

盐岩温度与应力耦合损伤研究

陈剑文¹, 杨春和¹, 高小平¹, 李晓红², 姜德义²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 盐岩应力与温度耦合损伤研究对处在深层盐岩的地下空间利用有重要意义。从微观统计的角度出发, 通过岩石细观力学的分析、综合, 修正前人的研究成果, 从而建立温度-应力耦合下的盐岩损伤方程。为验证所提方程的有效性, 进行不同围压和温度下的盐岩力学特性试验, 分析围压和温度对其力学特性的影响, 尤其是对损伤的影响。试验结果表明: 围压可抑制损伤的发展, 而温度的升高, 则在一定的范围内造成损伤的加剧。根据试验结果进行参数拟合, 验证所提出的损伤方程的有效性。

关键词: 岩石力学; 岩盐; 温度-应力耦合; 损伤; 试验

中图分类号: TU 313+1; O 346.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)11-1986-06

STUDY ON THE COUPLED DAMAGE OF TEMPERATURE AND MECHANICS FOR SALT ROCK

CHEN Jian-wen¹, YANG Chun-he¹, GAO Xiao-ping¹, LI Xiao-hong², JIANG De-yi²

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

2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The investigation of coupled damage of and temperature mechanics(TM) for salt rock is very significant for the underground space in the salt rock. Based on previous studies and with the relation of statistical mechanics and fractal rock mechanics, the damage formulation of the coupled damage of temperature and mechanics is deducted. In order to verify the formulation, the experiments of salt rock under different confining pressures and temperatures are carried out. At the same time, the effects of confining pressure and temperature on the mechanics of salt rock are analyzed. Through the experiment, the results show that the confining pressure can restrain the damage increasing, and at a certain range of temperature, the temperature can weaken the damage increasing. The theoretical results agree well with the test results.

Key words: rock mechanics; rock salt; coupling between temperature and mechanics; damage; experiment

1 引言

损伤概念自1958年由Kachanov提出后, 各国学者相继投入大量研究, 但早期的研究主要应用于

金属材料。文[1]在1976年开始将损伤力学引入岩石和混凝土材料。此后, 文[2]根据断裂面的概念研究岩石的脆塑性损伤行为, 并建立了相应的连续介质模型。文[3]探讨了岩石及其他材料破坏后的损伤特征及其力学描述。文[4~6]将分形几何引入, 更

收稿日期: 2004-10-01; **修回日期:** 2004-12-09

基金项目: 国家自然科学基金发展规划973项目(2002CB412704); 国家自然科学基金资助项目(50374064, 50334060)

作者简介: 陈剑文(1979-), 男, 2003年毕业于中国地质大学(武汉)工程学院水文与水资源工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石力学理论和试验方面的研究工作。E-mail: jwchen111498@126.com。

好地定量描述了岩石的损伤,开辟了新的研究思路。

损伤力学的研究方法主要有三种^[7],其中基于统计的考虑非局部效应的本构理论因材料本身存在缺陷的无序性而受到许多学者的青睐^[8-10]。但在材料的细观结构(各种组构的形态、方向和分布)和细观损伤的数学描述方面比较繁琐。此外,细观结构演变及损伤演化的运动学与力学之间的定量联系方面还有待进步研究。尽管如此,微观损伤力学采用统计的办法处理因随机微裂纹而导致的损伤仍不失为一种有效的手段。

盐岩是一种特殊的岩石,具有空隙率非常小(低渗透性^[11]),损伤自我恢复良好的蠕变性能等特点,适宜作深埋法核废料处置和石油、天然气储存的理想场所^[12]。但是在核废料的处置过程中,因放射性同位素的衰变,将产生大量的热能,将使周围的岩土介质升温,按照 5 000 a 以上的安全运行尺度,温度可高达 250 °C~400 °C。从安全角度考虑,岩盐硐库的埋深一般在 1 000 m 以下,温度可超过 50 °C,地应力也相当可观。因此研究盐岩在温度-应力耦合下的损伤特性具有重要的实际意义,而这方面的研究目前国内外报道相对较少。

本文从缺陷统计的方法入手,导出考虑围压效应的损伤变量表达式;综合前人的成果,以分形岩石力学为桥梁,推导出温度-应力耦合下的盐岩损伤方程。最后根据试验结果对所导出的损伤方程进行验证。

2 应力 - 温度耦合损伤方程的推导

在试样中任一截面选取表征体元(REV),其相对微观水平而言足够大(可包含许多细观裂纹和细观孔洞),而相对研究域而言(宏观水平)又是足够小,逼近一个数学点。由这样的表征体元组成的介质为连续介质,可用连续介质理论描述。因盐岩内部构造不均,各缺陷的强度也不同,因此表征体元的强度也就不同。考虑到损伤随应变的发展是一个连续的过程,参照文[13],做如下假设:

- (1) 表征体元符合线弹性;
- (2) 破坏符合 Von Mises 屈服准则;
- (3) 强度符合 Weibull 统计规律 $W(m, a)$, 即

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{m}{a} \varepsilon^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: $\varphi(\varepsilon)$ 为表征体元在微应变下对应的强度概

率, m 为 Weibull 统计的形态参数, a 为所有表征体元的平均微应变, ε 为表征体元的微应变。

根据损伤变量 D 与应变 ε 的关系为

$$\frac{dD}{d\varepsilon} = \varphi(\varepsilon) \quad (2)$$

且假设初始条件下没有损伤,即 $\varepsilon = 0, D = 0$ 时,可以得到

$$D = \int_0^\varepsilon \varphi(\varepsilon) d\varepsilon = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m\right] \quad (3)$$

设盐岩符合 Von Mises 屈服准则,即

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2 \quad (4)$$

式中: σ_0 定义为盐岩表征体元的单轴强度。

三轴试验中,有 $\sigma_2 = \sigma_3$, 式(4)可简化为

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_0 \quad (5)$$

再根据广义 Hooker 定理,可以得到

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - (1 - 2\mu)\sigma_3 / E \quad (6)$$

将式(6)代入到式(3)中,得到与围压有关的损伤变量方程为

$$D = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{\varepsilon_1 E - (1 - 2\mu)\sigma_3}{aE}\right]^m\right\} \quad (7)$$

根据式(7)中推得:随着轴向应变的增大,损伤愈加厉害;而围压增大,损伤变量减小。这说明围压一定程度上可抑制微裂纹的扩张。

事实上,盐岩损伤的过程也是微缺陷的扩张过程,当然这个过程是由压力和温度共同作用的结果,因此必须在式(3)中引入一个温度函数。

对式(3)做变形^[14]如下:

$$\frac{1}{1-D} = \exp\left[\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m\right] \quad (8)$$

两边取 2 次对数得

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-D}\right)\right] = m \ln\left(\frac{\varepsilon}{a}\right) \quad (9)$$

为保证式(9)有意义, D 的范围为 $0 < D < 1$ 。可见, $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-D}\right)\right]$ 与 $\ln\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)$ 成线性关系,与分形中的容量维定义相似。白晨光据此认为 m 即是分维数。虽然分维数的定义并没有严格的规则,仅考虑形式和变化趋势就判定 m 是分维数不太妥。而且,

损伤是由微裂隙引起，有的岩石孔隙并不满足分形的规律，因此损伤和分形的联系需要进一步推导和验证。

在 Weibull 分布中， m 虽是形态参数，但实际也反映出材料缺陷分布的不规则度。文[15]由缺陷最薄弱环链假设入手，再辅以分形假设，推导出：

$$m = 2D_f \tag{10}$$

式中： D_f 为分维数， m 为 Weibull 统计的形态参数。

根据文[16, 17]的试验表明：盐岩在温度和受压的状态下，亚晶格网络存在分形，说明盐岩的微裂隙满足分形的规律。

由此，本文认为 m 和分维数有联系，其大小反映了损伤的程度，分维数越大，则损伤越厉害^[18]。为了便于下面的推导，在此不妨假设：

$$m = kD_f \tag{11}$$

式中： k 为正的线性关系系数， D_f 为分维数。

参照文[17]的试验结果，盐岩裂隙的分维数与温度成二次曲线关系，设 m 与温度 T 的关系为

$$m = \alpha T^2 + \beta T + \gamma \tag{12}$$

式中： α, β, γ 为试验参数； T 为温度。

由式(7)，(12)得出应力 - 温度耦合下的盐岩损伤变量方程为

$$D = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{\varepsilon_1 E - (1 - 2\mu)\sigma_3}{aE} \right]^{aT^2 + \beta T + \gamma} \right\} \tag{13}$$

根据式(13)初步分析，损伤变量是最大轴向应变 ε_1 和温度 T 的增函数、围压 σ_3 的减函数。因损伤变量方程为含张量的非线性函数，其是否为张量还有待证明。

3 试验情况

3.1 试样及制备

本次试样取自浙江金坛盐矿，黑色粗粒，主要成分为 NaCl，含少量角砾碎屑和泥质胶结物。因盐岩溶于水，采用干式锯磨加工，试验直径 $\phi 100$ mm，高 210 mm。

3.2 试验设备

试验在长春新特试验机厂和中国科学院武汉岩土力学研究所共同研制的 XTR01 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪上完成。其主要技术指标为：

轴向系统：最大轴向力 2 000 kN，示值最大相对误差 < 1%；最大位移 100 mm，示值最大相对误差 < 1%；轴向变形最大测量值 5 mm，示值最大相对误差 < 1%；径向变形量 2.5 mm，示值最大误差 < 1%。

侧向系统：最大侧向压力 100 MPa，测量精度 < 1%，适合尺寸 $\phi 50 \sim 100$ mm。

温控系统：最高工作温度 200 °C，测量相对误差 < 2%。加温装置为电阻丝式陶瓷炉。温度设定后由系统自行控制。

各项数据由微机自动采集，并可在电脑屏幕上实时生成曲线(可自定义)，便于实时分析和控制。

3.3 试验步骤

试验时，将试样加上上、下垫块后，用热缩胶套密封，在垫块与试样接触处采用“O 型”圈密封。加温速率为 2 °C/min，达到预定温度后恒温 2 h，使岩样受热均匀后再开始试验。

试验采用轴向位移控制，速率为 0.03 mm/min，直至试验破坏。

4 试验分析及损伤方程验证

4.1 试验分析

4.1.1 应力 - 应变曲线分析

本次试验围压设为 5, 15 和 25 MPa 三级；温度则为 25 °C, 50 °C 和 100 °C 三级。采用正交试验方法。所得试验力学参数见表 1，所得典型应力 - 应变曲线见图 1 所示。

盐岩在不同温压下的变形规律同一般岩石一样，大致经历了 4 个阶段：(1) 微裂纹压密阶段；(2) 弹性阶段；(3) 塑性变形阶段。此阶段，应力增量非常小，应变速率却明显增加，但盐岩的塑性变形阶段非常明显，尤其在高温下，出现类似流动的变形特征；(4) 破坏阶段。当盐岩在围压作用下，并不像其他脆性岩石呈现突然的崩裂，而是仍然具有较大的承载能力，没有明显的破裂面，并且出现膨胀破坏。

4.1.2 不同围压下的试验分析

围压的主要作用是限制了岩石中裂纹的扩展，因而提高了岩石的强度(承受差应力的能力)，塑性变形也增加。三向应力作用下，软岩的弹性模量有所增大(如图 2 所示)，但是也有一定的限度^[19]。因

表 1 不同围压下的盐岩力学试验数据

Table 1 Experimental mechanical data of rock salt under different confining pressures and temperatures

围压/MPa	温度/°C	峰值应力/MPa	峰值应变/%	弹性模量/GPa
5	25	20.61	1.02	14.21
15	25	35.74	1.43	15.36
25	25	48.24	2.54	18.88
5	50	13.24	1.21	12.31
15	50	24.13	1.75	14.86
25	50	35.64	3.52	17.88
5	100	12.11	1.47	9.15
15	100	17.86	2.18	10.50
25	100	21.93	4.14	13.05

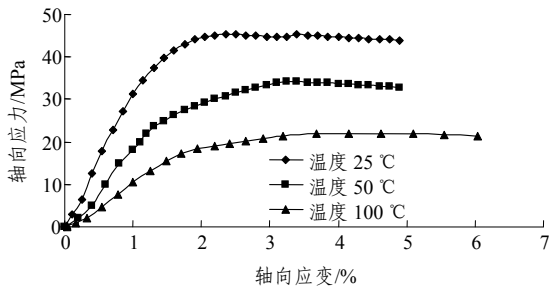


图 1 不同围压、温度下的岩盐应力 - 应变曲线

Fig.1 Triaxial compression curves of rock salt under different confining pressures and temperatures

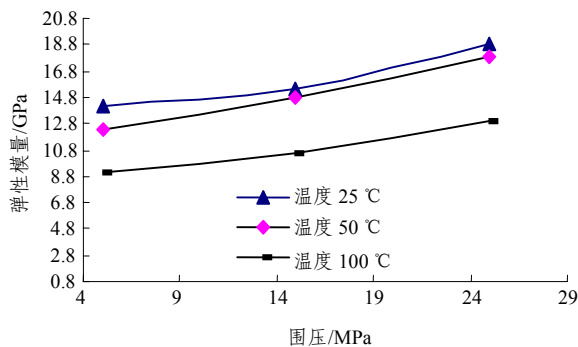


图 2 岩盐弹性模量与围压的关系

Fig.2 Curves of the Young's modulus and confining pressures of rock salt

此围压可抑制损伤的发展，形成负损伤。

但对盐岩而言，在三向应力作用下，具有塑性变形，韧性破坏^[20]的特点。如果围压进一步加大，且轴向应力超过蠕变应力阈值，甚至还出现蠕变现象。这与其他岩石有些不同。

4.1.3 不同温度下的试验分析

盐岩在不同温度的作用下的损伤，表现为峰值应力降低(如图 3 所示)，弹性模量减小(如图 4 所示)，峰值应力所对应的应变增大(见表 1)。更为重要的是，如果温度继续升高，则可能出现蠕变现象。

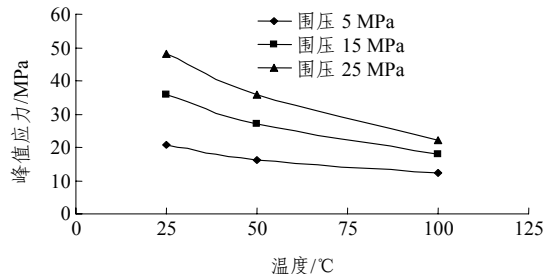


图 3 盐岩峰值应力与温度的关系

Fig.3 Relationship between peak stress and temperature of rock salt

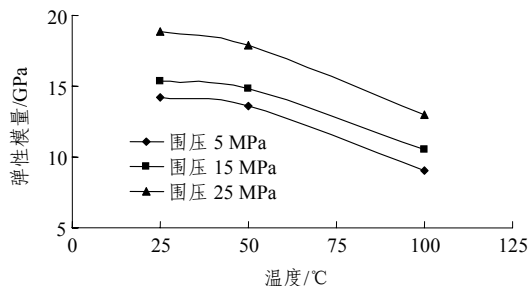


图 4 盐岩弹性模量与温度的关系

Fig.4 Relationship between Young's modulus and temperature of rock salt

虽然温度对岩石力学参数的影响因岩石种类的不同而有所差异，但盐岩表现为其力学性质随温度的升高而劣化。究其原因，可能是随着温度的上升，分子的热运动加强，导致分子之间的作用力减弱，使亚晶格错位或者开裂。还有一个原因可能是盐岩所含多种矿物颗粒因不同热膨胀系数以及各向异性颗粒的不同结晶方位的热弹性性质不同，引起跨颗粒边界的热膨胀不协调而导致开裂，引起微裂纹的产生，甚至扩展联成网络。这两个原因综合造成所谓的热损伤^[21]。

相对围压的影响而言，温度对盐岩损伤的影响比较大，一定程度上，损伤随温度升高而加剧。但当温度达到一定的值(一般认为是熔融温度的 1/3 左右)时，盐岩便进入到蠕变阶段。而一般的观点是稳态蠕变阶段没有损伤。温度继续升高能否使盐岩的损伤愈合，又存在什么关系，这些问题需要进一步的试验验证分析。

4.2 损伤方程的验证

为了便于通过试验对盐岩的损伤方程进行验证并求取参数，由各向同性损伤的广义弹性定理，有

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E(1 - D) + 2\mu\sigma_3 \quad (14)$$

将式(13)进一步变形，得到下式

$$\ln \left[\ln \left(\frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \right) \right] = m \ln \left[\varepsilon_1 - \frac{(1 - 2\mu)\sigma_3}{E} \right] - m \ln a \quad (15)$$

将试验数据代入，以 $\ln \left[\ln \left(\frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \right) \right]$ 为纵坐标， $\ln \left[\varepsilon_1 - \frac{(1 - 2\mu)\sigma_3}{E} \right]$ 为横坐标，拟合为线性关系，其斜率即为 m ，常数项即 $m \ln a$ ，得出了 m ，则 a 也就不难得出。

试验验证时，首先由单轴压缩试验确定盐岩弹性模量 E 和泊松比 μ ，然后将一组带温度三轴试验数据根据上面的方法，便可求出 m 和 a 的值，最后由三组不同温度下的试验数据根据式(12)求出 m 表达式中的 α ， β 和 γ 等参数。

由本次试验拟合得 $\alpha = 4 \times 10^{-7}$ ， $\beta = 2 \times 10^{-5}$ ， $\gamma = 0.2917$ ， $a = 0.0012$ 左右。拟合曲线与试验曲线对比如图 5 所示。

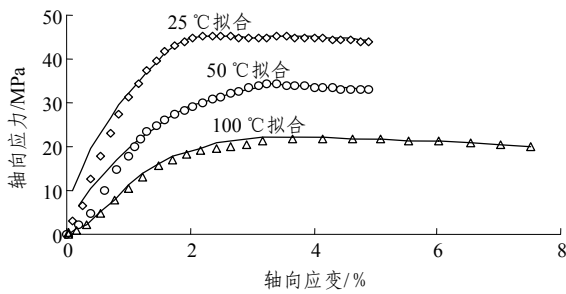


图 5 理论曲线与试验曲线的对比

Fig.5 Comparison of theoretical curves vs. experimental curves

验证结果表明：式(13)能够较好的表达盐岩在温度 - 应力耦合下的损伤，但在开始的微裂纹压密阶段，偏差较大，随着轴向应变的增大，理论与试验结果吻合也越好。造成开始时偏差较大的主要是没有考虑微裂纹压密过程，此外屈服准则的选取也有一定的影响。

值得一提的是，在 25 °C 时， m 值数量级为 -5，远比 100 °C 时的 0.2979 小得多，这表明温度对损伤的影响存在门限值^[21]。

5 结 语

通过对盐岩温度与应力耦合损伤的理论分析和实验研究，得出如下结论：

(1) 根据统计力学原理，以分形岩石力学为桥梁，对前人工作进行综合、修正，建立了应力、温度损伤方程，并验证其有效性；

(2) 围压可抑制盐岩微裂纹的扩张，从而抑制损伤发展，表现为围压增大，弹模增加，但趋势逐渐减小；

(3) 温度对盐岩力学特性的影响比围压的大，在一定范围内，随着温度的升高，盐岩损伤加剧。存在温度损伤的门限值；

(4) 本文的损伤方程没有考虑以下三个方面的问题：温度损伤的门限值；较高温度时可能造成的损伤愈合问题；开始时，微裂纹的压密过程。其机理笔者将进一步加以研究。

致谢 本次试验得到冒海军、刘建忠等同志的帮助，在此表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Dougill J W, Lau J C, Burt N J. Toward a theoretical model for progressive failure and softening in rock, concrete and similar materials[J]. Mech. in Engng., ASCE-EMD, 1976. 335 - 355.
- [2] Dragon A, Mroz Z A. Continuum model for plastic-brittle behavior of rock and concrete[J]. Int. J. Engng. Sci., 1979, 17: 121 - 137.
- [3] Costin L S. Time-dependent damage and creep of brittle rock[J]. Damage Mechanics and Continuum Modeling, ASCE, 1985, 25 - 38.
- [4] 谢和平. 大理岩微观断裂的分形模型研究[J]. 科学通报, 1989, 5: 365 - 368.(Xie Heping. Research on the fractal model of micro crack of marble[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 5: 365 - 368.(in Chinese))
- [5] 谢和平, 高峰. 岩石类材料损伤演化的分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(1): 74 - 82.(Xie Heping, Gao Feng. The fractal features of the damage evolution of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(1): 74 - 82.(in Chinese))
- [6] 谢和平, Sanderson D J, Peacock D C P. 雁形断裂分形模型和能量耗散[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 1 - 7.(Xie Heping, Sanderson

- D J, Peacock D C P. A fractal model and energy dissipation for en echelon fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(1): 1 - 7.(in Chinese)
- [7] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 5 - 6.(Yu Shouwen, Feng Xiqiao. Damage Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 5 - 6.(in Chinese))
- [8] Hult J. Effect of voids on creep rate and strength[J]. Damage Mechanics and Continuum Model, ASCE, 1985, 13 - 24.
- [9] Atkinson B K, Meredith P G. The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks[J]. Fracture Mechanics of Rock, 1987, 2: 111 - 166.
- [10] 杨光松. 微结构弹性损伤模型[J]. 固体力学学报, 1989, 2: 116 - 126.(Yang Guangsong. The micro-structure elastic damage model[J]. Acta Mechanica Solid Sinica, 1989, 2: 116 - 126.(in Chinese))
- [11] Consenza P, Ghoreychi M, Sabet B B, et al. In-situ rock permeability for long term safety assessment of storage[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1999, 36: 509 - 526.
- [12] Fokker P A. The Behavior of Salt and Salt Caverns[M]. Proefschrift Aussois, France: Technische Universiteit Ddlft, 1998.
- [13] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 214 - 216.(Xie Heping, Chen Zhonghui, Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004. 214 - 216.(in Chinese))
- [14] 白晨光, 魏一鸣, 朱建明. 岩石材料初始缺陷的分维数与损伤演化关系[J]. 矿冶, 1996, 5(4): 17 - 19.(Bai Chenguang, Wei Yiming, Zhu Jianming. The relation between dimension of defects of rock material and its damage evolution[J]. Mining and Metallurgy, 1996, 5(4): 17 - 19.(in Chinese))
- [15] 谢和平. 分形——岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 145 - 147.(Xie Heping. The Fractals—Rock Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1997, 3: 145 - 147.(in Chinese))
- [16] Franssen R C M C W, Spiers C J. Deformation of polycrystalline salt in compression and in shear at 250 - 300 °C [J]. Deformation Mechanics, 1990, 3: 201 - 212.
- [17] 吴文. 盐岩的静、动力学特性试验研究与理论分析[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.(Wu Wen. Experimental studies and theoretic analysis of static and dynamic mechanical characteristics of rock salt[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of rock and soil mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003.(in Chinese))
- [18] 陈忠辉, 谭匡焕, 杨文柱. 不同围压作用下岩石损伤破坏的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 576 - 580.(Chen Zhonghui, Tan Kuanghuan, Yang Wenzhu. Numerical simulation of damage and failure under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 576 - 578.(in Chinese))
- [19] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53 - 56.(You Mingqing. The relation between Young's modulus and confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53 - 56.(in Chinese))
- [20] 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 Weiguang, Zhao Yangsheng. Testing study on material property of thenardite rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 391 - 394.(in Chinese))
- [21] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. 岩石力学与工程, 2000, 19(4): 408 - 411.(Liu Quansheng, Xu Xichang. The analysis of damage of brittle rock under temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 408 - 411.(in Chinese))