

# 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型研究

汤艳春<sup>1,2</sup>, 周 辉<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 基于溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制分析, 建立溶蚀作用下岩盐塑性力学模型。研究表明, 溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制在于溶蚀作用使得岩盐宏观力学参数发生了变化, 但岩盐力学破坏机制并没有本质上的改变; 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, 并结合常规三轴压缩试验结果, 得出无溶蚀作用下黏聚力和内摩擦角与等效塑性应变之间的关系式; 基于溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制以及无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型, 在考虑黏聚力随溶蚀作用发生变化的前提下, 建立岩盐塑性力学模型; 结合单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验结果, 采用 FLAC-遗传算法联合求解方法对溶解阶段黏聚力随溶解时间的变化规律进行计算, 确定溶解后再加载阶段黏聚力计算公式, 并归纳出溶蚀作用下岩盐塑性力学模型中黏聚力的变化规律。

**关键词:** 岩石力学; 岩盐; 溶蚀作用; 塑性力学模型; 黏聚力

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2012)增 1-3031-07

## STUDY OF PLASTIC MECHANICAL MODEL OF ROCK SALT WITH DISSOLVING EFFECT

TANG Yanchun<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** Through analysis of mechanism of variation for rock salt mechanical properties with dissolving effect, rock salt plastic mechanical model with dissolving effect has been established. The analysis results show that mechanism of variation for rock salt mechanical properties with dissolving effect is because that macro-mechanical parameters of rock salt, such as cohesion, have been varied with dissolving effect; but rock salt failure mechanism has been unchanged essentially. With strain hardening-softening model which can be used to reasonably describe rock salt mechanical behavior, rock salt plastic mechanical model without dissolving effect has been established; and associated with the conventional triaxial compression test results, the expressions between cohesion and internal friction angle without dissolving effect and equivalent plastic strain have been obtained. Based on mechanism of variation for rock salt mechanical properties with dissolving effect and rock salt plastic mechanical model without dissolving effect, and under the premise that with dissolving effect, the value of cohesion has been changed, the rock salt plastic mechanical model with dissolving effect has been established. At last, based on the uniaxial compression meso-mechanical test results of rock salt with coupled stress-dissolving effect, the variation rule of cohesion on dissolving phase with dissolving time is calculated by combined FLAC-Genetic Algorithms. The formula of cohesion on reloading phase after dissolving is obtained; and the

**收稿日期:** 2011-04-22; **修回日期:** 2011-07-28

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(50809035); 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开放基金(Z110705); 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金(2008KDZ02)

**作者简介:** 汤艳春(1981-), 男, 2001年毕业于长安大学水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事可溶岩应力-溶解耦合机制方面的教学与研究工作。E-mail: tych8102-2002@163.com。通讯作者: 周 辉(1972), 男, 现任研究员。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

variation rule of cohesion of rock salt plastic mechanical model with dissolving effect has also been obtained.

**Key words:** rock mechanics; rock salt; dissolving effect; plastic mechanical model; cohesion

## 1 引言

在储库盐腔中实施能源储存的首要问题是盐腔形成过程中的围岩稳定性问题。围绕着盐腔稳定性,众多学者开展了大量相关研究工作。在岩盐力学特性研究方面:杨春和等<sup>[1]</sup>对应力水平及加载路径对岩盐时效的影响进行了研究;梁卫国和赵阳升<sup>[2]</sup>获得了钙质芒硝岩盐的强度曲线方程;刘新荣等<sup>[3]</sup>进行了三轴应力状态下岩盐力学性质试验;梁卫国等<sup>[4]</sup>对金坛储气库岩盐蠕变特性及其实用本构进行了研究;房敬年<sup>[5]</sup>根据岩盐单/三轴压缩试验和细观力学试验结果,对岩盐弹塑性损伤耦合机制进行了研究。在岩盐溶蚀特性研究方面:张哲纬等<sup>[6-8]</sup>进行了岩盐水溶性能试验研究。在岩盐溶腔稳定性研究方面:刘新荣等<sup>[9-11]</sup>对岩盐溶腔围岩应力分布规律进行了数值模拟计算和分析。在岩盐应力-溶解-渗流耦合特性研究方面:Z. M. Hou<sup>[12]</sup>对地下工程开挖扰动区内岩盐的力学和渗透性质进行了研究;周辉等<sup>[13]</sup>对盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型进行了研究,并通过试验对该模型的适用性进行了验证;汤艳春等<sup>[14-17]</sup>基于单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验结果,对岩盐应力-溶解耦合特性进行了初步的研究,研究表明,当岩盐在力学作用下产生较大塑性变形后,在较短溶解时间(最高值为400 s)下,岩盐试样物质的量可发生明显改变,这说明应力作用对岩盐的溶蚀特性产生较大影响;在溶解阶段,随着溶解时间的增加,其轴向应力不断降低,说明溶蚀作用对岩盐力学特性的影响不可忽略。

目前所开展的关于盐腔稳定性方面的研究主要基于对岩盐力学性质的分析,忽略了岩盐溶解之后其力学性质的改变,这将会对盐腔稳定性分析结果造成不可忽略的误差;另外,由于在较短时间的溶蚀作用下岩盐试样物质的量已经发生了改变,而岩盐的流变性需要较长时效。故本文通过溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制的分析,对溶蚀作用下岩盐塑性力学模型进行研究,为进一步研究岩盐应力-溶解耦合机制提供理论依据和试验基础。

## 2 溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制

从细观和宏观的角度,对溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变的分析如下:

### (1) 从细观的角度

从细观的角度,无溶蚀作用下岩盐力学破坏机制为在应力作用下,裂缝尖端的实际应力强度因子 $K_I$ 超过了裂缝的临界应力强度因子 $K_{IC}$ ,造成裂缝失稳并扩展。但是在溶蚀作用下,岩盐表面裂缝被溶解,导致裂隙的 $K_{IC}$ 降低为 $K'_{IC}$ ,使裂纹达到起裂条件 $K_I > K'_{IC}$ ,从而造成裂纹失稳并且扩展。根据单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验结果,在溶解阶段,随着溶解时间的增加,轴向应力值不断降低<sup>[14]</sup>,该试验结果定性验证了上述溶蚀作用下岩盐力学破坏机制。

### (2) 从宏观的角度

从宏观的角度,由于岩盐主要由尺度较大的晶体颗粒以及晶体之间填充的胶结物组成,并且胶结物的刚度通常比晶体的刚度小,无溶蚀作用下,岩盐试样在受压状态下所产生的裂纹大多沿着晶体与晶体之间的交界面延伸。但是,溶蚀作用下,由于晶体和胶结物被溶解,晶体之间的内摩擦力改变,并且胶结物之间的黏结力被削弱,该特征反映在宏观上的表现即为岩盐宏观力学参数(如黏聚力、内摩擦角以及抗拉强度等)受到溶蚀作用的影响而发生变化。

基于上述分析,可以得出:溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制在于溶蚀作用使得岩盐宏观力学参数发生了变化,但岩盐力学破坏机制并没有本质上的改变。

## 3 无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型

岩盐具有明显塑性变形特征,并且其单轴细观力学试验结果中轴向应力-轴向应变曲线具有明显的应变硬化-软化特征<sup>[14]</sup>,故可采用应变硬化-软化模型对无溶蚀作用下岩盐塑性力学行为进行描

述。

### 3.1 无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型

应变硬化 - 软化模型是基于与拉力流动法则相关联而与剪切流动法则不相关联的 Mohr-Coulomb 模型<sup>[18]</sup>，其屈服函数和势函数，塑性流动法则和应力修正同 Mohr-Coulomb 模型一致。两者之间的差别在于塑性屈服开始后，应变硬化 - 软化模型考虑了材料参数(例如黏聚力、内摩擦角、剪胀扩容和抗拉强度等)值的变化，而在 Mohr-Coulomb 模型中这些材料参数是不变的。

### 3.2 模型参数的确定

本文通过岩盐常规三轴压缩试验以及对试验数据的分析，来求取无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型计算中所需的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  等参数。

#### (1) 岩盐常规三轴压缩试验

岩盐常规三轴试验采用的设备为中国科学院武汉岩土力学研究所的 MTS 岩石力学试验系统，采用尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的圆柱形岩盐试件，试件照片如图 1 所示，所用岩盐试样均取自于湖北省云应岩盐矿区，与汤艳春等<sup>[14]</sup>研究中所进行的单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验所采用的岩盐试样的来源地一致。通过试验可获得不同围压条件下轴向应力与等效塑性应变的关系，本次试验共进行了 7 组试验，每组试验共测试 4 个岩盐试样，图 2 为一组岩盐试样在不同围压(5, 10, 15, 20 MPa)条件下等效塑性应变随轴向应力  $\sigma_1$  变化曲线。



图 1 圆柱形岩盐试件照片  
Fig.1 Photos of rock salt cylinder specimen

#### (2) $c$ , $\varphi$ 计算

根据不同围压下等效塑性应变  $\overline{\varepsilon^p}$  随轴向应力变化结果，可获得黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  与  $\overline{\varepsilon^p}$  之间的关系函数，即  $c(\overline{\varepsilon^p})$ ,  $\varphi(\overline{\varepsilon^p})$ ，其计算步骤如下：

① 在每条曲线上取出能反映该曲线特征的  $n$

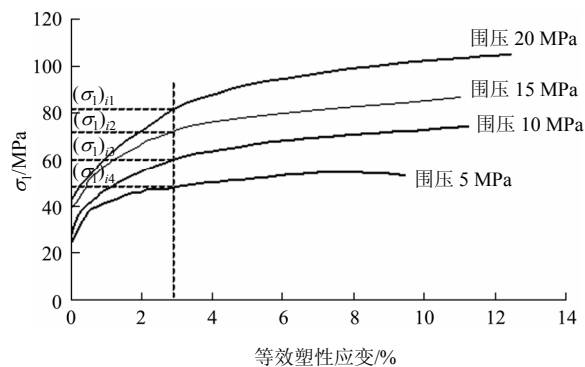


图 2 不同围压下等效塑性应变随轴向应力变化曲线  
Fig.2 Variation curves of equivalent plastic strain with axial stress under different confining pressures

个数据点，针对 4 种不同围压共取出  $4n$  个数据点(见图 2)，可标记为： $\{(\overline{\varepsilon^p})_i, (\sigma_1)_{ij}, (\sigma_2 = \sigma_3)_j\}$ 。其中， $i = 1, 2, \dots, n$ ，表示每条曲线上所取数据点的个数； $j = 1, 2, 3, 4$ ，表示 4 种不同围压。

② 采用 4 个应力莫尔圆来分别描述针对每一个  $(\overline{\varepsilon^p})_i$  值所对应的 4 个应力数值点  $\{(\sigma_1)_{ij}, (\sigma_2 = \sigma_3)_j\} (j = 1, 2, 3, 4)$  的应力状态，然后根据这 4 个应力莫尔圆绘制公切线来确定相应的  $c(\overline{\varepsilon^p})_i$ ,  $\varphi(\overline{\varepsilon^p})_i$ 。

③ 由于共进行 7 组试验，可计算出  $7n$  组  $\{(\overline{\varepsilon^p})_i, c(\overline{\varepsilon^p})_i, \varphi(\overline{\varepsilon^p})_i\}$ ，故可以得出  $c(\overline{\varepsilon^p})$ ,  $\varphi(\overline{\varepsilon^p})$  的函数表达式为

$$c(\overline{\varepsilon^p}) = 9.34 \exp(-\overline{\varepsilon^p} / 7.48) + 4.20 \quad (1)$$

$$\varphi(\overline{\varepsilon^p}) = 0.41 + 8.06\overline{\varepsilon^p} - 0.66(\overline{\varepsilon^p})^2 + (\overline{\varepsilon^p})^3 \quad (2)$$

其中， $\overline{\varepsilon^p}$  的单位为%， $c$  的单位为 MPa， $\varphi$  的单位为(°)。

#### (3) 验证分析

通过单轴压缩条件下岩盐全过程加载细观力学试验(无溶蚀作用)的模拟计算结果和试验结果的对比，对所选用的应变硬化 - 软化模型，以及所获得的黏聚力、内摩擦角与等效塑性应变之间关系的合理性进行了验证，对比结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出：在达到应力峰值前，计算曲线和试验曲线具有较好的吻合度；应力峰值之后，2 条曲线的变化趋势基本一致。故可以得出：从整体上看，模拟计算结果与试验结果吻合较好。这说明，所选用的应变硬化 - 软化模型可用于描述岩盐塑性力学行为，所获得的黏聚力、内摩擦角与等效塑性应变的关系函数是合理的。

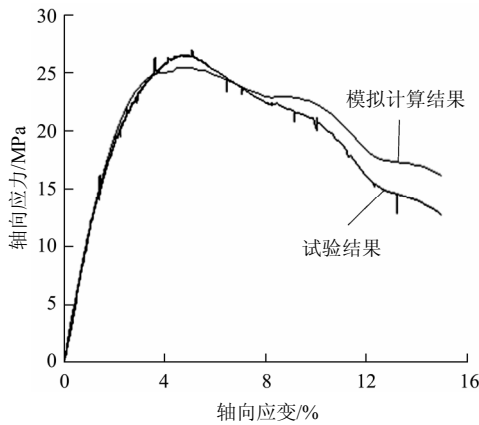


图3 模拟计算结果与无溶蚀作用下岩盐试验结果对比  
Fig.3 Comparison between computing result and test result of rock salt without dissolving effect

### 4 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型

基于溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制以及无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型,对溶蚀作用下岩盐塑性力学模型进行了研究。

#### 4.1 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的基本假设

(1) 溶蚀作用使得岩盐宏观力学参数发生了变化,但岩盐力学破坏机制并没有本质上的改变,且应变硬化-软化模型可用于描述岩盐塑性力学行为,故可假定应变硬化-软化模型适用于计算溶蚀前后岩盐塑性力学性质;

(2) 溶蚀作用下,由于晶体和胶结物被溶解,晶体之间的内摩擦力变化较微弱,使得内摩擦角  $\varphi$  变化较微弱,但胶结物之间的黏聚力被削弱,使得胶结物之间的黏聚力  $c$  值发生较明显的变化,故可假定,溶蚀前后  $c$  降低,但  $\varphi$  不变;

(3) 假定溶解阶段岩盐抗拉强度和剪胀角不变;

(4) 当岩盐试样处于弹性阶段和表面细观裂纹阶段,溶蚀作用对岩盐试样的力学特性影响很小,而且溶蚀质量很小,这说明溶蚀作用对岩盐的弹性参数影响可以忽略<sup>[14]</sup>,故可假定溶蚀前后岩盐弹性参数不变;

(5) 假定岩盐力学参数不受围压的影响;

(6) 由于单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应细观力学试验中溶解后再加载阶段的轴向应力-轴向应变曲线和单轴压缩条件下岩盐全过程加载试验(无溶蚀作用)中相对应部分的轴向应力-轴向应变曲线之间,在形态上存在着较好的相似性<sup>[17]</sup>,故可假定,黏聚力值的变化趋势在溶解后再加载阶

段与全过程加载试验(无溶蚀作用)中相对应部分是一致的。

#### 4.2 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的建立

基于上述基本假设,溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的复合准则在  $(\sigma_1, \sigma_3)$  平面上的描述如图4所示。在图4中,折线  $ABC$  反映了无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型复合准则;折线  $DEC$  反映了溶蚀作用下岩盐塑性力学模型复合准则。

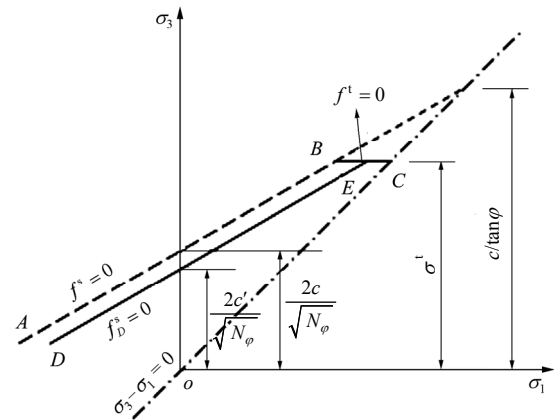


图4 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型复合准则示意图  
Fig.4 Sketch of combined criteria of rock salt plastic mechanical model with dissolving effect

点  $A$  到点  $B$  为无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的屈服准则  $f^s = 0$ , 其  $f^s$  的表达式为

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \tag{3}$$

其中,

$$N_\varphi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

式中:  $c$  为无溶蚀作用下的黏聚力。

点  $D$  到点  $E$  为溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的屈服准则  $f^s = 0$ , 且  $AB \parallel DE$ 。  $f^s$  的表达式为

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c'\sqrt{N_\varphi} \tag{4}$$

式中:  $c'$  为溶解后岩盐的黏聚力,  $c' < c$ 。随着溶蚀作用时间的增加,  $c'$  值也发生变化。

有、无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的拉破坏准则  $f^t = 0$  基本一致( $BC$  段反映了无溶蚀作用下塑性力学模型的拉破坏准则;  $EC$  段反映了溶蚀作用下塑性力学模型的拉破坏准则), 其中  $f^t$  的表达式为

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \tag{5}$$

式中:  $\sigma^t$  为抗拉强度。

从上述所建立的复合准则中可以看出,溶蚀作用下岩盐塑性力学模型复合准则受黏聚力随溶解时

间的变化关系所控制，故在获得溶蚀作用下黏聚力变化规律的前提下，即可对溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的力学参数进行计算。

### 4.3 溶蚀作用下黏聚力值的计算思路

溶蚀作用下黏聚力变化规律计算思路如下：

(1) 根据无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型参数计算公式确定溶解前黏聚力和摩擦角等参数值；

(2) 根据单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应细观力学试验条件和试验结果，确定溶解阶段岩盐应力状态的变化；

(3) 采用 FLAC - 遗传算法联合求解方法求解溶解阶段黏聚力值随溶解时间的变化规律；

(4) 确定溶解后再加载阶段模型的黏聚力；

(5) 归纳出溶蚀作用下黏聚力的变化规律。

### 4.4 溶解阶段岩盐应力状态确定

单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应细观力学试验轴向应力 - 轴向应变曲线示意图如图 5<sup>[14]</sup>所示。在图 5 中，曲线 *OABD* 为单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应细观力学试验轴向应力 - 轴向应变曲线，其中曲线 *OA*、*AB*、*BD* 分别对应加载阶段、溶解阶段以及溶解后再加载阶段；曲线 *AC* 为单轴压缩条件下岩盐全过程加载试验(无溶蚀作用)中与曲线 *BD* 相对应部分的轴向应力 - 轴向应变曲线。

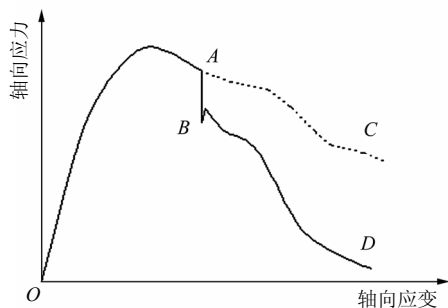


图 5 单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应细观力学试验结果示意图<sup>[14]</sup>

Fig.5 Sketch of mesomechanical test result of rock salt under uniaxial compression with coupled mechanical-dissolving effect<sup>[14]</sup>

溶解阶段点 *A* 和 *B* 的应力状态为：轴向应变不变，但溶解后轴向应力降低，即  $\sigma_B < \sigma_A$ ；相应地，点 *A* 处对应的黏聚力值  $c_A$  可采用无溶蚀作用时黏聚力计算公式确定，但点 *B* 所对应的黏聚力由于溶蚀作用发生了变化。

通过以上分析可知，点 *B* 所对应的溶蚀后黏聚力  $c'_B$  值可通过溶解阶段应力状态的变化(即单轴压

缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应细观力学试验中溶解阶段应力降比值的变化规律)来求取。

溶解阶段应力降比值与轴向塑性应变和溶解时间之间的关系表达式<sup>[14, 16]</sup>为

$$H(m) = \frac{1}{3.8} \left\{ -\frac{0.42}{\exp[m(\varepsilon^p, t=4)/1.38]} + 0.43 \right\} \cdot \left\{ -\frac{0.436}{\exp[m(\varepsilon^p = 7.2, t)/1.137]} + 0.436 \right\} \quad (6)$$

其中，

$$m(\varepsilon^p, t) = \frac{1}{3.4} (0.21t + 0.16t^2) \cdot \left\{ 4.75 - \frac{4.56}{1 + \exp[(\varepsilon^p - 6.2)/0.54]} \right\} \quad (7)$$

式中： $H$  为应力降比值， $H = (\sigma_A - \sigma_B) / \sigma_A$ ； $m(\varepsilon^p, t)$  为溶解阶段不同轴向塑性应变  $\varepsilon^p$  (%) 和溶解时间  $t(10^2 \text{ s})$  所对应的溶解质量(g)。

### 4.5 FLAC - 遗传算法联合求解方法求解溶解阶段黏聚力的变化规律

点 *B* 所对应的溶蚀后黏聚力  $c'_B$  值可采用 FLAC - 遗传算法联合求解方法进行计算，其具体计算过程如下：

(1) 首先根据试验条件建立计算模型；

(2) 基于式(1)，(2)，采用 FLAC 计算软件对无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型进行计算，求取出点 *A* 所对应的等效塑性应变值  $\varepsilon^{p0}$ ，轴向塑性应变  $\varepsilon^{p0}$ ，应力  $\sigma_A$  和黏聚力  $c_A$ ；

(3) 将  $\varepsilon^{p0}$  和给定的溶解时间  $t_0$  代入式(6)和(7)中，求取出  $H(\varepsilon^{p0}, t_0)$  和  $\sigma_B$ ；

(4) 采用遗传算法对溶蚀后黏聚力  $c'_B$  值进行搜索，随机生成  $c'_B$  值的计算种群；

(5) 采用 FLAC 计算软件对岩盐塑性力学模型进行计算，计算步骤为：首先将无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型的计算参数赋给计算模型，当计算到溶解阶段时(即点 *A* 所对应的应力 - 应变状态)，改变计算参数黏聚力值，将遗传算法所给定的  $c'_B$  值代入 FLAC 计算模型中，计算此时溶蚀后的应力值(即点 *B* 所对应的计算值  $\sigma'_B(\varepsilon^{p0}, t_0)$ )；

(6) 将点 *B* 所对应的计算值  $\sigma'_B(\varepsilon^{p0}, t_0)$  与试验值  $\sigma_B$  相比较，如  $\sigma_B = \sigma'_B$ ，即可获得不同等效塑性应变和溶解时间下  $c'_B$  值；如  $\sigma_B \neq \sigma'_B$ ，则继续对溶蚀后黏聚力  $\sigma'_B$  值进行遗传演化，重新进行第 4, 5, 6 步计算。

通过 FLAC - 遗传算法联合求解计算方法, 得出点 B 所对应的溶蚀后黏聚力  $c'_B$  值的计算表达式为

$$\frac{c'_B}{c_A} = K(\overline{\varepsilon}^{p0}, t) = \frac{1}{D}(1.01 - 0.06\overline{\varepsilon}^{p0}) \cdot [0.52 \exp(-t/1.95) + 0.48] \quad (8)$$

式中:  $c_A$  可根据式(1)计算出来(MPa);  $\overline{\varepsilon}^{p0}$  为溶解阶段所对应的等效塑性应变(%);  $D$  为常数, 取为 0.578;  $K$  为比例系数, 与溶解阶段的试验条件相关, 为溶解阶段  $\overline{\varepsilon}^{p0}$  和  $t$  的函数。

#### 4.6 溶解后再加载阶段黏聚力的确定

根据溶蚀作用下岩盐塑性力学模型第 6 条假设, 黏聚力值的变化趋势在溶解后再加载阶段与全过程加载试验(无溶蚀作用)中相对应部分可以认为是 一致的, 即可以认为

$$c'(\overline{\varepsilon}^p, t) = K(\overline{\varepsilon}^{p0}, t)c(\overline{\varepsilon}^p) \quad (9)$$

式中:  $\overline{\varepsilon}^p$  为溶解后再加载阶段的等效塑性应变,  $\overline{\varepsilon}^p > \overline{\varepsilon}^{p0}$ ;  $c'$  为  $\overline{\varepsilon}^p$  和溶解时间的函数。

#### 4.7 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型中黏聚力的变化规律

通过上述分析, 可得出溶蚀作用下岩盐塑性力学模型中黏聚力值的变化规律, 如图 6 所示。在图 6 中, 曲线 I, II, III 段分别代表加载阶段、溶解阶段以及溶解后再加载阶段所对应的黏聚力变化曲线段; 虚线段代表与曲线 III 段相对应部分的无溶蚀作用下岩盐黏聚力变化曲线段。

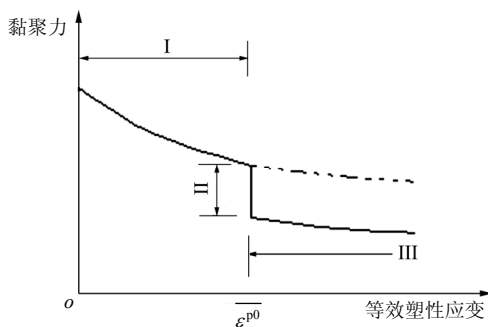


图 6 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型中黏聚力值变化规律示意图

Fig.6 Sketch of rule of cohesion of rock salt plastic mechanical model with dissolving effect

联合式(1), (8)和(9), 溶蚀作用下岩盐塑性力学模型中黏聚力  $c$  值的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} c'(\overline{\varepsilon}^p, t) &= K(\overline{\varepsilon}^{p0}, t)c(\overline{\varepsilon}^p) & (\overline{\varepsilon}^p < \overline{\varepsilon}^{p0}) \\ c(\overline{\varepsilon}^p) &= 9.34 \exp(-\overline{\varepsilon}^p / 7.48) + 4.20 & (\overline{\varepsilon}^p \geq \overline{\varepsilon}^{p0}) \end{aligned} \right\} (10)$$

#### 4.8 模型的验证

通过单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验的模拟计算结果和试验结果的对 比, 对所建立的溶蚀作用下岩盐塑性力学模型以及 所获得的溶蚀作用下黏聚力变化规律(式(10))的合 理性进行了验证。

针对单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效 应的细观力学试验的模拟计算过程为: 首先选定  $\overline{\varepsilon}^{p0}$  和  $t$  值, 代入式(10)中, 对溶解阶段点 A 和 B 所 对应的黏聚力值进行计算; 然后根据试验条件建立 计算模型; 最后依据所建立的溶蚀作用下岩盐塑性 力学模型以及所计算出来的溶解阶段黏聚力变化规 律, 采用 FLAC 计算软件进行模拟计算, 计算出在 给定  $\overline{\varepsilon}^{p0}$  和  $t$  值条件下的轴向应力 - 轴向应变计算 曲线。模拟计算结果和溶蚀作用下岩盐试验结果对 比如图 7 所示。

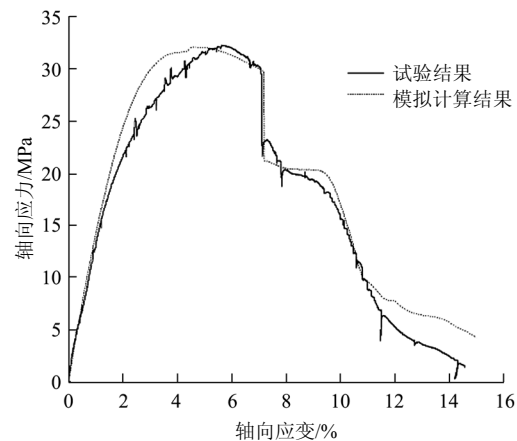


图 7 模拟计算结果和溶蚀作用下岩盐试验结果对比  
Fig.7 Comparison between computing result and test result of rock salt with dissolving effect

从图 7 中可以看出: 轴向应力 - 轴向应变计算 曲线与试验曲线吻合较好, 这表明所建立的溶蚀作 用下岩盐塑性力学模型以及所获得的溶蚀作用下黏 聚力变化规律可较合理地描述溶蚀作用下岩盐塑性 力学行为。

### 5 结 论

基于溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制分 析, 本文建立了溶蚀作用下岩盐塑性力学模型, 并 结合单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细 观力学试验结果对溶蚀作用下黏聚力变化规律进行 了计算。主要结论如下:

- (1) 溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制在

于溶蚀作用使得岩盐宏观力学参数发生了变化, 但岩盐力学破坏机制并没有本质上的改变。

(2) 采用应变硬化 - 软化模型来描述岩盐塑性力学行为, 并结合常规三轴压缩试验结果, 得出无溶蚀作用下黏聚力和内摩擦角与等效塑性应变之间的关系式。

(3) 基于溶蚀作用下岩盐力学性质发生改变机制以及无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型, 在考虑黏聚力随溶蚀作用发生变化的前提下, 建立了溶蚀作用下岩盐塑性力学模型。

(4) 依据所建立的溶蚀作用下岩盐塑性力学模型, 并结合单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验结果, 采用 FLAC - 遗传算法联合求解方法对溶解阶段黏聚力随溶解时间的变化规律进行计算, 确定溶解后再加载阶段黏聚力计算公式, 并归纳出了溶蚀作用下岩盐塑性力学模型中黏聚力的变化规律。

本文的研究成果为进一步研究岩盐应力 - 溶解耦合机制奠定了试验依据以及理论基础。

## 参考文献(References):

- [1] 杨春和, 殷建华, DAEMEN J J K. 盐岩应力松弛效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 262 - 265.(YANG Chunhe, YIN Jianhua, DAEMEN J J K. Investigation of stress relaxation of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 262 - 265.(in Chinese))
- [2] 梁卫国, 赵阳升. 岩盐力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 391 - 394.(LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng. Testing study on mechanical properties of thenardite rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 391 - 394.(in Chinese))
- [3] 刘新荣, 鲜学福, 马建春. 三轴应力状态下岩盐力学性质试验研究[J]. 地下空间, 2004, 24(2): 153 - 165.(LIU Xinrong, XIAN Xuefu, MA Jianchun. Experimental study on mechanical properties of rock salt under triaxial stress state[J]. Underground Space, 2004, 24(2): 153 - 165.(in Chinese))
- [4] 梁卫国, 徐素国, 刘江, 等. 金坛储气库岩盐蠕变特性及其实用本构研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(3): 354 - 356.(LIANG Weiguo, XU Suguo, LIU Jiang, et al. Research on creep property and practical constitutive equation of rock salt in Jintan gas storage of China[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(3): 354 - 356.(in Chinese))
- [5] 房敬年. 岩盐弹塑性损伤耦合机制及其对溶蚀特性的影响[硕士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.(FANG Jingnian. Coupled elasto-plasto-damage mechanism and its influence on dissolving property of rock salt[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))
- [6] 张哲纬. 岩盐矿石水溶性能试验若干问题探讨[J]. 中国井矿盐, 2002, 33(2): 23 - 25.(ZHANG Zhewei. Study on experimentation of rock salt solution mining[J]. China Well and Rock Salt, 2002, 33(2): 23 - 25.(in Chinese))
- [7] 杨骏六, 杨进春, 邹玉书. 岩盐水溶特性的试验研究[J]. 四川联合大学学报: 工程科学版, 1997, 1(2): 74 - 80.(YANG Junliu, YANG Jinchun, ZHOU Yushu. Experiments study of solution mining properties of rock salt[J]. Journal of Sichuan Union University: Engineering Science, 1997, 1(2): 74 - 80.(in Chinese))
- [8] 梁卫国, 徐素国, 赵阳升. 钙芒硝盐岩溶解渗透力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 951 - 955.(LIANG Weiguo, XU Suguo, ZHAO Yangsheng. Investigation on solution pervasion and mechanical characteristics of glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 951 - 955.(in Chinese))
- [9] 刘新荣, 姜德义. 岩盐溶腔围岩应力分布规律的有限元分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(2): 43 - 46.(LIU Xinrong, JIANG Deyi. FEM analysis of stress distribution law in the rock salt cavity's surrounding rock[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2003, 26(2): 43 - 46.(in Chinese))
- [10] 王贵君. 盐岩层中天然气存储洞室围岩长期变形特征[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 431 - 435.(WANG Guijun. Long-term deformation characters of salt rock surrounding a gas storage cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 431 - 435.(in Chinese))
- [11] 尹雪英, 杨春和, 陈剑文. 金坛盐矿老腔储气库长期稳定性分析数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 869 - 874.(YIN Xueying, YANG Chunhe, CHEN Jianwen. Numerical simulation research on long-term stability of gas storage in Jin-tan salt mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 869 - 874.(in Chinese))
- [12] HOU Z M. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 725 - 738.
- [13] 周辉, 汤艳春, 胡大伟, 等. 盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 946 - 950.(ZHOU Hui, TANG Yanchun, HU Dawei, et al. Study on coupled penetrating-dissolving model and experiment for salt rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 946 - 950.(in Chinese))
- [14] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 294 - 302.(TANG Yanchun, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Analysis of meso-mechanical test of rock salt considering couple stress-dissolving effects under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 294 - 302.(in Chinese))
- [15] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 应力作用下岩盐的溶蚀模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 296 - 302.(TANG Yanchun, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Study on dissolving model under effect of stress for rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 296 - 302.(in Chinese))
- [16] TANG Y C, ZHOU H. Experimental study of dissolving effect on mechanical characteristics of rock salt[C]// Proceedings of the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Asheville, USA: [s.n.], 2009: 152 - 159.
- [17] 汤艳春. 考虑岩盐应力与溶解耦合效应的盐腔溶腔机制研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.(TANG Yanchun. Study on washing process of rock slat cavern with coupled stress-dissolving mechanism[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institutive of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.(in Chinese))
- [18] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 28 - 32.(LIU Bo, HAN Yanhui. Principles, examples and application guide of FLAC[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 28 - 32.(in Chinese))