

文章编号: 1000-7598-(2006)08-1267-05

盐岩蠕变特性和本构关系研究

刘 江^{1,2}, 杨春和¹, 吴 文¹, 高小平¹

(1. 中国科学院岩土力学重点实验室, 武汉 430071; 2. 中交第二航务工程勘察设计院, 武汉 430071)

摘 要: 对金坛盐岩蠕变规律进行了试验研究, 分析了不同应力状态和温度对盐岩蠕变特性的影响, 通过试验获取了蠕变曲线和蠕变特征参数。根据其蠕变曲线特征, 用黏弹塑性理论建立了盐岩蠕变本构模型。试验结果表明, 稳态蠕变率是偏应力和温度的非线性函数关系, 并提出盐岩的稳态蠕变本构方程。通过试验数据拟合得到本构方程中的参数, 将理论和试验结果进行比较, 结果表明两者的吻合性较好。

关 键 词: 盐岩; 蠕变试验; 温度; 本构关系

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Study on creep characteristics and constitutive relation of rock salt

LIU Jiang^{1,2}, YANG Chun-he¹, WU Wen¹, GAO Xiao-ping¹

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

2. The Second Investigation and Design Institute, China Transportation Engineering, Wuhan 430071, China)

Abstract: Uniaxial and triaxial creep tests have been performed on rock salt of Jintan Salt Mine on high temperature and high pressure triaxial rheological device; the creep characteristics of rock salt are investigated and the effect of stress state and temperature of rock salt are analyzed; and then the creep characteristic curve and parameters are obtained. Based on the character of creep curve of rock salt, a creep constitutive model of rock salt is established by using viscoelasto-plastic theory. Through the test results, it is shown that the steady state creep strain rate is a nonlinear function of deviatoric stress and temperature; a steady state creep constitutive model of rock salt is established. The parameters of constitutive equation are obtained by fitting test data; the theoretic results is proved well by comparison with the experimental results.

Key words: rock salt; creep test; temperature; constitutive relation

1 引 言

盐岩具有良好的蠕变特性、低渗透性和损伤恢复特性, 被认为是能源地下储存和核废料地下处置的理想介质。近 20 年来, 西方发达国家对盐岩力学性质特别是蠕变特性进行了大量的研究^[1~3]。根据盐岩的试验结果和流变理论以及盐岩的力学特性, 学者们提出了大量的盐岩本构方程和蠕变响应模型, 如由 Munson 和 Dawson^[4] (1984 年) 提出来的多机制变形模型(M-D), Carter^[5]和 Hunsche^[6]均对盐岩本构关系模型进行了研究。国内的一些学者^[7~9]也对盐岩的本构关系进行了一些研究。建立盐岩蠕变本构方程主要有以下方法: (1) 经验公式法; (2) 黏弹塑性模型理论方法; (3) 唯象方法。国家为配

合天然气“西气东输”工程, 确定在江苏省金坛地区的金坛盐矿建设我国第一个天然气盐岩地下储存库。为研究金坛盐矿盐岩的蠕变特性, 确定其本构关系, 笔者对金坛盐岩进行了大量的三轴蠕变试验, 获得了蠕变曲线和岩石参数, 提出了金坛盐岩的本构关系。

2 试验设备和岩样加工

2.1 实验设备

试验设备为中国科学院武汉岩土力学研究所研发的 XTR01 型微机控制电液伺服试验机, 它主要由轴压系统、侧向压力系统、孔隙水系统、加温系统、微机控制系统 5 大部分组成, 见图 1。各量程的测量精度可保持在 1% 的误差范围内, 满足试验要求。

收稿日期: 2005-03-03

修改稿收到日期: 2005-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50274065); 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基础研究基金(No. Q110205)。

作者简介: 刘江, 男, 1979 年生, 硕士, 主要从事岩石力学研究和试验方面的工作。E-mail: liujiang1979@126.com



图 1 XTR01 型微机控制电液伺服试验机

Fig.1 XTR01 electric-fluid serving compression machine

2.2 岩样加工

本次试验研究的试样取自江苏金坛盐矿深部盐层, 盐岩试样呈黑灰色粗粒状, 主要成份为 NaCl, 含少量黑色角砾碎屑及少量泥质胶结物。由于盐岩具有遇水溶解的特点, 采用干式锯磨法进行全部试样的加工。先切割两端面, 保留 200 mm 的原样长度(原样不足 200 mm 的, 按其所能保留的最大长度进行切割), 然后对两切割端面进行手工打磨, 直至符合试验要求的标准^[10], 对试件的环表面进行简单加工打磨。

3 盐岩蠕变试验

3.1 试验结果

盐岩的单、三轴蠕变试验的目的是获取蠕变本构模型的特征参数, 确定轴压、围压以及温度对岩石蠕变特性的影响。本次蠕变试验结果见表 1, 盐岩各种试验典型的曲线见图 2~3。

表 1 盐岩蠕变实验结果

Table 1 experiment result of creep of rock salt

加载应力/MPa		温度	实验时间	初始蠕变极限	稳态蠕变率
围压	轴压	/℃	/h	/%	/10 ⁻⁴ h ⁻¹
0	10	25	91	0.68	1.40
0	10	50	89	1.01	3.47
0	15	25	56	0.96	2.41
0	15	50	79	1.47	8.37
5	10	25	119	0.19	0.18
5	15	25	90	0.27	0.45
5	25	25	90	0.55	0.56
5	15	50	84	0.45	2.32
5	15	100	76	1.31	6.97
10	15	25	80	0.22	0.28
10	15	50	101	0.37	1.74
10	15	100	95	0.78	3.80
10	20	50	53	0.44	5.18
15	20	25	93	0.25	0.61
15	25	25	97	0.45	1.10
15	30	25	85	0.75	1.60

3.2 结果分析

试验研究表明, 盐岩的初始蠕变阶段较短, 很快就过渡到稳态蠕变阶段, 应力状态和温度这两个环境因素对盐岩蠕变特性有较大的响应。

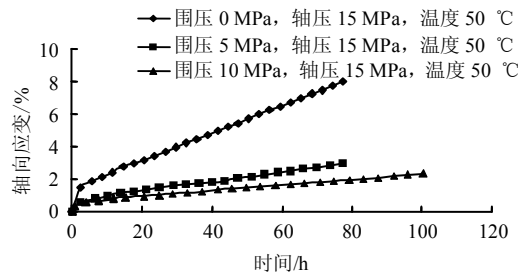


图 2 不同围压下盐岩应变-时间曲线

Fig.2 Creep strain curve under different deviatoric stress

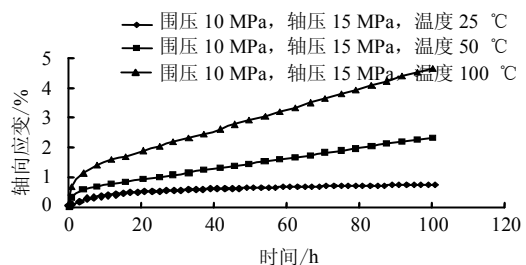


图 3 相同应力状态、不同温度下盐岩应变-时间曲线

Fig.3 Creep strain curve under same stress state with different temperature

根据盐岩单、三轴蠕变试验结果, 其蠕变特征如下:

(1) 盐岩的蠕变曲线可以分为 3 个阶段, 即初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段。初始蠕变阶段持续时间一般较短, 很快就过渡到稳态蠕变阶段, 而稳态蠕变的时间很长, 特别是在低应力水平下盐岩稳态蠕变阶段可以持续较长的时间。由于时间限制本文试验未做到第三阶段。

(2) 在相同轴压、不同围压下, 盐岩蠕变应变随偏应力增加而增加。随偏应力的增加, 盐岩的蠕变应变率变化较大, 在稳态蠕变阶段盐岩的蠕变应变率依赖于偏应力的变化。

(3) 在相同应力状态下, 盐岩蠕变应变随温度增加而增加。温度增加, 盐岩的初始蠕变极限和稳态蠕变率增加很快, 温度能造成盐岩损伤使盐岩物理力学性质劣化。

4 盐岩蠕变本构方程

4.1 黏弹塑性蠕变本构方程

根据金坛盐矿的盐岩蠕变试验结果和其他学者的一些盐岩试验结果^[8], 岩盐的蠕变曲线 $\varepsilon-t$ 一般

有如下特点: 施加轴向应力后, 立刻产生瞬时的弹性应变; 蠕变曲线反映出应变随时间增大而增大的趋势。根据半理论、半经验方法可以确定盐岩的黏弹塑性本构模型元件由马克斯威尔体和廖国华体串连组成, 如图4示。

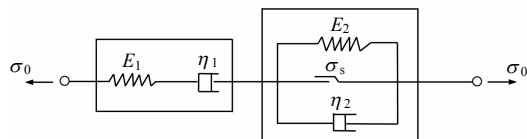


图4 盐岩流变模型

Fig.4 The rheology model of rock salt

4.1.1 简单应力状态下的本构方程

在简单应力状态下, 模型受力作用后产生的总应变为:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \begin{cases} \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) & \sigma_0 > \sigma_s \\ 0 & \sigma_0 \leq \sigma_s \end{cases} \quad (3)$$

式中 E_1 , E_2 均为弹性元件的弹性系数; σ_s 为塑性元件的起始摩擦阻力; η_1 ; η_2 均为黏性元件的黏滞系数; σ_0 为施加的恒载。

因此, 简单应力状态下的本构方程为:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t & \sigma_0 \leq \sigma_s \\ \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) & \sigma_0 > \sigma_s \end{cases} \quad (4)$$

4.1.2 复杂应力状态下的本构方程

在三维应力状态下, 应力张量 σ 为二阶对称张量, $\sigma = \sigma_{ij} e_i e_j$, 可以分解为球应力张量 $\sigma_m \mathbf{I}$ 和偏斜应力张量 $\mathbf{S}$ 。记为

$$\sigma = \sigma_m \mathbf{I} + \mathbf{S}, \text{ 或 } \sigma_{ij} = \delta_{ij} \sigma_m + S_{ij} \quad (5)$$

式中 $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, 为平均应力; $\mathbf{I}$ 为单位张量; δ_{ij} 为克罗内尔符号。同理, 应变张量 $\varepsilon = \varepsilon_{ij} e_i e_j$ 也可分解为球应变张量 $\varepsilon_m \mathbf{I} + \varepsilon$ 和偏斜应变张量 ε 。记为

$$\varepsilon = \varepsilon_m \mathbf{I} + \varepsilon, \text{ 或 } \varepsilon_{ij} = \delta_{ij} \varepsilon_m + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

式中 ε_m 为平均正应变, $\varepsilon_m = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ 。

由三维应力状态下的虎克定律有:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= 3K \varepsilon_m \\ S_{ij} &= 2G \varepsilon_{ij} \Rightarrow \varepsilon_{ij} = \left(\frac{S_{ij}}{2E_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 K 为盐岩体积模量, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$; ν 为盐岩泊松比; G 为盐岩剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 。

根据体积改变定律与形状改变定律^[11]: 球应力张量只引起体积变化, 而不会引起形状的改变; 而偏斜应力张量则只导致物体形状改变, 不导致其体积变化。故可以得到三维复杂应力状态下的本构方程为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \frac{\sigma_m}{2E_1} + \frac{(S_{ij})_0}{\eta_1} t + \frac{(S_{ij})_0 - \sigma_s}{2E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] & |(S_{ij})_0| \geq |\sigma_s| \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{\sigma_m}{2E_1} + \frac{(S_{ij})_0}{\eta_1} t & |(S_{ij})_0| < |\sigma_s| \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

4.1.3 黏弹塑性本构模型参数确定

由简单应力状态下的本构关系式可知, 当 $t=0$ 时, 产生一个瞬态弹性应变 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1}$, 根据曲线可以

确定出模型中弹簧参数 E_1 。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 若施加的应力 $\sigma < \sigma_s$, 模型变为 Maxwell 体, 产生稳态蠕变变形, 模型的应变为 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t$, 蠕变率为 $\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_1}$ 。

根据试验曲线可以确定出黏壶的黏性参数 η_1 。若应力 $\sigma > \sigma_s$, 模型即如图4所示。在简单应力状态下应变可由式(4)来描述, 此时应变为 $\varepsilon \rightarrow \left(\frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma - \sigma_s}{E_2} \right)$, 蠕变率由最大值 $\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_1} + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2}$, 趋向于

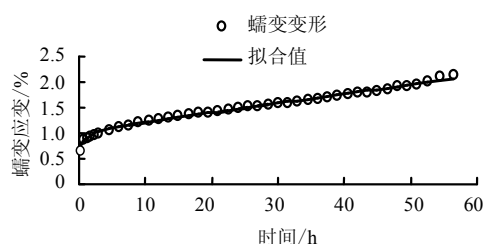
定值 $\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_1}$ 。由蠕变率曲线可以确定出参数 σ_s 与 η_2 。给合蠕变曲线形态, 可以确定出参数 E_2 。以上的结果只是考虑到单轴蠕变过程, 当试验为三轴应力状态时, 由相应的分析可知, 该模型能较好地描述蠕变过程中的稳态蠕变与初始蠕变。分析盐岩的试验数据, 并对曲线进行模拟, 可求出相应的参数

见表 2。将理论和试验曲线进行比较, 见图 5。模型的温度效应不能从方程本身直接反映, 只能从参数随温度的变化来反映, 由表 2 的后 3 行数据可以发现相同偏应力下参数随温度变化的趋势。

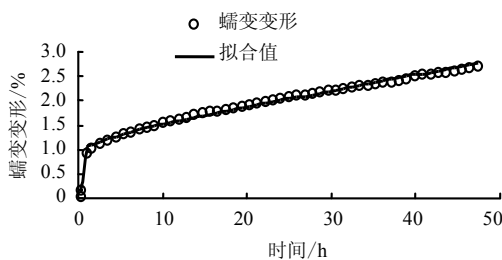
表 2 盐岩蠕变参数拟合结果

Table 2 Fitting result of creep parameters of salt rock

σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	T /(°C)	E_1 /GPa	E_2 /GPa	η_1 /GPa·s	σ_s /MPa	η_2 /MPa·s
5	10	25	21.465	3.706	2.846	8.469	3.049
5	15	25	19.97	8.83	1.635	14.24	44.636
15	20	25	14.5	3.54	1.113	18.01	5.602
0	10	25	19.87	4.21	0.948	10.56	0.738
15	25	50	10.62	3.32	0.666	21.29	4.87
5	15	100	7.9	17.18	0.46	6.28	74.89



(a) 围压 15 MPa, 轴压 20 MPa, 温度 25 °C



(b) 围压 5 MPa, 轴压 15 MPa, 温度 100 °C

图 5 盐岩试验曲线与理论曲线比较

Fig.5 The comparison between the experiment analysis and theory of rock salt

4.2 稳态蠕变本构方程

稳态蠕变率与偏应力、围压和温度关系曲线见图 6~8。

根据本次试验结果, 从图 6 和图 7 可以看出, 偏应力和温度对稳态蠕变率影响较大, 而从图 8 可知, 当围压大于 5 MPa 时, 围压对稳态蠕变率变化影响不大, 稳态蠕变率的围压效应可以不考虑。盐岩稳态蠕变率主要受温度和偏应力所控制, 根据盐岩的蠕变特征, 稳态蠕变阶段的蠕变应变率可以采用如下表达式:

$$\dot{\epsilon}_s = f(\sigma_1 - \sigma_3)f(T) \quad (9)$$

式中 $\dot{\epsilon}_s$ 为盐岩稳态蠕变应变率; $f(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为偏应力影响函数; $f(T)$ 为温度影响函数;

根据本次试验结果和前人的研究成果, 盐岩的

稳态蠕变率本构关系可以用下式表示:

$$\dot{\epsilon}_s = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma^*}\right)^m \quad (10)$$

式中 A 为材料常数; Q 为材料的激活能; σ^* 为单位应力; R ($R=8.3143$ kJ/mol) 为普适气体常数; T 为试验温度 (K); m 为应力指数。通过试验数据可以拟合得到 A , Q , m , 三个参数值分别为: $A=1.336 \times 10^{-6}$ MPa⁻⁵·d⁻¹; $Q=15.9$ kJ/mol; $m=5$ 。

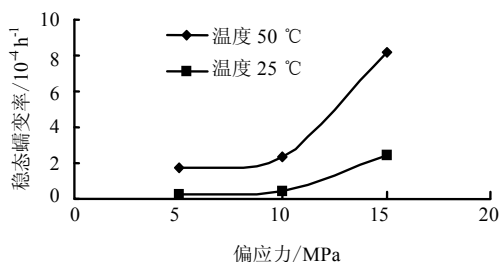


图 6 稳态蠕变率与偏应力关系曲线图

Fig.6 Curve of steady creep rate with different deviatoric stress

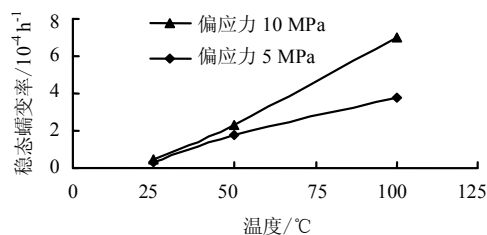


图 7 稳态蠕变率与温度关系曲线

Fig.7 Curve of steady creep rate with different temperature

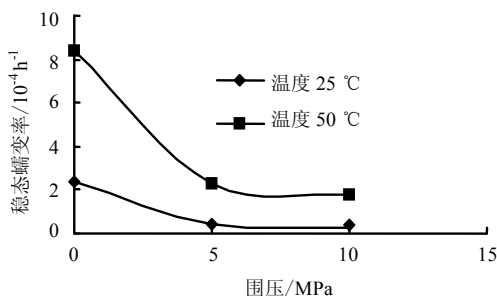


图 8 稳态蠕变率与围压关系曲线

Fig.8 Curve of steady creep rate with confining pressure

5 结 论

(1) 试验结果表明: 盐岩蠕变对应力状态和温度有较大响应, 蠕变应变随温度和偏应力增加而增加。

(2) 通过试验结果分析, 提出了盐岩蠕变的黏

弹塑性本构模型, 该模型组成元件少, 参数易于确定, 能较好地描述蠕变过程中的稳态蠕变与初始蠕变。通过试验数据拟合得到模型参数, 将试验结果和理论结果进行比较, 发现两者能较好地吻合。

(3) 稳态蠕变率是偏应力、围压和温度的函数, 提出了相应的稳态蠕变率本构方程。通过对本次试验数据的拟合, 得到了稳态蠕变率方程参数。

参 考 文 献

- [1] Paul E Senseny. Creep properties of four rock salts[A]. **The Mechanical Behavior of Salt of the Second Conference**[C]. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984. 431—444.
- [2] Mrugala M, Hardy H R. Effect of test duration on the viscoelastic parameters of salt[A]. **The Mechanical Behavior of Salt of the Second Conference**[C]. Germany: Trans. Tech. Publications, 1988. 245—262.
- [3] Udo Hunsche, Otto Schulze. Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt[A]. **The Mechanical Behavior of Salt of the Third Conference**[C]. Germany: Trans. Tech. Publications, 1993. 237—248.
- [4] Munson D E, Dawson P R. Salt constitutive modeling using mechanism maps[A]. **The Mechanical Behavior of Salt of the First Conference**[C]. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984. 717—737.
- [5] Cater N L, Russell J E. Modified mechanical equation of state for rock salt[A]. **The Mechanical Behavior of Salt of the Second Conference**[C]. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984. 409—430.
- [6] Hunsche U. Measurement of creep in rock salt at small strain rates[A]. **The Mechanical Behavior of Salt of the Second Conference**[C]. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984. 187—196.
- [7] 杨春和, 高小平, 吴文. 盐岩时效特性实验研究与理论分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(6): 764—766.
- [8] 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, 2002.
- [9] 杨春和, 曾义军, 吴文. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1678—1682.
- [10] 长江水利委员会长江科学院. 水利水电工程岩石试验规程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [11] 尹祥础. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [12] YANG Chun-he, GAO Xiao-ping, WU Wen. Experiment studies and theoretic analysis of time dependent properties of rock salt[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2004, 23(6): 764—766.
- [13] 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, 2002.
- [14] 杨春和, 曾义军, 吴文. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1678—1682.
- [15] YANG Chun-he, ZENG Yi-jun, WU Wen, et al. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1 678—1 682.
- [16] 长江水利委员会长江科学院. 水利水电工程岩石试验规程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [17] 尹祥础. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [18] 贾超, 刘宁, 肖树芳. 洞室岩体参数的位移正演反分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 450—454.
- [19] JIA Chao, LIU Ning, XIAO Shu-fang. Application of direct displacement inverse analysis to rockmass parameters of caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 450—454.
- [20] 郝哲, 刘斌. 基于差分法及神经网络的洞室围岩力学参数反分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 77—80.
- [21] HAO Zhe, LIU Bin. Back analysis of mechanical parameters of rocks surrounding openings on the basis of calculus of difference method and neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 77—80.
- [22] 蒋中明, 徐卫亚, 邵建富. 基于人工神经网络的初始地应力场三维反分析[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 52—56.
- [23] JIANG Zhong-ming, XU Wei-ya, SHAO Jian-fu. ANN based 3D back analysis of initial stress in rock masses[J]. **Journal of Hohai University**, 2002, 30(3): 52—56.
- [24] 易达, 徐明毅, 陈胜宏, 等. 人工神经网络在岩体初始应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 943—946.
- [25] YI Da, XU Ming-yi, CHEN Sheng-hong, et al. Application of artificial neural network to back analysis of initial stress field of rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 943—946.
- [26] 易达, 陈胜宏, 葛修润. 岩体初始应力场的遗传算法与有限元联合反演法[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 077—1 080.
- [27] YI Da, CHEN Sheng-hong, GE Xiu-run. A methodology combining genetic algorithm and finite element method for back analysis of initial stress field of rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1 077—1 080.

上接第 1266 页