

煤岩电磁辐射的力-电耦合模型

何学秋,王恩元,魏建平,聂百胜,赵恩来,刘贞堂

中国矿业大学能源与安全工程学院,江苏徐州 221008

[摘要] 基于煤岩电磁辐射的力-电耦合机理和统计损伤力学理论,建立了煤岩电磁辐射的力-电耦合模型,并通过对 Weibull 形态参数 m 值的模拟研究,修正了煤岩电磁辐射力-电耦合模型,使其更具有准确性和实用性。运用修正后的煤岩电磁辐射力-电耦合模型对不同煤岩试样的 m 值及电磁辐射进行了模拟,煤岩电磁辐射的模拟结果与实验测试结果一致。

[关键词] 电磁辐射;力-电耦合;形态参数 m ;数值模拟

[中图分类号] O441.5, O346.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)17-0046-06

The Mechanical-electrical Coupling Model for EME of Coal or Rock

HE Xueqiu, WANG Enyuan, WEI Jianping, NIE Baisheng, ZHAO Enlai, LIU Zhentang

College of Energy and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221008, Jiangsu Province, China

Abstract: Based on the mechanical and electrical coupling in EME of coal or rock and the statistical theory of damage mechanics, a coupling model for EME of coal or rock is established in this paper, which is a modification of a previous model, based on the simulation study on Weibull morphological parameter m . The value of m and EME for different coal or rock samples are simulated by using the modified coupling model, and the results agree well with experimental values.

Key Words: EME; Mechanical-electrical coupling; morphological parameter m ; numerical simulation

CLC Numbers: O441.5, O346.5

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)17-0046-06

0 引言

煤岩变形破裂过程中产生电磁辐射和声发射,电磁辐射与煤岩体的载荷及变形破裂程度紧密相关^[1-15]。从本质上讲,煤岩体变形破裂是煤岩体在应力作用下微观缺陷或微裂纹形成、扩展、融合、贯通的结果,即材料内部损伤的结果。煤岩体的电磁辐射、声发射与煤岩体的损伤之间有着必然的联系。在煤岩声发射方面,利用损伤力学对声发射进行研究和模拟已有大量的报道^[13-15]。在煤岩电磁辐射研究方面,国内外学者对煤岩破裂电磁辐射效应及机理进行了大量的研究^[1-12],基于断裂力学、电动力学等建立了一些煤岩电磁辐射的微观数学物理模型^[2-5,7-10],并应用于初步的理论分析。但这些数

学模型多是微观的,无法满足实际应用的需求。建立煤岩电磁辐射的数学物理模型对于煤岩电磁辐射的数值模拟、数字实验及煤岩电磁辐射技术应用具有非常重要的意义。本文基于煤岩电磁辐射的力-电耦合机理和统计损伤力学理论,建立了煤岩电磁辐射的力-电耦合模型,并通过对 Weibull 形态参数 m 值的模拟研究,修正了煤岩电磁辐射力-电耦合模型,使其更具有准确性和实用性;运用修正后的煤岩电磁辐射力-电耦合模型对不同煤岩试样的 m 值及电磁辐射进行了模拟,煤岩电磁辐射的模拟结果与实验测试结果一致。希望该研究成果对于进行煤岩电磁辐射数值模拟和对煤岩体进行均质性分析具有指导意义。

收稿日期: 2007-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50204010),国家自然科学基金仪器专项(50427401),国家“十五”科技攻关计划项目(2005BA813B-3-09),国家重点基础研究发展计划项目(973 计划,2005CB221505),国家高技术发展计划项目(863 计划,2006AA06Z119),教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0477)

作者简介: 何学秋,江苏省徐州市解放南路中国矿业大学能源与安全工程学院,教授,研究方向为矿山安全和安全科学理论与技术;
E-mail: hexq@chinasafety.gov.cn

1 煤岩电磁辐射的力-电耦合机理

煤岩体是由不同属性的单元(或微元)构成的,界面之间的作用则是通过电场或电荷来完成的。煤岩体在应力和孔隙流体(如瓦斯)的作用下,发生变形及破裂,是众多单元变形或破坏的结果。从宏观上来说,煤岩体受载变形破裂时产生电磁辐射是基于煤岩体的非均匀性,由应力作用下非均匀变形引起的诱导极化或带电粒子变速运动引起的^[2,10]。受载煤岩体的高应变区主要位于强度不同的单元界面处强度较低的单元内,而煤岩体的变形破裂主要是在承受高应力的弱单元内部或沿着单元之间的界面进行的,当单元内或相邻单元之间发生非均匀形变时,其界面处的电子平衡被打破,产生局部激发,结果是受拉的界面处积累了分离电荷(主要是电子),而受压的界面内积累了相反符号的电荷。从宏观上看,材料表面积累的电荷会形成静电场(库仑场);当变形非常缓慢或匀速情况下,分离电荷会及时消退以适应电平衡的变化,因而对外不辐射电磁波;当相邻颗粒之间发生非均匀快速形变时,局部激发会产生电磁辐射。从微观上来看,压电效应、摩擦起电效应、带电缺陷(如空位、线性位错、刃形位错等)的非平衡应力扩散、共价键断裂、EDA 键断裂和分子间作用力的消涨等原因导致产生电荷分离,是电磁辐射产生的基础和根本原因。

2 煤岩电磁辐射的力-电耦合模型

受载煤岩体产生电磁辐射是煤岩体变形破裂,以及材料内部微损伤的结果,每一个单元(或体元)的变形破裂都对电磁辐射有一份贡献。如同声发射一样,煤岩材料的损伤参量与电磁辐射之间存在着正比关系。煤岩材料的电磁辐射反映了材料的损伤程度,与材料内部缺陷的演化与繁衍直接相关。由于电磁辐射的活动规律是一种统计规律,因此,其必然与材料内部缺陷的统计分布规律一致。

根据统计损伤力学^[13-16],假设电磁辐射脉冲数 ΔN 与损伤面积 ΔS 成正比,可以推导出试件受载时,应变增至 ε 时的电磁辐射脉冲数累计为^[11-12]

$$\sum N = N_m \int_0^{\varepsilon} \phi(x) dx \quad (1)$$

式中, N_m 为试件全破坏的电磁辐射累计脉冲数。当材料强度分布 $\phi(\varepsilon)$ 服从 Weibull 分布^[13]时,

$$\frac{\sum N}{N_m} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right) \quad (2)$$

式中, ε_0 为材料破坏时的应变量。

根据损伤力学理论和式(2),可以得出损伤因子与电磁辐射脉冲数的重要关系

$$D = \frac{\sum N}{N_m} \quad (3)$$

由此可见,煤岩材料的电磁辐射脉冲数累计具有与损伤参量同样的性质。由此可以得出一维情况下电磁辐射脉冲数表示的煤岩材料本构关系为

$$\sigma = E\varepsilon \left[1 - \frac{\sum N}{N_m} \right] \quad (4)$$

式(2)和式(4)构成煤岩电磁辐射的力-电耦合模型^[11-12, 17]。

3 煤岩电磁辐射力-电耦合数值模拟

根据式(4)对实验过程中电磁辐射脉冲数累计量比值与应变量比值进行了模拟,模拟过程取 ε_0 为加载结束时的应变量,加载过程为等速位移控制,控制过程为 300 s 行程 1.5 mm, 参数 m 分别取 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.5, 5.0 和 10.0, 模拟结果见图 1。

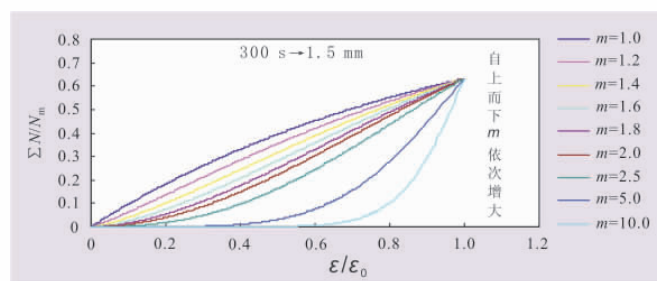


图 1 加载全过程不同参数 m 的力-电耦合模型模拟结果(加载速率 0.3 mm/min)

Fig. 1 Simulation results of the coupling model with different parameter m in whole loading process (loading rate 0.3 mm/min)

从模拟结果看,不同的 m 曲线形状不同。 m 较小时,曲线平缓,甚至出现上翘的趋势;随着 m 的增大,曲线逐步下凹,并且越来越陡峭,最终各条曲线都趋向同一点。可以看出 m 值对电磁辐射脉冲数的累计变化趋势影响很大。

分析式(2),当 $\varepsilon = \varepsilon_0$ 时, m 无论取任何值,

$$\frac{\sum N}{N_m} = 1 - e^{-1} \quad (5)$$

由于电磁辐射脉冲数总累计量 N_m 很难确定, m 的选取也有很大随机性和不确定性,使得式(2)较难实用化。根据式(5),对式(2)进行适当修正,用加载到某一时间的脉冲数累计量和应变量来表达,即

$$\frac{\sum N}{N_{m0}} = (1 - e^{-1})^{-1} \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right) \right] \quad (6)$$

式中, N_{m0} 为加载到某一时间电磁辐射脉冲数的总累计量; ε_0 为对应时间的应变变量。

由此, 式(4)被修正为

$$\sigma = E\varepsilon \left[1 - \frac{(1 - e^{-1}) \cdot \sum N}{N_{m0}} \right] \quad (7)$$

根据修正后的模型式(7), 以加载结束时的电磁辐射脉冲数累计量为总脉冲数累计, 模拟了不同 m 下, 不同加载控制过程, 电磁辐射脉冲数累计量比值与应变变量比值的变化关系, 见图2。这些模拟结果与笔者实验

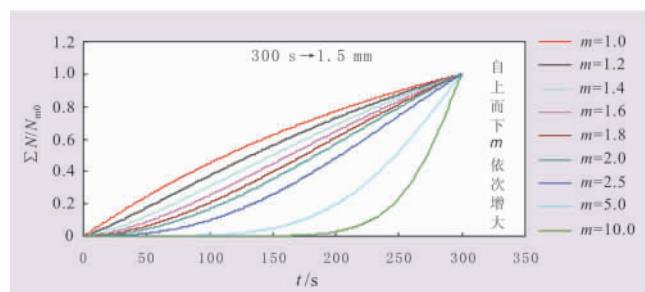


图2 加载速率为 0.3 mm/min 时不同参数 m 下修正力-电耦合模型模拟结果

Fig. 2 Simulation results of the modified coupling model with different parameter m and loading rate is 0.3 mm/min

获得的电磁辐射变化趋势具有很好的一致性, 说明了所建立模型的正确性和合理性。同时可看出, m 值的选

取十分关键, 直接影响到电磁辐射脉冲数累计量的模拟结果。

4 煤岩电磁辐射力-电耦合模型参数 m 值的确定

式(2)和式(6)中的参数 m 为 Weibull 分布的形态参数, 当 m 由小到大变化时, 微元的强度分布曲线由矮而宽到高而窄变化。参数 m 反映了材料内部的均质性, 矮而宽的曲线表明煤岩微元强度的分布比较分散, 材料不均匀; 高而窄的曲线表明煤岩微元强度的分布比较集中, 材料比较均匀。也就是说, m 越大, 煤岩越均匀; 反之, 则越不均匀。

煤是特殊的岩石材料, 与其他岩石相比, 其明显的特点是强度低, 孔隙、裂纹多。因此, 其均质程度比普通岩石差, 相应的参数 m 小, 不同煤样的均质程度也有所不同, 如何确定合理的参数 m 对于分析和模拟煤岩电磁辐射规律显得尤为重要。

本节利用模型式(6)对测试的电磁辐射实验数据的模型参数 m 进行拟合, 以确定 m 值的合理范围。

对式(6)进行移项, 公式两侧取两次对数运算后得

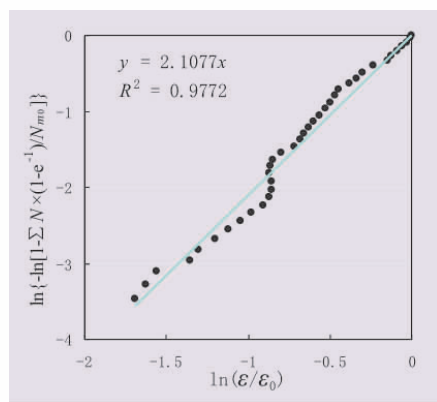
$$\ln \left[-\ln \left[1 - \frac{\sum N}{N_{m0}} (1 - e^{-1}) \right] \right] = m \ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \quad (8)$$

以横坐标 $\ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)$, 纵坐标 $\ln \left[-\ln \left[1 - \frac{\sum N}{N_{m0}} (1 - e^{-1}) \right] \right]$

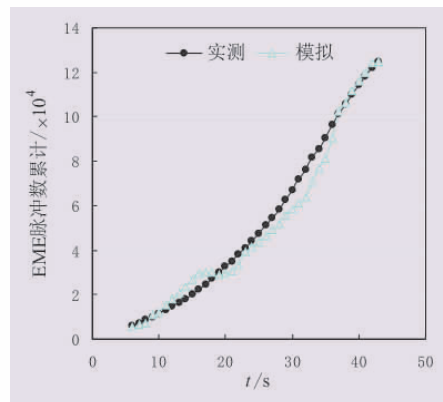
进行拟合, 就可以求出 m 值。

对实验结果进行了拟合求解, 典型结果见图3~图8。

从以上拟合和模拟的结果看, 参数 m 的数据拟

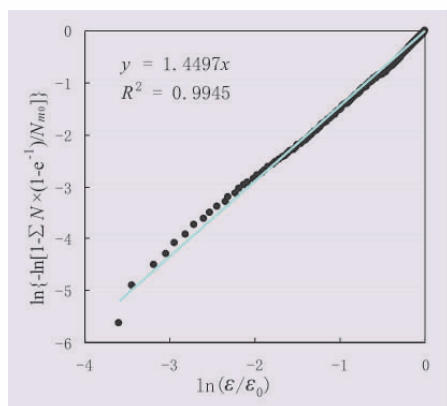


(a) m 的拟合曲线
(a) Fitting curve of m

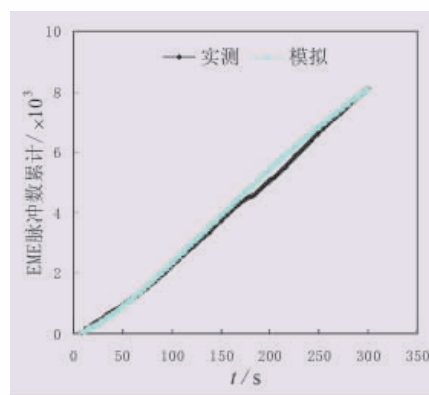


(b) 模拟的 EME 脉冲数累计与实验结果对比关系
(b) Comparison between accumulation of simulation EME pulses and experiment results

图3 焦作九里山矿原煤样参数 m 的拟合以及模拟和实测数据的对比关系图
Fig.3 Fitting of parameter m and a comparison between simulation and experiment data for raw coal in Jiaozuo Jiulishan Coal Mine



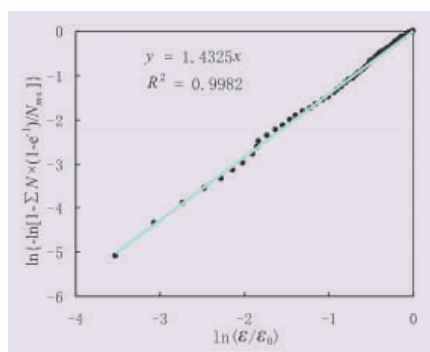
(a) m 的拟合曲线
(a) Fitting curve of m



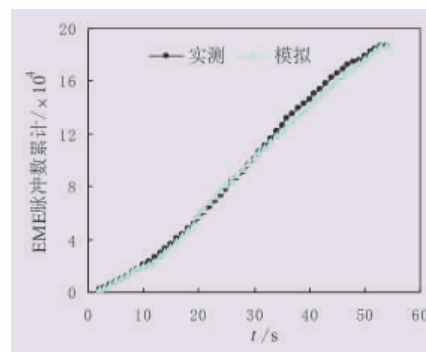
(b) 模拟的 EME 脉冲数累计与实验结果对比关系
(b) Comparison between accumulation of simulation EME pulses and experiment results

图 4 阳泉一矿原煤样参数 m 的拟合以及模拟和实测数据对比关系图

Fig. 4 Fitting of parameter m and a comparison between simulation and experiment data for raw coal in Yangquan First Coal Mine



(a) m 的拟合曲线
(a) Fitting curve of m



(b) 模拟的 EME 脉冲数累计与实验结果对比关系
(b) Comparison between accumulation of simulation EME pulses and experiment results

图 5 焦作九里山矿型煤样参数 m 的拟合以及模拟和实测数据的对比关系图

Fig. 5 Fitting of parameter m and a comparison between simulation and experiment data of briquettes in Jiaozuo Jiulishan Coal Mine

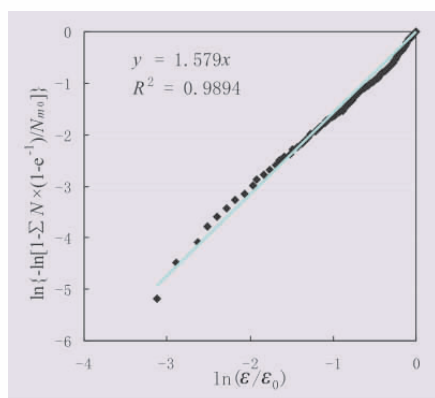


图 6 兖州东滩矿原煤样 m 的拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve for m for raw coal in Yanzhou

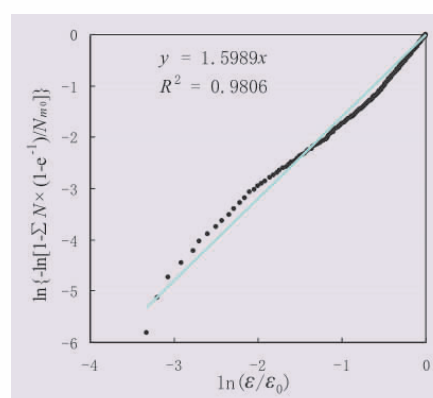
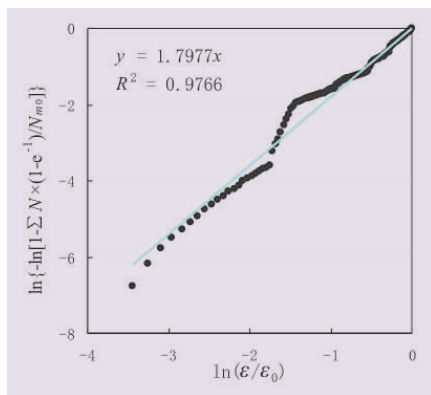
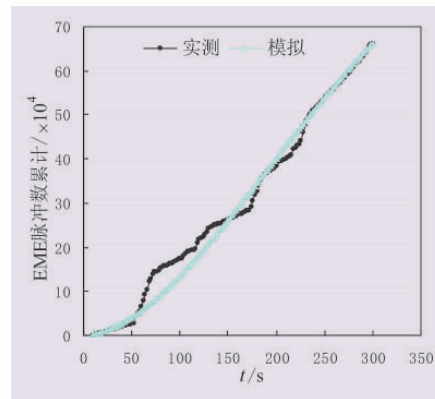


图 7 义马千秋矿原煤样参数 m 的拟合
Fig. 7 Fitting curve of m for raw coal in Yima Dongtan Coal Mine Qianqiu Coal Mine



(a) m 的拟合曲线
(a) Fitting curve of m



(b) 模拟的 EME 脉冲数累计与实验结果对比关系
(b) Comparison between accumulation of simulation
EME pulses and experiment results

图 8 邢台东庞矿型煤参数 m 的拟合以及模拟和实测数据的对比关系图
Fig. 8 Fitting of parameter m and a comparison between simulation and experiment data
of briquettes in Xingtai Dongpang Coal Mine

合精度较高,复相关系数 R^2 都在 0.97 以上,满足数据分析的要求;修正后的煤岩电磁辐射力-电耦合模型较好地反映了实验测试结果,模拟结果与实测结果比较一致。各试样拟合的参数 m 数值都不大,一般在 1.4~2.1 之间,平均值为 1.7,说明实验试样的均质性都不太好,这为进行煤岩电磁辐射的分析和数值模拟提供了基础依据。实际煤体的均质程度比实验室实验样品差,因此在现场实际应用中要考虑尺度效应带来的差异。

数值模拟结果表明,基于统计损伤力学、煤岩电磁辐射规律及力-电耦合机理建立的煤岩体电磁辐射力-电耦合模型是符合实际的,可以很好地描述煤岩体变形破坏过程中电磁辐射的变化趋势和特征。其意义在于间接地证明了电磁辐射现象的损伤破坏的本原特征和用电磁辐射监测矿井煤岩动力灾害的可行性和合理性。同时,也可以将一维的模型扩展到三维的情形,利用模拟的结果探索三维情况,甚至大尺度条件下电磁辐射的规律,为煤岩动力灾害的监测预警奠定基础。

5 结论

1) 基于统计损伤力学、煤岩电磁辐射规律及力-电耦合机理建立的煤岩体电磁辐射力-电耦合模型是符合实际的,数值模拟结果与实验测试结果一致,为煤岩电磁辐射数值模拟及进一步理论分析奠定了基础。

2) 通过反演分析确定了不同煤岩的均质度参数 m , 通过电磁辐射实验结果和煤岩电磁辐射力-电耦合模型可确定表征材料均质度的参数 m , 进而评价煤岩材料的均质度。

参考文献 (References)

- [1] 何学秋, 王恩元, 聂百胜, 等. 煤岩流变电磁动力学[M]. 北京: 科学技术出版社, 2003.
HE Xueqiu, WANG Enyuan, NIE Baisheng, *et al.* Electro-magnetic dynamics of coal or rock rheology [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] 王恩元. 含瓦斯煤破裂的电磁辐射和声发射效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1997.
WANG Enyuan. The effect of EME and AE during the fracture of coal containing gas and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1997.
- [3] 国家地震局科技监测司. 震前电磁波观测与实验研究文集 [C]. 北京: 地震出版社, 1989.
Department of Science and Technology of China Seismological Bureau. Anthology of electromagnetic wave observation before earthquake and experiment study [C]. Beijing: Seismological Press, 1989.
- [4] NITSAN U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks[J]. Geophysical Research Letters, 1977, 4(8): 333-336.
- [5] ШЕВЦОВ Т И, Мигунов Н И. и другие. Электризация полевых штапов при деформации и разрушении[J]. ДАН СССР, 1975, 225(2): 313-315.
SHEVTSOV T I, MIGUNOV N I, *et al.* The Electrogenesis phenomenon during the deformation and failure of feldspars[J]. Bulletin of Soviet Academy of Science, 1975, 225(2): 313-315.
- [6] ГОХБЕРГ М Б, Гуфельд ИЛ. и другие. Электромагнитные эффекты при разрушении земли коры [J]. Физика Земли. 1985(1): 71-87.
GOKHBERG M B, GUFEL'D I L, *et al.* The electromagnetic effect in earth crust failure[J]. Geophysics, 1985(1): 71-87.
- [7] 萨多夫斯基 М А. 苏联地震预报研究文集 [C]. 北京: 地震出版社, 1993.

- SADOFSKI M A. Works of earthquake prediction in the Soviet Union[C]. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [8] 郭自强, 尤峻汉, 等. 破裂岩石的电子与原子压缩模型 [J]. 地球物理学报, 1989, 32(2): 173-177.
GUO Ziqiang, YOU Junhan, *et al.* The model of compressed atoms and electron emission of rock fracture[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1989, 32(2): 173-177.
- [9] 朱元清, 罗祥麟, 等. 岩石破裂时电磁辐射的机理研究 [J]. 地球物理学报, 1991, 34(5): 595-601.
ZHU Yuanqing, LUO Xianglin, *et al.* A study of mechanism on electronic emission associated with rock fracture [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(5): 595-601.
- [10] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射实验研究 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 131-137.
WANG Enyuan, HE Xueqiu. Experiment study on electromagnetic radiation of coal or rock during deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 131-137.
- [11] 聂百胜. 含瓦斯煤岩力电效应及机理的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.
NIE Baisheng. Study on the effect of stress and electricity and its mechanism of coal or rock containing gas[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.
- [12] 魏建平. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警机理及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.
WEI Jianping. Study on forecasting mechanism and its applications of electromagnetic emission for mine coal or rock dynamic disaster [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2004.
- [13] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
TANG Chunan. Catastrophe in rock unstable failure[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [14] 陈忠辉, 唐春安, 徐小荷, 等. 岩石声发射 Kaiser 效应的理论和实验研究[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 9-12.
CHEN Zhonghui, TANG Chunan, XU Xiaohu, *et al.* Theoretical and experimental studies for Kaiser effect in rock [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(1): 9-12.
- [15] 徐东强, 单晓云, 甄在学. 双向压缩下岩石声发射特性损伤力学分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000(3): 82-84.
XU Dongqiang, SHAN Xiaoyun, ZHEN Zaixue. The analysis of rock acoustic emission characteristic under biaxial compressing using damage mechanics [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000(3): 82-84.
- [16] KRAJCINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. Journal of Solid Structures, 1982, 18(7): 551-562.
- [17] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤岩力电耦合模型及其参数计算[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 505-508.
NIE Baisheng, HE Xueqin, WANG Enguen, *et al.* Coupled stress-electricity model and its parameters computation method of coal or rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4): 505-508.

(责任编辑 齐志红)

·学术动态·

“中国电子学会电子信息科学技术奖”申报启动

2007 年中国电子学会将继续在全国范围内开展“中国电子学会电子信息科学技术奖”(国科奖社准字[2002]03-0053)的评选活动。主要奖励在电子信息领域科学研究、技术创新与开发、科技成果推广应用和实现产业化方面取得显著成绩或做出突出贡献的个人和集体。凡是国内首创或本行业先进的技术研究成果,并且经过鉴定、验收、检测等相应评价及实际应用,包括新产品、新技术、新工艺、新材料、新设计、新方法;采用先进电子信息技术改造传统产业的重大应用成果、重大工程;理论上有一定创新和发展,学术水平在国内处于领先地位,并在全国性学术刊物或国外杂志发表后,为同行所公认,对生产实践有较大指导意义的研究成果均可通过省、自治区、直辖市电子信息产业主管部门及省、自治区、直辖市地方电子学会;全国重点高等院校;国家大型科学研究院;国家大型企业集团;3 位两院院士或 5 位以上中国电子学会常务理事推荐申报。该奖项可通过单位和个人推荐的办法申报,申报时间为 2007 年 10 月 31 日前。了解详情请登录 www.cie-xh.cn

·学术动态·

“叶笃正全球变化科学奖”征集 2007 年度候选人

“叶笃正全球变化科学奖”理事会现面向全球华人征集该奖项 2007 年度候选人。被推荐人需满足下列所有条件才能成为有效候选人:

1) 出生在中国大陆、台湾、香港和澳门的华人,年龄在 55 周岁以下;

2) 过去 10 年内公开发表的科学研究成果,在全球变化科学领域具有重大影响,为国内外学术界所公认。

该奖项受奖人产生过程,既面向国内外公开征集候选人,同时也请有关专家推荐候选人;至少得到 2 名国内外专家(教授、研究员)推荐的人员才能成为有效候选人。

请于 2007 年 9 月 1 日-12 月 1 日通过信函或电子邮件向“叶笃正全球变化科学奖”基金理事会提交推荐书。

联系地址:北京市朝阳区华严里 40 号楼中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室

邮 编: 100029

电子信箱: yxd@tea.ac.cn

联系人: 延晓冬