文章编号：1000－7598 (2012) 11－3414－05

基于断层擦痕侧伏角公式的构造应力张量反演

何 书[1]，赵 奎[2]，朱 忠[1]，吴开兴[1]

（1. 江西理工大学 资源与环境工程学院，江西 赣州 341000；2. 江西理工大学 工程研究院，江西 赣州 341000）

摘 要：利用 Aleksandrowski 推导的断层擦痕侧伏角公式，提出了一种改进的构造应力张量反演法。根据不同应力比值下构造应力与断层擦痕侧伏角的关系，利用最小二乘法，详细推导了构造应力张量的反演方法，最后利用 Matlab 软件编制程序实现了该计算过程。在此基础上，现场调查了江西武山铜矿北矿带的断层滑动数据，利用上述改进方法反演了该地区的构造应力张量方向特征。将上述反演结果与由震源机制解获得的最新构造应力场结果进行对比分析，并结合研究区断层的展布特征及所在的地质构造背景，获得了该地区自晚侏罗世以来的构造应力场特征，表明该地区构造应力场具有一定的稳定性。改进后的构造应力张量求解过程及工程应用表明，将 Aleksandrowski 的图示法和 Etchecopar 等的反演法结合起来反演构造应力张量，是对已有方法的改进，具有更加简单、实现容易等特点，计算结果比较符合实际。

关 键 词：断层擦痕；侧伏角；反演；武山铜矿；构造应力张量

中图分类号：P 554 **文献标识码：**A

Back analysis of tectonic stress tensor based on the formula for calculating pitch direction of fault slip data

HE Shu[1]，ZHAO Kui[2]，ZHU Zhong[1]，WU Kai-xing[1]

（1. Faculty of Resource and Environmental Engineering, Jangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2. Engineering Institute, Jiangxi Univesity of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China）

Abstract: Based on the formula deduced by Aleksandrowski for calculating pitch direction of fault slip data, an improved method for determination of tectonic stress tensor was put forward. A method for back analysis of tectonic stress field was deduced by least square method based on the relation between tectonic stress with pitch direction of fault slip data in different stress ratio values. At last, the calculating process was deduced by Matlab program. The fault slip data were obtained in the Wushan mining region, Jiangxi province. On this basis, by the improved method of inversion of fault slip data, the parameters of tectonic stress tensor in mine region were determined. The tectonic stress field in this area since Late Jurassic was obtained, by comparing the faults with the average stress field of the region obtained from focal mechanism solutions and studying distribution of the strike-slip faults and the tectonic setting of this area. It is indicated that the tectonic stress field in this area has better stability since Late Jurassic. The progress of solving tectonic stress tensor and the application of the improved method show that, comparing with the graphical instrument method put forward by Aleksandrowski and the method for back analysis by Etchecopar, the method is simple and more feasible, and the focal mechanism solution is reasonable.

Key words: fault slip data; pitch direction; back analysis; Wushan copper mine region; tectonic stress tensor

1 引 言

在脆性变形为主的地区，变形局限于主断层带，利用断层滑动资料可以反演断层所在地区的构造应力张量[1]。自从 Bott 首次提出利用断层擦痕反演应力张量的基本原理以来，利用断层擦痕资料反演构造应力场的方法及其应用在国内外得到了迅猛发展[2－10]。Aleksandrowski 利用 Bott 推导的公式计算出在不同应力比率条件下若干个断层面上擦痕的侧伏角，以此提出了利用断层擦痕资料确定主应力方向的图示方法[11]。张银旗等[11]利用空间解析几何方法证明了 Aleksandrowski 的图示法适用于任何应力状态和各向异性岩石，并能准确的确定主应力方位。在实际应用中，Etchecopar 等[5]提出的演算应力张量

收稿日期：2011-07-27
基金项目：江西省青年科学基金资助项目(No. 2010GQC0049)；国家重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011cb411913)；国家自然科学基金项目(No.51064010)；国家科技支撑计划项目子课题(No. 2008BAB32B03)。
第一作者简介：何书，男，1978 年生，博士，讲师，主要从事岩土体稳定分析及矿山工程地质方面的研究。E-mail:769844918@qq.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的反演技术最为普及，简称 EC 法。EC 法原理较为简单，但计算过程略显复杂。Aleksandrowski 提出的断层擦痕侧伏角公式反映的是侧伏角与应力比值及主应力之间的关系，其目的主要是为了解释图示法求解构造主应力方向的正确性。笔者将应用于图示法的公式与传统反演法的基本原理相结合，利用最小二乘法，将两种方法统一起来，改进了原有反演法的求解过程，使得计算过程更加简单明了，易于实现。在此基础上，通过对江西武山铜矿北矿带断层滑动特征的观测分析，将改进后的反演法应用于该地区的构造应力主方向研究中，并与震源机制解方法获得的现代构造应力场结果进行对比，获得了满意的结果。

2　研究方法及公式推导

2.1　反演法的基本原理

反演法应用的基本前提是，在区域构造应力场作用下, 岩层中已存在或新产生断层的滑动方向与断面上剪切应力方向一致。基于以上前提，该方法利用弹性力学的方法，根据断层面产状计算剪应力方向，然后与断层面上的擦痕方向进行非线性最小二乘法拟合，以求得某一断层在活动时期的 3 个构造主方向和 1 个主应力差之比 R（$(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$）。该方法要求参与计算的擦痕必须是同一期构造应力下形成的。

2.2　基于断层擦痕侧伏角公式的构造应力主方向求解过程

根据弹性力学的相关理论，一点的应力状态可由张量 $\boldsymbol{T}$ 表示，在主应力参考系中张量 $\boldsymbol{T}$ 可表示为

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}\sigma_1 & 0 & 0\\ 0 & \sigma_2 & 0\\ 0 & 0 & \sigma_3\end{bmatrix} \tag{1}$$

应力张量 $\boldsymbol{T}$ 的确定需建立两套坐标系来完成，一套是主应力方向坐标系；另一套是地理坐标系 x, y, z（其中 x 轴正方向为正东方向，y 轴正方向为正北方向，z 轴则朝上）。两套坐标系之间的关系可用 3 个欧拉角（ϕ, θ, φ）（分别表示两套坐标系对应坐标轴的夹角）来表示（见图 1）。

为了探讨断层面上擦痕与主应力之间的关系，在前人研究基础上，Aleksandrowski[11]推导的侧伏角计算公式为

$$\tan\zeta=\frac{n}{lm}\left[m^2-(1-n^2)\frac{\sigma_z-\sigma_x}{\sigma_y-\sigma_x}\right] \tag{2}$$

式中：ζ 为擦痕的侧伏角；σ_x、σ_y 和 σ_z 分别为与坐标轴一致的主应力；l、m 和 n 为在主应力坐标系下断层面法线方向余弦。

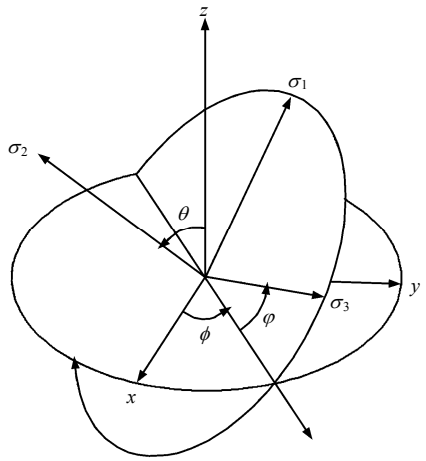

图 1　欧拉角与主应力方向及地理坐标系的关系
Fig.1　The relation between Euler angles and principal stress direction and geographic coordinate system

假设 $\sigma_z=\sigma_2$，$\sigma_y=\sigma_1$，$\sigma_x=\sigma_3$，令 $R=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$，则式（2）可变为

$$\tan\zeta=\frac{n}{lm}\left[m^2-(1-n^2)R\right] \tag{3}$$

在此，若已知一系列同期构造应力场作用下形成的断层面产状及主应力方向，即可通过坐标变换求得式（3）中的 l、m 和 n。由于主应力方向及大小都是未知的，于是式（3）含有 4 个未知数：（ϕ, θ, φ，R）。若要求解这 4 个未知数，必须求解一个非线性方程组，且断层面的个数必须大于等于 4 个。

设在地理坐标系统中断层面都是通过坐标原点的，则倾角为 α，倾向为 β 的断层面的向上单位法线矢量可表示为

$$\hat{n}=(A,B,C) \tag{4}$$

式中：$A=\sin\alpha\sin\beta$，$B=\sin\alpha\cos\beta$，$C=\cos\alpha$

若已知 3 个欧拉角为 ϕ、θ、φ，则断层面在主应力坐标系中的单位法向矢量 $\hat{n}'$ 可由下式求解：

$$\hat{n}'=(l,m,n)=\boldsymbol{K}\cdot(A,B,C) \tag{5}$$

其中 $\boldsymbol{K}$ 为方向余弦矩阵：

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}\cos\varphi & \sin\varphi & 0\\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta & \sin\theta\\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\phi & \sin\phi & 0\\ -\sin\phi & \cos\phi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{6}$$

求解过程中，首先要产生一个随机均匀分布的

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（ϕ, θ, φ，R）4 个未知数的初值，其中ϕ，φ在 0 到 2π 中取值，θ在 0 到π中取值，R在 0 到 1 中取值。然后将这 4 个初值及一系列断层面产状数据代入式（3）中，可得到一个非线性方程组，然后根据数值方法求解。据反演方法的假设，求解该方程组的目的即为求解理论擦痕侧伏角与实际测量的擦痕侧伏角之间的夹角最小。这是一个非线性的最小二乘拟合问题，可表示为

$$\min\frac{1}{2}\| f(\phi,\theta,\varphi,R,\hat{n}_i)-Y_i \|^2 = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}(f(\phi,\theta,\varphi,R,\hat{n}_i)-Y_i)^2 \tag{7}$$

式中：N 为观测擦痕的个数；$\hat{n}_i$ 为第 i 个断层擦痕所在断层面的法线单位矢量；Y_i 为观测擦痕的侧伏角。

函数 $f(\phi,\theta,\varphi,R,n_i)$ 由式（3）求解：

$$f(\phi,\theta,\varphi,R,n_i)=\tan\zeta_i=\frac{n_i}{l_i m_i}\left[m_i^{\,2}-(1-n_i^{\,2})R\right] \tag{8}$$

根据已知的断层擦痕及断层面数据，求解一个非线性最小二乘法拟合问题，可求出 4 个未知数：(ϕ, θ, φ，R)，从而确定主应力方向。以上求解过程可利用 Matlab 软件编制程序完成，其过程较易实现。

3 应用实例

3.1 研究区概况

笔者选取位于江西瑞昌县境内的武山铜矿区，开展了井下断层滑动特征的调查，对相关数据进行了详细测量。武山铜矿区位于九瑞矿田中部，横立山-黄桥向斜东段北翼，据矿体控制因素及空间展布特征，将该矿床以二叠系栖霞阶地层（$P_1q^{1\text{-}2}$）上限为界划分为南、北两个矿带。武山铜矿区自晚白垩世以来，主要发育一系列北北西向断裂，横切矿区北矿带（见图 2）。根据这些断层的平面展布特征及其与地层的切割关系，可推断属于同一期构造作用的结果。现场调查表明，北西向断裂伴随硅质、铁质胶结与破碎构造角砾岩的产出,多为高倾角断层，倾伏角很小，滑动方向近于水平，属于典型的走滑断裂。这些断层横切矿区矿体，研究这些断层所反映的构造应力特征，对矿山采矿巷道布置及其稳定性的分析有着重要意义。

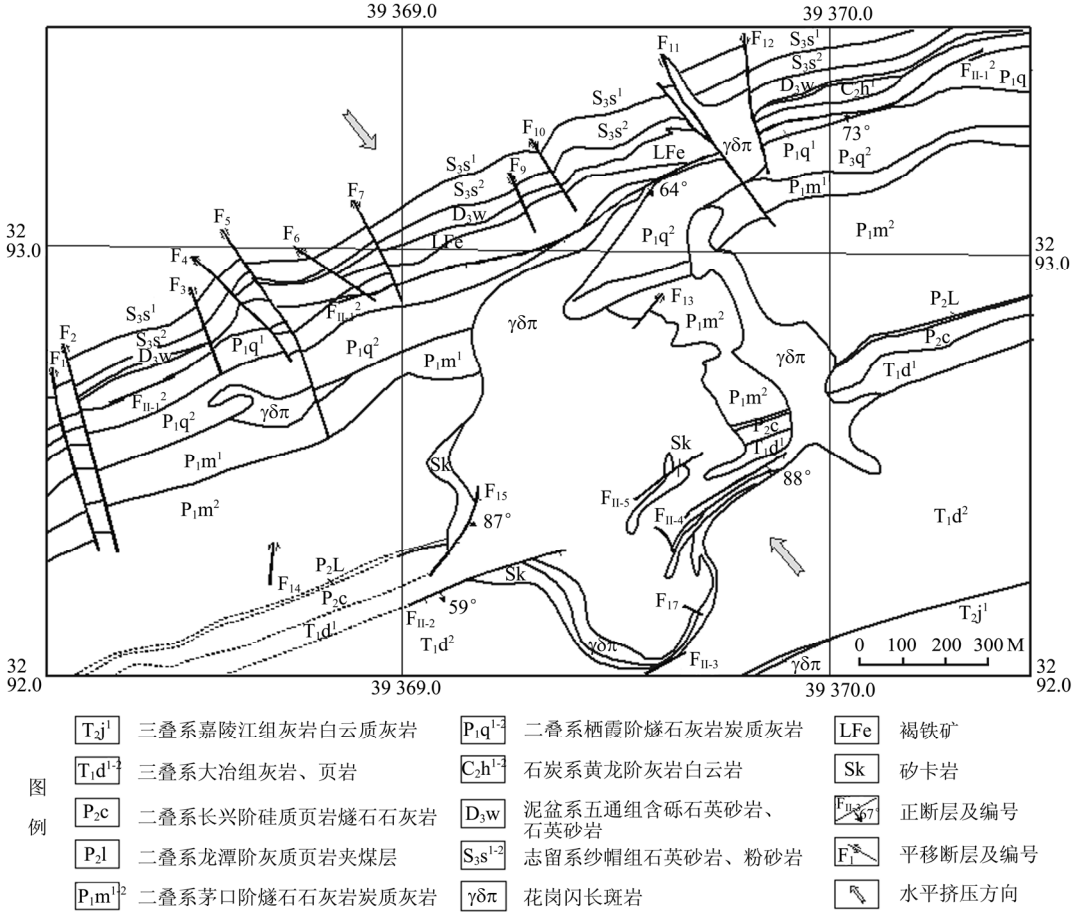

图 2 武山矿区断裂分布图

Fig.2 The distribution of faults in the Wushan mining region

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　断层滑动资料观测及计算结果分析

对矿区北矿带井巷工程揭露的 11 条北北西向断层进行了实地观测（见表 1），获得了反映断层滑动的特征数据。现场调查结果表明，断层擦痕的倾伏向与断层走向近于一致，倾伏角接近于 0，在利用改进的构造应力张量反演方法中，式（7）中的实测擦痕 Y_i 皆等于 0，运算过程变得更加简单。经过反复改变参数，得到了该区的构造应力主方向（见表 2）。计算结果显示，最大主应力倾伏向为 336°；中间主应力的倾伏角为 59°；最小主应力倾伏角仅 2°，方向近于水平。实测走滑断裂发育于横立山-黄桥向斜的北翼，该向斜轴面呈北东-南西向展布，是该地区地层受到北西-南东向水平挤压构造应力作用的结果（见图 2）。将上述计算结果与区域构造水平挤压方向对比分析不难看出，两者具有一定的相似性，说明该区受来自北西-南东向的水平挤压具有持续性的特点。以上分析表明，本区构造应力主方向的计算结果与走滑断裂所在地质构造背景基本吻合，说明反演成果是可信的。

表 1　断层观测数据表

Table 1　The observed data of faults

断层编号	观测位置	断层面产状/(°)			断层性质
		走向	倾向	倾角	
F_1	79 线	350	80	65	走滑
F_2	79 线	345	75	75	走滑
F_3	39 线	345	255	80	走滑
F_4	29 线	310	220	60	走滑
F_5	29 线	333	243	56	走滑
F_6	9 线	305	215	75	走滑
F_7	0 线	325	235	54	走滑
F_9	40 线	335	75	60	走滑
F_{10}	50 线	330	240	65	走滑
F_{11}	80 线	330	60	62	走滑
F_{12}	90-100 线	350	80	72	走滑

表 2　主应力方向计算结果

Table 2　The calculated results of principal stress direction

σ_1		σ_2		σ_3		应力差之比 R
倾伏向/(°)	倾伏角/(°)	倾伏向/(°)	倾伏角/(°)	倾伏向/(°)	倾伏角/(°)	
336	31	160	59	67	2	0.44

3.3　与震源机制解的对比分析

研究区最近的一次地震活动为 2005 年 11 月 26 日发生的九江-瑞昌 5.7 级地震和 4.8 级强余震。王墩等[12]对九江-瑞昌地震的发震构造研究认为，地震活动主要是在近东西向挤压应力场作用下，瑞昌断裂产生右旋逆冲走滑运动，同时牵动引发了与其交汇的北西向武山隐伏断裂的错动，使其产生左旋滑动，两组断裂共轭剪切作用形成了此次地震北西向武山隐伏断裂错动的结果。研究表明，武山铜矿区出露的北北西向断裂与武山深部隐伏断裂密切相关，是隐伏断裂在地壳表层的一种表现。从对地貌的控制来看，断裂在新构造期活动较为明显。因此，这些断层的错动特征与现代构造应力场具有一定联系。根据震源机制解，构造应力场主压应力方向在 287°～297°之间，武山铜矿所在地区现代构造应力场呈现北西-南东向挤压的主要特征。对比震源机制解和依据走滑断裂滑动资料的反演成果，表明两种方法计算的构造应力主方向近于一致，反映了武山铜矿区受北西-南东向挤压的构造应力场特征，表明该区现代构造应力场与古构造应力场之间有着密切的关系。

4　结　论

（1）基于 Aleksandrowski 提出的侧伏角计算公式和最小二乘拟合法，结合 EC 构造应力张量反演的基本原理，提出了改进的构造应力张量反演方法。

（2）在实测武山铜矿区断层滑动资料的基础上，利用改进的反演方法，得出了矿区现代构造应力场的 3 个主应力方向。计算过程表明，改进的反演方法计算过程更加简单，容易实现，计算结果比较符合实际。

（3）将反演结果与最新的震源机制解结果对比分析表明，两种方法计算的构造应力主方向近于一致，表明武山矿区的构造应力场特征具有一定的稳定性，该区现代构造应力场与古构造应力场之间有着密切关系。

参 考 文 献

[1] 吴树仁. 利用断层滑动资料反演构造应力场的方法[J]. 地质科技情报, 1990, 9(3): 95－100.
WU Shu-ren. The inverse techniques of tectonic stress fields using fault slip data[J]. **Geological Science and Technology Information**, 1990, 9(3): 95－100.

[2] BOTT M H P. The mechanism of oblique slip faulting[J]. **Geological Magazine**, 1959, 96(2): 10－14.

[3] ANGELIER J. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population[J].

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Tectonophysics, 1979, (56): 17－26.

[4] ANGELIER J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data[J]. **Journal of Structural Geology**, 1989, 11 (1－2): 37－50.

[5] ETCHECOPAR A, VASSEUR G, DAIGNIERES M. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis[J]. **Journal of Structural Geology**, 1981, 3 (1): 51－65.

[6] 谢富仁, 苏刚, 崔效锋, 等. 滇西南地区现代构造应力场分析[J]. 地震学报, 2001, 23(1): 17－23.
XIE Fu-ren, SU Gang, CUI Xiao-feng, et al. Modern tectonic stress field in southwestern Yunnan, China[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2001, 23(1): 17－23.

[7] 荆振杰, 杜义, 谢富仁. 昆明周边地区活动断层滑动与现代构造应力场[J]. 地震学报, 2008, 30(3): 230－239.
JING Zhen-jie, DU Yi, XIE Fu-ren. Contemporary tectonic stress in Kunming basin and surrounding regions deduced from fault slip in version[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2008, 30(3): 230－239.

[8] 陈正乐, 杨农, 王平安, 等. 江西临川地区相山铀矿田构造应力场分析[J]. 地质通报 2011, 30(4): 514－531.
CHEN Zheng-le, YANG Nong, WANG Ping-an, et al. Analysis of the tectonic stress field in the Xiangshan uranium ore field, Linchuan area, Jiangxi, China[J]. **Geological Bulletin of China**, 2011, 30(4): 514－531.

[9] 司荣军, 王春秋, 程国强. 大安山矿后槽构造应力场数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 1): 167－170.
SI Rong-jun, WANG Chun-qiu, CHENG Guo-qiang. Numerical simulation study of tectonic stress field of Houcao area in Daanshan Coal Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.1): 167－170.

[10] 杨树新, 陈连旺, 谢富仁. 中国大陆现今构造应力场的回归分析研究[J]. 岩土力学, 2003, (增刊 2): 357－360.
YANG Shu-xin, CHEN Lian-wang, XIE Fu-ren. A study of regression analysis and numerical simulation on modern tec-stress field in China mainland[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, (Supp.2): 357－360.

[11] 张银旗, 何绍勋, 段嘉瑞. 根据断层擦痕确定主应力方位理论及方法的探讨[J]. 地质与勘探, 1992, 28(8): 35－42.
ZHANG Yin-qi, HE Shao-xun, DUAN Jia-rui. On the method for determination of principal stress from fault slickenside[J]. **Geology And Prospecting**, 1992, 28 (8): 35－42.

[12] 王墩, 肖和平, 姚运生, 等. 九江-瑞昌地震序列的构造背景与发震构造探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(增刊 1): 15－21.
WANG Dun, XIAO He-ping, YAO Yun-sheng, et al. On seismogenic and its background tectonics of Jiujang-Ruichang seismic sequence[J]. **Journal of Geodesy and Geodynamics**, 2007, 27(Supp.1): 15－21.

上接第 3413 页

[5] DRAKE J L, FRANK R A, ROCHEFORD M A. A simplified method for the prediction of the ground shock loads on buried structures[C]//Proceedings of the First International Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures. Florida: U.S. Air Force Academy, 1983: 191－121.

[6] WESTINE P S, FRIESENHAHN G J. Free-field ground shock pressure from buried detonations in saturated and unsaturated soils[C]//Proceedings of the First International Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures. Florida: U.S. Air Force Academy, 1983: 216－227.

[7] 钱七虎, 王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[8] 张宇, 范华林, 金丰年. 化爆作用下岩石介质自由场应力波拟合方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3043－3047.
ZHANG Yu, FAN Hua-lin, JIN Feng-nian. Weighted least squares fitting of free field equation of rock under chemical explosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 3043－3047.

[9] 王占江, 李孝兰, 戈琳, 等. 花岗岩中化爆的自由场应力波传播规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1827－1831.
WANG Zhan-jiang, LI Xiao-lan, GE Lin, et al. The free-field stress wave propagation of underground chemical explosion in granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1827－1831.

[10] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA nonlinear dynamic analysis of structures[M]. California: Livemore, 1999.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net