

断层滑动准则和稳定性评价及构造应力场的反演

宋卫华, 张宏伟

(辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究矿震、突出等动力现象与断层滑动、开采深度的关系, 首先在试验室进行砂岩双剪摩擦试验, 从工程角度出发, 确定砂岩的滑动准则。其次为研究地下岩体的稳定性, 确定构造应力场的分布, 针对地下岩体的赋存特点, 在分析实测应力分布特点的基础上, 通过地质动力区划方法建立地质构造模型, 采用有限元法反演复杂断层扰动下的构造应力场, 计算结果与矿区震源面制分析结果以及原岩应力测量结果取得较好的一致性。计算的高应力区域中心位置位于 I 级断裂的不连续地带, 与地下地震多发地带相对应, 说明构造应力是矿区地震的主要成因。研究表明, 断裂面的失稳滑动是北票矿区地震的主要机制, 构造应力的存在是矿震发生的必要条件, 而矿区开采则是发震的诱导因素, 北票断裂对区域其他次级断裂及其构造应力区起主导和控制作用, 是北票矿区动力现象的动力源。

关键词: 岩石力学; 矿井动力现象; 断层滑动准则; 地质动力区划; 构造应力场

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3740 - 06

ASSESSMENT ON FAULTS SLIDE CRITERION AND STABILITY AND BACK-ANALYSIS OF TECTONIC STRESS FIELD

SONG Weihua, ZHANG Hongwei

(College of Resource and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: For the study of the relationship between the dynamic phenomena in mines such as mine earthquakes, outburst and faults slide, extraction depth, firstly, double shear friction experiments of sandstone have been carried out so as to achieve its slide criterion in engineering aspects. Secondly, in order to study the stability of underground rock and zone of tectonic stress field, based on the analysis of distribution characteristics of initial rock stress measurements, the geology structural model is built according to the feature of underground rock, and tectonic stress field is obtained by back-analysis using finite element method. The calculating results agree well with the analysis result of earthquakes mechanism and the distribution characteristics of the measurements. The high stress regional centers locating at discontinuous zone of I level faults are corresponding to underground earthquakes scene. The study shows that existence of tectonic stress is the major origin and necessary condition of mine earthquakes. The instability sliding of the faults is the main manifest and the mining activity is the leading factor. Beipiao fault has dominated effects on other sub faults and tectonic stress areas and is dynamical fountain of dynamic phenomena in the Beipiao Mines.

Key words: rock mechanics; dynamic phenomena in mines; faults slide criterion; geo-dynamic division; tectonic stress field

收稿日期: 2007 - 06 - 01; **修回日期:** 2007 - 08 - 19

基金项目: 国家重点研究发展规划(973)项目(2005cb221501); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20040147005); 辽宁省教育厅高等学校科研项目计划(2008280)

作者简介: 宋卫华(1980 -), 男, 2008 年于辽宁工程技术大学采矿工程专业获得博士学位, 主要从事矿山压力及其控制和矿井动力灾害防治方面的研究工作。E-mail: ruby727@sohu.com

1 引言

矿震、煤与瓦斯突出等动力现象的发生, 与断裂活动密切相关, 其动力因素是区域构造应力场及其空间分布的非均匀性。自 W. F. Brace^[1]提出断层的黏滑移动可能是浅源地震的一种机制以来, 国内外许多学者^[2~9]对断层从室内到室外, 从摩擦性状、本构方程到诱发地震方面做了大量的研究工作。地应力测量技术和数值模拟方法的发展, 也为研究地下岩体的稳定性以及应力状态提供了比较实用的手段。如 M. D. Zoback 和 H. Stephen^[10]和马云春等^[11]分别利用地应力测量资料和滑动准则讨论内华达试验场的断层和红河断裂的活动性; 黄醒春等^[12]利用断层周边应力场的原位实测进行数值反演。本文针对北票矿区的矿震、构造型冲击和突出的问题, 进行了典型岩石的双剪摩擦试验, 结合试验结果对主要断层的滑动摩擦性状进行分析, 综合其他因素的影响, 确定断层的滑动准则。利用地应力测量结果, 采用多区域耦合有限元法对井田区域构造应力场进行反演, 并对局部构造应力场的变化及断层失稳的情况进行了分析。

2 岩石双剪摩擦试验

2.1 岩石光滑面和粗糙面的双剪摩擦试验

试验所用砂岩取自北票矿区台吉煤矿, 试验设备为小型双剪设备(见图 1)。两侧岩石试件规格为 40 mm×15 mm×40 mm, 中间试件规格为 40 mm×30 mm×50 mm。滑动接触面上的正应力由加载螺杆逐级施加, 剪应力由压力试验机提供。施加一定数值

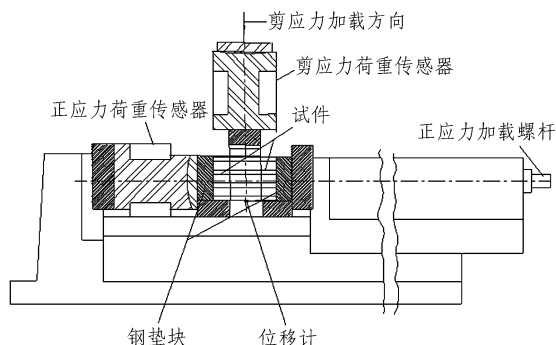


图 1 小型双剪设备示意图

Fig.1 Sketch of small-scaled double shear equipment

的正应力后, 在压力机提供的剪应力作用下, 中间试件向下摩擦滑动, 正应力、剪应力和中间试件的位移分别由应力传感器和位移传感器输入动态电阻应变仪, 再通过 X-Y 函数记录仪输出到记录纸上。

砂岩试件的光滑面在正应力较小时, 首先是稳定滑动, 一定距离(大约 1 mm)后有较小振幅的黏滑振荡, 但很快趋于稳定滑动; 当正应力较大时, 稳定滑动后出现较大振幅的黏滑振荡, 随着黏滑的继续, 黏滑应力降逐渐减小, 最后趋于稳定滑动。将做完光滑面摩擦试验的试件再进行双剪摩擦试验(认为是粗糙面的摩擦试验), 滑动也是由稳定滑动开始的, 伴随滑动的进行出现黏滑振荡, 大体上看, 黏滑应力降比光滑面要大一些, 滑动一定距离后, 黏滑应力降逐渐消失变为稳定滑动。图 2 为砂岩光滑面和粗糙面的最大摩擦滑动准则。

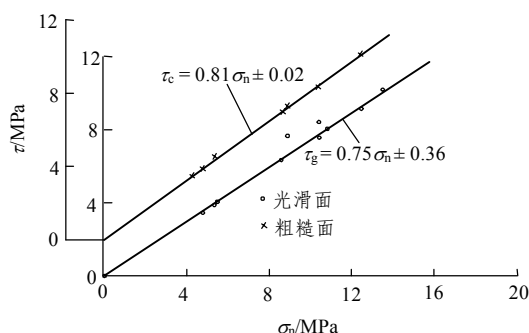


图 2 砂岩光滑面和粗糙面最大摩擦滑动准则

Fig.2 Maximum friction slide criterion for sandstone flat surfaces and rough surfaces

2.2 断层泥对砂岩摩擦性状的影响

在砂岩光滑面之间装入模拟断层泥进行双剪试验, 以研究断层泥对其滑动性状的影响。考虑断层表面性状、断层泥厚度、断层泥粒径的影响, 进行以下 3 组对比试验:

(1) 在断层泥厚度为 0.6 mm, 滑动表面光滑的情况下, 对不同粒径的断层泥进行对比试验, 断层泥粒径分别为: $d \leq 0.125$ mm, 0.250 mm $< d \leq 0.300$ mm。

(2) 在断层泥厚度为 0.8 mm, 粒径为 0.250 mm $< d \leq 0.300$ mm 的条件下, 分别对光滑表面和粗糙表面进行对比试验, 以此来研究滑动表面性状对滑动摩擦的影响。

(3) 在断层泥粒径为 0.250 mm $< d \leq 0.300$ mm 的情况下, 进行断层泥厚度不同的双剪摩擦试验。断层泥的厚度大体为 0.6, 0.8 mm, 图 3 为断层

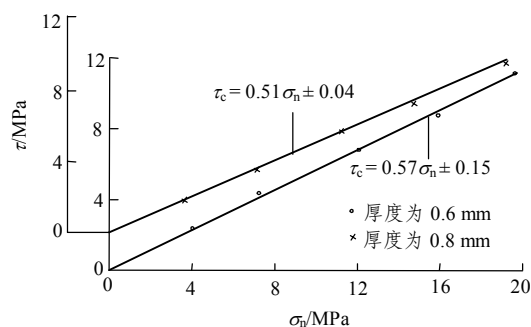


图3 断层泥厚度对砂岩最大摩擦强度的影响

Fig.3 Influence of fault gouge thickness on sandstone maximum friction strength

泥厚度对砂岩最大摩擦强度影响的回归曲线。

3 断层滑动准则的确定

判定天然岩体中不连续面(如断层、断裂)的稳定性,首要的问题是滑动准则(摩擦强度)的选取。由于目前对天然断层深部的情况了解较少,再加上断层周围岩体的复杂性,因此,研究天然断层的滑动特性和准则有一定的困难。目前主要在试验室内进行,大部分讨论都使用由低温条件下得出的、多种岩石平均的 Byerlee^[13]定律:

$$\tau = 0.85\sigma_n \quad (3 \text{ MPa} < \sigma_n < 200 \text{ MPa}) \quad (1a)$$

$$\tau = 50 + 0.6\sigma_n \quad (200 \text{ MPa} \leq \sigma_n < 1700 \text{ MPa}) \quad (1b)$$

C. B. Raleigh 等^[14]在兰吉利油田研究注水诱发地震的试验中,采用 Byerlee 确定的砂岩滑动准则,验证了在试验室得到的断层滑动准则可以用于天然断层。M. D. Zoback 等^[10, 15]在分析美国卡罗来纳州 Monticello 水库蓄水后是否诱发地震时,采用的摩擦因数为 0.6~0.8;在分析内华达试验场地几条断层稳定性时,采用的摩擦因数为 0.6~1.0。张伯崇等^[9]对黄河上游拉瓦西水电站两条断层稳定性分析时,进行了花岗岩和变质灰岩双剪摩擦试验,另外还进行了锯切面和节理面的三轴摩擦试验,最后提出该断层的滑动准则为 $\tau = 0.66\sigma_n$,并认为此准则是断层滑动的下限。在研究三峡水利枢纽工程拦河大坝的稳定性时,进行了花岗岩和灰岩的三轴摩擦试验,提出以 $\tau = 0.65(\sigma_n - P_0)$ 作为地下断层滑动的下限,以 $\tau = 0.85(\sigma_n - P_0)$ 作为平均的滑动准则。结

合前人的研究成果,并根据前面砂岩摩擦试验的结果,提出台吉煤矿断层滑动准则为

$$\tau = (0.62 \sim 0.81)(\sigma_n - P_0) \quad (2)$$

式中: P_0 为孔隙水压力。

4 构造应力场的数值模拟

4.1 计算模型的建立

根据北票矿区井下地应力测量结果(水平最大主应力为 52.43 MPa,方向为 N84°E,最小主应力为 21.27 MPa),得出该矿区存在着构造应力场。按板块学说和地质动力区划理论,在构造应力场作用下,各级板块内岩体应力状态受板块运动和活动断裂赋存状态和活动方式的制约。以地质动力区划法^[16]查明的 I~IV 级活动断裂为计算模型模拟反演计算构造应力场(见图 4)。模型计算时不考虑自重应力引起的弹性变形能,可能释放的只有构造应力引起的弹性变形能,同时略去采动影响。

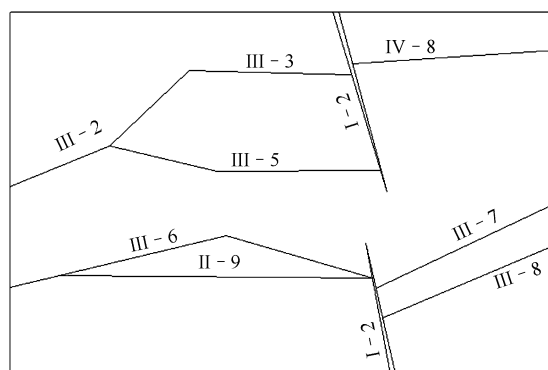


图4 计算模型

Fig.4 Calculation model

4.2 基本参数的确定

4.2.1 岩体和断裂力学参数确定

计算区域内,在一定的应力或位移的边界条件下,所形成的应力场在大小和方向上的分布与区域内岩体的力学性质及分布状态有关,因而,正确地确定计算区域内岩体参数对计算结果产生重要的影响。矿区内共有 5 种区域性岩体。岩体力学参数见表 1。

从地质研究上看,断裂常常表现为一系列规模不等的近于平行的断层,或构造弱化带。从理论上

表 1 各种岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

岩性	$E/(10^4 \text{ MPa})$	μ
孙家湾石灰岩	0.5~0.7	0.23
土城子砾岩	0.3~0.5	0.20
兰旗火成岩	0.5~0.8	0.23
兴隆沟火成岩	0.5~0.7	0.23
煤系地层	0.1~0.2	0.20

讲, 利用高精度仪器, 布设小间距的地球物理探测网可以揭示断裂带的实际宽度, 但对于本文研究断裂(级别低, 规模小), 目前还没有这方面的资料。为此, 根据断裂级别大小和计算上的要求, 并参考其的经验公式 $b = 10 h$ (b 为断裂的影响宽度(m), h 为沿断裂垂直的落差(m))和徐煜坚^[17]对断裂的影响宽度来处理宽度。

4.2.2 边界条件的确定

为了简化计算过程, 模型边界应力视为均匀分布, 计算区域选择尽量大一些, 以减少边界效应的影响。计算时矩形区域的左下角为坐标原点, 在 $X=0$ 和 $Y=0$ 的边界上作用着相应的约束。边界上作用的原岩应力值, 根据矿区实测最大、最小主应力的比值 $52.43/21.27 = 2.4$ (测点为 -700 m 以上)。模型中取外载最大主应力为 100 MPa , 最小主应力为 50 MPa ,

最大主应力方向同实测结果, 为 $N84^\circ E$ 。

4.2.3 断层滑动准则的确定

为研究断层活化与矿震、突出的关系, 在试验室进行岩石双剪摩擦试验, 试验结果见节 2, 3。在构造应力场反演计算中, 未予考虑地下水的影响, 采用 $\tau = 0.69\sigma_n$ 作为断层失稳的准则。

4.2.4 模型可靠性验证

将计算区域内选取为均匀材料参数, 施加均匀载荷, 用该模型计算, 区域内的各种应力分布也应是均匀的。取均质石灰岩体($E = 0.5 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\mu = 0.23$), 无断裂, 最大主应力为 100 MPa , 最小主应力为 50 MPa 。

对输出数据统计分析得出最大主应力落在 $86.00 \sim 104.00 \text{ MPa}$ 区间内为 96.33% , 最小主应力落在 $46.75 \sim 63.15 \text{ MPa}$ 区间内为 97.25% , 计算出的应力波动值主要位于模型边界角点处, 由此本模型是可靠的。

4.3 数值模拟结果及其分析

根据已确定的计算模型建立原始数据文件, 然后通过计算确定测点附近的构造应力场的分布特征。计算过程中, 逐步调整各区域初始应力场参数及各自的力学参数, 直到测点附近计算出的应力值与地应力实测值相符为止。按给定的初始条件和边界条件, 对 $3\,000 \text{ m}$ 垂深的原应力场进行数值计算, 得出最大主应力等值线图(见图 5)和最大剪应力等

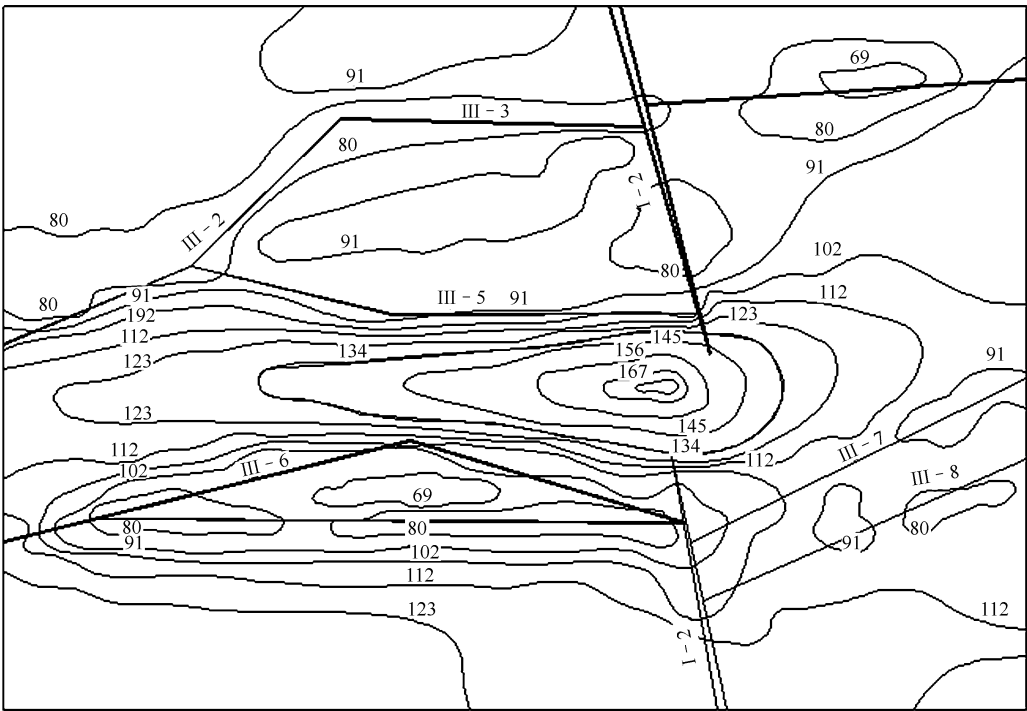


图 5 最大主应力等值线图(单位: MPa)

Fig.5 Isograms of the maximum principal stresses(units: MPa)

值线图及其迹线图。结合数值计算结果,对于 I 级断裂,块断间相对位移的落差大约为 400 m,由此得出影响区可达 4 000 m(见图 6)。断裂的影响区占据着部分台吉和冠山井田,并产生构造应力集中区。

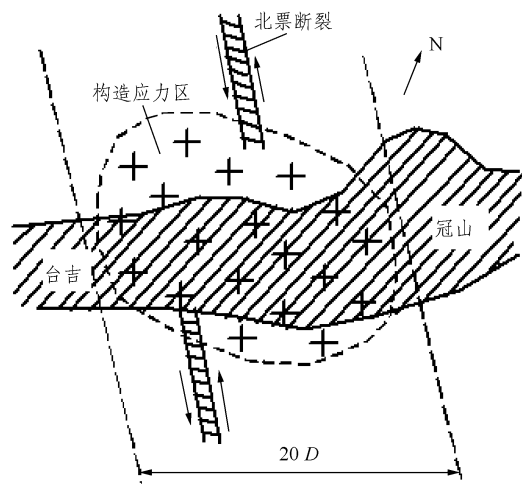


图 6 I 级断裂构造应力区分布

Fig.6 Distribution of level I fault tectonic stress field

矿区内岩体应力分布如下:

(1) 最大主应力迹线呈东西分布,在断裂带附近出现不同的转向,说明北票矿区最大主应力取向近东西,这与地震活动反映的应力场一致。在断裂带附近,视其产状差异而承受不同方式的作用力。

最大主应力等值线总体呈近东西向分布。通过 I 级断裂两个断裂段端点的 123 MPa 等值线,圈定了一个近东西展布和条带状构造应力区,显示出 I 级断裂段的接合部产生了大范围的构造应力区。该构造应力区内最大主应力值变化在 123~165 MPa 之间,平均约为 145 MPa,与岩体的最大主应力 100 MPa 相比,平均应力集中系数为 1.5,为岩体自重应力 γH 的 2.1 倍。应力大于 145 MPa 的地点几乎与 $M_L \geq 2.0$ 级的地震震源位置重合。

(2) 最大剪应力的分布规律与最大主应力的分布规律相同。通过 I 级断裂两个断裂段端点的 38 MPa 等值线,圈定了一个呈东西展布的条带状构造应力区,最大剪应力值约为 60 MPa,平均 50 MPa。这个最大剪应力构造应力区与最大主应力构造应力区重合。最大剪应力大于 50 MPa 的地点几乎与 $M_L \geq 2.0$ 级的地震震源位置重合。最大剪应力迹线在矿区呈 NE 或 NW 取向,在此方位上的断层最易发生滑动。

5 断层稳定性分析

在构造应力区内,处于临界滑动状态的断层,一旦受采动影响,破坏了平衡条件,可能导致断层的滑动,使岩体中聚集的弹性能释放,形成地震。断裂面的失稳滑动是北票矿区地震的主要机制。从最大剪应力及其迹线分布可以看出,在北票矿区的构造应力场中,呈 NE 或 NW 取向的断裂滑动的可能性最大,因为这个方位是最大剪切面方位。

最大剪切面方位、断裂的稳定性和岩石破裂都应根据库仑准则加以判定,断层的滑动条件为

$$\tau_{\max} \geq \tau_0 + \mu_f \sigma_n \quad (3)$$

式中: τ_0 为断面黏结强度, μ_f 为断面摩擦因数, σ_n 为断面正应力。

τ_0 的量级约为几十分之一兆帕,可以忽略。 μ_f 值在一定正应力界限内比较稳定,即不随岩石类型和正应力水平的变化而出现较大波动,对台吉矿的岩石取样试验测定结果 $\mu_f = 0.67$,在最大剪切面 $\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 。因此,对于该矿区的具体条件,在最大剪切面方位断层的滑动准则可以写成如下形式:

$$\tau_{\max} \geq \frac{\mu_f (\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \geq 0.33 (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (4)$$

计算得出,在 I 级断裂端部构造应力区, $\sigma_1 = 145$ MPa, $\sigma_3 = 45$ MPa, $\tau = 50$ MPa。代入式(4)得,摩擦阻力 $\tau_{\max} = 63$ MPa。尽管总体水平 τ_{\max} 高于 τ ,但由于两者水平差异不大,在局部地点就会出现后者大于前者的情况而产生断层的滑动。特别是当断层面充水,存在孔隙流体压力时,将会降低断层面的摩擦阻力,这是触发断层滑动的重要条件。此外在开采水平附近,应力状态的改变,也会造成断层滑动。

6 结 论

矿井动力现象预测的准确性和可靠性,从根本上说取决于对区域应力场和活动断裂的研究水平,查明活动断裂以及确定活动断裂引起的应力集中区是准确预测矿震等矿井动力现象的前提。经过上面的分析计算,得出以下几点结论:

(1) 在 I 级断裂构造应力区, NW 或 NE 取向的断层处于滑动的临界状态,是发生浅源地震的最危险部位。

(2) 矿区内岩体应力计算结果与地应力测量结果取得了较好的一致性。矿区应力以水平方向占主导。

(3) 计算的高应力区域中心位置位于 I 级断裂的不连续地带, 与地下 3 000 m 垂深的地震多发地带相对应, 说明构造应力是矿震的主要成因。

(4) 断裂面的失稳滑动是北票矿区地震的主要机制。北票断裂对区域其他次级断裂及其构造应力区起主导和控制作用, 是北票矿区动力现象的动力源, 现代地质动力过程是引起矿井动力现象危险性升高的主要原因。构造应力的存在是地震发生的必要条件, 而矿区开采则是发生浅源地震的诱导因素。

参考文献(References):

- [1] BRACE W F, BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. Science, 1966, 153: 992 - 999.
- [2] DIETERICH J H. Modeling of rock friction experimental results and constitutive[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B5): 2 168 - 2 173.
- [3] RUINA A L. Slip instability and state variable friction laws[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(B12): 10 359 - 10 370.
- [4] DIETERICH J H. Modeling of rock friction: 1. experimental results and constitutive equations[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B5): 2 161 - 2 168.
- [5] SCHOLZ C H. Earthquakes and friction laws[J]. Nature, 1998, 391(1): 37 - 42.
- [6] 何昌荣. 两种摩擦本构关系的对比研究[J]. 地震地质, 1999, 21(2): 137 - 146.(HE Changrong. Comparing two types of rate and state dependent friction laws[J]. Seismology and Geology, 1999, 21(2): 137 - 146.(in Chinese))
- [7] 何昌荣, 陶青峰, 王泽利. 高温高压条件下辉长岩的摩擦强度及其速率依赖性[J]. 地震地质, 2004, 26(3): 450 - 460.(HE Changrong, TAO Qingfeng, WANG Zeli. Frictional strength and rate dependence of gabbro under elevated temperature and pressure[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(3): 450 - 460.(in Chinese))
- [8] 王泽利, 何昌荣, 周永胜, 等. 断层摩擦试验中的应力状态及摩擦强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4 079 - 4 083.(WANG Zeli, HE Changrong, ZHOU Yongsheng, et al. Stress state and frictional strength obtained with frictional experiments of fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4 079 - 4 083.(in Chinese))
- [9] 张伯崇, 马元春. 岩石摩擦性状的试验和断层滑动准则的讨论[C]// 国家地震局地壳应力研究所. 地壳构造与应力文集(1). 北京: 地震出版社, 1987: 136 - 145.(ZHANG Bochong, MA Yuanchun. The experiments on frictional behaviors rocks and a discussion on criterion of fault slide[C]// Institute of Crustal Dynamics of State Seismological Bureau ed. Proc. of the 1st Crustal Tectonic and Stress(I). Beijing: Earthquake Press, 1987: 136 - 145.(in Chinese))
- [10] ZOBACK M D, STEPHEN H. In site study of the physical mechanisms controlling induced seismicity at Monticello reservoir, south Carolina[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(88): 6 959 - 6 974.
- [11] 马元春, 刘长义, 王福江. 依据滑动准则、原地应力测量讨论红河断裂的北段地震活动性[C]// 国家地震局地壳应力研究所. 地壳构造与应力文集(10). 北京: 地震出版社, 1997: 154 - 161.(MA Yuanchun, LIU Changyi, WANG Fujiang. A discussion on the seismic activity of the northern segment of the Honghe fault in according of the slide criterion and in-situ stresses[C]// Institute of Crustal Dynamics of State Seismological Bureau ed. Proc. of the 10th Crustal Tectonic and Stress(10). Beijing: Earthquake Press, 1997: 154 - 161.(in Chinese))
- [12] 黄醒春, 夏小和, 沈为平. 断层周边应力场的原位实测及数值反演[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(12): 55 - 59.(HUANG Xingchun, XIA Xiaohe, SHEN Weiping. Measurement and back analysis on the initial rock stress field around the faults[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(12): 55 - 59.(in Chinese))
- [13] BYERLEE J D. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116(4 - 5): 615 - 626.
- [14] RALEIGH C B, HEALY J H, BREDEHOEFT J D. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado[J]. Science, 1976, 191: 1 230 - 1 237.
- [15] ZOBACK M D, ZOBACK M L, MOUNT V S, et al. New evidence on the state of stress of the San Andreas fault system[J]. Science, 1976, 238: 1 105 - 1 111.
- [16] 张宏伟. 地质动力区划在煤与瓦斯突出区域预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 621 - 624.(ZHANG Hongwei. Application of geo-dynamic division method in prediction of coal and gas outburst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 621 - 624.(in Chinese))
- [17] 徐煜坚. 华北北部地区地质模型与强震迁移[M]. 北京: 地震出版社, 1985.(XU Yujian. Geological model and earthquake migration in the north area of North China[M]. Beijing: Earthquake Press, 1985.(in Chinese))