

盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型及试验研究

周 辉¹, 汤艳春¹, 胡大伟¹, 冯夏庭¹, 邵建富²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 法国里尔科技大学, 法国 里尔 59650)

摘要: 根据盐岩溶解机制, 对盐岩裂隙的溶解过程进行合理简化和假设; 在此基础上, 考虑盐岩裂隙溶解和渗透性变化的耦合条件, 建立盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型。利用自行设计研制的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合试验装置对特定条件下的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合过程进行试验研究, 并应用盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型进行模拟分析与验证, 计算结果与试验结果非常吻合, 表明所建立的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型可以很好地描述盐岩裂隙的渗流 - 溶解耦合机制。该研究成果为进一步研究盐岩的应力 - 渗流 - 溶解耦合机制奠定重要的理论和试验基础。

关键词: 岩石力学; 盐岩裂隙; 渗流 - 溶解耦合模型; 模拟分析

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)05 - 0946 - 05

STUDY ON COUPLED PENETRATING-DISSOLVING MODEL AND EXPERIMENT FOR SALT ROCK CRACKS

ZHOU Hui¹, TANG Yanchun¹, HU Dawei¹, FENG Xiating¹, SHAO Jianfu²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille 59650, France)

Abstract: Dissolving process of salt rock crack is theoretically simplified according to the dissolution mechanism of salt rock; and coupled penetrating-dissolving model for salt rock crack is then set up by taking salt rock crack dissolution, permeability variation, and their interaction into consideration simultaneously. Experiment on coupled penetrating-dissolving process of salt rock crack is performed under certain conditions using the device for coupled penetrating-dissolving test for salt rock crack designed by the authors; and the coupled penetrating-dissolving model is used to model the dissolving process under the same conditions. The computational results agree well with those obtained by experiment. The achieved results can provide an important foundation for the theoretical and experimental aspects of further analyses of coupled mechanical, penetrating, and dissolving mechanism of salt rock.

Key words: rock mechanics; salt rock crack; coupled penetrating-dissolving model; simulation analysis

1 引言

能源(石油和天然气)是一个国家的主要经济命脉, 保障国家能源安全的重要手段之一是建立国家

战略能源储备。目前, 能源储存主要有陆上储罐、海上储罐和地下储存 3 种方式, 地下储存因安全性高、不容易遭到破坏而被称为“高度战略安全的储备库”。由于盐岩具有非常低的渗透特性、良好的蠕变行为、稳定的力学性能以及易溶解于水的特

收稿日期: 2005 - 12 - 19; **修回日期:** 2006 - 02 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50204009); 中国科学院武汉岩土力学研究所前沿领域基础研究基金资助项目(Q110306); 中国科学院岩土力学重点实验室开放基金资助项目(Z000403)

作者简介: 周 辉(1972 -), 男, 博士, 1994 年毕业于山东矿业学院采矿工程系采矿工程专业, 现任副研究员, 主要从事岩石细观力学计算方法、流固耦合和孔隙介质力学理论及盐岩力学方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

性, 使得盐岩储库的施工开挖更加容易和经济。因此, 世界上大部分能源储存库建在盐岩介质中。安全性问题是在盐岩矿层中实施能源储存的首要问题, 从本质上来看, 其安全性主要涉及盐岩洞室围岩的稳定性及其渗透性变化所带来的安全性问题。在一定的应力作用下, 盐岩(储库围岩)发生损伤破坏, 产生不同尺度的裂隙; 如果盐岩中的裂隙与地下水导通, 地下水就会在裂隙(网络)中流动, 对盐岩裂隙产生溶解作用, 从而进一步使裂隙开度增大, 诱发应力调整, 产生新的破坏。总而言之, 制约上述过程的盐岩性质主要包括: 力学性质、溶解性、渗透性以及上述性质的耦合作用。

以往关于盐岩性质的研究大部分集中在力学性质和渗透性方面, 并取得了丰富的研究成果。如 U. Hunsche 等^[1~4]对盐岩的短期强度与变形特性进行了试验研究; C. H. Yang 等^[5, 6]进行了单轴、三轴压缩和松弛状态下盐岩的蠕变试验研究; 在试验的基础上, 一些学者分别建立了不同形式的弹塑性或损伤本构模型^[1~4]以及多种蠕变本构关系^[7~10]。在盐岩渗透性研究方面, J. C. Stormont^[11]通过气体渗流试验来描述盐岩内部的损伤程度, Z. Hou 等^[12, 13]对于地下工程 EDZ(开挖扰动区)内盐岩力学性质和渗透性进行了研究, 提出一个新的流固耦合模型, O. Schulze 等^[14]研究了盐岩变形过程中的损伤和渗透性演化特征。另外, 梁卫国^[15]建立了盐类矿床水压致裂水溶开采的多场耦合理论, 用于对盐矿开采过程进行模拟分析。

由于完整盐岩的渗透性极低, 实际储库工程中的流体基本上是在盐岩裂隙中流动和赋存的。因此, 溶解引起的损伤作用主要也是在裂隙中发生的, 而且盐岩裂隙的溶解与渗透性变化和盐岩的宏观力学行为是相互耦合的, 这种耦合的性质对于储库的安全性至关重要。然而, 目前关于这方面的研究尚不充分, 因此, 本文将首先根据盐岩的溶解特点, 在考虑溶解对盐岩裂隙渗透性的影响作用下, 建立理想条件下盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型, 并通过试验对该模型进行验证, 为进一步研究盐岩的应力 - 渗流 - 溶解耦合机制奠定基本的理论和试验基础。

2 盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型

为了分析的方便, 本文首先考虑理想条件下的盐岩裂隙(见图 1), 并作如下简化: (1) 盐岩均质,

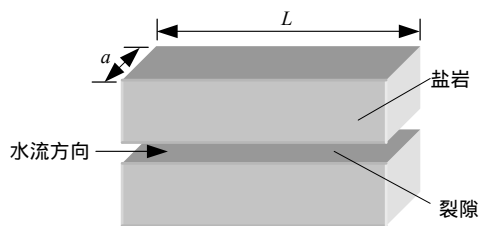
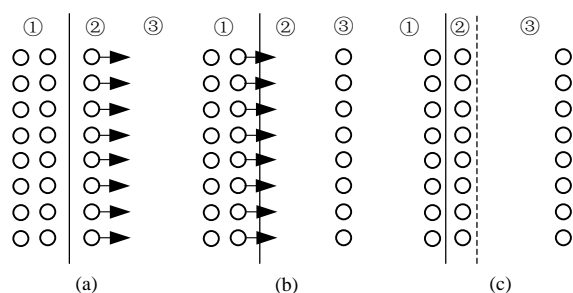


图 1 简化的理想盐岩裂隙
Fig.1 Simplified salt rock crack

溶解特性为各向同性, 且无夹层; (2) 裂隙中的渗流为层流; (3) 不可溶残渣随流体流动, 不沉淀在裂隙中; (4) 不可溶杂质对扩散过程的影响可以忽略不计; (5) 忽略温差及温度变化的影响。

同时, 根据盐岩溶解机制, 对盐岩裂隙的溶解过程作如下简化^[16]: 假设紧贴盐岩裂隙固壁表面有一层极薄的边界层, 其溶液浓度为饱和浓度, 固壁表面溶离的盐岩离子经过边界层进入扩散区; 当边界层内盐岩离子扩散进入裂隙内的流场时, 其溶液浓度降低到低于饱和浓度(见图 2(a)); 固壁表面盐岩溶解, 盐岩离子进入边界层, 补充边界层的物质损失, 使边界层的溶液浓度重新达到饱和(见图 2(b)); 同时, 由于固壁表面物质损失, 裂隙边界(连同所附着的边界层)后退一段微小距离(见图 2(c))。



①—盐岩固壁; ②—边界层; ③—扩散区

图 2 盐岩溶解过程示意图

Fig.2 Sketch for salt rock dissolving process

在图 1 中沿水流方向取一截面, 并建立如图 3 所示的坐标系。根据 Fick 扩散定律, 有

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial \bar{n}} \quad (1)$$

式中: J 为扩散通量, D 为扩散系数, C 为盐岩溶液的浓度, \bar{n} 为裂隙面的外法线方向。

对于微元体 dx , 根据物质平衡原理并参照图 1 可得

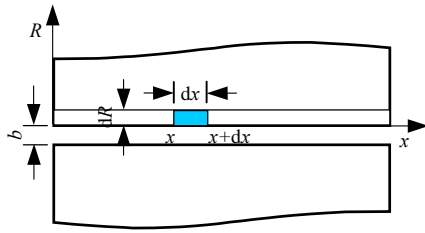


图3 盐岩裂隙溶解关系分析示意图
Fig.3 Sketch for salt rock crack dissolution

$$Jadxdt = a \frac{\rho_s}{M} dx dR \quad (2)$$

式中： ρ_s 为盐岩的密度， M 为盐岩的摩尔质量， R 为盐岩裂隙固壁的溶解厚度。

联立式(1)，(2)，可以建立盐岩裂隙固壁的溶解速度方程为

$$\frac{dR}{dt} = -D \frac{M}{\rho_s} \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} \quad (3)$$

式中： Γ_1 为裂隙面。

由于边界层极薄，这里忽略其厚度；且在隙宽很小的盐岩裂隙内，可以认为扩散过程瞬间完成，则式(3)可以简化为

$$\frac{dR}{dt} = D \frac{M}{\rho_s} (C_s - C_{xt}) \quad (4)$$

式中： C_s 为盐岩的饱和浓度， C_{xt} 为 t 时刻裂隙 x 处的溶液浓度。

可以看出，式(3)，(4)为盐岩溶解的必要条件。但是，盐岩裂隙中的溶解过程还受到流体的流速 v 和裂隙宽度的控制，因此，还必须建立盐岩裂隙溶解的充分条件(即平衡方程)。

设 m_x 为 dt 时间内流经 x 处(见图3)裂隙断面的溶液离子摩尔数， m_{x+dx} 为 dt 时间内流经 $x+dx$ 处裂隙断面的溶液离子摩尔数， b 为裂隙的初始宽度，则有

$$\left. \begin{aligned} m_x &= C_{xt} a v_{xt} (2R_{xt} + b) dt \\ m_{x+dx} &= \left(C_{xt} + \frac{\partial C}{\partial x} dx \right) a v_{xt} (2R_{xt} + b) dt \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

忽略盐岩溶解引起的裂隙内流体体积的变化，根据物质平衡原理， m_{x+dx} 与 m_x 之差值即为在时间 dt 内 dx 段所溶解的盐岩摩尔数，即

$$m_{x+dx} - m_x = a \frac{\rho_s}{M} \partial R \partial x \quad (6)$$

由此可得

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\rho_s}{v_{xt} (2R_{xt} + b) M} \frac{\partial R}{\partial t} \quad (7)$$

式中： R_{xt} ， v_{xt} 分别为 t 时刻裂隙在 dx 段内固壁的

溶解厚度和流体流速。

v_{xt} 是由 t 时刻整个裂隙的形状即裂隙的渗透性所控制的，下面推导 v_{xt} 的表达式。设盐岩裂隙两端的压差 ΔP 保持恒定，且其中的流体满足 Darcy 定律，忽略溶解引起的流体体积变化，故在 t 时刻流进 x 处断面的流量 Q_t 与流出 $x+dx$ 处断面的流量相等。则有

$$Q_t = A_{xt} v_{xt} = -K_{xt} A_{xt} \frac{dP}{dx} \quad (8)$$

式中： K_{xt} ， A_{xt} 分别为 t 时刻在盐岩裂隙 x 处的宏观渗透系数和宏观等效过水断面面积。

如图3所示，在 x 处取 dx 段，则有

$$dP = -\frac{Q_t}{K_{xt} A_{xt}} dx \quad (9)$$

对上式积分可得整个盐岩裂隙长度 L 上的压力水头差 ΔP 为

$$\Delta P = -\int_0^L \frac{Q_t}{K_{xt} A_{xt}} dx \quad (10)$$

在 dx 段内，根据立方定律裂隙渗透系数 K_{xt} 可以表示为

$$K_{xt} = \frac{\rho_{xt} g}{12\mu} (2R_{xt} + b)^2 \quad (11)$$

式中： ρ_{xt} 为 x 处裂隙内的溶液密度， μ 为溶液的动力黏滞系数， g 为重力加速度。

另外，裂隙在 x 处的过水断面面积为 $A_{xt} = a(2R_{xt} + b)$ 。联立式(8)，(10)和(11)可得

$$v_{xt} = -\frac{\Delta P}{2R_{xt} + b} \frac{1}{\int_0^L \frac{12\mu}{\rho_{xt} g (2R_{xt} + b)^3} dx} \quad (12)$$

同时，还必须满足密度方程

$$\rho_{xt} = \rho_w + C_{xt} M \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \quad (13)$$

式中： ρ_w 为水的密度。

利用式(4)，(7)，(12)和(13)，并将各式中的变量单位统一，即可对盐岩裂隙的渗流-溶解耦合过程进行分析。

3 盐岩裂隙渗流-溶解耦合试验及模拟验证

根据以上分析，作者自行设计了一套盐岩裂隙渗流-溶解耦合试验装置(见图4)。

试验方法为：首先，将盐岩试样的试验面(人工

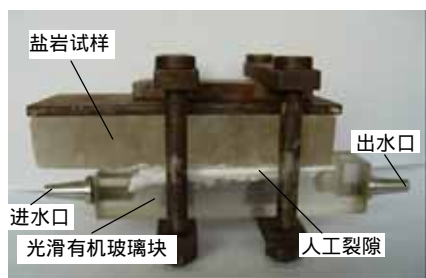


图 4 盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合试验装置
Fig.4 Device for coupled penetrating-dissolving test for salt rock crack

裂隙面)打磨光滑平整;其次,考虑到两块盐岩试样紧贴在一起形成的人工裂隙面很难达到平整闭合的要求,且盐岩强度较低,难以加工,故设计了一块各面光滑的有机玻璃试样来代替其中的一块盐岩试样;再次,利用盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合试验装置,在保持 ΔP 不变的条件下,使一定饱和度的盐岩溶液流经盐岩试样与有机玻璃试样之间形成人工裂隙;最后,对盐岩试样裂隙面的溶解形态进行测定和分析。

本次试验的各参数如下: $D = 2.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, $M = 58.5 \text{ kg/mol}$, $C_s = 5.4 \text{ mol/L}$, $\rho_s = 2160 \text{ kg/m}^3$, $\Delta P = 4.7 \text{ cm}$, $L = 6 \text{ cm}$, $b = 0.001 \text{ cm}$, $C_0 = 5 \text{ mol/L}$, 试验持续时间为 125 h。

图 5 给出了盐岩裂隙面的溶解形态。图 6 给出了平均溶解厚度的试验曲线与计算曲线对比情况。

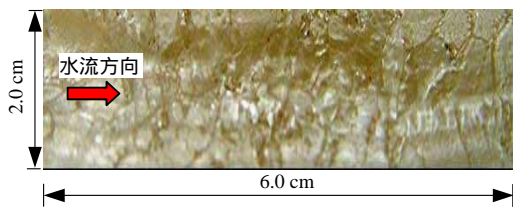


图 5 盐岩裂隙面的溶解形态
Fig.5 Figure of dissolved surface of salt rock crack

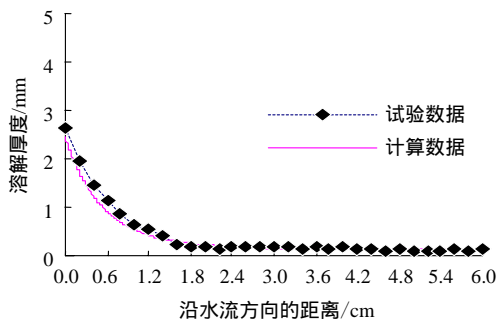


图 6 平均溶解厚度的试验曲线与计算曲线对比情况
Fig.6 Comparison of the average dissolved thickness between test and calculated results

根据上述试验条件,利用本文提出的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型进行了模拟分析与验证。由于试验中采用光滑的有机玻璃试样代替了其中的一块盐岩试样,因此需要将式(4), (7), (12)和(13)进行修正,构成如下定解方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial t} &= D \frac{M}{\rho_s} (C_s - C_{xt}) \\ \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{\rho_s}{v_{xt}(R_{xt} + b)M} \frac{\partial R}{\partial t} \\ v_{xt} &= -\frac{\Delta P}{R_{xt} + b} \frac{1}{\int_0^L \frac{12\beta}{g(R_{xt} + b)^3} dx} \quad (0 \leq x \leq L, t \geq 0) \\ R_{xt}|_{t=0} &= 0 \\ C_{xt}|_{t=0} &= C_0 \\ C_{xt}|_{x=0} &= C_0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: β 为溶液的运动黏滞系数,且有 $\beta = \mu/\rho$, 这里取 $\beta = 1.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

利用差分方法求解式(14),并编制了相应的计算程序。采用以上试验参数对试验过程进行模拟分析,得到的溶解厚度曲线如图 6 中的计算曲线。从图 6 中可以看出,计算所得的溶解厚度与试验所得的溶解厚度非常吻合,表明本文所建立的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型可以很好地描述盐岩裂隙的渗流 - 溶解耦合机制,而且所进行的简化和假设是符合实际情况的。

4 讨论与结论

本文根据盐岩的溶解特点,对盐岩裂隙的溶解过程进行了合理的简化和假设;在此基础上,考虑盐岩裂隙溶解和渗透性变化的耦合条件,建立了盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型。利用自行设计研制的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合试验装置对特定条件下的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合过程进行了试验研究,并应用本文所建立的盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型进行了模拟分析与验证,计算结果与试验结果非常吻合,表明本文所建立的岩盐裂隙渗流 - 溶解耦合模型可以很好地描述盐岩裂隙的渗流 - 溶解耦合机制。本文的研究成果为进一步研究盐岩的应力 - 渗流 - 溶解耦合机制奠定了重要的理论和试验基础,从而为能源地下(盐岩)储存的安全性分析提供了基本的理论依据和分析手段。

参考文献(References) :

- [1] Hunsche U, Albrecht H. Results of true triaxial strength tests on salt rock[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(4/5): 867 - 877.
- [2] 刘新荣, 姜德义, 余海龙, 等. 岩盐变形特性的试验研究[J]. *矿冶工程*, 1999, 19(4): 12 - 15.(Liu Xinrong, Jiang Deyi, Yu Hailong, et al. The experiment study of rock salt's deformation characteristics[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1999, 19(4): 12 - 15.(in Chinese))
- [3] 周时光, 阳友奎, 李晓东. 岩盐力学特性的刚性试验研究[J]. *西南工学院学报*, 1994, 9(2): 42 - 46.(Zhou Shiguang, Yang Youkui, Li Xiaodong. Experimental study on rock salt mechanics properties by stiff machine[J]. *Journal of Southwest Institute of Technology*, 1994, 9(2): 42 - 46.(in Chinese))
- [4] 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 property of Thenardite rock salt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 391 - 394.(in Chinese))
- [5] Yang C H, Daemen J K, Yin J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(2): 233 - 242.
- [6] 邱贤德, 庄乾城. 盐岩流变特性的研究[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 1995, 18(4): 96 - 103.(Qiu Xiande, Zhuang Qiancheng. Research on the rheology behavior of salt rock[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science)*, 1995, 18(4): 96 - 103.(in Chinese))
- [7] Winkel B V, Gerstle K H, Ko H Y. Analysis of the time-dependent deformation in openings in salt media[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1972, 9(2): 249 - 260.
- [8] Chan K S. A damage mechanics treatment of creep failure in salt rock[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1997, 6(1): 122 - 152.
- [9] 王贵君. 天然气盐岩洞室群长期存储能力[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 62 - 66. (Wang Guijun. Long-term storage capability of gas caverns in salt rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 62 - 66.(in Chinese))
- [10] Chan K S, Munson D E, Bodner S R, et al. Cleavage and creep fracture of salt rock[J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(9): 3 553 - 3 565.
- [11] Stormont J C. In-situ gas permeability measurements to delineate damage in salt rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(7): 1 055 - 1 064.
- [12] 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.
- [13] Hou Z, Lux K H. A new coupling concept for the hydromechanical interaction of clay stone and salt rock in underground waste repositories[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 495.
- [14] Schulze O, Popp T, Kern H. Development of damage and permeability in deforming salt rock[J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(2/3): 163 - 180.
- [15] 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.(Liang Weiguo. 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.(in Chinese))
- [16] 赵志成, 朱维耀, 单文文, 等. 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 Zhicheng, Zhu Weiyao, Shan Wenwen, 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.(in Chinese))