

文章编号: 1000-7598-(2008)02-296-07

应力作用下岩盐的溶蚀模型研究

汤艳春¹, 周 辉¹, 冯夏庭¹, 谢越韬²

(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, 武汉 430071;

2. 河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098)

摘 要: 有无应力作用下的岩盐溶蚀机理是一致的, 两者之间的差别在于溶蚀作用面积不同。首先通过分析岩盐的溶蚀机理, 建立了无应力作用下的岩盐溶蚀模型; 通过对有无应力作用下岩盐溶蚀作用差异的分析, 提出了等效扩散系数的概念, 用于描述应力作用下岩盐的宏观溶蚀速率, 从而建立了应力作用下的岩盐溶蚀模型, 并提出了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来计算等效扩散系数的方法, 得到了等效扩散系数与扩散系数的比值与轴向塑性应变、溶解时间之间的关系。其研究成果为进一步研究岩盐应力-溶解耦合机理奠定了基础。

关 键 词: 岩盐; 溶蚀; 应力作用; 等效扩散系数

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on dissolving model under effect of stress for rock salt

TANG Yan-chun¹, ZHOU Hui¹, FENG Xia-ting¹, XIE Yue-tao²

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

Wuhan 430071, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The dissolving mechanism of rock salt with and without stress is same, but difference between them is the variation of the dissolved surface. Dissolving model of rock salt without stress is set up based on the analysis of dissolving mechanism. By way of analyzing the difference of dissolving mechanism of rock salt with and without stress, equivalent dissolving coefficient is proposed to describe the macro-dissolving speed of rock salt under the stress, based on which dissolving model of rock salt under the stress is set up. The method to calculate the equivalent dissolving coefficient is proposed based on the uniaxial meso-mechanical test data under the coupled mechanical-dissolving effect, and the relationship among axial plastic strain, dissolving time and equivalent dissolving coefficient is obtained. The results can provide an important basis for the further analysis of coupled mechanical-dissolving mechanism of rock salt.

Key words: salt rock; dissolution; effect of stress; equivalent dissolving coefficient

1 引 言

岩盐水溶开采后可形成巨大的岩盐溶腔, 它是一种优良的战略能源储备场所。利用岩盐溶腔储存能源(石油、天然气等)具有许多的优点, 特别是其安全性高, 被称为“高度战略安全的储备库”, 因而岩盐作为能源地下储存介质在欧美等西方发达国家得到了广泛的应用^[1,2]。据统计, 世界上许多国家的能源地下储存库建在岩盐介质或报废的废盐矿井中。能源战略储备和商业储存也是我国能源战

略的重要课题之一, 在今后一段时间内将要建设我国的能源战略储备与商业地下储存库, 以确保国民经济和社会的可持续发展^[3]。

在水溶建腔过程中, 其溶腔过程和稳定性主要受盐腔围岩的应力分布^[4-7]和盐腔壁面的溶蚀特性^[8-11]两个方面因素的控制。以往关于盐腔溶腔过程和稳定性的研究大都是分别单独考虑这两方面因素的影响, 并取得了丰富的研究成果, 但却很少考虑上述两种因素之间的相互作用。实际上, 在溶腔过程中, 盐腔围岩的应力分布和盐腔壁面的溶蚀作

收稿日期: 2007-03-19

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(No.50579091)。

作者简介: 汤艳春, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程研究方面的工作。E-mail: tych8102-2002@163.com

用这两方面是相互作用、相互影响的：由于围岩应力场的存在，使得围岩产生破坏，从而使盐腔壁面的溶蚀特性发生变化，造成岩盐的宏观溶解速度变大。同时，溶蚀特性的变化会对岩盐的力学性质和溶腔的稳定性、形状控制等产生不可忽视的影响。因此，研究岩盐的溶解特性和应力之间的耦合作用对于盐腔溶腔过程和稳定性分析是至关重要的。然而，目前关于这方面的研究尚不充分。

针对上述问题，本文首先研究岩盐的溶蚀机理及无应力作用下岩盐溶蚀模型，进而考虑有应力作用下岩盐溶蚀机理的变化，建立应力作用下岩盐的溶蚀模型，最后通过应力-溶解耦合作用下的岩盐细观力学试验对该模型进行验证，为进一步研究岩盐的应力-溶解耦合机理奠定理论和试验基础。

2 岩盐的溶蚀机理

在有应力作用和无应力作用下，岩盐溶解的过程实际上都是岩盐分子（溶质）在水（溶剂）中的扩散过程，两者在溶蚀机理上是一致的。

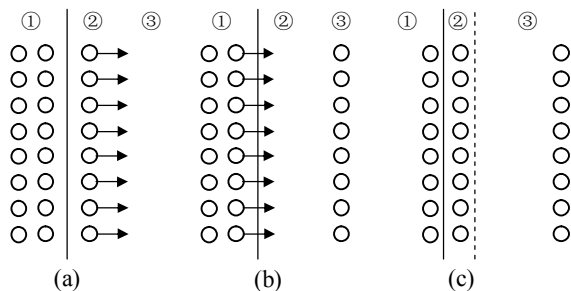
为了研究的方便，本文根据岩盐的溶解机理对其溶蚀过程作如下简化：如图1所示，边界层内侧紧贴岩盐固壁有一层极薄的底层，底层内岩盐溶液浓度始终保持恒定不变，可视为饱和浓度；底层以外为扩散区。从岩盐固壁上溶解出来的岩盐分子经过边界层的底层进入扩散区，而底层内的物质总量始终在溶解与扩散之间维持着动态平衡。

溶蚀过程可以分为以下3步：

(a) 边界层中，底层内的岩盐分子经扩散作用进入扩散区，底层内溶液浓度降低，低于饱和浓度；

(b) 岩盐固壁发生溶解，溶解出来的岩盐分子进入边界层底层，使底层内溶液浓度重新达到饱和；

(c) 由于固壁上的岩盐溶解，固壁壁面（连同所附着的边界层一起）后退一段微小距离，底层与扩散区之间维持动态物质平衡。



①—岩盐固壁；②—边界层；③—扩散区

图1 岩盐溶蚀过程示意图

Fig. 1 Sketch of rock salt dissolving process

3 无应力作用下岩盐的溶蚀模型

岩盐溶蚀过程实际上是一个复杂的流体动力学和化学动力学过程^[12,13]，因此可以根据三维对流-扩散过程的动力学分析，并结合流体力学的基本理论和化学动力学原理，建立溶腔过程中溶质-流体流动的数学模型，以研究溶腔边界形态变化规律。

3.1 模型的基本假设

为了分析的方便，首先做如下假设和简化：

(1) 假设岩盐是一种各向同性的均质材料，忽略岩盐结晶方向、层理等微结构的各向异性对溶蚀特性的影响；

(2) 忽略岩盐溶解过程中的化学反应内部的过程和热力学过程；

(3) 忽略岩盐中不可溶杂质的影响；

(4) 流体是不可压缩的；

(5) 流体输运过程中仅受到流体自身重力场的作用，不考虑其他外力对流体输运所产生的影响；

(6) 不考虑温度对岩盐溶解过程的影响。

3.2 流体输运方程

根据不可压缩流体动力学的基本理论，可以建立岩盐溶蚀过程中质量和浓度的输运方程。

(1) 连续性方程

对于不可压缩流体，连续性方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中： $\mathbf{u}$ 为速度矢量。

(2) 运动方程

根据 Navier-Stokes 方程，流体动量方程可写为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

式中： ν 为运动黏度； ∇p 为压强梯度； p 为流体平均动力压强； $\mathbf{f}$ 为单位质量力矢量，则对于重力场，式(2)变为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -g \nabla h - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3)$$

式中： h 为铅垂坐标（向上为正）。

(3) 对流-扩散方程

岩盐溶蚀的过程实际上就是溶质在溶剂中的输运过程，可用对流-扩散方程来描述：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) C = \nabla (D \nabla C) \quad (4)$$

式中： C 为摩尔浓度； D 为扩散系数。

3.3 岩盐溶蚀过程边界形态方程

(1) Fick 第一扩散定律

扩散作用可用如下 Fick 第一扩散定律来描述:

$$J = D \frac{\partial C}{\partial \vec{n}} \quad (5)$$

式中: J 为扩散通量, 即物质通过垂直于法线方向单位面积的质量流; $\vec{n}$ 为法线方向矢量。

(2) 表征岩盐边界形态变化的动边界方程

沿岩盐边界法线方向作一个剖面, 并建立坐标系, 如图 2 所示。

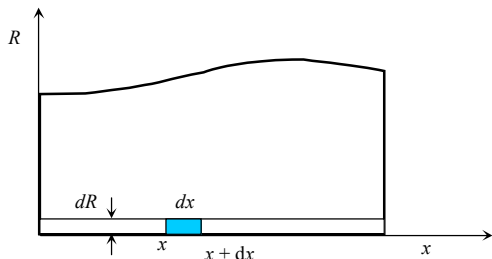


图 2 岩盐边界溶蚀示意图

Fig. 2 Sketch of rock salt boundary dissolution

对于单位厚度的微元体 dx , 根据物质平衡原理可以得到

$$J dx dt = dx dR \frac{\rho_s}{M} \quad (6)$$

式中: $J dx dt$ 为在时间 dt 内岩盐试件表面从断面 $1 \times dx$ 溶入溶液中的岩盐的摩尔数; $dR dx \frac{\rho_s}{M}$ 为在时间 dt 内、在距离 dx 之内所溶解的岩盐的体积 ($dR dx$) 对应的摩尔数; ρ_s 为岩盐的密度; M 为岩盐的摩尔质量; R 为岩盐边界的溶解厚度。

联立式 (5) 和式 (6) 可以建立岩盐边界面的溶解速度方程:

$$\frac{dR}{dt} = -D \frac{M}{\rho_s} \frac{\partial C}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma_1} \quad (7)$$

式中: Γ_1 为岩盐的边界面。

3.4 辅助方程

在描述流体输运的方程中, 由于密度 ρ 与浓度 C 不是独立的变量, 还应该建立两者之间的关系:

$$\rho = \rho_w + CM \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \quad (8)$$

式中: ρ_w 为蒸馏水的密度。

3.5 方程定解条件

以上方程组只有加上适当的初始条件和边界条件, 才能构成相应的定解问题。

(1) 初始条件

在开始溶蚀之前, 与岩盐边界相接触的水溶液为静止的。因此, 本模型的初始条件为

$$u|_{t=0} = 0 \quad (9)$$

$$C|_{t=0} = C_0 \quad (10)$$

式中: C_0 为初始状态时水溶液的摩尔浓度, $0 \leq C_0 \leq C_s$; C_s 为岩盐水溶液的饱和摩尔浓度。

(2) 边界条件

根据所建立的岩盐溶蚀模型, 在岩盐边界面处的溶蚀表面浓度可以取为常数, 即岩盐水溶液的饱和摩尔浓度,

$$C|_{\Gamma_1} = C_s \quad (11)$$

综上所述, 根据连续性方程、动量方程、对流扩散方程、岩盐边界面的溶解速度方程以及辅助方程和定解条件, 可以得到无应力作用下岩盐溶蚀模型的定解偏微分方程组为

$$\left. \begin{aligned} \nabla u &= 0; \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u &= f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u; \\ \frac{\partial C}{\partial t} + (u \nabla) C &= \nabla (D \nabla C); \\ \rho &= \rho_w + CM \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right); \\ \frac{dR}{dt} &= -D \frac{M}{\rho_s} \frac{\partial C}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma_1}; \\ u|_{t=0} &= 0; C|_{t=0} = C_0; C|_{\Gamma_1} = C_s \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

4 有无应力作用下岩盐溶蚀作用的差异

在应力作用下, 岩盐与水溶液接触产生溶蚀时是不能忽略岩盐所承受的应力作用的, 有无应力作用下的岩盐溶蚀机理是一致的, 但还是存在一些差异:

(1) 无应力作用下, 岩盐的溶蚀作用只在岩盐固体边界面上发生, 也就是说溶蚀作用面就是岩盐的固体边界面。

(2) 在应力作用下, 特别是在屈服以后, 岩盐会产生塑性变形, 从而在岩盐固体表面上产生一定数量的裂纹。此时, 当岩盐与水溶液发生接触产生溶蚀时, 岩盐的溶蚀作用不仅在其固体边界面上发生, 而且也会在岩盐表面裂纹内部发生, 也就是说此时的溶蚀作用面是岩盐的固体边界面与所有表面裂纹的表面之和。

通过上面的分析可以看出在应力作用下岩盐的溶蚀作用发生了变化, 其溶蚀作用面比无应力作用下的溶蚀作用面大, 并且岩盐裂纹的数量和尺寸随着塑性应变的增加而增加, 岩盐的溶蚀作用面积也不断变大, 造成相同时间内溶解的岩盐质量会越

来越大。因此，在应力作用下岩盐的宏观溶蚀速率会增大，并且岩盐的宏观溶蚀速率与岩盐的塑性应变之间必然存在一定的关系。

5 应力作用下岩盐的溶蚀模型

由于岩盐裂纹的数量和尺寸很难统计出来，应力作用下的岩盐溶蚀作用面的面积无法计算，所以无法直接套用无应力作用下的岩盐溶蚀模型。通过以上的分析，注意到：宏观上在有无应力作用这两种情况下岩盐的宏观溶蚀速率是有差异的，并且可以用相同的岩盐表面在相同时间内所溶解掉的岩盐质量这一参数来描述这种差异，而且岩盐的溶蚀作用实际上是由岩盐表面的扩散作用决定的，即是由岩盐溶蚀作用面的面积及扩散系数这两个因素来决定的。

在无法计算出实际岩盐溶蚀作用面积的情况下，可以进行等效简化：在有无应力作用这两种岩盐溶蚀情况下，假设岩盐溶蚀作用面积不变，而其宏观扩散系数发生了变化。应力作用下的岩盐扩散系数可以称之为等效扩散系数 D^* ，等效扩散系数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。若用等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 来描述岩盐的破坏程度，则它与岩盐的塑性应变之间存在着一定的关系。另外，由于不同溶解时间下岩盐的宏观溶蚀速率也有着差别，因此等效扩散系数 D^* 与等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 、溶解时间 t 之间都存在着一定的关系，可以写为 $D^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ 。

根据上述分析，可以建立应力作用下的岩盐溶蚀模型，具体如下：

(1) 前提假设：①无应力作用下的岩盐溶蚀模型的表达形式和假设在此仍然成立；②假设可以用等效扩散系数来描述在应力作用下的岩盐溶蚀作用。

(2) 模型的数学表达式

根据以上前提假设，可以写出应力作用下岩盐溶蚀模型的定解偏微分方程组的形式为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \mathbf{u} &= 0; \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u}; \\ \frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) C &= \nabla \cdot (D^*(\bar{\varepsilon}^p, t) \nabla C) \\ \rho &= \rho_w + CM \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right); \\ \frac{dR^*(\bar{\varepsilon}^p, t)}{dt} &= -D^*(\bar{\varepsilon}^p, t) \frac{M}{\rho_s} \frac{\partial C}{\partial \bar{n}} \Big|_{r_1}; \\ u|_{r=0} &= 0; C|_{r=0} = C_0; C|_{r_1} = C_s \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

方程组式 (13) 中，由于使用的是等效扩散系数 $D^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ ，故所计算出来的单位面积下的溶解厚度也应该为等效溶解厚度 $R^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ 。在应力作用下，如果给定不同等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 、溶解时间 t 所对应的 $D^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ 值，就可以得出不同等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 和溶解时间 t 所对应的岩盐溶蚀模型。

6 等效扩散系数的计算

不同等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 、溶解时间 t 所对应的 $D^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ 值无法通过试验直接测出，但是等效溶解厚度 $R^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ 可以通过试验来测定。为了计算出等效扩散系数 $D^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ ，可以通过试验首先确定出等效溶解厚度值，再代入定解偏微分方程组式 (13) 中，计算出与等效溶解厚度 $R^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ 相对应的等效扩散系数 $D^*(\bar{\varepsilon}^p, t)$ 值。

根据以上分析，笔者采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的“应力-水流-化学耦合的岩石破裂全过程细观力学试验系统”进行了一系列的单轴压缩条件下应力-溶解耦合效应的岩盐细观力学试验，得出了不同轴向塑性应变 ε^p 和溶解时间 t 下所溶解掉的岩盐质量，试验过程和试验结果及其分析见文献[14]。根据试验结果拟合得到的溶解质量 m 和轴向塑性应变 ε^p 、溶解时间 t 的关系表达式为^[14]

$$m(\varepsilon^p, t) = \frac{1}{C} (0.21t + 0.16t^2) \cdot \left[4.75 - \frac{4.56}{1 + \exp((\varepsilon^p - 6.2)/0.54)} \right] \quad (14)$$

式中： $C=3.4$ 。

在单轴压缩条件下可以采用轴向塑性应变来表征岩盐的力学破坏特征，故针对单轴压缩条件下考虑应力-溶解耦合效应的岩盐细观力学试验结果，可采用轴向塑性应变 ε^p 代替等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 对应力作用下的岩盐溶蚀模型进行描述和计算。

根据前面的分析可知，要得出不同轴向塑性应变 ε^p 、溶解时间 t 所对应的应力作用下的岩盐溶蚀模型，需要得到不同轴向塑性应变 ε^p 、溶解时间 t 所对应的 $D^*(\varepsilon^p, t)$ 值。

同时，由于所建立的应力作用下岩盐溶蚀模型是计算宏观溶解速度或单位面积上的等效溶解厚度，因而可以得出

$$R^*(\varepsilon^p, t) A \rho_s = m(\varepsilon^p, t) \quad (15)$$

式中： A 为溶蚀作用面积。故可以采用单轴压缩条件下考虑应力-溶解耦合效应的岩盐细观力学试验

结果中溶解质量与轴向塑性应变和溶解时间的关系表达式 (14) 来计算等效扩散系数 $D^*(\varepsilon^p, t)$ 。

根据文献[14]中单轴压缩条件下应力-溶解耦合效应的岩盐细观力学试验的试验条件, 利用本文提出的应力作用下岩盐溶蚀模型进行了模拟分析, 采用有限差分方法来计算定解偏微分方程组式 (13), 并编制了相应的计算程序用于计算等效扩散系数, 程序的流程如图 3 所示。

试验参数 $\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_s = 2.16 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $M = 6.88 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$, $C_s = 5.4 \times 10^3 \text{ mol/m}^3$, $\nu = 1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $C_0 = 0$, 无应力作用时岩盐溶蚀的扩散系数 $D = 2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

通过计算和拟合分析, 可以得出等效扩散系数 D^* 与扩散系数 D 的比值 D^*/D 和轴向塑性应变 ε^p 、溶解时间 t 之间的数学表达式为

$$\frac{D^*(\varepsilon^p, t)}{D} = \left(-13.48 + 16.02 \exp\left(\frac{t}{1.1}\right) \right) \cdot \left[2.71 - \frac{704.35}{1 + \exp((\varepsilon^p - 6.53)/0.39)} \right] \quad (16)$$

图 4 为当溶解时间 $t = 400 \text{ s}$ 时 D^*/D 与轴向塑性应变 ε^p 之间的关系, 图中其曲线的数学表达式为

$$\frac{D^*(\varepsilon^p, t)}{D} \Big|_{t=400} = 2.71 - \frac{704.35}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon^p - 6.53}{0.39}\right)} \quad (17)$$

式中: ε^p 的单位为%。

从图 4 中可以看出, 在溶解时间一定时, 不同轴向塑性应变下等效扩散系数 D^* 与扩散系数 D 的比值 D^*/D 相差较大, 根据轴向塑性应变和 D^*/D 之间的关系, 曲线可以分为 3 段:

I 段: 该段曲线非常平缓。在此段曲线中, D^*/D 很小, 随着轴向塑性应变的逐渐增加, D^*/D 也在缓慢增加, 但变化幅度非常小。这是因为当轴向塑性应变值较小时, 岩盐表面所产生的裂纹较少, 溶蚀作用面积变化较小, 等效扩散系数的变化也较为微弱;

II 段: 该段曲线向上凹曲, 并且曲线斜率变化非常显著。这说明随着轴向塑性应变的增加, D^*/D 显著增加, 而且其变化幅度相当大。这是因为当轴向塑性应变达到一定值后, 在岩盐表面产生大量的裂纹, 这就造成溶蚀作用面积发生急剧的变化, 从而等效扩散系数的变化也非常显著;

III 段: 该段曲线为上升曲线, 曲线斜率变化较小, 这说明随着轴向塑性应变的增加, D^*/D 增加

较快。这是因为在此段中随着轴向塑性应变的增加, 溶蚀作用面积也在不断变大, 从而等效扩散系数增加较快。

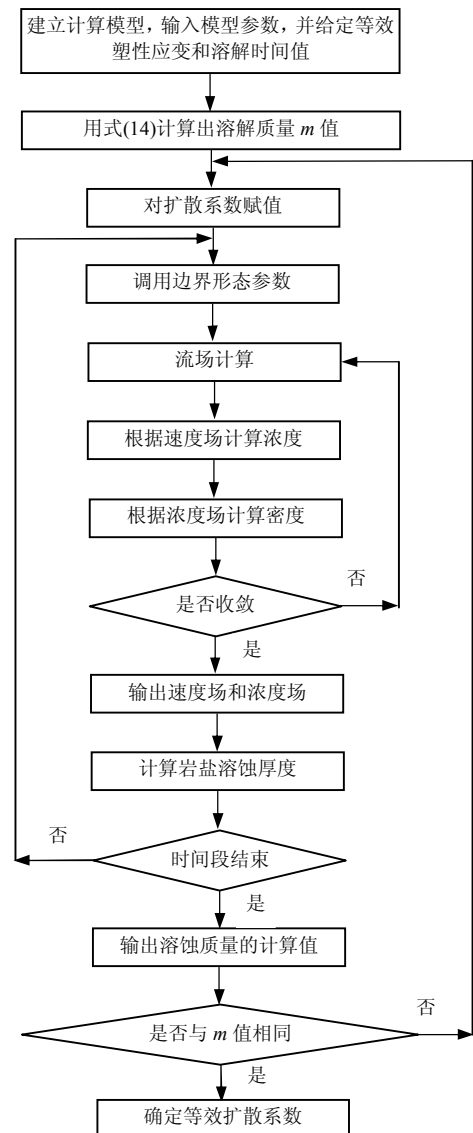


图 3 程序流程图
Fig.3 Flowchart of program

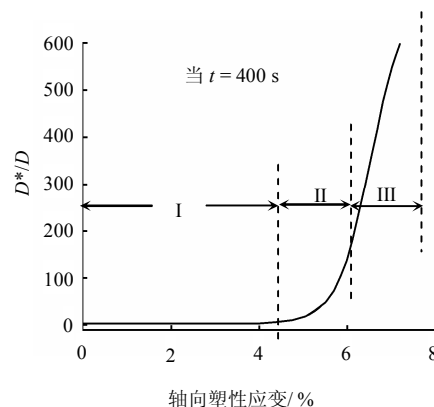


图 4 轴向塑性应变与 D^*/D 之间的关系
Fig.4 Relationship between axial plastic strain and D^*/D

图5为当轴向塑性应变 $\varepsilon^p=7.2\%$ 时 D^*/D 与溶解时间 t 之间的关系, 曲线的表达式为

$$\frac{D^*(\varepsilon^p, t)}{D} \bigg|_{\varepsilon^p=7.2\%} = -13.48 + 16.02 \exp\left(\frac{t}{1.1}\right) \quad (18)$$

式中: t 的单位为 100 s。

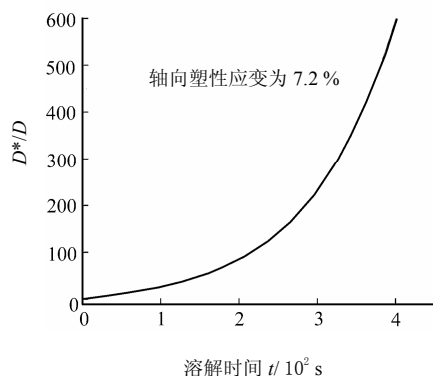


图5 溶解时间 t 与 D^*/D 之间的关系
Fig.5 Relationship between time and D^*/D

从图5中可以看出, 当轴向塑性应变一定时, 随着溶解时间的增加, 等效扩散系数 D^* 与扩散系数 D 的比值 D^*/D 也不断增加, 这是因为随着溶解时间的增加, 溶蚀作用面积不断变大, 从而使得等效扩散系数不断变大。

7 结 论

有无应力作用下的岩盐溶蚀作用存在着差异, 但两者在岩盐溶蚀机理上是一致的。本文通过对岩盐溶蚀机理的研究, 建立了无应力作用下的岩盐溶蚀模型, 并通过对有无应力作用下岩盐溶蚀机理差异的分析, 建立了应力作用下的岩盐溶蚀模型。针对有应力作用下岩盐溶蚀作用, 得到如下主要结论:

(1) 有无应力作用下岩盐溶蚀作用的差异在于溶蚀作用面的不同, 无应力作用下的溶蚀作用面为岩盐的固体边界面, 而有应力作用下的溶蚀作用面是岩盐的固体边界面与所有表面裂纹的表面之和。

(2) 在应力作用下, 岩盐的宏观溶蚀速率增大, 并且岩盐的宏观溶蚀速率与岩盐的塑性应变之间存在一定的关系。

(3) 针对溶蚀作用面无法计算的问题, 提出了等效扩散系数的概念, 用于描述应力作用下单位溶蚀面积上的宏观溶蚀速率, 并建立了应力作用下的岩盐溶蚀模型。

(4) 提出了根据单轴压缩条件下应力-溶解耦合效应的岩盐细观力学试验结果来计算等效扩散系

数的方法, 并得到了等效扩散系数与扩散系数的比值与轴向塑性应变、溶解时间之间的函数关系式。

以上研究成果可以为进一步研究岩盐应力-溶解耦合机理提供理论和试验依据, 从而为岩盐溶腔的稳定性分析与评价奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 何建英, 张登庆. 岩盐开采与石油储备库建设[J]. 中外能源, 2006, 11(3): 7—11.
HE Jian-ying, ZHANG Deng-qing. Salt mine exploiting and petroleum reserve storage building[J]. *China Foreign Energy*, 2006, 11(3): 7—11.
- [2] 谭羽非, 陈家新, 余其铮. 国外盐穴地下储气库的建设及研究进展[J]. 油气储运, 2001, 20(1): 6—8.
TAN Yu-fei, CHEN Jia-xin, YU Qi-zheng. The construction and development of foreign underground gas storage caverns in salt formations[J]. *Oil & Gas Storage*, 2001, 20(1): 6—8.
- [3] 李建中. 利用岩盐层建设盐穴地下储气库[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 119—121.
LI Jian-zhong. Using salt beds to build underground gas storages with salt caves[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(9): 119—121.
- [4] 刘新荣, 姜德义, 许江. 等. 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, 2003, 26(2): 39—41.
LIU Xin-rong, JIANG De-yi, XU Jiang, et al. FEM analysis of stress distribution law in the rocksalt cavity's surrounding rock[J]. *Journal of Chongqing University*, 2003, 26(2): 39—41.
- [5] 陶连金, 姜德义. 岩盐溶腔稳定性的非线性大变形分析[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 64—67.
TAO Lian-jin, JIAOG De-yi. Analysis on nonlinear large deformation of saltrock cavity[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2003, 26(2): 39—41.
- [6] HOU Z. Mechanical and hydraulic behavior of salt rock in the excavation disturbed zone around underground facilities[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(5): 725—738.
- [7] 王贵君. 盐岩层中天然气存储洞室围岩长期变形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 25(4): 431—435.

- WANG Gui-jun. Long-term deformation characters of salt rock surrounding a gas storage cavern[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 25(4): 431—435.
- [8] 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 on coupled penetrating-dissolving model and experiment for salt rock cracks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 946—950.
- [9] 班凡生, 高树生, 单文文. 岩盐品位对岩盐储气库水溶建腔的影响[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 115—118.
- BAN Fan-sheng, GAO Shu-sheng, SHAN Wen-wen. Rock salt grades influences on salt cavity gas storage built with water solution[J]. **Natural Gas Industry**, 2006, 26(4): 115—118.
- [10] 梁卫国. 盐类矿床水压致裂水溶开采的多场耦合理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1 090—1090.
- LIANG Wei-guo. Study on multi-field coupling theory and its application of hydraulic fracturing and solution mining for salt deposit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(6): 1 090—1 090.
- [11] 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 Jun-liu, YANG Jin-chun, ZOU Yu-shu. The study on experiments of Solution mining properties of salt[J]. **Journal of Sichuan Union University(Engineering Science Edition)**, 1997, 1(2): 74—80.
- [12] 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(4): 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(4): 261—266.
- [13] 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, et al. Research on mechanism of solution mining for building underground gas storage in salt cavern[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2003, 30(5): 107—109.
- [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(特刊).
- TANG Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting et al. Analysis of rock Salt uniaxial compression mesomechanics test considering coupled stress-dissolving effect [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, to be published.

深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例

作 者: 王卫东等 书 号: ISBN9787-112-09503-2

出版社: 中国建筑工业出版社 出版日期: 2007-8-1 开 本: 16 开 装 帧: 简装

本书以大量翔实的实际工程为背景, 以设计、理论分析和工程实测信息为主线, 全面深入地讨论了支护结构与主体地下结构相结合的几种方式的设计、分析及工程实例应用结果, 针对复杂的支护结构与主体地下结构相结合的基坑工程设计提供了较完整、实用的计算方法, 相关的节点设计和构造措施可以直接为其他基坑工程提供参考。本书内容新颖, 条理清晰, 文字简练, 具有较强的前瞻性、实用性和较强的学术价值。第1章 绪论; 第2章 支护结构与主体地下结构相结合的深基坑工程设计方法; 第3章 支护结构与主体地下结构相结合的深基坑分析方法; 第4章 支护结构与主体地下结构相结合的深基坑工程实例。参考文献。附录 工程照片。

本书适合从事岩土工程的科研、设计、施工、管理及监理人员参考使用, 同时也可作为高校土木工程专业师生的参考用书。

(信息来源: 摩天图书网, 编辑部编辑)