

基于 FLAC^{3D} 模拟的矿山巷道掘进煤岩变形 破裂力电耦合规律的研究

肖红飞¹, 何学秋², 冯涛¹, 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 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 首先通过 FLAC^{3D} 软件对矿山巷道掘进过程中煤岩内部应力场分布规律进行了数值模拟, 并提取了各个单元的应力值; 然后根据数值模拟应力值和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的力电耦合关系式研究了巷道掘进过程中产生的电磁辐射信号变化规律。研究表明: 模拟应力值的变化规律与理论分析和现场实际围岩应力显现规律是一致的, 从而说明该方法能正确模拟现场煤岩受采动影响时内部应力场的变化规律; 将较大范围煤岩体单元当作电磁辐射源时的计算结果只比将应力集中区看作电磁辐射源的计算值大 3%~8%, 说明在现场监测到的 EME 强度反映的是应力集中区煤岩变形破裂的程度; EME 强度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; 随着迭代时间的增加, EME 强度在同一监测点的变化关系先是逐渐增加, 增加到一定程度后趋于平缓, 反映了煤岩体内部应力的变化规律; 巷道开挖后内部应力变化的快慢表现在 EME 强度的变化上。现场钻孔内不同深度 EME 强度测定结果基本上也呈现出与模拟结果相同的变化趋势, 同时证明了力电耦合方法的合理性。

关键词: 采矿工程; FLAC^{3D}; 巷道掘进; 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:** 1000-6915(2005)05-0812-06

RESEARCH ON COUPLING LAWS BETWEEN EME AND STRESS FIELDS DURING DEFORMATION AND FRACTURE OF MINE TUNNEL EXCAVATION BY FLAC^{3D} SIMULATION

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

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

Abstract: First the distribution laws of stress fields in the course of mine tunnel excavation are simulated by means of FLAC^{3D} software, and the stress value in each unit is obtained. Then according to the stress values and the coupling laws between electromagnetic emission(EME) strength and stress fields during the deformation and fracture of coal or rock, the changing laws of EME strength during mine tunnel excavation are studied. The results show that the changing rules of simulated stress are in accordance with that of the theoretical analysis and the practical strata stress, which shows that the FLAC^{3D} method can appropriately simulate the changing law of stress field in the course of mine tunnel excavation. The simulated values by taking a large area as EME resources are only 3~8 percent larger than that by taking the stress concentration zone as EME resources, which show that EME signal received on the stress concentration zone reflects the deformation and fracture degree of coal or rock.

收稿日期: 2003-11-06; 修回日期: 2003-12-19

基金项目: 国家安全生产科技发展计划项目(04-232); 湖南省科技攻关项目(03JTY2005)

作者简介: 肖红飞(1971-), 男, 2003年于中国矿业大学获安全技术及工程专业博士学位, 现为副教授, 主要从事安全监测理论及技术和相关方面的研究工作。E-mail: xhfdyl@sohu.com

The EME signal in head-on area along the direction of tunnel excavation increases constantly to the summit value and then falls down along with the computation time step. The EME strength in the same monitoring point increases firstly, and then increases slightly with the increase of the computation time step. The changing of EME strength reflects the changing of internal stress after excavation. The practical measured results of EME strength have the same changing tendency as the simulated results, which also testify the feasibility of the coupling method between EME strength and stress.

Key words :mining engineering ;fast Lagrangian analysis of continua(FLAC) ;tunnel excavation ;deformation and fracture of coal or rock ; coupling between EME and stress ;electromagnetic emission(EME) ; stress fields ; numerical simulation

1 引言

非接触电磁辐射法是一种有效的预测预报冲击矿压、煤与瓦斯突出等煤岩灾害动力现象的方法,近年来取得了较大的成就^[1-9]。电磁辐射信号综合反映了冲击矿压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害现象的主要影响因素。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。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现象和宏观现象间的桥梁。文[10]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。

对煤岩变形破裂过程产生的电磁辐射信号进行研究,其目的主要是为了更好更有效地监测现场受载煤岩的动态破坏过程,以便有效地预测预报煤岩灾害动力现象。煤岩体是一种复杂的富含缺陷的非均质固体。矿山煤与瓦斯突出、煤爆等灾害动力现象的发生与煤岩体结构特点及其在变形破裂过程中应力集中即内部损伤的发展是密切相关的;而煤岩体变形破裂过程中产生的电磁辐射的强度、位置则与应力集中场的变化和方位紧紧联系在一起。

因此利用 FLAC^{3D} 对矿山巷道掘进过程迎头和两帮煤岩内部应力场进行数值模拟,然后通过煤岩受压变形破裂过程中产生的电磁辐射(electromagnetic emission, EME)强度与煤岩内部应力之间的力电耦合关系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研究,对进一步揭示煤岩灾害动力过程及灾害发生机理,对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 矿山巷道掘进围岩三维应力场的数值模拟

2.1 模型构建

连续介质快速拉格朗日差分法(fast Lagrangian analysis of continua, 简写 FLAC)是近年来逐步成熟完善起来的一种新型数值分析方法。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的岩体力学特性、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,取得了显著的成果^[11-13]。

矿山巷道开挖过程中受采动影响的弹塑性区域分布以及应力集中区域大小与巷道大小、埋深、煤岩力学性质、顶底板特性有关,因此模型设计为3层,每层分3块,从左至右生成:上层是直接顶和老顶,尺寸为43 m×40 m×20 m;中间层是煤层,尺寸为43 m×40 m×3 m;下层是底板,尺寸为43 m×40 m×10 m;巷道为矩形巷道,尺寸为3 m×3 m。模型共划分为121 500个六面体单元,单元大小划分按照从模型外边界到巷道逐渐缩小的原则,缩小比例为0.95。模型计算时采用 Mohr-Coulomb 应变软化准则,每次开挖2 m,共开挖16 m。当煤岩体在采动影响作用下应力重新分布时,一些区域会发生塑性屈服,其力学性质就会发生变化,因此在进行应力场数值模拟计算时对塑性区域进行了应变软化处理,即调整其力学性质,以便更好地模拟实际情况。处理方式主要是根据应变的程度对内摩擦力和内摩擦角进行弱化,一般是变形越大,则内摩擦力和内摩擦角越小。

根据模型的几何尺寸划分计算网格,给相应层位岩体赋予煤岩物理力学参数,建立数值计算模型。计算前按照模型所在的深度向模型施加载荷,并对三维模型侧面和底面提供约束,计算时首先根据模

拟的条件构成初始应力场，岩体垂直应力 s_z 按照岩体自重($s_z = gH$)来计算；岩体的水平应力 s_x, s_y 根据现场地应力测量结果(一般 $s_x = s_y = 0.45s_z$)和岩体泊松效应计算；然后根据巷道掘进的方式分步开挖，获得不同掘进距离和地质条件下的煤岩体应力场和破坏场，并在计算过程中提取数据(主要是各个单元体在不同时期的最大主应力值)。采用应力边界条件，模型的上表面施加均匀的垂直压应力，模型下表面垂直和水平位移固定，模型两侧面施加随着深度变化的水平压应力。其模拟巷道示意图和坐标示意图为图 1, 2。

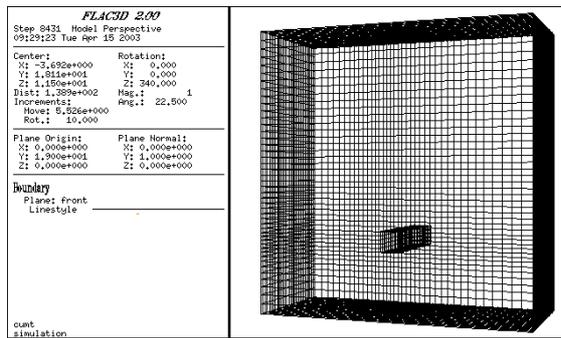


图 1 模拟巷道示意图(立体图)

Fig.1 Sketch of simulated tunnel

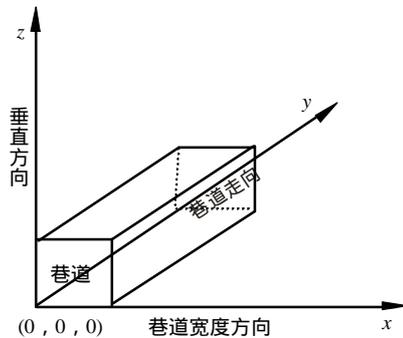


图 2 巷道掘进模型坐标示意图

Fig.2 Sketch of coordinates for tunnel excavation model

2.2 FLAC^{3D} 模拟结果分析

模拟采用的 FLAC^{3D} 有限元程序考虑了煤系地层的层状特征、岩体破坏后具有残余粘聚力和残余内摩擦力等力学特征，以及煤岩体变形破坏的大变形等特征。下面以淮南潘三矿 1452 工作面开采 13[#] 煤层巷道掘进为计算依据，上顺槽长度为 1 060 m，下顺槽长度为 1 070 m，倾斜长度最大为 200 m，最小为 150 m。煤层厚度为 3.5~4.38 m，平均 3.9 m。煤层倾角为 12°~32°，平均 18°，本文模拟计算时没有考虑煤岩的倾斜情况。在进行数值模拟时，以 1452 工作面开切眼前下顺槽独巷掘进为对象，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，主要提取出各个单元的应力、应变值。

图 3, 4 为开挖 16 m 迭代 500 步后煤岩巷道中部纵切面和垂直巷道走向截面最大主应力分布图，可见当煤岩层开挖后，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。图 5 为煤层纵切面最大主应力等值线图。从

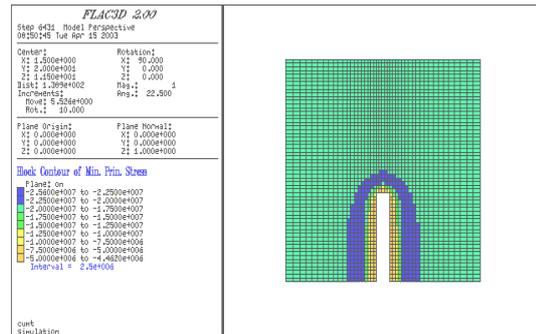


图 3 煤岩巷道中部纵切面最大主应力分布

Fig.3 Maximum stress distribution in middle longitudinal section of tunnel

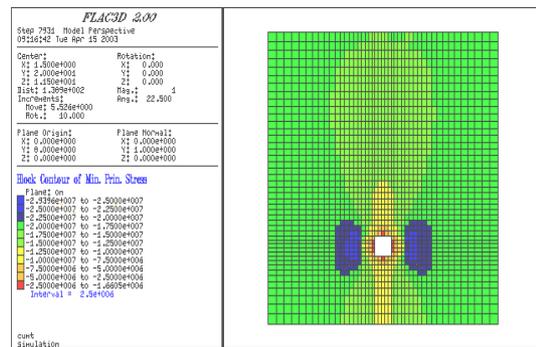


图 4 垂直巷道走向截面最大主应力分布

Fig.4 Maximum stress distribution of vertical section of tunnel

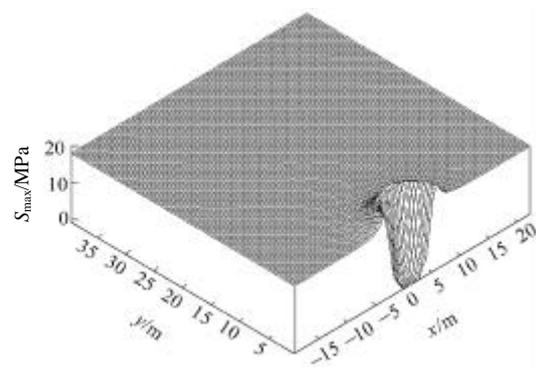


图 5 煤层纵切面最大主应力 S_{max} 等值线

Fig.5 Isolines of maximum stress of longitudinal section of coal layer

图中可看出：当开挖 2 m 后，在两帮应力集中区范围为距离巷道壁面 5 m 内，最大应力达到原岩应力的 1.4 倍，说明其受掘进影响较大。

从图 6, 7 可看出，当开挖 10 m 后，右帮应力集中区主要在离巷道壁面 3~5 m 处，在 $y = 0$ m 和 $y = 8$ m 处的截面的应力峰值位置是不同的，距离迎头越远的壁面的应力峰值距离巷道壁面越近，这相当于应力重新分配过程随着时间的延长，应力峰值逐渐向内部转移的动态过程，也就是说巷道周围的应变软化区范围逐渐扩大。而在距离壁面 2 m 范围内应力急剧降低，相当于应力降低区。开挖 16 m 后在距离开挖起点不同位置处煤层右帮垂直截面最大主应力等值线同样呈现出了这个规律，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。

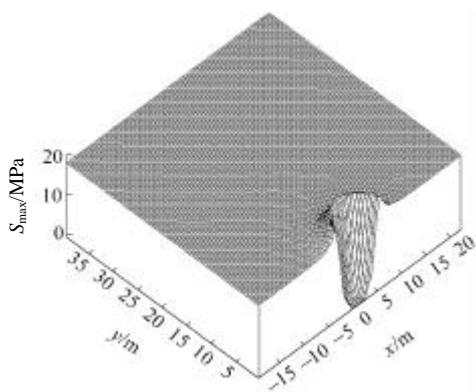


图 6 煤层纵切面最大主应力 S_{max} 等值线

Fig.6 Isolines of maximum stress of longitudinal section of coal layer

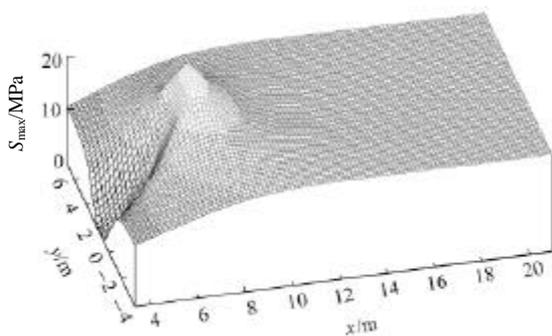


图 7 煤层右帮垂直截面最大主应力 S_{max} 等值线

Fig.7 Isolines of maximum stress of the right vertical section of coal layer

3 FLAC^{3D} 模拟时力电耦合计算结果分析

作者在文[14]中理论分析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，并在试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的关系可以用三次多项式来表征，同时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：

$$\dot{E} = E_m e^{i\omega t} e^{-gr} = (a s^3 + b s^2 + c s + d) e^{-ar} e^{i(\omega t - br)} \quad (1)$$

式中： E_m 为电磁辐射源在 t 时刻的幅值； s 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； \dot{E} 为实际监测到的电磁辐射信号幅值。

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 8~10 为基于上述 FLAC^{3D} 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 $H = 700$ m，取定式(1)中的系数 $a = -0.0029$ ， $b = 0.0379$ ， $c = 2.1787$ ， $d = 18.565$ 。可见：(1) 较大范围(本文规定为比应力集中区范围大 1 倍的范围)内的煤岩体单元当作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 EME 强度的变化规律主要反映的是应力集中区煤岩变形破裂的程度(如图 8)。(2) EME 强度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(如图 9)。(3) 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。随着迭代时间的增加，EME 强度在同一监测点的变化关系先是逐渐增加，增加到一定程度后趋于平缓，反映了煤岩体内部应力的变化规律(如图 10)。

图 11 为现场实际测定结果。可见现场钻孔内不

同深度测定的 EME 强度是不同的，一般规律是随着离孔口的距离的增加，先是逐渐增大，在离孔口大 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，同时也证明了力电耦合计算的合理性。

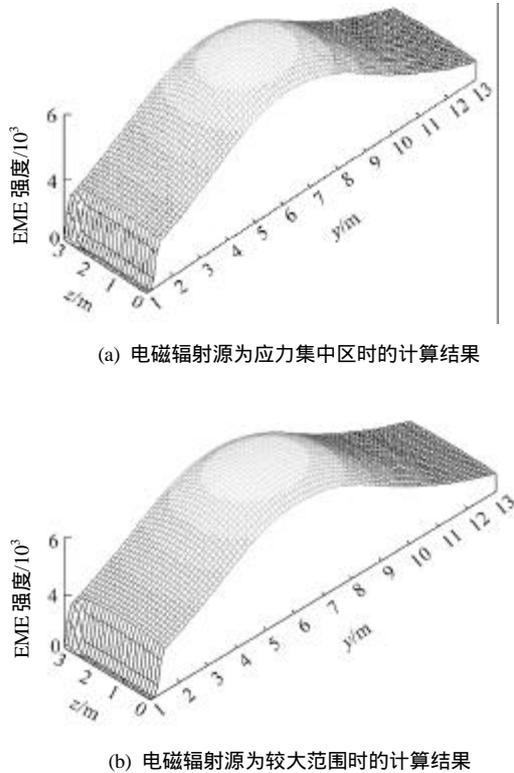


图 8 不同取值范围巷道迎头煤岩体 EME 强度在掘进方向的分布

Fig.8 EME distribution along excavation direction with different EME resource area

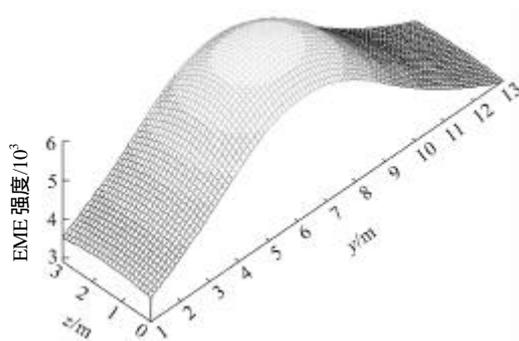
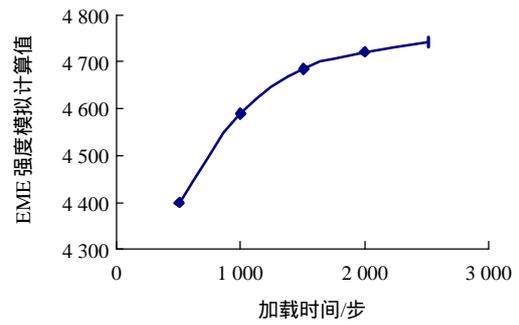


图 9 巷道迎头煤岩体 EME 强度在掘进方向的分布

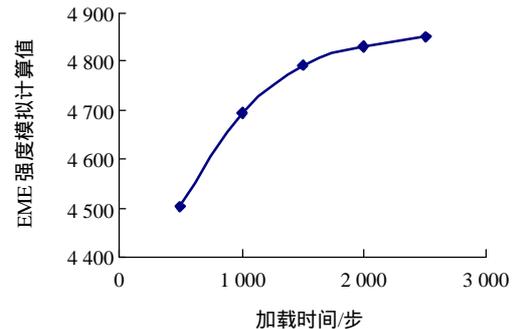
Fig.9 EME distribution along excavation direction in head-on of tunnel

4 结 论

(1) FLAC^{3D} 软件能够有效地数值模拟矿山巷道



(a) (x = 0 m, y = 16 m, z = 1.6 m)



(b) (x = 1.5 m, y = 16 m, z = 1.6 m)

图 10 巷道监测点 EME 强度的时变规律

Fig.10 EME vs. time in monitoring point

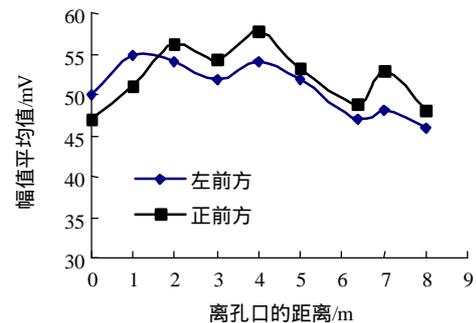


图 11 EME 强度现场测定幅值与钻孔不同深度的关系

Fig.11 The practical EME value in different boring depth

掘进过程中两帮和迎头内部应力场的分布规律，能正确反映应力集中区的动态变化，并能提取出煤岩内部各单元的应力值，为煤岩变形破裂电磁辐射信号与应力的耦合计算奠定了数据基础。

(2) 根据提取的 FLAC 应力计算值和煤岩受压变形破裂过程中产生的 EME 强度与煤岩内部应力之间的力电耦合三次多项式关系对巷道掘进过程中产生的电磁辐射信号变化规律进行了研究，结果发现：EME 强度随加载时间的变化与应力随时间的变化存在良好的对应关系，与试验结果的趋势是一致的；将应力集中区域看作为电磁辐射源区是可行的。

(3) 力电耦合计算结果表明，本文采用的数值

模拟 FLAC^{3D} 方法和力电耦合模型是合理的, 可以有效地模拟矿山巷道掘进过程中煤岩变形破裂电磁辐射信号的变化过程。

参考文献(References) :

- 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.(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))
- 2 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.(Dou Linming, He Xueqiu. Geophysics of Mining[M]. Beijing: China Science and Culture Press, 2002.(in Chinese))
- 3 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.(Dou Linming, He Xueqiu. Theory and Technology of Rock Burst Prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.(in Chinese))
- 4 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.(Liu Mingju, He Xueqiu. Characteristics of electromagnetic response of outbursts prone coal[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2000, 19(5): 470 - 473.(in Chinese))
- 5 钱书清, 郝锦琦, 邓明德等. 混凝土样品受压破裂过程中的电磁信号[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 797 - 800.(Qian Shuqing, Hao jinqi, Deng Mingde, et al. Electromagnetic signals of concrete samples during fracturing under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 797 - 800.(in Chinese))
- 6 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[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))
- 7 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.(Dou Linming, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Electromagnetic emission by fracture of coal or rock[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(12): 86 - 88.(in Chinese))
- 8 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.(Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Present situation and progress trend of prediction technology of coal and gas outburst[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6): 40 - 43.(in Chinese))
- 9 Nie Baisheng. Macro and micro-mechanism of effect of EME on CBM adsorption in coal[A]. In: Proceedings of First Mine Environment and Ventilation Symposium[C]. [s. l.]: [s. n.], 2000. 121 - 128.
- 10 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 & EME of coal or rock mutation [Post-Doctor Research Report][R]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.(in Chinese))
- 11 朱建明, 徐秉业, 朱峰等. FLAC 有限差分程序及其在矿山工程中的应用[J]. 中国矿业, 2000, 9(4): 78 - 81.(Zhu Jianming, Xu bingye, Zhu Feng, et al. FLAC and its application in the mining engineering[J]. China Mining, 2000, 9(4): 78 - 81.(in Chinese))
- 12 来兴平, 伍永平, 蔡美峰. FLAC 在地下巷道离层破坏非线性数值模拟中的应用[J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(3): 193 - 195.(Lai Xingping, Wu Yongping, Cai Meifeng. Application nonlinear numerical simulation during abscission layer destroying in underground road way[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2000, 20(3): 193 - 195, 217.(in Chinese))
- 13 康红普. 回采巷道锚杆支护影响因素的FLAC 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(Kang Hongpu. FLAC analysis on affecting factors to rock bolting in gate roads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- 14 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))