

DOI: 10.11779/CJGE20230337

地下水对 CAES 地下储气库气密性和围岩稳定性影响

万发^{1,3}, 蒋中明^{*1,2}, 廖峻慧¹, 李海峰³

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 珠江委水利科学研究院, 广东 广州 510000)

摘要: 压缩空气储能 (CAES) 储气库密封和稳定是保证电站安全稳定运行的基础, 储气库受力影响因素众多, 且特性复杂, 长期运行过程中气密性和稳定性的精准预测和评估一直是热点和难点。以考虑渗漏和传热过程的压缩空气热力学模型为非稳态边界、以热流固耦合理论为核心建立了储气库多物理场耦合下气密性和稳定性联合分析模型, 探讨了洞周围岩中的地下水对储气库气密性和稳定性的影响。研究成果表明: ①地下水的存在可使储气库每个循环气体损失量降低 78%; ②衬砌结构主要受拉应力作用, 顶部和底部出现了应力集中现象, 需进行加密配筋; ③岩体中存在地下水有助于强化储气库内的气体密封效果。

关键词: 压缩空气储能; 热流固耦合; 非稳态边界; 应力应变; 两相流

中图分类号: TU43; TU9

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)09-1899-10

作者简介: 万发(1991—), 男, 博士, 主要从事压缩空气储能技术相关研究。E-mail: wfwanfa123@163.com。

Influences of groundwater on air tightness and surrounding rock stability of CAES underground gas reservoir

WAN Fa^{1,3}, JIANG Zhongming^{1,2}, LIAO Junhui¹, LI Haifeng³

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The tightness and stability of compressed air energy storage (CAES) gas reservoir is the basis to ensure the safe operation of power station. There are many factors affecting the mechanics of gas reservoir and its mechanics characteristics are complex. The accurate prediction and evaluation of reliability and stability in the long-term operation process has always been an important topic. Based on the thermodynamic model for compressed air considering the leakage and heat transfer process as the unsteady boundary and the theory of thermo-hydro-mechanical coupling as the core, a joint analysis model for gas storage is established under the coupling of multiple physical fields. The influences of groundwater in the rocks around the cave on the air tightness and stability of gas storage are studied. The results show that: (1) The existence of groundwater can reduce the gas loss per cycle in gas storage by 78%. (2) The lining structure is mainly subjected to tensile stress, and the stress concentration appears at the top and bottom, where more steel bars is suggested to be configured. (3) The existence of groundwater in rock mass is helpful to strengthen the gas sealing effects in gas storage.

Key words: compressed air energy storage; thermo-hydro-mechanical coupling; unsteady boundary; stress-strain; two-phase seepage

0 引言

根据国家“十四五”规划中对能源体系的发展计划, 至 2025 年非化石能源使用占比提升至 20%, 需建设一批风电、光电、水电等清洁能源基地, 同时加快抽水蓄能电站和新型储能技术规模化应用^[1]。压缩空气储能技术 (compress air energy storage, 简称 CAES) 是新型的大型能源存储技术, 采用压缩空气

作为工质对能量进行存储和释放, 具备改善电力品质、提高电力系统稳定可靠性以及效率高, 布置灵活、投资和运行费用较少等优点, 一直是国内外研究热点^[2]。

1969 年世界上第一个商业大型 CAES 电站在德国

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178381, 51778070)

收稿日期: 2023-04-18

*通信作者 (E-mail: zzmjjiang@163.com)

Huntorf 诞生^[3], 20 世纪 70 年代美国能源部开始对 CAES 电站进行示范性工程计划, 该计划关注的两个主要问题为: ①CAES 长期运行过程储层稳定性标准; ②尽量少用或不用化石燃料补充燃烧的 CAES 系统可行性^[4]。直至目前 CAES 的研究的出发点依旧是紧密围绕 CAES 电站的安全可靠性和经济性这两个关键问题, 针对经济性的研究主要围绕压缩热量处理^[5-6], 压缩空气热力学过程^[7-10]、能量计算^[11-12], 系统设计及能量利用效率计算^[13-14]等。针对安全可靠性的研究主要围绕地下储气库稳定性这一问题展开, 其研究成果远少于经济性研究成果。

CAES 电站地下储气库深处地下, 本身受力影响因素众多, 受力特性复杂, 再加上空气在储气库中频繁循环压缩和释放, 造成压力和温度载荷的频繁循环变化, 使长期运行过程中地下储气库可靠性和稳定性的精准预测和评估成为难点。目前多数学者的研究成果均存在较大局限性, 如 Carranza-torres 等^[15]采用解析解和有限差分两种方法研究了浅埋圆形洞室的地质稳定性; Kim 等^[16]采用极限平衡法探究了储气库设计参数对地面隆起的影响; 夏才初等^[17]采用数值模拟方法分析了衬砌围岩受力特性。然而以上研究过程中并未对温度这一关键物理因素对储气库受力影响进行考虑。蒋中明等^[18]、周舒威等^[19-20]、夏才初等^[21]对温度的影响进行考虑, 采用热力耦合理论分别采用 FLAC3D、解析解和 COMSOL 研究了储气库衬砌围岩的受力特性, 但忽略了运行过程中气体渗漏对稳定性的影响。周瑜等^[22]则考虑了储气库的渗漏问题, 但忽略了温度的作用。目前仅有 Kim 等^[23]、Rutqvist 等^[24]采用 TOUGH-FLAC 对储气库衬砌围岩进行了热流固耦合 (thermo-hydro-mechanical, 简称 THM) 研究。

以上研究成果虽有进步性, 然而对多物理场耦合过程考虑的还不够全面, 尤其针对有无地下水两种情况下储气库气密性和稳定性的研究仍需进一步深入。为探究地下水对 CAES 硬岩地下储气库运行过程中的气密性和稳定性影响, 本文基于压缩空气热力学、热流固耦合理论和两相渗流理论, 分别建立了非稳态边界条件下衬砌围岩单相和两相 THM 耦合数值模型, 对比分析了地下水对 CAES 电站运行过程中储气库稳定性的影响, 为此类工程的选址、设计、建设和运行提供科学依据。

1 孔隙介质多物理场耦合理论和数值实现方法

当 CAES 电站选址位置无地下水或者地下水位较低时, 运行过程中储气库不受地下水影响, 考虑气体渗漏过程和压缩空气的温度变化和洞壁传热过程时,

储气库衬砌围岩的受力特性可采用单相 THM 耦合理论进行描述。

1.1 单相 THM 耦合理论

基于线性热弹性假设, 在考虑渗流耦合作用和温度应力作用下时, 总应变为应力导致的应变、渗流压力导致的应变和热应变之和, 固体总应变控制方程^[25]表示如下:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_v - \beta_1\delta_{ij}(T_s - T_{s0}) + \alpha\delta_{ij}(p - p_0) \quad (1)$$

式中: $G = E / 2(1 + \nu)$; $\lambda = 2\nu G / (1 - 2\nu)$; $\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2$; $\beta_1 = \alpha_T E / (1 - 2\nu)$ 。其中: σ_{ij} 为应力二阶张量分量 (Pa); G 为岩石剪切模量 (Pa); ε_{ij} 为应变张量的分量; E 为岩石弹性模量 (Pa); ν 为泊松比; λ 为拉梅系数 (Pa); δ_{ij} 为 Kronecker 符号, 当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$, 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$; ε_v 为体积应变; β_1 为热膨胀因子; α_T 为热膨胀系数 (K^{-1}); T_s 为固体温度 (K); T_{s0} 为固体初始温度 (K); α 为有效应力系数, 无量纲; p 为孔隙渗流压力 (Pa); p_0 为初始孔隙压力 (Pa); u_i 和 u_j 为分别为位移在 i 和 j 方向上的分量。

不考虑衬砌结构的配筋和损伤破坏, 将其视作理想弹性材料, 围岩屈服准则采用莫尔库仑模型:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c \cos \varphi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \quad (2)$$

式中: σ_1 , σ_3 分别为第一、三主应力 (N/m^2); c 为黏聚力 (MPa); φ 为内摩擦角 ($^\circ$)。

孔隙内流体流动满足达西定理, 同时考虑固体流体应力变形和温度膨胀过程, 热流固耦合作用下渗流方程如下:

$$\frac{\theta}{\beta_1} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{\mu_g} (\nabla p + \rho_f g) - \alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + (\theta \alpha_1 + (1 - \theta) \alpha_s) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中: θ 为孔隙介质孔隙率; β_1 为流体体积模量 (Pa); K 为多孔基质渗透率 (m^2); μ_g 为气体动力黏度 ($Pa \cdot s$); ρ_f 为流体密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 (m/s^2); α_1 和 α_s 分别为流体和固体组分热膨胀系数 (K^{-1}); T 为温度 (K)。

其中考虑体积变形和热膨胀作用时多孔介质孔隙率和渗透率的变化如下所示^[26]:

$$\theta = 1 - \frac{(1 - \theta_0)}{1 + \varepsilon_v} \left(1 - \frac{\Delta p}{K_s} + \alpha_s \Delta T \right) \quad (4)$$

$$K = K_0 (\theta / \theta_0)^3 \quad (5)$$

气体在多孔介质中的流动, 在温度差异下产生对流传热和传导传热过程, 此处采用局部热平衡假设, 假设多孔基质和孔隙内气体温度在极短时间内达到热平衡状态, 此时的多孔基质内传热控制方程如下所示:

$$(\theta_s \rho_s C_{sp} + (1 - \theta_s) \rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} + \theta_s K' \alpha_T T_0 \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} +$$

$$\rho C_p u_g \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\theta_s k_s + (1 - \theta_s) k) \nabla T = Q \quad (6)$$

式中: θ_s 为多孔介质内基质体积分数; ρ_s 为基质材料密度 (kg/m^3); C_{sp} 为基质材料恒压热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$); C_p 为气体恒压热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$); ∇T 为温度梯度 (K/m); k_s 为固体基质导热率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); k 为气体导热率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); Q 为热源 ($\text{J}/(\text{m}^3\text{s})$)。

1.2 两相 THM 耦合理论

当储气库处于地下水影响范围内时, 整个物理过程为两相热流固耦合过程, 其中固体力学理论和耦合理论如上一节基本相同, 但式 (1) 中的孔隙压力为气相和液相的平均压力; 气体渗流过程由单相渗流变为气液两相渗流, 根据达西定律和毛管力驱动可得其控制方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\theta}{\beta_1} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-K \left(s_1 \frac{k_{r1}}{\mu_1} + s_2 \frac{k_{r2}}{\mu_2} \right) (\nabla p + (s_1 \rho_1 + s_2 \rho_2) g) \right] \\ = -\alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + (\theta \alpha_1 + (1 - \theta) \alpha_s) \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial(\theta c_1)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-K \left(s_1 \frac{k_{r1}}{\mu_1} + s_2 \frac{k_{r2}}{\mu_2} \right) \nabla p \cdot c_1 \right] \\ = \nabla \cdot \left[\frac{k_{r1}}{\mu_1} k (s_1 - 1) \frac{\partial p_{ec}}{\partial s_1} \cdot \nabla c_1 \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, $\beta_1 = s_1 \times \beta_w + s_2 \times \beta_g$, $c_1 = s_1 \rho_1 k_{r1} = s_1^{l_{vg}} (1 - (1 - s_1^{1/m_{vg}})^{m_{vg}})^2$, $k_{r2} = (1 - s_1)^{l_{vg}} (1 - s_1^{1/m_{vg}})^{2m_{vg}}$ 。

式中: s_1 和 s_2 分别为湿润相和非湿润相体积分数; β_w 和 β_g 分别为液体和气体体积模量 (Pa); ρ_1 和 ρ_2 分别为湿润相和非湿润相流体密度 (kg/m^3); k_{r1} 和 k_{r2} 分别为湿润相和非湿润相流体相对渗透率; l_{vg} 和 m_{vg} 分别为模型参数; c_1 为湿润相流体在孔隙中含量 (kg/m^3)。

采用局部热平衡假设, 且根据体积平均理论, 多孔基质内两相流体传热控制方程如下所示:

$$(\theta_s \rho_s C_{sp} + (1 - \theta_s) \rho C_{p_{ef}}) \frac{\partial T}{\partial t} + \theta_s K' \alpha_T T_0 \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \rho C_{p_{ef}} u \nabla T - \nabla \cdot (\theta_s k_s + (1 - \theta_s) k_{ef}) \nabla T = Q \quad (8)$$

式中: θ_s 为多孔介质内基质体积分数; $C_{p_{ef}}$ 为流体有效比热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), $C_{p_{ef}} = s_1 \cdot C_{p1} + s_2 \cdot C_{p2}$, C_{p1} 和 C_{p2} 分别为流体相 1 和 2 的比热容; k_{ef} 为流体有效导热率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), $k_{ef} = s_1 \cdot k_1 + s_2 \cdot k_2$, k_1 和 k_2 分别为流体相 1 和 2 的导热系数。

1.3 储气库 THM 耦合动态边界模型

关于 CAES 电站运行过程中储气库内压缩空气热力学模型, He 等^[27]做出了相当有益的工作, 本部分内容在其研究结果上进行了细化推导和演化, 增加了渗漏项。考虑洞壁传热和气体渗漏过程的压缩空气热

力学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} dm/dt = m_{in} - m_{out} - m_e \\ m_e = \oint u \rho_g D ds \\ dT/dt = (\dot{Q} + m_{in} Cp(T_{in} - T) + V dp/dt) / m Cp \\ dp/dt = 1/V [\kappa R m_{in} T_{in} - \kappa R m_{out} T - \kappa R m_e T + (\kappa - 1) h_c A (T_w - T)] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: m 为储气库内压缩空气质量 (kg); m_{in} 和 m_{out} 分别为充放气速率 (kg/s); m_e 为储气库整体渗流渗透速率 (kg/s); D 为圆柱形储气库长度 (m); s 为圆柱形储气库横断面周长 (m); V 为储气库容积 (m^3); T_{in} 为充气温度 (K); R 为气体常数, 取值 $287.06 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$; κ 为绝热指数; h_c 为储气库洞壁对流换热系数, ($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$); A 为洞壁的对流换热面积 (m^2); T_w 为储气库洞壁温度 (K)。

数值实现时, 储气库压缩空气实时变化的压力作为应力和压力边界作用在洞室内壁边界上; 压缩空气实时变化的温度则作为热传导分析的边界作用在洞壁表面。

1.4 THM 耦合数值分析流程

由于渗流速度 u 和储气库洞壁温度 T_w 受到压缩空气压力 p 和温度 T 影响, 以 COMSOL 数学全局 ODE (ordinary differential equation) 来建立压缩空气热力学模型, 将耦合时变渗漏和洞壁传热的空气温度 T 压力 p 作为储气库洞室内壁非稳态边界。流场采用弱形式 PDE (partial differential equation) 在达西定律与两相达西模块进行二次开发建模。耦合数值分析模型计算流程如图 1 所示。

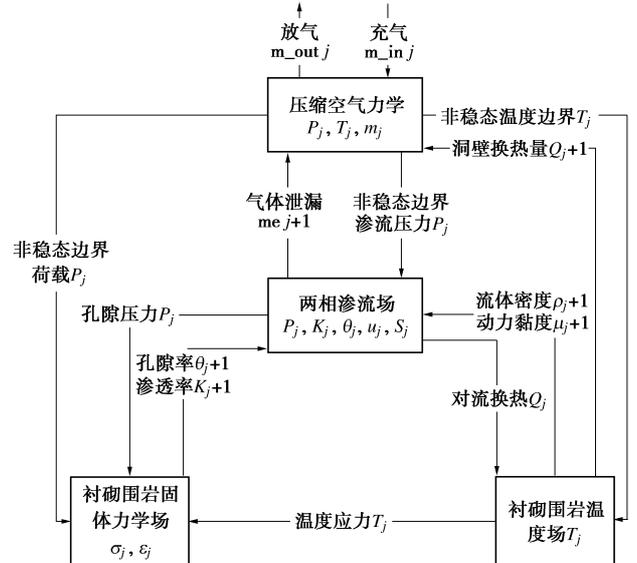


图 1 储气库衬砌围岩两相热流固耦合模型计算流程
Fig. 1 Calculation flow of two-phase THM coupling model for lining and surrounding rock of gas reservoir

1.5 模型及程序验证

为验证热流固模型的正确性，本文采用经典的一维饱和土柱弹性热固结问题进行验证，该问题前后经过 Noorisha 等^[28]、孙致学等^[25]学者的验证。利用 COMSOL 建立该热流固耦合数值模型并求解，模型高为 7 m，宽 1 m。模型初始孔隙水压力为 10 kPa，模型初始温度为 10℃，土柱顶部向下施加 10 kPa 均布载荷，同时受 60℃ 温度作用，且为自由渗流边界。模型左右边界和底部的力学边界为法向约束，热学边界为绝热边界，渗流边界为不透水边界。模型及网格如图 2 所示，模型参数如文献^[25]。

热固结数值模型计算所得到的沉降位移、渗流压力、温度验证结果分别如图 3~5 所示，由图可知，本模型与数值解所得出结果在数值和规律上一致性较好，位移曲线先下降，最后开始上升，其过程代表含义为孔隙水排除后，孔隙压力消散，有效应力增加，位移增加，当孔隙水排净后，温度传递导致的膨胀作用导致位移向上。从位移、压力和温度对比可表明该数值模型的正确性。

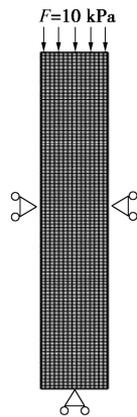


图 2 热固结验证模型

Fig. 2 Verification model of thermal consolidation

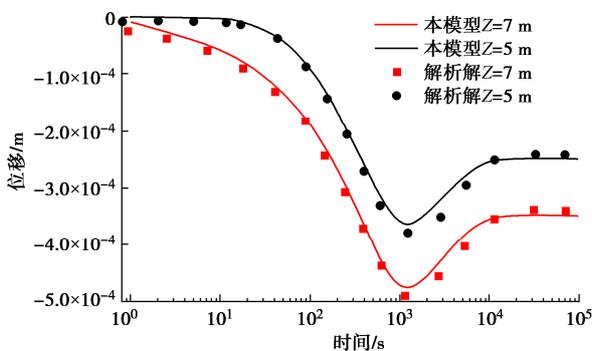


图 3 不同高度沉降位移验证结果

Fig. 3 Verification results of displacement at different heights

2 算例研究

以某拟建地下硬岩 CAES 储气库为例，建立其横

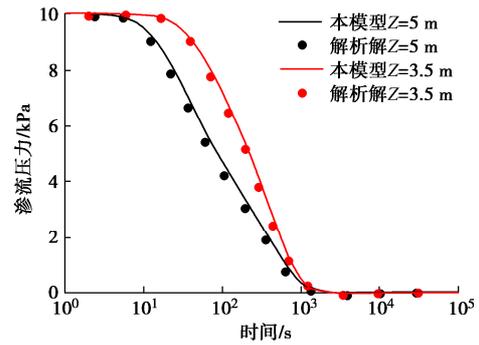


图 4 不同高度渗流压力验证结果

Fig. 4 Verification results of seepage pressure at different heights

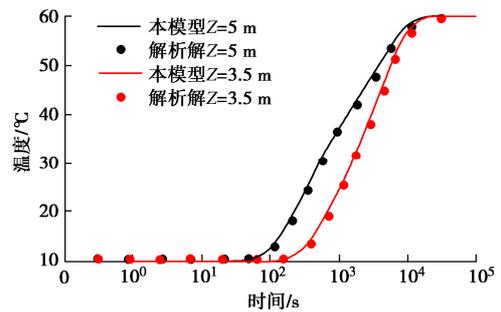


图 5 不同高度温度验证结果

Fig. 5 Verification results of temperature at different heights

断面二维数值模型，图 6 为地下储气库模型及边界设置，储气库为圆柱形横向布置，半径 7.5 m，洞室长度 300 m，衬砌密封层采用低渗混凝土，厚度为 0.5 m，洞室埋深 250 m，围岩为花岗岩。假定地下水位在地平面位置。模型采用二维轴对称模型进行建模，为尽量减弱边界尺寸对计算结果的影响，围岩研究范围定为 500 m。

电站运行以 1 d 为一个周期，分别为充气（8 h）—高压储气（4 h）—放气（4 h）—低压储气（8 h）。入气温度为 15℃，储气库的运行压力上下限为 7~10 MPa。充放气速率调整结果为初始阶段以 50.3 kg/s 的充气速率充气 24 h，正式运行时充气速率为 47.5 kg/s，放气速率为 95 kg/s。

依照 Kim 等^[23]、Rutqvist 等^[24]提出的地下水两相 THM 模型计算流程，模型计算流程分 4 步：①初始自重应力平衡过程计算，清除初始自重位移。②地下储气库的开挖过程计算，计算开挖排水之后 7 d 的储气库位移变形和围岩内孔压变化。③计算衬砌施工后 1 d 内的衬砌围岩的变形位移和孔压变化。④计算包括初始充气阶段在内的 60 个运行循环过程中的压缩空气热力学过程和储气库两相 THM 耦合过程。

模型左侧为对称边界，对力学模型底部为固定约束、右边为法向约束、顶部为自由面；对渗流模型底部、右侧和顶部均为随埋深变化的常压和水相饱和度

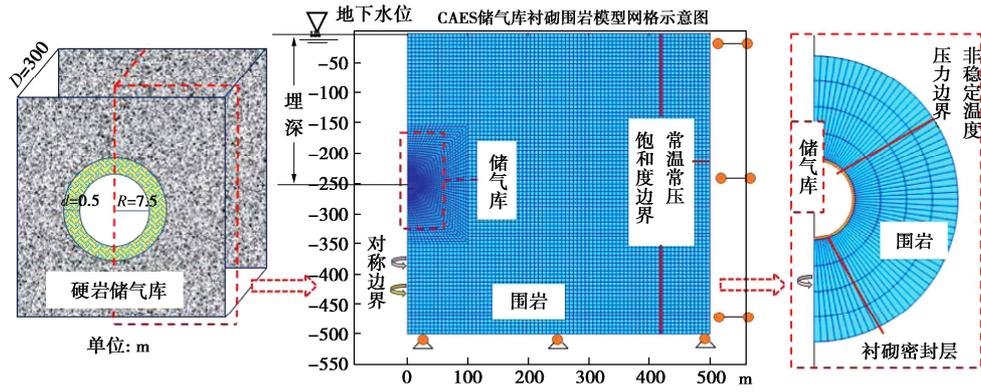


图 6 CAES 储气库数值模型及边界示意图

Fig.6 Numerical model and boundary diagram of CAES gas reservoir

表 1 计算参数取值表

Table 1 Values of calculation parameters

参数	值/单位	参数	值/单位	参数	值/单位	参数	值/单位
储气库半径 r	7.5 m	两相流参数 l_{vg}	0.5	围岩初始孔隙率 θ_{r0}	0.02	衬砌恒压热容 C_{pc}	880 J/(kgK)
储气库长度 D	300 m	两相流参数 m_{vg}	0.595	围岩恒压热容 C_{pr}	930 J/(kg K)	衬砌导热率 λ_c	2 W/(m·K)
衬砌密封层厚度 d	0.5 m	围岩弹性模量 E_r	20 GPa	围岩导热率 λ_r	1.8 W/(m·K)	围岩热膨胀系数	$5.0 \times 10^{-5} 1/K$
初始压力 P_0	1 atm	衬砌弹性模量 E_c	23 GPa	衬砌热膨胀系数	$1.2 \times 10^{-5} 1/K$	围岩内摩擦角	50°
初始温度 T_0	15 °C	围岩密度 ρ_r	2650 kg/m ³	衬砌初始孔隙率 θ_{c0}	0.01	围岩泊松比 ν_r	0.18
充气温度 T_{in}	15 °C	衬砌密度 ρ_c	2300 kg/m ³	衬砌初始渗透率 K_{c0}	$1 \times 10^{-20} m^2$	衬砌泊松比 ν_c	0.2
毛细入口压力 p_{ec}	1.47 MPa			围岩初始渗透率 K_{r0}	$2 \times 10^{-16} m^2$	围岩黏聚力 c	2 MPa

边界, 对传热模型底部、右侧和顶部为常温边界。计算相关参数如表 1 所示。

3 计算成果及分析

3.1 储气库压缩空气热力学过程变化

压缩空气热力学特性变化过程如图 7 所示, 由图可知, 第一个充气阶段, 压缩空气温度和压力随时间迅速升高, 空气压力随时间线性升高, 在 24 h 迅速上升至 10 MPa, 温度先迅速升高后缓慢升高至 415 K。压缩空气的温度和压力在放气过程中迅速降低, 随后的运行循环中, 空气温度会波动降低, 稳定时的温度波动上下限 279~314 K, 波动范围 35 K。

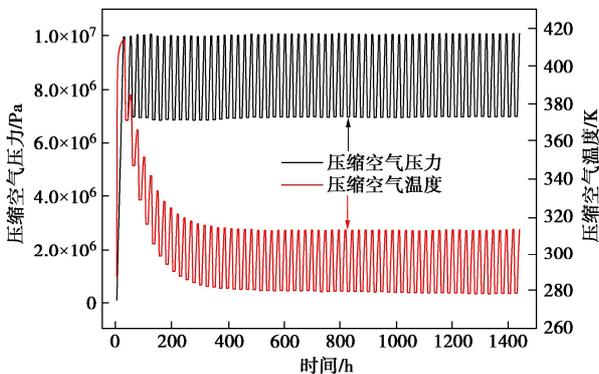


图 7 压缩空气热力学特性变化过程

Fig. 7 Variation of thermodynamic characteristics of compressed air

3.2 地下水对储气库密封性影响

密封性以储气库内气体质量为对象, 储气库渗透率以储气库气体减少为负, 增加为正。两种模型储气库 60 个运行循环整体渗透速率变化过程如图 8 所示, 有无地下水两种地质条件下的储气库渗透速率对运行过程周期性波动变化。由于空气压力的动态变化, 初始时衬砌和围岩内渗流压力较低, 但是储气库内气体压力迅速升高, 因此初始循环时气体渗透最快。随着渗流压力扩散, 衬砌和围岩内渗流压力升高, 此时渗透速率逐步降低, 最后形成稳定波动。单相 THM 模型渗透速率稳定时波动范围为-0.034~0.0165 kg/s, 两相 THM 模型渗透速率稳定波动范围为-0.0135~0.011 kg/s。值得注意的是, 在放气阶段, 气体渗透为正, 即气体在放气阶段由衬砌围岩向储气库内渗流, 原因为放气阶段由于气体压力迅速降低 3 MPa, 衬砌结构内渗流压力的变化存在滞后性, 其压力高于储气库内气体压力, 此时渗流方向向内。

储气库每个循环气体渗透质量变化规律如图 9 所示, 每个循环气体渗透质量变化规律随循环过程总体成减小并稳定的趋势。单相 THM 模型在第 4 个循环是渗透质量达到稳定, 稳定时每个循环气体质量损失为 440 kg, 两相 THM 模型在 10 个循环时达到稳定, 稳定时每个循环气体损失为 95 kg。该储气库稳定运行时充气速率 47.5 kg/s, 充气时间 8 h, 每个循环充气质

量为 1.37×10^6 kg, 单相 THM 模型每个循环气体渗漏质量占充气质量 0.032%, 两相 THM 模型每个循环气体渗漏质量占充气质量 0.007%。两个模型稳定运行时每个循环气体损失均小于 1%, 表明当衬砌密封层渗透率为 $1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 考虑其受力过程产生的应变而导致渗透率变化, 该衬砌密封层密封效果符合要求。且地下水存在时, 会导致气体质量损失降低 78%, 地下水可有效辅助密封。

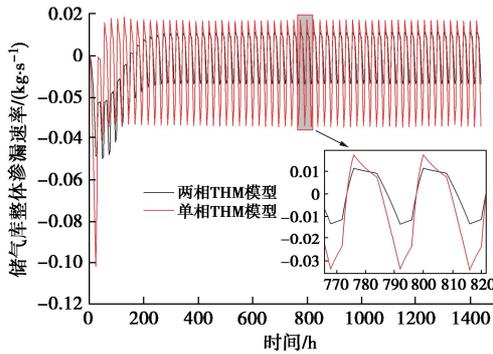


图 8 两种模型储气库整体渗漏速率变化规律

Fig. 8 Variation of overall leakage rate of two models for gas reservoir

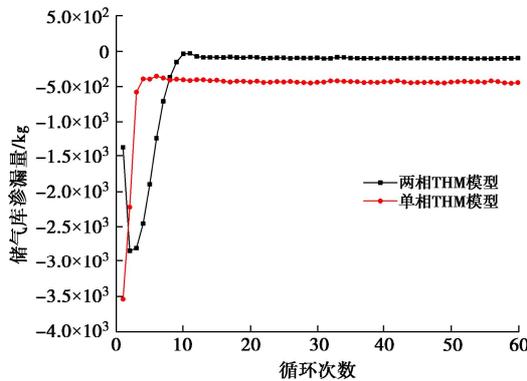
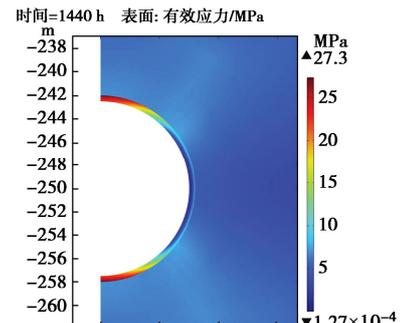


图 9 储气库每个循环气体渗漏质量随运行过程变化规律

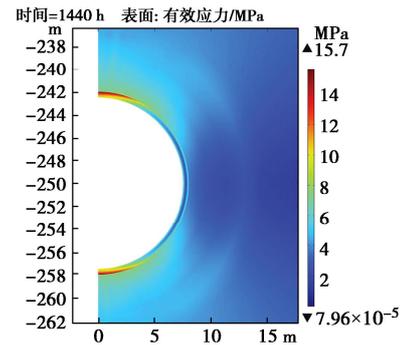
Fig. 9 Variation of gas leakage quality in each cycle of gas reservoir with operation process

3.3 地下水对储气库结构受力特性影响

储气库衬砌围岩结构的受力状态决定了储气库的安全稳定性, 两种模型在稳定运行过程充气段末衬砌和围岩有效应力分布如图 10 所示, 由图可知, 当衬砌结构强度高于围岩时, 衬砌结构受力高于围岩, 是主要受力结构, 衬砌顶部和底部会出现应力集中现象, 单相 THM 模型充气段末衬砌最大有效应力为 27.3 MPa, 而两相 THM 模型衬砌最大有效应力为 15.7 MPa。当储气库地层中有地下水作用时, 衬砌结构顶部和顶部的集中有效应力会有较大幅度降低, 充气段末的最大应力降低幅度为 42.5%。



(a) 单相THM

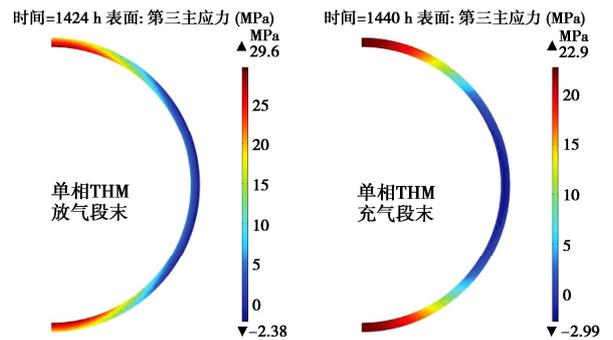


(b) 两相THM

图 10 充气段末衬砌和围岩受力分布云图

Fig. 10 Stress distribution of lining and surrounding rock at end of charging stage

分析衬砌密封层结构的主要受力形态和可能发生的破坏形式, 有助于对储气库结构的安全稳定性做出准确评估。此处第三、第一主应力按照岩土力学规定进行划分。储气库衬砌结构第 60 循环充气 and 放气段末第三、第一主应力分布如图 11 所示, 由图 11 可知, ①放气段末衬砌结构第三主应力高于充气段末, 即放气段结构失稳危险程度高于充气段; ②衬砌结构在充气 and 放气阶段第三主应力大范围表现为正, 即衬砌结构大范围承受拉应力, 拉应力较高位置为顶部和底部, 侧壁位置第三主应力为负, 表现为压应力; ③两相 THM 模型衬砌结构充放气段第三、第一主应力均小于单相 THM 模型, 即有地下水时, 衬砌结构最大拉应力可以降低 52%。



(a)

(b)

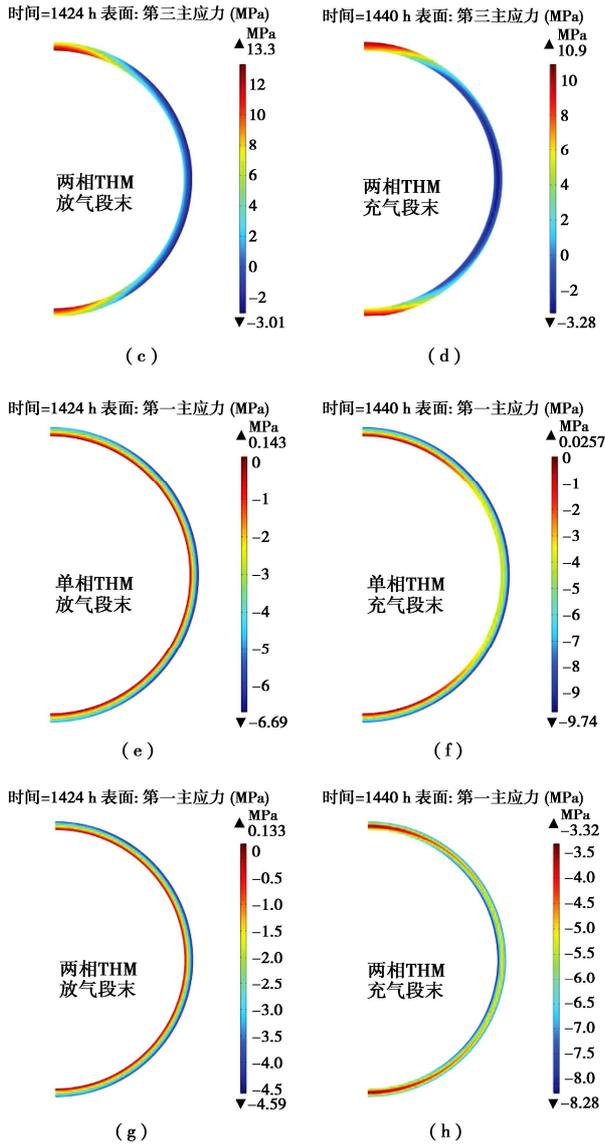


图 11 典型运行阶段末两种模型衬砌第三和第一主应力分布
Fig. 11 Distribution of first and third principal stresses of lining structures of two models at end of typical operation stage

为消除开挖和施工变形位移差异对衬砌结构最终变形位移结果的影响,以运行初期为参照对两种模型衬砌结构典型位置测点位移变化进行研究,其规律如图 12 所示。衬砌径向位移随空气压力升高迅速变大,然后随充放气状态起伏波动,稳定运行时径向位移波动范围为 1.5 mm。洞室侧壁水平位移大于顶部竖向位移,即运行过程中储气库横向膨胀变形大于纵向,整体变形成椭圆形膨胀。单相 THM 模型侧壁水平位移和顶部竖向位移分别比两相 THM 模型大 0.8 mm 和 0.4 mm。

衬砌典型测点环向应变变化规律如图 13 所示,衬砌结构顶部应变大于侧壁,该规律与 Kim 等^[29]研究成果相一致。衬砌顶部环向应变为拉应变,侧壁环向应变状态随充放气变化,充气时为拉应变,放气时为压

应变。单相 THM 模型衬砌测点环向应变均大于两相 THM 模型,单相 THM 模型衬砌最大环向应变为 0.0011,该应变结果与相似工况下的夏才初等^[17]的研究成果相类似,而两相 THM 模型最大为 0.0006。可知地下水可有效降低衬砌顶部拉应变。

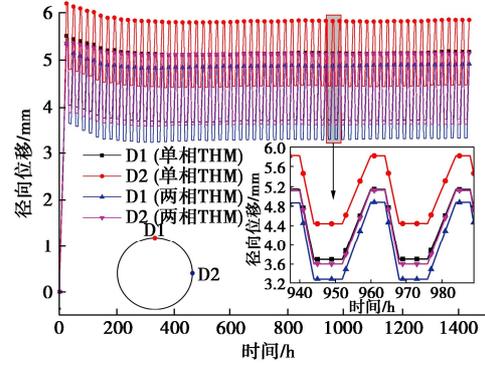


图 12 衬砌测点径向位移变化规律

Fig. 12 Variation of radial displacement of monitoring points for lining

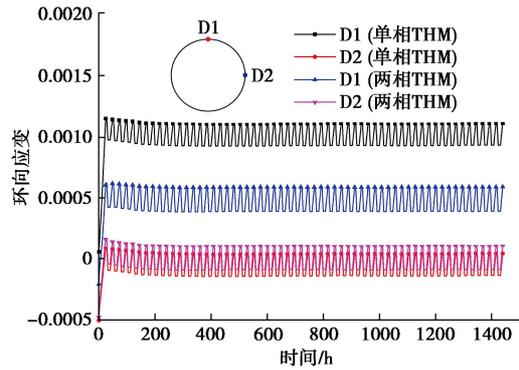


图 13 衬砌测点环向应变变化规律

Fig. 13 Variation of circumferential strain at different measuring points for lining

储气库运行过程中围岩塑性区面积变化和分布规律如图 14 所示。储气库围岩塑性区为剪切塑性区,稳定运行时两相 THM 模型围岩塑性区成环形分布于洞室周围,而单相 THM 模型围岩塑性区成矩形分布于洞室周围,在洞室顶部和底部向围岩中延伸,最远可达围岩内部 20 m。开挖围岩塑性区集中于洞室腰部围岩内,随着运行过程增加,洞室顶部和底部围岩有效应力增加,塑性区逐渐向顶部和底部围岩中发展。初始运行时单相 THM 模型塑性区面积为 332 m²,随后的两个循环中急速增长,之后缓慢增长至第 10 个循环时达到稳定,稳定时围岩塑性区面积为 1337 m²。初始运行时两相 THM 模型塑性区面积为 248 m²,在第 3 个循环时达到稳定,稳定时塑性区面积为 356 m²。地下水可以有效降低运行过程中围岩塑性区分布。根据此项结果,围岩在施工过程中需要进行加固处理,

在没有地下水影响时需对洞室顶部、底部深部区域进行加固处理。

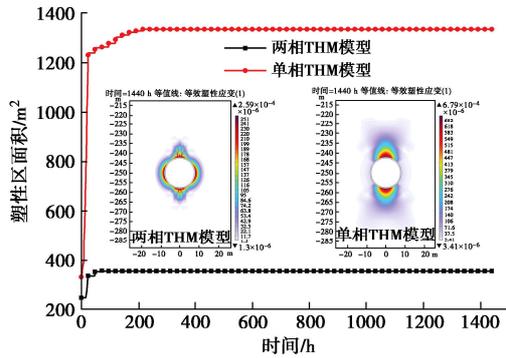


图 14 围岩塑性区面积随时间变化及分布规律

Fig. 14 Variation and distribution laws of plastic zone area of surrounding rock with time

3.4 讨论

储气库 THM 耦合模型结果和两相 THM 耦合模型结果对比如表 2 所示。相同条件下当有地下水时，储气库渗漏速率从 $-0.034 \sim 0.016 \text{ kg/s}$ 降低至 $-0.013 \sim 0.011 \text{ kg/s}$ ，每个循环渗漏百分比从 0.035% 降低至 0.008%，地下水的存在可有效辅助气体密封。

衬砌出现应力集中，当有地下水时，衬砌最大有效应力从 27.3 MPa 降低至 15.7 MPa，最大第三主应力也从 29.6 MPa 降低至 13.3 MPa，最大剪应力从 31 MPa 降低至 17.9 MPa，衬砌最大拉应变降低 0.0005。围岩剪应力大小和分布均出现较大范围降低，塑性区面积从 1337 m^2 降低至 356 m^2 。

表 2 有无地下水对储气库渗漏和受力特性影响

Table 2 Influences of groundwater on leakage and mechanical characteristics of gas reservoir

工况	渗漏速率/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	衬砌最大有效 应力/ MPa	衬砌最大第三 主应力/ MPa	围岩最大有效 应力/ MPa	衬砌最大 拉应 变	围岩塑 性区面 积/ m^2	
							渗漏百 分比%
无地 下水	$-0.034 \sim 0.016$	0.032	27.3	29.6	7.63	0.0011	1337
有地 下水	$-0.013 \sim 0.011$	0.007	15.7	13.3	7.57	0.0006	356

注：表中应力符号规定为拉正压负，渗漏速率以气体从储气库向外为负

地下水存在时，衬砌外侧和围岩内孔隙压力增高，有效应力降低，尤其是衬砌结构内，衬砌最大有效应力、最大第三主应力和剪应力均降低 1/3。地下水的存在会使围岩塑性区面积也出现了大幅度降低，降低幅度为 92%，其原因为有地下水时，洞周围岩内孔压增加，有效应力降低、同时剪应力降低，由于正应力降低导致的抗剪强度也随之降低，但是在本文模型的

洞室形状、洞室埋深、地下水水位和运行条件下，围岩的剪应力降低幅度高于抗剪强度的降低幅度，因此围岩剪切塑性区分布区域减小。有效应力和塑性区的降低幅度主要由孔隙压力增高幅度决定，孔隙压力的增高幅度主要由埋深与地下水水位相对关系控制。由此可知，地下水的存在会大幅度降低衬砌有效应力和减小围岩塑性区面积。

4 结 论

对 CAES 储气库密封可靠性和安全稳定性的研究是保证 CAES 电站可靠运行的基础，地下储气库的密封效果和安全稳定性的影响因素众多，耦合过程复杂，同时耦合变量之间高度非线性增加了对储气库安全性和可靠性评价的难度。本文采用热流固耦合理论、两相渗流理论、压缩空气热力学理论对储气库运行过程中涉及到的流体状态变化、空气渗漏、衬砌围岩单相 THM 和两相 THM 耦合过程进行了建模。该模型计算了有无地下水两种情况下储气库从开挖至 60 d 运行过程，主要得出以下 3 点结论。

(1) 在该储气库以本文模型设定方案运行时，衬砌渗透率为 $1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 时，储气库渗漏率低于 1%，可满足密封要求。地下水的存在可使储气库每个循环气体损失量降低 78%。

(2) 该模型储气库运行时衬砌为受力主体，衬砌顶部和底部出现应力集中，且表现为受拉应力作用，因此衬砌顶部和底部需注意配加密筋以满足受力要求。运行时储气库总体成椭圆形膨胀变形，横向变形大于竖向。

(3) 地下水存在时可大幅度降低衬砌结构有效应力和围岩塑性区面积。

参考文献:

[1] 曾 鸣, 王永利, 张 硕, 等. “十四五”能源规划与“30·60”双碳目标实现过程中的 12 个关键问题[J]. 中国电力企业管理, 2021(1): 41-43. (ZENG Ming, WANG Yongli, ZHANG Shuo, et al. 12 key issues in the process of "14th Five-Year Plan" energy planning and "30 60" double carbon target realization[J]. China Power Enterprise Management, 2021(1): 41-43. (in Chinese))

[2] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments[J]. Applied Energy, 2016, 170: 250-268.

[3] ELDRIDGE F. Wind Energy Conversion Systems Using Compressed Air Storage[M]. McLean: Mitre Corporation,

- 1976.
- [4] Gaelectric Energy Storage Ltd. Gaelectric Energy Storage[R]. London, 2015.
- [5] 张远. 风电与先进绝热压缩空气储能技术的系统集成与仿真研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2014. (ZHANG Yuan. Study on System Integration and Simulation of Wind Power and Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage Technology[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese))
- [6] NAKHAMKIN M. Advanced adiabatic compressed air energy storage system: US, 8261552 B2[P]. 2012-09-11.
- [7] 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.
- [8] 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): 21901-21901.
- [9] 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.
- [10] 邓广义, 郭祚刚, 陈光明. 压缩空气储能系统设计及其热力学分析[J]. 储能科学与技术, 2013, **2**(6): 615-619. (DENG Guangyi, GUO Zuogang, CHEN Guangming. Design and thermodynamic analysis of compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, **2**(6): 615-619. (in Chinese))
- [11] GUO C, XU Y, ZHANG X, et al. Performance analysis of compressed air energy storage systems considering dynamic characteristics of compressed air storage[J]. Energy, 2017, **135**(9): 876-888.
- [12] GUO C B, PAN L H, ZHANG K N, et al. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and Caverns based on the Huntorf CAES plant[J]. Applied Energy, 2016, **181**: 342-356.
- [13] BARNES F, LEVINE J. Large Energy Storage Systems[M]. NewYork: Taylor & Francis Group, 2011.
- [14] LUO X, WANG J H, KRUPKE C, et al. Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale adiabatic compressed air energy storage systems with low-temperature thermal storage[J]. Applied Energy, 2016, **162**: 589-600.
- [15] CARRANZA-TORRES C, FOSNACHT D, HUDAK G. Geomechanical analysis of the stability conditions of shallow cavities for compressed air energy storage (CAES) applications[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2017, **3**(2): 131-174.
- [16] KIM H M, PARK D, RYU D W, et al. Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock Caverns[J]. Engineering Geology, 2012, **135**: 60-65.
- [17] 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 Caichu, ZHANG Pingyang, ZHOU Shuwei, 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. (in Chinese))
- [18] 蒋中明, 刘澧源, 李双龙, 等. 压气储能平江试验库受力特性数值研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, **14**(4): 62-68. (JIANG Zhongming, LIU Liyuan, LI Shuanglong, et al. Numerical study on mechanical characteristics of the Pingjiang pilot cavern for compressed air energy storage[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, **14**(4): 62-68. (in Chinese))
- [19] 周舒威, 夏才初, 张平阳, 等. 地下压气储能圆形内衬洞室内压和温度引起应力计算[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2025-2035. (ZHOU Shuwei, XIA Caichu, ZHANG Pingyang, et al. Analytical approach for stress induced by internal pressure and temperature of underground compressed air energy storage in a circular lined rock cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2025-2035. (in Chinese))
- [20] 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**(2): 749-770.
- [21] 夏才初, 赵海斌, 梅松华, 等. 埋深对压气储能内衬洞室稳定性影响的定量分析[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学), 2016, **36**(3): 1-7. (XIA Caichu, ZHAO Haibin, MEI Songhua, et al. Quantitative analysis of impact of cover depth on stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage[J]. Journal of Shaoxing University, 2016, **36**(3): 1-7.

- (in Chinese))
- [22] 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. (ZHOU Yu, XIA Caichu, ZHAO Haibin, et al. A method for estimating air leakage through inner seals and mechanical responses of the surrounding rock of lined rock caverns for compressed air energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(2): 297-309. (in Chinese))
- [23] 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**(2): 653-667.
- [24] 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**(3): 71-81.
- [25] 孙致学, 徐 轶, 吕抒桓, 等. 增强型地热系统热流固耦合模型及数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, **40**(6): 109-117. (SUN Zhixue, XU Yi, LÜ Shuhuan, et al. A thermo-hydro-mechanical coupling model for numerical simulation of enhanced geothermal systems[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, **40**(6): 109-117. (in Chinese))
- [26] CHILINGAR G V. Relationship between porosity permeability and grain-size distribution of sands and sandstones[J]. Developments in Sedimentology, 1964, **1**: 71-75.
- [27] HE W, LUO X, EVANS D, et al. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system[J]. Applied Energy, 2017, **208**: 745-757.
- [28] NOORISHAD J, TSANG C F, Witherspoon P A. Coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: numerical approach[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, **89**(B12): 10365.
- [29] 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**(2): 573-584.

第二届黄土力学与工程防灾减灾学术研讨会（第二号通知） （中国·西安 2024年9月6日）

为进一步推动黄土力学与工程防灾减灾相关的科学研究和工程实践，第二届黄土力学与工程防灾减灾学术研讨会将由西安交通大学人居环境与建筑工程学院和长安大学地质工程与测绘学院联合承办，定于2024年9月6—8日在陕西省西安市召开。会议源自2020年11月在西安召开的黄土力学的理论与实践专题学术研讨会。本次会议将聚焦于新时代背景下黄土力学与工程防灾减灾领域的最新研究成果、前沿技术以及实践经验，会议主题为“智慧、低碳、可持续”，旨在为从事黄土力学和工程防灾减灾相关领域的专家学者、研究机构开展深入研讨提供平台，促进学术交流、深化合作，进一步推动该领域相关理论和工程防灾减灾水平的提升。我们热忱邀请国内外从事该领域研究和实践的相关专家学者和技术人员参加本次研讨会。

会议主题：①黄土力学与防灾减灾；②岩土体室内试验新技术；③岩土体本构模型及数值分析方法；④现场测试和检测的新技术、新方法和新材料；⑤沿黄流域重大工程案例的设计、施工与运维实践；⑥工程及地质灾害机理、风险和防治；⑦黄土高原土壤侵蚀与环境保护；⑧黄土高原资源能源开发及低碳岩土工程；⑨现代信息技术在工程防灾减灾中的应用；⑩其他。

主办单位：陕西省岩土力学与工程学会；西安交通大学；西安理工大学。

会议事项：网上缴费截止日期为2024年8月30日。注册费统一由会议主办方指定会议服务公司（陕西路优易思会议会展服务有限公司）收取并开票。正式代表2000元（2024年8月30日前注册），2500元（2024年8月30日之后及现场注册），学生代表1000元（2024年8月30日前注册），1500元（2024年8月30日之后及现场注册），会议住宿由组委会统一安排，费用自理。

汇款信息：陕西路优易思会议会展服务有限公司，银行账号643661426，开户银行中国民生银行西安雁塔南路支行，请通过银行转账汇款，并注明：“第二届黄土力学与工程防灾减灾学术研讨会参展”。

联系方式：报到注册伏映鹏(13236063423)，左璐(15529353046)；住宿/餐饮严东东(18700188073)，宋超(18845769981)；展览/会场孙萍萍(18092763624)，魏欣(18292563925)；接待/交通黄晓林(17302967884)，赵源(15084940062)；学术报告陆世锋(18301792821)，邓龙胜(15029028387)。

（会议组委会 供稿）