

基于力电耦合煤岩特性对 煤岩破裂电磁辐射影响的研究

Research on the influence of coal and rock mechanic features
on EME based on the coupling laws between EME and stress

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: 为了有效地预测预报和治理煤岩动力灾害现象, 在利用实验研究、理论分析和数值模拟方法研究煤岩变形破裂电磁辐射和应力耦合规律的基础上, 研究了煤岩特性对煤岩变形破裂电磁辐射的影响。研究表明: 巷道掘进过程周围煤岩特性如体积弹性模量、内聚力和内摩擦角等对煤岩内部应力分布有较大的影响, 应力峰值距离煤壁距离随着加载应力和采深的增加是逐渐增大的, 应力峰值距煤壁距离随着煤岩体积模量、内聚力和内摩擦角的增加是逐渐减小的; 随巷道两帮煤岩体积模量、内聚力和内摩擦角的降低, 在监测点电磁辐射信号是逐渐减弱的, 说明一方面是由于煤岩内部变形破裂程度降低即应力集中程度降低, 另一方面是应力集中区距离监测点越远所致, 力电耦合计算结果表明, 通过监测电磁辐射信号的变化规律一方面可以来评价煤岩内部应力集中程度, 一方面可评价煤岩动力灾害的危险性。

关键词: 煤岩特性; 煤岩变形破裂; 力电耦合; 电磁辐射(EME); 应力场; 数值模拟

中图分类号: TD 713.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)05-0663-05

作者简介: 肖红飞(1971-), 男, 博士, 副教授, 从事安全监测理论及技术和相关方面的研究工作。

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

(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: For the purpose of predicting and controlling dynamical disasters of coal and rock efficiently, the influence of mechanical features of coal and rock on EME during the deformation and fracture of coal or rock is studied on the basis of the coupling laws between EME and stress by using experimental research, theoretical analysis and numerical simulation. The research results show that the mechanical features of coal and rock such as volume modulus, cohesion and internal friction angle around the roadway during the tunnel excavation have a great influence on stress distribution. The distance of peak stress away from coal wall increases with the increase of loading stress and excavation depth, and decreases with the increase of volume modulus, cohesion and internal friction angle. With the decrease of volume modulus, cohesion and internal friction angle of coal and rock around the roadway, the EME signals in the detected place will gradually become weak because of the reduction of the deformation and fracture of coal or rock. So according to the coupling calculated results, by detecting the EME signals we can estimate on the one hand the stress concentration degree and, on the other hand, the danger to dynamical disasters of coal and rock.

Key words: coal and rock mechanical features; deformation and fracture of coal or rock; couples between EME and stress; electromagnetic emission (EME); stress fields; numerical analogy

0 引言*

研究表明^[1~7], 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的预测预报这些灾害动力现象, 并且可以实现非接触式预测; 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。何学秋、窦林名^[8]通过建立的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; 为了治理冲击矿压灾害, 利用数值模拟方法研究了巷道周围煤岩体的体积弹性模量、内聚力和内摩擦角等对应力分布的影响, 但是对电磁辐射

的影响没有研究^[9]。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, 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, 受载应力与煤岩变形破裂过程产生的电磁辐射信号具有耦合关系, 因此在二者之间可以建立微观和宏观的桥梁。

在煤岩变形破裂电磁辐射信号与应力耦合关系研究基础上, 可以分析矿山巷道掘进过程中巷道周围

* 基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(02JJY2076, 01JJY2152); 国家安全生产科技发展项目(04-232); 国家自然科学基金资助项目(50204010)

收稿日期: 2003-11-21

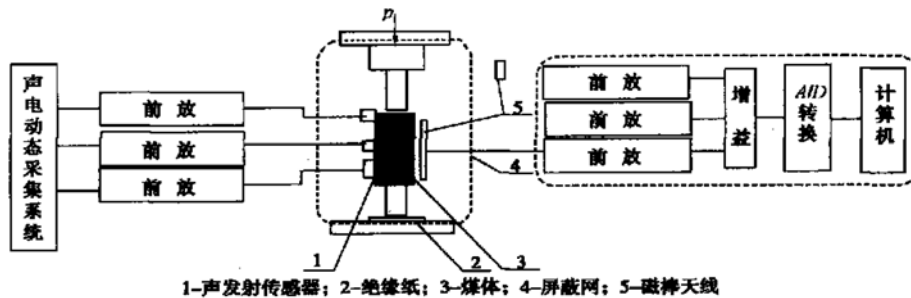


图1 电磁辐射实验系统示意图

Fig. 1 Experimental system for EME

煤岩体力学特性对应力分布以及产生的电磁辐射信号分布的影响,对于完善煤岩变形破裂电磁辐射监测和检测理论,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提供可靠的理论基础,对于进一步揭示煤岩灾害动力过程及灾害发生机理,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的理论和现实意义。

1 力电耦合模型

1.1 实验研究

为了考察煤岩变形过程中电磁辐射的变化特征,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进行实验。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。实验系统框图如图1所示,本实验系统由电液伺服机加载系统、声电动态监测及数据采集系统、DiSP-24型声发射监测系统、载荷-位移记录系统组成。图2至图3为煤岩单轴压缩电磁辐射信号实验结果,从图中可看出:随加载时间的增加,煤岩样品轴向应力先是逐渐增大,达到峰值后快速降低,在峰值前二者基

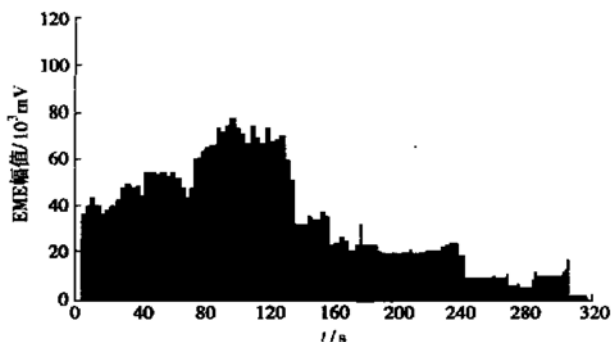


图2 EME 幅值与加载时间的关系

Fig. 2 The EME value versus loading time

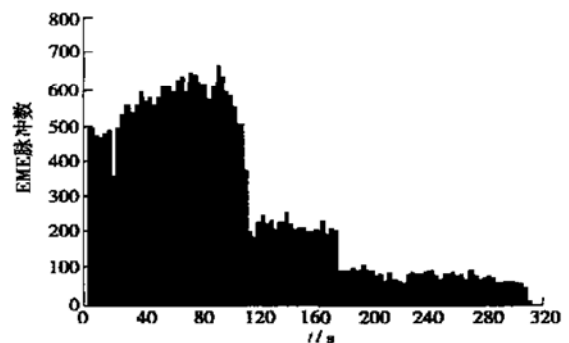


图3 EME 脉冲数与加载时间的关系

Fig. 3 The EME pulse number versus loading time

本上呈现正相关的关系;电磁辐射的幅值、脉冲数在煤岩主破裂前与应力基本成正相关的关系;出现峰值后降低,实验的各个样品均呈现此变化规律。表1所示为实验样品在单轴压缩时煤岩破裂前即达到应力峰值前电磁辐射幅值与轴向应力之间的实验回归方程。从表中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,这与前面的理论分析结果是相吻合的。

表1 电磁辐射幅值(E)和轴向应力(σ)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 [#]	$E = -0.0093\sigma^3 + 0.4273\sigma^2 - 1.8869\sigma + 33.556$	0.9546
权台 2 [#]	$E = -0.0029\sigma^3 + 0.0379\sigma^2 + 2.1787\sigma + 18.565$	0.9670
权台 3 [#]	$E = 0.0045\sigma^3 - 0.1358\sigma^2 + 2.4442\sigma + 18.848$	0.9606
东滩 1 [#]	$E = 0.0063\sigma^3 + 0.0246\sigma^2 + 0.2494\sigma + 9.4737$	0.9472
东滩 2 [#]	$E = 0.0167\sigma^3 - 0.2836\sigma^2 + 1.9758\sigma + 11.384$	0.9153
义马 1 [#]	$E = 0.0012\sigma^3 + 0.0313\sigma^2 + 0.5400\sigma + 8.5449$	0.9557

1.2 力电耦合方程的建立

笔者在文献[10]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与煤岩内部应力之间的耦合关系,如下简述。

假设微元体一旦破裂就不能恢复其强度,且随着变形的增加破裂的微元体数目也在不断增加。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 $\sigma + d\sigma$, 为简单计, 令 $m = 1$, 围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$, 在单轴压缩时, 围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 可以得到在应力变化 $\Delta\sigma = \sigma_1(2) - \sigma_1(1)$ 很小时煤岩体变形破裂过程中产生的电磁辐射脉冲数、电磁辐射强度与加载主应力之间的关系

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

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

由上述理论分析可知, 煤岩变形破裂过程产生的电磁辐射脉冲数和瞬时强度与加载应力或应力变化之间呈现非线性的关系, 可以用多项式来表征。考虑到电磁辐射信号在煤岩介质中传播时的衰减, 因此力电耦合计算时采取如下方法

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

式中 $E_m(t)$ 为电磁辐射源在 t 时刻的幅值; σ 为电磁辐射源所在微元体所受的轴向应力; a, b, c, d 为实验常数; α 为衰减系数, β 为相位常数。

2 煤层力学性质影响

由于煤岩力学性质对矿山巷道掘进过程中煤岩体内部应力分布具有较大的影响, 而煤岩变形破裂过程电磁辐射信号随着内部应力的变化而变化, 因此为了考察煤岩力学性质对电磁辐射信号的影响规律, 本文首先利用 FLAC 程序对煤岩内部应力场进行模拟, 然后在力电耦合模型的基础上对电磁辐射信号变化规律进行研究。

FLAC 程序考虑了煤岩地层的层状特征, 煤岩破坏后具有残余内聚力和内摩擦角等力学特征。模拟采用平面应变模型和 Mohr-Coulomb 应变软化塑性准则。模型分四层, 由底板、煤层、直接顶和老顶组成, 模拟独巷掘进过程, 因对称性, 模型大小取为 1/2, 即 $62 \text{ m} \times 48 \text{ m}$; 巷道为矩形, 宽高为 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。

2.1 煤岩体力学性质改变对应力分布的影响

应力场数值模拟时, 考虑到模型具有对称性, 改变巷道一帮 8.0 m 范围内煤岩层的体积弹性模量、内聚力和内摩擦角, 分析煤岩层两帮内正应力、剪切应力和塑性区状态图, 分析应力峰值和应力峰值距巷道周边距离的变化规律。力学参数变化如表 2 所示。

表 2 巷道周边煤岩力学参数变化表

Table 2 Different mechanical parameters of coal or rock around tunnel

参数	方案一	方案二	方案三
K/GPa	10	5	2
C/MPa	1.0	0.5	0.1
$\varphi/(\circ)$	30	28	25

数值模拟计算结果如图 4~11 所示, 图中 ($H =$

$600, \sigma = 15$) 指采深为 600 m , 加载应力水平为 15 MPa 。由图可看出, 随着加载应力的增加, 巷道两帮煤岩体的塑性屈服区逐渐向里扩展, 且出现剪切破坏和拉破坏, 两帮煤岩体开始向巷道空间突出; 不同的加载应力水平下, 塑性区范围是不同的, 应力越大, 塑性区范围越大, 且峰值距离煤岩壁面越远; 应力峰值距离煤壁距离随着加载水平和采深的增加是逐渐增大的; 应力峰值距煤壁距离随着煤岩体积模量、内聚力和内摩擦角的降低是逐渐增大的。

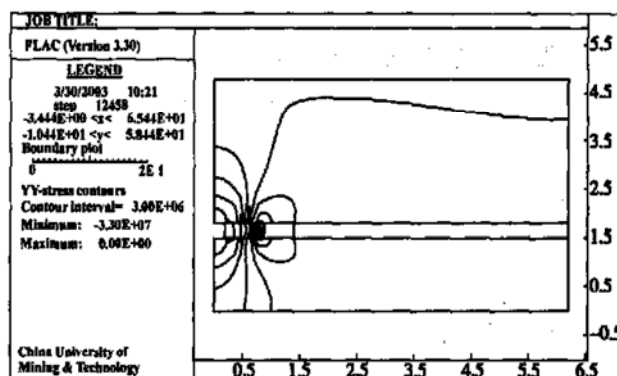


图 4 巷道帮正应力等值线 ($H = 600, \sigma = 15$)

Fig. 4 Isoline of normal stress along tunnel wall ($H = 600, \sigma = 15$)

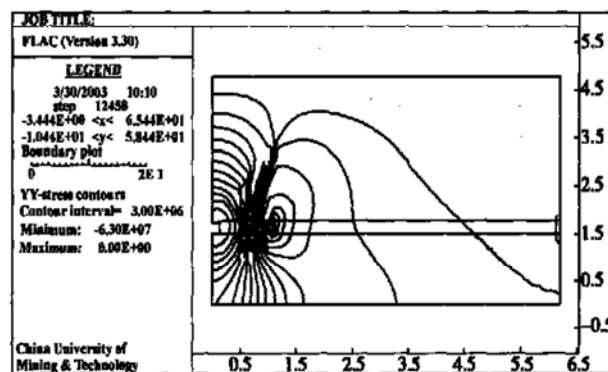


图 5 巷道帮正应力等值线 ($H = 1000, \sigma = 37.5$)

Fig. 5 Isoline of normal stress along tunnel wall ($H = 1000, \sigma = 37.5$)

2.2 煤岩体力学性质改变对电磁辐射信号分布的影响

为了考察巷道两帮煤层力学性质对监测地点电磁辐射信号的影响, 在 FLAC^{2D} 3.3 软件进行不同加载水平下应力场数值模拟基础上, 借助于取出的应力集中区数据通过力电耦合关系求出不同情况下的电磁辐射值。力电耦合计算结果如图 12~15 所示, 其中监测点为巷道高度方向的中部, 电磁辐射频率为 200 KHz , 耦合公式中的系数取 $a = 0.0063, b = 0.0246, c = 0.2494, d = 9.4737$ 。从图中可看出, 随巷道两帮煤岩体积模量、内聚力和内摩擦角的降低, 在监测点电磁辐射信号是逐渐减弱的, 说明一方面是煤岩内部变形破

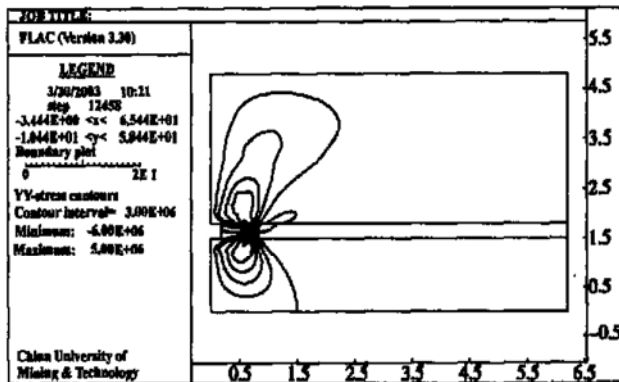
图 6 巷道帮剪应力等值线 ($H = 600, \sigma = 15$)

Fig. 6 Isoline of shear stress along tunnel wall
($H = 600, \sigma = 15$)

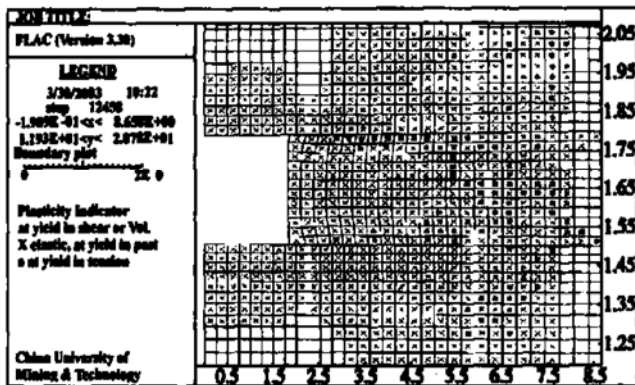
图 7 巷道帮塑性区状态图 ($H = 600, \sigma = 15$)

Fig. 7 The plastic zone along tunnel wall ($H = 600, \sigma = 15$)

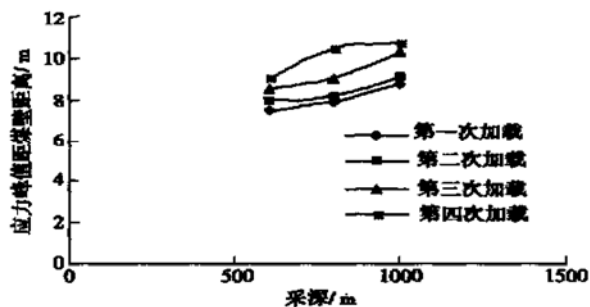


图 8 峰值距煤壁距离与采深之间的关系

Fig. 8 Peak stress position versus excavation depth

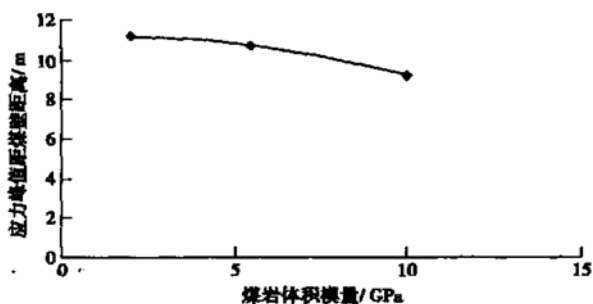


图 9 峰值距煤壁距离与体积模量的关系

Fig. 9 Position of peak stress versus volume modulus

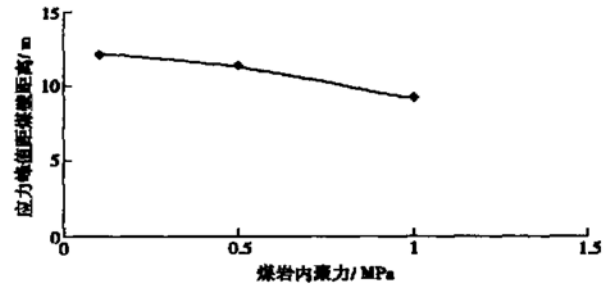


图 10 峰值距煤壁距离与内聚力的关系

Fig. 10 Position of peak stress versus cohesion

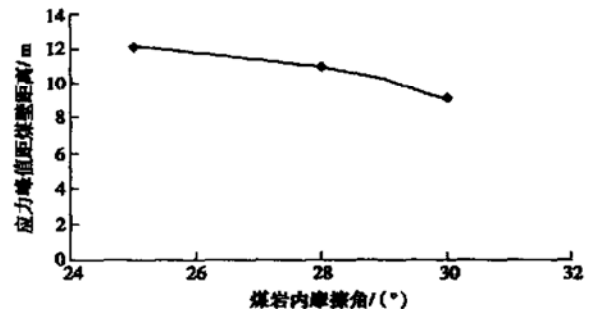


图 11 峰值距煤壁距离与内摩擦角的关系

Fig. 11 Position of peak stress versus internal friction angle

裂程度降低即应力集中程度降低, 另一方面是应力集中区距离监测点越远所致, 这从图 15 应力峰值位置与煤岩体积模量之间的关系曲线也可以得到证明。力电耦合计算结果也表明, 可以通过监测电磁辐射信号的变化规律来评价煤岩内部应力集中区域和集中程度的变化。

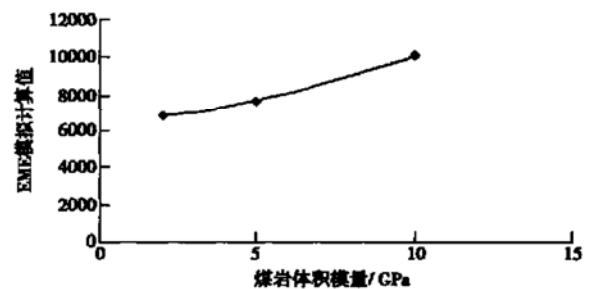


图 12 电磁辐射强度与煤岩体积模量的关系

Fig. 12 EME strength versus volume modulus of coal

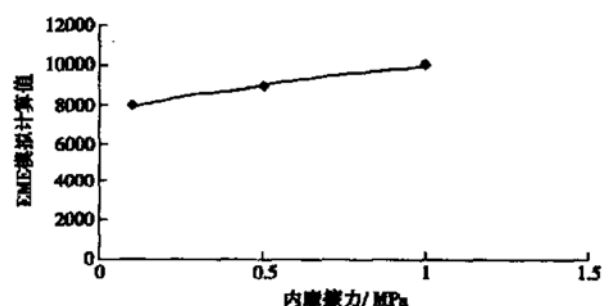


图 13 电磁辐射强度与煤岩内聚力的关系

Fig. 13 EME strength versus cohesion of coal

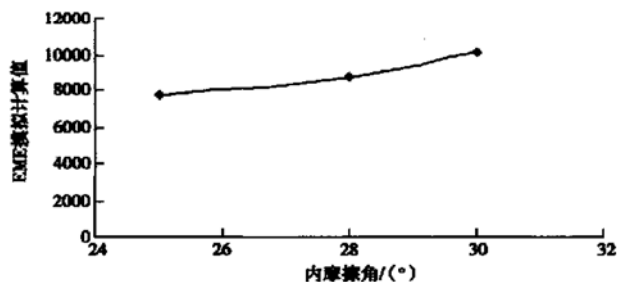


图14 电磁辐射强度与内摩擦角的关系

Fig. 14 EME strength versus internal friction angle

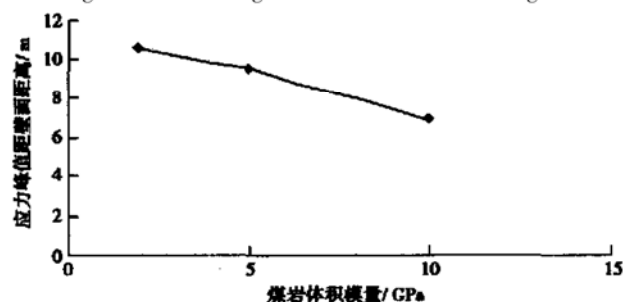


图15 峰值距煤壁距离与煤岩体积模量的关系

Fig. 15 Position of peak stress versus volume modulus

3 结 论

利用FLAC有限元软件和煤岩变形破裂电磁辐射与应力之间的力电耦合关系可以有效模拟矿山巷道掘进时煤岩体内部应力分布以及电磁辐射信号的变化规律,可以分析不同影响因素的影响程度,从而为现场实际应用非接触电磁辐射法预测煤岩灾害动力现象打下基础。通过上述实验研究、理论分析和力电耦合模拟计算,可以得到以下结论:

(1) 根据应力场数值模拟结果可知,矿山巷道掘进过程煤岩特性如体积弹性模量、内聚力和内摩擦角等均对煤岩内部应力分布有较大影响。

(2) 随着煤岩体积模量、内聚力和内摩擦角的增

加,应力峰值距煤壁距离逐渐减小;随着加载水平和采深的增加,应力峰值距煤壁距离则是逐渐增大的。

(3) 随着巷道两帮煤岩体积模量、内聚力和内摩擦角的降低,在监测点电磁辐射信号是逐渐减弱的,一方面是因为煤岩内部变形破裂加剧即应力集中程度降低,另一方面是因应力集中区距离监测点越远所致。

(4) 力电耦合计算结果表明,通过监测电磁辐射信号的变化规律一方面可以用来评价煤岩内部应力集中区域和集中程度的变化,一方面可以评价煤岩动力灾害的危险性。

参考文献:

- [1] 窦林名,何学秋.采矿地球物理学[M].北京:中国科学文化出版社,2002.
- [2] 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.
- [3] 刘明举,何学秋.突出煤的电磁响应特征研究[J].辽宁工程技术大学学报,2000,19(5):470-473.
- [4] Bai-sheng Nie, etc. Macro and Micro-Mechanism of Effect of EME on CBM Adsorption in coal, First Mine Environment and Ventilation Symposium, India, 2000. 121-128.
- [5] Xue-qiu He, Eir-yuan Wang, Zhen-tang Liu. 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, 1999.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 窦林名.煤岩突变的声电效应规律及其应用研究[R].徐州:中国矿业大学,2001,2.
- [9] 窦林名,何学秋.煤岩特性对应力分布影响的实验研究[J].辽宁工程技术大学学报,2001,20(4):484-486.
- [10] 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.