

# 应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制研究

汤艳春<sup>1,3</sup>, 周辉<sup>2</sup>, 许模<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

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. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**通过分析岩盐应力-溶解耦合作用对盐腔水溶建腔过程的影响, 研究应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制。研究表明, 在盐腔成腔过程中, 应力-溶解耦合作用对盐腔形状的影响不可忽略; 应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制在于溶蚀作用下在水的溶蚀影响范围内的腔壁围岩力学性质发生变化, 同时, 由于腔壁边界处围岩力学性质的改变, 造成盐腔内部溶蚀过程发生变化, 从而使盐腔形态发生改变; 根据应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制, 建立应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔计算方法; 使用编制的应力-溶解耦合作用下的盐腔形态变化计算程序以及 FLAC 计算软件对水溶建腔过程进行计算。计算结果表明, 相比于纯溶解作用, 应力-溶解耦合作用下计算得到的盐腔形状与实际溶腔形状较为符合。该研究成果可为进一步研究储库盐腔水溶建腔机制提供理论依据和分析基础。

**关键词:** 盐腔; 应力-溶解耦合作用; 水溶建腔

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

## Study of mechanism of washing process of rock-salt cavern under coupled mechanical-dissolving effect

TANG Yan-chun<sup>1,3</sup>, ZHOU Hui<sup>2</sup>, XU Mo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

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

Wuhan 430071, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** Through analyzing the influence for washing process of rock-salt cavern with coupled mechanical-dissolving effect, mechanism of washing process of rock-salt cavern under coupled mechanical-dissolving effect has been studied. The research results show that during the washing process, influence for rock-salt cavern shape by coupled mechanical-dissolving effect can not be ignored. The mechanism of washing process of rock-salt cavern under coupled mechanical-dissolving effect is that because of dissolving effect the mechanical properties of wall rock of rock-salt cavern within the scope of influence by water has been changed; and then because of the variation for the mechanical properties of the boundary of wall rock, the dissolving process in the interior of rock-salt cavern has been changed; so that the variation for the shape of rock-salt cavern has occurred. According to the mechanism of washing process of rock-salt cavern under coupled mechanical-dissolving effect, the computing method of washing process of rock-salt cavern under coupled mechanical-dissolving effect has been built. Based on the established computing method, by computing program of rock-salt cavern shape under coupled mechanical-dissolving effect and FLAC software the washing process of rock-salt cavern has been computed. the computing results show that compared with the computing shape of rock-salt cavern under dissolving effect, the computing shape of rock-salt cavern under mechanical-dissolving effect more coincided with the actual shape of rock-salt cavern. The results can provide a foundation for further analysis of the mechanism of washing process of rock-salt cavern.

**Key words:** rock-salt cavern; coupled mechanical-dissolving effect; washing process

## 1 引言

储库盐腔一般采用水溶法建造, 在水溶建腔过

程中, 控制合理的盐腔形状和尺寸一方面可以保证盐腔有足够的储存容量, 另一方面对于确保盐腔围岩的力学稳定性也是至关重要的。

收稿日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助 (No. 50809035); 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金资助 (No. 2008KDZ02)。

第一作者简介: 汤艳春, 男, 1981年生, 博士, 副教授, 主要从事可溶岩应力-溶解耦合作用机理方面的研究工作。E-mail: tych8102-2002@163.com

通讯作者: 周辉, 男, 1972年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值模拟与工程安全性分析方面的研究。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

前人围绕岩盐溶腔形态控制和稳定性及其相关特性,开展了大量和富有成效的研究工作。在岩盐溶腔稳定性及其相关力学性质方面, HOU Zheng-meng<sup>[1]</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; LIANG 等<sup>[2]</sup>对层状盐岩的力学特性进行了试验研究; 房敬年等<sup>[3]</sup>根据岩盐单/三轴压缩试验和细观力学试验结果,对岩盐的弹塑性损伤耦合机制进行了研究; 张鹏等<sup>[4]</sup>利用弹塑性力学理论,对岩盐溶腔顶板失稳机制进行了研究; 尹雪英等<sup>[5-7]</sup>对储气库长期稳定性进行了数值模拟计算和分析; 杨强等<sup>[8]</sup>针对能源储备地下库群整体稳定性评价,运用考虑有限元强度折减法的变形稳定理论,建立了强度折减系数与塑性余能范数关系曲线的库群整体稳定性和破坏的关键判据。在溶腔形态控制方面,班凡生等<sup>[9-10]</sup>、赵志成等<sup>[11]</sup>对岩盐储气库水溶建腔流体输运理论以及溶腔形态变化规律进行了研究; 霍琰等<sup>[12]</sup>对盐穴建腔期腔内卤水流场规律及夹层与流场的相互影响关系进行了研究。在岩盐应力-溶解耦合机制研究及其相关性方面,周辉等<sup>[13]</sup>建立了盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型,并通过试验验证了模型的适用性。汤艳春等<sup>[14-19]</sup>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以及三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验,对岩盐应力-溶解耦合特性进行了分析,认为有无应力作用下的岩盐溶蚀机制是一致的,两者之间的差别在于溶蚀作用面积不同;溶蚀作用下岩盐力学性质发生变化的机制在于岩盐发生溶解使得岩盐的宏观力学参数发生了变化,但岩盐破坏的力学机制并没有本质上的改变;基于所提出的等效扩散系数的概念,建立了应力作用下的岩盐溶蚀模型;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。

目前所开展的大量研究工作忽略了岩盐应力-溶解耦合效应对盐腔水溶建腔过程的影响,这会对溶腔的形状控制和力学稳定性分析结果造成不可忽略的误差。本文通过岩盐应力-溶解耦合效应对盐腔水溶建腔过程影响的分析,对应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制进行研究,为进一步研究储库盐腔水溶建腔机制提供理论依据和分析基础。

## 2 应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制

对于岩盐溶蚀作用来说,应力的作用(特别是在产生塑性应变之后)对岩盐溶蚀特性会产生非常明显的影响,其影响是不可忽略的<sup>[14]</sup>。反过来,溶

蚀作用也会对岩盐的力学性质产生很大的影响,会使岩盐的力学参数发生变化<sup>[16,19]</sup>,在实际盐腔成腔过程分析中,必须考虑溶蚀作用下岩盐力学性质的变化,因此,在盐腔成腔过程的分析中必须要考虑应力与溶解的耦合效应对岩盐水溶建腔的影响。

在盐腔水溶建腔过程中,应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制在于:一方面,在已具备的盐腔形态条件下,盐腔围岩由于应力作用产生大量的裂纹,腔壁围岩与水接触后,水对裂纹和盐腔表面产生溶蚀作用,并在盐腔围岩中形成一定的溶蚀影响范围。在水的溶蚀影响范围之内,腔壁围岩由于溶蚀作用的影响,其在水的溶蚀影响范围内的围岩区域的岩盐的力学性质发生变化,从而对整个盐腔围岩的应力场、应变场造成影响。另一方面,由于盐腔边界处围岩力学性质的变化,水对盐腔边界处围岩的溶蚀作用受到影响,盐腔内部溶蚀过程发生改变,从而对盐腔形态产生不可忽略的影响。

综上所述可知,在盐腔水溶建腔过程中,盐腔形态以及盐腔围岩力学性质之间相互影响、相互制约。

## 3 应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔计算方法

根据应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制,针对实际的盐腔水溶单井建腔工艺,建立应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔计算方法。

### 3.1 计算思路

应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔过程可采用如下计算思路:

①给定初始的盐腔形态,对盐腔围岩的初始应力场、应变场进行计算,计算时采用溶蚀前围岩介质岩盐的力学性质参数。

②盐腔围岩与水接触后,盐腔围岩受水影响范围内的岩盐力学性质参数发生变化。基于溶蚀作用下岩盐塑性力学模型,对溶蚀作用下盐腔围岩进行力学计算。

③依据溶蚀后围岩应力-应变分布,以及应力作用下的岩盐溶蚀模型,进行应力作用下盐腔形状计算,获取一定溶解时间之后的盐腔形状变化。第①~③步可合并称为第一循环步。

④基于已改变的盐腔形状,以及溶蚀作用下岩盐塑性力学模型,对盐腔围岩进行进一步的力学计算。继而进行进一步的应力作用下盐腔形状计算。该步可称为第二循环步。

⑤重复第二循环步的计算步骤,通过不断的循

环计算，即可得到应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔过程。

### 3.2 计算模型的建立

#### 3.2.1 模型的基本假设

考虑到计算的需要，可作简化和基本假设：(1) 忽略岩盐结晶方向、层理等微构造的各向异性对溶蚀过程的影响，假设岩盐是各向同性的均质材料。

(2) 不考虑岩盐的流变特性等具时间效应的力学特性。(3) 忽略温度对岩盐力学性质以及岩盐溶蚀过程的影响。(4) 假设岩盐地层无杂质。(5) 假设溶蚀过程中，盐腔的腔体形态为轴对称结构。(6) 忽略地层倾角等地质因素对盐腔水溶建腔过程的影响。(7) 忽略初始地应力场对盐腔初始形状的影响。(8) 假设在盐腔内部进行溶解时，水影响范围以外的岩盐的力学性质不受水的影响。(9) 假设盐腔中流体运动为层流流动。

#### 3.2.2 几何模型

针对实际的单井盐腔水溶建腔工艺，本文取如图 1 所示的 1/2 物理模型进行计算。图 1 中，盐腔的初始形态为一球形， $P_0$  为上覆均布荷载； $P_1$  为侧压力；I 代表盐腔初始位置；II 代表预定溶腔范围线，所建立的坐标系原点在盐腔的中心点。在图 1 中，由于所建立的计算模型的高度  $H$  较小，故可近似认为侧压力  $P_1$  为均布荷载。

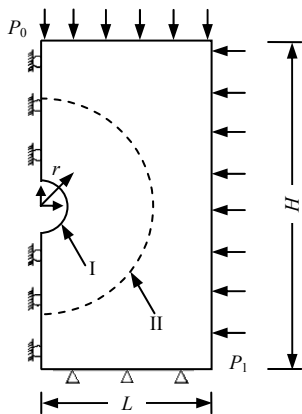


图 1 盐腔几何模型示意图

Fig. 1 Sketch of geometrical model of rock-salt cavern

#### 3.2.3 盐腔围岩区域网格划分

对盐腔围岩区域网格划分的规则如下：①沿盐腔围岩边界，边界网格均匀划分。②盐腔围岩边界网格的外法线方向过盐腔的中心点。③在初始盐腔至预定溶腔范围线内部的区域，采用等间距的环向网格划分方式进行网格划分。

依照上述网格划分规则，对盐腔围岩区域进行

网格划分，其网格划分示意图如图 2 所示。

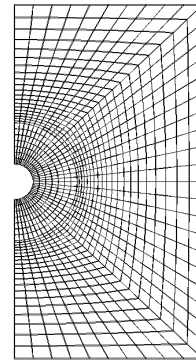


图 2 盐腔围岩区域网格划分示意图

Fig.2 Meshing sketch of adjacent rock area of rock-salt cavern

### 3.3 计算步骤

为了计算应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔过程，编制了有限差分计算程序来计算应力-溶解耦合作用下的盐腔形态变化，以及不同溶腔形态时的围岩应力场和应变场。具体计算步骤如下。

#### 3.3.1 第一循环步的计算

##### (1) 无溶蚀作用下岩盐力学计算

给定初始的盐腔形态，对盐腔围岩的初始应力场、应变场进行计算。采用的力学模型是应变硬化-软化模型，应用 FLAC 计算软件进行数值计算，黏聚力随着等效塑性应变的变化可采用式 (1) [16] 中溶解前的计算公式来计算。

$$\left. \begin{array}{l} \text{溶解前:} \\ \overline{\varepsilon}^p < \overline{\varepsilon}^{p0} \quad C(\overline{\varepsilon}^p) = 9.34 \exp(-\overline{\varepsilon}^p / 7.48) + 4.20 \\ \text{溶解后:} \\ \overline{\varepsilon}^p \geq \overline{\varepsilon}^{p0} \quad C'(\overline{\varepsilon}^p, t) = K(\overline{\varepsilon}^{p0}, t) C(\overline{\varepsilon}^p) \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中： $\overline{\varepsilon}^p$  为等效塑性应变； $\overline{\varepsilon}^{p0}$  为溶解阶段所对应的等效塑性应变 (%)； $K$  为比例系数，它与溶解阶段的试验条件（溶解阶段的  $\overline{\varepsilon}^{p0}$  和溶解时间  $t$ ）相关；其他符号意义见文献[16]； $K(\overline{\varepsilon}^{p0}, t)$  的计算表达式[16]为

$$K(\overline{\varepsilon}^{p0}, t) = \frac{1}{A} \left( 1.01 - 0.06 \overline{\varepsilon}^{p0} \right) \cdot [0.52 \exp(-t/1.95) + 0.48] \quad (2)$$

式中： $A$  为常数，取为 0.578。

(2) 将盐腔充满水，忽略充水过程对盐腔形状的影响。

##### (3) 溶蚀作用下岩盐力学模型的计算

盐腔围岩与水接触后,假定盐腔围岩受水影响范围为盐腔围岩边界单元。依据溶蚀作用下岩盐塑性力学模型(该模型的假设条件、计算方法和参数等参考文献[16]),对溶蚀作用下盐腔围岩进行力学计算,具体计算步骤:①改变盐腔围岩边界单元的黏聚力参数值,在水影响作用范围内的盐腔围岩边界单元的黏聚力值采用式(1)中溶解后的黏聚力值计算公式来计算。②对于在水影响范围以外的盐腔围岩单元,黏聚力值采用式(1)中溶解前的计算公式来计算。③使用FLAC计算软件对盐腔围岩的应力场和应变场重新计算。④给出围岩边界单元的等效塑性应变值。

#### (4) 应力作用下盐腔形状计算

基于所给出的围岩边界单元等效塑性应变值,将盐腔内流体区域单独考虑,近似模拟水溶建腔工艺,对盐腔内流体区域的浓度场进行计算,进而可得到盐腔形状的变化。具体计算过程为

##### ①建立盐腔内流体区域计算模型

单独考虑盐腔内的流体区域,建立的计算模型如图3所示。图中, $\Omega$ 为流体区域; $\Gamma_1$ 为不溶边界; $\Gamma_2$ 为侧溶边界,即盐腔围岩边界; $A$ 、 $B$ 分别为 $\Gamma_1$ 和 $\Gamma_2$ 的交点。需要说明的是:侧溶边界 $\Gamma_2$ 的形状随着溶蚀作用而不断变化。

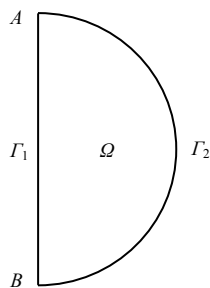


图3 流体区域计算模型示意图  
Fig.3 Sketch of fluid area model

在初始时刻(初始条件),流体区域 $\Omega$ 内初始的浓度场 $C$ 和速度场 $u$ 均为0,可标记为

$$C|_{\Omega,t=0} = 0; u|_{\Omega,t=0} = 0 \quad (3)$$

对于计算模型的边界条件,速度边界条件在盐腔边界表面上可取无滑移边界条件,即

$$u|_{\Gamma_2} = 0 \quad (4)$$

浓度边界条件:溶蚀表面 $\Gamma_2$ 浓度取常数,即饱和浓度 $C_s$ ;  $\Gamma_1$ 为不渗透边界,可标记为

$$C|_{\Gamma_2} = C_s; \frac{\partial C}{\partial n}|_{\Gamma_1} = 0 \quad (5)$$

由于在侧溶边界上速度为0,故可以采用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来计算盐腔围岩边界上不同等效塑性应变下岩盐的溶解速率。

##### ②流体区域网格划分

流体区域网格划分与盐腔围岩区域的网格划分不同,两者只是共用一个盐腔边界;流体区域用四边形网格进行划分,靠近 $\Gamma_1$ 的区域网格小而密,远离 $\Gamma_2$ 的区域网格大而疏。

##### ③应力作用下盐腔形状计算

根据所给出的围岩边界单元的等效塑性应变值。盐腔侧溶边界处的等效扩散系数 $D^*$ 值( $D^*$ 的概念是宏观上单位时间内通过单位面积的质量流与法向浓度梯度的比例系数,用于描述应力作用下单位溶蚀面积上的宏观溶蚀速率<sup>[15]</sup>)可由式(6)<sup>[15]</sup>确定。

$$\frac{D^*(\bar{\varepsilon}^p, t)}{D} = (-13.48 + 16.02 \exp(t/1.1)) \cdot \left[ 2.71 - \frac{704.35}{1 + \exp((\bar{\varepsilon}^p - 6.53)/0.39)} \right] \quad (6)$$

式中:无应力作用时岩盐溶蚀的扩散系数 $D = 2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变(%); $t$ 为溶解时间(100 s)。

将所确定的 $D^*$ 值代入应力作用下岩盐溶蚀模型中,对盐腔内流体区域内浓度场进行计算,求得时间 $t$ 内浓度场的变化( $t$ 为这一步中岩盐溶解过程的总时间)。应力作用下岩盐溶蚀模型的计算方法见参考文献[15]。

盐腔形状计算。溶解厚度 $R$ 与侧溶边界 $\Gamma_2$ 处浓度梯度之间的计算公式<sup>[15]</sup>为

$$\frac{dR^*(\bar{\varepsilon}^p, t)}{dt} = -D^*(\bar{\varepsilon}^p, t) \frac{M}{\rho_s} \frac{\partial C}{\partial n}|_{\Gamma_2} \quad (7)$$

根据式(7)可以计算出溶解 $t$ 所溶解掉的 $R$ 值,继而求得侧溶边界 $\Gamma_2$ 的形状变化。

物质平衡检验。根据物质平衡原理,对整个盐腔流体计算区域进行总质量的守恒检验。假定在 $t_{n+1}$ 时刻进行质量守恒检验,定义相对误差进行物质平衡检验:

$$\delta M^{n+1} = \Delta M^{n+1} / M^{n+1} < \varepsilon_M \quad (8)$$

式中： $\varepsilon_M$  为质量守恒许可误差，如果计算出来的结果不符合式 (8)，则调整计算，控制和调整时间步长和单元大小； $M^{n+1}$  为  $t_{n+1}$  时刻实际计算的总质量值； $\Delta M^{n+1}$  采用如下计算公式：

$$\Delta M^{n+1} = M^{n+1} - M^0 + M_{\text{出}}^{n+1} - M_{\text{入}}^{n+1} \quad (9)$$

式中： $M^0$  为初始状态的总质量； $M_{\text{出}}^{n+1}$  为  $t_{n+1}$  时刻流出的总质量； $M_{\text{入}}^{n+1}$  为  $t_{n+1}$  时刻流入的总质量。

④溶解时间  $t$  的控制

溶解时间  $t$  的选择取决于所溶解掉的岩盐厚度，当盐腔侧溶边界处的溶解厚度  $R > d$  时 ( $d$  为围岩边界单元厚度)，则认为盐腔内流体的溶蚀计算停止，从而确定溶解时间  $t$ 。

至此，第一循环步的计算结束，盐腔围岩的应力应变场以及盐腔形状已发生了变化。

3.3.2 第二循环步的计算

(1) 导入第一循环步中计算出来的盐腔形状。

(2) 进行溶蚀作用下盐腔围岩力学计算

计算过程：①将第一循环步中溶解掉的盐腔围岩边界单元“开挖”，在 FLAC 计算中对这些单元赋 NULL，并算出此时围岩中的等效塑性应变分布。②由于溶解“开挖”，盐腔围岩边界发生了变化，变化后的盐腔围岩边界单元的黏聚力值采用式 (1) 中溶解后的黏聚力值计算公式计算。③对于在水影响范围以外的盐腔围岩单元，其黏聚力值采用式 (1) 中溶解前的计算公式来计算。④使用 FLAC 计算软件计算出溶蚀作用下围岩边界单元的等效塑性应变  $\varepsilon^p$  值。

(3) 进行应力作用下盐腔形状计算

基于上一循环步所计算出的盐腔形状，对盐腔流体区域建立计算模型，划分网格；基于溶蚀作用下围岩边界单元的  $\varepsilon^p$  值，采用式 (6) 确定盐腔侧溶边界处的  $D^*$  值，根据应力作用下岩盐溶蚀模型以及  $D^*$  值，对浓度场以及盐腔形态进行计算，同时进行溶解计算中时间步长的控制以及物质平衡检验。

在第二循环步中，计算过程基本与第一循环步相同，假设条件、控制条件也与第一循环步相同。

紧接着的计算步骤就是第二循环步的重复，通过不断地循环计算，就可以得到不同溶解时间下盐腔形状的变化。当盐腔围岩边界达到预定的溶腔范围线时，停止计算。

采用的应力-溶解耦合作用下的盐腔形态变化计算程序流程图见图 4，溶蚀作用下盐腔围岩力学模型计算模块的流程图见图 5，应力作用下盐腔形

状计算模块的流程图见图 6。

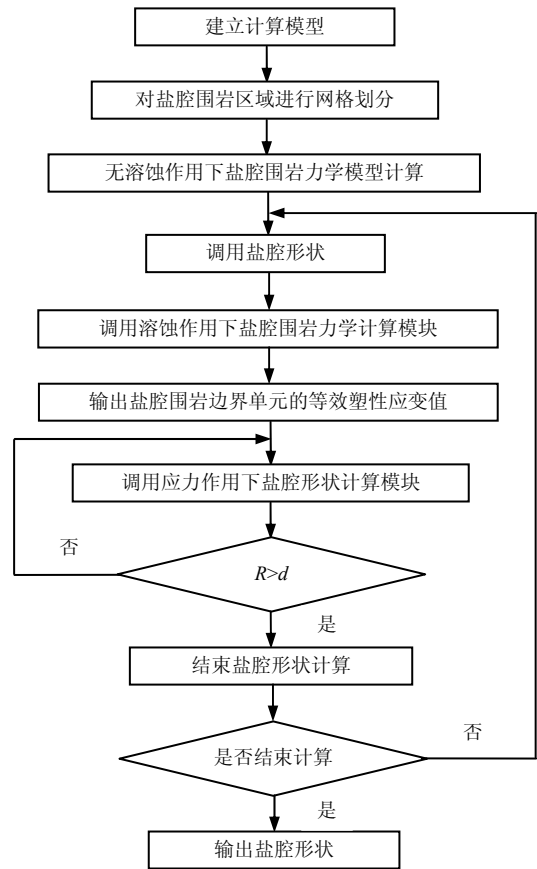


图 4 应力-溶解耦合作用下的盐腔形态变化计算程序流程图

Fig.4 Flow chart of computing program of rock-salt cavern shape under coupled mechanical-dissolving effect

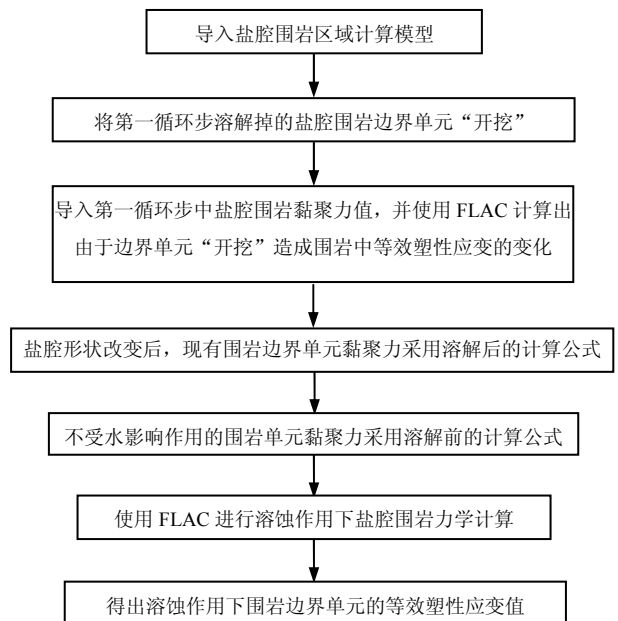


图 5 溶蚀作用下盐腔围岩力学计算模块流程图

Fig.5 Flow chart of computing program of wall rock mechanical model under dissolving effect

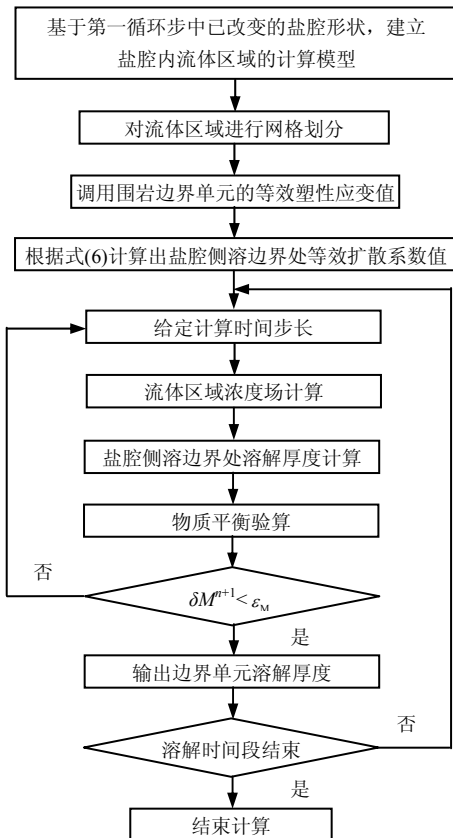


图6 应力作用下盐腔形状计算模块流程图

Fig.6 Flow chart of computing program of rock-salt cavern shape under mechanical effect

#### 4 应力-溶解耦合与纯溶解作用下盐腔水溶建腔计算结果比较

为了更加清晰地反映应力-溶解耦合作用对盐腔水溶建腔过程的影响,对应力-溶解耦合与纯溶解作用下盐腔水溶建腔的计算结果进行对比分析。

##### 4.1 纯溶解作用下盐腔水溶建腔计算步骤

纯溶解作用下盐腔水溶建腔过程的计算在建立的计算模型、流体区域网格划分,以及盐腔内流体区域计算模型的初始条件、边界条件和模型假设等方面,与应力作用下盐腔形状计算基本一致。两者之间最主要的不同在于:在纯溶解作用下盐腔水溶建腔过程的计算中,盐腔侧溶边界处扩散系数是相同的,都取纯溶解状态下的扩散系数 $D$ ,其值不受应力因素的影响。纯溶解作用下盐腔水溶建腔过程的计算程序流程图如图7所示纯溶解作用下盐腔水溶建腔过程的具体计算步骤:

- ①建立纯溶解作用下盐腔内流体区域的计算模型,其初始的计算模型如图3所示。
- ②调用盐腔形状。
- ③给定纯溶解作用下盐腔侧溶边界处的扩散系数 $D$ 值,对每一个时间步长内盐腔内流体区域的浓

度场变化进行计算。

- ④计算盐腔侧溶边界处的溶解厚度。

- ⑤得出盐腔形状。

⑥溶解时间步长以及物质平衡检验与上述应力作用下盐腔形状计算中的一致。

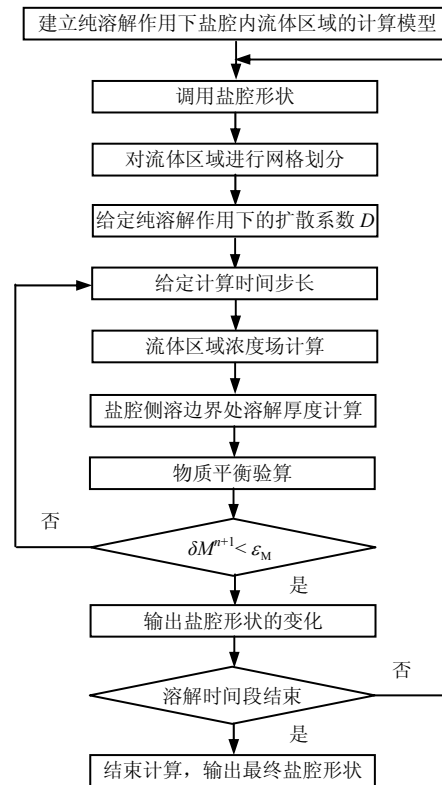


图7 纯溶解作用下盐腔形状计算程序流程图

Fig.7 Flow chart of computing program of rock-salt cavern shape under dissolving effect

##### 4.2 计算结果对比

盐腔计算模型的具体参数为:高度 $H=60\text{ m}$ ,宽度 $L=30\text{ m}$ ,初始盐腔的半径 $r=2.5\text{ m}$ ,预定盐腔范围线的半径 $R=10\text{ m}$ ,上覆均布荷载 $P_0=25\text{ MPa}$ ,侧压力 $P_1=30\text{ MPa}$ ,岩盐密度 $\rho_s=2\ 160\text{ kg/m}^3$ 。在初始溶腔和预定溶腔范围线之内的区域,采用等间距的环向网格进行划分,其厚度均为 $d=20\text{ cm}$ 。

通过应力-溶解耦合与纯溶解作用下盐腔水溶建腔计算,所取得的不同循环步时应力-溶解耦合与纯溶解作用下盐腔形状变化如图8所示,所取得的不同循环步时应力-溶解耦合作用下盐腔围岩区域的等效塑性应变分布变化如图9所示。图8中,绿色区域代表不同循环步时纯溶解作用下盐腔被溶解掉的区域,白色的区域与绿色区域之和代表不同循环步时应力-溶解耦合作用下盐腔被溶解掉的区域,蓝色区域则代表不同循环步时未溶解的围岩区域。

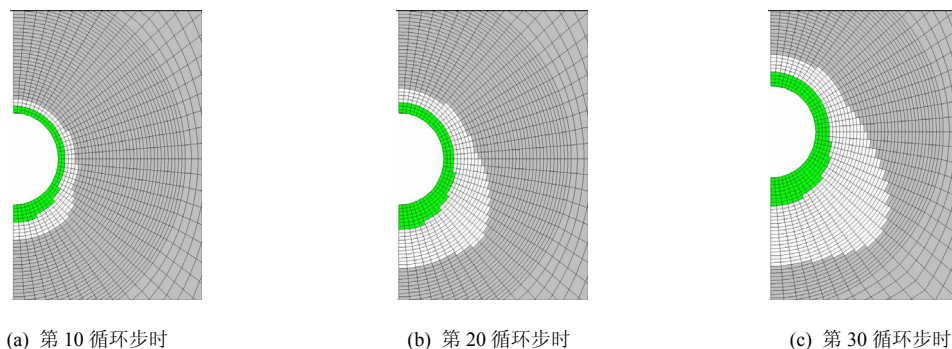


图 8 不同循环步时应力-溶解耦合与纯溶解作用下盐腔形状变化  
 Fig.8 Difference between rock-salt cavern shape at different cycle steps under coupled mechanical-dissolving effect and dissolving effect

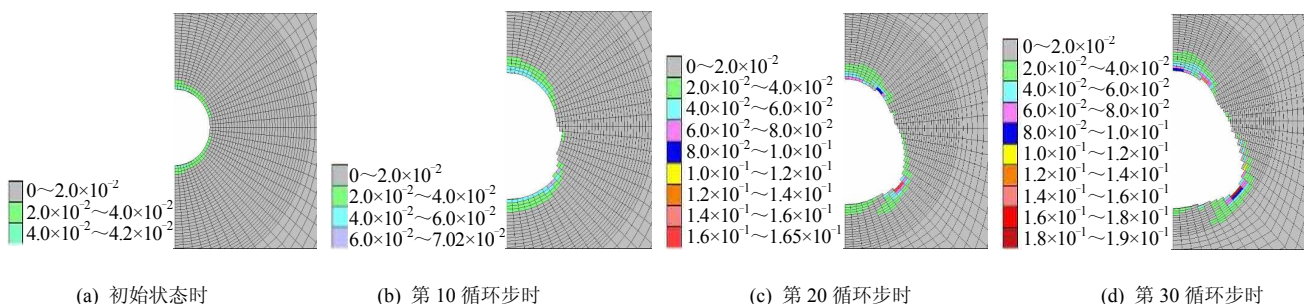


图 9 不同循环步时应力-溶解耦合作用下盐腔围岩区域等效塑性应变变化  
 Fig.9 Difference between equivalent plastic strain of wall rock on rock-salt cavern under coupled mechanical-dissolving effect at different cycle steps

从图 8、9 中可以看出，(1) 随着溶蚀作用的进行，盐腔围岩中的等效塑性应变分布发生了很大的变化，随着盐腔形状的变化，在盐腔形状改变最大的地方，围岩中的等效塑性应变也急剧变化。(2) 在相同条件下，应力-溶解耦合作用下盐腔的溶蚀速率比纯溶解作用下盐腔的溶蚀速率快，且在应力-溶解耦合作用下所溶解的岩盐区域要比纯溶解作用下所溶解的区域大。(3) 随着计算循环步的增加，盐腔右下方的围岩边界单元的等效塑性应变发生明显变化，并且使得应力-溶解耦合作用下盐腔被溶解掉的区域（即白色区域）在右下方变化更为突出。造成该现象的原因是由于应力-溶解耦合作用下，首先由于初始状态下围岩边界单元的等效塑性应变分布不同，造成不同围岩边界单元处溶蚀速率也不相同，从而使盐腔形状发生了改变；继而，由于盐腔形状发生了改变，其围岩边界单元处的等效塑性应变分布也随之发生改变。在等效塑性应变大的地方，溶蚀速率变大，使得此处溶腔形状变化加大；而由于溶腔形状变化加大，则此处发生应力集中，等效塑性应变值会变得更大，就会进一步加大此处溶腔形状的变化。(4) 应力-溶解耦合作用、纯溶解作用下计算得到的盐腔形状，都为上小下大，但存在着

较大的差别。纯溶解作用下计算得到的盐腔形状为鸡蛋状，而应力-溶解耦合作用下计算得到的盐腔形状为梨形，并且比纯溶解作用下计算得到的盐腔的下端更扁更宽。

图 10 为在应力-溶解耦合作用、纯溶解作用下计算得到的盐腔形状与实际盐腔形状的对比如。

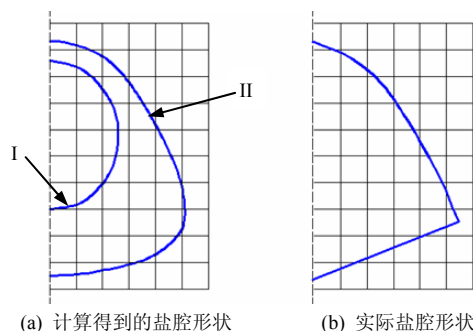


图 10 计算得到盐腔形状与实际盐腔形状对比  
 Fig.10 Difference between computing rock-salt cavern shape

在图 10(a)中，曲线 I 为纯溶解作用下计算得到的盐腔形状，曲线 II 为应力-溶解耦合作用下计算得到的盐腔形状，图中的竖向虚线代表中心轴。图 10(b)为实际溶腔形状<sup>[5]</sup>，可见应力-溶解耦合作用下计算得到的盐腔形状与实际溶腔形状较为符合。

## 5 结论

(1) 在盐腔成腔过程中, 应力-溶解耦合效应对盐腔形状的影响不可忽略。

(2) 应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机理在于, 由于溶蚀作用, 在水的溶蚀影响范围内的腔壁围岩力学性质发生变化。同时, 由于腔壁边界处围岩力学性质的改变, 造成盐腔内部溶蚀过程发生变化, 从而使盐腔形态发生改变。

(3) 根据应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机理, 针对实际的盐腔水溶单井建腔工艺, 建立了应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔计算方法。

(4) 使用编制的应力-溶解耦合作用下的盐腔形态变化计算程序以及 FLAC 计算软件对水溶建腔过程进行了计算, 并对应力-溶解耦合作用、纯溶解作用下计算得到的盐腔形状与实际盐腔形状进行了对比, 发现应力-溶解耦合作用下计算得到的盐腔形状与实际溶腔形状较为符合。

本文研究成果可为进一步研究储库盐腔水溶建腔机制提供理论依据和分析基础。

### 参考文献

- [1] HOU Zheng-meng. 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: 725—738.
- [2] LIANG W G, YANG C H, ZHAO Y S, et al. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44(3): 400—411.
- [3] 房敬年, 周辉, 胡大伟, 等. 岩盐的弹塑性损伤耦合模型研究[J]. 岩土力学, 待刊.  
FANG Jing-nian, ZHOU Hui, HU Da-wei, et al. Study of coupled elasto-plasto-damage model of rock salt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, in press.
- [4] 张鹏, 卢青峰, 张文广, 等. 岩盐溶腔顶板稳定性分析及其控制[J]. 中国井矿盐, 2011, 42(3): 11—14.  
ZHANG Peng, LU Qing-feng, ZHANG Wen-guang, et al. Stability analysis and control of rock salt cavern roof[J]. *China Well and Rock Salt*, 2011, 42(3): 11—14.
- [5] 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 Xue-ying, YANG Chun-he, CHEN Jian-wen. 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.
- [6] 戴永浩, 陈卫忠, 杨春和, 等. 金坛盐岩储气库运营模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3574—3580.  
DAI Yong-hao, CHEN Wei-zhong, YANG Chun-he, et al. A study of model test of Jintan rock salt gas storage's operation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3574—3580.
- [7] 邵保平, 赵阳升. 层状盐岩溶腔储气库长期运行稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(8): 1562—1567.  
XI Bao-ping, ZHAO Yang-sheng. Investigation on stability of gas storage caverns in bedded rock salt[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(8): 1562—1567.
- [8] 杨强, 邓检强, 吕庆超, 等. 基于能量判据的盐岩库群整体稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1513—1521.  
YANG Qiang, DENG Jian-qiang, LÜ Qing-chao, et al. Global stability analytical method of cavern group in salt rock based on energy criterion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(8): 1513—1521.
- [9] 班凡生. 盐穴储气库水溶建腔优化设计研究[D]. 北京: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2008.
- [10] 班凡生, 耿晶, 高树生, 等. 岩盐储气库水溶建腔的基本原理及影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2): 261—266.  
BAN Fan-sheng, GENG Jing, GAO Shu-sheng, et al. Studying on basic theory and influence factor of gas storage in salt caverns building with water solution[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(2): 261—266.
- [11] 赵志成, 朱维耀, 单文文. 盐穴储气库水溶建腔机制研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 107—109.  
ZHAO Zhi-cheng, ZHU Wei-yao, SHAN Wen-wen. Research on mechanism of solution mining for building underground gas storage in salt cavern[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(5): 107—109.
- [12] 霍琰. 盐岩储气库建腔期流场实验研究及数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [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 Yan-chun, HU Da-wei, et al. Study of coupled penetrating-dissolving model and experiment for salt rock cracks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 946—950.



- and Engineering, 2005, (11).
- [4] 于玉贞, 邓丽军. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1320—1323.  
YU Yu-zhen, DENG Li-jun. Centrifuge modeling of seismic behavior of slopes reinforced by stabilizing pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1320—1323.
- [5] 于玉贞, 李荣建, 李广信, 等. 抗滑桩静力与动力破坏离心模型试验对比分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1090—1093.  
YU Yu-zhen, LI Rong-jian, LI Guang-xin, et al. Centrifuge modeling of static and dynamic failure of stabilizing piles in slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(7): 1090—1093.
- [6] 祁生文, 伍法权. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学 (E 辑技术科学), 2003, 33(增刊): 28—40.  
QI Sheng-wen, WU Fa-quan. The regularity of response of slope dynamic[J]. **Science in China Series E**, 2003, 33(Supp.): 28—40.
- [7] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 624—632.  
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 624—632.
- [8] 苏栋, 李相菘. 水平多向荷载下桩-土相互作用初探[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 603—608.  
SU Dong, LI Xiang-song. Preliminary study on soil-pile interaction under multidirectional horizontal loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(3): 603—608.

#### 上接第 44 页

- [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 Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, 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.
- [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 Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Study of dissolving model under effect of stress for rock salt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 296—302.
- [16] 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, 待刊.  
TANG Yan-chun, ZHOU Hui. Study of rock salt plastic mechanical model with dissolving effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, in press.
- [17] 汤艳春, 房敬年, 周辉. 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验研究[J]. 岩土力学, 待刊.  
TANG Yan-chun, FANG Jing-nian, ZHOU Hui. Study of rock salt dissolving characteristics test with triaxial stress effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, in press.
- [18] TANG Yan-chun, ZHOU Hui. Experimental study of dissolving effect on mechanical characteristics of rock salt[C]//The 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Asheville: [s. n. ], 2009.  
TANG Yan-chun, ZHOU Hui, XIONG Jun. Study on some phenomena of rock salt mechanical property test with dissolving effect[J]. **Advanced Science Letters**, 2012, 12: 299—303.