

文章编号:1000-582X(2011)05-071-05

坚硬顶板组合煤岩样破坏电磁辐射规律及其应用

姚精明¹, 闫永业², 尹光志¹, 姚俊伟¹, 李生舟¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 河南科技学院 机电学院, 河南 新乡 453003)

摘要:采用实验室试验和分形理论相结合的方法研究了组合煤岩样变形破裂的电磁辐射规律。研究表明,加载初期,电磁辐射信号增加,然后略微减小,出现一段较为稳定的区域,当临近主破裂时,又大幅度增加,进入残余变形阶段时,电磁辐射又逐渐减小;电磁辐射信号与顶板在组合煤岩样的比例成正指数关系;电磁辐射脉冲数具有分形特征,并且随着加载进行,分形维数增加,临近主破裂时分形维数急剧减少;分形维数与顶板在组合煤岩样的比例成正线性关系。利用上述规律,成功地对7251工作面的冲击危险进行了预测预报。

关键词:坚硬顶板;组合煤岩样;电磁辐射;分形维数;冲击地压

中图分类号:TD324

文献标志码:A

The EME rules of composed coal and rock samples with hard roof failure and their application

YAO Jing-ming¹, YAN Yong-ye², YIN Guang-zhi¹, YAO Jun-wei¹, LI Sheng-zhou¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. School of Mechanics and Electronics, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, P. R. China)

Abstract: The electric magnetic emission (EME) rules of deformation and failure of composed coal and rock samples are studied by lab experiments and fractal theory. The results show that at the initial stage of loading, EME signals increase, then decline slightly and stay at a stable level. Substantial increase appears when the composed coal and rock samples are close to the main fracture, and EME signals decline slowly when they are in the stage of residual deformation. The EME signals have a positive exponent relation to roof ratio in the composed coal and rock samples. The EME pulse count has the fractal characteristic, and the fractal dimensions increase with the process of loading. When the composed coal and rock samples are close to main fracture, the fractal dimensions decline suddenly, and it has a positive linear relation to the ratio of roof in the composed coal and rock samples. With the achieved rules, the burst danger has been forecasted successfully in face 7251.

Key words: hard roof; composed coal and rock sample; electric magnetic emission; fractal dimension; rock burst

收稿日期:2011-01-16

基金项目:中央高校基本科研业务费科研专项(CDJZR10 24 00 07)

作者简介:姚精明(1979-),男,重庆大学博士后,主要从事矿山冲击地压方面的研究,(E-mail)yao_jing_ming@qq.com。

自从发现煤岩体破裂产生电磁辐射现象以来,广大科研工作者运用损伤力学、统计学、模糊数学、分形等理论,以数值模拟试验、物理试验和现场工程实践为研究手段,对煤岩体破坏产生电磁辐射信号机理、特征和规律进行了研究,并且在理论和应用上都取得较大的进展。研究表明^[1-10],煤岩体无论是拉伸破坏、压缩破坏还是剪切破坏,无论是稳定破坏还是失稳破坏,均有电磁辐射信号产生,煤岩体变形破坏产生的电磁辐射信号与其承受的载荷增量成正相关关系,与受载过程的加载机械能成正比关系。上述研究在一定程度上揭示了煤岩体破坏产生的电磁辐射的本质,形成了电磁辐射预测煤岩动力灾害技术,促进了电磁辐射的现场应用。但上述研究主要针对于纯煤样,而对组合煤岩样尤其是坚硬顶板的组合煤岩样的电磁辐射试验鲜有报道,文献[11]虽然研究了组合煤岩样的电磁辐射规律,但是没有研究电磁辐射规律与顶板尤其是坚硬顶板在组合煤岩样比例的关系;并且,没有采用合适的非线性理论来描述煤岩体破坏产生的电磁辐射特征和规律,这将导致电磁辐射现场预报水平较低^[12]。煤岩动力灾害是顶板-煤体-底板系统失稳而猛然释放能量的一种动力现象,并且中国大部分易发生煤岩动力灾害矿井都具有坚硬顶板^[13],因此对坚硬顶板组合煤岩样的研究根据有理论价值和实际意义。因此,笔者通过对具有坚硬顶板的组合煤岩样的电磁辐射试验,借助分形理论研究组合煤岩样变形破坏的电磁辐射规律,并通过现场应用来检验研究的正确性。

1 坚硬顶板组合煤岩样变形破裂电磁辐射实验研究

在易发生冲击地压的某矿 7251 工作面提取新鲜煤样,钻取顶底板岩心,在中国矿业大学岩层控制中心实验室首先把煤样、岩样加工成直径 50 mm 煤样和岩样,然后把煤样、顶板、底板按照一定比例加工、粘结成直径 50 mm 高 100 mm 的标准试样,见表 1。中砂岩顶板岩样抗压强度为 127.3 MPa,煤样抗压强度 18.7 MPa,煤样冲击能指数为 5.5,属于强冲击危险煤层。把加工好的组合煤岩样放在试验系统做电磁辐射实验。

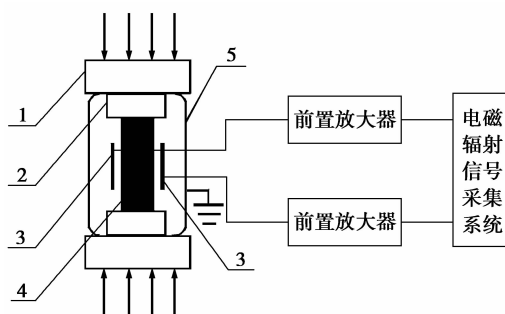
1.1 试验系统

试验系统由加载系统、电磁辐射信号采集系统、载荷位移记录系统和电磁屏蔽罩组成。加载装置采用高精度能控制加载速度及调节油压的 SANS 伺服试验机,加载方式为匀速加载,加载速率为 0.2 mm/s,

电磁辐射信号测试系统为 Disp-24 声电测试系统。为了保证测量的准确性,用了 2 个通道来测量电磁辐射信号,其中通道 1 电磁辐射门槛值为 46 dB,通道 2 电磁辐射门槛值为 97 dB,数据采集间隔时间为 1 ms;电磁辐射前置放大器放大倍数为 40 dB,滤波电路采用低频段进行滤波;采用网格尺寸小于 0.5 mm 的铜网作屏蔽系统。如图 1 所示。

表 1 组合煤岩样单轴压缩电磁辐射实验

规格/mm	实验材料/%		
	煤	中砂岩顶板	泥岩底板
50×100	20	55	25
50×100	30	45	25
50×100	50	35	25
50×100	50	25	25



1. SANS 压力机;2. 绝缘垫块;3. 电磁波接受天线;
4. 煤岩试样;5. 电磁屏蔽网

图 1 试验系统示意图

1.2 试验结果分析

典型试验结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,组合煤岩样变形破坏产生的电磁辐射具有如下规律。

1.2.1 加载各阶段电磁辐射信号的变形规律

在加载时间为 0~25 s 时,组合煤岩样承受最大载荷占峰值应力的 18.0%,组合煤岩样处于压密阶段,电磁辐射信号先增加后减少,总的处于一个较低的水平,该阶段电磁辐射幅值平均值占总幅值平均值的 31.5%,电磁辐射脉冲数平均值占总脉冲数平均值的 46.0%;在加载时间为 26~49 s 时,组合煤岩样承受最大载荷占峰值应力的 46.3%,组合煤岩样处于弹性阶段,电磁辐射信号稍微有所增加,基本保持稳定,仍然维持在一个较低的水平,该阶段电磁辐射幅值平均值、脉冲数平均值分别仅占总幅值

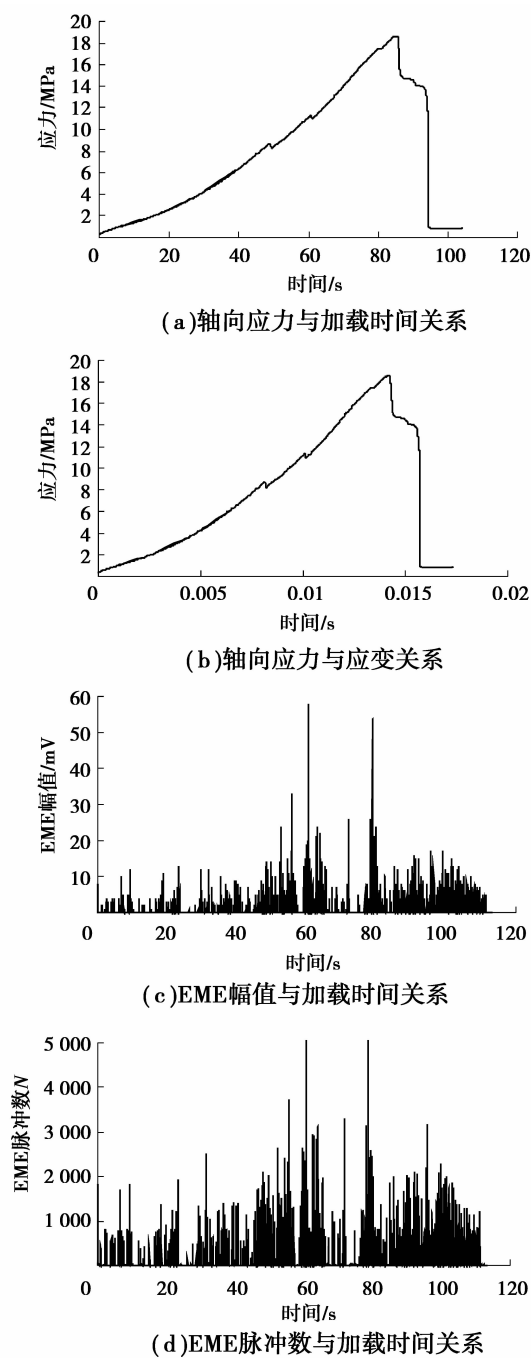


图 2 组合煤岩样试验结果(顶板占组合煤岩的 45%)

平均值的 38.7% 和总脉冲数平均值的 59.7%; 在加载时间为 50~86 s, 组合煤岩样承受载荷逐渐达到峰值应力, 组合煤岩样处于塑性阶段, 该阶段电磁辐射信号大幅度增加, 尤其是临近主破裂时, 电磁辐射信号最为强烈, 其幅值、脉冲数均达到最大值, 分别为 28 mV 和 3 000 次, 该阶段电磁辐射幅值平均值、脉冲数平均值分别占总幅值平均值的 135.5% 和总脉冲数平均值的 120.4%; 随着加载的进一步进行, 组合煤岩样变形进入残余变形阶段, 在主破裂刚发生后, 电磁辐射信号降低的幅度比较大, 此后降低的

速度逐渐放缓, 该阶段电磁辐射幅值平均值、脉冲数平均值分别占总幅值平均值的 110.0% 和总脉冲数平均值的 110.0%。

1.2.2 电磁辐射信号与坚硬顶板占组合煤岩样比例的关系

电磁辐射信号与坚硬顶板占组合煤岩样比例的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 组合煤岩样中顶板的比例与受载时产生电磁辐射信号, 无论是幅值还是脉冲数均成正指数关系。即组合煤岩样中顶板的比例越大, 组合煤岩样破裂产生的电磁辐射信号也就越强烈。这也说明在不同厚度顶板条件下, 矿井发生冲击矿压产生的电磁辐射临界值是不同的, 坚硬顶板越厚, 电磁辐射临界值也就越大。

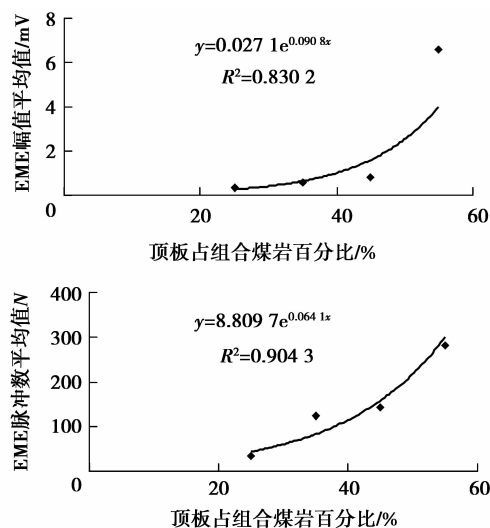


图 3 EME 平均值与顶板占组合煤岩样比例的关系

1.2.3 组合煤样电磁辐射信号的分形规律

为了进一步探求组合煤样破裂产生的电磁辐射信号规律, 提高电磁辐射预报矿井动力灾害的水平, 引入分形数学理论。

由文献[14-15]可知, 煤岩体破裂过程中的裂纹衍生、扩展具有分形特征, 又根据文献[1]可知, 电磁辐射信号也是由裂纹的萌生、扩展等塑性变形引起的, 电磁辐射信号脉冲数表征了单位时间裂纹扩展速度和裂纹衍生的数目, 由此可见, 煤岩体破裂产生的电磁辐射脉冲数在时空上应具有分形特征。

采用盒维数的数目-半径法求分形维数, 即用不同时间半径 t 的圆来覆盖采集到的电磁辐射信号数据, 然后数出半径 t 的圆内所包含电磁辐射脉冲数的数目 $M(t)$, 如果是分形分布, 则 $\log t - \log M(t)$ 的关系曲线为一直线, 直线的斜率就为分形维数^[15]。

计算结果如图 4 和表 2 所示。

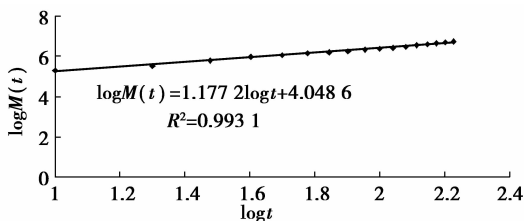


图 4 组合煤样 5 电磁辐射脉冲数分布的双对数关系曲线

表 2 组合煤岩样不同变形阶段 EME 分形维数的计算结果

变形阶段	受载时间/s	分形维数
压密阶段	0~25	0.84
弹性阶段	26~49	1.12
塑性阶段	50~85	2.26
主破裂阶段	86~86	0.87
残余变形阶段	87~104.2	0.78

从图 4 可以看出,煤岩体受载破坏过程中产生的电磁辐射事件数的对数和受载时间的对数成线性关系,由此可见,煤岩体受载过程产生的电磁辐射的事件数在时间上具有明显分形分布特征。从表 2 中可以看出,在压密阶段,电磁辐射分形维数较小,为 0.84,当煤样进入弹性阶段,电磁辐射分形维数略微增加,达到 1.12,当组合煤岩样进入塑性阶段,电磁辐射分形维数大幅度增加,达到 2.26,此后当组合煤岩样主破裂时,电磁辐射分形维数又急剧减小到 0.87,此后煤样进入残余变形阶段,电磁辐射分形维数又降低。由此可见,只要选择合适的标度 t ,通过计算煤岩样的分维,可以确定煤岩样的主破裂时间,即计算现场监测到的电磁辐射分维,可以预报矿井发生动力灾害的时间。

1.2.4 电磁辐射信号分形维数与坚硬顶板占组合煤岩样比例的关系。

图 5 是电磁辐射分形维数与坚硬顶板占组合煤岩样比例的关系。从图 5 中可以看出,电磁辐射分形维数与顶板占组合煤岩样的比例成正线性关系,顶板的比例越高,组合煤岩样变形破裂过程产生的电磁辐射分形维数就越高,煤岩的冲击破坏也就越剧烈。

由上分析可知,当组合煤岩样发生主破裂时,电磁辐射幅值和脉冲数均处于极大值,电磁辐射分形维数处于一个从较大值急剧降低的过程中,因此可

以通过电磁辐射信号的强度临界值和其分形维数变化特征来判断矿井冲击危险性。

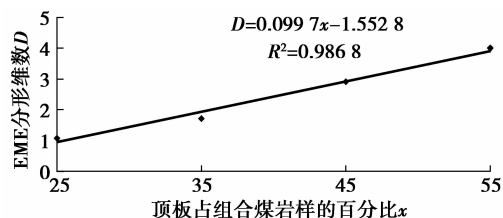


图 5 电磁辐射分形维数与顶板占组合煤岩样比例的关系

2 现场应用

某矿 7251 轻型综放工作面位于 7249 工作面采空区下方,工作面采深 -559.4~-603.7 m,走向长度约为 540 m,倾向长度约为 150 m。工作面开采山西组 7[#] 煤层,煤层平均厚 4.00 m,煤层倾角平均 10°。工作面直接顶为砂质泥岩,平均厚 0.44 m,老顶为中砂岩和细砂岩互层,平均厚度 14.5 m,直接底为泥岩,平均厚 1.29 m,老底为砂质泥岩,平均厚度为 3.25 m。该煤层经冲击倾向鉴定为强冲击煤层,老顶为厚层难冒顶板。

相邻的 7249 工作面回采期间曾多次发生冲击地压现象,虽未造成人员的伤亡,但是给矿井的安全生产带来了隐患,经对 7249 工作面冲击地压危险原因分析,坚硬顶板的大面积暴露和煤层的强冲击倾向是冲击地压发生的主要原因,预计 7251 工作面回采期间也可能发生类似 7249 工作面的冲击地压现象。为此采用煤层注水和顶板爆破相结合的方法来预防冲击地压的发生。

根据顶板-煤体-底板比例为 2:1:1 组合煤岩样实验测试结果,结合现场测试,7251 工作面电磁辐射临界指标为:值 400 mV;电磁辐射脉冲数分形维数为 1.73,且呈明显降低趋势。

图 6-7 为 7251 工作面材料道采取解危措施前后的电磁辐射监测和分形计算结果,从图中可以看出,3 月 7 日未采取措施前电磁辐射信号相对强烈,电磁辐射的幅值达到 500 mV,电磁辐射分形维数降低到 1.74,冲击地压危险性大。采取解危措施后,3 月 9 日材料道内煤体的电磁辐射幅值降到 250 mV 以下,电磁辐射分形维数增加到 1.85,冲击地压危险得到解除。运用上述规律和电磁辐射预测方法,7251 工作面回程过程中未发生冲击地压事故。

由此可见,电磁辐射信号强度的临界值和其分形维数变化特征可以对矿井冲击危险进行预测预报。

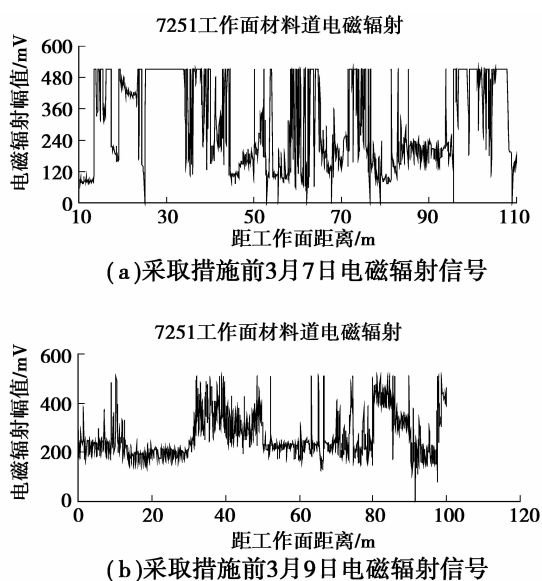


图 6 某矿 7251 工作面材料道电磁辐射信号

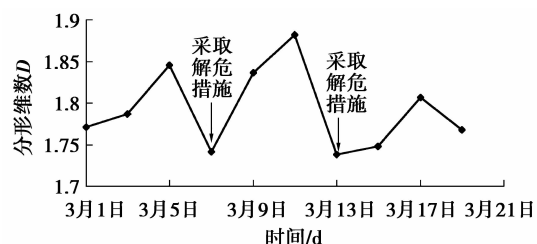


图 7 电磁辐射脉冲数分形维数与时间曲线

3 结 语

1) 组合煤岩样变形破坏会产生电磁辐射信号, 加载初期, 电磁辐射信号出现较大的增加, 然后减小, 出现一段较为平静的区域, 当临近主破裂时, 又大幅度增加, 进入残余变形阶段时, 电磁辐射又逐渐减小。

2) 电磁辐射信号与坚硬顶板占组合煤岩样比例成正比关系。组合煤岩样中顶板的比例越大, 组合煤岩样破裂产生的电磁辐射信号也就越强烈。

3) 组合煤岩样变形破坏产生的电磁辐射信号具有分形特征, 随着加载的进行, 分形维数增加, 当临近主破裂时, 分形维数急剧降低。

4) 电磁辐射分形维数与顶板占组合煤岩样的比例成正线性关系, 顶板的比例越高, 组合煤岩样变形破裂过程产生的电磁辐射分形维数就越高, 煤岩的冲击破坏也就越剧烈。

5) 现场电磁辐射监测证明, 采用电磁辐射的临界值法和分形法相结合的办法能够对冲击危险进行预测预报。

参考文献:

[1] 何学秋, 王恩元, 聂百胜, 等. 煤岩流变电磁动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[2] 何学秋, 聂百胜, 王恩元. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 56-59.

HE XUE-QIU, NIE BAI-SHENG, WANG EN-YUAN. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 56-59.

[3] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1473-1477.

WANG EN-YUAN, HE XUE-QIU, LIU ZHEN-TANG. Study on electromagnetic emission characteristics of loaded rock and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1473-1477.

[4] 王恩元, 何学秋, 李忠辉, 等. 煤岩电磁辐射技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[5] 王恩元, 赵恩来. 岩土单轴压缩过程的电磁辐射特性实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(1): 56-58.

WANG EN-YUAN, ZHAO EN-LAI. Experiment study on electromagnetic emission character of rock and soil in process of uniaxial compression loading[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(1): 56-58.

[6] 姚精明, 何富连, 徐军, 等. 冲击地压的能量机理及其应用[J]. 中南大学学报, 2009, 40(3): 808-813.

YAO JING-MING, HE FU-LIAN, XU JUN, et al. Energy mechanism of rock burst and its application[J]. Journal of Central South University, 2009, 40(3): 808-813.

[7] FRID V. Rock burst hazard forecast by EMR excited by rock fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30(4): 229-236.

[8] 窦林名, 何学秋, 王恩元, 等. 由煤岩变化破坏引起的电磁辐射[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(12): 86-88.

DOU LIN-MING, HE XUE-QIU, WANG EN-YUAN, et al. Electromagnetic emission in rock and coal burst failures[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2001, 41(12): 86-88.

- LI AN-GUI, HAO CAI-XIA, ZHANG HAI-PING. Experimental study on solar chimney for natural ventilation[J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2009, 30(4): 460-464.
- [14] 翟晓强,王如竹. 太阳能强化自然通风理论分析及其在生态建筑中的应用[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 568-570.
- ZHAI XIAO-QIANG, WANG RU-ZHU. Theoretical analysis of natural ventilation enhanced by solar energy and ITS application in bioclimatic building[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(4): 568-570.
- [15] 苏醒,刘传聚,苏季平. 太阳能烟囱的通风效应及应用研究[J]. 能源技术, 2005, 26(6): 245-247.
- SU XING, LIU CHAN-JU, SU JI-PING. The research on ventilation effect and the application of the solar energy chimney[J]. Energy Technology, 2005, 26(6): 245-247.
- [16] 左璐,郑源,周建华,等. 太阳能强化烟囱技术在强化室内自然通风中的研究进展[J]. 暖通空调, 2008, 38(10):41-47.
- ZUO LU, ZHENG YUAN, ZHOU JIAN-HUA, et al. Review of study of solar chimney technology in strengthening indoor natural ventilation[J]. Journal of HV&AC, 2008, 38(10):41-47.
- [17] 江亿,林波荣,曾剑龙,等. 住宅节能[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [18] 丁勇,李百战,沈艳,等. 建筑平面布局和朝向对室内自然通风影响的数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1):90-95.
- DING YONG, LI BAI-ZHAN, SHEN YAN, et al. The influence analysis of the architectural design on natural ventilation effect[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(1): 90-95.
- [19] 李楠,李百战,沈艳,等. 住宅建筑自然通风对室内热环境的影响[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(7):36-42.
- LI NAN, LI BAI-ZHAN, SHEN YAN, et al. Impacts of natural ventilation on indoor thermal environment for residential housing[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(7):36-42.
- [20] 沈艳. 重庆自然通风建筑室内热环境实测与模拟分析[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [21] 中华人民共和国建设部. GB/T 50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2004.

(编辑 郑洁)

(上接第75页)

- [9] 窦林名,何学秋. 冲击矿压危险预测的电磁辐射原理[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2):427-431.
- DOU LIN-MING, HE XUE-QIU. Monitoring rock burst by electromagnetic emission[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2): 427-431.
- [10] 肖红飞,何学秋,冯涛,等. 单轴压缩煤岩变形破裂电磁辐射与应力耦合规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23):3948-3953.
- XIAO HONG-FEI, HE XUE-QIU, FENG TAO, et al. Research on coupling laws between EME and stress fields during deformation and fracture of coal and rock in uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3948-3953.
- [11] 窦林名,田京城,陆菜平,等. 组合煤岩冲击破坏电磁辐射规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3541-3544.
- DOU LIN-MING, TIAN JING-CHENG, LU CAI-PING, et al. Research on electromagnetic radiation rules of composed coal-rock burst failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3541-3544.
- [12] 姚精明. 坚硬顶板条件下冲击矿压机理及其电磁辐射预测研究[D]. 北京:北京科技大学, 2009.
- [13] 赵本均. 冲击矿压及其防治[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1995.
- [14] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(s2):3383-3390.
- YIN XIAN-GANG, LI SHU-LIN, TANG HAI-YAN. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(s2): 3383-3390.
- [15] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社, 1996.

(编辑 郑洁)