

煤岩灾害动力现象危险性预测中的定向定位研究

肖红飞¹, 何学秋², 冯涛¹, 王恩元²

- (1. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201;
2. 中国矿业大学能源科学与技术学院, 江苏徐州 221008)

[摘要] 为了更好地应用非接触电磁辐射方法预测预报煤岩灾害动力现象的危险性, 借助于力电耦合方程计算出在天线的各个朝向电磁辐射信号的变化规律及对某一个固定监测点结果的比较, 就可以确定出某一个监测点电磁辐射信号的最佳监测方向以及应力变化最大(即危险性最大)的方向; 在巷道掘进过程中进行巷道迎头电磁辐射动态监测时, 天线测定的位置应该放置在巷道高度方向的中部, 并对着煤层层理方向, 通过不断改变天线朝向来监测巷道迎头和两帮煤岩层的突出危险性; 可以通过应力场数值模拟得出的应力集中区来确定有效预测距离的范围。现场电磁辐射信号测定结果表明, 利用力电耦合研究煤岩灾害动力现象危险性预测中危险区域的定向定位是可行的。

[关键词] 煤岩动力灾害; 危险性预测; 定向定位; 煤岩变形破裂; 力电耦合; 电磁辐射(EME)

[中图分类号] TD713.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)11-0081-06

研究发现, 在煤岩变形破坏过程中有电磁辐射产生, 电磁辐射技术可以有效预测预报煤岩灾害动力现象, 并且可以实现非接触式预测^[1-8]。但是利用煤岩变形破裂电磁辐射对煤岩灾害动力现象的定位监测还缺乏深入的理论研究。定位定向技术在通讯、军事等领域有着广泛的应用, 众多学者对此进行了许多研究, 并取得了较好的成果^[9,10]。但是这些定位定向有一个共同的特点, 就是电磁辐射的频率和发射的功率是可以控制的, 因而可以发射一定频率的电磁波, 通过对接收的反射波进行分析和数据处理, 从而达到定位和定向的目的。而煤岩变形破裂过程产生的电磁波频率和强度是一个随着时间变化的动态过程, 其变化的大小和频度反映了煤岩的动态变形破坏程度, 也就是反映了煤岩动力灾害的危险性, 并且其电磁辐射源分布很广, 因此利用监测到的信号直接对煤岩变形破坏产生的电磁辐射源进行定位和定向是非常困难的。

采用电磁辐射方法的目的能够达到准确、方

便、快捷地预测预报煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩灾害动力现象而不影响现场生产。利用数值模拟的方法来间接研究煤岩变形破裂电磁辐射产生、传播和接收过程的最终目的, 也是为了将此项技术更好地应用于解决现场实际问题, 并初步实现煤岩变形破裂电磁辐射的定向定位。通过煤岩变形破裂电磁辐射与应力耦合规律的研究, 可以对巷道掘进过程产生的电磁辐射信号变化规律进行有效模拟, 并可据此合理确定电磁辐射信号监测的方向、位置, 即可初步实现煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩灾害动力现象危险性预测中危险区域的定向和定位。

1 基于煤岩变形破裂力电耦合研究的定向定位技术

1.1 实验与力电耦合研究

由于电磁辐射与煤岩变形破裂有关, 与煤岩受压下内部损伤过程有关, 因此可以引入损伤理论来研究应力场与电磁场的耦合关系。笔者在文献[11]

[收稿日期] 2004-12-28; **修回日期** 2005-07-18

[基金项目] 湖南省自然科学基金资助项目(05JJ30081); 国家安全生产科技发展计划资助项目(04-232); 湖南省科技攻关资助项目(03JTY2005); 国家自然科学基金资助项目(50204010)

[作者简介] 肖红飞(1971-), 男, 湖南邵阳市人, 博士, 湖南科技大学教授, 硕士生导师

中利用煤岩材料损伤特性和强度统计理论,研究了受载煤岩变形破裂的三维力电耦合本构关系,分析了煤岩变形破裂过程中电磁辐射强度和脉冲数与加载应力之间的关系,认为它们之间可以用多项式来表征,如式(1),(2)。

在应力变化 $\Delta\sigma = \sigma_1(2) - \sigma_1(1)$ 很小时,电磁辐射脉冲数与最大主应力与最小主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 之间是非线性的关系,可以看作 n 次多项式关系,

$$N = a_n \Delta\sigma^n + a_{n-1} \Delta\sigma^{n-1} + \dots + a_1 \Delta\sigma + a_0 \quad (1)$$

用加载应力或应力变化 n 次多项式表示的瞬间电磁辐射强度关系式为:

$$E_m = f(\sigma) = b_n \Delta\sigma^n + b_{n-1} \Delta\sigma^{n-1} + \dots + b_1 \Delta\sigma + b_0 \quad (2)$$

实验研究是在采煤工作面和掘进巷道提取煤岩样品,在中国矿业大学岩层控制中心实验室加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的原煤和型煤两种标准试件。然后利用高精度能控制加载速度及调节油压的伺服机和声发射、电磁辐射测定系统对不同矿区(徐州权台矿、兖州东滩矿、淮南潘三矿等)、不同类型(原煤、型煤)的煤岩样品在单轴压缩变形破裂过程中产生的电磁辐射信号进行了测定,测定结果示如图1。从图1可见,煤岩破裂前即达到应力峰值前电磁辐射幅值与与加载时间呈现正相关的关系。从表1可以看出电磁辐射的幅值(mV)与轴向应力(MPa)之间为三次多项式关系,其相关系数均在0.9以上,说明它们之间的相关性非常好,这与理论分析结果是相吻合的。

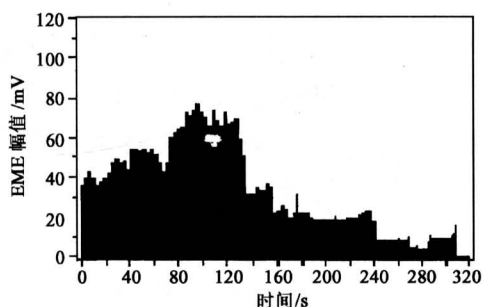


图1 EME幅值与加载时间的关系(实验结果)

Fig.1 EME strength vs loading time (experimental result)

考虑到电磁辐射信号在煤岩介质中传播时的衰减,力电耦合计算时采用如下实验拟合方程式:

$$E = E_m e^{j\omega t} e^{-\gamma r} = (a\sigma^3 + b\sigma^2 + c\sigma + d) e^{-\alpha r} e^{j(\omega t - \beta r)} \quad (3)$$

式中, E_m 为电磁辐射源的幅值; σ 为电磁辐射源所在微元体所受的轴向应力; a, b, c, d ——实验常数; E 为实际监测到的电磁辐射信号幅值; α 为衰减系数, β 为相位常数。

表1 电磁辐射幅值(y)和轴向应力(x)关系的拟合方程

Table 1 Fitting equations of EME strength vs axial stress

样品	拟合方程式	相关系数 R^2
权台1#	$y = -0.0093x^3 + 0.4273x^2 - 1.8869x + 33.556$	0.9546
权台2#	$y = -0.0029x^3 + 0.0379x^2 + 2.1787x + 18.565$	0.9670
权台3#	$y = 0.0045x^3 - 0.1358x^2 + 2.4442x + 18.848$	0.9606
东滩1#	$y = 0.0063x^3 + 0.0246x^2 + 0.2494x + 9.4737$	0.9472
东滩2#	$y = 0.0167x^3 - 0.2836x^2 + 1.9758x + 11.384$	0.9153
义马1#	$y = 0.0012x^3 + 0.0313x^2 + 0.5400x + 8.5449$	0.9557

力电耦合计算首先是通过FLAC软件对巷道掘进煤岩变形破裂过程内部应力的变化规律进行数值模拟,提取模型各个单元在不同模拟条件下的应力值,利用前述的力电耦合方程式(3)求出电磁辐射信号的变化规律。图2为EME在巷道掘进方向的分布,发现与煤岩内部应力分布规律是一致的,从而也揭示了EME因煤岩内部应力变化而产生的机理。

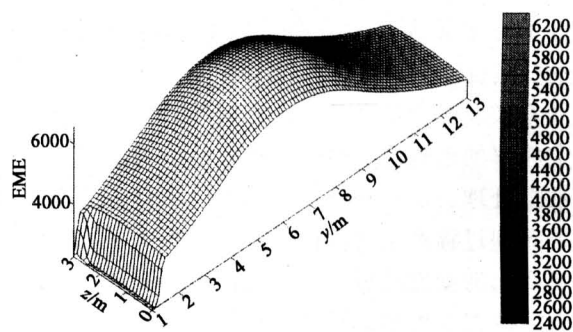


图2 EME信号在巷道掘进方向的分布

Fig.2 EME distribution along excavation direction

1.2 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪简介

煤岩体在受到外力的作用下均会产生变形破裂,从而产生电磁辐射和声发射等一系列的能量释放现象,因此通过电磁辐射或声发射信号监测,可

有效预测预报煤岩破裂后引起的煤岩动力灾害现象。煤岩变形破裂电磁辐射现象的研究及监测仪器的研制,主要是通过测定工作面前方的电磁辐射脉冲数来评价冲击矿压与煤和瓦斯突出危险性。煤炭科学研究总院重庆分院的马超群等研制了 MMT-92 型煤与瓦斯突出危险探测仪^[12],测定指标是电磁辐射的脉冲数,根据脉冲数的高低来预测工作面突出危险性。但缺点是测定参数只有电磁辐射脉冲数指标且测定的只是单一频率,这与实际煤岩体变形破裂过程电磁辐射参数的特征是不符合的,因而导致其判定结果的不准确性,使其应用受到一定的限制。

KBD-5 矿用本安型电磁辐射监测仪是中国矿业大学根据对受载煤岩电磁辐射特征的研究而设计制造的,可用于煤矿井下预测预报冲击矿压、煤与瓦斯突出等煤岩灾害动力现象,以及用于工作面前方应力状态的监测,也可以对金属矿山岩爆危险性以及混凝土构造的隧道安全性等进行监测,是按照 GB3836.4~83《爆炸性环境用防爆电器设备通用要求》制造的。该仪器使用宽频带、高灵敏度定向天线,接收电磁辐射参数有电磁辐射强度和脉冲数两个指标。主要技术参数有:频率为宽频;天线灵敏度达到 $50 \mu\text{V}/\text{m}$;采用非接触定向测试方式;手动设置预警临界值,超限自动报警;接收机输入信号 $V_{pp} \geq 2 \mu\text{V}$;使用 MCDX-III 型隔爆本安电源;工作电压和工作电流分别为 $12 \pm 0.5 \text{ V}$, 不大于 500 mA ;有效预测距离为 $7 \sim 22 \text{ m}$;防爆形式 (Ex ibI) 为矿用本质安全型。KBD-5 矿用本安型电磁辐射监测仪包括天线、接收机、微机、电源、充电器、天线固定支架和数据处理及分析软件,其主要特点有:电磁辐射技术及监测实现了非接触、定向、区域及连续预测;电磁辐射信号的采集、转换、处理、存储和报警由监测仪自动完成;监测仪具有人机对话、定向接收、数据接收和处理、数据存储和查询、数据和图形显示、与 PC 机通讯和报警等功能。

1.3 现场预测方向、距离及测定位置的确定

1.3.1 现场预测方向的确定 矿山巷道掘进煤岩变形破裂产生的电磁辐射场是一个矢量场,具有方向性,因此现场利用电磁辐射监测仪预测预报煤岩动力灾害现象时必须考虑天线接收的方向,预测方向选择的合理与否,对监测结果具有重要的影响。利用 KBD-5 型电磁辐射监测仪进行煤与瓦斯突

出、冲击矿压、岩爆危险性预测预报时,可对同一煤层同一地点进行同步监测,也可进行动态跟踪监测。定点监测是在巷道中选定某一测点,监测采掘过程中选定区域内电磁辐射变化。动态跟踪监测是随着工作面的进尺,在工作面迎头布置测点,监测进尺后工作面前方煤体的电磁辐射,以预测工作面前方煤体突出危险程度。中国矿业大学对此进行了研究,初步确定了现场电磁辐射监测仪监测方向的一般原则并应用于实践,取得了一定的效果^[13]。

因为在掘进过程中掘进工作面周围煤岩体内(包括两帮和迎头)的应力分布是不均匀的,应力集中区的位置也是不固定的,导致电磁辐射源的位置也在不断变化。力电耦合计算结果表明,电磁辐射信号在煤岩中的分布规律不仅与煤岩电性参数有关,而且与应力集中区的位置、区域大小有关^[11]。将应力集中区看作电磁辐射源是合理的,同时考虑到天线接收的方向性,对于 KBD-5 矿用本安型电磁辐射监测仪采用的是线圈天线,其主要接收方向为天线轴向两边各 30° ,通过改变天线朝向就可以接收来自不同方向煤岩变形破裂产生的电磁辐射信号。笔者在进行力电耦合计算时规定:监测巷道迎头时,规定天线轴向与垂直迎头壁面方向一致时天线轴向偏转角为 0° ;监测两帮时,规定天线轴向与垂直两帮壁面方向一致时天线轴向偏转角为 0° ,顺时针方向为负,逆时针为正,如图 3 所示。这样就可以借助于力电耦合模型计算出在天线的各个朝向电磁辐射信号的变化规律,通过对某一个固定监测点结果比较,就可以确定出某一个监测点的最佳监测方向以及应力变化最大(即危险性最大)的方向。图 4 和图 5 分别为在巷道迎头壁面处左前方和正前方监测点电磁辐射模拟计算值与天线监测方向的关系曲线,采深为 700 m ,取开挖 16 m 迭代 500 步和 1 500 步后的数据值,其他条件为:取潘三矿 1452 工作面煤岩力学性质,电磁波在其中的衰减系数为 $0.2 \text{ dB}/\text{m}$,转换成非分贝值为 0.0460 ;取耦合公式中的系数 $a = 0.0063$, $b = 0.0246$, $c = 0.2494$, $d = 9.4737$ 。从图中可见,在正前方,天线轴向方向偏转角度为 $-60^\circ \sim +60^\circ$ 时,EME 值变化不大,正对着壁面时最大;在左边角时,天线轴向方向偏转角度为 $+60^\circ$ 时 EME 值最大,较正对着迎头壁面为大。说明在左边角前方煤岩层内部应力场变化较大,且比正前方 EME 的最大值还要大一些,因此在现场进行监测时必须主

要监测巷道两边角的区域，且可以适当增加测点。

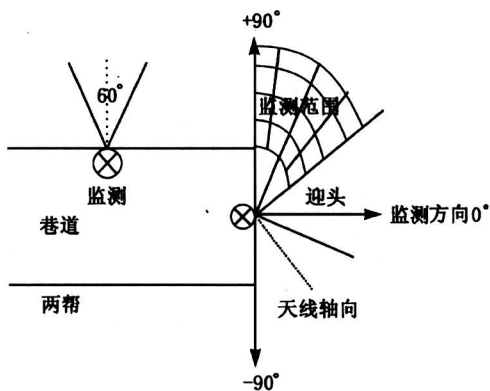


图3 电磁辐射监测方向和范围示意

Fig.3 Sketch of EME monitoring direction and scope

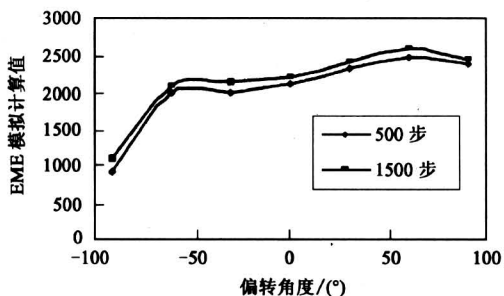


图4 EME 模拟值与方向的关系 (左前方)

Fig.4 Simulated EME vs direction for left

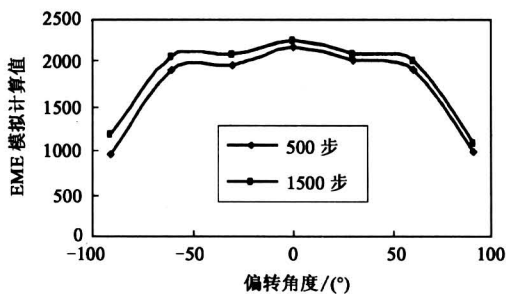


图5 EME 模拟值与方向的关系 (正前方)

Fig.5 Simulated EME vs direction for forward

根据前面的分析与研究，笔者认为：在预测巷道或工作面采掘过程中的应力场数值模拟过程中，必须结合现场围岩变形破坏参数的测定结果如顶底板移近量、巷道两帮的位移量等对程序进行调试；

程序调试好后，根据数值模拟的应力场分布，确定应力集中区范围，然后根据监测天线的方向角度（60°）提取该范围的应力值，利用力电耦合模

型计算待监测点在各个方向电磁辐射模拟计算值的变化规律，其中最大值的方向就可以看作是最佳的预测方向。

1.3.2 现场预测距离的确定 根据文献 [14]，对于实际现场煤岩，当电磁辐射频率 $f \leq 1.0$ MHz 时，则煤岩体中电磁波传播的有效距离即电磁辐射仪监测的有效预测距离 L 由下式确定：

$$L = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu f}} \tag{4}$$

$$f = \frac{\rho}{\pi\mu L^2} \tag{5}$$

对于岩石和矿物，磁导率可看作为真空中的磁导率；煤岩电阻率为 $10 \sim 1\,000 \Omega \cdot m$ 。若选择电磁波频率为 500 kHz，则 L 为 7.12~22.5 m。

由于煤岩变形破裂过程产生的电磁辐射频率不是单一的，并且不同煤岩层对不同频率电磁波的衰减也是不同的，根据文献[11]将煤岩变形破裂过程的应力集中区看作电磁辐射源是可行的，笔者认为可以通过应力场数值模拟得出的应力集中区来确定有效预测距离的范围。

1.3.3 现场测定位置的选择 现场巷道掘进过程中进行电磁辐射动态监测，预测位置一般选择在迎头左、中、右三个点和巷道两帮。但是，由于现场的复杂性，不同矿区不同煤岩层以及不同的工作面或掘进面，应力集中程度和应力集中区的位置是不同的，产生的电磁辐射信号在监测空间的分布也是不同的，因此合理选择监测的位置，才能提高预测预报的有效性和准确性。

力电耦合计算结果表明^[11]，天线朝向迎头垂直壁面方向进行监测时，在巷道空间沿着高度方向电磁辐射信号强度分布规律是中间大、两端小；在煤岩体内部是随着与巷道壁面距离的增加先是逐渐增加，达到峰值后再逐渐降低，其分布曲线呈现出与煤岩内部应力分布曲线相同的规律；但在迎头与两帮相连的边角处，若天线方向朝向边角，则电磁辐射信号较大，说明在该处方向应力变化较大，属于重点监测的区域，如图2，图3所示。因此，在巷道掘进过程中，进行巷道迎头电磁辐射动态监测时，天线测定的位置应该放置在巷道高度方向的中部，并对着煤层层理方向，通过不断改变天线朝向来监测巷道迎头和两帮煤岩层的突出危险性。

2 现场应用

2002年4月开始在淮南潘三矿掘进工作面进

进行现场试验，在潘三矿 1452 (3) 轨顺、1452 (3) 运顺掘进工作面安装了煤与瓦斯突出电磁辐射监测仪，并确定了电磁辐射监测参数；现场测试掘进工作面煤与瓦斯突出与电磁辐射的关系；现场测试掘进工作面电磁辐射与钻屑量的关系；测试了工作面不同方位电磁辐射的分布。

图 6 是电磁辐射与常规预测指标及突出危险性关系测定结果分析，从中可以看出：

1) 电磁辐射强度和脉冲数平均值在同一监测地点的不同方位（监测方向均为垂直煤层层理朝着迎头掘进方向）的变化趋势均是一致的，即左前方、右前方和正前方在某一个时刻测定的结果相差

不大，但是正前方的值要稍微大于左前方和右前方，此变化规律与力电耦合计算结果是一致的；

2) 电磁辐射强度和脉冲数平均值测定结果与常规预测法测试值也具有相同的变化趋势，说明煤岩变形破裂过程产生的电磁辐射信号能反映煤岩体内部应力的变化，二者呈现正相关的关系。

3 结论

通过对电磁辐射信号监测的方向、位置的合理确定即煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩灾害动力现象，危险性预测中危险区域的定向定位的初步研究，可以得到以下结论：

1) 可以通过煤岩变形破裂过程力电耦合方程与 FLAC 三维软件的应力数值模拟，对煤岩灾害动力现象危险性预测中危险区域的定向定位进行研究。

2) 根据数值模拟得到的应力场分布来确定应力集中区范围，然后通过应力场数值模拟得出的应力集中区来确定有效预测距离的范围。

3) 通过力电耦合模型对天线各个朝向电磁辐射信号的计算以及对某一个固定监测点结果比较，就可以确定电磁辐射信号的最佳监测方向或危险性最大的方向。

4) 在巷道掘进过程中，进行巷道迎头电磁辐射动态监测时，天线测定的位置应该放置在巷道高度方向的中部，并对着煤层层理方向，通过不断改变天线朝向来监测巷道迎头和两帮煤岩层的突出危险性。

5) 现场电磁辐射强度测定结果基本上呈现出与模拟结果相同的变化趋势，证明了力电耦合方法的合理性。

参考文献

[1] 何学秋, 王恩元, 聂百胜, 等. 煤岩流变电磁动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003

[2] 窦林名, 何学秋, 王恩元, 等. 由煤岩变形冲击破坏所产生的电磁辐射 [J]. 清华大学学报, 2001, 41 (12): 86~88

[3] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出预测技术研究现状及发展趋势 [J]. 中国安全科学学报, 2003, 13 (6): 40~43

[4] He Xueqiu, Wang Enyuan, Liu Zhentang. Experimental study on the electromagnetic radiation (EMR) during the fracture of coal or rock [A]. Proceedings of the '99 International Symposium on Mining Science and Technology [C]. Beijing, 29~31 August 1999. 133~136

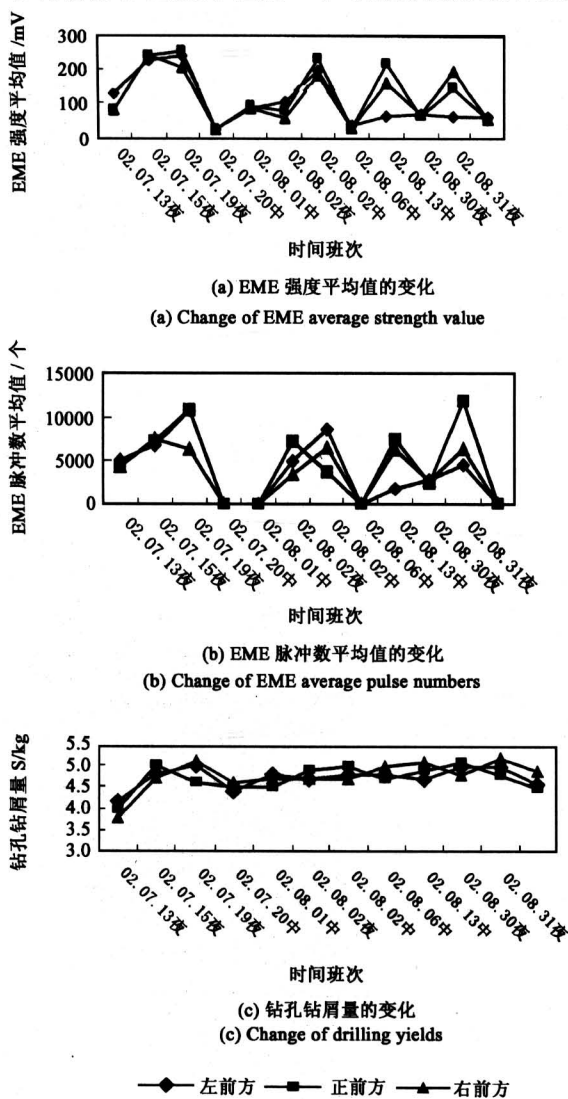


图 6 不同方位电磁辐射与常规预测测定结果对比

Fig.6 Comparison of EME testing results with popular prediction results at different direction

- [5] Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang. The fractal rule of electromagnetic emission (EME) during coal or rock deformation and fracture [A]. Proceedings of the '98 International Symposium on Safety Science and Technology [C]. Beijing, Oct 1998. 356~361
- [6] Nie Baisheng, et al. Macro and Micro-mechanism of effect of EME on CBM adsorption in coal [A]. First Mine Environment and Ventilation Symposium [C]. India, Oct 2000. 121~128
- [7] Frid V. EMR method for rock and gas outburst forecast [J]. Journal of Applied Geophysics, 1997, 38 (2): 97~104
- [8] Frid V. Electromagnetic radiation method water-infiltration control in rockburst-prone strata [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 43 (1): 5~13
- [9] 冯文灏, 郑文华. 工业测量中两测角装置间起始方向线的定向方法 [J]. 测绘信息与工程, 2002 (2): 63~65
- [10] 张小义. 机载无源测向交叉定位系统中消除系统误差的一种算法 [J]. 航空电子技术, 2002, 33 (1): 106~109
- [11] 肖红飞. 煤岩变形破裂电磁辐射与应力耦合规律研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003
- [12] 马超群, 陆道儿. MTT-92 型煤与瓦斯突出危险探测仪的研制与试验 [J]. 煤炭工程师, 1996 (1): 63~67
- [13] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论及技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001
- [14] 王恩元. 电磁辐射监测煤与瓦斯突出危险性技术及其应用研究 [博士后研究报告]. 徐州: 中国矿业大学, 1999

Research on Direction and Location for Danger Prediction of Coal or Rock Dynamic Disaster

Xiao Hongfei¹, He Xueqiu², Feng Tao¹, Wang Enyuan²

(1. College of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. College of Energy Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

[Abstract] In order to use the non-touch electromagnetic emission (EME) method to better forecast or predict the danger of coal or rock dynamic disaster such as coal or gas outburst, rock or coal outburst and so on, the direction and location of dangerous areas, that is, how to ascertain the monitoring direction and position for EME, is studied. The research results show that according to the computation for the changing rules of EME signals in various directions by means of the coupling equation between EME and stress, and the EME numerical results comparisons for the designated monitored spot, the best monitoring direction and the direction with most stress or maximum dangers can be ascertained. When dynamically monitoring the EME signals in tunnel head-on in the course of tunnel excavation, the monitoring antenna should be laid at the middle height of tunnel and faced with the coal stratum direction. The outburst danger can be monitored by altering the antenna monitoring direction. The available scope of prediction distance can be determined in light of the stress concentration ascertained by numerical simulation for stress field. The EME measuring results on the spot show that it is feasible to study the direction and location of dangerous areas in predicting the danger of coal or rock dynamic disaster by means of the coupling between EME and stress.

[Key words] rock or coal dynamic disaster; danger prediction; direction and location; deformation and fracture of coal or rock; couples between EME and stress; electromagnetic emission (EME)