

煤岩动力灾害电磁辐射预测技术中力电耦合方法的研究及应用

肖红飞¹, 冯涛¹, 何学秋², 王恩元², 朱川曲¹

(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: 对煤岩动力灾害电磁辐射预测技术的研究现状和发展趋势进行了论述与分析, 基于煤岩变形破裂电磁辐射信号与受载时应力变化之间的关系, 从 FLAC 应力场数值模拟与电磁辐射传播的角度对煤岩变形破裂电磁辐射力电耦合研究方法进行了研究。研究表明: 基于 FLAC 模拟的力电耦合方法能合理地确定应力集中区域以及正确模拟电磁辐射在煤岩层内的分布规律, 该方法为现场应用电磁辐射方法和技术准确预测预报煤岩灾害动力现象提供可靠的理论基础, 对于完善煤岩变形破裂电磁辐射监测和检测理论以及促进相关学科的发展具有理论和现实意义。最后还对未来煤岩动力灾害电磁辐射预测技术研究的发展前景进行展望。

关键词: 岩石力学; 煤岩动力灾害; 预测技术; 力电耦合; 电磁辐射(EME); 煤岩变形破裂

中图分类号: TD 713.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)11-1881-07

STUDY AND APPLICATION OF COUPLING BETWEEN EME AND STRESS IN ELECTRO-MAGNETICAL EMISSION PREDICTION TECHNOLOGY FOR COAL OR ROCK DYNAMICAL DISASTER

XIAO Hong-fei¹, FENG Tao¹, HE Xue-qiu², WANG En-yuan², ZHU Chuan-qu¹

(1. College of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. College of Energy Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The present situation and progress trend of electro-magnetic emission(EME) prediction technology for rock or coal dynamical disasters are analyzed. On the basis of the relationship between EME signal and loading stress during deformation and fracture of coal or rock, the coupling methods between EME and stress are studied based on FLAC simulation for stress field and EME propagation. The results show that the coupling relationship can be expressed by thrice multinomial approximately. The electromagnetic emission signal will increase with the increase of loading stress, which approximately conforms to thrice multinomial. There are relatively large influences on the EME intensity or pulse in loading stress and loading speed. The higher the stress and loading speed are, the stronger the signal of electromagnetic emission produced is. The coupling results of calculation show that the EME signals increase with the increment of loading speed or the strength of coal or rock. The coupling method between EME and stress based on FLAC analogy can reliably ascertain the stress concentration fields, and properly simulate the distribution rules of EME signal in coal or rock stratum. It provides a kind of new approach to electromagnetic emission monitoring technology for the purpose of the application of monitoring

收稿日期: 2004-02-16; **修回日期:** 2004-04-10

基金项目: 国家安全生产科技发展计划项目(04-232, 04-238); 湖南省科技攻关项目(03JTY2005); 湖南科技大学博士启动基金(E50335)

作者简介: 肖红飞(1971-), 男, 2003年于中国矿业大学获博士学位, 现任副教授, 主要从事安全监测理论及技术和相关方面的教学与研究工作。

E-mail: xhfdyl@sohu.com.

EME to the prediction of dynamical disaster phenomena such as coal or rock outbursts. It can also provide reliably theoretical basis for the use of EME method and technology to predict and forecast rock or coal dynamical disasters. It has important meaning for perfecting the EME monitoring and detecting theory and promoting the related disciplines. Finally, a prospect for the research on the EME prediction technology for rock or coal dynamical disaster in the future is presented.

Key words : rock mechanics ; rock or coal dynamical disasters ; forecast technology ; coupling between EME and stress ; electro-magnetic emission(EME) ; deformation and fracture of coal or rock

1 引言

煤岩动力灾害现象是指在地下资源开采过程中发生的重大动力灾害事故,主要表现为煤与瓦斯突出、岩爆、冲击矿压、矿震等,且该问题随着采掘深度的不断延伸和开采规模的不断扩大日益严重,造成了大量的人员伤亡和财产损失,严重威胁着矿井安全生产。例如:2002年4月淮北煤业集团芦岭煤矿突出10 000 t煤,瓦斯60多万立方米,死亡13人;2003年11月15日17时,云南昭通地区昭通市扎西镇柳尾坝煤矿(产量6万吨/年,乡镇基建矿井)发生煤与瓦斯突出事故,11人死亡。由于煤与瓦斯突出或冲击矿压能在一瞬间向采掘工作面空间喷出巨量煤与瓦斯流,不仅严重地摧毁巷道设施,毁坏通风系统,而且使附近区域的井巷全部充满瓦斯与煤粉,造成瓦斯窒息以致煤流埋人,甚至还会造成煤尘与瓦斯爆炸等严重后果,因此,致力于煤与瓦斯突出等煤岩灾害动力现象产生的机制、预测预报以及预处理的理论和方法的研究(特别是预测预报的研究)显得十分重要。

国内外学者对煤岩动力灾害现象的产生机制及其预测预报进行了研究^[1,2],取得了很大的成绩。煤岩动力灾害现象的发生主要是煤岩体在其内外物理化学及应力综合作用下快速变形破裂的结果,是一种典型的不可逆能量耗散过程。在其中能量形式包括有:固体弹性能、热能、气体容积功、声能和电磁能等,据此预测预报方法有声发射法、微重力法、电磁辐射法等,其中非接触电磁辐射法是一种很有发展前景的地球物理方法。文[3~5]对煤岩体破坏过程中电磁辐射产生的机制及电磁波变化的监测进行了研究,发现电磁辐射技术可以有效预测预报这些灾害动力现象,并且可实现非接触式预测。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有待于在试验和理论研究上进一步深入。本文主要在

论述电磁辐射预测法研究现状的基础上,基于电磁辐射信号的产生与受载时煤岩变形破裂或应力变化之间的关系,提出了一种新的煤岩变形破裂电磁辐射研究方法——力电耦合方法。

2 煤岩动力灾害电磁辐射预测方法研究现状

2.1 常规预测方法简述

煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩动力灾害预测的基础是人们对灾害发生过程及其影响因素的认识。在对此进行研究的过程中,国内外学者经过不懈的努力提出了各种各样的危险性预测方法。对于煤与瓦斯突出预测,从预测的范围和时间来分可以分为区域预测(指确定整个煤层区域的危险性,也叫长期预测)和局部预测(指在区域预测的基础上,预测采掘工作面的突出危险性,又叫日常预测或工作面预测)2种,而日常预测又可以分为静态(或不连续)和动态(连续)预测。

静态方法是指从现场工作面提取煤岩体在某一时刻某一状态的特定量化指标或参数来确定煤岩体所处的危险性,有:钻孔瓦斯涌出初速度 q 法、钻屑瓦斯解吸指标法、 R 指标法、 D, K 综合指标法、钻屑量法和钻屑倍率法等。动态方法是指动态地连续地监测能够综合反映煤岩体所处变形状态的某种指标来确定其危险性的方法,目前有以下几种动态连续监测方法:声发射监测技术、瓦斯涌出动态指标法和电磁辐射监测技术。

煤岩变形破裂过程裂隙的产生和扩展将以弹性波的形式产生能量辐射,利用该物理现象的方法就是声发射技术,属于一种地球物理方法。最早是美国于20世纪40年代初利用声发射技术监测金属矿的岩爆,其后前苏联、英国、德国、加拿大、日本等国在这方面都进行了不同程度的研究,取得了一

定的成就,并在矿井中得到了较为广泛的应用。我国的研究起步较晚,如煤炭科学研究总院西安分院研制了 MJY-1 型声发射监测系统^[6]。但是声发射监测技术存在许多缺点,归纳起来主要是仪器结构复杂,且要求仪器传感器与待测煤岩体表面很好接触耦合,因而实际上应用起来还存在许多困难。瓦斯涌出动态指标法与德国学者提出的 V_{30} 指标(V_{30} 是指掘进工作面放炮后 30 min 内的瓦斯涌出量与落煤量之比值)以及瓦斯涌出变动系数 K_V 有关,研究表明:当 $V_{30} > 9 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $K_V > 0.7$ 时在工作面前方 2~5 m 内有突出危险^[7],但该方法进行大面积推广尚须时日。

2.2 电磁辐射预测方法研究现状

研究发现,煤、岩石等固体材料在受载变形破坏过程中会有电磁辐射产生,煤岩电磁辐射的研究是从震前电磁异常开始的,研究电磁辐射监测技术的主要目的是预测预报地震灾害现象,已经取得了一定的成绩^[8]。同样用电磁辐射法也可以预测预报煤岩灾害动力现象,在利用煤岩电磁辐射预测预报煤岩动力灾害现象方面,中国矿业大学经过十多年的理论、试验和现场研究,取得较好成果。下面从电磁辐射的产生机制、试验研究和电磁辐射传播影响因素三方面对电磁辐射预测技术研究的现状进行阐述。

在电磁辐射产生机制研究方面,文[9]认为孕震过程中的机电转换机制包括:摩擦起电、压电效应、斯捷潘诺夫效应和动电效应。文[10]用固体中压缩原子模型从理论上解释岩石受压及破裂时发射电子的机制。在煤岩破裂方面,文[11]认为的应力诱导电偶极子瞬变、裂隙边缘分离电荷随着裂隙扩展的变速运动以及裂隙壁面分离电荷的弛豫等综合作用产生电磁辐射机制。文[12]认为煤岩等材料的变形破裂时产生的电磁辐射一种是由于表面积累电荷引起的库仑场,一种是由于带电粒子作变速运动而产生的电磁辐射,是脉冲波。文[13]的应力诱导电偶极子瞬变、裂隙扩展和摩擦等作用产生分离电荷的变速运动、裂隙壁面振荡 RC 回路的能量耗散、分离电荷的弛豫以及高速粒子碰撞裂隙壁面产生的韧致辐射等综合作用电磁辐射产生机制。

在煤、岩变形破裂电磁辐射试验研究方面,文[11]在我国首次通过试验研究证明,煤在变形破裂过程中有电磁辐射产生,孔隙气体影响电磁辐射的产生;并在此基础上分析了煤与瓦斯突出过程中的能量耗散,分析电磁辐射法预测预报煤与瓦斯突

出的原理,利用钻孔电磁辐射接收系统对采掘工作面煤岩体内的电磁辐射进行测定以及突出危险性的评价,从而提出电磁辐射法是一种具有广阔前景的煤岩灾害动力现象非接触预测预报方法。文[13]通过试验和测试结果表明,煤岩体在变形、破坏过程中均产生电磁辐射现象;煤岩在冲击破坏前,电磁辐射强度一般在某个值以下;而在冲击破坏时,电磁辐射强度突然增加,依此规律可以对冲击矿压危险性进行评价和预测预报。

在煤岩破裂电磁辐射影响因素及传播规律研究方面,从宏观试验测定结果分析,煤岩体变形破裂电磁辐射影响因素主要有:煤岩电性参数、加载条件(加载速率和加载方式)、煤岩组分、瓦斯及含水率等。电性质是煤岩材料的重要物理性质,也是研究煤岩电磁辐射传播特性的主要参数,包括介质特性和导电特性的研究。对于受载煤岩体的电性参数随应力场的变化规律,文[14]进行了一定程度的研究,试验结果为:

(1) 煤体电阻率随应力的增大而减小,破坏后则迅速增大;而相对介电常数正好相反。因此现场电磁辐射传播在原始煤岩体和受载煤岩体中由于电性参数的不同而有很大变化;

(2) 加载速率和方式对电磁辐射的影响(即应力的变化速率决定裂纹扩展的速度以及煤岩破坏所需的能量,也就决定破坏过程电磁辐射能量的大小):加载速率越大,产生的电磁辐射越强,剪切破坏时由摩擦产生的电磁辐射占有很大比例;

(3) 水分对电磁辐射的影响:对煤岩体的变形破裂过程和煤岩材料的电性参数即 EME 的传播有影响。并且水在煤岩体中流动会产生动电效应,会向外辐射电磁波,一方面,水会降低煤岩的强度、弹性模量,从而降低 EME;另一方面,会产生流动电势,增加 EME,二者相互竞争,流动电势主要影响电磁辐射的近场区,而对煤岩物理力学性质的影响则主要影响远场区。

为实现煤岩变形破裂电磁辐射信号的监测,需了解电磁辐射信号的特征。文[15]从电磁场理论出发,导出电磁波在煤岩介质中的传播特性和煤岩介质电偶极子的电磁辐射特性,获得了煤与瓦斯突出电磁辐射型号的功率谱特性:(1) 辐射信号是频率小于等于 1MHz 的低频信号;(2) 接收到的信号功率最大点的频率随着辐射源的距离而发生变化。距离越近频率越大,即电磁辐射信号功率最大点的频率向高频偏移;距离越远频率越小,即电磁辐射信

号最大功率点的频率向低频偏移。这一特征为煤与瓦斯变形及破裂突出的预报、定向、定位具有重要意义，但是对电磁场在煤岩中的传播特性与影响因素之间的关系缺乏研究，因此在这方面有待进一步的研究。

3 煤岩动力灾害电磁辐射预测技术的发展——电磁辐射与应力耦合研究

3.1 煤岩变形破裂力电耦合研究进展

文[14]试验研究了含瓦斯煤岩体力电效应的规律、瓦斯气体在煤体中充放电过程中电磁辐射的变化及幅频规律；利用统计损伤力学建立了受载含瓦斯煤岩体的一维力电耦合模型，如式(1)所示。该模型能较好的反映电磁辐射和煤岩变形破裂过程的关系，也可反映受载含瓦斯煤岩体电磁辐射和应力及时间的关系。结果表明：声发射、电磁辐射累计脉冲数与应力、时间符合三次多项式关系，这可为电磁辐射方法现场评定煤岩体受力状态和预测预报含瓦斯煤岩灾害动力现象提供可靠的评判方法：

$$\sigma = E\varepsilon \left(1 - \frac{\sum N}{N_0} \right) \quad (1)$$

式中： $\sum N$ 为煤岩试件受载时当应变增加 $\Delta\varepsilon$ 时产生的电磁辐射累计脉冲数， N_0 为整个试件全破坏时产生的电磁辐射脉冲总数。

文[13]利用弹脆性体突变机制对声电耦合关系进行了研究，并提出煤岩冲击破坏危险的声电判据。但是煤岩动力灾害发生时，煤岩变形破裂往往处于围岩应力作用下，不是单轴受力状况。为寻求围压下煤岩变形破坏的应力和电磁辐射之间的耦合规律，宜考虑采用三维的情况进行研究。

3.2 基于FLAC方法的煤岩变形破裂力电耦合研究

根据试验研究，煤岩变形破裂电磁辐射的产生以及其强度与变形破裂过程中煤岩体内部单元的应力场的变化是密切相连的。通过应力场的数值模拟及基于试验研究的力电耦合关系来分析研究电磁辐射场在煤岩中的分布规律，将为揭示各种因素对煤岩变形破裂电磁辐射的影响关系提供一种新的研究方法，是一种新的研究思路，将完善煤岩变形破裂电磁辐射监测和检测理论以及促进电磁辐射预测技术的发展。力电耦合的研究路线为：试验研究 理

论分析 数值模拟 力电耦合 应用研究，如图 1 所示。

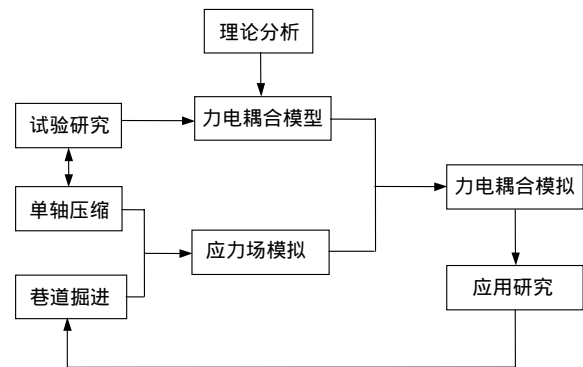


图 1 研究路线示意图

Fig.1 Schematic diagram of researching route

电磁辐射信号的产生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。本文在文[16]中利用煤岩损伤力学和强度统计理论推导出了煤岩变形破裂电磁辐射信号强度与煤岩内部应力之间的耦合关系可用多项式表征，即

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

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。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 0.90 以上，说明其相关性非常好，这与理论分析是相吻合的。

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

样品来源	拟合方程式	相关系数 R^2
权台 1#	$y = -0.0093x^3 + 0.4273x^2 - 1.8869x + 33.5560$	0.9546
权台 2#	$y = -0.0029x^3 + 0.0379x^2 + 2.1787x + 18.5650$	0.9670
权台 3#	$y = 0.0045x^3 - 0.1358x^2 + 2.4442x + 18.8480$	0.9606
东滩 1#	$y = 0.0063x^3 + 0.0246x^2 + 0.2494x + 9.4737$	0.9472
东滩 2#	$y = 0.0167x^3 - 0.2836x^2 + 1.9758x + 11.3840$	0.9153
义马 1#	$y = 0.0012x^3 + 0.0313x^2 + 0.5400x + 8.5449$	0.9557

力电耦合计算时考虑到电磁辐射信号在煤岩介

质中传播时会衰减, 采取如下方法处理:

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

式中: $E_m = E_m(t)$ 为电磁辐射源在 t 时刻的幅值; $\sigma = \sigma(t)$ 为 t 时刻电磁辐射源所在微元体所受的轴向应力; a, b, c, d 为试验常数; E 为实际监测到的电磁辐射信号幅值。

FLAC(fast Lagrangian analysis of continua)是目前公认的优秀的岩土力学数值计算软件包之一, 由美国国际著名岩土力学咨询公司 Itasca 花了 6 a 时间于 1992 年开发而成。在采矿工程中, 许多学者利用 FLAC 软件对采矿过程中围岩活动规律及巷道围岩稳定性问题涉及到岩体力学特性、围岩压力、支护围岩相互作用关系及巷道与工作面的时空关系等一系列复杂的力学问题进行了一系列的研究, 取得了显著的效果^[17]。力电耦合计算时先是对煤岩单轴压缩、矿山巷道掘进进行三维 FLAC 分析与应力场数值模拟计算, 提取出煤岩内部各单元的应力值; 然后是利用力电耦合方程对电磁辐射信号强度进行了计算。有关 FLAC 模拟计算的具体研究方法、模型的建立过程以及数据的提取等详细过程见文^[16]。力电耦合计算与试验结果及现场测定结果如图 2~5 所示。从图中可以看出, EME 幅值随加载时间的耦合计算结果与实验室测定结果在破裂前是一致的, 在临近破裂时达到最大; 较大范围区与应力集中区计算结果相差不大, 说明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, 其变化规律主要反映的是应力集中区煤岩破裂的程度。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; 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

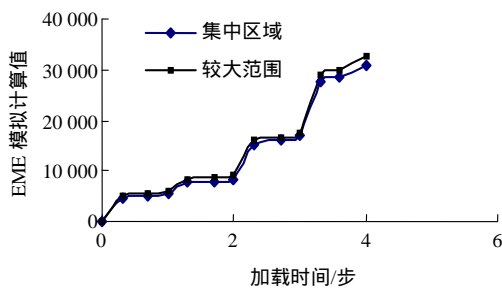


图 2 EME 模拟计算值随加载时间的关系(耦合结果)
Fig.2 EME vs. loading time for coal or rock

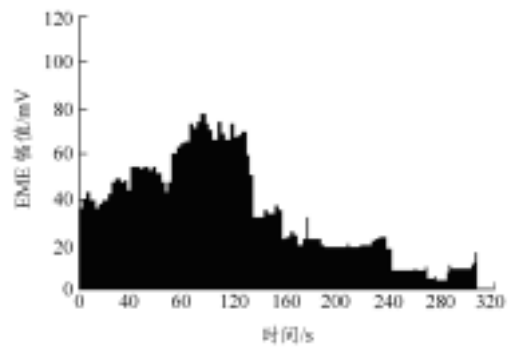


图 3 EME 幅值与加载时间关系的试验结果

Fig.3 Experimental results of EME strength vs. loading time

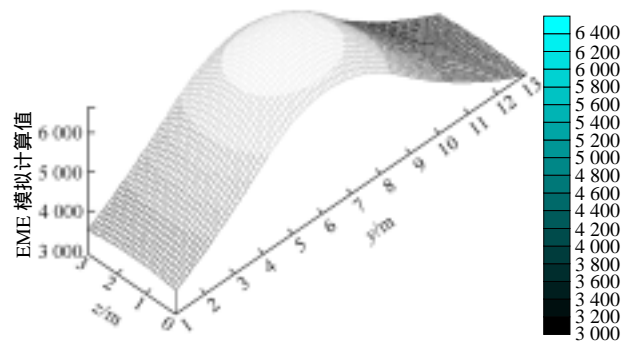


图 4 巷道迎头煤岩体 EME 模拟计算值在掘进方向的分布
Fig.4 EME distribution along excavation direction of head-on

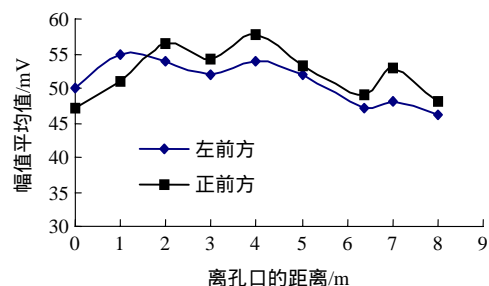


图 5 EME 现场测定幅值平均值与钻孔不同深度的关系
Fig.5 Practical EME values with different boring depths

化相同的趋势。因此证明了基于 FLAC 数值模拟的力电耦合模型的正确性。

4 煤岩动力灾害电磁辐射预测技术发展趋势与展望

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。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。因此,本文的研究成果对于合理利用电磁辐射法预测煤岩动力灾害现象具有下面2方面的意义:(1)获得了可以从电磁辐射信号与应力耦合的角度来研究煤与瓦斯突出、冲击矿压等煤岩动力灾害危险性预测的电磁辐射预测技术;(2)得到了电磁辐射信号主要来源于应力集中区的结论,为煤岩动力灾害危险源的初步定位和定向研究打下了基础。

尽管从力电耦合的角度对电磁辐射监测技术进行初步研究,但是文[17]根据地震孕育、发生过程中岩石破裂的特点,提出电磁辐射的有限移动源模型,认为不同形状、不同破裂方式的电磁激励源的辐射,是地震电磁观测不确定性的一个重要原因。同样煤岩变形破裂过程电磁辐射信号产生源也随着采掘过程的进行而在不断移动,因此还有许多工作要做,下面对有待研究的问题和方向进行展望。

(1) 由于在煤岩变形破电磁辐射的产生与传播不仅与应力有关,而且与电磁辐射信号的产生机制、煤岩力学特性、煤岩内部水和瓦斯流动、电磁辐射信号的衰减有关,天线接收的信号是电磁场量的矢量叠加,因此有必要对电磁辐射产生机制、传播的影响因素进行进一步的研究;

(2) 对于预测预报煤岩动力灾害现象,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。

5 结 语

(1) 与常规预测方法相比,电磁辐射预测法是1种有效的煤岩动力灾害危险性预测方法,并能实现非接触预测,对提高生产效率和降低工人劳动强度具有重要的实际意义;

(2) 煤岩动力灾害电磁辐射预测法研究现状的论述与分析表明,电磁辐射的产生机制、动力灾害危险区域的定向定位还缺乏深入系统的研究;

(3) 从新的角度,利用新的研究思路对煤岩变

形破裂电磁辐射力电耦合研究方法进行了研究,研究与应用效果表明:该方法为现场应用电磁辐射方法和技术准确预测预报灾害动力现象以及研究煤岩体变形破裂较为强烈区域的电磁辐射定位技术提供了可靠的理论基础,对于完善煤岩变形破裂电磁辐射监测和检测理论具有重要的理论和现实意义;

(4) 煤岩动力灾害电磁辐射监测技术的发展趋势是,消除或减弱外界干扰,实现定位监测和定量预报,进一步地研究电磁辐射产生机制、传播的影响因素。

参考文献(References):

- [1] 冀林名,何学秋.采矿地球物理学[M].北京:中国科学文化出版社,2002.(Dou Linming, He Xueqiu. Geophysics of Mining[M]. Beijing: China Science and Culture Press, 2002.(in Chinese))
- [2] 冀林名,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,2002.(Dou Linming, He Xueqiu. Theory and Technology of Rock Burst Prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.(in Chinese))
- [3] 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.(He Xueqiu, Wang Enyuan, Nie Baisheng, et al. Electromagnetic Dynamics of Coal or Rock Rheology[M]. Beijing: Science Press, 2003.(in Chinese))
- [4] Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Macro and micro-mechanism of effect of EME on CBM adsorption in coal[A]. In: Proc. the 1st Mine Environment and Ventilation Symposium[C]. India: Science Press, 2000. 121-128.
- [5] He Xueqiu, Wang Enyuan, Liu Zhenqiang. Experimental study on the electromagnetic radiation(EMR)during the fracture of coal or rock[A]. In: Proceedings of the '99 International Symposium on Mining Science and Technology[C]. Beijing: Science Press, 1999. 133-136.
- [6] 石显鑫,蔡栓荣,冯宏,等.利用声发射技术预测预报煤与瓦斯突出[J].煤田地质与勘探,1998,26(3):60-65.(Shi Xianxin, Cai Shuanrong, Feng Hong, et al. The prediction of coal and gas outburst using the acoustic emission technique[J]. Coal Geology and Exploration, 1998, 26(3): 60-65.(in Chinese))
- [7] 苏文叔.利用瓦斯涌出动态指标预测煤与瓦斯突出[J].煤炭工程师,1996,(5):1-7.(Su Wenshu. Probing into the prediction of coal and gas outburst with dynamic index of gas emission[J]. Coal Engineer, 1996, (5): 1-7.(in Chinese))
- [8] 马玉虎,王培玲,吴红岩.电磁辐射与孕震过程的初探[J].高原地震,2001,13(3):24-30.(Ma Yuhu, Wang Peilin, Wu Hongyan.

- Preliminary discussion on electromagnetic radiation and seismogenic process[J]. Plateau Earthquake Research, 2001, 13(3): 24–30.(in Chinese))
- [9] 熊皓. 地震电磁辐射研究的新进展[J]. 地震学报, 1991, 13(2): 254–258.(Xiong Hao. New progress in electromagnetic radiation research of earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 1991, 13(2): 254–258.(in Chinese))
- [10] 郭自强, 尤俊汉, 李高, 等. 破裂岩石的电子发射和压缩原子模型[J]. 地球物理学报, 1989, 32(2): 173–177.(Guo Ziqiang, You Junhan, Li Gao, et al. Model of electron emission and compressed atom for fractured rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1989, 32(2): 173–177.(in Chinese))
- [11] 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.(He Xueqiu, Liu Mingju. Fracture Electromagnetic Dynamics of Coal or Rock Containing Gas[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1995.(in Chinese))
- [12] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的试验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 131–137.(Wang Enyuan, He Xueqiu. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 131–137.(in Chinese))
- [13] 窦林名. 煤岩突变的声电效应规律及其应用研究[博士后研究报告][R]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.(Dou Linming. Study on the effect and application of AE and EME of coal or rock mutation [Postdoctoral Report][R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.(in Chinese))
- [14] 聂白胜. 含瓦斯煤岩破裂力电效应的机制研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.(Nie Baisheng. Research on mechanism of stress-electric effect during the fracture of coal or rock containing gas[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.(in Chinese))
- [15] 钱建生, 何学秋, 王恩元, 等. 煤岩破裂过程电磁波传播特性的分析[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 392–394.(Qian Jiansheng, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Analysis of electromagnetic wave's propagating characteristic process of coal rock outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 392–394.(in Chinese))
- [16] 肖红飞. 煤岩变形破裂电磁辐射与应力耦合规律研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003.(Xiao Hongfei. Research on the coupling laws between EME and stress during the fracture of coal or rock[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2003.(in Chinese))
- [17] 董积平, 高攸纲. 有限移动源的电磁波辐射[J]. 北京邮电大学学报, 2001, 24(3): 89–92.(Dong Jiping, Gao Yougang. Electromagnetic radiation of the finite moving source[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2001, 24(3): 89–92.(in Chinese))