

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0231-06

升温过程中盐岩动力特性实验研究

陈剑文, 杨春和, 冒海军

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 利用超声波技术对盐岩进行了升温过程中(无侧压, 温度为 20~270 °C) 的动力学测试, 分析了超声波波速、动弹性常数以及温度所导致的损伤变化规律。试验结果表明, 随着温度升高, 盐岩的超声波波速、动弹性模量和泊松比都有不同程度地降低, 且呈现一定的规律性。试验过程中所观察到的现象和理论分析说明, 盐岩的热损伤主要由矿物失水和晶间裂纹所导致, 损伤变量和平行轴向相对裂纹密度随温度的升高而增大, 但速度逐渐变缓, 试验中未观察到温度对盐岩损伤的门限值以及损伤愈合现象。

关键词: 盐岩; 动力特性; 高温; 损伤

中图分类号: TU 313+.1; O 346.5

文献标识码: A

Experimental research on dynamical properties of rock salt during rising temperature

CHEN Jian-wen, YANG Chun-he, MAO Hai-jun

(Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Because of the special mechanical properties of rock salt can be used for the energy storage and waste (radioactive and toxic wastes) disposal. But one of the properties of deep ground is "high temperature" and the temperature plays very important role of the rock salt mechanical properties, especially rising temperature. Testing with the Yingcheng rock salt during rising temperature (without confining pressure, 20-270 °C) using ultrasonic wave. From the experimental data, the velocity of ultrasonic wave, the modulus and the Poisson's ratio of dynamics decrease during rising temperature, but their trend is different. Dynamical elastic modulus decreases fast and the dynamical bulk decreases slowly. The relation of the ultrasonic wave velocity and the dynamical modulus between temperature can be expressed by functions. Both of experimental phenomenon and the data reveals that, the thermal damage and the relative align microcrack density parallel to the axis of specimen evolution with the temperature, but the rate is attenuating when the temperature rising. There is no phenomena indicates the "critical temperature" and damage self-healing due to the temperature.

Key words: rock salt; dynamical properties; temperature; damage

1 引言

盐岩因其良好的物理力学特性, 诸如结构致密、渗透率极低、良好的蠕变特性, 可使损伤自我恢复以及成腔相对容易等特点, 而成为能源安全储存以及CO₂和核废料隔离处置的优良场所。国外一些国家如美国、法国、德国等对盐岩力学特性进行大量研究, 在盐膏层中建成硐室, 并投入使用。我国对金坛盐岩也在进行可行性研究, 为能源战略储存打下基础。

资料显示^[1], 世界上大部分天然气、石油储存

库大都建在 1 000 m 以下的岩盐层中, 而我国的盐岩埋藏于地下数十米至 4 000 m, 拟建的金坛储气库埋深也在 1 000 m 左右, 温度超过 50 °C。在核废料的处置过程中, 因放射性同位素衰变所产生大量的热, 可使周围的岩土介质温度可高达 250~400 °C; 因此研究盐岩在不同温度下微观结构以及力学性能的改变^[2-5]具有重要意义。

目前国内外研究主要集中在恒定的高温状态下对盐岩力学性能如强度、变形特性以及对稳态蠕变率的影响上, 其本构方程上也只是将低温下的本

收稿日期: 2005-11-24

修改稿收到日期: 2006-03-01

基金项目: 国家基础研究发展规划 973 项目 (No. 2002CB412704); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50374064, No. 50334060)。

作者简介: 陈剑文, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学理论及实验研究。Email: jwchen111498@126.com

构乘以简单的项,但关于升温过程盐岩力学特性的试验及其理论研究则非常少,而在一些实际的工程中如储气库的注、采气过程,核废料的处置时放热过程等都是温度变化的过程。

本文主要研究盐岩在升温度在 24~270 °C 过程中的力学特性变化以及温度对盐岩损伤演化的影响。由于静力法确定试样力学参数时存在如下不足:(1) 不能用同一试样测定各种温度条件下的力学性能,难以避免数据离散;(2) 高温下加载可能引起盐岩的蠕变;(3) 需要试样较多而且盐岩取样和制备都比较困难,本次试验主要通过测量不同温度下盐岩的纵、横波波速,并根据弹性波动理论得到动力学弹性参数,分析盐岩的力学特性变化。

2 动力特性试验概述

2.1 试验准备及过程

2.1.1 试验设备及器材

本次试验采用的设备有(武汉岩土力学研究研制)RSM-SYSS 型超声波检测仪,300 kHz 纵波换能器,200 kHz 横波换能器,声波测试夹具,武昌实验仪器厂生产的 KWY-101 型电阻干燥箱,尺寸为:300 mm×450 mm×300 mm,最高温度为 300 °C,采用 TA-001 温度控制仪,控温灵敏度为±1 °C;黄油,锡箔纸等。

2.1.2 试样制备

试样取自湖北应城,为灰白~白色含钙芒硝粗粒盐岩。采用干锯法进行初步加工,后用砂纸将两端打磨光滑。试样尺寸:直径为 φ75 mm,长度为 160 mm。

2.1.3 试验过程

为了避免试样中的水对试验产生影响,试样加工好后在恒温(24 °C)干燥环境中放置一周后再进行试验。试验时将盐岩试样放置在恒温箱中,以 5 °C/min 速度升到预定温度后恒温 2 h,再拿出恒温箱立即进行声波测试。

2.2 试验基本原理

用超声波检测仪测出纵波和横波在试样中传播的时间 t ,并根据下式计算出纵、横波波速:

$$V_p = L/(t_p - t_0); V_s = L/(t_s - t_0) \quad (1)$$

式中: L 为试样长度; V_p 为纵波波速; V_s 为横波波速; t_0 为仪器系统的零延时。

试样声波测试步骤遵循《水利水电工程岩石试验规程》^[6]。

2.3 岩石动力学参数计算

岩石动力学参数包括岩石的动泊松比 ν_d 、动杨

氏模量 E_d 、动剪切模量 G_d 、动体积模量 K_d 。根据无限弹性介质波动理论,可以推导其表达式为^[7]

$$\left. \begin{aligned} \nu_d &= \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}; E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}; \\ G_d &= \rho V_s^2; K_d = \rho(V_p^2 - 4V_s^2/3) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3 试验结果及分析

试验采用了 3 个试样。为了便于分析比较,每次只做一个试样,共进行 3 次试验。试验结果整理包括波速、动力学参数等随温度的变化,并采用曲线进行拟合。

3.1 波速随温度的变化

一般而言,岩石波速与岩石的矿物成份和岩石所受的温度、压力有关,岩石中的孔隙和孔隙流体等对岩石波速也有着巨大的影响。

一般情况下岩石的波速随温度的升高而降低,但岩石的种类不同,降低幅度不一样。从试验结果来看,除了 TW-01 样在 174 °C 时略有升高外,盐岩的纵波、横波波速都随温度的升高而逐渐降低。波速随降低的平均速度,纵波为 5.760~6.045 k·ms⁻¹·°C⁻¹,横波为 4.460~5.167 k·ms⁻¹·°C⁻¹。

波速随温度的变化规律可采用下式进行拟合:

$$V = \alpha \exp(-\beta T) \quad (3)$$

式中: V 为纵、横波波速; T 为温度(°C); α 、 β 为拟合参数。对于纵波: $\alpha=4.31\sim4.56$, $\beta=0.0014\sim0.0016$,横波: $\alpha=2.97\sim3.03$, $\beta=0.0021\sim0.0025$ 。拟合的结果和试验曲线对比结果见图 1。

3.2 动弹性参数随温度的变化

3.2.1 动弹性模量随温度的变化关系

岩石的弹性参数是反映岩石弹性变形的重要指标,岩石的弹性除了受矿物的弹性性质控制外,更重要的是由岩石内部的孔隙所决定。通常岩石的静弹性模量比动弹性模量小,但岩石越致密则相差越小,岩石的动弹性参数由式(2)确定。图 1 表明,3 个试样的动杨氏模量和剪切模量均随温度的升高而下降,下降的趋势随着温度的升高而减缓。这与杜守继等^[8]所测的花岗岩趋势相近,但动体积模量在 180 °C 左右时出现升高,然后下降,但总体上还是随温度升高而下降。

假设岩石的孔隙主要由孔洞组成,由 Walsh 公式可导出^[9]:

$$\beta_{\text{eff}} = \beta_s \left(1 + \frac{3(1-\nu_s)\eta}{2(1-2\nu_s)(1-\eta)} \right) \quad (4)$$

式中： β_{eff} 为岩石的有效压缩系数，是体积模量的倒数； β_s 为基质的压缩系数； η 为孔隙度； ν_s 为基质的泊松比。取 $\nu_s = 0.25$ ，则 $\beta_{\text{eff}} = \beta_s(1 + 2.25\eta)$ 。温度升高时，岩石空隙可能逐渐增加，岩石的体积模量应该减少，造成在 180 °C 左右出现异常可能与盐岩中某些成份(如芒硝、石膏等)分解的粉末填充微裂纹，造成孔隙度降低。

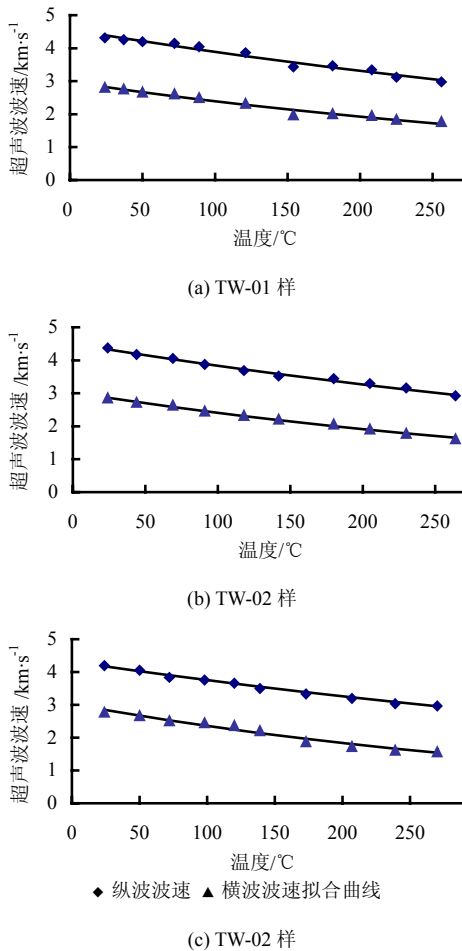


图 1 声波波速试验观测值和拟合结果对比

Fig.1 Experimental and fitting data of ultrasonic speed of rocksalt under different temperatures

由试验曲线可知（图 2），动杨氏模量随温度升高而降低最快，降幅也非常大，体积模量则最慢，动弹性模量随温度的变化满足下面关系：

$$C_d = \alpha + \beta \exp(\gamma T) \tag{5}$$

式中： C_d 为动弹性模量； T 为温度（°C）； α 、 β 分别为拟合参数。实验拟合参数见表 1，拟合曲线限于篇幅，仅列出 TW-02 样，如图 2 所示。

3.2.2 动泊松比随温度的变化

根据测试结果，盐岩的动泊松比随温度的关系相对显得比较凌乱（图 3），除了 TW-01 样外，都是随温度的升高而升高，但动泊松比随温度升高的

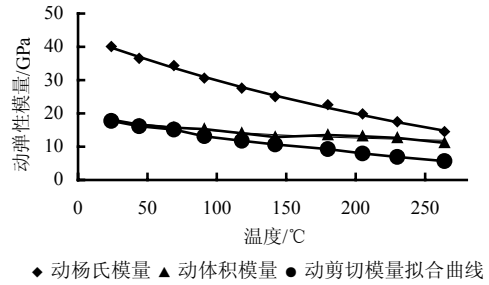


图 2 不同温度下的动弹性模量实验观测值和拟合结果
Fig.2 Experimental and fitting data of dynamical modulus of elasticity of rocksalt under different temperatures

速率并不是一致，在 130~170 °C 范围内比较快，其他范围要变缓。根据物理化学知识，芒硝（ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）和石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）的失水温度分别为 100 °C 和 150 °C，超过一定的温度会失去结晶水。水包括水汽、湿气在增加能量的点更容易被吸附，从而这些地方溶解能力局部增强，形成卤水薄膜，使盐岩的变形能力加强^[10]。此外，当岩石的含水率升高时对波速的变化影响较大，纵横波速比(V_p/V_s)值也增大，由式(2)所计算的泊松比也随其而增大。据此初步分析，泊松比在 130~160 °C 范围内随温度升高的速率比较快是与失去结晶水所产生的少量水汽有关。

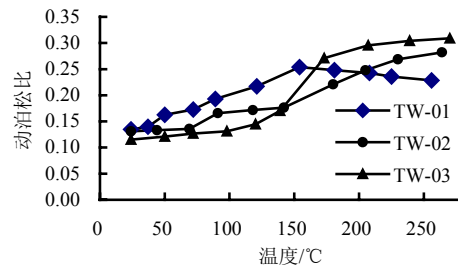


图 3 盐岩在不同温度下动泊松比随温度变化曲线
Fig.3 The curve of dynamical poisson's ratios of rocksalt under different temperatures

4 温度损伤分析

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，但本次试验结果显示，盐岩力学性质随温度的升高而劣化，其原因主要有：(1) 当温度升高到一定值时盐岩中某些成份就会失去结晶水，从而导致热稳定性问题并且带来力学性能变化^[11, 12]；(2) 盐岩所含多种矿物颗粒因不同热膨胀系数以及各向异性晶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热损伤^[13]。本次试验过程中也观察

表1 盐岩动弹性模量随温度变化规律拟合参数

Table 1 The fitting data of dynamical modulus of elasticity of rocsalt under different temperatures

参数	E_d			G_d			K_d		
	TW-01	TW-02	TW-03	TW-01	TW-02	TW-03	TW-01	TW-02	TW-03
α	-5.719 2	-10.049 8	-20.323 8	1.217 9	-5.167 5	-10.637 8	-61.3923	10.853 7	12.759 6
β	48.531 8	53.416 1	61.157 4	18.098 1	24.588 7	29.244 3	80.7867	8.506 5	5.716 8
γ	0.003 1	0.002 9	0.002 3	0.004 8	0.003 1	0.002 4	0.00042	0.007 9	0.021 4
R^2	0.988	0.998	0.992	0.990	0.998	0.989	0.948	0.971	0.882

到了当温度(大于 150 °C)较高时试样表面的盐岩晶粒之间出现明显的晶间裂纹,见图 4(b),并听到较低清脆破裂声。对于后者,人们通常比较重视,而对热稳定性问题的研究则报导甚少。

盐岩中常见的二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的密度为 2.3 g/cm^3 , 150 °C失水为 CaSO_4 时密度为 2.9 g/cm^3 , 体积缩小 20.69%; 芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)密度为 1.48 g/cm^3 , 100 °C时失水变为无水芒硝(Na_2SO_4),密度为 2.67 g/cm^3 , 体积缩小 44.56%,可见失去结晶水必定会对盐岩力学特性产生影响。本次试验过程中也发现它们失水后产生的白色粉末分布于试样表面的晶粒之间。

遗憾的是,失水作用所导致的热稳定性问题以及对盐岩力学性能的影响还停留在试验观察描述上,其理论分析有待进一步研究。笔者对 8 个盐岩试样进行巴西劈裂试验,得出其抗拉强度为 0.76~1.31 MPa,平均为 1.04 MPa,故认为晶间的抗拉强度约为 1.0 MPa。而盐岩的线膨胀系数为 $(3.2\sim 4)\times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,为一般岩石的 4 倍,当温度超过一定范围时很容易导致晶间开裂,产生损伤。

损伤变量的定义非常多,采用纵波波速定义^[14]是其中之一:

$$D = 1 - \left(V_{pd} / V_{pmax} \right)^2 \quad (6)$$

式中: D 为损伤变量, V_{pmax} 为完整岩石的纵波波速,可以取初始状态波速; V_{pd} 为损伤试样纵波波速。

根据式(6)所定义的损伤变量,对试验结果进行处理后发现随着温度的升高,损伤逐步加剧,损伤变量为温度的非线性函数,见图 5。

Ayling et al^[15] (1995 年)提出利用超声波技术可连续监测微裂纹变化,表达为

$$\left. \begin{aligned} \delta_z &= 0.92(1 - (V_p/V_{p,max})^2) - 0.57(1 - (V_s/V_{s,max})^2); \\ \delta_{x,y} &= 4.28(1 - (V_s/V_{s,max})^2) - 1.77(1 - (V_p/V_{p,max})^2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: δ_z 为垂直 z 轴(单轴时 σ_1)的拉伸微裂纹密度; $\delta_{x,y}$ 为平行 z 轴(即平行 σ_1)的排列(aligned)微裂纹密度(裂纹密度设初始为零); V_s 、 V_p 分别表示剪切波和压缩波速。



(a) 试验前(24 °C)



(b) 试验后(270 °C)

图4 试验前后照片

Fig.4 The photograph of specimen TW-03 before and after experiment

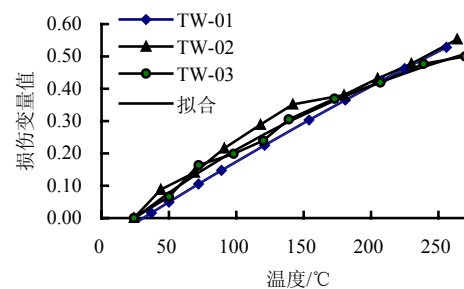


图5 盐岩损伤变量随温度变化曲线

Fig.5 The damaging parameter of rock salt vs. temperature

由式(7)可得平行试样轴线的相对裂纹密度随温度的变化情况,见图 6,而垂直试样轴线的相对裂纹密度最大只有 0.16,相对平行轴线的非常小(限于篇幅图略)。通过对试验数据进行分析发现,无论是按照式(6)所定义的损伤变量还是平行轴线裂纹相对密度随温度的变化规律都可采用下式表达:

$$D = \alpha(\beta - \exp(-\gamma T)) \quad (8)$$

式中: D 为损伤变量或相对裂纹密度; α 、 β 、 γ

均为拟合参数，拟合效果见图 5 和图 6。其随温度的演化规律为

$$\dot{D} = dD/dT = \alpha\gamma \exp(-\gamma T) \quad (9)$$

在 20~270 °C 范围内温度对盐岩的损伤影响随着温度的升高而逐渐减弱，亦即需要更多的能量才能使裂纹进一步扩展。

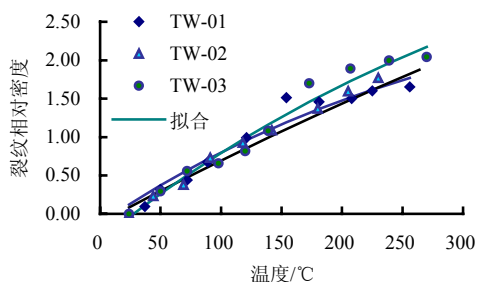


图 6 按 Ayling 公式定义裂纹相对密度随温度变化曲线
Fig.6 The relative densities of microcrack according to Ayling's formulation vs. temperature

有些研究表明温度对岩石的损伤存在门限值^[4, 13]，但本次的试验没有明显的现象证明其存在。至于一定的温度可导致盐岩损伤愈合的问题，笔者认为是因为试样在所含水分、压力、温度的联合作用下产生压力溶解和重结晶才导致损伤愈合，而这方面的研究也主要以试验观察为主(Brigitte Martin et al, 1999 年, Bas den Brok et al, 1999, Siese de Meer et al, 1999 年)，本次试验是在无侧压的情况下进行，这是没有观察到损伤愈合的主要原因。

5 结 论

盐岩的线膨胀系数为一般岩石的 4 倍左右，而抗拉强度仅为 1 MPa。在温度变化过程中，尤其是温度冲击对其力学影响非常大，遗憾的是对此研究见报的非常少。本次试验通过测量盐岩经历 20~270 °C 高温时的超声波波速，分析了动力学参数以及由温度所造成的损伤随温度的变化规律：

(1) 盐岩的超声波波速随温度的升高而下降，符合负指数关系，且横波波速比纵波波速下降稍快。

(2) 盐岩的动杨氏模量、剪切模量和体积模量随温度的升高而降低，但趋势逐渐缓慢，可采用形如式(5)的函数进行拟合，并得出了拟合参数，但 3 个参数随温度升高下降的幅度并不一样，动杨氏模量下降最快，动体积模量最慢。

(3) 动泊松比随温度的变化规律相对不明显，但总的趋势是随温度的升高而降低。

(4) 按纵波波速定义的损伤变量以及平行试样

轴向相对裂纹密度随温度的升高而增大，但趋势逐渐变缓，其表达式为式(8)。

(5) 本次试验没有观察到温度损伤存在的门限值以及温度所导致盐岩试样损伤愈合问题。在无侧压情况下，只是考虑了升温过程对盐岩力学性能，尤其是损伤演化的影响，对热稳定性问题也只是进行了简单地分析，但实际工程中岩石一般处在三向应力状态，需要进一步考虑应力-温度耦合损伤，这对探讨温度对盐岩损伤的影响非常重要。

致谢：本次试验过程中得到胡元育高工和包洪涛等同志的帮助，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Soppe W J, Donker H, Garcia Celma A, et al. Radiation-induced stored energy in salt rock[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1994, 217: 1-31.
- [2] 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. 201-212.
- [3] 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.
- [4] 陈剑文, 杨春和, 高小平, 等. 盐岩的温度与应力耦合损伤研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(11): 1 986-1 999.
CHEN Jian-wen, YANG Chun-he, GAO Xiao-ping, et al. Study on the coupled damage of temperature and mechanics for salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(11): 1 986-1 999.
- [5] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240 °C 内盐岩物理力学特性的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2 365-2 369.
LANG Wei-guo, ZHAO Yang-sheng, XU Su-guo. Testing study on physical and mechanical properties of heated salt rock within 240°C[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2 365-2 369.
- [6] SD246-2001, 水利水电工程岩石试验规程[S].
- [7] 贺玲凤, 刘军. 声弹性技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 杜守继, 马明, 陈浩华, 等. 花岗岩经历不同高温后纵波波速分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1 803-1 806.
DU Shou-xu, MA Ming, CHEN Hao-hua, et al. Testing study on longitudinal wave characteristics of granite after high temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1 803-1 806.
- [9] 陈颀, 黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001
- [10] Udo Hunsche, Otto Schulze. Effect of humidity and

- confining pressure on creep of rock salt[A]. **The Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the Third Conference**[C]. Edited by M.Ghoreychi, P.Bérest and H.Reginald Hardy, Jr. Germany: Tans Tech Publication, 1993. 237—248.
- [11] Hartmut Kern, Jorg H. Fanke. The effect of temperature on the chemical and mechanical behavior of carnallite_halite rock[A]. **The Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the First Conference**[C]. Edited by H.Reginald Hardy, Jr. Germany: Trans Tech Publication, 1981. 180—191.
- [12] Kern H, Popp T, Takeshita T. Characterization of the thermal and thermomechanical behaviour of polyphase salt rocks by means of electrical conductivity and gas permeability measurements[J]. **Tectonophysics**, 1992, 213(3-4): 285—302.
- [13] 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 Quan-sheng, XU Xi-chang. The analysis of damage of brittle rock under temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 408—411.
- [14] Kawamoto T. Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass damage mechanics theory[J]. **International Journal of Numerical Analysis Method in Geomechanics**, 1988, 12(1): 1—30.
- [15] Mark R. Ayling, Philip G. Meredith and Stanley A. F. Murrell. Microcracking during triaxial deformation of porous rocks monitored by changes in rock physical properties, I. Elastic-wave propagation measurements on dry rocks[J]. **Tectonophysics**, 1995, 245(3-4): 205—221.
-
- 上接第 230 页
- Soil Slopes under Earthquakes and Rainstorms**[C]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1998. 116—131.
- [6] Sarma S K. Seismic stability of earth dams and embankments[J]. **Geotechnique**, 1975, 25(4): 74—761.
- [7] Biondi G, Cascone G, Maugeri M. Flow and deformation failure of sandy slopes[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(9-12): 1 103—1 114.
- [8] Lin J S, Whiteman R V. Decoupling approximation to the evaluation of earthquake-induced plastic slip in earth dams[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1983, 11(5): 667—678.
- [9] Gazetas G, Uddin N. Permanent deformation on preexisting sliding surfaces in dams[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994, 120(11): 2 041—2 061.
- [10] Wartman J, Bray J D, Seed R B. Shaking table experimental of a model slope subjected to a pair of repeated ground motions[A]. **Proceedings of Fourth International Conference on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics**[C]. California: San Diego, 2001. 5—14.
- [11] Kramer S L, Smith M W. Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1997, 123(7): 635—644.
- [12] Rathje E M, Bray J D. Nonlinear coupled seismic analysis of earth structures[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2000, 126 (11): 1 002—1 015.
- [13] 徐志英, 沈珠江. 地震液化的有效应力二维动力分析方法[J]. **华东水利学院学报**, 1981, 9(3): 1—14.
XU Zhi-ying, SHEN Zhu-jiang. 2-D dynamic analysis of effective stresses of seismic liquefaction[J]. **Journal of East China College of Hydraulic Engineering**, 1981, 9(3): 1—14.
- [14] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [15] 张鲁渝, 郑颖人. 简化 Bishop 法的扩展及其在非圆弧滑面中的应用[J]. **岩土力学**, 2004, 25(6): 927—934.
ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren. An extension of simplified Bishop method and its application to non-circular slip surface for slope stability analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6):927—934.
- [16] 李湛, 栾茂田. 考虑强度退化效应的堤坝抗震稳定性评价方法[J]. **岩土力学**, 2004, 25(增刊 2): 409—413.
LI Zhan, LUAN Mao-tian. Evaluation of aseismic stability of soil embankments considering cyclic degradation of soil strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp2.): 409—413.
- [17] Stamatopoulos C A. Sliding system predicting large permanent co-seismic movements of slopes[J]. **Earthquake Engineering and structural Dynamics**, 1996, 25(10): 1 075—1 093.
- [18] Ambraseys N, Srbulov M. Earthquake induced displacements of slopes[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1995, 14(1): 59—71.
- [19] 汪闻韶, 金崇磐, 王克成. 土石坝的抗震计算和模型实验及原型观测[J]. **水利学报**, 1987, (12): 1—15.
WANG Wen-shao, JIN Chong-pan, WANG Ke-cheng. Aseismic calculation, model and prototype experiments and field monitoring of earth-rock dams[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1987, (12):1—15.