross-section storage caverns using theoretical analysis based on elasticity theory. First, we propose a gas-tightness criterion based on the elastic stress state and derive an analytical solution for the elliptical cross-section's optimal axial ratio. Second, we establish a stability criterion for lined rock caverns under anisotropic in-situ stress and develop a method to determine the operating pressure range for elliptical cross-sections, comparing it with the circular cross-section. Furthermore, we perform a parameter sensitivity analysis using FLAC3D to evaluate how factors affect the elliptical cross-section's optimal axial ratio and operating pressure range. Finally, we establish an integrated calculation process to determine the optimal axial ratio and pressure range.

收稿日期: 2025-07-31

录用日期: 2025-12-24

基金项目: 国家自然科学基金 (No. U24A20599)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U24A20599).

第一作者简介: 张国华, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhangguohua@cug.edu.cn

通信作者: 华东杰, 男, 1995 年生, 博士后, 主要从事地下工程方面的研究工作。E-mail: huadongjie@cug.edu.cn

Results show that, under anisotropic in-situ stress conditions, an elliptical cross-section designed with an optimal axial ratio can produce uniform hoop stress around the cavern. When an elliptical cross-section gas storage facility is designed with the optimal axis ratio, its pressure operating range is maximized. The lateral pressure coefficient, in-situ stress and internal pressure of gas storage are the main factors affecting the operating pressure range of elliptical section gas storage. These findings provide theoretical guidance for the shape optimization and pressure design of underground gas storage caverns.

Keywords: compressed air energy storage; gas storage cavern; elliptical section; optimal axial ratio; operating pressure range

1 引言

随着可再生能源的大规模接入,能源系统对高效、大容量、绿色储能技术的需求日益增长。压缩空气储能(compressed air energy storage,简称CAES)作为一种具有规模大、寿命长、响应快等优势储能方式,在电力调峰、负荷调节和新能源消纳中展现出广阔的应用前景^[1-3]。地下储气库作为CAES系统的关键基础设施,常位于深部岩体中,其结构稳定性直接影响整个系统的运行安全与经济效益。相关研究表明,在复杂地质环境中,储气库受天然地应力场和运营工况(充气、抽气)双重影响,结构受力特性极为复杂,尤其是在不等向地应力显著的地下环境中,储气库断面的几何形状对围岩受力分布产生影响^[4-7]。同时,拟定合理的储气库运行压力区间也是CAES电站设计的关键一环,本文将这两方面进行重点研究。

国内外学者围绕地下储气库受力特性分析与断面优化设计,开展了大量研究工作。早期研究多基于弹性理论推导储气库围岩应力场分布,如Kirsch解、Zienkiewicz理论等^[8-12],揭示了开挖引起的应力扰动规律。近年来,随着数值模拟技术的发展,FLAC3D、ABAQUS等软件被广泛用于地下储气库受力分析。徐军等^[13]采用ABAQUS进行网格划分,基于偏微分技术,建立岩石力学弹塑性随机有限元增量初应力法的计算格式,研究不同深度下储气库围岩受力状态,指出地应力大小及其不等向性对塑性区发展有重要影响。而断面形状作为控制围岩受力状态的核心因素,对储气库的稳定性起到关键作用,也一直是研究热点。传统圆形断面因其应力分布较均匀、设计简便而被广泛采用^[14-20]。为进一步提升结构性能,学者们尝试引入椭圆形、马蹄形、直墙圆顶形等非圆形断面进行对比研究。针对断面优化,夏才初等^[21]采用FLAC3D对圆形、马蹄形与城门洞3种截面开展三维数值对比,分别在开挖后与充气后工况下评估洞室的应力分布、位移与塑性区特征,结果表明,圆形截面在开挖和运营阶段均表现出较好的稳定性。但考虑椭圆形断面结构在承受不等向地应力时,相较于圆形可能受力更优,变

形更小,适当调整椭圆的轴比(即竖直方向与水平方向上的椭圆半轴之比)可改善边界应力分布^[22-27],从而提升结构稳定性。刘力源等^[28]针对深部地下洞室与地应力场之间的轴变关系,建立了非均质围岩统计损伤力学模型,结果表明,最佳轴比情况下洞室围岩损伤破裂区面积最小。宋朝阳等^[29]通过FLAC3D探究了不同轴比的椭圆井筒断面形状下井筒围岩应力演化和变形规律。在地下椭圆洞室中,可以通过寻找等应力轴比来降低围岩的损伤程度,然而地下储气库洞室内部有较高的内压,受力更复杂,如何确定适用于多种地应力与地质条件下的椭圆形储气库最优轴比设计方法尚不全面。

现有关于地下储气库运行压力区间的研究,主要从抗隆起稳定性与能量转化效率两个维度给出取值建议,但多以圆形断面为基础,难以覆盖椭圆形断面的工况与参数敏感性^[30-32]。在方法上,张国华等^[32]基于储气库受力特征,从弹性力学出发,在等向应力条件下提出了运行压力区间的确定思路,为圆形断面提供了理论依据。然而,椭圆形断面下的运行压力区间迄今仍缺乏系统讨论。

为此,本文采用理论推导与数值模拟相结合的方法,从弹性力学角度出发,在弹性假设下得到椭圆形断面储气库最佳轴比的计算公式,并建立椭圆形断面储气库运行压力区间计算方法。通过基准工况的计算,对比分析理论值和模拟值的最佳轴比和椭圆形断面储气库洞周环向应力分布,验证最佳轴比解析解的适用性。进一步通过参数敏感性分析,分别探讨椭圆形断面储气库最佳轴比和运行压力区间的影响因素,得到影响椭圆形断面储气库最佳轴比和运行压力区间的关键参数。最后提出一种适用于不等向地应力下的椭圆形断面最佳轴比确定方法,为地下储气库的工程设计提供理论参考。研究成果可为椭圆形断面储气库运行压力区间和最佳轴比的确定提供理论基础。

2 椭圆形断面受力状态

2.1 基本假设

在实际工程中,地下储气库洞周应力状态受岩体性质、开挖形态、初始应力场、施工方式、洞室

内气体温度变化等因素的影响, 为了简化分析, 本文做出如下假设:

(1) 围岩等效为连续、均质介质, 不考虑围岩裂隙的影响^[7, 32-33]。

(2) 围岩等效为各向同性介质^[7, 32-33]。

(3) 压缩空气储能地下储气库足够长, 按平面应变问题分析^[7, 32-33]。

(4) 硐室埋深远大于硐室半径, 简化为无限大平板的开孔问题^[33]。

(5) 不考虑充放气过程中的渗流-温度对围岩受力的影响^[7, 32]。

2.2 椭圆形断面设计的考量

在等向地应力条件下, 地下储气库一般设计为圆形断面, 但是在不等向地应力条件下, 圆形断面

的环向应力分布不均匀, 充气后储气库硐周的裂缝会在局部发育, 导致局部裂缝宽度过大, 存在局部泄漏及失稳的风险, 见图 1(a)。当侧压力系数 $\lambda < 1$, 在垂直地应力 p 、水平地应力 λp 和储气库内压 p_a 的相互作用下, 圆形断面储库硐周的裂缝分布情况如图 1(a) 左图中红色线条所示。由于垂直应力更大, 在储库断面顶部和底部出现应力集中现象, 使得裂缝集中分布在断面顶部和底部。将断面形状优化为椭圆形后, 环向受力趋于均化, 裂缝的分布也会更加均匀, 如图 1(b) 左图所示。当 $\lambda > 1$, 如图 1(a) 右图所示。由于水平应力更大, 在储库断面左帮和右帮出现应力集中现象, 裂缝会集中分布在断面的左帮和右帮。将断面形状优化为椭圆形, 环向受力趋于均化, 裂缝的分布也会更加均匀, 如图 1(b) 右图所示。

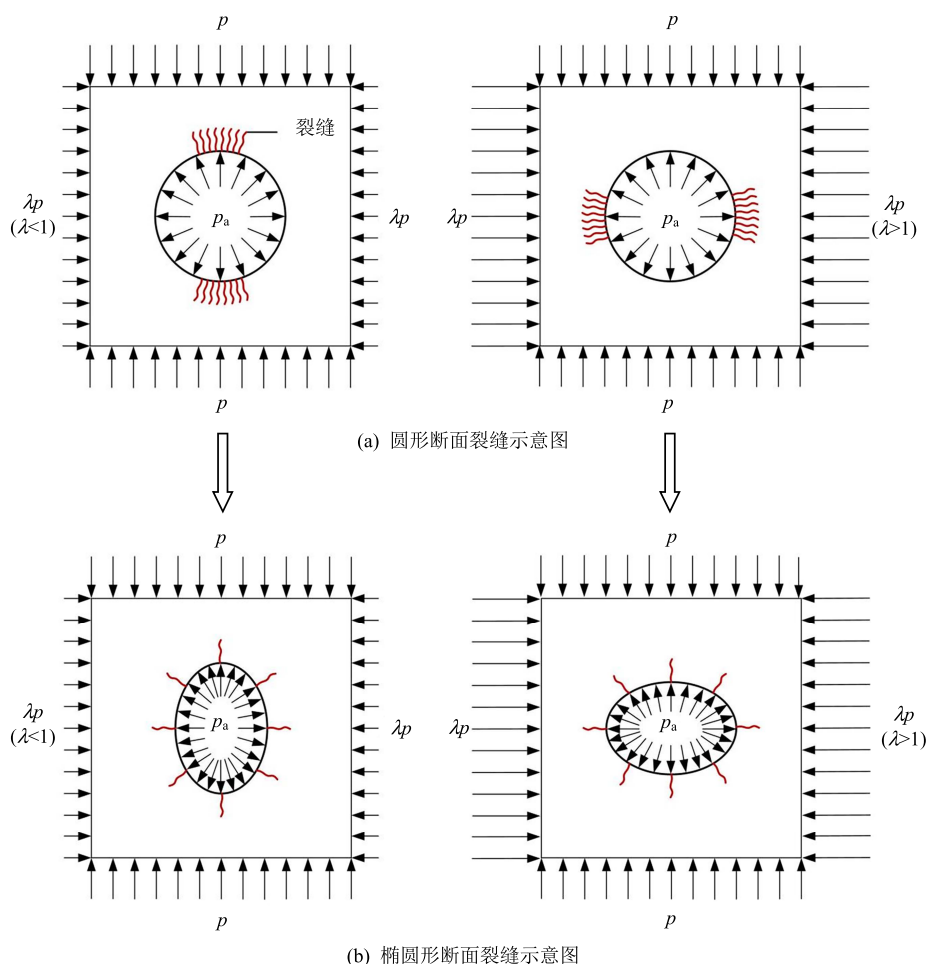


图1 不等向应力下圆形断面和椭圆形断面裂缝分布示意图

Fig.1 Schematic diagrams of crack distribution in circular and elliptical sections under unequal stress

上述分析表明, 在不等向地应力条件下, 通过将圆形断面改为椭圆形, 可有效降低环向应力的应力差, 即储气库断面轴比的变化直接影响硐周应力

分布, 进而改变硐周裂缝分布情况。因此, 有必要对椭圆断面在不等向应力作用下的受力机制开展系统分析, 量化轴比对稳定性的具体影响, 并据此确

定更优的断面参数与设计方案。

2.3 弹性状态下椭圆形断面受力及最佳轴比

为探讨椭圆形储气库在弹性状态下的受力特性并确定其最佳轴比, 本节给出具体计算方法。在弹性假设下, 当硐室在内部承受储气内压, 外部承受不等向地应力时, 储气库典型断面受力示意图见图2。

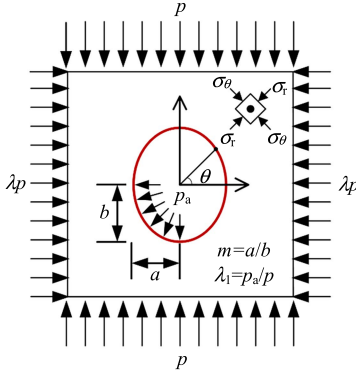


图2 椭圆形硐室周边应力计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of stress calculation around the elliptical chamber

尹光志等^[23]利用复变函数理论, 以均布荷载为边界条件, 求解出了椭圆形钻孔在远场应力和钻孔内压共同作用下的钻孔周围应力场解析解。本文在此基础上, 给出了适用于地下储气库椭圆形硐室周边任一点的环向应力表达式:

$$\sigma_{\theta} = \lambda_1 p \frac{m^2 - 2m - (m^2 - 1)\cos^2 \theta}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} + p \frac{(m+1)^2 \cos^2 \theta - m^2}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} + \lambda p \frac{(m+1)^2 \sin^2 \theta - 1}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \quad (1)$$

式中: σ_{θ} 为环向应力; $\lambda_1 = p_a / p$; m 为椭圆断面轴比, $m = a / b$, a 为半长轴, b 为半短轴; θ 为椭圆硐室截面上某一点的极角。

将式(1)按照常数项与 $\cos^2 \theta$ 分组可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta}(\cos^2 \theta) &= p \frac{A \cos^2 \theta + B}{D + C \cos^2 \theta} \\ A &= (1 - \lambda)(m+1)^2 - \lambda_1(m^2 - 1) \\ B &= (\lambda + \lambda_1 - 1)m^2 + 2(\lambda - \lambda_1)m \\ C &= 1 - m^2 \\ D &= m^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)可知, 椭圆形硐室的环向应力随着 θ 的变化而变化, 在不等向地应力作用下会在边界处形成非均匀应力分布。当 $\sigma_{\theta}(\cos \theta)$ 在区间内存在常

数时, 则有

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d \cos \theta} \left(\frac{A \cos^2 \theta + B}{D + C \cos^2 \theta} \right) &= \frac{AD - BC}{(D + C \cos^2 \theta)^2} = 0 \\ AD - BC &= 0 \Leftrightarrow \frac{A}{B} = \frac{1 - m^2}{m^2} \quad (B, D \neq 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(3)可知, 硐周的受力状态很大程度上受控于椭圆形的轴比, 通过改变轴比, 可以使得硐周边向应力处处相等。硐周环向应力是裂缝产生的主要原因^[34-35], 当硐周环向应力分布均匀时, 硐周裂缝分布也更加均匀, 有利于储气库的气密性。因此, 本文从裂缝均匀分布角度提出储气库气密性保障的判据:

$$\frac{d \sigma_{\theta}}{d \theta} = 0 \quad (4)$$

通过求导式(1)代入式(4)并求解可得到等应力轴比(其中, $m = a / b > 0$):

$$m = \frac{\lambda_1 - \lambda}{\lambda_1 - 1} = \frac{a}{b} \quad (5)$$

式(5)中, m 与 θ 无关, 代入式(1)可得

$$\sigma_{\theta} = p(1 + \lambda - \lambda_1) = \text{const} \quad (6)$$

此时硐室周边应力处处相等, 故根据式(5)确定的轴比 m 即为等应力轴比。采用等应力轴比确定的硐室断面是最稳定断面, 是工程设计所追求的最优状态故可称之为最佳(优)轴比。等应力轴比与初始应力的绝对值无关, 只与 λ 、 λ_1 值有关, 即等应力轴比与侧压力系数和储气内压有关。

由式(3)可知, 当 $\lambda_1 = 1$ 或 $\lambda_1 = \lambda$ 时, 不存在正数 m 满足式(4), 即不存在等应力轴比, 此时硐室的应力状态如图3所示, 储气内压与水平应力或垂直应力相等。

当 $\lambda_1 = 1$ 时,

$$\sigma_{\theta} = p \frac{[-\lambda m^2 + 2(1 - \lambda)m + (2 - \lambda)] \cos^2 \theta}{m^2 + (1 - m^2) \cos^2 \theta} + p \frac{\lambda m^2 + 2(\lambda - 1)m}{m^2 + (1 - m^2) \cos^2 \theta} \quad (7)$$

当 $\theta \in [0, 2\pi]$ 时 $\cos^2 \theta \in [0, 1]$, 硐周环向应力 σ_{θ} 的极值和应力差 $\Delta \sigma_{\theta}$ 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= p \left[\lambda + \frac{2(\lambda - 1)}{m} \right], \quad \cos^2 \theta = 0 \\ \sigma_{\theta} &= p(2 - \lambda), \quad \cos^2 \theta = 1 \\ \Delta \sigma_{\theta} &= 2p |1 - \lambda| \left(1 + \frac{1}{m} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

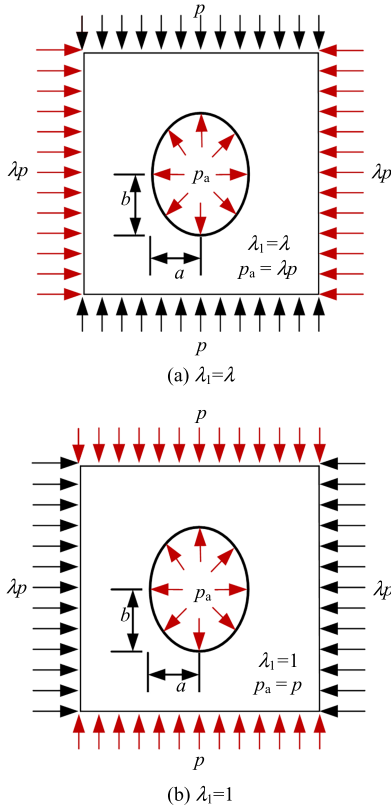


图3 椭圆形硐室受力示意图
Fig.3 Schematic diagrams of forces acting on elliptical chamber

同理,当 $\lambda_1 = \lambda$ 时,硐周环向应力的应力差 $\Delta\sigma_\theta$ 为

$$\Delta\sigma_\theta = 2p|1 - \lambda|(1 + m) \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知,在不等向地应力作用下,当储气内压与水平应力或垂直应力相等,硐周的环向应力差总是存在的,考虑施工与经济成本,在这种情况下推荐地下储气库建造圆形断面,此时的硐周环向应力差 $\Delta\sigma_\theta = 4p|1 - \lambda|$ 。

2.4 椭圆形断面储气库运行压力区间确定方法

张国华等^[32]指出,当储气库断面为圆形时,储气库的应力场受到储气内压和不等向地应力的共同作用。同理,当储气库断面为椭圆形时,同样受到储气内压和不等向地应力的共同作用。即当储气库处于弹性状态时,可以将应力场分解为两个应力场。

围岩中最危险的点位于储气库内壁,对应的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \lambda_1 p \\ \sigma_\theta &= \lambda_1 p \frac{m^2 - 2m - (m^2 - 1)\cos^2 \theta}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} + \\ &\quad p \frac{(m+1)^2 \cos^2 \theta - m^2}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} + \lambda p \frac{(m+1)^2 \sin^2 \theta - 1}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: σ_r 为径向应力; $\tau_{r\theta}$ 为剪应力。

内壁上的剪应力为0,所以内壁上的径向应力和环向应力就是两个主应力,对应摩尔应力圆的圆心为

$$c_\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = \lambda_1 p \frac{m^2 - m + (1 - m^2)\cos^2 \theta}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} + \frac{p}{2} \cdot \frac{(m+1)^2 \cos^2 \theta - m^2}{m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} + \frac{\lambda p (m+1)^2 \sin^2 \theta - 1}{2 m^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \quad (11)$$

随夹角 θ 变化,摩尔圆的圆心 c_σ 位于 (p, λ) 平面上的两条直线之间。

$$\left. \begin{aligned} c_{\sigma 1} &= \lambda_1 p \left(1 - \frac{1}{m}\right) - \frac{p}{2} + \frac{\lambda p}{2} \left(1 + \frac{2}{m}\right) \\ c_{\sigma 2} &= \lambda_1 p (1 - m) + \frac{p}{2} (2m + 1) - \frac{\lambda p}{2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当 $\lambda = 1$ 时,有

$$\left. \begin{aligned} c_{\sigma 1} &= \lambda_1 p \left(1 - \frac{1}{m}\right) + \frac{p}{m} \\ c_{\sigma 2} &= \lambda_1 p (1 - m) + mp \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

在两条直线的交点处,储气库运行压力区间最大^[32],即

$$\lambda_1 p \left(1 - \frac{1}{m}\right) + \frac{p}{m} = \lambda_1 p (1 - m) + mp \quad (14)$$

式(14)经过化简可以得到 $m = 1$ 。将 $m = 1$ 代入式(13)可得 $c_\sigma = p$,即当 $\lambda = 1$ 时,储气库断面为圆形,存在最大运行压力区间。

从圆心 $(c_\sigma, 0)$ 作圆与强度线相切,则可得到 $m = 1$ 时储气库运行压力区间为

$$\left. \begin{aligned} p_{\min, m=1} &= p(1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi \\ p_{\max, m=1} &= p(1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $p_{\min, m=1}$ 为圆形断面储气库的下限储气内压; $p_{\max, m=1}$ 为圆形断面储气库的上限储气内压; c 为围岩黏聚力; φ 为围岩内摩擦角。

对于不等向地应力($\lambda \neq 1$)状态,同样是两条直线的交点处压力区间最大,即

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 p \left(1 - \frac{1}{m}\right) - \frac{p}{2} + \frac{\lambda p}{2} \left(1 + \frac{2}{m}\right) &= \\ \lambda_1 p (1 - m) + \frac{p}{2} (2m + 1) - \frac{\lambda p}{2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(16)经过化简可以计算得到 $m = (\lambda_1 - \lambda) / (\lambda_1 - 1)$, $m = -1$ (舍去),说明在不等向地应力条件下,椭圆形断面储气库按照最佳轴比设计时,压力

运行区间最大。将 $m = (\lambda_1 - \lambda) / (\lambda_1 - 1)$ 代入式 (12) 可得摩尔圆的圆心为

$$c_\sigma = \frac{1+\lambda}{2} p \quad (17)$$

张国华等^[32]给出了当 $m=1$ (圆形储气库) 时摩尔圆的圆心 c'_σ

$$\left. \begin{aligned} c'_{\sigma 1} &= \frac{3\lambda-1}{2} p \\ c'_{\sigma 2} &= \frac{3-\lambda}{2} p \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

这 3 条直线见图 4, 交点为 $(p, 1)$, 即 C 点。以 $\lambda \leq 1$ 为例, $m = (\lambda_1 - \lambda) / (\lambda_1 - 1)$ 时, 摩尔圆的圆心为 M 点; $m=1$ 时, 摩尔圆的圆心在 AB 两点之间。过 A 点圆与围岩强度线相切, 该圆与正应力轴的右侧交点为上限储气内压 $p_{\max, m=1}$; 过 B 点圆与围岩强度线相切, 该圆与正应力轴的左侧交点为下限储气内压 $p_{\min, m=1}$; 过 M 点圆与围岩强度线相切, 该圆与正应力轴左侧交点为下限储气内压 $p_{\min}$, 该圆与正应力轴的右侧交点为上限储气内压 $p_{\max}$; 当储气内压大于上限储气内压或小于下限储气内压时, 围岩会进入塑性。

为保障储气库长期稳定运行, 围岩在循环充放气全过程应始终处于弹性受力状态, 基于此, 从弹性受力角度出发, 根据 Mohr-Coulomb 强度准则提出稳定性保障判据:

$$f_{MC} = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} - 2c \frac{\cos \varphi}{1-\sin \varphi} < 0 \quad (19)$$

式中: σ_1 为第一主应力; σ_3 为第三主应力。

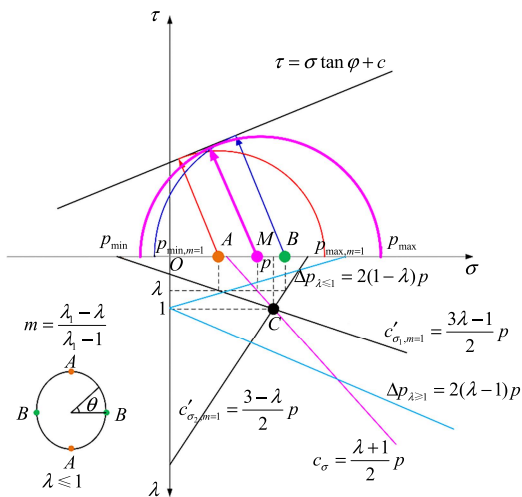


图4 不等向地应力作用下储气库的运行压力区间

Fig.4 Operating pressure range of gas storage under the action of unequal in-situ stress

当储气内压为低压时, $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r = p_a$, 将式 (10) 代入式 (19) 可得

$$p_a > p \frac{1+\lambda}{2} (1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi \quad (20)$$

当储气内压为高压时, $\sigma_1 = \sigma_r = p_a$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$, 将式 (10) 代入式 (19) 可得

$$p_a < p \frac{(1+\lambda)}{2} (1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi \quad (21)$$

根据式 (20) 和式 (21), 并结合图 4 的几何关系可以得到, 当 $m \neq 1$ 时储气库的下限储气内压 $p_{\min}$ 和上限储气内压 $p_{\max}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} p_{\min} &= \frac{1+\lambda}{2} p (1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi \\ p_{\max} &= \frac{1+\lambda}{2} p (1 + \sin \varphi) + c \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

当 $m=1$ 时储气库的下限储气内压和上限储气内压分别为

$$\left. \begin{aligned} p_{\min} &= \frac{3-\lambda}{2} (1 - \sin \varphi) p - c \cos \varphi \quad (\lambda \leq 1) \\ p_{\max} &= \frac{3\lambda-1}{2} (1 + \sin \varphi) p + c \cos \varphi \quad (\lambda \leq 1) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{\min} &= \frac{3\lambda-1}{2} (1 + \sin \varphi) p + c \cos \varphi \quad (\lambda > 1) \\ p_{\max} &= \frac{3-\lambda}{2} (1 - \sin \varphi) p - c \cos \varphi \quad (\lambda > 1) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

值得注意的是, 从图 4 中可以看出, $m \neq 1$ 时储气库运行压力区间相较于 $m=1$ 时范围更广, 根据式 (22) ~ (24) 可以计算出其压力差, 压力差 Δp 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{\lambda \leq 1} &= 2(1-\lambda)p \quad (\lambda \leq 1) \\ \Delta p_{\lambda > 1} &= 2(\lambda-1)p \quad (\lambda > 1) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

3 参数敏感性分析

本文 2.2 节给出了椭圆形断面储气库的最佳轴比计算公式和储气库洞室周围环向应力解析解, 2.3 节给出了储气库运行压力区间的确定方法。椭圆形断面储气库最佳轴比计算公式见式 (5), 椭圆形断面储气库运行压力区间的计算公式见式 (22)。本章将对影响椭圆形断面储气库最佳轴比和运行压力区间的因素进行敏感性分析。

3.1 数值模型的建立

基于 2.2 节弹性假设下的理论公式推导结果, 进一步采用数值模拟方法来计算椭圆形断面储气库

的最佳轴比，并建立椭圆形断面储气库的数值模型如图 5 所示。

在正常地应力条件和较均质岩体中，硐室开挖扰动的影响范围通常在 3~6 倍半径之间，此范围内其应力状态趋于初始地应力，可以近似当作无扰动。故本模型在硐库上下左右 4 个方向分别取延伸长度大于 6 倍硐半径作为影响半径。以基准工况为例，建立椭圆形断面隧道式储气库，椭圆形断面横截面积恒为 64π ，长短半轴的具体数值由式（5）决定，断面形状如图 5(b)所示，例如当轴比 $m=1$ 时，数值模椭圆形断面长轴为 8 m、短轴为 8 m，椭圆形断面退化特殊情况圆形；数值模型宽度为 400 m，高度为 400 m。数值模型的上下及左右方向施加应力边

界以模拟不等向地应力的影响，底部水平面施加垂直位移约束。模型内表面上施加 12 MPa 的压力以反映储气库内的最高压力作用。数值模型的计算单元数量为 12 880 个，节点数量为 36 521 个。另外，为直观呈现硐室环向应力分布特征，仅在硐室内部设置了厚度较小的圆环作为围岩内壁应力提取单元，如图 5(b)中蓝色单元所示，其力学强度参数与围岩保持一致。

围岩力学计算采用弹性本构模型，综合考虑工程地质和岩体两种关键因素，研究各参数对储气库轴比的影响，参数敏感性分析计算方案见表 1。重点探讨地应力、侧压力系数、围岩强度参数等关键因素对椭圆形储气库轴比的影响规律。

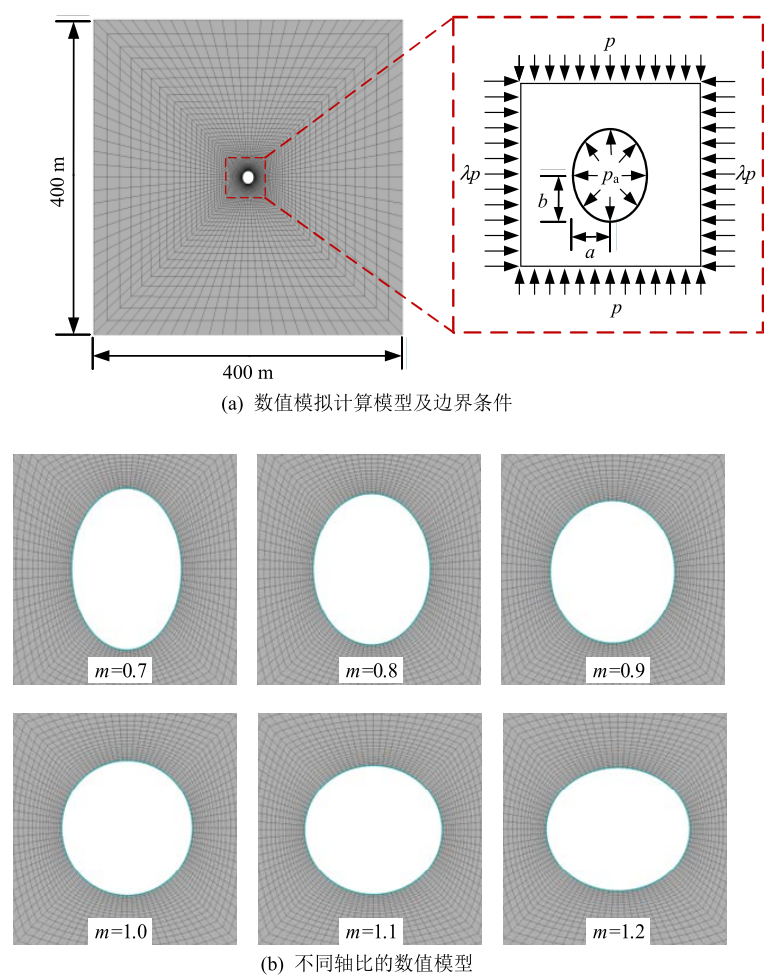


图 5 椭圆形断面储气库数值模型
Fig.5 Numerical models of gas storage cavern with elliptical section

表 1 最佳轴比计算方案
Table 1 Calculation schemes of the optimum axial ratio

数据类型	变形模量 / GPa	泊松比	储气库断面横截面积 / m ²	地应力 / MPa	储气库内压 / MPa	侧压力系数
基准值	15	0.25	64	6	12	1.1
对比方案取值	5, 10, 15, 20, 25	0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35	—	2, 4, 6, 8, 10	8, 10, 12, 14, 16	0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5

3.2 基准工况计算结果

在基准工况下 ($\lambda = 1.1$, $p_a = 12$ MPa, $p = 6$ MPa), 代入式 (5) 计算得到此时的最佳轴比 $m = 0.9$, 由式 (6) 可知, 此时储气库硐周的环向应力处处相等, $\sigma_\theta = 0.6$ MPa。随后, 在理论值的最佳轴比邻近范围内 ($m = 0.7 \sim 1.1$) 选取多个轴比值, 将对应的椭圆形断面储气库模型在 FLAC3D 中进行弹性工况下的数值模拟, 并将模拟得到的储气库硐周环向应力与解析解进行对比, 同时对比不同轴比下椭圆形储气库硐周最大环向应力与最小环向应力的差值 ($\Delta\sigma_\theta = |\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta\min}|$)。经过计算, 随着轴比的改变, 储气库硐周环向应力理论值和模拟值如图 6 所示, 储气库硐周环向应力变化范围如图 7 所示。由图 6、7 可知, 在 $m = 0.9$ 时, 模拟得到储气库硐周环向应力散点趋于同一水平线上, 与理论值比较吻

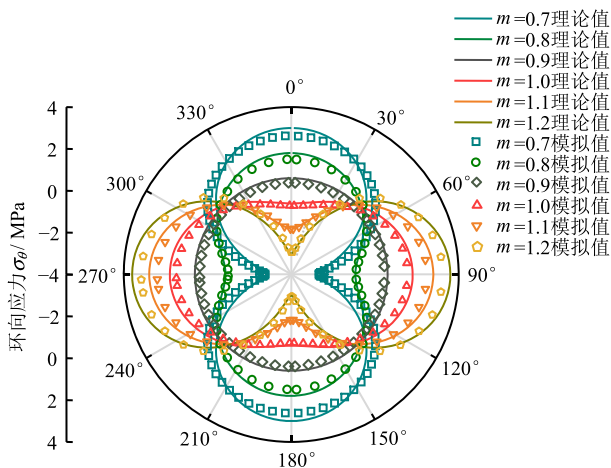


图 6 基准工况下不同轴比的硐周环向应力理论值和模拟值

Fig.6 Theoretical and simulated values of circumferential stress of different axial ratios under reference working condition

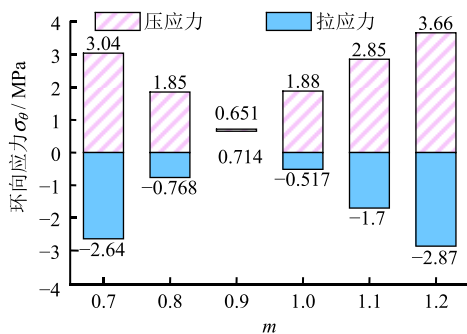


图 7 基准工况下不同轴比的硐周环向应力变化范围

Fig.7 Variation range of circumferential stress of different axial ratios under the reference working condition

合, 此时环向应力在 0.651~0.714 MPa 之间浮动, 环向应力差 $\Delta\sigma_\theta = 0.063$ MPa, 说明此时储气库硐周受力比较均匀, 即使产生裂缝, 裂缝的分布也较为均匀。然而, 无论轴比增加或减小, 环向应力分布不再均匀, 且椭圆形断面轴比与最佳轴比 0.9 偏差越大, 储气库硐周环向应力差 $\Delta\sigma_\theta$ 越大。

基准工况下不同轴比的硐周环向应力分布云图如图 8 所示。从图中可以看出, 椭圆形断面轴比小于最佳轴比时, 拉应力主要分布在拱顶和拱底, 压应力主要分布在拱腰; 椭圆形断面轴比大于最佳轴比时, 拉应力主要分布在拱腰, 压应力主要分布在拱顶和拱底。

上述结果表明, 通过 FLAC3D 模拟得到椭圆形断面储气库最佳轴比为 0.9, 与式 (5) 计算结果一致, 说明式 (5) 可以用来快速计算出椭圆形断面储气库的最佳轴比。

3.3 椭圆形断面储气库最佳轴比参数敏感性

通过对基准工况的分析, 在弹性假设条件下, 采用理论公式与数值模拟相结合的方法, 将模拟得到的等应力时的轴比作为最佳轴比。在本节则探讨不同参数对椭圆储气库最佳轴比的影响, 所考虑的地质条件主要包括变形模量、泊松比、地应力、储气内压和侧压力系数。计算方案见表 1。

不同参数对椭圆形断面储气库最佳轴比和环向应力差的影响分别如图 9 和图 10 所示。从图 9(a)、9(b) 可以发现, 随着围岩弹性模量和泊松比的改变, 最佳轴比的模拟值与理论值重合且保持恒定 ($m = 0.9$)。由图 10(a)、10(b) 可知, 储气库硐周环向应力差几乎稳定在 0.1 MPa, 环向应力分布较为均匀。因此, 在分析最佳轴比区间时可忽略围岩变形模量和泊松比的影响。

由图 9(c) 可知, 储气内压在 8~16 MPa 范围内变化时, 最佳轴比理论值与模拟值的最佳轴比变化趋势一致。随着内压的增大, 最佳轴比呈现先缓慢增大后平稳的趋势, 当储气内压超过 14 MPa 后, 最佳轴比增幅趋于平缓, 表明储气内压在低储气内压范围内对最佳轴比的影响较大。而储气库硐周环向应力差几乎稳定在 0.1 MPa, 环向应力分布较为均匀 (见图 10(c))。因此, 在分析最佳轴比区间时要着重考虑较低储气内压的影响。

当围岩地应力从 2 MPa 增加到 10 MPa, 如图 9(d) 所示, 最佳轴比模拟值与理论值变化趋势一致, 随着地应力的增大, 最佳轴比呈现先缓慢下降后急速下降的趋势, 当地应力超过 8 MPa 后, 最佳轴比骤降。同时, 从图 10(d) 可以发现, 储气库硐周

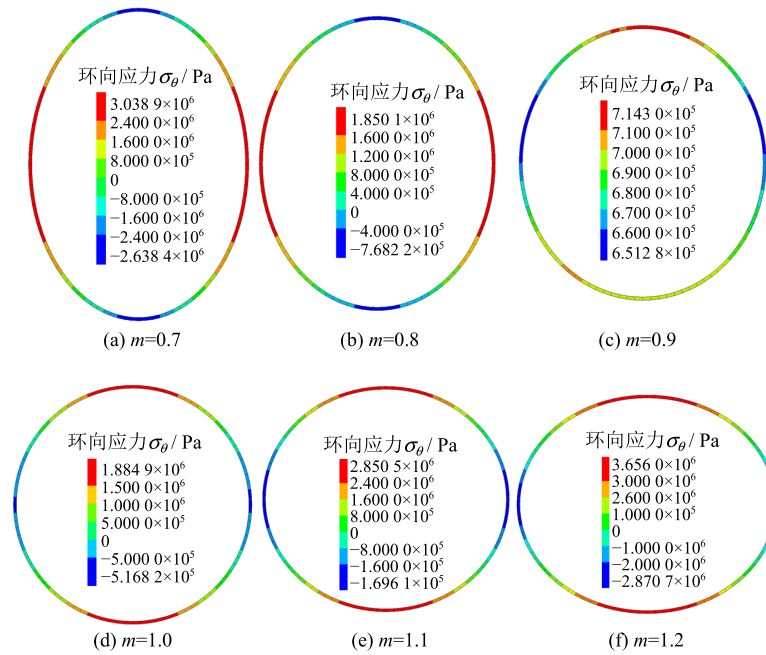


图8 基准工况下不同轴比的硐周环向应力分布云图

Fig.8 Nephograms of circumferential stress of different axial ratios under the reference working condition

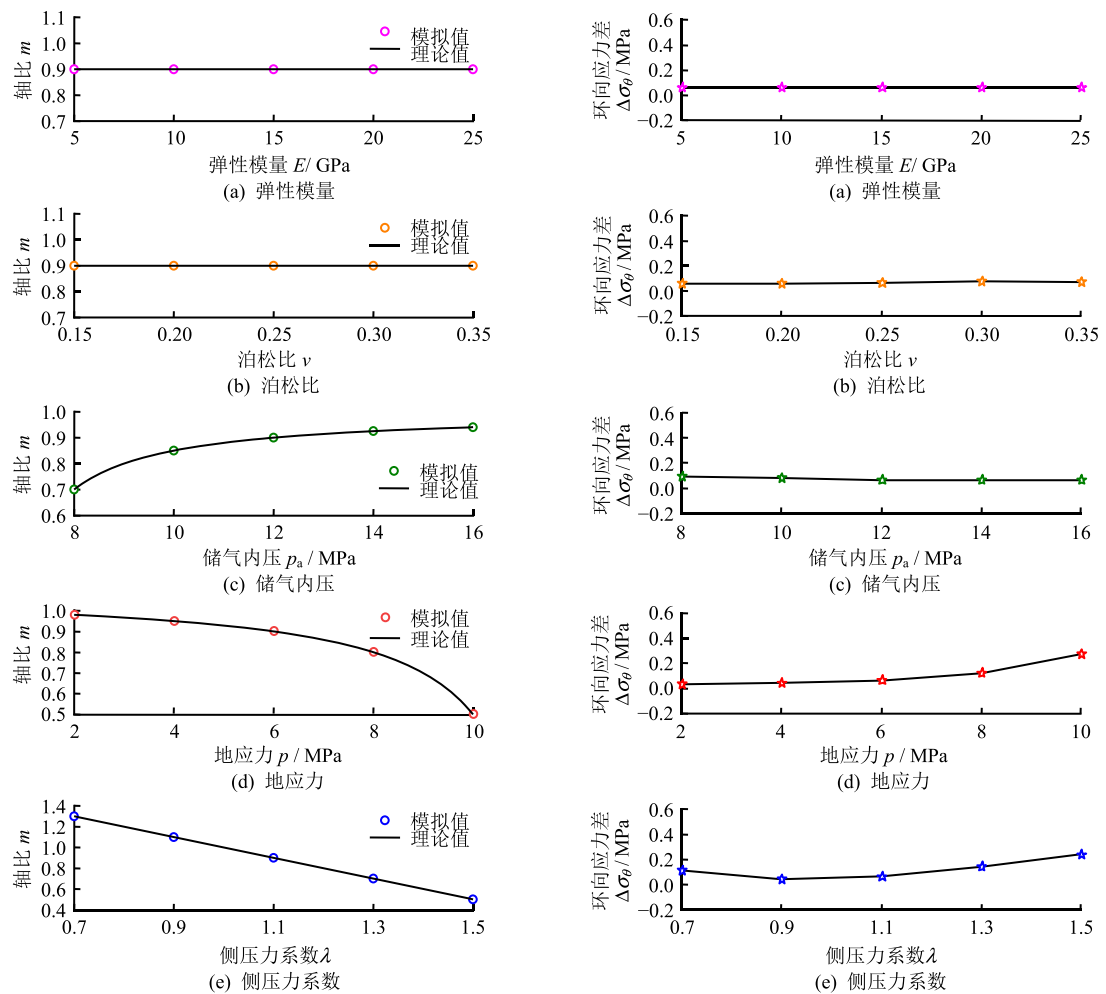


图9 各因素对最佳轴比的影响

Fig.9 Influence of various factors on the optimum axial ratio

图10 最佳轴比条件下各因素对环向应力差的影响

Fig.10 Influence of various factors on circumferential stress difference under the best axial ratio condition

环向应力差也随着地应力的增大而增大。因此,在分析最佳轴比区间时要着重考虑高地应力的影响。

通过上述多次模拟得到不同侧压力系数下对应的最佳轴比,结果如图9(e)所示,当围岩侧压力系数从0.5增加到1.5,最佳轴比呈现线性下降趋势,理论值与模拟值的最佳轴比变化趋势一致。储气库硐周环向应力差也随着侧压力系数的增大而增大(见图10(e))。说明在分析最佳轴比区间时,侧压力系数是不可忽略的参数。

将各参数对最佳轴比和环向应力差的影响情况汇总于图11。从中图11(a)可知,侧压力系数、地应力、储气内压对最佳轴比影响较大,是影响椭圆形断面储气库最佳轴比的关键因素。通过图11(b)的模拟结果可知,在最佳轴比条件下地应力和侧压力系数对环向应力差影响较大,影响着环向应力的均匀分布,但应力差较小,基本在0~0.3 MPa以内。

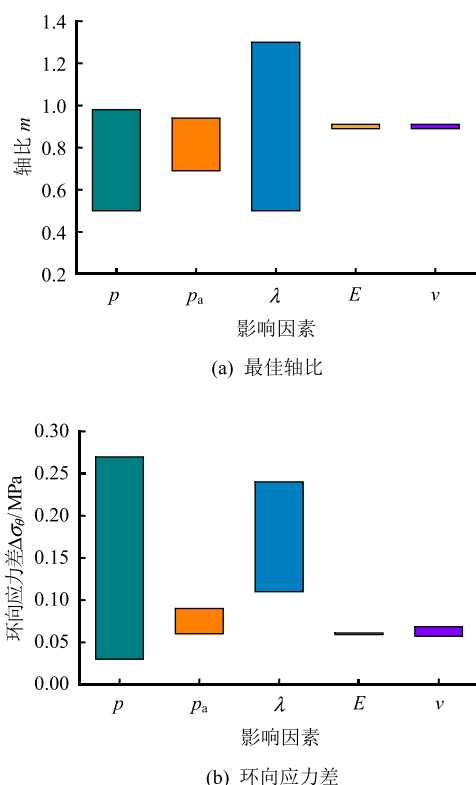


图 11 单因素相对变化时对最佳轴比和环向应力差的影响
Fig.11 Influence of single factor relative change on the optimal axial ratio and circumferential stress difference

上述结果表明,在弹性条件下,式(5)可以较好地预测各参数下的椭圆形断面储气库最佳轴比,且参数敏感性关系为侧压力系数>地应力>储气内压>弹性模量=泊松比。

为了揭示多因素交互作用对最佳轴比的影响规律,针对侧压力系数、地应力、储气内压,计算了两种因素组合下交互作用对最佳轴比的影响。以储气内压和侧压力系数为例(见图12),在不同地应力条件下,等值线总体规则、近似平行线,说明在所取参数范围(见表1),储气内压和侧压力系数的交互作用相对较弱。值得注意的是,在低地应力条件下,如图12(a)所示,最佳轴比整体在1~1.5之间波动,且等值线疏密变化较明显,交互作用相对较强。从图13中可以看出,地应力和侧压力系数组合对最佳轴比的影响最大,储气内压和侧压力系数次之,地应力和储气内压影响最小。在进行储气库断面设计时,除了考虑单因素的影响之外还应该综合考量多因素耦合机制的影响。

3.4 椭圆形断面储气库储气内压参数敏感性

对于椭圆形断面储气库,在最佳轴比条件下,存在最大储气库压力区间,此时储气库运行压力区间计算公式见式(22)。从式(22)中可知,椭圆形断面储气库运行压力区间受地应力、侧压力系数、黏聚力和内摩擦角的影响。本节将探讨这些参数对椭圆形断面储气库运行压力区间的影响,计算方案见表2。

图14给出了椭圆形断面储气库在最佳轴比条件下,不同参数对储气库运行压力的影响。由图14(a)可知,随着侧压力系数的增加,上下限储气内压基本呈线性增加规律。当围岩侧压力系数从0.5增加到1.7时,上限储气内压范围在8~15 MPa之间,下限储气内压范围在0~2 MPa之间。由图14(b)可知,随着地应力的增加,上下限储气内压仍呈线性增加规律,且相对侧压力系数有着更大的斜率。当围岩地应力从2 MPa增加到12 MPa时,上限储气内压范围在4.5~22.5 MPa之间,下限储气内压范围在0~2.5 MPa之间。如图14(c)、14(d)所示,随着内摩擦角和黏聚力的增加,上限储气压力均呈缓慢增加趋势,而下限储气压力则均呈缓慢降低趋势。内摩擦角变化时,上限储气内压范围在10~12.5 MPa之间,下限储气内压范围在0~3 MPa之间;黏聚力变化时,上限储气内压范围在11~12 MPa之间,下限储气内压范围在0~2 MPa之间。

图15给出了各因素相对变化时对上下限储气内压的影响,曲线越陡峭说明影响越显著。由图可知,地应力是影响上限储气内压的最显著因素,其次是侧压力系数,黏聚力和内摩擦角对上限储气内压的

影响较小。地应力、侧压力系数、黏聚力和内摩擦角对下限储气内压的影响大致相当。此外可以发现，这

4 个因素发生变化时，上限储气内压变动较大，而下限储气内压变动较小，基本在 0~4 MPa 以内。

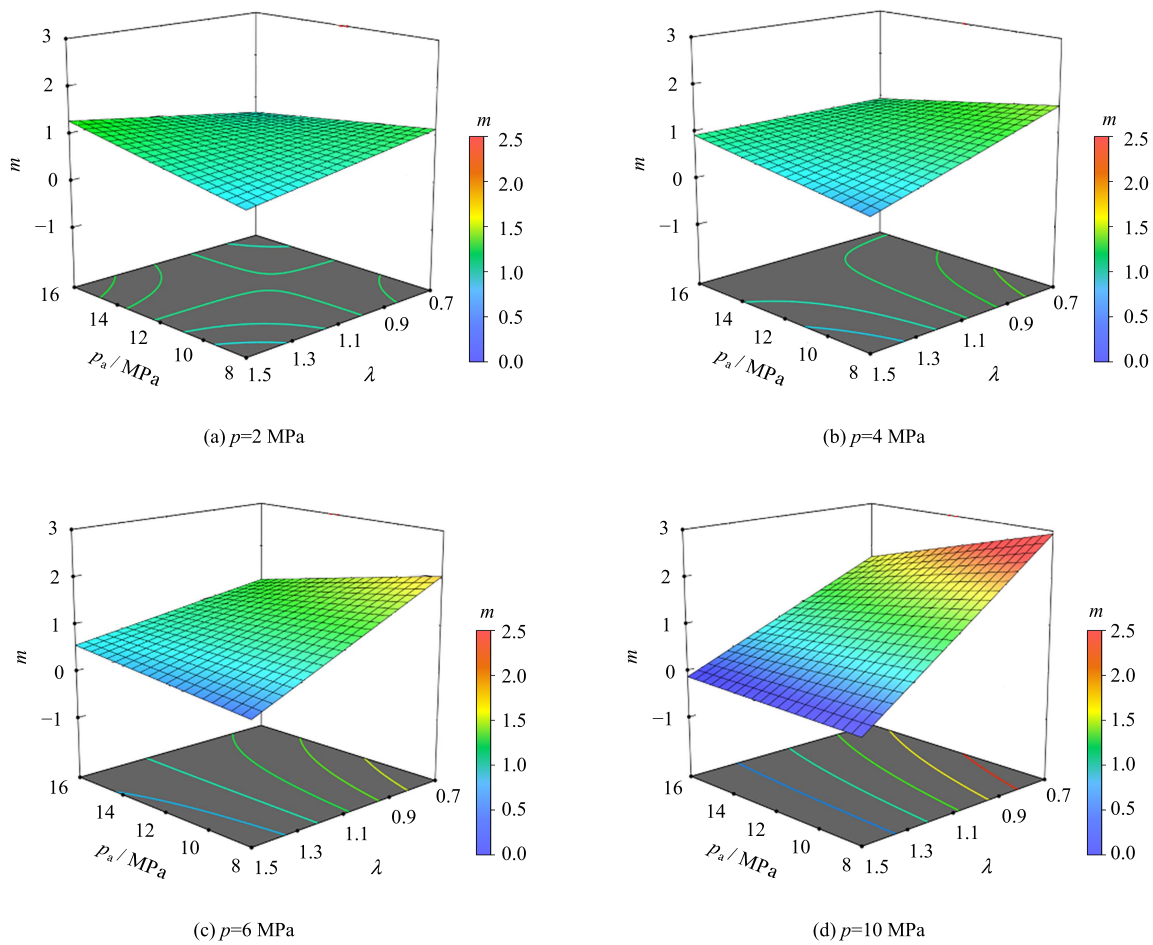


图 12 不同地应力下储气内压和侧压力系数相互作用对最佳轴比的影响
Fig.12 Influence of the interaction between internal pressure of gas storage and lateral pressure coefficient on the optimal axial ratio under different in-situ stresses

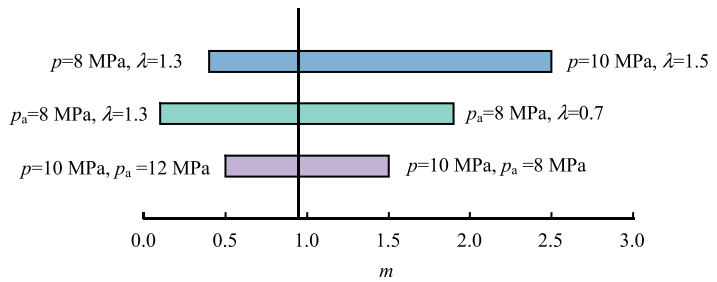


图 13 双因素敏感性分析最佳轴比的龙卷风图
Fig.13 Tornado plot of the optimal axial ratio from two-factor sensitivity analysis

表 2 运行压力区间计算方案
Table 2 Calculation schemes of operating pressure range

数据类型	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / MPa	地应力 / MPa	侧压力系数
基准值	45	1.1	6	1.1
对比方案取值	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65	0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7

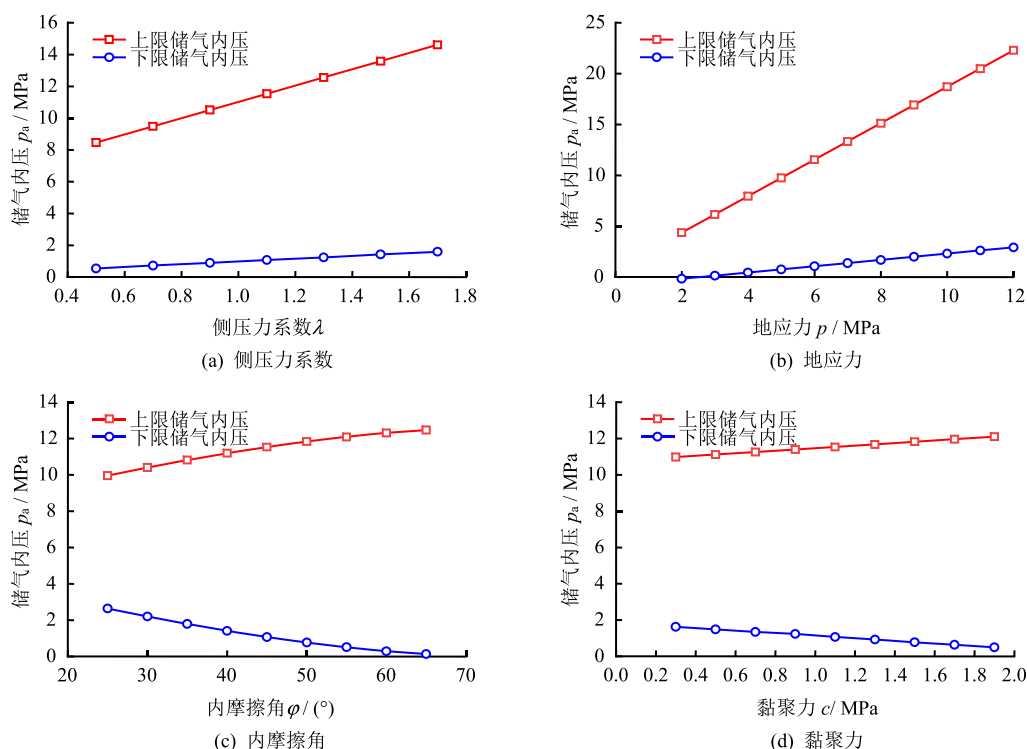


图 14 各因素对储气内压的影响

Fig.14 Influence of various factors on internal pressure of gas storage

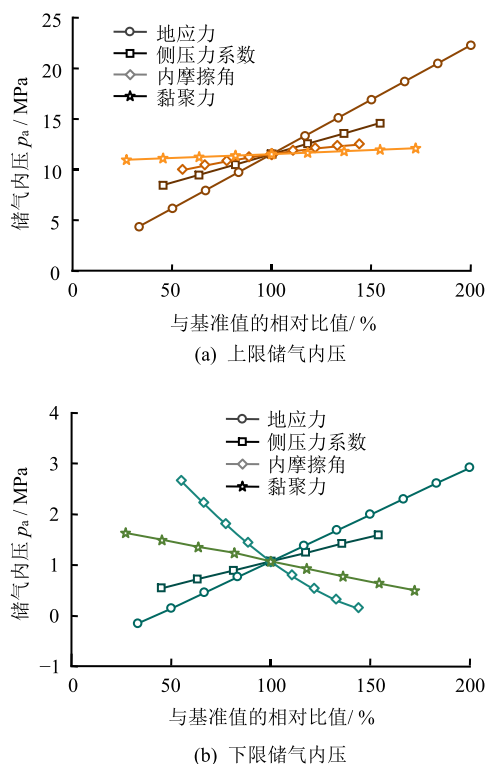


图 15 单因素相对变化时对储气内压影响

Fig.15 Effect of relative variation of single factor on internal pressure of gas storage

4 椭圆形断面储气库最佳轴比确定

前文给出了弹性受力状态下椭圆形断面储气库最佳轴比的表达式, 以及运行压力区间的计算方

法, 并进行了弹性受力状态下的最佳轴比和运行压力区间的参数敏感性分析。结果表明, 围岩变形模量、泊松比对轴比的影响较小, 而地应力、侧压力系数和储气内压均对最佳轴比产生影响。同时, 地应力和侧压力系数也是椭圆形断面储气库在最佳轴比条件下影响上限储气内压的重要因素。在此给出了上限储气内压随着侧压力系数和地应力变化的等值线图, 如图 16 所示。

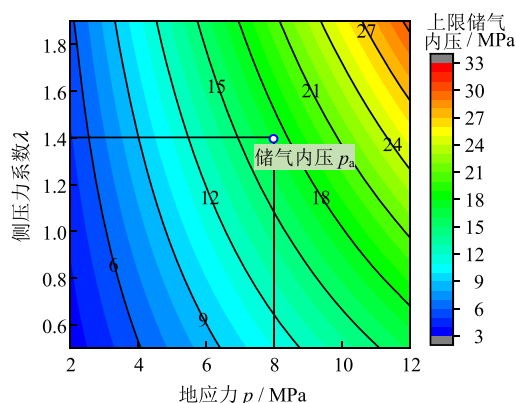


图 16 地应力和侧压力系数对上限储气内压的影响

Fig.16 Influence of in-situ stress and lateral pressure coefficient on the upper limit internal pressure of gas storage

由式 (5) 以及上述的研究结果可知, 椭圆形断面储气库最佳轴比与侧压力系数 λ 、地应力 p 和储

气内压 p_a 有关, 与围岩强度参数无关。根据式 (22) 以及上述的研究结果可知, 椭圆形断面储气库运行压力区间与侧压力系数 λ 、地应力 p 和围岩强度参数关系不大, 因此在已知地应力和侧压力系数条件下, 可以根据式 (22) 计算得到的上限储气内压视为储气内压 p_a , 进而求得椭圆形断面储气库最佳轴比。椭圆形断面储气库最佳轴比计算流程如图 17 所示, 首先获取地应力参数和岩石力学参数 (地应力、侧压力系数、内摩擦角和黏聚力), 进而计算得到保证储气库稳定运行的最大储气内压, 最后计算出使得椭圆形断面硐周受力均匀的最佳轴比。其中, 当侧压力系数 $\lambda=1$ 时, 最佳轴比 $m=1$, 即储气库最佳断面形状为圆形。

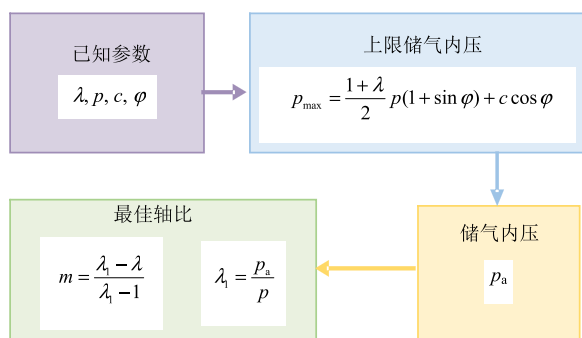


图17 椭圆形断面储气库最佳轴比计算流程

Fig.17 Calculation process of the optimal axial ratio of elliptical section gas storage

以基准工况为例 ($\lambda=1.1$, $p=6$ MPa, $c=1.1$ MPa, $\varphi=45^\circ$), 根据式 (22) 则可计算出上限储气内压 $p_{\max}=11.53$ MPa, 将其视为储气内压 p_a 代入式 (5) 可得到椭圆形断面储气库最佳轴比 $m=0.8915$, 此时硐周环向应力理论值和模拟值如图18所示。

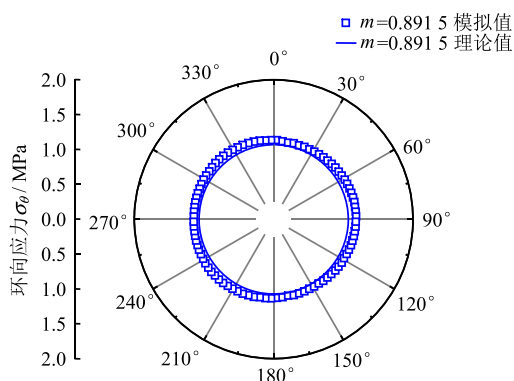


图 18 硐周环向应力理论值和模拟值

Fig.18 Theoretical and simulated values of circumferential stress

需要指出的是, 本文的研究仅从受力的角度探讨了椭圆形断面在力学性能方面具有潜在优越性。但在实际工程中, 相较于圆形储气库断面, 非圆形断面会增大库体表面积, 增加建造成本, 也会降低施工效率。因此, 在实际设计时, 除了受力因素, 还需考虑施工因素和成本因素。

5 结 论

本文从弹性力学角度出发, 针对不等向地应力场中的地下储气库, 提出气密性保障判据和稳定性保障判据, 建立了椭圆形断面储气库最佳轴比及其运行压力区间的确定方法, 并结合 FLAC3D 数值模拟开展了参数敏感性分析, 基于弹性理论推导与数值结果, 探讨各个参数对椭圆形断面轴比及储气库运行压力区间的影响。主要结论如下:

(1) 在不等向地应力条件下, 通过式 (5) 确定储气库硐室断面最佳轴比, 可显著降低硐周环向应力的应力差, 使得硐室周围环向应力受力更均匀。

(2) 在不等向地应力条件下, 椭圆形断面储气库上下限运行压力区间见式 (22), 相对于圆形断面储气库压力运行区间更大; 椭圆形断面储气库按照最佳轴比设计时, 压力运行区间最大。

(3) 地应力、侧压力系数和储气内压是影响椭圆形断面储气库最佳轴比的主要因素; 地应力和侧压力系数是影响椭圆形断面储气库运行压力区间的主要因素。

(4) 将运行压力区间计算方法与最佳轴比方法相结合, 建立了椭圆形断面储气库最佳轴比计算流程, 通过该流程可计算出椭圆形断面储气库的最大储气内压和最佳轴比。

上述结论基于小变形线弹性与均质各向同性围岩假设, 未考虑节理不连续性、各向异性和施工扰动等影响。在后续研究中考虑在最佳轴比与压力区间判据中引入材料各向异性与优势节理裂缝取向对环向应力与储气库运行压力区间的影响, 并考虑岩体结构面对储气库稳定性的控制作用。

参 考 文 献

- [1] 李仲奎, 马芳平, 刘辉. 压气蓄能电站的地下工程问题及应用前景[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 1): 2121-2126.
- LI Zhong-kui, MA Fang-ping, LIU Hui. Underground engineering problems in compressed air energy storage and its developing future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Suppl.1): 2121-

- 2126.
- [2] 徐新桥, 杨春和, 李银平. 国外压气蓄能发电技术及其在湖北应用的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3387-3392.
- XU Xin-qiao, YANG Chun-he, LI Yin-ping. Review on compressed air energy storage abroad and its feasibility application to Hubei province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Suppl.2): 3387-3392.
- [3] 张国华, 王薪锦, 相月, 等. 压缩空气硬岩储库关键问题研究进展: 气密性能、热力过程与稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2601-2626.
- ZHANG Guo-hua, WANG Xin-jin, XIANG Yue, et al. Compressed air energy storage in hard rock caverns: airtight performance, thermomechanical behavior and stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(11): 2601-2626.
- [4] 鲁青云, 徐英俊, 夏才初, 等. 纤维增强柔性混凝土压气储能地下洞室力学响应研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3566-3575.
- LU Qing-yun, XU Ying-jun, XIA Cai-chu, et al. Mechanical response of fiber reinforced flexible concrete for compressed air energy storage underground caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(12): 3566-3575.
- [5] 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(增刊 2): 3633-3650.
- ZHANG Guo-hua, XIANG Yue, WANG Xin-jin, et al. Analytical solution for load sharing in the structure of an underground lined rock cavern for compressed air energy storage and analysis of influencing factors[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(Suppl.2): 3633-3650.
- [6] 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.
- [7] XIANG Y, ZHANG G H, WANG X J, et al. Load-sharing characteristics of lined rock caverns of compressed air energy storage system: a theoretical analysis[J]. **Applied Energy**, 2025, 388: 125626.
- [8] 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.
- [9] BARTON N. Rock mass classification and tunnel rein for cement selection using the *Q*-system[C]//Proceedings of Symposium Rock Classification Systems for Engineering Purposes. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 1988: 59-88.
- [10] KLUGER J M, HAJI M N, SLOCUM A H. The power balancing benefits of wave energy converters in offshore wind-wave farms with energy storage[J]. **Applied Energy**, 2023, 331: 120389.
- [11] FRANGOPOL D M, LEE Y H, WILLAM K. Nonlinear finite element reliability analysis of concrete[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1996, 122(12): 1174-1182.
- [12] 朱合华, 张琦, 章连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1945-1963.
- ZHU He-hua, ZHANG Qi, ZHANG Lian-yang. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(10): 1945-1963.
- [13] 徐军, 郑颖人. 隧道围岩弹塑性随机有限元分析及可靠度计算[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 70-74.
- XU Jun, ZHENG Ying-ren. Elastoplastic stochastic finite element analysis of surrounding rock of tunnel and its application to reliability calculation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(1): 70-74.
- [14] 高红, 郑颖人, 冯夏庭. 岩土材料最大主剪应变破坏准则的推导[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 518-524.
- GAO Hong, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting. Deduction of failure criterion for geomaterials based on maximum principal shear strain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 518-524.
- [15] 马念杰, 李季, 赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 206-213.
- MA Nian-jie, LI Ji, ZHAO Zhi-qiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2015, 44(2): 206-213.
- [16] 易琪, 孙冠华, 姚院峰, 等. 压缩空气储能地下内衬硐库上覆岩体稳定性分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3523-3532.

- YI Qi, SUN Guan-hua, YAO Yuan-feng, et al. Stability analysis of overlying rock mass of lined rockcaverns for compressed air energy storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(12): 3523-3532.
- [17] 孙冠华, 王娇, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站地下内衬砌库基本原理与分析方法研究进展[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 1-25.
- SUN Guan-hua, WANG Jiao, YU Xian-yang, et al. Research progress on basic principles and analysis methods of lined rock caverns for compressed air energy storage station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(1): 1-25.
- [18] 赵大洲, 景来红, 杨维九. 南水北调西线工程深埋长隧洞管片衬砌结构受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3679-3684.
- ZHAO Da-zhou, JING Lai-hong, YANG Wei-jiu. Numerical analysis of segment linings in deep and long tunnels of westroute of south-to-north water transfer project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3679-3684.
- [19] 吕爱钟. 地下洞室最优开挖形状的确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 275-281.
- LÜ Ai-zhong. The method for optimum shapes of tunnels and cavities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1996, 15(3): 275-281.
- [20] 冯紫良. 地下洞室形状设计优化的一个方法[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 30-36.
- FENG Zi-liang. An approach to optimal shape design of underground cavern[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(3): 30-36.
- [21] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1391-1398.
- XIA Cai-chu, ZHANG Ping-yang, ZHOU Shu-wei, et al. Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage cavern[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1391-1398.
- [22] 祝青钰, 周锐. 椭圆孔边任意长度双裂纹复合型应力强度因子复变函数解[J]. 机械强度, 2019, 41(4): 983-987.
- ZHU Qing-yu, ZHOU Rui. The complex function solution of the stress intensity factor for the double-crack composite type at any length on the edge of the elliptical hole[J]. **Journal of Mechanical Strength**, 2019, 41(4): 983-987.
- [23] 尹光志, 刘超, 李铭辉, 等. 椭圆形钻孔应力场解析解及水力压裂特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊 1): 61-73.
- YIN Guang-zhi, LIU Chao, LI Ming-hui, et al. Analytical solution of stress field and hydraulic fracturing characteristics of elliptical borehole[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(Suppl.1): 61-73.
- [24] 孙焕纯, 张巨勇, 严国梅, 等. 弹性平面孔洞形状优化复变函数方法[J]. 应用数学和力学, 1978, 8(2): 133-141.
- SUN Huan-chun, ZHANG Ju-yong, YAN Guo-mei, et al. Complex variable function method for hole shape optimization in anelastic plane[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 1978, 8(2): 133-141.
- [25] DENG B Z, YIN G Z, LI M H, et al. Feature of fractures induced by hydro-fracturing treatment using water and L-CO₂ as fracturing fluids in laboratory experiments[J]. **Fuel**, 2018, 226: 35-46.
- [26] HOU P, GAO F, GAO Y N, et al. Changes in breakdown pressure and fracture morphology of sandstone induced by nitrogen gas fracturing with different pore pressure distributions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2018, 109: 84-90.
- [27] 刘晓红, 刘正夫, 李鹏. 基于极限分析下限理论的压气储能洞室应力研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2019, 32(4): 15-20.
- LIU Xiao-hong, LIU Zheng-fu, LI Peng. Stress study of pressurized energy storage cavern based on lower bound limit analysis theory[J]. **Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences)**, 2019, 32(4): 15-20.
- [28] 刘力源, 张乐, 纪洪广. 深部地下洞室与应力场轴变关系及其围岩损伤破裂分析[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 516-525.
- LIU Li-yuan, ZHANG Le, JI Hong-guang. Mechanism analysis of rock damage and failure based on the relation between deep chamber axial variation and in situ stress fields[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2022, 44(4): 516-525.
- [29] 宋朝阳, 纪洪广, 孙利辉. 高地应力深立井井筒围岩应力演化与变形规律及支护分析[J]. 煤炭工程, 2016, 48(10): 45-48.
- SONG Chao-yang, JI Hong-guang, SUN Li-hui. Evolution of surrounding rock of deep vertical shaft in highly stress and reinforcement mechanism[J]. **Coal Engineering**, 2016, 48(10): 45-48.