

微地震技术在煤矿安全监测方面的应用

逢焕东¹, 杨永杰², 张兴民², 姜福兴³

(1. 山东科技大学土木与建筑工程学院, 山东青岛 266510;

2. 山东科技大学矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东青岛 266510;

3. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 微地震事件与煤矿井下的岩体破裂情况密切相关, 而岩体破裂与采矿活动又有直接关系。对微地震进行监测可以发现岩体活动剧烈的区域, 以合理的方法指导开采, 预防井下因采矿活动引起的冒顶、垮落等灾害的发生。本文研制了井下微地震监测的仪器设备并进行监测, 根据初至波时间差方法进行了微地震事件的定位, 并在此基础上对安全状况做出合理的判断。基于此, 该技术有很大的推广价值。

关键词: 采矿工程; 微地震; 安全监测; 时差定位; 安全判据

中图分类号: TD325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2008)00-0717-7

Application of micro seismic technique in safety monitoring of mine pit

PANG Huandong¹, YANG Yongjie², ZHANG Xingmin², JIANG Fuxing³

(1. *College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266510;*

2. *Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266510;*

3. *College of Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Science & Technology, Beijing 100083)*

Abstract: Micro seismic (MS) events are closely related to underground rock mass crack, which has a direct relationship with the mining activities. With MS monitoring, the active area in rock mass can be found so as to instruct the mining work and to prevent disasters such as rock fall, collapse and so on. A set of monitoring equipment is developed to monitor MS activities and to locate the MS events by time-delay method, on the basis of which the safety condition is worked out. This method can provide a more rational judgment on the safety status of rock mass. Therefore, the MS monitoring technique is of great value in future.

Key words: mining engineering; micro seismic; safety monitoring; time-delay location; safety criterion

0 引言

矿山采场及巷道围岩破坏前后发生的微地震 (micro seismic, MS), 属于矿体围岩系统在其力学平衡状态被破坏并且释放出大于消耗能量的瞬间震动。每次能量的突然释放均伴随应力平衡状态的破坏, 从物理破坏点 (震源) 向外传播地震波。由于矿井微地震与围岩破坏机制不同, 因此仪器所记录和测得的参数也不同。但是, 它们同是能量释放, 因此岩体破坏与微地震之间必然存在一定的内在关系。倘若在矿区某一区域出现微地震现象, 则只象征着有潜在的岩体破坏危险, 它存在着较大的随机性和复杂性。只有当岩体出现明显破裂后, 才被认为是岩体破坏失稳。岩体失稳破坏发生的内因是岩

基金项目: 矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放基金 (MDPC0609)

作者简介: 逢焕东 (1969—), 男, 副教授, 主要研究方向: 岩体动力学及其安全监测, E-mail: phd2050@163.com

体承受的载荷超过其极限承载能力，而微地震是一个循序渐进的过程。因此，研究岩体压缩破坏过程中的微地震活动特征对于预报岩体破坏失稳、保证矿山安全生产具有重要意义。

对安全问题的高度重视，要求矿井配备先进的自动安全监测系统，改变传统的依靠人工测试、人工判断预报的落后监测方法。目前相关研究已经逐步展开，并成为研究的热点问题之一。

1 地震与矿山岩体破裂

1.1 微地震现象与矿山安全

研究微地震，目的是以此为手段，来判断岩体的内在状况，如微地震震源的位置、性质和岩体破坏的严重程度。因此震源的定位研究成为微地震监测不可缺少的组成部分。震源的定位方法有很多，对于煤矿开采过程中围岩破坏的微地震定位，主要应用二维、三维的时差定位。时差定位是通过对各个微地震信号到达时间差、波速和检波器间距等参数的测量及一定的算法运算来确定震源。

在定位理论的指导下，国内外开发研制了很多微地震定位仪器。例如，蔡美峰等^[1]把微地震监测技术应用于矿山监测中，对老虎台煤矿进行了安全监测和预报；澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)^[2]研制了 Siroseis 系统，用于微地震的监测和定位，取得了比较满意的效果；加拿大 MERCER 等^[3~4]采用统计方法和数值方法计算地应力，综合分析微地震现象和安全的关系，为矿井设计服务。

1.2 微地震信号的特点

微地震信号与天然地震类似，但是其能量要小得多。岩体中微地震波传播规律的研究对于微破裂的准确定位具有重要意义。岩体含有许多节理、裂隙、断层、夹层等缺陷，含水量也不同，所以微地震测量数据具有分散性。但是一般微地震信号时域和频域的波形具有相似性。

由于大量岩体内部缺陷的影响，微地震波会发生反射、折射和散射等复杂情况，信号也随着传播距离而衰减。影响衰减的因素很多，主要有品质因子 Q、岩体内部缺陷的分布和数量、孔洞的分布和数量等。这些地质条件类似于一个天然的滤波器，通常这个滤波器会把高频波过滤掉，低频波通过。与天然地震类似，微地震振幅也随距离逐步衰减，但是近距离衰减得快，远距离衰减得慢一些。不同情况下的噪声背景不同，采用小波滤波方法降噪，可以达到较好的效果。

1.3 检波器布置的要求和方法

利用微地震进行矿山安全监测，根据具体情况，井下微地震监测仪应满足以下基本要求：

- 1) 鉴于井下工作环境，仪器体积不宜太大；
- 2) 采用高性能计算机进行数据采集和处理；
- 3) 防爆、防湿、防尘、防震；
- 4) 井上、井下数据通讯与计算机遥控。

根据上述要求，山东科技大学相关课题组专门自主设计开发了 Comise2002 煤矿井下微地震监测仪，其结构组成如图 1 所示。该仪器结构简单，操作灵巧方便，符合煤矿井下防爆安全要求。

另外，检波器的布置应当考虑以下因素：

- 1) 与定位算法结合，检波器的埋置须覆盖整个监测范围，使得计算过程收敛^[5]；
- 2) 经济、安全、高效，尽可能减少支出；
- 3) 可操作性强，由于检波器是布置在钻孔里面的，所以钻孔深度不能太大，特别是在井下或狭小空间里；

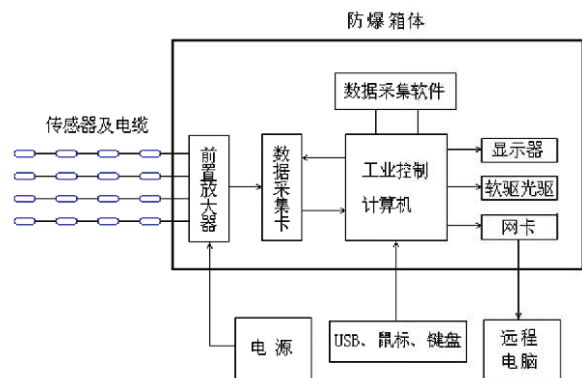


图 1 煤矿井下微地震监测仪的组成
Fig. 1 Composition of MS monitoring instrument underground coal mine

4) 应使布置点所受其它外界因素干扰最小，如各种机械干扰、管缆干扰等。

2 地震事件定位和监测

2.1 微地震时差定位原理

由于纵波 (P 波) 的传播速度较横波 (S 波) 快，且初至时间易于识别，所以采用 P 波定位。假定 P 波以常速度 v 传播， x_i, y_i, z_i, t_i, t 分别是某检波器点的坐标、记录到的 P 波到达时刻和微地震的实际发生时刻，则微地震源与 m 个检波器的走时关系是

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - v(t_i - t) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

第 i 个测点减去第 k 个测点的走时方程

$$\begin{aligned} & 2(x_i - x_k)x + 2(y_i - y_k)y + 2(z_i - z_k)z - 2v^2(t_i - t_k)t \\ & = x_i^2 - x_k^2 + y_i^2 - y_k^2 + z_i^2 - z_k^2 - v^2(t_i^2 - t_k^2) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (2)$$

令 $k=i-1$ ，有

$$\begin{aligned} & 2(x_i - x_{i-1})x + 2(y_i - y_{i-1})y + 2(z_i - z_{i-1})z - 2v^2(t_i - t_{i-1})t \\ & = x_i^2 - x_{i-1}^2 + y_i^2 - y_{i-1}^2 + z_i^2 - z_{i-1}^2 - v^2(t_i^2 - t_{i-1}^2) \quad (i = 2, 3, \dots, m) \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) 以矩阵表示为

$$\mathbf{A}_m \mathbf{x}_n = \mathbf{B}_m \quad (4)$$

这里 $\mathbf{x}_n = [x, y, z, t]'$ 。根据 m, n 的不同，式 (4) 的求解可分为几种情况：

1) $m < n = 4$ 时有无穷解，但是可以求全部二乘解和极小范数最小二乘解。设 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ， $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^m$ ，则式 (4) 的通解是

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^+ \mathbf{B} + (\mathbf{I} - \mathbf{A}^+ \mathbf{A}) \mathbf{Z} \quad (\mathbf{Z} \in \mathbf{R} \text{ 任意}) \quad (5)$$

式中， \mathbf{A}^+ 是 Moore-Penrose 逆。式 (5) 有解的充分必要条件是

$$\mathbf{A}^+ \mathbf{A} \mathbf{b} = \mathbf{b} \quad (\text{或 } \mathbf{A}^+ \mathbf{A} = \mathbf{I}) \quad (6)$$

唯一极小范数解是

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{A}^+ \mathbf{B} \quad (7)$$

2) $m = n = 4$ 时有唯一解

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (8)$$

3) $m > n = 4$ 时是矛盾方程组，可以求得唯一极小范数最小二乘解

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{A}^+ \mathbf{B} \quad (9)$$

另外，2)、3) 两种情况也可以采用正规化求解。此时方程是

$$\mathbf{A}_m \mathbf{x}_n = \mathbf{A}_m \mathbf{B}_m \quad (10)$$

令 $\mathbf{A}_m = \mathbf{C}_m$ ， $\mathbf{A}_m \mathbf{B}_m = \mathbf{D}_n$ ，式 (10) 变为

$$\mathbf{C}_m \mathbf{x}_n = \mathbf{D}_n \quad (11)$$

当有 4 个以上检波器监测到微地震信号时，就可以得到定位解

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{C}_m^{-1} \mathbf{D}_n \quad (12)$$

2.2 微地震监测系统布置及监测结果

采用山东科技大学自主研制的 Comise2002 煤矿井下微地震监测仪对华丰煤矿 1409、1609 和 1610 工作面覆岩断裂破坏进行监测。将观测系统布置在 1609 中和 1610 中工作面停采线前后的 200 m 范围内，实施监测的工作面走向总长度约 400 m。

1409、1609 和 1610 工作面开采条件为：工作面倾斜长度为 150~200 m，走向长 2 000~2 100 m；煤层厚度为 6.0~7.3 m，其中开采高度为 2.0 m，放煤厚度为 4.0~5.3 m；地面标高 +110~+130 m。共布置 4 个倾斜钻孔，在巷道内向上钻进，钻孔名分别称为 A、B、C、D，其中 A、C、D 三个钻孔的孔径为 108 mm，B 孔的孔径为 98 mm。每个钻孔设计安装三个三分量检波器，间距 30 m。为提高观测效果及可靠性，沿巷道壁布置 3 串巷道检波器，用于辅助定位，巷道检波器直接固定在巷道壁上。钻孔及巷道检波器平面位置如图 2 所示。

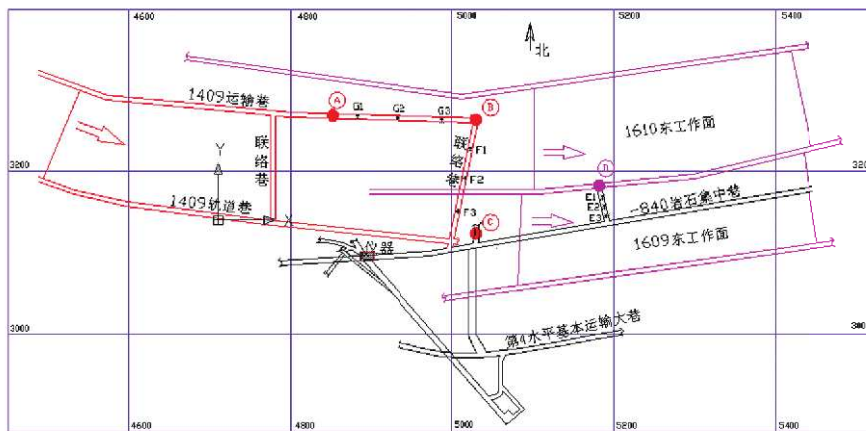


图 2 华丰煤矿井下微地震监测系统布置图

Fig. 2 Layout plan of MS monitoring system in Huafeng Colliery

井下监测从 2004 年 11 月 1 日开始，到 12 月 31 日结束，其间每天均记录了大量有效的微地震事件，一般每天 50~200 个，典型的微地震事件如图 3 所示。

根据线性方程定位原理输入微地震监测的坐标和时差参数，可以得到相应的微地震事件的定位结果。

图 4、图 5、图 6 分别是 11 月 15 日、12 月 18 日、12 月 27 日的定位结果，分别对应着 3 个工作面上监测到的 99、235、128 个微地震事件。为显示方便，采用了局部坐标。Y 轴附近为开采扰动区域。可见，在其附近发生的微地震事件最为密集。微地震事件连续贯通，则意味着断裂带的产生。单独的微地震事件并不表示已经发生了岩体破裂。可以看出，破裂集中在工作面上方小于 100 m 的范围内，但是其扰动范围可以达到几百米，其它方向的微地震事件很少。因此，微地震事件的定位结果可以揭示采动后上覆岩层的运动情况。微地震事件主要集中在采场直接顶和老顶范围内，显示该区域岩体活动剧烈，与煤层开采后顶板运动规律相吻合。另外，依据微地震事件与“三带”的关系，可以用微地震事件的稠密程度揭示“三带”的范围以及进行安全预报。

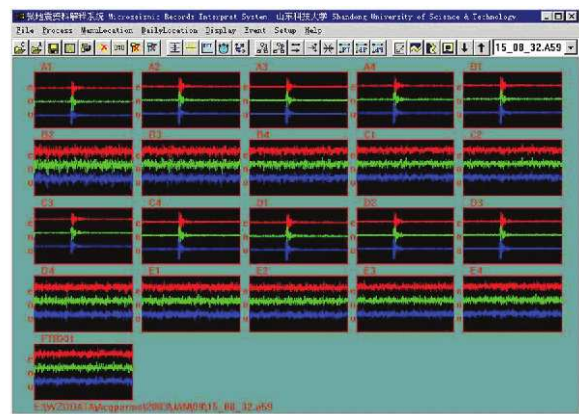


图 3 煤矿井下记录的微地震事件

Fig. 3 Recorded MS events underground coal mine

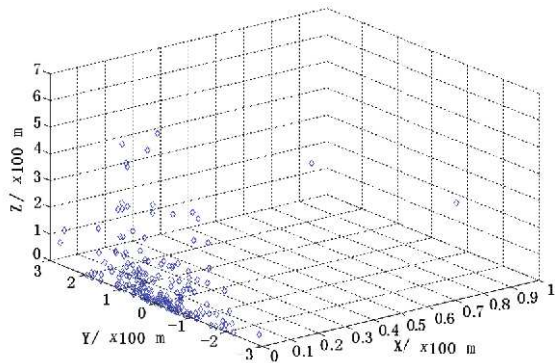


图4 1409工作面微地震事件的定位结果
Fig.4 Location result of MS events in 1409 coal face

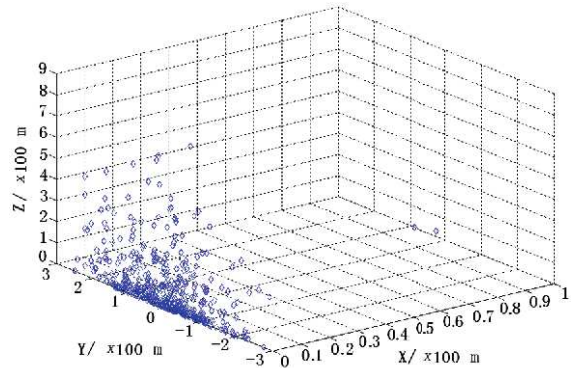


图5 1610工作面微地震事件的定位结果
Fig.5 Location result of MS events in 1610 coal face

3 采场覆岩破坏失稳的微地震预报

3.1 作为预报指标的微地震参数

一般认为，随着时间的推移，微地震事件在空间趋于集中，岩体破裂的危险性越大；反之如果微地震事件在空间趋于分散，则危险性越小。可以用下面3个考虑时间因素^[6]的微地震参数作为预报指标。

1) MS事件的距离差分。此参数用于衡量微地震事件的相互接近程度，按下式计算：

① 首先根据监测时间差求取顺序发生的微地震事件的三维定位坐标

$$P_i(x_i, y_i, z_i), P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$$

② 计算彼此相邻发生的微地震事件之间的距离

$$d_i = [(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2]^{1/2} \quad (13)$$

③ 记前后相邻微地震事件距离的 k 阶差分

$$\begin{aligned} X_k &= d_{k+1} - d_k \\ Y_k &= X_{k+1} - X_k \\ Z_k &= Y_{k+1} - Y_k \\ W_k &= Z_{k+1} - Z_k \end{aligned} \quad (14)$$

④ 计算并且判断差分结果是否有下降的趋势。若有表示破裂趋于集中，很可能会发生失稳破坏。

2) MS事件的能量差分。一般情况下，发生地质灾害之前，微地震事件所释放的能量会有明显的变化，微地震事件的能量差分就反映了这种变化。把该变化提取出来进行分析，就可以预测失稳是否可能产生。计算方法是：

① 先根据监测结果得到微地震事件随时间变化的波形；

② 计算波形曲线下与时间横轴间的面积，得到一系列微地震事件的能量；

③ 类似式 (14)，同样可得到微地震事件能量 E 的 k 阶差分；

④ 计算并且判断差分是否有上升的趋势。大多数情况下地质灾害发生之前，微地震事件所释放的能量会有明显增加。

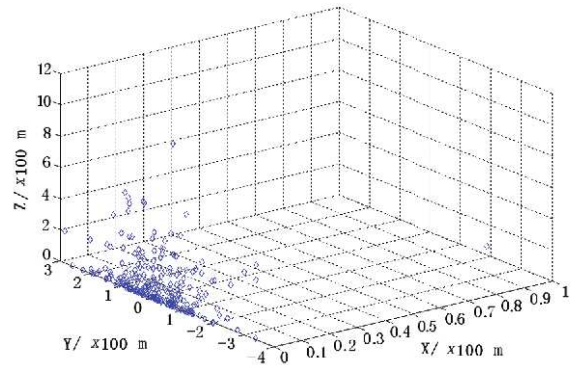


图6 1609工作面微地震事件的定位结果
Fig.6 Location result of MS events in 1609 coal face

3) MS事件频数差分。在某一监测时期内,按照一定的时间间隔统计该段时间的微地震事件,得到一个时间序列,即微地震事件的频数。发生地质灾害前,由于该范围内地质运动非常活跃,所以微地震事件的频数会有明显地变化,微地震事件频数的差分就反映了这种变化,该参数也可以作为衡量地质灾害是否发生的重要指标。计算方法是:

① 根据总监测时期确定适当的时间间隔,这些时间间隔应当长度相同。根据监测结果计算先后时间段内微地震事件各自的频数 N_i ;

② 同样类似式(14),可得到微地震事件频数 N 的 k 阶差分;

③ 计算并且判断差分结果是否有上升的趋势。大多数情况下岩体破裂发生之前,微地震事件频数会明显地增加。

3.2 微地震的安全预报

如果用 s 表示安全的度量,系数为 1 表示安全,0 表示破坏,则安全与距离、能量和频数的关系可表示为

$$s = \alpha/\Delta d + \beta \cdot \Delta E + \gamma \cdot \Delta N \tag{15}$$

α, β, γ 是权重系数,根据实际经验证实,安全与能量释放的关系更为密切,所以这里 α, β, γ 分别取 0.2, 0.5, 0.3。 $\Delta d, \Delta E, \Delta N$ 分别是距离、能量和频数的 1 阶差分。对 s 在 0~1 之间做归一化处理,表示即将发生失稳破坏的危险程度。 s 越来越小,表示安全状况劣化。为找到岩体微地震规律与岩体失稳活动的规律,对三个工作面直接顶板垮落前的观测数据进行了分析。利用式(15)代入相应的 $\Delta d, \Delta E, \Delta N$ 值计算,得到了 s 值。

比较图 4、图 5、图 6 和图 7、图 8、图 9,发现微地震是产生岩体失稳的必要条件而非充分条件,即岩体破坏失稳必定伴随微地震发生,但是微地震的发生不一定预示着岩体的破坏失稳。这也是用微地震预报岩体破坏失稳的主要困难所在。对应于本

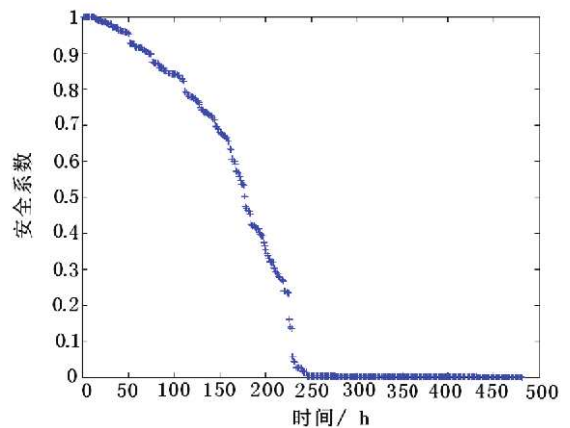


图 7 1409 工作面直接顶垮落时微地震的安全系数变化
Fig. 7 Parameters variation of MS events before immediate roof fall in 1409 coal face

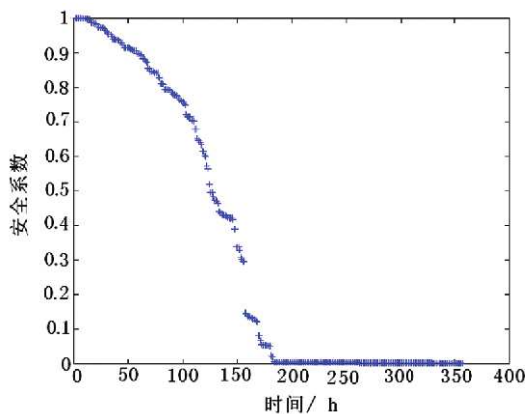


图 8 1610 工作面直接顶垮落时微地震的安全系数变化
Fig. 8 Parameters variation of MS events before immediate roof fall in 1610 coal face

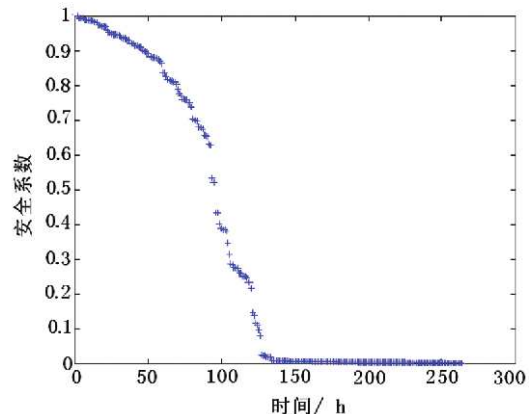


图 9 1609 工作面直接顶垮落时微地震的安全系数变化
Fig. 9 Parameters variation of MS events before immediate roof fall in 1609 coal face

次实验的监测时间，如果以 $s=0.5$ 计算，三个工作面直接顶保持未失稳状态的预报时间分别是 160 h、130 h、90 h，而实际破坏时间分别是 240 h、190 h、125 h，这样可以赢得几天的时间，对于安全预防工作意义重大。实际上，微地震的变化距离、能量、频数的一到三阶差分基本都能够显示微地震事件的变化规律，其预报效果接近，实际工作中只选其一即可。

4 结论

微地震监测事件直接反映井下围岩破裂情况，据此总结出的微地震特征和规律与采矿活动直接相关，微地震监测结果可以指导合理开采，预防井下因采矿引起的地质灾害发生。微地震事件震源位置特征实用性和指导性更大，根据微地震监测结果可以总结分析多种特征信息，综合解释采矿地质现象，解决采矿过程中的岩体破裂问题。在矿山利用井下微地震监测技术，将微地震定位、有限元、可视化等多种方法结合起来预测岩体破裂，是一项创新性的探索工作。虽然还有许多问题需要解决，但同其它监测方法相比，具有许多优点。对加强中国煤矿的监测、开发井下自动化和可视化的微地震监测系统及提高煤矿的生产安全都有重要意义。该技术必将得到广泛的应用。

致谢

在此对华丰煤矿技术科的工程师和山东科技大学矿山灾害预防控制教育部重点建设实验室老师们热情帮助与支持深表感谢！

[参考文献] (References)

- [1] CAI M F, JI H G, WANG J A. Study of the time-space-strength relation for mining seismicity at Laohutai coal mine and its prediction[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005(42): 145~151.
- [2] 张兴民, 于克君, 席京德, 等. 微地震技术在煤矿两带监测领域的研究与应用[J]. *煤炭学报*, 2000, 25 (6): 566~570.
ZHANG X M, YU K J, XI J D, et al. The research and application of microseismic technology in mine fractured and caving zones monitoring[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(6): 566~570. (in Chinese)
- [3] MERCER R A, BAWDEN W F. A statistical approach for the integrated analysis of mine-induced seismicity and numerical stress estimates, a case study-Part I: developing the relations[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005(42): 47~72.
- [4] MERCER R A, BAWDEN W F. A statistical approach for the integrated analysis of mine induced seismicity and numerical stress estimates, a case study-Part II: evaluation of the relations[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005(42): 73~94.
- [5] 逢焕东, 姜福兴, 张兴民. 微地震的线性方程定位求解及其病态处理[J]. *岩土力学*, 2004, 25 (增): 60~62.
PANG H D, JIANG F X, ZHANG X M. Resolution of MS linear locating equations and its ill-state treatment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Suppl.): 60~62. (in Chinese)
- [6] 逢焕东, 姜福兴, 张兴民. 数学实验揭示的岩体声发射参数变化[J]. *防灾减灾工程学报*, 2004, 24 (2): 158~161.
PANG H D, JIANG F X, ZHANG X M. Parameter variation of rock mass' acoustic emission revealed by mathematical experiment[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineerin*, 2004, 24(2): 158~161. (in Chinese)