

文章编号: 1000 - 7598 - (2014) 08 - 2375 - 10

# 热-应力-损伤耦合作用下深埋隧洞围岩稳定性分析

贾善坡<sup>1,2</sup>, 吴 渤<sup>3</sup>, 陈卫忠<sup>2</sup>, 伍国军<sup>2</sup>, 高 敏<sup>1</sup>, 龚 俊<sup>1</sup>

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 以热力学和弹塑性力学理论为基础, 分析岩石热-力完全耦合作用及其对力学参数和热特性参数的影响, 建立了岩石热-力-损伤耦合模型及其参数演化方程, 以 ABAQUS 软件为平台对其进行二次开发, 并通过典型算例验证了岩石热-力完全耦合的重要性。然后以某深埋软岩隧洞为例, 研究温度和开挖卸载共同作用下的隧洞围岩力学行为和损伤过程。计算结果表明: 温度对岩石的力学性质和损伤演化过程影响显著, 开挖损伤和热应力诱发的损伤对围岩热力学参数的影响不可忽略; 所提出的力学模型可以有效反映围岩损伤演化、调热圈演化以及热力学参数演化, 具有一定的借鉴作用。

**关 键 词:** 岩石力学; 热-力耦合模型; 损伤; 隧洞; 数值模拟

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

## Study of thermo-mechano-damage coupling behavior of surrounding rock of deep tunnel

JIA Shan-po<sup>1,2</sup>, WU Bo<sup>3</sup>, CHEN Wei-zhong<sup>2</sup>, WU Guo-jun<sup>2</sup>, GAO Min<sup>1</sup>, GONG Jun<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the theories of thermo-mechanics and elastoplastic mechanics, the thermo-mechanical coupling effects of rock and their effects on mechanical and thermal parameters are analyzed. By defining the evolution equations of thermo-mechanical coupling parameters under the damage of temperature effects and mechanics, a new coupled thermo-mechanical damage model with improved Mohr-Coulomb criterion is established, and the numerical implementation in ABAQUS is given. Using finite element method, a typical example was given to verify the importance of the thermo-mechanical fully coupling of rock. Taking a deep tunnel of clay stone as background, the evolution and distribution of damage, temperature and coupling parameters of the surrounding rock are simulated in detail. The results show that the temperature has a great influence on rock properties and damage evolution. Also, the damage by excavation and thermal stress has a great influence on conducting and diffusing of heat. The proposed model can depict the excavation damage, control heat circle and coupling parameters evolution, and may provide a new tool for associated applications.

**Key words:** rock mechanics; thermo-mechanical coupling model; damage; tunnel; numerical simulation

## 1 引 言

在深埋隧道施工、城市地下空间开发、深部资源开采、核废料处置、地热资源开发、煤层瓦斯的安全抽放和综合利用等工程中, 都不可避免地涉及到高温下岩石的强度及变形特性, 其相关材料参数是岩石地下工程开挖、支护、围岩稳定性分析不可或缺的基本依据, 又因热-力耦合作用研究涉及岩石

力学、工程热力学之间的相互交叉和渗透, 具有重要的理论意义, 因此, 多年来一直是地下工程领域的热点和前沿问题之一<sup>[1]</sup>。

由于岩石是含有微裂隙等初始缺陷的天然材料, 当受热或承受一定载荷后, 不可避免地会产生损伤。温度对岩石性质的影响极其明显, 由于夹杂和胶结物的软化, 高温下岩石晶粒滑移变得更加容易, 黏结力减小, 使得岩石的损伤破坏更加复杂。

收稿日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41102182); 中国石油科技创新基金 (No. 2011D-5006-0603); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金 (No. Z013007); 湖北省建设科技计划项目 (No. 2011-119)

第一作者简介: 贾善坡, 男, 1980 年生, 博士(后), 副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiashanporsm@163.com

目前,国内外学者对温度影响下岩石损伤特性做了大量的研究工作。MIAO 等<sup>[2]</sup>通过试验在热力学框架内将弹塑性理论和连续损伤力学结合起来预测半脆性材料的力学性能;徐燕萍等<sup>[3]</sup>分析研究了岩石在高温作用下的热弹塑性力学特性,研究了岩石的加、卸载过程,推导了温度作用下的岩石热弹塑性损伤本构方程;陈剑文等<sup>[4]</sup>建立了温度-应力耦合下的盐岩损伤演化方程,并利用不同围压和温度下的盐岩力学特性试验数据进行了验证;于庆磊等<sup>[5]</sup>利用数字图像处理技术数字化表征岩石内部矿物颗粒的几何形态,结合细观损伤力学和热弹性理论,建立了岩石热-力耦合作用下破裂过程的数值模型;孙可明等<sup>[6]</sup>建立了油页岩非均质热弹塑性损伤模型,给出确定损伤变量的方法,并将岩石材料参数视为满足 Weibull 分布的随机变量,对油页岩地下开发加热过程中热-力耦合问题进行数值模拟;白冰<sup>[7]</sup>分析了岩土材料热-力耦合作用及其对热、力特性参数的影响,利用有限元法讨论了核废料储库周围黏性土介质内温度场、应力场等的动态发展变化规律,但未考虑开挖扰动区材料参数的动态演化;刘文岗等<sup>[8]</sup>应用 FLAC 有限差分程序模拟计算了热-力耦合条件下高放废物地质处置库围岩的温度场、应力场和变形场的变化特征,但仅将岩石材料参数视为常数,未考虑开挖损伤以及温度的影响。

由于岩石热-力耦合问题的特殊性(高温、高压)、复杂性(多场耦合),加上试验设备所限,多数研究仅考虑温度对岩石力学特性的影响,很少考虑力学损伤、温度以及热力学诱发的损伤对岩石热力学特性的影响,所建立的数学模型未能实现真正意义上的完全耦合。本文以热力学、弹塑性理论和损伤力学为基础,建立考虑热-力耦合的岩石弹塑性损伤模型及其损伤演化方程,并以某泥岩高放废物处置库工程为背景,利用有限元法对隧洞开挖施工问题进行了数值模拟研究。

## 2 岩石热-应力-损伤耦合模型

岩石内部含有微裂纹等缺陷,在载荷作用下,这些缺陷将发生起裂、扩展和汇合直至形成宏观裂纹演化;同时,温度的变化产生热应力,不可避免会产生新的缺陷,对岩石造成损伤直至最终破坏。可将岩石总应变率分解为 4 个部分,表达式为

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{m,e} + \dot{\varepsilon}^{m,p} + \dot{\varepsilon}^d + \dot{\varepsilon}^T \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}^{m,e}$ 、 $\dot{\varepsilon}^{m,p}$  分别为岩石弹性和塑性应变率; $\dot{\varepsilon}^d$  为损伤应变率; $\dot{\varepsilon}^T$  为热膨胀应变率。

根据塑性流动法则可得<sup>[9]</sup>

$$\dot{\varepsilon}^{m,p} + \dot{\varepsilon}^d = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma} \quad (2)$$

式中: $G = (G, \Omega, T)$  为损伤塑性势; $\dot{\lambda}$  为塑性乘子。热膨胀应变率  $\dot{\varepsilon}^T$  为

$$\dot{\varepsilon}^T = \beta m \dot{T} \quad (3)$$

式中: $\beta$  为热膨胀系数; $m = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ;  $\dot{T}$  为温度增量。

根据损伤力学理论,综合式(1)~(3),可以获得增量形式的岩石本构方程为

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= (1 - \Omega) [D] (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^{m,p} - \dot{\varepsilon}^d - \dot{\varepsilon}^T) = \\ &= (1 - \Omega) [D] \left( \dot{\varepsilon} - \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma} - \beta m \dot{T} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\Omega$  为损伤变量; $[D]$  为弹性矩阵。

基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石热塑性损伤屈服函数和势函数为

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{I_1}{3} \sin \varphi + \sqrt{J_2 K^2 (\theta) + (1 - \Omega)^2 m^2 c^2 \cos^2 \varphi} - \\ &= (1 - \Omega) c \cos \varphi \\ G &= \frac{I_1}{3} \sin \phi + \sqrt{J_2 K^2 (\theta) + (1 - \Omega)^2 m^2 c^2 \cos^2 \phi} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $c$ 、 $\varphi$ 、 $\phi$  分别为黏聚力、内摩擦角和膨胀角; $I_1$  为应力第 1 不变量; $J_2$  为应力偏量第 2 不变量; $\theta$  为 Lode 角; $m$  为模型参数; $K(\theta)$  为 Mohr-Coulomb 准则的修正变量<sup>[9]</sup>。

参照文献[10]的研究,采用弹性损伤模型描述岩石峰前应变硬化行为,即

$$\Omega_e = \beta_1 (\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_{0e}) \quad (6)$$

式中: $\Omega_e$  为弹性损伤变量; $\bar{\varepsilon} = \sqrt{\varepsilon_{ij} D_{ijkl} \varepsilon_{kl}}$  为能量指标; $D_{ijkl}$  为弹性矩阵; $\varepsilon_{ij}$  和  $\varepsilon_{kl}$  为岩石应变; $\bar{\varepsilon}_{0e}$  为弹性损伤初始点对应的能量指标; $\beta_1$  为损伤参数。

岩石进入峰后阶段后,塑性损伤演化方程可以定义为

$$\Omega_p = A' \exp \left[ -\frac{\bar{\varepsilon}_{pl}}{(\alpha_1 \bar{\varepsilon}_{plmax})} \right] + B' \quad (7)$$

式中: $\Omega_p$  为塑性损伤变量; $\bar{\varepsilon}_{pl}$  为等效塑性应变, $\bar{\varepsilon}_{pl} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2})^2 + (\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p3})^2 + (\varepsilon_{p3} - \varepsilon_{p1})^2}$ ,  $\varepsilon_{p1}$ 、 $\varepsilon_{p2}$  和  $\varepsilon_{p3}$  分别为 3 个主塑性应变; $\bar{\varepsilon}_{plmax}$  为等效塑性应变最大值; $\alpha_1$  为模型参数,  $0 < \alpha_1 < 1$ , 用于控制塑性应变对损伤演化速度的影响;

$$A' = \frac{1}{e^{-1/a_1} - 1} ; B' = -\frac{1}{e^{-1/a_1} - 1} \circ$$

根据上述分析，岩石的有效弹性模量为

$$E = E_0(1 - \Omega) = E_0(1 - \Omega_T)(1 - \Omega_m) \quad (8)$$

式中： $\Omega_T$  为岩石热损伤， $\Omega_T = 1 - E_T / E_0$ ； $E_T$  为温度为  $T$  时的弹性模量值； $E_0$  为常温条件下的弹性模量值； $\Omega$  为岩石总损伤， $\Omega = 1 - (1 - \Omega_T)(1 - \Omega_m)$ ； $\Omega_m$  为力学损伤， $\Omega_m = \Omega_e + \Omega_p$ 。

已有试验研究表明<sup>[2-5]</sup>，随着温度的升高，岩石的强度逐渐降低。关于内摩擦角随温度的变化规律，目前还缺乏足够的试验数据来描述，文中仅考虑黏聚力随温度的变化，采用一阶衰减指数模型来建立黏聚力  $c_T$  的演化方程（见图 1）：

$$c_T = c_r^* + \left\{ A_0 \exp \left[ -\frac{T - T_0}{\alpha \cdot (T_{lim} - T_0)} \right] + B_0 \right\} \cdot (c_{max} - c_r^*) \quad (9)$$

式中： $c_{max}$  为岩石的最大黏聚力值，由室内试验确定； $c_r^*$  为  $T \rightarrow T_{lim}$  时所对应的黏聚力，由室内试验确定； $\alpha$  为模型参数； $A_0 = \frac{1}{1 - \exp(-1/\alpha)}$ ； $B_0 = \frac{-\exp(-1/\alpha)}{1 - \exp(-1/\alpha)}$ 。

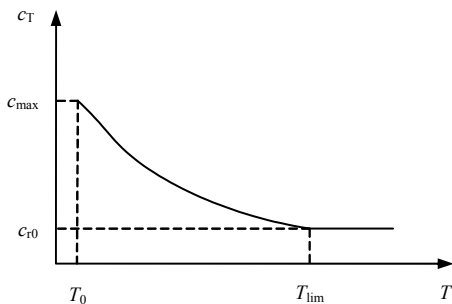


图 1 黏聚力随温度的演化曲线

Fig.1 Relation between cohesion and temperature

参照文献[10]，考虑热-力-损伤耦合的黏聚力演化方程为（见图 2）

$$c = c_T - (c_T - c_{rmin})\Omega_p^\eta \quad (10)$$

式中： $c_{rmin}$  为不同温度下材料完全损伤时所对应的残余黏聚力最小值； $\eta$  为模型参数， $0 < \eta < 1$ 。

### 3 耦合模型的数值方法设计

ABAQUS 提供了用 FORTRAN 语言编写的子

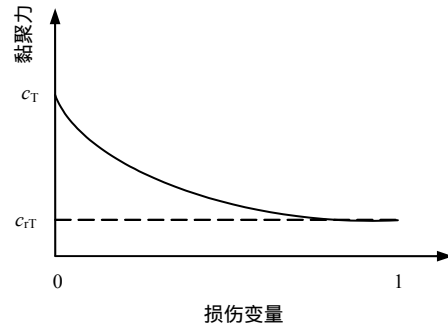


图 2 黏聚力与损伤变量的关系

Fig.2 Relation between cohesion and damage variable

程序接口，供用户二次开发之用。UMAT 子程序用来定义材料的物理特性，在每一个增量步的末尾，应力和与求解相关的状态变量需要更新，该子程序可以与另一个用户子程序 USDFLD 结合起来进行场变量的更新，例如进行损伤分析等。在 UMAT 中，通过迭代获得真实应力以及弹性、塑性应变，从而更新硬化参量及体积模量与剪切模量等状态变量，通过 DDSDE 数组提供材料本构模型的 Jacobian 矩阵，即应力增量对应变增量的变化率。

岩石的热-应力-损伤耦合分析是一个强非线性问题，笔者在已有成果的基础上发展了一个用于岩石热-力-损伤耦合分析的算法<sup>[9]</sup>，并使用 Aitken- $\Delta^2$  方法来加速连续迭代的收敛性<sup>[11]</sup>。本构积分的算法步骤如下：

(1) 根据温度场计算结果确定  $t_{n+1}$  时刻的温度，根据试验或经验计算公式确定变温下的材料力学特性（弹性刚度矩阵、屈服强度、内摩擦角、膨胀角、热膨胀系数等）。

(2) 在增量步开始时，主程序提供应力张量  $\sigma_n$ 、总应变  $\epsilon_{n+1}$ 、总应变增量  $\Delta\epsilon$ 、温度  $T_{n+1}$  及时间增量  $\Delta t$ ，计算热应变增量  $\Delta\epsilon^T$  和应变增量  $\Delta\epsilon^{epd} = \Delta\epsilon - \Delta\epsilon^T$ 。

(3) 根据主程序提供的应力、应变和温度值，根据损伤演化方程，确定  $\Omega_T$ 、 $\Omega_m$  及  $\Omega$ 。

(4) 根据弹性关系计算试探应力的增量值  $\Delta\sigma^*$  和试探应力值  $\sigma_{n+1}^*$ 。

(5) 计算屈服函数值  $F(\sigma_{n+1}^*, \Omega, T_{n+1})$ ，若  $F < 0$ ，则该积分点为弹性加载或塑性卸载状态，更新应力张量、应变张量。

(6) 如果  $F > 0$ ，则处于塑性加载状态，进行塑性修正，计算塑性因子  $\lambda$  和一致性刚度矩阵  $D_{cT}$ ，更新应力和应变，直到  $|F| < 1 \times 10^{-6}$ 。

基于 ABAQUS 的 UMAT 子流程图如图 3 示。

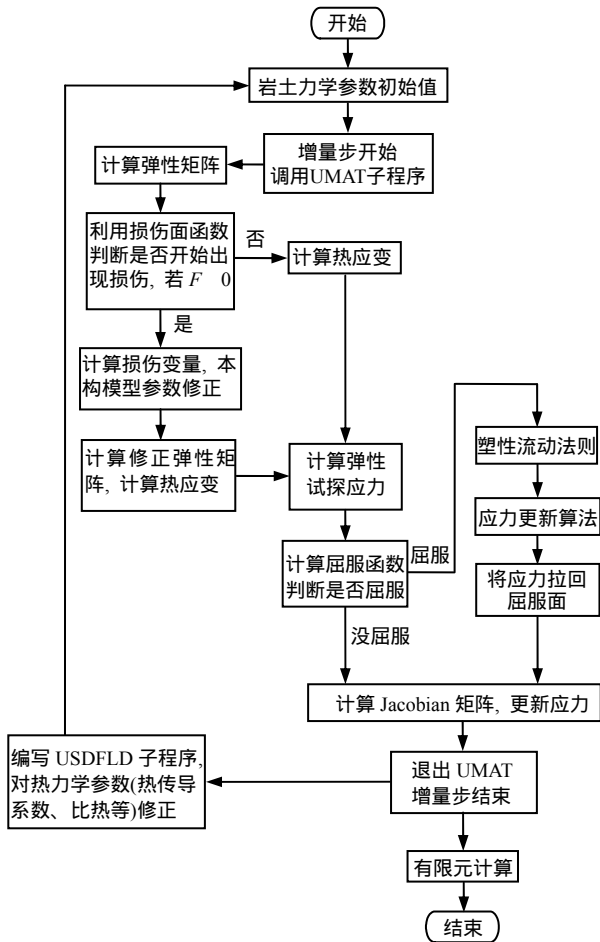


图 3 岩石热-弹塑性损伤程序二次开发流程  
Fig.3 Flow chart of secondary development of thermo-mechanical coupling model

### 4 岩石热-力完全耦合验证

取一理想的厚壁筒模型为研究对象(见图4),用来验证岩石热-力参数相互耦合的重要性。假设厚壁筒材料的破坏服从 Mohr-Coulomb 准则,当内摩擦角  $\varphi$  和膨胀角  $\phi$  均为 0,并且设定  $K(\theta)=1$  时,退化为 Mises 准则。厚壁筒材料的弹性模量  $E$  为 300 MPa,泊松比  $\mu$  为 0.25,热传导系数  $k_{10}$  为 2.1 W/(m·),比热  $c_{v0}$  为 800 J/(kg·),密度  $\rho$  为 2.3 g/cm<sup>3</sup>,屈服强度  $\sigma_c$  为 0.8 MPa,初始温度  $T_0$  为 20。为了凸显塑性应变对热力学参数的影响,将材料热膨胀系数  $\beta$  取为  $6.0 \times 10^{-5} 1/$ 。模型内半径为 0.5 cm,外半径为 5 cm,内壁温度为 120,外壁温度为 20。

分 2 种工况进行对比分析,工况 1:热-弹塑性力学分析,不考虑热-力参数之间的相互影响;工况 2:热-弹塑性力学分析,不计温度对材料力学参数的影响,仅考虑塑性应变对热传导系数和比热的影响。由于缺少试验数据,本文假设材料的热传导系数和比热均按如下公式进行动态演化:

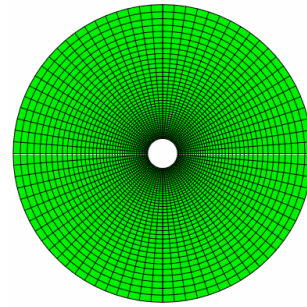


图 4 厚壁筒模型有限元网格  
Fig.4 Finite element meshes of thick cylinder

$$k_T = \begin{cases} 2.1, & \bar{\varepsilon}_{pl} < 1.0 \times 10^{-3} \\ 0.21 + \frac{(2.1 - 0.21)}{(1.0 \times 10^{-3} - 1.0 \times 10^{-2})} (\bar{\varepsilon}_{pl} - 1.0 \times 10^{-2}), & 1.0 \times 10^{-3} < \bar{\varepsilon}_{pl} < 1.0 \times 10^{-2} \\ 0.21, & \bar{\varepsilon}_{pl} > 1.0 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (11)$$

$$c_v = \begin{cases} 800, & \bar{\varepsilon}_{pl} < 1.0 \times 10^{-4} \\ 800 + \frac{(1600 - 800)}{(1.0 \times 10^{-2} - 1.0 \times 10^{-4})} (\bar{\varepsilon}_{pl} - 1.0 \times 10^{-4}), & 1.0 \times 10^{-4} < \bar{\varepsilon}_{pl} < 1.0 \times 10^{-2} \\ 1600, & \bar{\varepsilon}_{pl} > 1.0 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (12)$$

温度和等效塑性应变沿筒体径向分布曲线如图 5 所示。筒体发生塑性变形后,由于材料热传导系数降低以及比热的升高,导致筒体热传导能力降低,工况 2 中同一位置的温度明显小于工况 1,因此,岩石变形对材料的热力学参数的影响不可忽略,应予以重视。由于考虑了材料的热-力完全耦合效应,塑性应变也存在一定的差异,工况 2 的最大塑性应变略小于工况 1,塑性应变差异没有温度差异明显,这是因为算例仅考虑热传导系数和比热的动态演化,而未考虑材料力学参数的动态演化。因此,在岩石热-力耦合模型中,应当考虑材料的变形对热力学参数(如热传导系数、比热等)的影响,也应考虑温度场对岩石力学参数的影响,但从目前的文献调研发现,关于变形对岩石热力学参数影响的研究还不多见。

### 5 算例

#### 5.1 工程概况

近 10 多年来,随着西方工业发达国家核电等核工业的不断发展,大量高放废物亟待深埋处理,因此,评价高放废物处置库安全稳定性以及处理高放

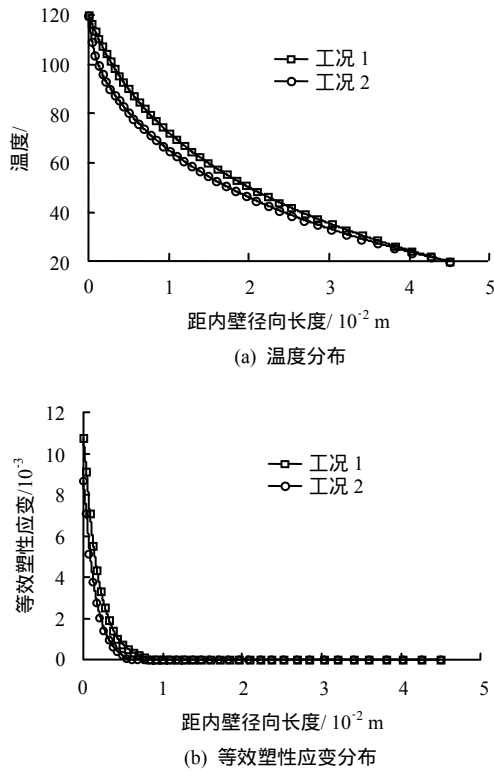


图 5 工况 1、2 计算结果比较

Fig.5 Comparison between case 1 and case 2

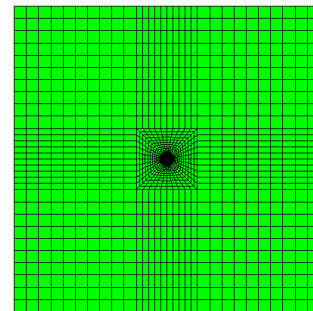
废物的选址等都要求对围岩热-力耦合问题进行深入细致的研究。

以某泥岩高放废物处置库工程为背景，试验隧洞埋深为 500 m，初始地应力为 10 MPa，侧压力系数为 0.7，初始温度为 30 。隧洞直径为 4.8 m，衬砌厚度为 0.4 m，开挖 1 d 后施加衬砌，隧洞内热源温度为 80 ，有限元分析模型如图 6 所示。

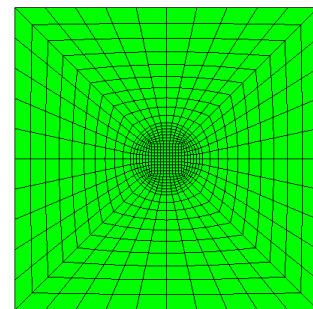
5.2 计算条件

假设隧洞开挖时围岩的载荷释放率为 30%，暂不考虑泥岩蠕变效应对开挖扰动区的影响。衬砌按

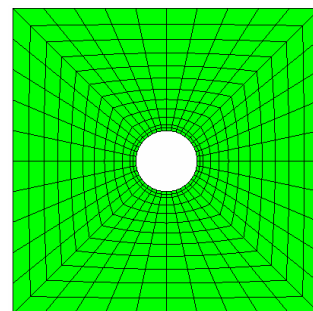
弹性材料看待，不考虑温度和应力对衬砌物理参数的影响。具体计算参数如表 1、2 所示。



(a) 整体模型



(b) 局部模型 (未开挖)



(c) 局部模型 (开挖支护后)

图 6 有限元计算模型

Fig.6 Finite element model

表 1 泥岩计算参数

Table 1 Material and model parameters of clay stone

$E$ /MPa	$\mu$	$\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	$c_{max}$ /kPa	$c_{min}$ /kPa	$c'_i$ /kPa	$\varphi$ /(°)	$\bar{\sigma}_{0c}$ /MPa <sup>1/2</sup>	$\beta_1$	$a_1$	$\alpha$	$\eta$	$\beta$	$k_{T0}$ /(W/(m·°C))	$c_{v0}$ /(J/(kg·°C))	$\bar{\epsilon}_{plmax}$
300	0.25	20	800	8	100	18	0.187	0.86	0.2	0.3	0.6	$1.0 \times 10^{-5}$	2.5	837	0.1

表 2 衬砌计算参数

Table 2 Material and model parameters of lining

$E$ /MPa	$\mu$	$\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	$\beta$	$k_T$ /(W/(m·°C))	$c_v$ /(J/(kg·°C))
30	0.3	25	$6.0 \times 10^{-6}$	2.2	993

相关室内试验研究表明：岩石的热传导系数基本上随着温度的升高而下降<sup>[12]</sup>，砂岩、黏土岩等沉

积岩在温度介于 20 ~ 300 时满足如下经验公式：

$$k_T = k_{T0} - (k_{T0} - 1.38) \left[ \exp\left(0.725 \frac{T - 20}{T + 130}\right) - 1 \right] \quad (13)$$

式中： $k_{T0}$  为 20 时所对应的初始热传导系数 (W/(m·°C))

Heuze 总结了岩石比热与温度的关系<sup>[13]</sup>，发现岩石的比热基本上随温度升高而增加，即

$$c_v = c_{v0} [1 + \varpi (T - 20)] \quad (14)$$

式中： $c_{v0}$  为 20 时所对应的初始比热； $\varpi$  为材料参数， $\varpi = 0.003$ 。

目前，由于缺乏试验数据，开挖扰动对岩石热传导系数和比热的影响还没有统一地认识，本文假设损伤致使围岩比热提高、热传导系数降低，采用如下模型进行描述（见图 7）：

$$\left. \begin{aligned} k_T(T, \Omega_m) &= k_D + [k_T(T) - k_D] \cdot [1 - (\Omega_m)^{a_k}] \\ c_v(T, \Omega_m) &= c_D - [c_D - c_v(T)] \cdot [1 - (\Omega_m)^{a_c}] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中： $\Omega_m$  为力学损伤； $k_D$ 、 $c_D$  分别为岩石完全损伤时的热传导系数和比热值，本文假设深埋隧洞围岩完全损伤后裂隙内充填了水，取  $k_D = 0.65 \text{ W/(m}\cdot\text{)}$ 、 $c_D = 4\,200 \text{ J/(kg}\cdot\text{)}$ ； $a_k$ 、 $a_c$  分别为模型参数，取  $a_k = 0.4$ 、 $a_c = 0.5$ 。

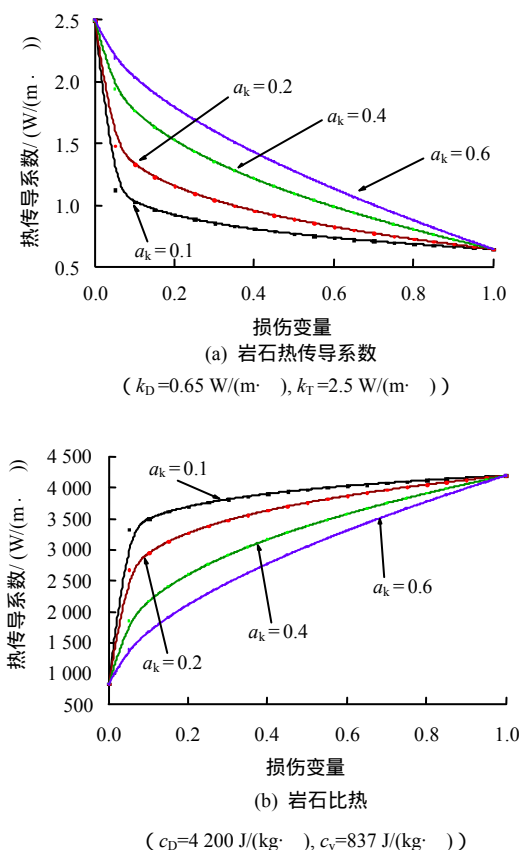


图 7 岩石热力学参数与损伤变量关系曲线  
Fig.7 Evolution curves of damage variable vs. thermo-dynamic parameters

在围岩扰动区，沿径向不同深度依次处于破碎区、损伤区和原岩应力区<sup>[14]</sup>，可以近似地用全应力-应变的不同应力-应变阶段来表示（弹性、硬化和软化阶段）。根据上述分析，岩石热力学参数演化也与

岩石应力-应变曲线相对应，3 条曲线相互一致并互相影响，由此实现了围岩的热-力耦合，如图 8 所示。目前，温度和损伤对岩石热膨胀系数和泊松比的影响还没有统一地认识，文中假设为常数。

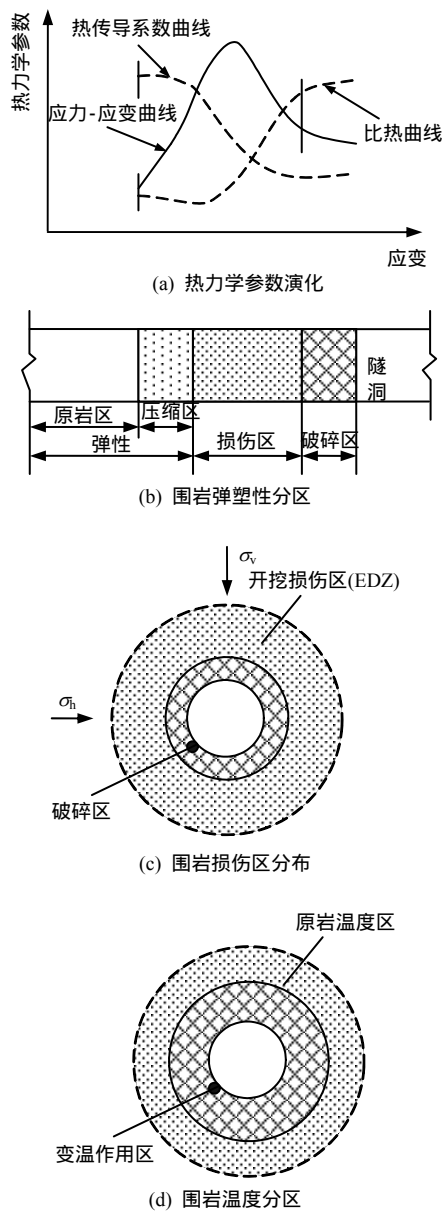


图 8 开挖引起的围岩扰动分区示意图  
Fig.8 Partition of surrounding rock due to excavation under different depths

### 5.3 计算结果分析

图 9 给出了隧洞围岩温度场在不同时间下的分布云图。隧洞内部热源的存在致使衬砌和围岩温度逐渐升高，在衬砌外围形成一个热套或调热圈，即图 8 所示的变温作用区；随着时间的增长，调热圈半径逐渐增大，施工 12 d 后围岩温度开始升高，施工 41 d 后，围岩温度约升高 10.7℃，调热圈厚度约为 5.6~6.6 m。



隧洞围岩力学损伤分布云图如图 10 所示。隧洞开挖后，弹性损伤区范围约为 1.6 m，塑性损伤范围约为 1.0 m，并且水平影响范围明显大于垂向；弹性损伤最大值约为 0.166，塑性损伤最大值约为 0.79，尽管隧洞内存在热源，但对力学损伤影响不明显，力学损伤随着时间的增大略有增加，但基本可以忽略。

围岩弹性模量随时间变化的分布云图如图 11 所示。开挖引起围岩应力重新分布，产生的力学损伤导致弹性模量明显降低，此后，随着调热圈的逐渐扩大，弹性模量影响区的范围也随之扩大，围岩弹性模量逐渐降低。

围岩黏聚力分布云图如图 12 所示。由于开挖损伤的影响，隧洞周边围岩黏聚力明显减小，最小值约为 107.4 kPa；此后，由于围岩温度逐渐上升，黏聚力逐渐减小，影响范围逐渐扩大，施工 41 d 后黏聚力最小值约为 94.91 kPa 施工 167 d 为 82.28 kPa。

围岩热传导系数分布云图如图 13 所示。由于开挖损伤的影响，热传导系数明显降低，随着围岩温度的上升以及调热圈的逐渐扩大，围岩的热传导系数也随之降低，并且影响范围也逐步扩大；施工完成 167 d 后，围岩热传导系数影响范围约为 1.0~1.5 m，热传导系数最小值约为 0.78 W/(m·)，约为原岩热传导系数的 0.31 倍。

围岩比热分布云图如图 14 所示，可以发现，开挖后由于损伤的影响，比热值明显增大，最大值约为 3 829 J/(kg·)；此后，随着围岩温度的上升以及调热圈的逐渐扩大，围岩的比热也随之增大，并且影响范围也逐步扩大，167 d 后比热最大值约为 3 873 J/(kg·)，约为原岩热传导系数的 4.5 倍。

计算模型同上，下面以隧洞开挖 167 d 为例，说明式 (15) 对隧洞围岩温度场和应力场的影响。根据上述分析可知，不考虑式 (15)，表明力学损伤对围岩热力学参数无影响，考虑该式表明力学损伤影响围岩的热力学参数。

图 15、16 分别为温度和热损伤沿隧洞围岩径向的分布曲线，从中可以发现，力学损伤对围岩的温度场分布有明显的影 响，围岩内的温度大小和热损伤明显低于不考虑力学损伤时的情况。此外，经过计算发现，由隧洞开挖所产生的力学损伤和塑性应变受后期升温效应和岩石热力学参数演化的影响较小，基本可以忽略。

图 17、18 分别为弹性模量和黏聚力沿隧洞围岩径向的分布曲线。与不考虑力学损伤对热力学参数影响的情况相比，前者的弹性模量和黏聚力均高于后者，并且围岩同一位置处弹性模量之间的差异大于黏聚力之间的差异，说明弹性模量对热力学参数影响的敏感程度高于黏聚力。

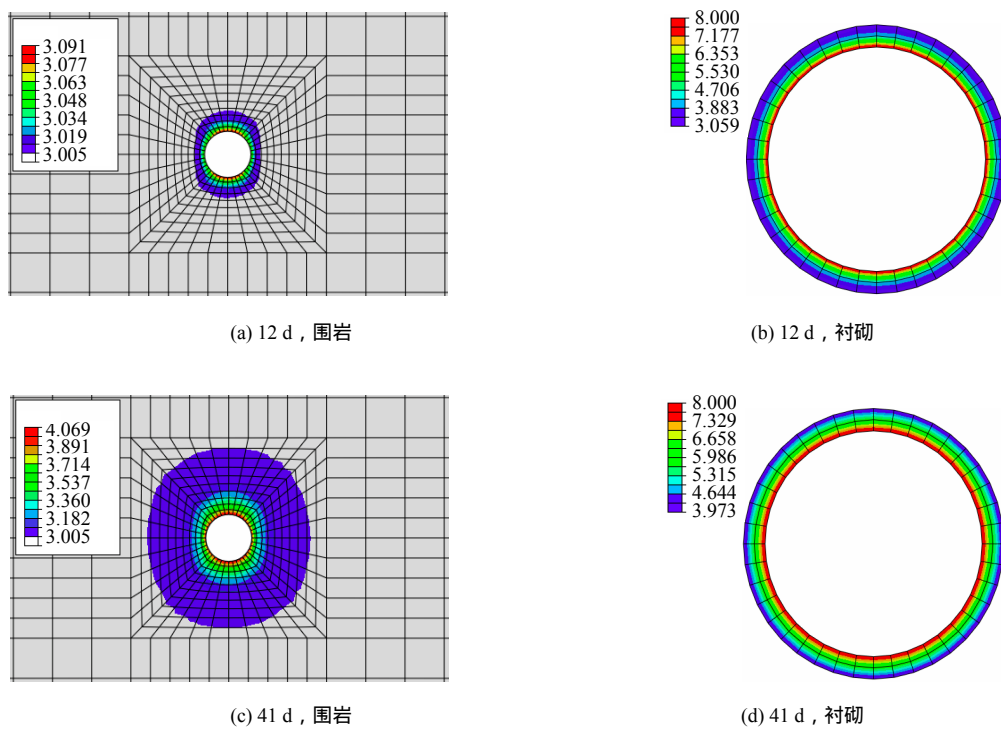


图 9 隧洞变温作用区随时间的演化 (单位: )  
Fig.9 Temperature distribution around gallery (unit: )

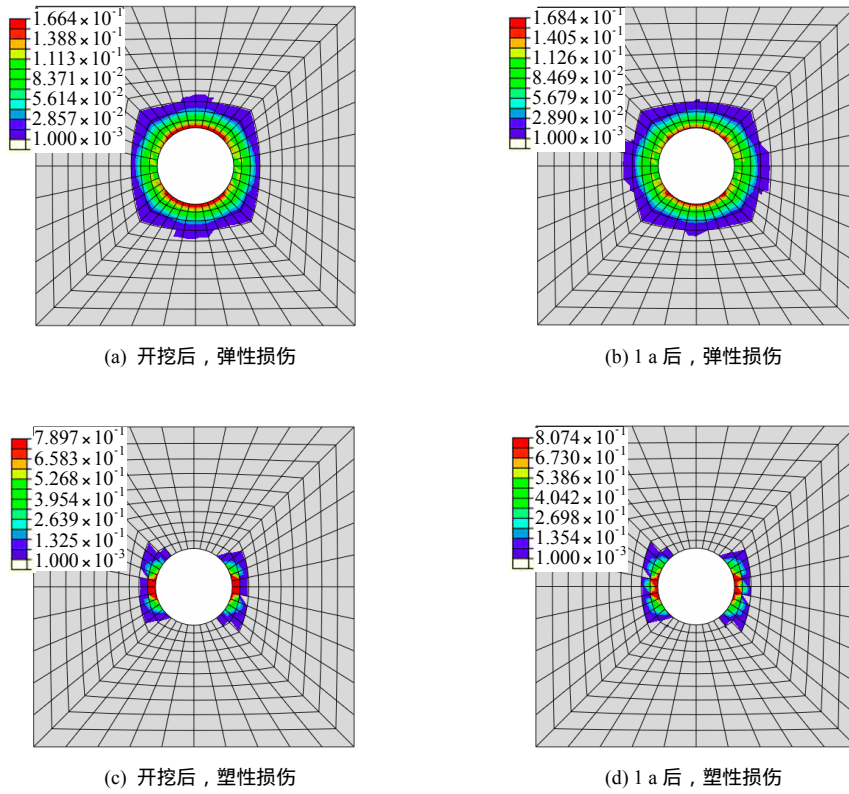


图 10 隧洞围岩力学损伤分布云图

Fig.10 Nephograms of mechanical damage distributions around gallery after tunnel excavation

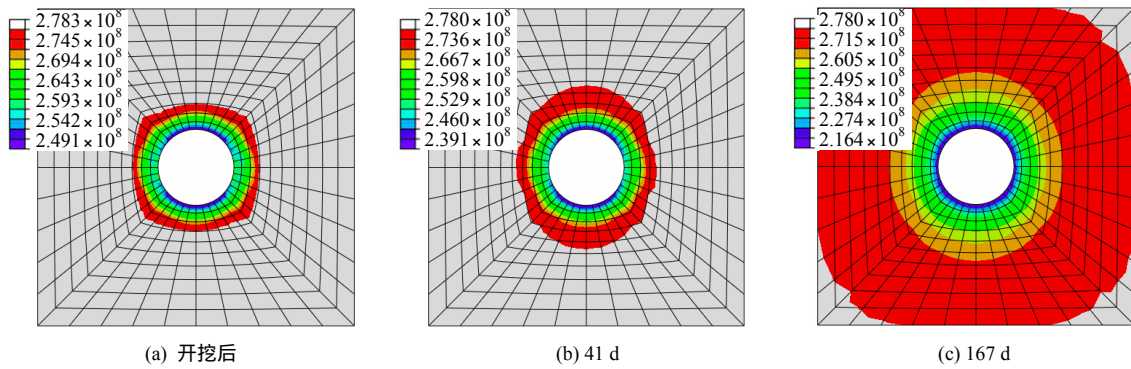


图 11 围岩弹性模量分布随时间的演化 (单位: Pa)

Fig.11 Evolutions of elastic modulus of surrounding rock mass with time (unit: Pa)

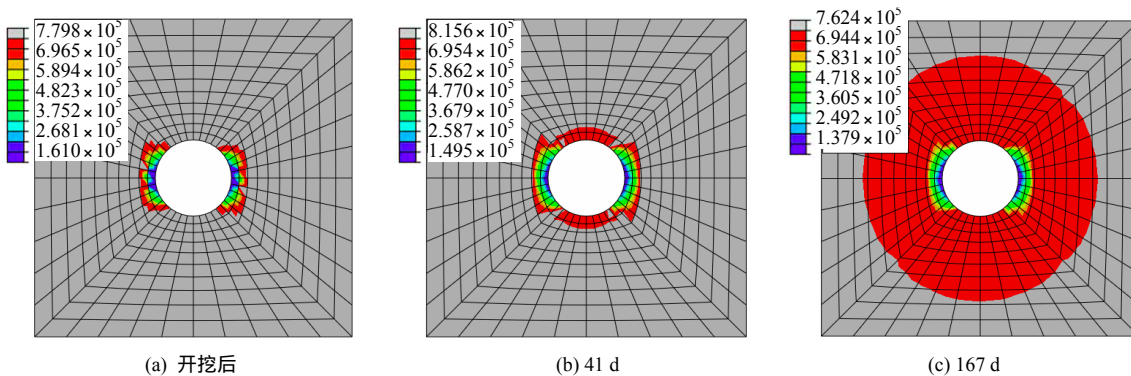


图 12 围岩黏聚力分布随时间的演化 (单位: Pa)

Fig.12 Evolutions of cohesive strength of surrounding rock mass with time (unit: Pa)



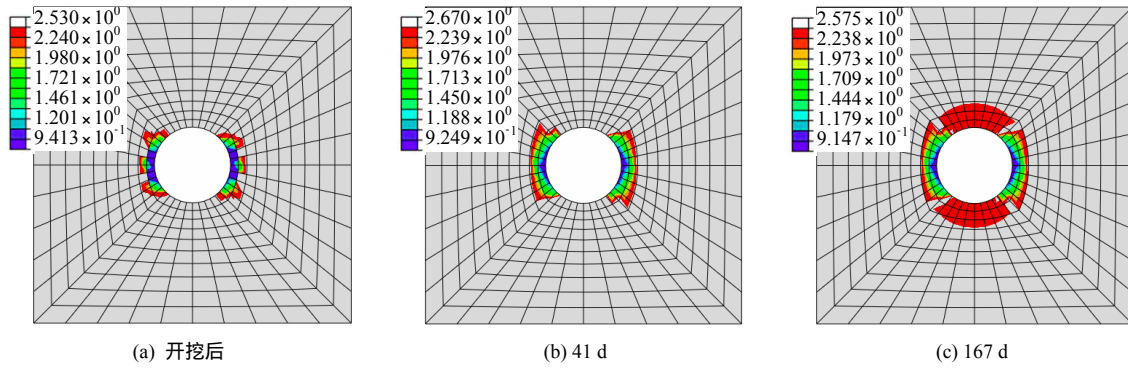


图 13 围岩热传导系数分布随时间的演化 (单位:  $W/(m \cdot ^\circ C)$ )

Fig.13 Evolutions of heat conduction coefficient of surrounding rock mass with time (unit:  $W/(m \cdot ^\circ C)$ )

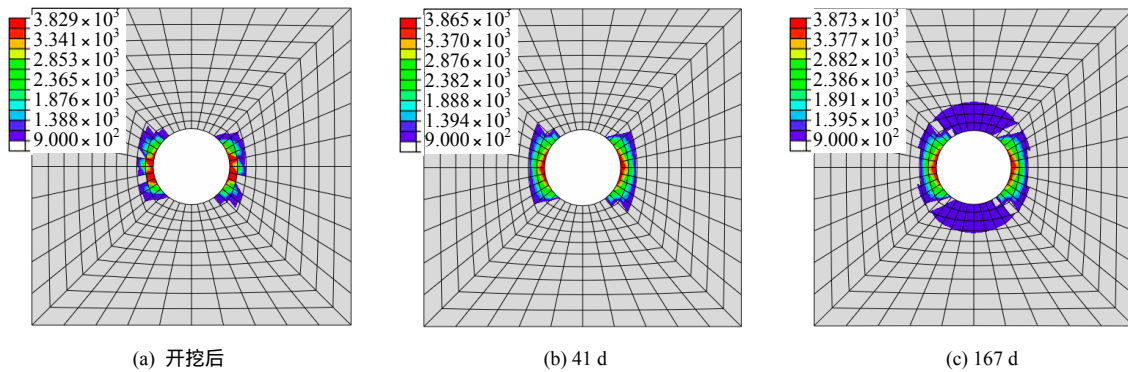


图 14 围岩比热分布随时间的演化 (单位:  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ )

Fig.14 Evolutions of specific heat of surrounding rock mass with time (unit:  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ )

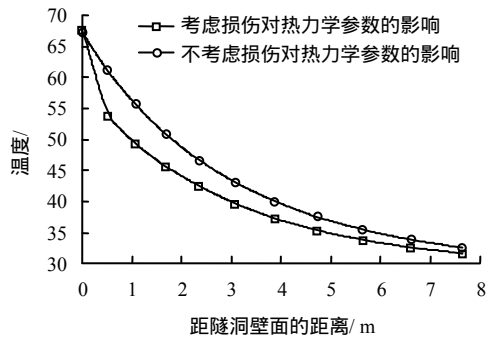


图 15 温度沿隧洞围岩径向的分布曲线  
Fig.15 Temperature distributions of gallery

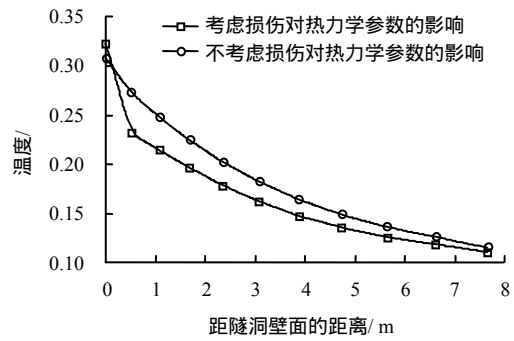


图 16 热损伤沿隧洞围岩径向的分布曲线  
Fig.16 Temperature damage distributions of gallery

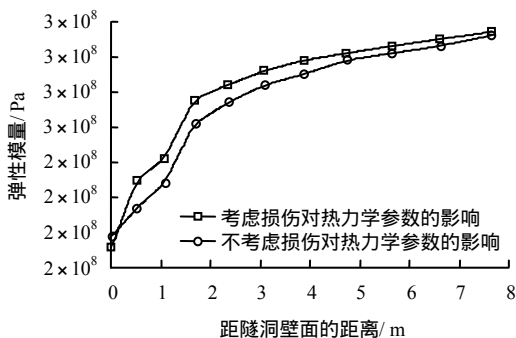


图 17 弹性模量沿隧洞围岩径向的变化曲线  
Fig.17 Elastic modulus distributions of gallery

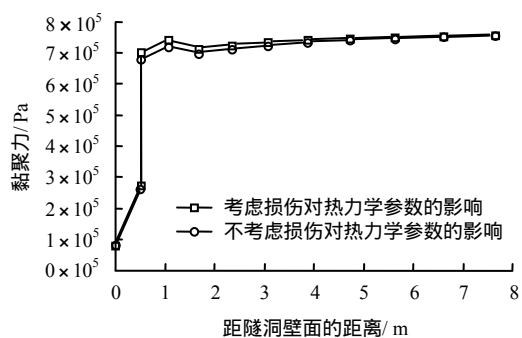


图 18 黏聚力沿隧洞围岩径向的变化曲线  
Fig.18 Cohesion strength distributions of gallery

## 6 结 论

(1) 根据已有试验的规律性认识,以热力学和弹塑性力学理论为基础,基于修正的 Mohr-Coulomb 准则,建立了岩石热-应力-损伤耦合模型及其参数演化方程,并在 ABAQUS 软件系统中加以实现。

(2) 对厚壁筒热-力耦合过程进行了数值模拟,结果表明,热力学参数的演化对岩石温度场和应力场有明显的影 响,塑性变形或损伤对材料的热力学参数的影响不可忽略。

(3) 对某深埋软岩隧洞围岩温度场及开挖损伤的演化过程的模拟结果表明:温度的存在很显著地影响了围岩的各种力学响应,热应力诱发的岩石力学性能明显劣化,需要考虑损伤和温度场对岩石热力学参数的影响;所建立耦合模型可以有效地反映开挖损伤演化、温度演化以及调热圈的演化、热力学参数的演化。

(4) 岩石的热-应力-损伤耦合分析是一个强非线性问题,耦合过程十分复杂,由于缺乏有代表性的现场测试成果,本文暂未对耦合模型的准确性进行验证,这也是笔者下一步要开展的工作。

### 参 考 文 献

- [1] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京: 科学出版社, 2010, 311 - 329.
- [2] MIAO S K, WANG M L. An elastoplastic damage model for concrete subjected to sustained high temperatures[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1997, 6(2): 195 - 216.
- [3] 徐燕萍, 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下的岩石热弹塑性本构方程的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 527 - 529.  
XU Yan-ping, LIU Quan-sheng, XU Xi-chang. The research on the thermo-elasto-plastic equation of the rock under the temperature effect[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2001, 20(4): 527 - 529.
- [4] 陈剑文, 杨春和, 高小平, 等. 盐岩温度与应力耦合损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1986 - 1991.  
CHEN Jian-wen, YANG Chun-he, GAO Xiao-ping, et al. Study of the coupled damage of temperature and mechanics for salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(11): 1986 - 1991.
- [5] 于庆磊, 郑超, 杨天鸿, 等. 基于细观结构表征的岩石破裂热-力耦合模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 42 - 51.  
YU Qing-lei, ZHENG Chao, YANG Tian-hong, et al. Meso-structure characterization based on coupled thermal-mechanical model for rock failure process and applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 42 - 51.
- [6] 孙可明, 赵阳升, 杨栋. 非均质热弹塑性损伤模型及其在油页岩地下开发热破裂分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 42 - 52.  
SUN Ke-ming, ZHAO Yang-sheng, YANG Dong. Thermoelastoplastic damage model of heterogeneous medium and its application to thermal cracking analysis of oil shale in underground mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 42 - 52.
- [7] 白冰. 核废料储库周边介质热力耦合数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1989 - 1993.  
BAI Bing. Thermo mechanical coupling analysis of nuclear waste repository[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1989 - 1993.
- [8] 刘文岗, 王驹, 周宏伟, 等. 高放废物处置库花岗岩热-力耦合模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 2875 - 2883.  
LIU Wen-gang, WANG Ju, ZHOU Hong-wei, et al. Coupled thermo-mechanical analysis of granite for high-level radioactive waste repository[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 2875 - 2883.
- [9] 贾善坡. Boom Clay 泥岩渗流应力损伤耦合流变模型、参数反演与工程应用[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [10] 贾善坡, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 泥岩弹塑性损伤本构模型及其参数辨识[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3608 - 3614.  
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, et al. Parameter identification of new elastoplastic damage constitutive model for claystone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3608 - 3614.
- [11] 张娟. 循环硬化材料高温非比例循环棘轮行为的本构描述及其有限元实现[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [12] 康健. 岩石热破裂的研究及应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2008, 97 - 161.
- [13] HUEZE F E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-a review[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(1): 3 - 30.
- [14] 许兴亮, 张农, 曹胜根. 动压巷道围岩渗流场的空间分布特征[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 163 - 168.  
XU Xing-liang, ZHANG Nong, CAO Sheng-gen. Seepage space features of roadway surrounding rock affected by dynamical pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(2): 163 - 168.