

基于力电耦合冲击矿压电磁辐射预测法的研究

肖红飞¹ 副教授 何学秋² 冯涛¹ 王恩元² 郑百生²

(1 湖南科技大学能源与安全工程学院 2 中国矿业大学能源科学与技术学院)

学科分类与代码:620.5040

基金项目:国家自然科学基金资助(50204010);湖南省自然科学基金资助(02JJY2076);
湖南科技大学博士基金资助(E50335)。

【摘要】 笔者首先提出了煤岩变形破裂过程电磁辐射与应力耦合的概念,然后在实验研究、理论分析和数值模拟的基础上从力电耦合的角度研究了煤岩冲击矿压预测的电磁辐射法(EME)。研究结果表明:FLAC^{3D}方法能对矿山巷道掘进过程煤岩内部应力场进行有效的数值模拟;电磁辐射信号主要来源于应力集中区,在场点监测到的电磁辐射信号主要是应力集中区煤岩变形破裂过程产生的;EME信号呈现出与煤岩内部应力变化相同的规律;利用力电耦合方法研究煤岩冲击矿压电磁辐射预测法是可行的。笔者最后还对未来煤岩冲击矿压电磁辐射预测法的研究进行了展望。

【关键词】 冲击矿压;煤岩变形破裂;力电耦合;电磁辐射(EME);预测

Study on Prediction of Rock or Coal Outburst by EME Method Based on Coupling EME with Stress

XIAO Hong-fei¹, Assoc. Prof. HE Xueqiu² FENG Tao¹ WANG Enyuan² ZHENG Baisheng²

(1 College of Energy & Safety Engineering, Hunan University of Science & Technology

2 College of Energy Science & Engineering, China University of Mining & Technology)

Abstract: The concept of coupling EME with stress during the deformation and fracture of rock or coal was put forward. Based on laboratory experiments, theoretical analysis and numerical simulation, the EME method for prediction of rock or coal outburst in light of coupling EME with stress was studied. The results showed that the FLAC3D method could effectively simulate the stress field of coal or rock during the course of tunneling. Most EME signals came from the stress concentrated area, which were produced in the course of deformation and fracture of coal or rock. EME signals showed the same changing rule as the stress. It is feasible to study the EME method for predicting rock or coal outburst by means of coupling EME with stress. Prospective for further study on EME method for predicting rock or coal outburst was presented.

Key words: Rock or coal outburst Deformation and fracture of coal or rock Coupling EME with stress
Electromagnetic emission (EME) Prediction

1 引言

作为煤岩动力灾害之一的冲击矿压以其突然、急剧、猛烈的破坏特点对煤矿、金属矿井和隧道等的安全构成严重的威胁或造成巨大经济损失和人员伤亡。非接触电磁辐射法是一种有效的预测预报冲击矿压等煤岩灾害动力现象的方法^[1~4]。研究发现:煤岩体所受的应力越高,电磁辐射的幅值与脉冲数就越大,也就是说卸载过程的应力场与产生的电磁辐射场具有某种耦合关系,电磁辐射信号综合反映了冲击

矿压等煤岩灾害动力现象的主要影响因素。

电磁辐射的产生机理属于微观现象,而应力场的变化属于宏观现象,因此,在二者之间可以建立微观和宏观的桥梁。何学秋、窦林名^[5]建立了可以反映煤岩体在应力作用下脆性破坏特征的弹塑脆性模型,认为煤岩体在载荷作用下变形破坏与电磁辐射现象和声发射现象之间具有耦合关系。

为此,笔者在实验研究、理论分析和应力场数值模拟的基础上,从煤岩受压变形破裂过程中产生的电磁辐射(EME)强度与煤岩内部应力之间存在力电耦合关系的角度研究了

冲击矿压电磁辐射预测法。这对于进一步揭示煤岩冲击矿压等煤岩灾害动力过程及灾害的发生机理,对于岩石混凝土结构稳定性评估以及对促进相关学科的发展都具有重要意义。

2 力电耦合方法的研究

2.1 力电耦合公式的提出

不管是压力、位移或者是电磁辐射,既然它们是同一力学过程的伴生信息,那么它们之间必然存在着某种对应关系。研究结果表明:电磁辐射与煤岩体的载荷、加载速率及变形破裂过程呈正相关。

笔者对文献[6]进行了理论分析指出了煤岩变形破裂电磁辐射信号与煤岩内部应力之间的耦合关系,其数学表达式如下:

设煤岩体变形从 ε 增加到 $\varepsilon + d\varepsilon$ 时对应的最大主应力 σ_1 从 σ 变化到 $\sigma + d\sigma$,则煤岩体变形破裂过程中产生的电磁辐射脉冲数与加载主应力之间的关系为

$$N = N_0 \int_{\varepsilon}^{\varepsilon + d\varepsilon} \varphi(x) dx = N_0 \int_{\sigma}^{\sigma + d\sigma} \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E\varepsilon_0} \right]^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E\varepsilon_0} \right)^m \right] d\sigma \quad (1)$$

为简单起见,令 $m=1$,围压 $\sigma_2 = \sigma_3 =$ 常数,在单轴压缩时,围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,则当最大主应力 σ_1 从 $\sigma_1(1)$ 变化到 $\sigma_1(2)$ 时,且应力变化 $\Delta\sigma = \sigma_1(2) - \sigma_1(1)$ 很小时,将上式按照泰勒级数展开,则得产生的电磁辐射脉冲数为

$$N = a_n \Delta\sigma^n + a_{n-1} \Delta\sigma^{n-1} + \dots + a_1 \Delta\sigma + a_0 \quad (2)$$

受载条件下的煤岩微元体在变形破裂过程中每发出一个电磁辐射脉冲,就相当于向外辐射出一份能量,则可以得到电磁辐射强度与加载应力关系式:

$$E_m = f(\sigma) = b_n \Delta\sigma^n + b_{n-1} \Delta\sigma^{n-1} + \dots + b_1 \Delta\sigma + b_0 \quad (3)$$

在实验研究中也得到了煤岩变形破裂过程产生的电磁辐射强度与应力变化之间可以用三次多项式来表征。考虑到电磁辐射信号在煤岩介质中传播时会衰减,因此,力电耦合计算时采取如下方法:

$$\vec{E} = E_m e^{i\alpha} e^{-\gamma r} = (\alpha^3 + b\alpha^2 + c\alpha + d) e^{-\alpha r} e^{i(\alpha t - \beta r)} \quad (4)$$

式中, $E_m(t)$ ——电磁辐射源在 t 时刻的幅值, mV;

$\sigma(t)$ ——电磁辐射源所在微元体所受的轴向应力, MPa;

a, b, c, d ——实验常数;

E ——实际监测到的电磁辐射信号幅值, mV。

2.2 力电耦合计算结果分析

连续介质快速拉格朗日差分法 (Fast Lagrangian Analysis of Continua, FLAC) 是近年来逐步成熟完善起来的一种新型数值分析方法。笔者利用 FLAC^{3D} 对矿山巷道掘进过程煤岩内部应力场进行数值模拟,以淮南潘三矿 1452 工作面开采 13 号煤层巷道掘进为例,模拟独巷掘进过程中煤岩迎头和

两帮支承应力区的应力变化情况,模拟平均采深为 700 m,主要提取出应力集中区各个单元的应力应变值。其模型大小为 $43 \times 40 \times 33 \text{ m}^3$,巷道为矩形巷道 ($3 \times 3 \text{ m}$),模型共划分为 121 500 个六面体单元,采用 Mohr-Coulomb 应变软化准则。独巷掘进模型坐标示意图与煤岩层柱状图如图 1、图 2 所示。

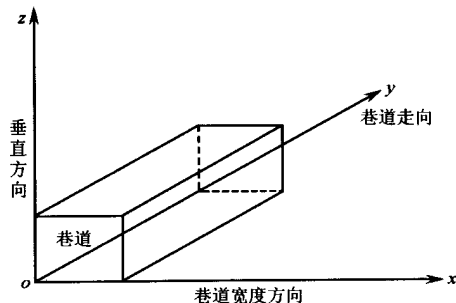


图 1 巷道掘进模型坐标示意图

岩性	柱状	厚度 (m)
泥质砂岩		3.20
粉砂岩		2.10
泥岩		1.45
13-2 煤		0.50
砂质泥岩		4.00
13-1 煤		4.30
泥岩		4.15

图 2 巷道掘进煤岩层柱状图

然后通过煤岩变形破裂过程电磁辐射 (EME) 强度与煤岩内部应力之间的力电耦合关系式 [即式 (4)] 对巷道掘进过程中产生的电磁辐射信号时空分布规律进行了研究,结果分析如下。

图 3 为巷道掘进过程中煤岩内部应力场分布,可见当煤层层开挖后,煤岩体内应力重新分布,以前处于原岩应力区的巷道两帮和迎头出现应力集中区域。这与理论分析和现场实际围岩应力显现规律是一致的,从而说明该模拟方法能正确反映现场煤岩受采动影响时内部应力场的变化规律。

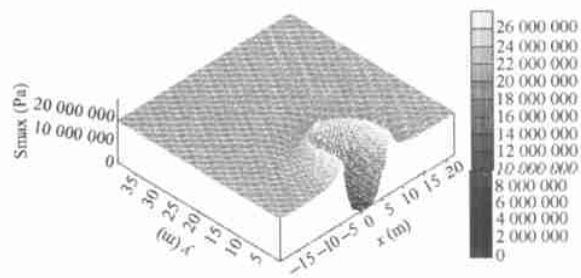


图 3 煤岩内部最大主应力等值线分布图

巷道开挖后内部应力重新分布,在此过程中煤岩单元体在逐渐变化的应力场作用下发生变形,并产生不断变化的电

磁辐射信号,其应力变化的快慢表现在 EME 强度的变化上。图 4 为基于上述三维 FLAC 应力场模拟的力电耦合计算结果,计算时取煤岩层的电导率为 0.01 S/m ,相对介电常数取为 4,采深 $H = 700 \text{ m}$,取定耦合公式中的系数 $a = -0.0029$, $b = 0.0379$, $c = 2.1787$, $d = 18.565$ 。图 5 为现场实际测定结果。可见:

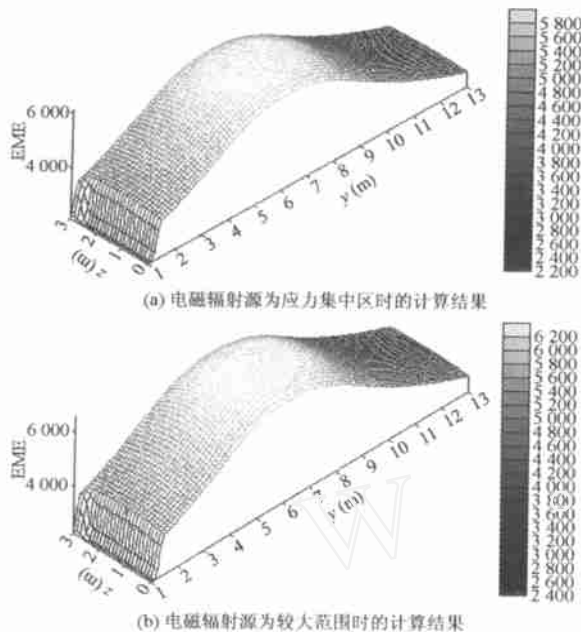


图 4 巷道迎头煤岩体 EME 强度在掘进方向的分布

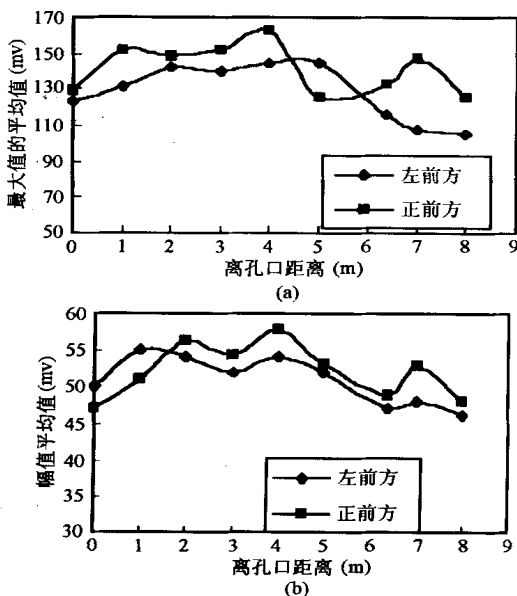


图 5 EME 现场测定幅值与钻孔不同深度的关系

(1) 较大范围区(笔者规定为比应力集中区范围大一倍的范围)内的煤岩体单元当电磁辐射源时的计算结果比只将应力集中区(应力大于原岩应力 5% 以上的区域)看作电磁辐射信号源的计算结果要大,但是其值变化不大,相差 3%~8%,说明在场点监测到的电磁辐射信号主要是应力集中区煤岩变形破裂过程产生的、也就是说现场监测到的电磁

辐射信号其变化规律主要反映的是应力集中区煤岩破裂的程度。

(2) EME 信号在迎头沿着走向符合先逐渐增大达到峰值后再逐渐降低的规律,呈现出与煤岩内部应力变化相同的规律。

(3) 可见现场钻孔内不同深度测定的电磁辐射强度是不同的,其一般是随着离孔口的距离的增加,先是逐渐增大,在离孔口大约 3~5 m 范围内达到峰值,然后又开始降低;基本上呈现出与钻孔应力变化相同的趋势,同时也证明了笔者力电耦合计算的合理性。

3 结论与展望

煤岩冲击矿压危险状态由岩体应力大小、岩体特性和煤层特征等因素决定,而冲击矿压的发生是压力超过煤岩体的强度极限,聚集在巷道周围的煤岩体中能量突然释放的动力效应。一般情况下应力高的区域更容易聚集弹性能,因此,在开采过程中分析冲击矿压区域内的应力分布状态和应力值的大小就可以分析冲击矿压的危险程度,从而为防治冲击矿压打下基础。并且随计算机应用技术的不断发展,可采用 FLAC, UDEC, ANSYS 等世界上通用有效的数值模拟软件来确定开采过程中煤岩巷道周围煤岩体内部的应力场分布。

理论和实际应用表明,采用电磁辐射方法对冲击矿压危险性评价与预测预报是行之有效的。电磁辐射信号的产生是由于煤岩变形破裂过程应力场发生变化而产生的,二者具有耦合关系。

笔者前面的力电耦合分析与计算结果表明:首先通过应力场的数值模拟可以合理确定出巷道周围煤岩内部应力分布,并提取出应力值,然后根据耦合关系式来得出电磁辐射信号在巷道空间的变化规律,其结果与实际测定结果变化趋势是一致的。

笔者的研究结果对于合理利用电磁辐射法预测冲击矿压现象具有下面两方面的意义:

一是得到了可以从电磁辐射信号与应力场之间的耦合角度来研究冲击矿压时产生的电磁辐射信号变化规律;

二是得到了电磁辐射信号主要来源于应力集中区的结论,为以后冲击矿压危险源的初步定位和定向的研究打下了基础。

尽管何学秋、窦林名等学者对煤岩体破坏过程中电磁辐射产生的机理及电磁波变化的监测进行了研究,但是对煤岩变形破裂电磁辐射在煤岩中的传播和时空分布规律以及煤岩灾害动力现象的定位监测还缺乏深入的实验和理论研究。笔者虽然也从力电耦合的角度对此进行了初步研究,但是还有许多工作要做,下面有待研究的问题和发展方向有以下思考:

(1) 由于在监测过程中监测到的是煤岩体内部各处破裂地带产生的电磁辐射传播到接收天线处的整体效应,是电磁场量的矢量叠加,不能良好反映应力集中带即主破裂处的具体位置,因此,影响电磁辐射的因素有待进一步的研究。

(2) 对于预测预报冲击矿压等煤岩动力灾害现象,监测矿山顶板活动状况来说,消除或减弱外界干扰,实现定位监测和定量预报,是目前急需解决的世界性难题,因此,煤岩体变形破裂

较为强烈区域的电磁辐射定位技术有待进一步的研究。

(3) 由于在采掘过程中,应力集中区是不断变化的,应力集中带也是在移动的,从而电磁辐射源的位置和大小都是在不断变化的,因此,可以将电磁辐射源看作是一个个有限移动源,其随着采动的影响而变化的规律也有待进一步的研究。

(收稿:2003 年 11 月;作者地址:湖南省湘潭市;湖南科技大学能源与安全工程学院;邮编:411201)

参 考 文 献

1 何学秋,刘明举.含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995

2 Bai-sheng Nie , etc. Macro and Micro-Mechanism of Effect of EME on CBM Adsorption in coal[C] , First Mine Environment and Ventilation Symposium , India , Oct. 2000 :121 ~ 128

3 Xue-qiu He , etc. Experimental study on the electromagnetic radiation(EMR) during the fracture of coal or rock[C] . Proceedings of the '99 International Symposium on Mining Science and Technology ,Beijing ,China ,29~ 31 August ,1999 :133 ~ 136

4 王恩元等.煤岩变形破裂的电磁辐射规律及其应用研究[J].中国安全科学学报,2000,10(2):35~39

5 窦林名.煤岩突变的声电效应规律及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2001.2

6 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

《中国安全科学》编辑部 推荐图书资料

编号	资 料 名 称	单价(元)	册数	合 计
01	《安全工程师专业培训教材》(上、中、下)	110.00		
02	高等院校安全工程专业教材:《安全学原理》、《安全系统工程》、《安全人机工程学》、《安全管理学》	106.00		
03	高等院校安全工程教育试用教材:《安全工程概论》	20.50		
04	《中国 21 世纪安全减灾战略》	128.00		
05	《安全文化新论》	26.00		
06	《中国企业安全文化活动指南》	18.00		
07	《中国安全文化建设研究与探索》	25.00		
08	《安全文化论文集》	22.00		
09	《画说 安全生产法》	8.00		
10	《中华人民共和国安全生产法释义》	25.00		
11	《安全生产法知识问答 100 例》	22.00		
12	《重大危险源应急救援与预案导论》	43.00		
13	《危险评价方法及应用》	50.00		
14	《重大危险源辨识与控制》	39.00		
15	《 安全生产许可证条例 释义》	28.00		
16	《 安全生产许可证条例 培训教材》	20.00		
17	《企业经营者安全生产教育读本》	38.00		
18	《安全生产依法行政指南》	53.00		
19	《 建设工程安全生产管理条例 释义》	28.00		
20	《 建设工程安全生产管理条例 培训教育读本》	30.00		
21	《 中华人民共和国道路交通安全法 释义》	28.00		
22	《 中华人民共和国道路交通安全法 学习读本》	20.00		
23	《国家安全生产监察员培训教材》	55.00		
24	《安全生产监察员行政执法讲义》	15.00		
25	《应急救援事故案例》	32.00		
26	《国内外危险化学品重特大典型事故案例》	42.00		
27	《危险化学品安全管理条例释义》	25.00		
28	《危险化学品经营单位安全管理培训教材》	52.00		
29	《危险化学品安全法规汇编》	128.00		
30	《危险化学品安全监管实用手册》	17.00		
31	《伤亡事故统计工作手册》	42.00		
32	《民用爆炸物品安全监管手册》	19.00		
总计金额		仟 佰 拾 元 整 (:)		

以上定价均含邮挂费,欲购请直接汇款至编辑部,并与张爱军联系。