

用混合源模型研究矿山地震震源机制*

董积平 张少泉** 张 诚 秦保燕

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文讨论了矿山地震的混合源机制问题, 并根据内源矩张量分解的特点提出了一种较合理的点源混合机制以及拟合求解方法。这相当于利用P波初动振幅进行相对矩张量反演, 对于区分双力偶事件和非双力偶事件是有意义的。在简化情况下, 对1987年发生在门头沟煤矿的15次事件进行了讨论, 发现它们大多属于剪切事件。

关键词: 混合源; 内爆-剪切比; 相对矩张量

1 引言

研究矿山地震震源机理于矿山地震的预防和预报有着十分重要的意义。将地震事件震源特性同某一特定地区的构造条件和采矿条件联系起来, 可以为矿井的设计、采矿的方法和预防措施提供合理的建议。

前人对矿震的类型及其发生机制已进行了广泛的研究。但是矿山地震类型很复杂, 目前似乎没有哪一种机制能够对矿山地震的发生进行圆满的解释。因此, 对于矿山地震的发生机制, 有必要进行进一步的研究。Gibowicz 等人(1977, 1979, 1981)用谱分析方法研究了波兰铜矿和煤矿的4.1—4.6级大矿震, 发现其震源机制解与区域构造应力场作用下的天然构造地震相一致。Spottiswoode 和 McGarr 等人(1975, 1981, 1984)用相同的方法研究了南非金矿的矿震, 也得出了矿山地震和天然地震十分相似的结论。Smith(1974)用复合断层面解的方法研究了美国犹他州东部的矿山微震并探讨了压力轴和张力轴与区域构造应力场的关系, 发现两者符合较好。

值得注意的是, 并非所有的矿山地震都可由双力偶源或剪切源来解释。有关矿山地震震源机制的最新研究结果表明, 除剪切破裂外, 矿山地震还可能有其他的破裂形式。常规的用初动符号确定震源机制的方法存在一定的弊端, 即在观测台站覆盖面不充分时, 有时不能唯一地断定震源的情况。有三种方法可以解决台站不足的问题, 即复合断层面解、振幅资料的利用和矩张量反演。对点源来说, 矩张量反演是最实用、最一般的方法, 它仅需要少而精的波形资料, 就可以对某个事件的震源特性进行求解, 该方法对于区分双力偶事件和非双力偶事件是十分有意义的。本文根据内源矩张量分解的特点讨论了拟合求解方法, 提出了一种较合

* 本文为董积平硕士学位论文
** 国家地震局地球物理研究所, 北京 100081

理的矿山地震的点源混合机制,最后对 1987 年发生在门头沟煤矿的 15 次矿震事件进行了分析讨论。

2 矿山地震的分类

尽管矿震类型的划分方法很多,但将矿山地震大致分为两类已成为国内外矿震专家们的共识。其中一类与采矿有直接关系,是在回采面上发生破裂造成的;另一类与采矿没有直接关系,是离采矿区较远的构造活动造成的。第一类矿震的平均震级较低,一般来说是由采矿率所度量的采矿活动的函数。这类矿震发生在一些地质上的不连续处以及掌子面附近的薄弱区。第二类矿震的平均震级较高,经常发生在距掌子面一段距离处。它们普遍与大的地质构造的不连续有关,具有全地区的整体的性质,其震源特点和地面运动参数跟天然地震非常相似。

Stankiewicz(1989)和 Kijko(1987)分别研究了波兰煤矿和铜矿的矿震发生的时间分布特征,结果显示了矿震随时间呈双峰分布,说明上述对矿震的分类是符合实际的(图 1,图 2)。

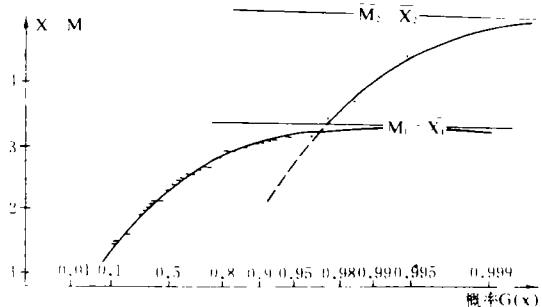


图 1 1972—1980 年波兰 Lubin 铜矿
矿震月分布概率

Fig. 1 Probability distribution of the monthly occurrences of maximum magnitude tremors at the Lubin copper mine, Poland in 1972—1980.

双峰分布要比 Gumbel 分布复杂,来源于由两个不同因素产生的随机变量的交混。第一峰由低能成分决定,第二个峰由高能成分决定,Kijko 就此提出两个模型:

(1)低能微震活动过程和高能微震活动过程彼此无关,即用任何方式进行矿床开采也不会影响构造活动;构造活动在没有进行矿床开采的地方也能发生。

(2)高能微震活动过程取决于低能微震活动过程。采矿产生的应力以低能微震活动的形式释放。

将矿山地震划分为两类是就普遍意义而言的,此外 Hasegawa 等人(1989)还提出了加拿大矿井的六类诱发地震类型(图 3),其中三类为双力偶型,另三类为非双力偶型。

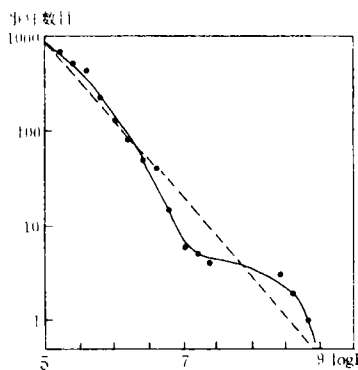


图 2 1978—1985 年波兰 Zabrze 煤矿
矿震数目相对于地震能量对数的关系

Fig. 2 The number of tremors versus the logarithm of seismic energy observed at the Zabrze coal mine, Poland in 1978—1985.

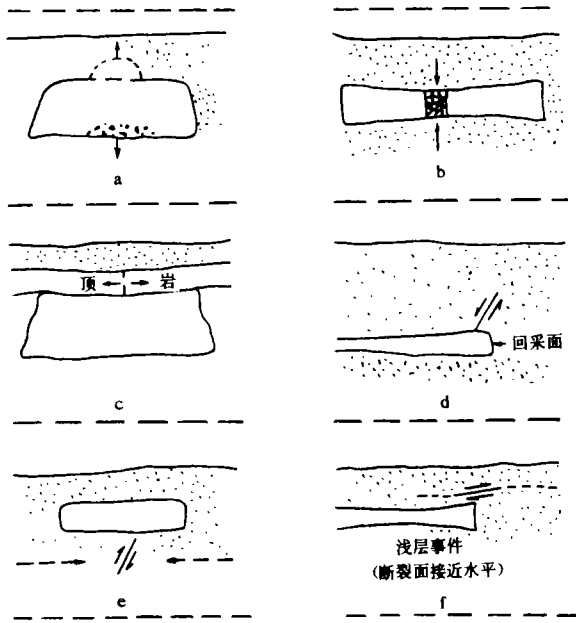


图3 六类矿震简图

a. 洞穴塌陷; b. 矿柱冲击; c. 张破裂;

d. 正断层; e. 逆断层; f. 冲破裂;

Fig. 3 Schematic diagram of six possible ways in which mine-induced tremors can occur.

Sileny(1989)指出,那些大的矿震一般与地质构造有关,属剪切源,而较小的矿震要复杂一些,可能为剪切型的,也可能为非剪切型的(如张裂、内爆等),甚至为剪切型和非剪切型叠加而成的混合源机制。他还提出过一种剪切-内爆模型(1986),并对该模型进行了实验室模拟(图4,图5)。为了模拟岩爆,对应于矿井中的采空区,在压缩区中用一些规则网状的空隙来弱化。将这种模型用于Kladno地区矿震的研究,发现对大约三分之一的震源描述较好。

实际上在此之前就有人提出各种混合源模型。如Droste和Teisseyre(1976)曾提出过单力源和双力偶源相叠加的混合源模型。Teisseyre等人(1975)还提出过类似于图6的共轭剪切源模型以及剪切-张(压)裂模型(1980)。此外象Kozak(1985)、Sileny(1985)、Rudajev(1985)等都分别对剪

切-张(压)裂源的剪切成分和张(压)裂成分做过讨论。

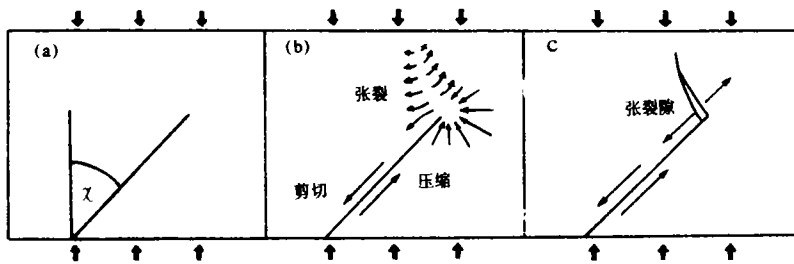


图4 单轴压下构造活动的实验室模拟

Fig. 4 Lab simulation of a tectonic fault under uniaxial compression.

在非剪切成分的产生过程中矿井中的采空区起着至关重要的作用。采空区属岩体内部的自由空间,它不仅破坏了岩体的原始应力平衡状态,使应力重新分布,生成附加载荷,同时它又为被积蓄的潜能释放创造了条件。此外,这种自由空间的形状、大小和位置对矿震的发

生、强度的大小以及震源的特点都有一定的影响。虽然剪切活动过程与其它现象(如塌陷、冲击等)的发生之间关系尚需进一步探讨,但由于采空区的存在,使得它们有时能几乎同时发生。当这种情况发生时哪一种因素占主要成分,若能够将其区分和鉴别,这无疑对震源机理的研究有着很大的意义。

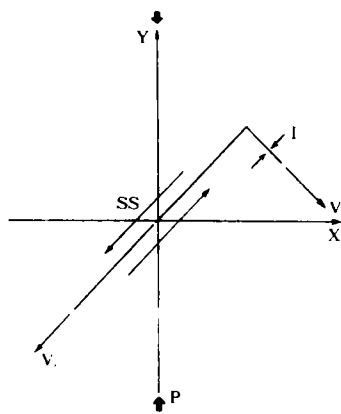


图 5 一种含有剪切-内爆分量的震源模型

Fig. 5 Model of a seismic source with shear and impulsive components.

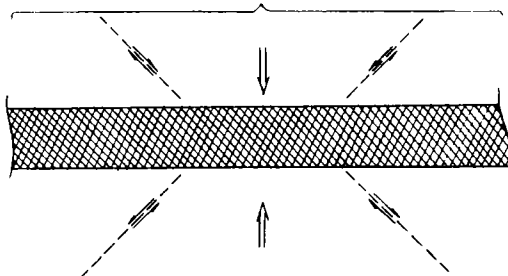


图 6 共轭剪切源模型

Fig. 6 Model of conjugate shear source.

3 矩张量分解*

由于矿震的强度较小,在一般的观测条件下将其视为点源是可行的。在点源近似的情况下,震源可等效地表示为单力项与二阶矩张量之和。二阶矩张量可用矩阵表示如下:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

地震是由于地球介质承受应力的能力骤然降低而发生于地球介质内的一种快速破裂现象,是一种内源,其总合力和总线性矩应为零,这导致单力项的不存在和地震矩张量的对称性,九个元素中只有六个独立分量(图 7)。

在主轴坐标系中,矩张量可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

源的激发可完全由这些正交的偶极源线性组合来描述。

矩张量可普遍分解为:

$$M = \begin{bmatrix} P & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M'_1 & 0 & 0 \\ 0 & M'_2 & 0 \\ 0 & 0 & M'_3 \end{bmatrix} = PI + M' \quad (3)$$

这里 $P = (M_1 + M_2 + M_3)/3$, I 是单位张量,对角矩张量 M' 是纯偏量部分,其本征值为:

* 陈运泰,地震矩张量及其反演.

$$M'_i = M_i - P, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

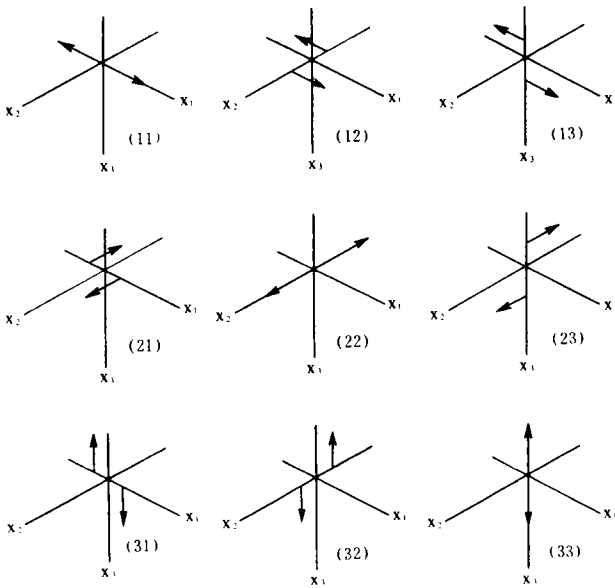


图 7 相应于地震矩张量各分量的等效力

Fig. 7 The equivalent forces corresponding to components of seismic moment tensor.

PI 为膨胀中心,代表矩张量的各向同性部分,其本征值 P 对确定震源体积的改变量是重要的。矩张量的偏量部分可以进一步分解;而且这种分解不唯一,如可分解成三个矢量偶极子,三个补偿线性矢量偶极子,一个最大双力偶和一个最小双力偶等等。

现在我们对这样一种分解进行讨论。设地震矩偏量部分 M' 三个本征值按绝对值大小排列 $|M'_1| \geq |M'_2| \geq |M'_3|$, 并且有 $M'_1 + M'_2 + M'_3 = 0$, 引进一个表示最小主值和最大主值绝对值之比的因子: $F = |M'_3| / |M'_1|$, 则

$$M = P \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + M'_1(1 - 2F) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + M'_1 F \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

注意,这里 $0 \leq F \leq 1/2$ 。因子 F 表示了补偿线性矢量偶极与双力偶的比例关系。当 $F = 0$ 时,偏量部分仅包含双力偶;当 $F = 1/2$,偏量部分仅包含补偿线性矢量偶极(张破裂)。与双力偶相联系的主轴方向是 T 轴和 P 轴的方向,另一方向为 B 轴(零轴)方向。

对某一类地震来说,一般以其中某一分量为主要成分,但也不排除包含其它成分。如天然地震以双力偶为主要成分,核爆炸以膨胀中心为主要成分。对矿山地震,从一般的意义上讲,我们可将其分为三部分:剪切部分、膨胀部分以及非剪切部分(仅对偏量部分而言)。非剪切部分可用补偿线性矢量偶极表示(也是为了以后求解的方便才这样做的)。另外(5)式还可表示为:

$$M = M'_1 W I + M'_1(1 - 2F) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + M'_1 F \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

这里 $W = P / |M'_1|$, 其反映膨胀中心相对于剪切成分的大小。(6)式还可表示为:

$$M = M'_1 \begin{bmatrix} W + 1 & 0 & 0 \\ 0 & F + W - 1 & 0 \\ 0 & 0 & W - F \end{bmatrix} \quad (7)$$

如果我们能求得 W 和 F, 则意味着求到了主轴坐标系下的矩张量的比例关系,即相对

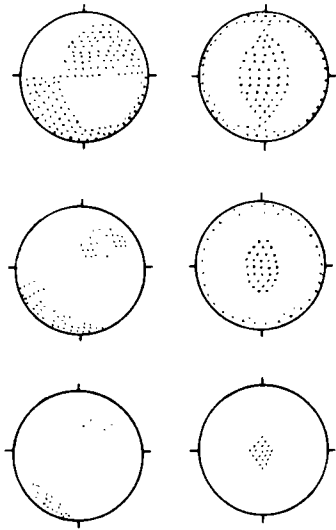


图 8 内爆源和剪切源在各种比例下的叠加情况

Fig. 8 Radiation patterns of P waves generated by combined shear-impulsive sources with w from 0 to -0.2 sequentially.

矩张量。由于 $0 \leq F \leq 1/2$, 习惯上用 $200 \times F\%$ 来表示补偿线性矢量偶极子的相对强度, 用 $100 \times (1 - 2F)\%$ 来表示纯双力偶相对强度, 两者之和为 100% 。

实际上若求得的 W 和 F 相对较高时, 事件是否为剪切型的就值得怀疑了。图 8 显示了 $F=0$ 时, W 从 0 到 20% 之间变化的 P 波初动辐射情况。可以看到, 当 W 等于 20% 时, 初动压缩几乎消失得差不多了(图 8)。

取震源为坐标原点, 建立如图 9 所示的震源坐标系。设均匀介质中某点处地震 P 波位移震幅为 u , 且有 $u = u_s + u_i + u_t$ 。这里 u_s 表示剪切分量, u_i 表示内爆分量, u_t 表示张裂分量。不难证明:

$$\left. \begin{aligned} u_s &\propto \frac{2(1-2F)XY}{r^3} \\ u_i &\propto \frac{3F(X+Y)^2}{2r^3} - \frac{F}{r} \\ u_t &\propto \frac{W}{r} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 $r^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$ 。于是有:

$$u \propto \frac{2(1-2F)XY}{r^3} + \frac{3F(X+Y)^2}{2r^3} + \frac{W-F}{r} \quad (9)$$

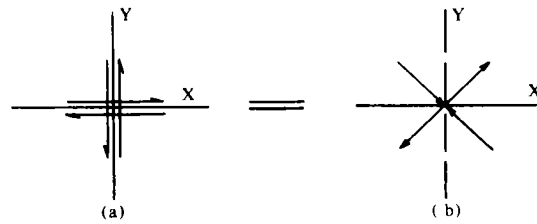


图 9 震源坐标系
Fig. 9 Source coordinate.

我们另取一坐标系, 使原点仍在震源, X 轴向东, Y 轴向北, Z 轴向上, 称之为地理坐标系。令地理坐标系为坐标系 I, 将它绕 Z_1 轴旋转 φ_1 角, 得坐标系 II; 再绕 Y_1 轴旋转 φ_2 角, 得坐标系 III; 再绕 Z_1 轴旋转 φ_3 角, 得坐标系 IV, 如图 10 所示。通过 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 这三个变量, 可使坐标系 IV 在空间取任意方向。如果令震源坐标系为坐标系 IV, 则任一震源坐标系都可由地理坐标系出发, 通过 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 这三个变量得到。一旦得到了震源坐标系, 也就等于得到了震源机制解。因此, 求解地震机制就归结为求解 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 。由图 9 不难看出 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 的意义。如果把 $X_N Y_N$ 平面, 即双力偶所在的平面称为应力面, 则 φ_1 表示应力面的走向, φ_2 表示应力面的倾向和倾角。由 φ_1 和 φ_2 确定了应力面后, 则在此平面内由 φ_3 决定力偶和应力主轴的方向。 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 的取值区间均为 $[0, 180]$ 。

设有某地震台 A, 在坐标系 I(地理坐标系)中的坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) 。当震源位置确定后, 这是已知量。令 A 在坐标系 II、III、IV 中的坐标分别为 (X_2, Y_2, Z_2) 、 (X_3, Y_3, Z_3) 、

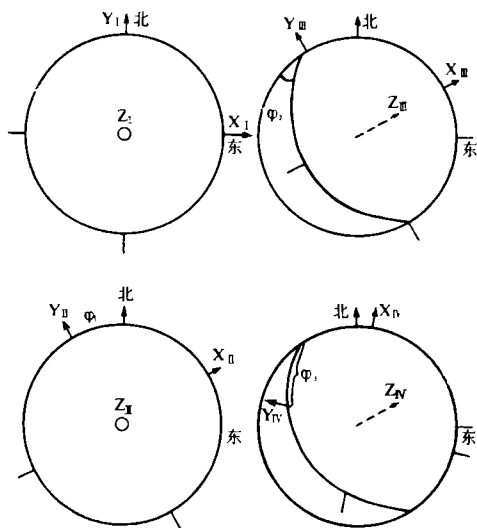


图 10 震源坐标系与地理坐标系变换示意图

Fig. 10 Transform of source coordinate system to geographic coordinate system.

(X_N, Y_N, Z_N) , 则有:

$$\left. \begin{aligned} X_I &= X_I \cos\varphi_1 + Y_I \sin\varphi_1 \\ Y_I &= Y_I \cos\varphi_1 - X_I \sin\varphi_1 \\ Z_I &= Z_I \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} X_{II} &= X_I \cos\varphi_2 - Z_I \sin\varphi_2 \\ Y_{II} &= Y_I \\ Z_{II} &= Z_I \cos\varphi_2 + X_I \sin\varphi_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} X_N &= X_{II} \cos\varphi_3 + Y_{II} \sin\varphi_3 \\ Y_N &= Y_{II} \cos\varphi_3 - X_{II} \sin\varphi_3 \\ Z_N &= Z_{II} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

地震 P 波在台站 A 处的位移振幅为:

$$u \propto \frac{2(1-2F)X_N Y_N}{r^3} + \frac{3F(X_N + Y_N)^2}{2r^3} + \frac{W-F}{r} \quad (13)$$

以后将 X_N, Y_N 表示成 $X(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), Y(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ 或者 X, Y 。

由台站 1 和台站 2 可得:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\frac{2(1-2F)X_2 Y_2}{r_2^3} + \frac{3F(X_2 + Y_2)^2}{2r_2^3} + \frac{W-F}{r_2}}{\frac{2(1-2F)X_1 Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1 + Y_1)^2}{2r_1^3} + \frac{W-F}{r_1}} \quad (14)$$

其中 u_1 是地震初至波在台站 1 处的均匀介质中引起的位移振幅, u_2 是地震初至波在台站 2 处的均匀介质中引起的位移振幅。它们可由各相应台站地震图上记录到的初至波位移振幅分别进行仪器响应和地面影响的校正而得到, 是已知量。

$r_1^2 = X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2$, r_1 是台站 1 至震源的距离;

$r_2^2 = X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2$, r_2 是台站 2 至震源的距离。

由(14)式可得:

$$W = \frac{1}{\frac{1}{r_2} - \frac{u_2}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}} \cdot \left\{ \frac{u_2}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1 Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1 + Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_2 Y_2}{r_2^3} + \frac{3F(X_2 + Y_2)^2}{2r_2^3} - \frac{F}{r_2} \right] \right\} \quad (15)$$

同理, 由台站 1 和台站 3、台站 4、台站 5 以及台站 6 可得:

$$W = \frac{1}{\frac{1}{r_3} - \frac{u_3}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}} \cdot \left\{ \frac{u_3}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1 Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1 + Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_3 Y_3}{r_3^3} + \frac{3F(X_3 + Y_3)^2}{2r_3^3} - \frac{F}{r_3} \right] \right\} \quad (16)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{r_4} - \frac{u_4}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}} \cdot \left\{ \frac{u_4}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_4Y_4}{r_4^3} + \frac{3F(X_4+Y_4)^2}{2r_4^3} - \frac{F}{r_4} \right] \right\} \quad (17)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{r_5} - \frac{u_5}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}} \cdot \left\{ \frac{u_5}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_5Y_5}{r_5^3} + \frac{3F(X_5+Y_5)^2}{2r_5^3} - \frac{F}{r_5} \right] \right\} \quad (18)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{r_6} - \frac{u_6}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}} \cdot \left\{ \frac{u_6}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_6Y_6}{r_6^3} + \frac{3F(X_6+Y_6)^2}{2r_6^3} - \frac{F}{r_6} \right] \right\} \quad (19)$$

令:

$$H = \frac{1}{r_2} - \frac{u_2}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1} \quad (20)$$

$$K(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, F) = \frac{u_2}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_2Y_2}{r_2^3} + \frac{3F(X_2+Y_2)^2}{2r_2^3} - \frac{F}{r_2} \right] \quad (21)$$

则(15)式可写成:

$$W = K/H \quad (22)$$

由(16)式和(22)式得:

$$K\left(\frac{1}{r_3} - \frac{u_3}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H \left\{ \frac{u_3}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_3Y_3}{r_3^3} + \frac{3F(X_3+Y_3)^2}{2r_3^3} - \frac{F}{r_3} \right] \right\} = 0 \quad (23)$$

$$K\left(\frac{1}{r_4} - \frac{u_4}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H \left\{ \frac{u_4}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_4Y_4}{r_4^3} + \frac{3F(X_4+Y_4)^2}{2r_4^3} - \frac{F}{r_4} \right] \right\} = 0 \quad (24)$$

$$K\left(\frac{1}{r_5} - \frac{u_5}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H \left\{ \frac{u_5}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_5Y_5}{r_5^3} + \frac{3F(X_5+Y_5)^2}{2r_5^3} - \frac{F}{r_5} \right] \right\} = 0 \quad (25)$$

$$K\left(\frac{1}{r_6} - \frac{u_6}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H \left\{ \frac{u_6}{u_1} \left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1} \right] - \left[\frac{2(1-2F)X_6Y_6}{r_6^3} + \frac{3F(X_6+Y_6)^2}{2r_6^3} - \frac{F}{r_6} \right] \right\} = 0 \quad (26)$$

在(23)式到(26)式四个方程中,含有四个独立变量 F, φ_1, φ_2 和 φ_3 , 所以可解。由于种种因素的影响,初动位移振幅观测值总是或多或少地偏离于理论值,所以,要直接求这四个变量的严格数学解,比较困难,我们只能求使观测值与理论值符合得最好的解。令

$$K\left(\frac{1}{r_3} - \frac{u_3}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H\left\{\frac{u_3}{u_1}\left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1}\right] - \left[\frac{2(1-2F)X_3Y_3}{r_3^3} + \frac{3F(X_3+Y_3)^2}{2r_3^3} - \frac{F}{r_3}\right]\right\} = S_1(F, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \quad (27)$$

$$K\left(\frac{1}{r_4} - \frac{u_4}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H\left\{\frac{u_4}{u_1}\left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1}\right] - \left[\frac{2(1-2F)X_4Y_4}{r_4^3} + \frac{3F(X_4+Y_4)^2}{2r_4^3} - \frac{F}{r_4}\right]\right\} = S_2(F, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \quad (28)$$

$$K\left(\frac{1}{r_5} - \frac{u_5}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H\left\{\frac{u_5}{u_1}\left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1}\right] - \left[\frac{2(1-2F)X_5Y_5}{r_5^3} + \frac{3F(X_5+Y_5)^2}{2r_5^3} - \frac{F}{r_5}\right]\right\} = S_3(F, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \quad (29)$$

$$K\left(\frac{1}{r_6} - \frac{u_6}{u_1} \cdot \frac{1}{r_1}\right) - H\left\{\frac{u_6}{u_1}\left[\frac{2(1-2F)X_1Y_1}{r_1^3} + \frac{3F(X_1+Y_1)^2}{2r_1^3} - \frac{F}{r_1}\right] - \left[\frac{2(1-2F)X_6Y_6}{r_6^3} + \frac{3F(X_6+Y_6)^2}{2r_6^3} - \frac{F}{r_6}\right]\right\} = S_4(F, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \quad (30)$$

选取 $F_0, \varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{30}$, 使

$$|S_1| + |S_2| + |S_3| + |S_4| = \text{最小值} \quad (31)$$

或者

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 = \text{最小值} \quad (32)$$

则 $F_0, \varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{30}$ 为最合理的解。

将得到的 $F, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 代入(15)式或(16)、(17)、(18)、(19)式,即可得到 W 。

此方法利用六个(至少六个)地震台站初动振幅的相互比值建立五个方程,而每个台只要有一个分向的良好记录即可。对于矿井地下台网,只须进行仪器响应的校正。若各站的仪器特性具有足够好的观测一致性,则仪器特性的细节方面在求每两个台站的位移振幅比时将自行消除。

4 资料的处理

门头沟煤矿使用1984年从波兰引进的SYLOK微震监测系统对矿震进行监测。该系统共有八个拾震仪,它们分布在几百米的深处,监测有效范围为 $4000 \times 6000\text{m}$ 。所记录的波形前段因受噪音干扰和距离震源较近的影响,比较紊乱,无法鉴别P,S波,且绝大多数记录限幅。但P波初动是清楚的。

在上述讨论的方法中,我们取 $F=0$ 的情况,对发生在1987年的15个事件进行了处理。运算时分以下二个步骤进行:先以一定的间隔(如 20°)在 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 的定义域内定下一批采样值作为初值,并逐一在解空间中沿目标函数取极小的方向逐步迭代,最终获得各个相应的

解。由于问题是非线性的,这些不同初值得到的解不尽一致,但是由各相应的目标函数的最终值可判定这些解中有些显然是不可取的。然后在那些可供选择的解域中,再以更小的间隔定出下一批初值,为求得目标函数的全局极小而重复上一步骤的计算过程,最后取出与观测资料拟合最佳,即目标函数取最小值时所对应的模型参量作为我们问题的解答。处理结果如表1所示。

表1 处理震例

发震时间	$\varphi_1(^{\circ})$	$\varphi_2(^{\circ})$	$\varphi_3(^{\circ})$	W	震级
1987-01-28	136.58	93.09	4.3	0.036	2.8
1987-02-21	62.54	93.11	95.05	0.056	1.73
1987-02-25	19.54	94.62	84.64	-0.001	2.8
1987-02-25	70.94	86.56	0.29	0.123	
1987-05-29	165.81	87.52	92.28	-0.002	2.6
1987-06-06	72.41	98.43	104.06	0.3978	2.5
1987-06-20	163.67	89.29	4.58	-0.030	
1987-06-21	159.22	80.66	171.81	0.078	
1987-06-25	154.28	91.86	6.73	0.000	
1987-11-05	151.06	102.6	100.89	-0.132	2.8
1987-11-21	123.66	87.87	6.97	0.030	2.6
1987-11-22	89.51	103.97	37.36	-0.805	2.8
1987-11-24	129.23	93.19	92.5	-0.038	2.7
1987-11-27	166.1	89.47	96.45	-0.001	
1987-11-30	166.34	89.4	96.46	-0.001	2.8

这些事件的震级都不是很大,但从W值看来,它们大多数为剪切事件。 φ_2 的变化也饶有兴趣,在 90° 左右徘徊,即应力面几乎在竖直方向,说明计算是符合实际的。值得注意的是,有几个事件W值偏大,其 φ_2 值与 90° 相差了较远,有可能是冲击型事件。最后两个事件的处理结果几乎相同,震源定位也很接近,一个是(4600, 3200, -340),另一个是(4620, 3190, -340),说明它们属同一构造活动,或者同一断裂的继续。许多资料,诸如矿区构造特征和矿井分布情况等,不大清楚,所以无法对这些结果作进一步讨论。

在处理这些事件资料时,我们令 $F=0$,这相当于一剪切源和一膨胀中心的叠加。但我们看到,结果还是有意义的,且所用台站也少。在对目标函数作反演迭代时,发现方法与参量数和目标函数的性质特征有很大的关系。对 $F \neq 0$ 时的反演迭代方法,尚需进一步探讨。

参考文献

- 1 Slawomir J. Gibowicz. Seismicity induced by mining advances. Geophysics, 1990, 32: 1-73.
- 2 J. Sileny. Possible mechanism of rockburst in coal mines. PAGEOPH, 1986, 124(4/5): 841-855.

- 3 J. Sileny. The mechanism of small mining tremors from amplitude inversion. PAGEOPH, 1989, 129(3/4) : 309—323.
- 4 C. Kisslinger. Procedures for computing focal mechanisms from local(Sv/Pz) data. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(6) : 1719—1729.
- 5 李钦祖. 一个研究小地震机制的方法. 地球物理学报, 1974, 17(3) : 155—164.
- 6 周惠兰. 地震学原理. 北京:地震出版社, 1982.

RESEARCH ON THE MECHANISM OF MINING TREMORS FROM THE COMBINED SOURCE MODEL

Dong Jiping, Zhang Shaoquan*, Zhang Cheng, Qin Baoyan

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

In this paper, the combined mechanism of mining tremors is discussed and a reasonable combined point-source mechanism with its solution is proposed in consideration of decomposition of interior source's moment tensor, that means inversion of relative moment tensor by the use of first motion amplitudes which is valuable for us to distinguish double-couple events and non-double-couple events.

Fifteen tremors observed in Mentougou Mine in 1987 are studied in simplified way, as a result most of them are double-couple events.

Key Words: Combined source; Implosive-shear ratio; Relative moment tensor;
Mining earthquake

* Institute of Geophysics, SSB, Beijing, China