第 53 卷第 11 期
2025 年 11 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 53 No. 11
Nov. 2025

文章编号：0253-374X(2025)11-1702-08　　**DOI**：10. 11908/j. issn. 0253-374x. 24192

基于随机相场模型的储气洞室起裂压力研究

何修涵[1]，周舒威[1]，徐英俊[1]，夏才初[2]，刘　瑞[1]

（1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 宁波大学 岩石力学研究所，浙江 宁波 315211）

摘要：为研究围岩断裂力学参数的空间变异性对储气洞室起裂压力的影响，基于随机场理论、质量和能量守恒定律、傅里叶定律和变分一致原理建立适用于压气储能内衬洞室的热力耦合随机相场模型，并通过试验和数值模拟验证了其正确性。结合蒙特卡洛法，选取典型压气储能案例分析研究。研究表明：储气洞室的起裂压力受到岩体空间变异性的显著影响，随着弹性模量和临界能量释放率变异系数的增加而减小，且二者空间变异性共同作用下呈近似反比关系，而弹性模量和临界能量释放率的自相关距离的影响较小；弹性模量相较于临界能量释放率，其空间变异性对起裂压力的影响更大。

关键词：压缩空气储能；起裂压力；空间变异性；随机相场模型；热力耦合

中图分类号：TU91　　**文献标志码**：A

Random Phase Field Model-based Research on Fracture Initiation Pressure of Gas Storage Caverns

HE Xiuhan[1], *ZHOU Shuwei*[1], *XU Yingjun*[1], *XIA Caichu*[2], *LIU Rui*[1]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To investigate the impact of spatial variability of different mechanical parameters on the initial fracturing pressure of gas storage cavern. A thermomechanical coupling random phase field model, applicable to lined caverns for compressed air energy storage, was established based on the principles of random field theory, conservation laws of mass and energy, Fourier´s law, and the variational principle. The correctness of the model was validated through experimental results and numerical simulation. Combining Monte Carlo method, a compressed air energy storage (CAES) case from literature was selected for analysis and study. The research indicates that the initiation pressure of a gas storage cavern is significantly influenced by the spatial variability of rock mass, decreasing with increasing coefficients of variation of the Young's modulus and the critical energy release rate, and exhibiting an approximately inverse relationship under their combined variability. However, the autocorrelation distances of the Young's modulus and critical energy release rate have a relatively minor impact. The spatial variability of Young's modulus has a greater influence on the initiation pressure compared with the critical energy release rate.

Keywords: compressed air energy storage; initial fracturing pressure; spatial variability; random phase field model; thermomechanical coupling

压缩空气储能是具有极大发展前景的大规模储能技术[1]。地下内衬洞室具有稳定性好、高地质适宜性、容量大和经济性好等特点，被认为是最具发展潜力的储气库之一。压气储能注气过程中，气压与温度效应共同作用于衬砌层和围岩，改变其应力状态。常规情况下，衬砌层先破裂；但在空间变异性较大的围岩中，薄弱点可能导致围岩层先行开裂。当围岩层或衬砌层的任意一点发生开裂时，洞室内部的气压被称为储气洞室的起裂压力 p_c。内衬洞室的 p_c 虽然不是储气洞室的极限内压，但也是影响洞室可用性和经济性的重要因素。一方面它对于压缩设备选型、运营效率和支护方式的选择具有极大的参考价值[2]，另一方面它是地下结构不稳定的开始，一旦发生开裂，密封层可能发生凹陷，在循环热力作用下更容易发生破坏，出现反射型裂缝[3]。因此，研究压气储能内衬洞室的起裂压力具有重要的理论和工程意义。

收稿日期：2024-06-05
基金项目：国家自然科学基金(52278408)；国家自然科学基金青年基金(海外)(2021)；中央高校基本科研业务费(22120240146)
第一作者：何修涵，博士生，主要研究方向为能源地下储存。E-mail：hexh9809@126. com
通信作者：周舒威，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为能源地下储存。E-mail：shuwei_zhou@tongji. edu. cn

论文拓展介绍

目前已有很多学者针对压气储能内衬洞室开展研究[3-6]，但这些研究主要关注储气库的稳定性和气密性两个方面。例如，周舒威等[4]提出一种计算压气储能圆形内衬洞室的气压和温度引起应力的解析方法。Zhou等[5]采用热力耦合模型分析密封层、混凝土衬砌和围岩的应力状态。蒋中明等[6]在湖南平江抽水蓄能电站勘探平硐的花岗岩地层内建造了国内第1个硬岩浅埋衬砌地下储气室，分析储气库的密封性和安全性。蒋中明等[3]基于FLAC3D平台开发衬砌裂缝分析程序，研究通过配筋控制衬砌裂缝宽度。

另外，目前对于压气储能地下内衬洞室的研究大多基于岩体力学性质是均质的这一假设。但在实际工程中，岩土体存在空间变异性，这将严重影响工程结构的分析和设计[7]。例如，姬建等[8]基于三维有限元分析表明岩土抗剪强度的空间变异性影响隧道开挖面的支护压力；杨鸽等[9]表示忽略材料的空间变异性可能会低估大坝的地震反应。因此，研究空气储能内衬洞室的起裂压力需要考虑围岩空间变异性的影响。

本研究目的为提出适用于空间变异性围岩中压气储能内衬洞室破裂的理论框架，并对洞室起裂压力进行初步研究。本文首先基于质量、能量守恒定律和傅里叶定律建立储气洞室内部空气方程和温度场方程，假设岩体弹性模量和临界能量释放率服从对数正态分布，采用随机场表征岩体的空间变异性，建立热力耦合随机相场模型；通过本文模型模拟结果与文献[10]和[11]结果的对比，验证所建立储能洞室断裂模拟方法的正确性；最后，耦合断裂模型和蒙特卡洛法初步研究空间变异性围岩中压气储能内衬洞室的起裂压力。

1　储气洞室断裂模型控制方程

计算开始之前做以下假设[3,12]：①围岩和衬砌为弹性体Ω；②衬砌为均质材料，围岩传热参数均匀分布，内部气体的温度和压力均用平均值表示；③洞室内已存在初始温度为T_0、气压为p_0的气体，且一直处于充气状态，不泄露；④裂缝只由拉伸驱动，且不可愈合。

1.1　储气洞室内部空气控制方程

根据质量守恒定律和能量守恒定律，洞室中气体应满足以下方程[12]：

$$V\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}=\dot{m}_{\mathrm{c}} \tag{1}$$

$$V\rho c_{\mathrm{v0}}\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{air}}}{\mathrm{d}t}=\dot{m}_{\mathrm{c}}\left[c_{\mathrm{p0}}(T_{\mathrm{i}}-T_{\mathrm{air}})+Z_0RT_{\mathrm{air}}+\rho\frac{RT_0^2Z_{\mathrm{T0}}}{\rho_0}\right]+\frac{2h_{\mathrm{c}}V}{r_0}(T_{\mathrm{RL}}-T_{\mathrm{air}}) \tag{2}$$

式中：V为洞室体积；ρ和ρ_0分别为洞室气体密度和初始洞室气体密度；$\dot{m}_{\mathrm{c}}$为洞室内气体的瞬时质量变化率；c_{v0}和c_{p0}分别为T_0温度、ρ_0密度状态下，定容比热容和定压比热；T_{i}、T_{air}和T_{RL}分别为注入的空气温度、洞室内气体温度和衬砌表面的温度；Z_0为初始状态下空气压缩因子；Z_{T0}为初始状态下$\partial Z/\partial T$的计算值；R为空气气体常数，为287J·(kg·K)$^{-1}$；h_{c}为衬砌表面与空气之间的平均传热系数；r_0为净洞半径。

洞室中气体压力可用气体状态方程求得

$$p=\rho ZRT_{\mathrm{air}} \tag{3}$$

式中：p为洞室内气体压强；Z为空气压缩因子[13]。

1.2　温度场控制方程

对于岩石内衬洞室，在衬砌和围岩内，满足传热控制方程：

$$\rho_{\mathrm{j}}c_{\mathrm{pj}}\frac{\partial T_{\mathrm{j}}}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_{\mathrm{j}}r\frac{\partial T_{\mathrm{j}}}{\partial r}\right),r_{\mathrm{j-1}}<r<r_{\mathrm{j}}(j=1,2) \tag{4}$$

式中：ρ_{j}、c_{pj}、k_{j}和T_{j}分别为第j层介质的密度、定压比热容、导热系数和温度；$j=1,2$分别代表衬砌和围岩；$r_{\mathrm{j-1}}$和r_{j}分别为第j层介质的内边界半径和外边界半径。

边界条件为

$$-k_1\frac{\partial T_1}{\partial r}=h_{\mathrm{c}}(T-T_1),r=r_0 \tag{5}$$

$$T_{\infty}=T_0,r=\infty \tag{6}$$

在压气储能洞室相场模型中，损伤状态的围岩和衬砌的导热系数用相场变量φ线性插值表示[14]。

1.3　岩体断裂力学参数的随机场表征

由于岩体力学参数为正数，因此假设岩体弹性模量和临界能量释放率服从对数正态分布[15]。假定随机场遵循平稳或者准平稳假设，且不考虑参数之间的互相关性。文献[16]证明对于沉积岩和火成岩的弹性模量，最适合的自相关函数是指数自相关函数。因此本文采用指数自相关函数：

$$\rho(\tau_{\mathrm{x}},\tau_{\mathrm{y}})=\exp\left[-\left(\frac{\tau_{\mathrm{x}}}{d_{\mathrm{h}}}+\frac{\tau_{\mathrm{y}}}{d_{\mathrm{v}}}\right)\right] \tag{7}$$

式中：τ_{x}、τ_{y}分别为两点之间水平和垂直方向的距离；d_{h}、d_{v}分别为水平和垂直方向的自相关距离。

模拟随机场的方法主要有局部平均法、扩展最优线性估计法和协方差矩阵分解法等。前两者在适用性和计算复杂度上各有局限，而协方差矩阵分解

法具有编程简便、普适性强的优势,因此本文采用该方法,其模拟步骤如下:

首先,通过拉丁超立方抽样生成正态分布样本矩阵$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{E}}=\{\varepsilon_{\mathrm{E}}^{1},\varepsilon_{\mathrm{E}}^{2},\cdots\varepsilon_{\mathrm{E}}^{n}\}$;然后,根据自相关函数生成自相关系数矩阵$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{xx}}^{G}$,并进行乔列斯基分解,$\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{L}_1^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{xx}}^{G}$。相关标准正态随机场$H_{\mathrm{E}}^{D}=\boldsymbol{L}_1\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{E}}$;最后,通过等概率变换方法将$H_{\mathrm{E}}^{D}$转换为相关非正态随机场$H_{\mathrm{E}}$,等概率变换公式如下:

$$H_{\mathrm{E}}=G_{\mathrm{i}}^{-1}\left\{\phi\left[H_{\mathrm{i}}^{D}\right]\right\} \tag{8}$$

式中:$G_{\mathrm{i}}^{-1}(\cdot)$为非正态分布边缘累积分布的逆函数;$\phi(\cdot)$为标准正态分布累积分布函数。

1.4 热力耦合相场断裂模型控制方程

Γ为弥散裂缝,φ表示损伤程度($\varphi=0$表示岩体无损伤;$\varphi=1$表示岩体完全破裂(裂缝);$0<\varphi<1$表示岩体处于损伤状态)。外边界$\partial\Omega$包括力边界$\partial\Omega_{\mathrm{t}}$和位移边界$\partial\Omega_{\mathrm{u}}$,并且$\partial\Omega_{\mathrm{t}}\cap\partial\Omega_{\mathrm{u}}=\varnothing$。

弹性体Ω中总的断裂能近似表示为

$$\psi_{\mathrm{f}}=\int_{\Gamma}G_{\mathrm{C}}\mathrm{d}S\approx\int_{\Omega}G_{\mathrm{C}}\gamma(\varphi,\nabla\varphi)\mathrm{d}\Omega=\int_{\Omega}G_{\mathrm{C}}\left(\frac{1}{2l_0}\varphi^2+\frac{l_0}{2}\left|\nabla\varphi\right|^2\right)\mathrm{d}\Omega \tag{9}$$

式中:G_{C}为临界能量释放率;l_0为尺度参数,控制裂缝的宽度。

弹性能ψ_{e}分解为拉伸产生的弹性能ψ_{e}^{+}和压缩产生的弹性能ψ_{e}^{-},可写为

$$\psi_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}})=g(\varphi)\psi_{\mathrm{e}}^{+}+\psi_{\mathrm{e}}^{-} \tag{10}$$

$$\psi_{\mathrm{e}}^{\pm}=\frac{\lambda}{2}\left\langle tr(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}})\right\rangle_{\pm}^{2}+\mu tr\left(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}}^{\pm 2}\right) \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}}$为弹性应变;$g(\varphi)$为退化函数,$g(\varphi)=\left[(1-k)(1-\varphi)^2+k\right]$,$k$取$10^{-9}$以防止数值奇异;$\lambda$和$\mu$是拉梅常数;$\langle\cdot\rangle=(\cdot\pm|\cdot|)/2$。$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}}^{\pm}$为拉或压弹性应变,可由弹性应变分解获得[14]。

在热力耦合相场断裂模型中,弹性应变为总应变减去热应变:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}}=\frac{1}{2}\left[\nabla u+(\nabla u)^{T}\right]-\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{T}}$为热应变;$\boldsymbol{u}$为位移场。

弹性体Ω中考虑断裂扩展的总能量泛函L为

$$L=\int_{\Omega}\psi_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}})\mathrm{d}\Omega+\int_{\Omega}G_{\mathrm{C}}\left(\frac{1}{2l_0}\varphi^2+\frac{l_0}{2}\left|\nabla\varphi\right|^2\right)\mathrm{d}\Omega-\int_{\Omega}\boldsymbol{bu}\mathrm{d}\Omega-\int_{\partial\Omega}\boldsymbol{fu}\mathrm{d}\partial\Omega-\int_{\Omega/\Gamma}\boldsymbol{\sigma}_0\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}}\mathrm{d}\Omega \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{b}$为体力;$\boldsymbol{\sigma}_0$为初始地应力。

对能量泛函L采用变分方法,得到控制方程的强形式,引入历史场H对相场控制方程进行修正,得

$$\begin{cases}\mathrm{Div}(\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{tol}})+\boldsymbol{b}=0\\ \left[\dfrac{2l_0(1-k)H}{G_{\mathrm{c}}}+1\right]\varphi-l_0^2\nabla^2\varphi=\dfrac{2l_0(1-k)H}{G_{\mathrm{c}}}\end{cases} \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{tol}}=g(\varphi)\boldsymbol{\sigma}_0+\boldsymbol{D}:\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}}$,$\boldsymbol{D}$为弹性张量;$H$为时间历史中弹性拉应变能最大值,$H(x,t)=max\{\psi_{\varepsilon}^{+}(x,s)+\boldsymbol{\sigma}_0:\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{e}}(x,s)\}(s\leqslant t)$。控制方程还满足如下边界条件:

$$\begin{cases}\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{tol}}\cdot\boldsymbol{n}=f & \partial\Omega_{\mathrm{t}}\\ u(x,t)=u_0 & \partial\Omega_{\mathrm{u}}\\ \nabla\varphi\cdot\boldsymbol{n}=0 & \partial\Omega\end{cases} \tag{15}$$

式中:$\boldsymbol{n}$是$\partial\Omega$的外边界法向量(指向区域外部)。

压气储能内衬洞室断裂模拟框架需耦合求解1.1至1.4小节所有控制方程,各控制方程的理论框架图如图1所示。通过1.1节中给出的洞室内部空气质量守恒方程(式(1))和能量守恒方程(式(2))可实时求解洞室内部气体密度和温度,进而利用气体状态方程(式(3))求解出洞室内部气体压强。1.1节中获得的洞室内气体温度作为边界条件辅助求解1.2节中的传热控制方程(式(4))。1.1节求解的洞室内气体压强作为1.4节中式(14)的位移场控制方程的边界条件,1.2节中求解的围岩和衬砌的温度场以温度应变的形式耦合于式(14)的位移场控制方程。式(14)中获得的位移场可计算出相场控制方程中所需的驱动力H,相场控制方程中求得的相场又将以损伤的形式作用于位移场控制方程中的弹性张量。

2 数值实现

模型采用COMSOL Multiphysics有限元法求解,断裂力学参数的随机场由MATLAB生成,搭接关系如图2所示。在COMSOL中,依次构建存储、固体力学1、洞室空气、传热、固体力学2及历史场与相场模块,各模块功能如下所述:①在存储模块中,MATLAB生成的围岩断裂力学参数随机场通过线性插值导入模型,并存储充气过程中围岩及衬砌层的应变、应力、弹性拉应变能密度和相场;②在固体力学模块1中围岩断裂力学参数被定义为存储模块中的随机场,进行地应力平衡;③在洞室内空气模块中对控制方程(1)和(2)求解,得到气体温度和压强;④传热模块中采用洞室内部气体温度作为边界条件对方程(5)求解;⑤在固体力学模块2中,围岩断裂

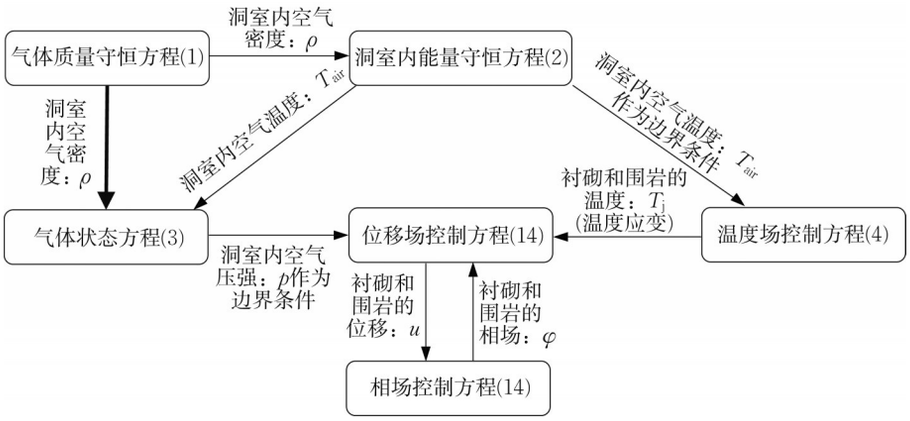


图 1　控制方程理论框架图

Fig.1　Theoretical framework of governing equations

力学参数取存储模块中的随机场,然后对地下围岩进行开挖,施加衬砌并充气运营。洞室内气体压强逐渐增大,作用在衬砌上,同时传热模块中求得的温度场以温度应变的形式作用在围岩中,对方程(14)中的位移场控制方程进行求解,并更新弹性拉应变能密度,存储在存储模块中;⑥在历史场模块中,拉伸弹性应变能由时间步间的能量密度变化更新;⑦最后,在相场模块中,根据更新的历史场,求解方程(14)中的相场解,获得围岩和衬砌中的相场。

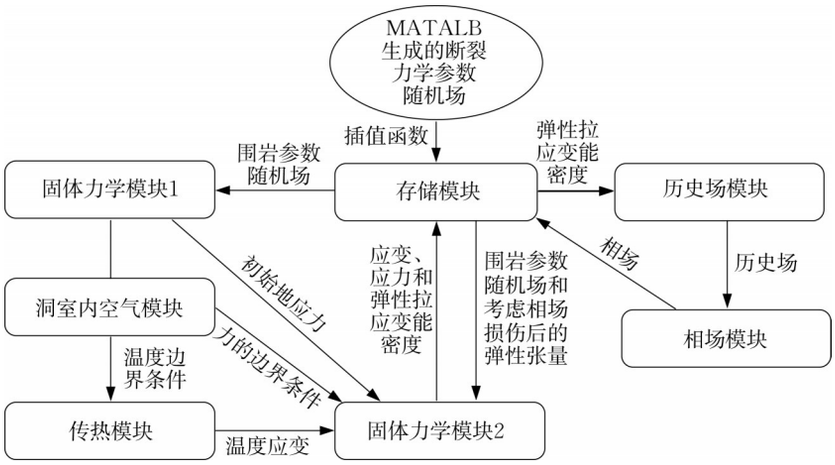


图 2　COMSOL 模块与 MATALB 生成的随机场搭接图

Fig.2　Integration of COMSOL modules and MATLAB-generated random field

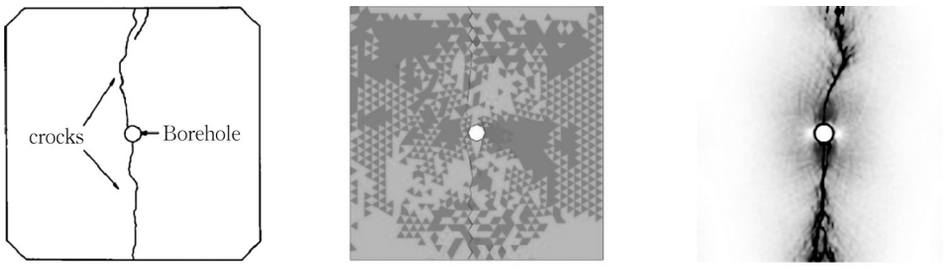
在热力耦合随机相场有限元求解过程中,采用交错迭代方案处理非线性多场耦合问题,即在位移场、温度场和相场耦合问题中,首先用已知的温度场和相场求出位移,然后根据传热方程求解温度场,依据最新的位移解更新历史场,最后求出相场。

3　验证

为了验证提出的热力耦合随机相场模型的正确性,采用文献[10]中加拿大原子能有限公司地下研究实验室提供的LDB花岗岩立方体热压裂试验进行验证。参考文献[11]建立边长为15cm的正方形二维数值模型,中心钻孔直径为1cm,上下边界施加法向约束,切向自由。外边界的初始温度为20℃,且绝缘,井壁温度从20℃升高到200℃。力学和热参数主要为[17]:泊松比为0.25,密度为2 600kg·m^{-3},弹性模量E为69GPa,G_C为15N·m^{-1},热膨胀系数为1×10^{-5}(℃)$^{-1}$,导热系数为1.2W·(m·℃)$^{-1}$,变异系数取0.1,自相关距离取0.005mm。在热力耦合随机相场模拟中,l_0取0.2mm,最大单元尺寸不超过0.1mm。

试验[10]、连续—间断法[11]和本文提出的模型获得的热断裂路径如图3所示。试验中裂缝从自由表面向内扩展,贯穿方形板,沿圆孔将板一分为二。连续—间断法开裂顺序与试验一致,但最终裂缝路径略有偏

差。图3c为本文模型模拟结果,其开裂过程与试验一致,裂缝的弯曲形状和自由边界处的多条裂缝开裂与试验结果完全一致,因此模型可有效模拟实际热力耦合裂缝演化,并用于压缩空气储能洞室起裂的研究。



a 试验结果[10] b 连续—间断法模拟结果[11] c 热力耦合随机相场模型模拟结果

图3 试验和不同数值模拟方法得出的裂缝路径图

Fig.3 Fracture path plots obtained from the experiment and various numerical simulation methods

4 压气储能内衬洞室起裂压力数值模拟初步研究

本文模型已通过试验验证,为研究围岩空间变异性对p_c的影响,将模型与蒙特卡洛法耦合,对文献[12]中的储气库的p_c进行初步研究,其数值模型和边界条件如图4所示。

4.1 参数取值

洞室体积为67 000m^3,半径为3m,衬砌厚度为0.5m。l_0取200mm,埋深取100m,侧压力系数取0.5,其他计算参数如表1所示[12]。

岩体弹性模量的自相关距离在0.15~150m之间波动,变异系数δ在0.04~1.3区间内[15,18-20],假设

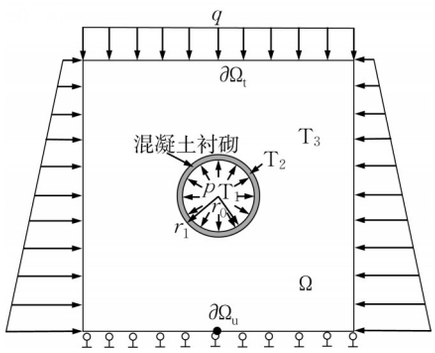


图4 数值模型及边界图

Fig.4 Numerical model and boundary condition

G_C的自相关距离和δ的取值区间与弹性模量相同。为了消除洞室大小对起裂压力的影响,采用相对自相关距离d,其为自相关距离与洞室半径的比值。

表1 计算参数

Tab. 1 Computational parameters

参数	R/(J·(kg·K)$^{-1}$)	T_0/K	p_0/MPa	p_c/MPa	T_c/K	c_{p0}/(J·(kg·K)$^{-1}$)	c_{v0}/(J·(kg·K)$^{-1}$)	$\dot{m}_c$/(kg·s^{-1})
空气	287	310	2.5	3.766	132.65	1 005	717.86	150
参数	导热系数/W·(m·K)$^{-1}$	比热/J·(kg·K)$^{-1}$	密度/(kg·m^{-3})	热膨胀系数/K^{-1}	E/GPa	泊松比	G_C/(N·m^{-1})	传热系数/(W·(m^2·K)$^{-1}$)
围岩	3.5	900	2 500	1×10^{-5}	35	0.3	150	50
衬砌	3	900	2 500	1×10^{-5}	30	0.3	80	50

4.2 蒙特卡罗模拟次数

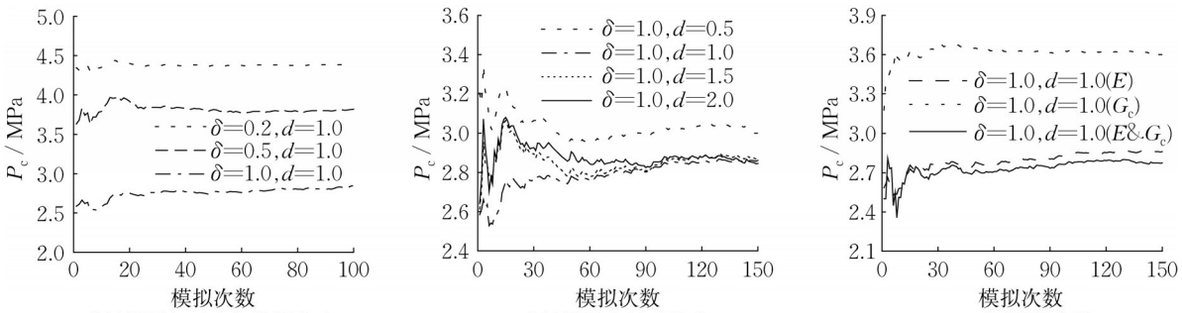
由于围岩空间变异性分布,内衬洞室的p_c具有随机性和不确定性。基于蒙特卡罗方法并结合拉丁超立方体采样生成岩体属性的随机样本[21],通过数值模拟获得储气库p_c的均值,可作为其真值的近似。

模拟次数应在保证精度的前提下尽可能最少,以兼顾计算效率。为确定模拟次数,采用控制变量法对不同随机参数、不同δ和不同d情况下对p_c均值收敛性的影响进行分析,如图5所示。δ为0.2和0.5时,模拟次数达到100次,p_c均值收敛;当δ为1.0,模拟次数达到150次时,p_c均值收敛。

除了均值收敛性分析外,还需评估蒙特卡洛估计与真实解的误差。E、G_C与p_c为复杂的非线性关系,可表述为$p_c=Q(E,G_C)$,其中Q为非线性函数。根据大数定理可得

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Q(E_i,G_{Ci})=E\big(Q(E,G_C)\big) \quad (16)$$

式中:左项为p_c的真值,记为p_c^*;右项为蒙特卡洛估



a 弹性模量相对自相关距离为1.0　　b 弹性模量变异系数为1.0　　c 不同随机参数

图5　起裂压力p_c均值随着模拟次数增加的收敛图

Fig.5　Convergence plot of the mean critical cracking pressure (p_c) with increasing simulation iterations

计值，记为p_e。以只考虑E的空间变异性为例，根据Matlab的K-S检验结果，在同一事件（即δ和d固定）中，p_{ci}独立同分布，且方差有限，满足中心极限定理成立的要求。当n足够大时，由中心极限定理可得

$$p\left(\left|\frac{p_e-p_c^*}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right|<x\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-x}^{x}e^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t=1-\alpha \quad (17)$$

式中：$1-\alpha$为置信水平。以E的δ为1.0，d为1.0的情况为例，当置信水平为99%，即$1-\alpha=0.99$，根据式(22)可得$x=3$，$|p_e-p_c^*|<3\sigma/\sqrt{n}$。蒙特卡洛模拟的最大误差如图6所示，模拟到150次时，最大误差基本平稳发展，为0.04MPa左右，可以接受。

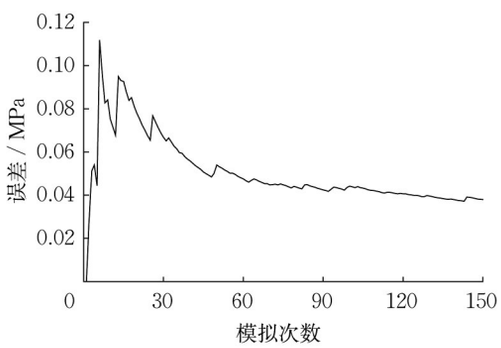


图6　δ=1.0，d=1.0误差图

Fig.6　Error plot for δ=1.0 and d=1.0

4.3　起裂压力分析

本节将分析不同岩体空间变异性条件下，经蒙特卡洛模拟获得的p_c均值。

（1）　相对自相关距离

图7给出了不同岩体断裂力学参数空间变异性下p_c随着d增大的变化图。当只考虑E的空间变异分布时，p_c随着d的增大而变小，再趋于平稳，均小于均质情况下的p_c，较大δ情况下d的影响也比较大，但变化幅度有限，在d小于2时，变化幅度不大于6.5%。这是由于弹性模量的d增大，岩体的结构或者相似组成成分的区域越大，弹性模量的空间变异性对洞室周边的裂缝驱动力的影响越大，更加容易形成裂缝；同时随着洞室周边的围岩更加完整，d对p_c的影响程度逐渐变小。δ为0.2，d为0.5时的p_c非常接近均质情况下的p_c，这是由于在围岩比较破碎并且δ又较小的情况下，弹性模量分布和均质时十分接近，裂缝的驱动力分布也接近。当只考虑G_C的空间变异分布时，当δ为0.2和0.5时，p_c随着d的增大而波动很小，变化幅度不超过2%，且均小于均质时的p_c。同时考虑两者变异分布时，p_c随着d的增大而缓慢波动，最大变化幅度小于6.0%。

（2）　只考虑临界能量释放率的空间变异性

图8给出了不同断裂力学参数情况下p_c随着δ增大的变化图。在不同断裂力学参数空间变异分布情况下，p_c均值随着δ的增加而逐渐变小，这是由于当δ变大，断裂力学参数的分布大小变化更大，洞室周边更容易出现薄弱区域，p_c有更大概率低于均质情况下的p_c。当只考虑E的空间变异性时，δ为1.0，d为1.5时得到的p_c相当于均质情况下的79%，影响显著。当只考虑G_C的空间变异性时，δ为1时，p_c为均质时的63%。同时考虑两者空间变异分布时，p_c与δ几乎呈反比例趋势，δ每增加0.1，p_c将降低约1.7MPa。当δ和d相同时，p_c在仅考虑G_C空间变异性时最大，仅考虑E变异性时次之，同时考虑两者变异性时最小。这是由于E和G_C的空间变异性均使得岩体物理力学参数更差，使得储气洞室更易起裂。E的空间分布影响围岩裂缝驱动力的分布，G_C的空间分布影响围岩抵抗起裂能力的分布，但是明显，围岩的裂缝驱动力分布对于洞室的起裂影响更大，弹性模量的空间变异分布影响更大。

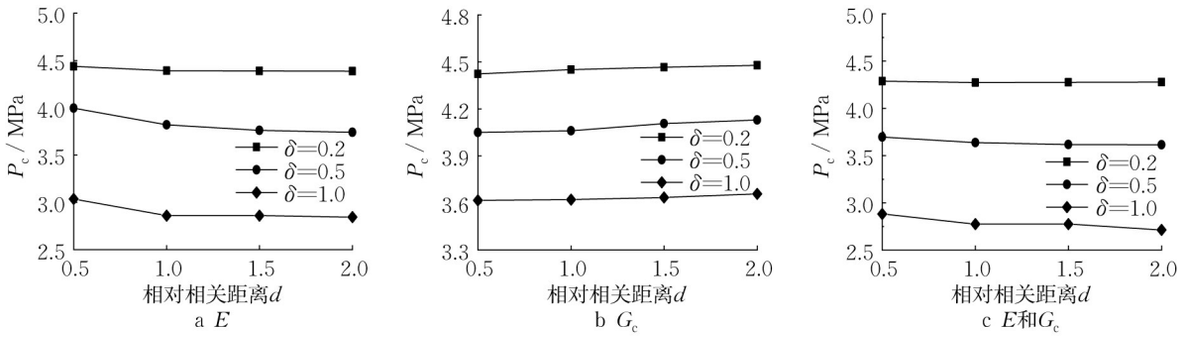


图7 起裂压力p_c与相对自相关距离d关系

Fig.7 Relationship between the initiation fracturing pressure (p_c) and the relative autocorrelation distance (d)

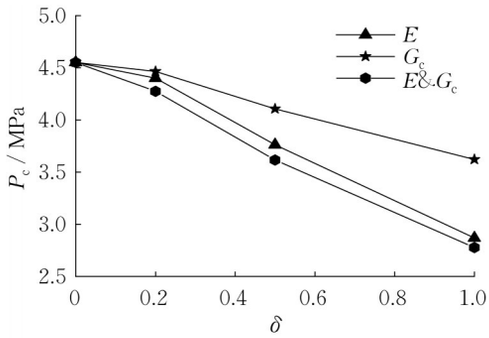


图8 考虑不同参数空间变异性时的p_c(d=1.5)

Fig. 8 Initial fracturing pressure (p_c) when the spatial variability of different parameters (d=1.5)

5 结论

本文提出压缩空气储能内衬洞室断裂的热力耦合随机相场模拟框架,并验证了其准确性,可以有效考虑围岩性质的空间变异性。采用该模型对埋深100m下半径为3m的压气储能空间变异性围岩储气洞室的起裂压力进行数值模拟分析,围岩条件包括弹性模量均值35GPa、泊松比0.3、临界能量释放率均值150N/m、侧压力系数0.5、导热系数3.5W·m^{-1}·K^{-1}、比热900J·kg^{-1}·K^{-1}、热膨胀系数1×10^{-5},得出以下初步结论:

(1) 围岩空间变异性对储气洞室起裂压力的影响不可忽视,在未来的储气洞室运营和支护设计中应考虑围岩的空间变异性,以进一步保证工程安全性。

(2) 围岩弹性模量和临界能量释放率的变异系数显著影响压气储能洞室起裂压力,变异系数越大,起裂压力越小。相较于临界能量释放率,弹性模量的空间分布对起裂压力影响更大。当变异系数为1.0,相对自相关距离为1.5时,只考虑临界能量释放率空间变异性时的起裂压力为均质的63%,而只考虑弹性模量空间变异性时为79%。

(3) 同时考虑弹性模量和临界能量释放率的空间变异分布时,起裂压力与变异系数几乎呈现反比例关系,当相对自相关距离为1.5时变异系数每增加0.1,起裂压力将降低约1.7MPa。

(4) 较大的变异系数即组成成分的较大差异性使得自相关距离对起裂压力的影响越明显,但自相关距离引起的变化幅度均较小,不超过6.5%。

作者贡献声明:

何修涵:提出研究命题,数值模拟,论文撰写;
周舒威:研究指导,项目支持,论文修订;
徐英俊:理论推导,数值模拟;
夏才初:理论指导,论文修改;
刘 瑞:数值模拟,理论分析。

参考文献:

[1] 叶斌,程子睿,彭益成. 压气储能洞室气密性影响因素分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1526.
YE Bin, CHENG Zirui, PENG Yicheng. Analysis of influence factors on air tightness of underground cavern for compressed air energy storage[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1526.

[2] KUSHNIR R, ULLMANN A, DAYAN A. Thermodynamic and hydrodynamic response of compressed air energy storage reservoirs: a review[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2012, 28(2/3): 123.

[3] 蒋中明, 甘露, 张登祥, 等. 压气储能地下储气库衬砌裂缝分布特征及演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 110.
JIANG Zhongming, GAN Lu, ZHANG Dengxiang, *et al*. Study on distribution characteristics and evolution law of liner cracks in underground cavern for compressed air energy storage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 110.

[4] 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.
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.

[5] ZHOU S W，XIA C C，ZHAO H B，*et al*. Numerical simulation for the coupled thermo-mechanical performance of a lined rock cavern for underground compressed air energy storage [J]. Journal of Geophysics and Engineering，2017，14 (6)：1382.

[6] 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.
JIANG Zhongming，LI Peng，ZHAO Haibin，*et al*. Experimental study on performance of shallow rock cavern for compressed air energy storage [J]. Rock and Soil Mechanics，2020，41(1)：235.

[7] LÄNSIVAARA T，PHOON K K，CHING J. What is a characteristic value for soils? [J]. Georisk：Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards，2022，16(2)：199.

[8] 姬建，张哲铭，夏嘉诚，等. 基于逆可靠度分析的隧道开挖面极限支护压力优化设计[J]. 岩土工程学报，2021，43 (10)：1825.
JI Jian，ZHANG Zheming，XIA Jiacheng，*et al*. Inverse reliability-based design of limit support pressure for tunnel face stability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2021，43 (10)：1825.

[9] 杨鸽，朱晟. 考虑堆石料空间变异性的土石坝地震反应随机有限元分析[J]. 岩土工程学报，2016，38(10)：1822.
YANG Ge，ZHU Sheng. Seismic response of rockfill dams considering spatial variability of rockfill materials via random finite element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2016，38(10)：1822.

[10] JANSEN D P，CARLSON S R，YOUNG R P，*et al*. Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite [J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，1993，98 (B12)：22231.

[11] YAN C，YANG Y，WANG G. A new 2D continuous-discontinuous heat conduction model for modeling heat transfer and thermal cracking in quasi-brittle materials [J]. Computers and Geotechnics，2021，137：104231.

[12] XIA C C，XU Y J，ZHOU S W，*et al*. Fracture initiation and propagation in the lined underground caverns for compressed air energy storage：Coupled thermo-mechanical phase-field modeling[J]. Computers and Geotechnics，2023，157：105329.

[13] 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，2015，48：749.

[14] ZHOU S W，ZHANG C K，XU Y J，*et al*. A hybrid phase field method for modeling thermal fractures in brittle rocks：fracture diversity from a modified driving force[J]. International Journal of Fracture，2022，238(2)：185.

[15] 蒋水华，李典庆，周创兵，等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报，2014，36(3)：508.
JIANG Shuihua，LI Dianqing，ZHOU Chuangbing，*et al*. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(3)：508.

[16] LIU H，QI X. Random field characterization of uniaxial compressive strength and elastic modulus for intact rocks [J]. Geoscience Frontiers，2018，9(6)：1609.

[17] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[J]. 1993.

[18] 陈东方. 基于随机有限差分的层状岩体洞室失稳风险分析[D]. 辽宁：东北大学，2016.
CHEN Dongfang. Risk analysis of cavern instability in layered rock mass based on a stochastic finite different method [D]. Liaoning：Northeastern University，2016.

[19] 陈福勇. 基于随机场理论的岩体破坏机理及隧道工程可靠度分析[D]. 重庆：重庆大学，2021.
CHEN Fuyong. Study on rock mass failure mechanism and reliability analysis of tunnel engineering based on random field theory[D]. Chongqing：Chongqing University，2021.

[20] 谭文辉，王家臣，周汝弟. 岩体强度参数空间变异性分析[J]. 岩石力学与工程学报，1999(5)：546.
TAN Wenhui，WANG Jiachen，ZHOU Rudi. Analysis on spatial variability of strength parameter of rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，1999 (5)：546.

[21] AGRAWAL H，DURUCAN S，CAO W，*et al*. Rockburst and gas outburst forecasting using a probabilistic risk assessment framework in longwall top coal caving faces [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，Rock Mechanics and Rock Engineering ，2023，56：6929.