

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.06.004

# 考虑围压影响的盐岩弹塑性损伤本构模型研究

贾善坡<sup>1,2</sup>, 罗金泽<sup>1</sup>, 杨建平<sup>3</sup>, 高 敏<sup>1</sup>, 龚 俊<sup>1</sup>

(1. 长江大学 岩土力学与工程研究中心, 湖北 荆州 434023; 2. 中石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北 任丘 062552;  
3. 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, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 深入研究盐岩受力变形、破坏机制及力学模型, 对于保证油气地下储库的安全和稳定具有十分重要的意义。以盐岩在多组围压下的三轴试验为基础, 由热力学定律出发, 将损伤引入到改进的摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则中, 提出了与围压相关的损伤准则和塑性硬化函数, 建立了一种能够描述盐岩力学特性的弹塑性损伤模型, 该模型能够反映盐岩的塑性与损伤耦合、应变硬化-软化和围压影响。将研究成果与 ABAQUS 软件相结合, 通过二次开发, 编制了相应的计算程序。通过模拟盐岩室内三轴压缩试验表明, 数值模拟曲线与试验曲线吻合较好, 所建立的力学模型可以较好地描述盐岩在不同围压状态下的力学损伤发展、应变硬化-软化以及脆-塑性转换的力学特征。

**关 键 词:** 盐岩; 围压; 力学模型; 损伤准则; 改进摩尔-库仑准则

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)04-1549-09

## An elastoplastic damage constitutive model for salt rock considering confining pressure effect

JIA Shan-po<sup>1,2</sup>, LUO Jin-ze<sup>1</sup>, YANG Jian-ping<sup>3</sup>, GAO Min<sup>1</sup>, GONG Jun<sup>1</sup>

(1. Research Center of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield, CNPC, Renqiu, Hebei 062552, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Further study of the mechanism and law of salt rock deformation and breakage has great significance for the safety and stability of the gas storage. Based on the triaxial compression test under different confining pressures, a new elastoplastic damage model with improved Mohr-Coulomb criterion is presented in the framework of the irreversible thermodynamics and nonlinear continuum mechanics, which can depict the confining pressure effect, hardening and softening behaviours of salt rock. In this model, the mechanical damage criterion and hardening function highly depend on the stress state. The solution process for the coupled model is studied using finite element method and the corresponding computer code is developed on the ABAQUS solver. The numerical simulation under various stress states shows that the numerical simulations perfectly agree with the experimental data; and the proposed model is able to effectively depict the main features of mechanical behaviors of salt rock.

**Keywords:** salt rock; confining pressure; mechanical model; damage criterion; improved Mohr-Coulomb criterion

## 1 引 言

能源作为国家的经济命脉, 事关经济和国家安全, 具有重要的战略意义。盐岩由于具有孔隙度低、渗透率小、损伤自修复和塑性变形能力强等优良特性, 被公认为石油和天然气储备的理想场所。我国地下盐岩资源十分丰富, 分布范围广, 具有良好的建设地下能源储存的地质条件, 在苏北、苏南、安徽、山东、江西、四川、湖南、广东、河南、新疆、

云南、青海等地均有大型盐岩矿层。为了解决在“西气东输”和“川气东输”等工程中天然气储存和调峰问题, 中石油和中石化等相关单位已开始江苏金坛、湖北云应、江苏淮安、湖北潜江、河南平顶山、安徽定远等地启动相关的研究工作。为了合理评价盐岩油气储库的稳定性, 为安全设计、施工和运行提供科学依据, 对盐岩的力学响应进行深入研究并提出能合理反映其变形和破坏特性的力学模型, 是工程中迫切需要解决的关键问题<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2013-11-18

基金项目: 中国石油科技创新基金(No.2011D-5006-0603); 国家自然科学基金资助项目(No.41102182); 中国博士后科学基金资助(No.2014M551055); 湖北省自然科学基金(No.2015CFB194)。

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

对于盐岩的力学行为，研究已经取得了一定的成就，不少力学模型已经建立，主要是根据盐岩在单轴和三轴应力作用下不考虑时间效应所进行的试验和理论分析研究，建立盐岩的强度与变形理论。Ahmad<sup>[2]</sup>采用细观和宏观相结合的方法对盐岩的力学特性进行了研究；吴文等<sup>[3]</sup>基于 Desai 提出的扰动概念模型，建立了三维应力状态的盐岩损伤本构模型；王同涛等<sup>[4]</sup>考虑到盐岩在三轴压缩和拉伸应力状态下破坏强度的差别较大，对盐岩破坏的 Mohr-Coulomb 准则进行修正，得到改进的 Mohr-Coulomb 准则；房敬年等<sup>[5]</sup>提出了一种能够描述岩盐特性的弹塑性损伤耦合的模型，该模型考虑了岩盐损伤演化和塑性变形的耦合；刘新荣等<sup>[6]</sup>根据芒硝变形特性，提出了以岩石塑性应变作为微元统计分布变量，建立了能够反映岩石应变硬化特征的损伤统计本构模型；汤艳春等<sup>[7]</sup>采用应变硬化-软化模型来描述无溶蚀作用下岩盐塑性力学行为，在考虑黏聚力随溶蚀作用发生变化的前提下，建立盐岩塑性力学模型。

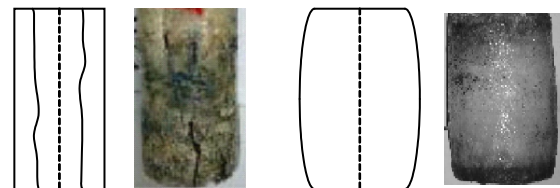
相关研究表明<sup>[8]</sup>，盐岩的力学特征与围压特征相关，损伤和塑性机制并存且相互耦合，然而，现有的盐岩力学模型尚不能全面地反映盐岩在不同围压状态下的应变硬化、软化以及脆-塑性转换的力学特征。本文根据盐岩单轴和三轴室内试验成果，采用与围压相关的塑性软化函数和力学损伤准则，建立考虑围压影响的盐岩弹塑性损伤力学模型，并通过室内三轴和数值模拟试验验证所建立模型的合理性和适用性。

## 2 盐岩三轴压缩试验结果分析

盐岩试样取自湖北云应矿区，对盐岩进行了单轴压缩和等围压三轴压缩试验，盐岩的破坏特征如图 1 所示。盐岩在单轴压缩下以横向张拉劈裂破坏为主，主要是由于抗拉强度过低造成的；当围压超过 5 MPa 时，盐岩的破坏形式为横向膨胀破坏，且没有出现明显的破裂面，由此可见，围压的存在限制了盐岩内部裂隙损伤的产生和发展，阻止了盐岩晶体颗粒间的相对滑移，塑性变形能力得到了提高。

从盐岩压缩应力-应变曲线可以看出（见图 2），盐岩在单轴时表现为一定的脆性特性和应变软化特性，随着围压的增加，盐岩逐渐由脆性变形特征转变为塑性变形特征；当围压为 5 MPa 时，盐岩出现明显的塑性流动，塑性变形是其内部晶体颗粒滑移变形的宏观综合反映；当围压大于 5MPa 时，盐岩表现为明显的应变硬化特性，且随着围压的增加，

盐岩的塑性变形能力逐步提高。此外，根据 Farmer 等的研究<sup>[9]</sup>，当围压大于 3.5 MPa 时，盐岩不再出现应变软化现象；刘新荣等<sup>[6]</sup>针对芒硝盐岩的试验成果表明，当围压在 5 MPa 以上时，芒硝盐岩已由单轴压缩时的应变软化特性转化为应变硬化特性；刘江等<sup>[8, 10]</sup>针对层状盐岩的试验成果也显示出类似的脆-塑性转换特征，临界围压为 5 MPa。由此可见，盐岩试样的三轴压缩应力-应变曲线及屈服破坏特征均表现出明显的围压相关性，可以采用脆-塑转换特性描述。



(a) 单轴破坏形态 (b) 三轴破坏形态

图 1 盐岩破坏形态示意图

Fig.1 Sketch of failure pattern for salt rock

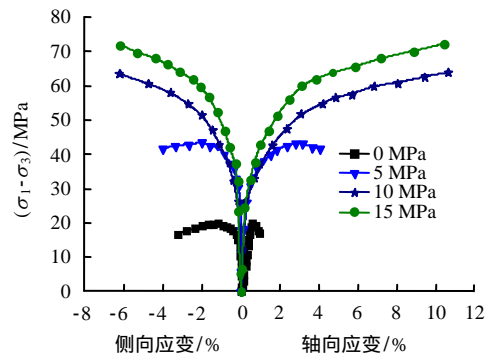


图 2 不同围压下盐岩全应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves at different confining pressures

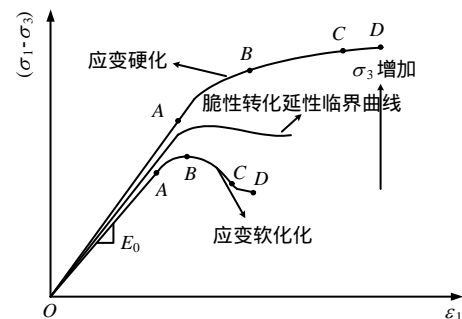


图 3 盐岩应力-应变曲线分段示意图

Fig.3 Stress-strain curves of salt rock in different stages

在本次试验中，围压大于 5 MPa 时盐岩不再产生应变软化现象。根据试验结果可将盐岩应力-应变过程分为 4 个阶段（见图 3）：OA 段为弹性变形阶

段,  $A$  的应力为初始屈服应力  $\sigma_c^0$ ;  $AB$  段为应变硬化阶段, 岩石内部微裂隙开始产生、扩展;  $BC$  段, 围压小于 5 MPa 时为应变软化, 围压为 5 MPa 时为塑性流动, 围压大于 5 MPa 时为应变硬化;  $CD$  段为塑性流动阶段, 随着塑性变形的持续发展, 最终强度不再降低, 达到破碎、松动的残余强度。

### 3 考虑围压的盐岩弹塑性力学模型

#### 3.1 热力学框架

根据损伤力学理论, 盐岩存在一个热力学势, 其损伤过程与其塑性变形耦合在一起, 弹塑性损伤模型便是在使用内变量的连续热动力学理论框架下推导形成的。假定是各向同性热力学过程, Helmholtz 自由能  $\psi$  表示为总应变张量  $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、塑性应变张量  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 、损伤变量  $d$  和累积塑性应变  $\boldsymbol{\varepsilon}^{ep}$  的形式, 根据热力学第 1 定律, 自由能  $\psi$  可以表示为弹性部分  $\psi^e$  和塑性部分  $\psi^p$  之和<sup>[11]</sup>, 即

$$\psi = \psi^e + \psi^p = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) : \mathbf{C}(d) : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) + \psi^p(\boldsymbol{\varepsilon}^{ep}, d) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{C}(d)$  为有效弹性刚度张量;  $\psi^p$  为塑性能, 为  $\boldsymbol{\varepsilon}^{ep}$  和  $d$  的函数;  $\boldsymbol{\varepsilon}^{ep}$  用来描述塑性软、硬化过程。

热力学伴随量可由标准的热力学势能的偏导数形式给出, 即

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^e}, Y_d = -\frac{\partial \psi}{\partial d}, Y_p = \frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{ep}} \quad (2)$$

式中:  $Y_d$  为对应于损伤变量  $d$  的热力学伴随量;  $Y_p$  为对应于塑性应变  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$  的热力学伴随量。

根据热力学第 2 定律, 状态变量的演化方程满足 Clausius-Duhem 不等式<sup>[12]</sup>, 即塑性流动和损伤发展必须满足以下不等式:

$$\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p + Y_d \dot{d} - Y_p \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{ep} \geq 0 \quad (3)$$

盐岩存在的耗散势  $\Omega$  可分解为塑性部分  $\Omega^p$  和损伤部分  $\Omega^d$ , 即

$$\Omega = \Omega^p + \Omega^d \quad (4)$$

式中:  $\Omega^p = \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}^p - Y_p \boldsymbol{\varepsilon}^{ep}$ ;  $\Omega^d = Y_d d$ 。

根据 Voyiadjis 等<sup>[13]</sup>提出的方法, 定义目标函数为

$$\Pi = \Omega - \dot{\lambda}_p g^p - \dot{\lambda}_d g^d \quad (5)$$

式中:  $\dot{\lambda}_p$ 、 $\dot{\lambda}_d$  分别为塑性乘子;  $g^p$ 、 $g^d$  分别为塑性耗散势能和损伤耗散势能。

根据最大耗散原理, 可得损伤演化准则<sup>[11]</sup>:

$$\dot{d} = \dot{\lambda}_d \frac{\partial g^d}{\partial Y_d} \quad (6)$$

类似于塑性屈服面, 假定在热力学广义力空间中存在一个损伤面  $f^d$ , 当应力状态点落在损伤面时, 损伤会继续发展, 损伤面在变形的过程中将随着损伤的增加而扩展, 即

$$f^d(Y_d, d) = 0 \quad (7)$$

因此, 损伤一致性条件可表示为

$$\dot{f}^d = \frac{\partial f^d}{\partial Y_d} \dot{Y}_d + \frac{\partial f^d}{\partial d} \dot{d} \quad (8)$$

#### 3.2 力学损伤的定义

损伤的过程实质上是能量耗散过程或不可逆热力学过程, 损伤演化方程可以借助损伤耗散势函数得到。在应变空间内定义一个能量指标为<sup>[14]</sup>

$$\tau = \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} C_{ijkl} \boldsymbol{\varepsilon}_{kl}} / \chi_d \quad (9)$$

式中:  $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$  为应变张量;  $C_{ijkl}$  为弹性矩阵;  $\chi_d$  用来反映应力状态对损伤状态的影响, 即

$$\chi_d(I) = \left| \frac{P + \sigma_c}{\sigma_c} \right|^\alpha \quad (10)$$

式中:  $P = \text{tr} \boldsymbol{\sigma} / 3$  为平均应力;  $\sigma_c$  为材料单轴抗压强度;  $\alpha$  为模型参数。

损伤的发展可以通过下面的损伤准则来确定:

$$f^d(\tau, d) = D_u \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\langle \tau - \tau_0 \rangle}{\beta \tau_0}\right) \right] - \frac{d}{d_c} \geq 0 \quad (11)$$

式中:  $D_u$  为材料破坏时达到的损伤终值;  $\tau_0$  为损伤发生阈值;  $\beta$  为模型参数;  $d_c^0$  为单轴压缩条件下的损伤终值。

假设盐岩脆-塑性转化的临界围压为  $P_c^0$ , 随着围压的增大,  $D_u$  将逐渐减小, 损伤对应应变硬化的影响将有减小的趋势,  $D_u$  的演化方程定义如下(见图 4):

$$D_u = \begin{cases} 1 - \left(\frac{P_c}{P_c^0}\right)^\gamma & 0 \leq P_c \leq P_c^0 \\ 0 & P_c > P_c^0 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\gamma$  为模型参数,  $0 < \gamma < 1$ ;  $P_c = \langle \sigma_3 \rangle$ ,  $\sigma_3$  为第 3 主应力, 在本文中体现为围压。

采用关联的耗散准则, 于是有  $f^d = g^d$ , 假定损伤流动与损伤势函数的梯度方向相同, 增量损伤变量可以写为

$$\dot{d} = \dot{\lambda}_d \frac{\partial g^d}{\partial \tau} \quad (13)$$

式中:  $\dot{\lambda}_d \geq 0$  为损伤乘子。

损伤势函数的相容方程为

$$\dot{g}^d = \frac{\partial g^d}{\partial \tau} \dot{\tau} + \frac{\partial g^d}{\partial d} \dot{d} = 0 \quad (14)$$

于是可得到

$$\lambda_d = - \frac{\frac{\partial g^d}{\partial \tau} d\tau}{\frac{\partial g^d}{\partial d} \frac{\partial g^d}{\partial \tau}} \quad (15)$$

最后得到损伤演化方程为

$$\dot{d} = - \frac{\frac{\partial g^d}{\partial \tau} d\tau \frac{\partial g^d}{\partial \tau}}{\frac{\partial g^d}{\partial d} \frac{\partial g^d}{\partial \tau}} \quad (16)$$

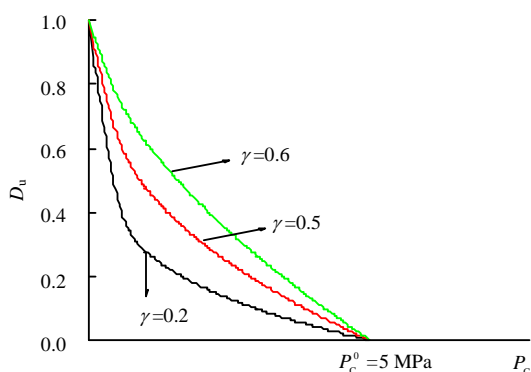


图 4 损伤变量与围压的关系曲线

Fig.4 Relation curve of damage variable vs. confining pressure

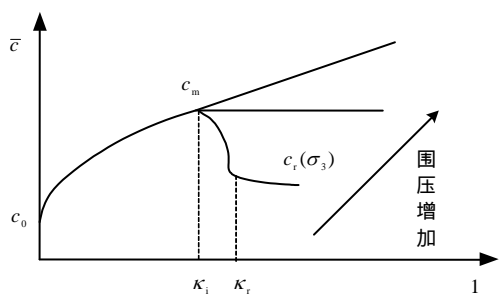


图 5 黏聚力演化曲线

Fig.5 The evolution curve of cohesive strength

### 3.3 塑性力学行为

为了考虑围压对盐岩强度、硬化及软化行为的影响，定义广义等效塑性应变  $\kappa$ ，即

$$\kappa = \frac{\varepsilon^{ep}}{\chi_p} = \frac{\int \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij}^p : d\varepsilon_{ij}^p}{\chi_p(P_c)} \quad (17)$$

式中： $d\varepsilon_{ij}^p$  为塑性应变增量； $\chi_p$  为围压  $P_c$  的函数， $\chi_p$  可取如下方程描述：

$$\chi_p(I) = A_1 + A_2 \left( \frac{P_c}{\sigma_c} \right) \quad (18)$$

式中： $A_1$ 、 $A_2$  为待定参数。

为描述盐岩的脆-塑性转换力学特性 根据试验结果，假设材料内摩擦角保持不变，黏聚力的演化方程可定义为（见图 5）

$$c(\kappa) = \begin{cases} c_0 + (c_m - c_0) \left( \frac{\kappa}{\kappa_i} \right)^\eta & \kappa < \kappa_i \\ c_m + \left( \frac{c_r - c_m}{\kappa_r - \kappa_i} \right) \cdot (\kappa - \kappa_i) & \kappa_i < \kappa < \kappa_r \\ c_r & \kappa > \kappa_r \end{cases} \quad (19)$$

式中： $\kappa_i$  为脆-塑性转换临界点； $\kappa_r$  为残余塑性流动初始点； $\eta$  为模型参数，用于控制塑性应变对应硬化速度的控制。 $c_0$  为初始屈服强度； $c_m$  为峰值强度； $c_r$  为终值强度，为围压的函数，可表示为

$$c_r(I) = c_r^0 [1 + A_3 P_c + A_4 P_c^2] \quad (20)$$

式中： $c_r^0$  为单轴压缩条件下材料残余强度； $A_3$ 、 $A_4$  为模型参数。

刘江等<sup>[8, 10]</sup>分别选定应城盐矿和金坛盐矿为示范工程，对两盐矿的盐岩试样的短期强度和变形特征进行试验研究，结果表明，两地盐岩的强度均符合 Mohr-Coulomb 破坏准则。考虑到盐岩在三轴压缩和拉伸应力状态下破坏强度的差别较大，本文对盐岩破坏的 Mohr-Coulomb 准则进行修正。常规的 Mohr-Coulomb 是一个压剪型的屈服准则<sup>[15]</sup>，不适用拉剪型应力状态，用它预测的锥顶处的  $I_1^*$  值远大于试验值  $\sigma_t$ （抗拉强度）。采用双曲线方程对拉伸型 Mohr-Coulomb 屈服准则和剪切型 Mohr-Coulomb 屈服准则进行拟合（见图 6），即

$$f = \frac{I_1 \sin \varphi}{3} + \sqrt{J_2 K^2(\theta) + m^2 c^2 \cos^2 \varphi} - c \cos \varphi = 0 \quad (21)$$

式中： $I_1$ 、 $J_2$  分别为应力第 1 不变量和应力偏量第 2 不变量； $\varphi$  为内摩擦角； $\theta$  为 Lode 角； $K(\theta) = \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varphi \sin \theta$ ； $m$  为模型参数，通过调整参数  $m$  的大小来反映盐岩的抗拉强度的大小，同时，参数  $m$  可以修正屈服面上的尖顶，使尖角变得光滑，避免了数值计算的发散和收敛的缓慢。

Mohr-Coulomb 屈服面存在 6 个棱角这些奇异点，使数值计算困难，采取分段函数进行描述  $K(\theta)$ ，

在棱角处进行光滑连续的处理，并尽量接近原 Mohr-Coulomb 屈服面（见图 7）。当  $|\theta| \leq \theta_T$  时，在  $\pi$  平面屈服函数迹线不做处理，文中取  $\theta_T = 25^\circ$ ；当  $|\theta| > \theta_T$  时，对屈服函数的迹线进行光滑处理，即

$$K(\theta) = (A - B \sin 3\theta) \quad (22)$$

式中： $A = \frac{1}{3} \cos \theta_T \left( 3 + \tan \theta_T \tan 3\theta_T + \frac{1}{\sqrt{3}} \text{sign}(\theta) \cdot (\tan 3\theta_T - 3 \tan \theta_T) \sin \varphi \right)$ ，

$$B = \frac{1}{3 \cos 3\theta_T} \left( \text{sign}(\theta) \sin \theta_T + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \varphi \cos \theta_T \right)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta \geq 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases}$$

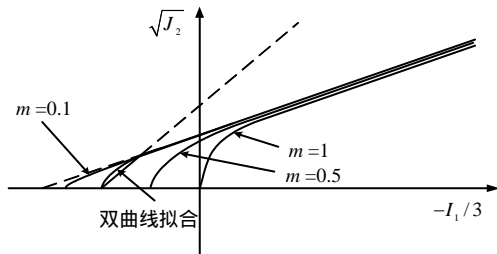


图 6 拟合的改进摩尔-库仑准则  
Fig.6 The improved Mohr-Coulomb yield criterion

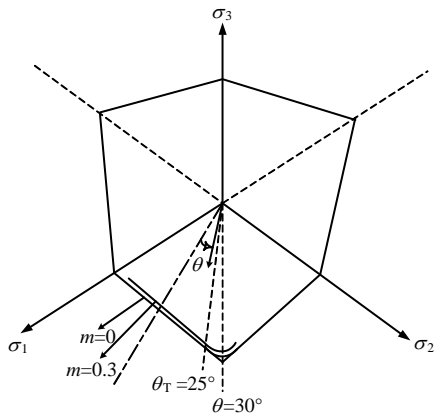


图 7  $\pi$ 平面上棱角的光滑处理  
Fig.7 Smooth treatment of Mohr-Coulomb criterion in the  $\pi$  plane

基于 Mohr-Coulomb 模型的弹塑性损伤屈服函数和势函数分别为

$$\left. \begin{aligned} f^p &= \frac{I_1}{3} \sin \varphi + \sqrt{J_2 K^2(\theta) + (1-d)^2 m^2 c^2 \cos^2 \varphi} - (1-d)c \cos \varphi \\ g^p &= \frac{I_1}{3} \sin \varphi + \sqrt{J_2 K^2(\theta) + (1-d)^2 m^2 c^2 \cos^2 \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中： $\phi$  为膨胀角。

## 4 弹塑性损伤模型积分算法

### 4.1 本构积分算法

采用完全隐式向后欧拉算法，给定  $t_n$  时刻应变增量  $\Delta \epsilon_{n+1}$ 、应力  $\sigma_n$ 、塑性内变量  $\kappa_n$  及损伤变量  $d_n$ ，求出  $t_{n+1}$  时刻的应力  $\sigma_{n+1}$ 、塑性内变量  $\kappa_{n+1}$  及损伤变量  $d_{n+1}$  等参数。模型的应力更新过程可以分为弹性预测、塑性修正和损伤修正 3 个步骤，此算法在应力空间的几何解释如图 8 所示。

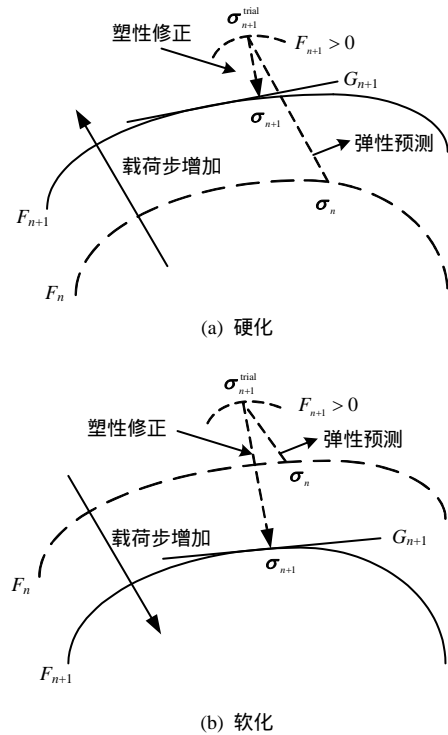


图 8 应力更新示意图  
Fig.8 The diagram of stress updating

#### (1) 弹性预测

步骤 按式 (11) 判断是否发生损伤，若  $f^d \leq 0$ ，计算  $t_n$  的损伤变量  $d_n$ 。

步骤 已知  $t_n$  时刻应变增量  $\Delta \epsilon_{n+1}$ 、应力  $\sigma_n$ ，计算弹性试探应力，即

$$\sigma_{n+1}^{\text{trial}} = \sigma_n + D_e^d : \Delta \epsilon_{n+1} \quad (24)$$

式中： $D_e^d$  为弹性损伤矩阵， $D_e^d = (1 - d_n) D_e^0$ ， $D_e^0$  为无损弹性矩阵。

在弹性预测内，内变量保持不变：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{n+1}^{\text{trial}} &= \lambda_n \\ \kappa_{n+1}^{\text{trial}} &= \kappa_n \\ d_{n+1}^{\text{trial}} &= d_n \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中： $\lambda$  为塑性算子。

(2) 塑性修正

步骤 检查屈服条件，即

$$f^p(\sigma_{n+1}^{trial}, \kappa_{n+1}^{trial}, d_{n+1}^{trial}) \begin{cases} < 0 & \text{弹性} \Rightarrow \sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{trial}, \text{转步骤} \\ > 0 & \text{塑性} \Rightarrow \text{塑性修正, 转步骤} \end{cases}$$

步骤 塑性修正过程中，应变增量  $\Delta \epsilon_{n+1}$  及损伤变量  $d_n$  保持不变，应力修正为

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{trial} - \Delta \lambda (D_e^d)_n : \left( \frac{\partial g^p}{\partial \sigma} \right)_{n+1} \quad (26)$$

塑性内变量修正为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{n+1} &= \lambda_n + \Delta \lambda \\ \kappa_{n+1} &= \kappa_n + \lambda_{n+1} \mathbf{B}(\sigma) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中： $\mathbf{B}(\sigma) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{\partial g^p}{\partial \sigma} : \frac{\partial g^p}{\partial \sigma} \right)$ 。

(3) 损伤变量修正

步骤 由式 (16) 第  $n+1$  步的损伤变量更新为

$$d_{n+1} = d_n + \Delta d \quad (28)$$

步骤  $t_{n+1}$  时刻应力张量更新为

$$\sigma_{n+1} = (D_e^d)_{n+1} : (\epsilon_n^e + \Delta \epsilon_{n+1} - \Delta \epsilon_{n+1}^p) \quad (29)$$

在隐式积分算法中，需要合适的切线模量，具体见文献[15]。

4.2 程序的二次开发

在上述研究的基础上，以 ABAQUS 软件为平台，对其进行了二次开发<sup>[16]</sup>，编制了材料本构子程序，计算分析流程如图 9 所示。

5 模型验证

本模型中共包含 16 个计算参数，尽管模型参数较多，但这些参数均可以通过室内三轴试验得到确定。在这些参数中， $E$ 、 $\mu$  为材料弹性参数； $\sigma_c$ 、 $c_r^0$ 、 $c_0$ 、 $c_m$ 、 $\varphi$  分别为材料强度参数； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $\eta$  为材料硬化或软化相关的参数； $\tau_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为与材料损伤相关的参数。确定过程依次为：

弹性参数  $E_0$ 、 $\mu$  可以直接从三轴试验峰前曲线获取；根据不同围压下的应力-应变曲线，采用拟合的方法，可确定  $c_0$ 、 $c_m$ 、 $\varphi$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ ；根据单轴压缩曲线，可确定  $\sigma_c$ 、 $\tau_0$ 、 $c_r^0$ ；广义等效塑性应变参数  $A_1$ 、 $A_2$  可通过拟合的方法获得<sup>[12]</sup>；其余待定参数通过反演法获得<sup>[9]</sup>。

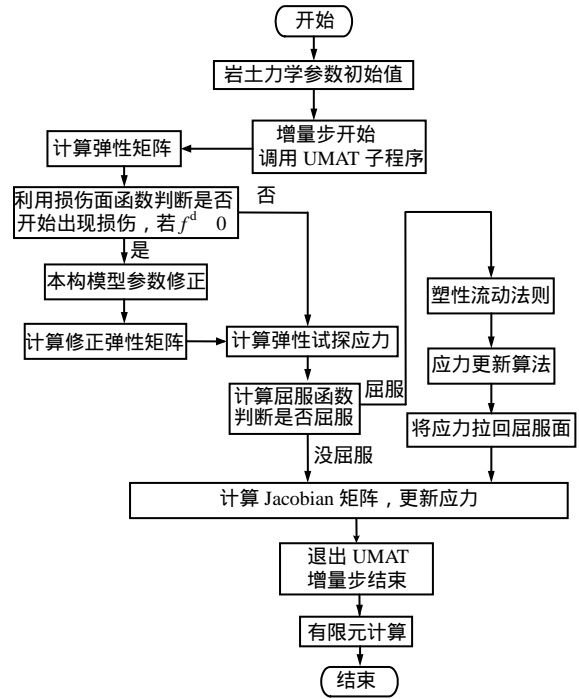


图 9 有限元程序二次开发流程图  
Fig.9 Flow chart of secondary development for FEM

为了验证本文模型的适用性，对盐岩室内试验进行了数值模拟验证，有限元模型如图 10 所示，圆柱体高度为 100 mm，直径为 50 mm，底面约束法向自由度，试件四周施加围压，按照位移控制方式进行加载。在剪切之前，按照试验过程施加相等的围压，建立初始平衡状态；然后在试样顶部按照位移控制施加竖向荷载，直至试样达到破坏。计算参数如表 1 所示，单轴情况对应的峰值黏聚力值为 5.23 MPa，其余三种围压情况对应的峰值黏聚力为 5.76 MPa，峰值黏聚力对单轴应力-应变曲线的影响较为明显。

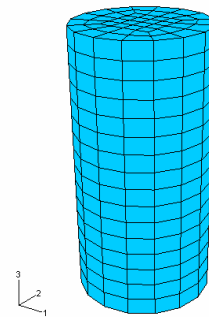


图 10 三轴压缩试验分析模型  
Fig.10 Finite element model for triaxial test

图 11 给出了数值计算得到的应力-应变曲线与试验结果应力-应变曲线的对比可以看出，数值模拟

和试验曲线在趋势上和定量上总体吻合较好，能够反应盐岩在不同围压下的变形和破坏全过程，表明本文的力学模型较好地反映了盐岩弹性模量随围压

升高而增加的趋势，以及随着围压的升高其破坏方式由低围压下的脆性破坏向高围压下的延性破坏的转化。

表 1 计算参数  
Table 1 Material and model parameters

$E/\text{MPa}$	$\mu$	$\sigma_c/\text{MPa}$	$c_r^0/\text{MPa}$	$c_0/\text{MPa}$	$c_m/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\tau_0$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\eta$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
3 380	0.31	19.70	4.80	1.14	5.76	38.3	0.45	0.41	1.80	0.23	0.60	$3.27 \times 10^{-2}$	$45.95 \times 10^{-2}$	0.07	$-2.40 \times 10^{-3}$

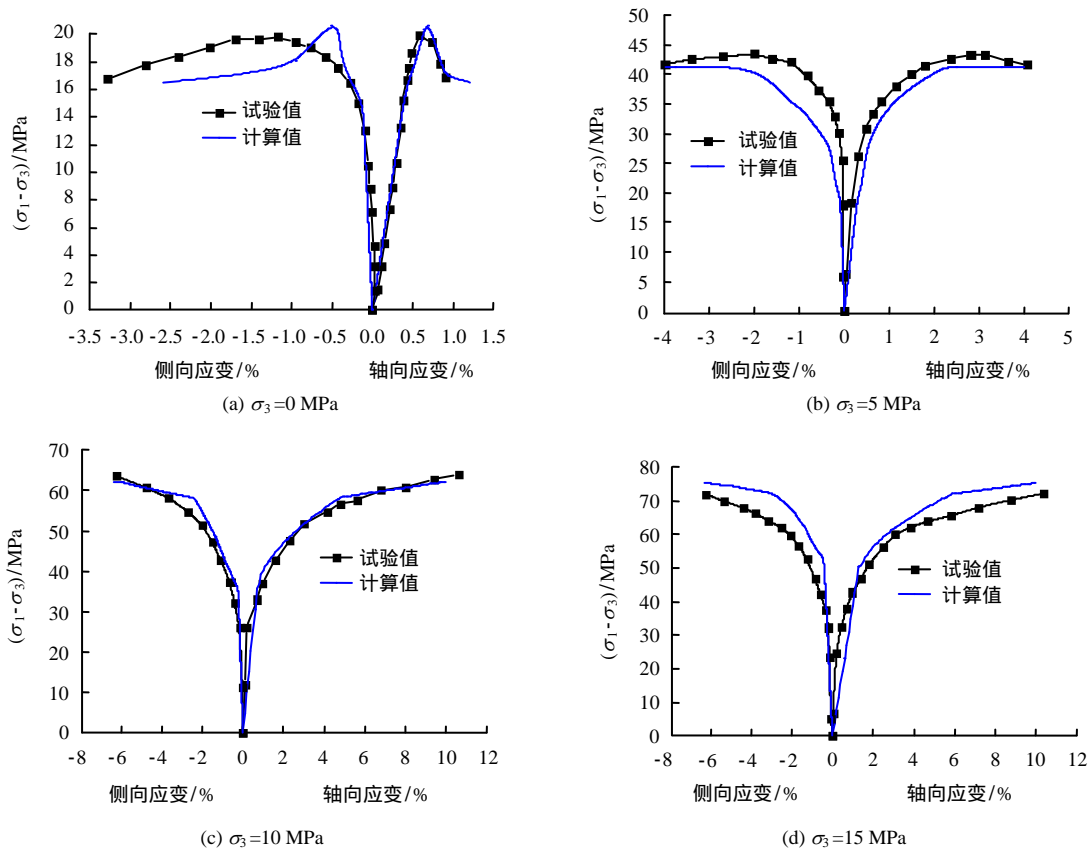


图 11 不同围压条件下试验结果与数值结果对比

Fig.11 Comparison between stress-strain curves experimentally obtained and ones numerically obtained

图 12 中给出了数值计算得到的单轴条件下损伤值随轴向应变的演化曲线，可以看出，损伤随应变的增加而逐渐增大，并且增加速率逐渐趋近平缓，盐岩的损伤对应变软化占主要作用。另外，通过模拟发现，当围压等于 5 MPa 时，盐岩的破坏主要由塑性应变引起，损伤值很小，基本可以忽略其影响。

不同围压条件下黏聚力与轴向应变关系曲线如图 13 所示，可以发现，不同围压下黏聚力的演化规律与屈服后的应力-应变曲线类似，说明每一条应力-应变曲线对应一组围压和强度参数的演化关系。在 0~5 MPa 范围内，不同围压下强度参数的演化曲线是不同的；在 5~15 MPa 范围内，强度参数的演化曲线类似。因此，如果通过室内三轴试验得到的全过程应力-应变曲线确定盐岩的强度参数，那

么，屈服后区段包含了强度参数的某种变化信息。

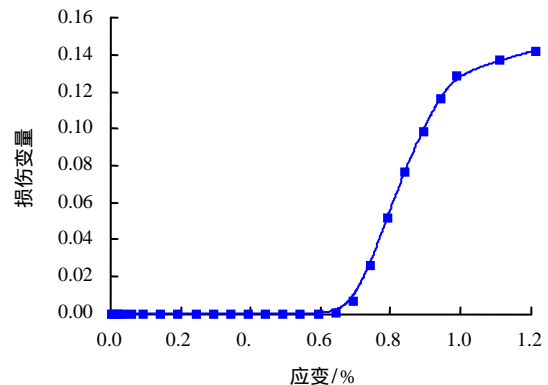


图 12 单轴条件下损伤变量与轴向应变关系曲线  
Fig.12 Damage variable vs. axial strain under uniaxial compression condition

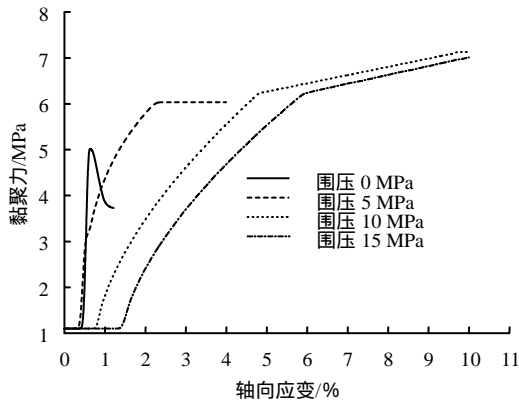


图 13 不同围压条件下黏聚力与轴向应变关系曲线

Fig.13 Curves of cohesive strength vs. axial strain for the confining pressure

## 6 结 论

(1) 盐岩属于软岩,在单轴压缩下表现出应变软化特征,其破坏形式主要为横向张拉劈裂破坏,而三轴压缩下盐岩强度和变形能力随围压增大迅速提高,表现出应变硬化特征,其破坏形式为横向膨胀,且没有明显的破裂面,盐岩的力学特征对围压有很强的敏感性,应予以考虑。

(2) 综合考虑塑性和损伤共同对盐岩力学性能的影响,将损伤和围压引入到修正的 Mohr-Coulomb 准则中,建立了考虑围压影响的弹塑性损伤本构模型,导出了盐岩的损伤演化方程,采用完全隐式欧拉算法编制了计算程序。

(3) 基于三轴压缩试验结果,将试验应力-应变曲线与数值计算所得的应力-应变曲线进行对比,结果表明,本文的力学模型可以较准确地拟合试验曲线,很好地反映了盐岩在不同围压状态下的应变硬化、软化以及脆-塑性转换的力学特征。

## 参 考 文 献

- [1] 贾善坡, 杨建平, 王越之, 等. 含夹层盐岩双重介质耦合损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2548 - 2555.  
JIA Shan-po, YANG Jian-ping, WANG Yue-zhi, et al. Study of coupled damage model dual media for salt rock with interlayer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2548 - 2555.
- [2] AHMAD POUYA. Micro-macro approach for the rock salt behavior[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2000, 19: 1015 - 1028.
- [3] 吴文, 杨春和. 盐岩的压缩试验研究与损伤模型模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3709 - 3713.  
WU Wen, YANG Chun-he. Experimental study on salt rock under compression and damage model simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3709 - 3713.
- [4] 王同涛, 闫相祯, 杨秀娟, 等. 适用于多夹层盐穴储气库的改进 MOHR-COULOMB 准则[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 1040 - 1044.  
WANG Tong-tao, YAN Xiang-zhen, YANG Xiu-juan, et al. Improved Mohr-Coulomb criterion applicable to gas storage caverns in multi-laminated salt stratum[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2010, 31(6): 1040 - 1044.
- [5] 房敬年, 周辉, 胡大伟, 等. 岩盐弹塑性损伤耦合模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 363 - 368.  
FANG Jing-nian, ZHOU Hui, HU Da-wei, et al. Coupled elastoplastic-damage model for salt rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 363 - 368.
- [6] 刘新荣, 王军保, 李鹏, 等. 芒硝力学特性及其本构模型[J]. 解放军理工大学学报, 2012, 13(5): 527 - 532.  
LIU Xin-rong, WANG Jun-bo, LI Peng, et al. Mechanical properties and constitutive model of thenardite[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2012, 13(5): 527 - 532.
- [7] 汤艳春, 周辉. 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3031 - 3037.  
TANG Yan-chun, ZHOU Hui. Study of plastic mechanical model of rock salt with dissolving effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Supp. 1): 3031 - 3037.
- [8] 杨春和, 李银平, 陈锋. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] FARMER I W, GILBERT M J. Dependent strength reduction of rock salt[C]//Proceedings of the 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal: Tans. Tech. Publications, 1984: 4 - 18.
- [10] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3104 - 3109.  
LIU Jiang, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experiment study on short-term strength and deformation properties of rock salts[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.1): 3104 - 3109.
- [11] 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[博士论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.



- [13] 李海波, 刘博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1741 - 1752.  
LI Hai-bo, LIU bo, FENG Hai-peng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1741 - 1752.
- [14] 朱小明, 李海波, 刘博, 等. 含一阶和二阶起伏体节理剪切强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1810 - 1818.  
ZHU Xiao-ming, LI Hai-bo, LIU Bo, et al. Experimental study of shear strength of joints with first-order and second-order asperities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(9): 1810 - 1818.
- [15] 黄曼, 罗战友, 杜时贵, 等. 系列尺度岩石结构面相似表面模型制作的逆向控制技术研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1211 - 1216.  
HUANG Man, LUO Zhan-you, DU Shi-gui, et al. Study of inverse controlling technology for series scales similar surface model making of rock structural plane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1211 - 1216.
- [16] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1977, 10(1 - 2): 1 - 54.
- [17] 葛云峰, 唐辉明, 黄磊, 等. 岩体结构面三维粗糙系数表征新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2508 - 2517.  
GE Yun-feng, TANG Hui-ming, HUANG Lei, et al. A new representation method for three-dimensional joint roughness coefficient of rock mass discontinuities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(12): 2508 - 2517.
- [18] 马龙. 白光扫描干涉测量方法与系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [19] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z2[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2011, 34(3): 243 - 251.
- [20] GB 50204-2002 混凝土结构工程施工质量验收规范[S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2011.
- [21] 贾洪强. 岩石节理面表面形态与剪切破坏特性的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.

#### 上接第 1556 页

- [12] 沈新普, 杨璐. 混凝土损伤理论及试验[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 16 - 36.
- [13] VOYIADJIS G Z, TAQIEDDIN Z N, KATTAN P I. Anisotropic damage-plasticity model for concrete[J]. **International Journal of Plasticity**, 2008, 24(10): 1946 - 1965.
- [14] 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.
- [15] 贾善坡, 陈卫忠, 杨建平, 等. 基于修正 MOHR-COULOMB 准则的弹塑性本构模型及其数值实施[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2051 - 2058.  
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. An elastoplastic constitutive model based on modified Mohr-Coulomb criterion and its numerical implementation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2051 - 2058.
- [16] 贾善坡, 吴渤, 陈卫忠, 等. 热-应力-损伤耦合作用下深埋隧洞围岩稳定性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2375 - 2384.  
JIA Shan-po, WU Bo, CHEN Wei-zhong, et al. Study of thermo-mechano-damage coupling behavior of surrounding rock of deep tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2375 - 2384.