

煤矿安全与振动监测

Colliery Safety and Vibration Observation

陆其鹄/LU Qi-hu

中国地球物理学会地球物理技术委员会, 北京 100081

Geophysical Technique Committee, Chinese Geophysical Society, Beijing 100081, China

[摘要] 近年来,我国煤矿灾害时有发生,虽然煤矿瓦斯含量的监测已很普遍,但进行振动监测者则极少。其实,煤矿的主要灾害诸如瓦斯爆炸、水患、矿震,都与煤岩体的破裂有关,破裂则必然产生振动,因此,监测并研究矿山的种种振动事件是研究和预防矿山灾害的重要途径。阐述了振动监测在煤矿安全中的重要性,简略介绍了这方面的某些研究结果以及一些监测研究方法。

[关键词] 振动监测; 煤矿安全; 矿山灾害

[中图分类号] X924.2, P315.61

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)08-0008-04

Abstract: This article designed to clarify the importance of vibration observation in colliery safety. Many coal mine Disasters have occurred in recent years. At present gas content monitoring is widespread in our country, but vibration observing methods are rarely used. In fact, major coal mine disasters, such as gas explosions, flooding as well as mine quake, are closely related to coal rock crack phenomena. Of course, the crack will necessarily cause a vibration. Therefore, studying various vibrations is an important and effective way to study and prevent mine disasters, this paper also briefly introduced some researching results as well as some monitoring and researching methods in this aspect.

Key Words: vibration observation; colliery safety; mine disaster

CLC Numbers: X924.2, P315.61

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)08-0008-04

煤炭是我国目前主要的能源资源,以2000年为例,煤炭占我国一次能源的比重为67%,在国民经济发展中占有十分重要的地位。截至1996年末,全国煤炭累计保有储量为1 024.9亿t,探明储量为6 044亿t,但我国煤矿的煤系、地层构造复杂,开采方式仍比较落后,靠井工作业的煤矿占95%,生产的机械化、自动化程度较差,井下作业人员太多,开采越来越深,致使近年来我国煤矿事故时有发生。例如,2000年我国煤矿百万吨死亡率高达5.68,年死亡人数是全球其他产煤国家死亡人数总和的3倍^[1]。为此,应切实采取措施保障煤矿安全,降低矿难发生几率,减少矿难人员伤亡。

1 煤矿发生灾难的诱因、主要灾害形式及成因

1.1 煤矿发生灾难的诱因

1) 煤岩体受各种内力和外力的作用,包括: 天然的地质构造应力; 内含高压气体的挤压力; 地下水的挤压力; 人为开采造成的应力变化; 外界的其他触发力,如放炮、运输、天体引力变化等。

2) 煤岩体内产生的化学变化,包括煤体里的碳、水、空气长年累月形成的甲烷(CH_4)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)的过程。

3) 煤矿人为开采活动的场地和设施的影响。

4) 开采活动使煤岩体内形成的若干空区。

1.2 煤矿的主要灾难形式及成因

前面所述诱因在一定的条件下就有可能形成煤矿灾害,这些灾害的主要形式有3种: 冲击地压; 瓦斯溢出,煤尘爆炸燃烧; 蕴藏的地下水涌出,淹没矿井的局部或全部。

上述3种灾害都源于应力平衡状态的破坏。煤岩体受上述各种力的作用,形成了某些区域的应力集中; 应力达到破裂临界值则产生破裂; 应力接近临界值时,外加微小的触发力也会产生破裂; 这种触发力往往与煤矿开采活动有关,如放炮、掘进、运输等,但也不能排除自然界其他力的作用结果。大破裂前会产生一系列小破裂。无破裂,水不会涌出,气也不会溢出,煤岩体也不会垮落; 破裂则产生震动,震动则产生弹性波。因此,抓住破裂,抓住震动监测,研究其发展规律,成为研究矿山安全的重要途径。

煤矿灾害的诱因及主要灾害形式可用图1表示。图中黑色为煤岩体,绿色为煤岩体所受的作用力,蓝色为煤岩体内的变化过程,红色表示灾害,棕色表示火源的产生因素。

2 矿山震动监测的目的

1) 快速定位,抢险救灾。如: 门头沟煤矿1985年6月发生了一次2.6级矿震,该矿用syllok微震监测系统迅速定位,立即电话通知调度,调度立即通知离事故现场100多m处的掘进队,掘进队立即奔赴现场将埋在碎煤里的7名人员全部救出; 某煤矿2005年1月24日产生冲击地压,引起瓦斯溢出并局部瓦斯爆炸,10多人当场死亡,另有100多人却因窒息死亡。当时已经发现巷道里有烟,但因无震动监测系统,故无法确定事故发生位

收稿日期: 2006-06-02

作者简介: 陆其鹄,男,北京民族学院南路5号中国地球物理学会地球物理技术委员会,研究员,主要从事振动理论与技术方面的研究工作; E-mail: luwan99@126.com

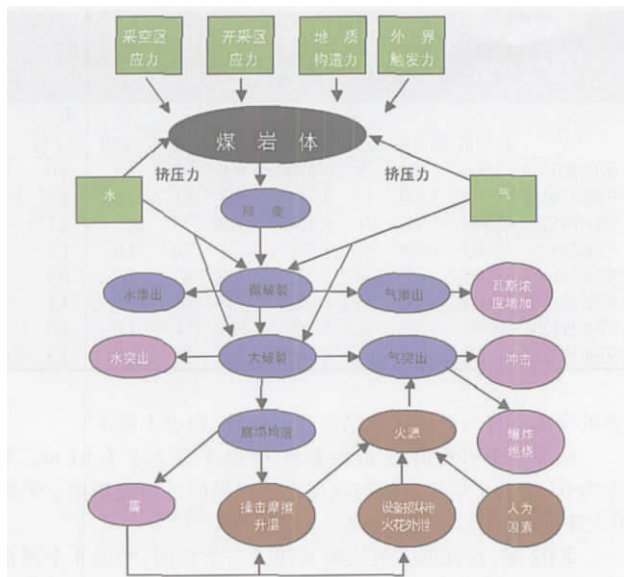


图 1 煤矿的背景状况及主要灾害

Fig. 1 The background and main disasters in coal mine

置及烟源,因而延误了抢救时间,造成了重大伤亡。

2) 分析原因, 区别是天然地震灾害还是煤矿采动过程所造成的冲击地压。

3) 参照矿震活动情况调整生产部署。

4) 利用震动信息研究矿山灾害的孕育发展过程及预测、防治方法。

3 矿山震动的分类与监测

矿山的震动现象有多种表现形式, 诸如矿震、冲击地压、冲击矿压、岩爆、煤炮、塌陷地震等。本文试图从发震原因和震动信号特征来进行区分。

3.1 从发震原因来分

1) 矿山产生的所有大大小小的震动现象统称为矿震, 其特征是用仪器可以接收到它所产生的弹性波, 或其震动现象能被人们感觉到。

2) 由于自然界力的作用所产生的震动称为天然地震，简称地震。

3) 由于人为开采活动而产生或诱发产生的震动, 称为矿山地震或冲击地压。

3.2 从信号特征来分

不同大小的震动,其震动能量和主要频谱成份不同,习惯上可分为地声和微震,地声还可分为低频地声、中频地声和高频地声。矿井中的高频地声可称为矿井声发射,主频 1 kHz 以上,中频地声 200 Hz 至 1 kHz 低频地声 20~200 Hz,20 Hz 以下为微震。

3.3 振动信号的监测

声发射监测, 监测距离为 100 m 以内; 地声观测, 主要监测中频地声, 兼顾部分低频地声, 监测距离为数百 m; 微震监测, 监测部分为低频地声及微震, 监测距离为数 km 以上。

4 矿震及其相关现象的实验观测结果

4.1 声发射与电磁辐射的关系

窦林名报道了如下实验结果:对媒体加载,可观察到声发射及电磁辐射的 Kaiser 效应。所谓 Kaiser 效应是一种记忆效应,就是当载荷小于先前承受的应力时,不产生电磁辐射或声发射,或

产生得非常微弱;当载荷超过先前承受的应力时,产生较强的电磁辐射或声发射,或电磁辐射、声发射明显增强。实验结果表明,利用电磁辐射所测得的先前应力值与用声发射所测得的值是一致的。

当所加力使煤体超过先前所承受的应力时,产生电磁辐射及声发射,对电磁辐射脉冲数按时间取最大值,对于声发射则对同一试验煤样按时间取振铃计数率最大值,结果如图 2 及图 3 所示,图 2 为电磁脉冲数与时间的关系,图 3 为声发射脉冲数与时间的关系。

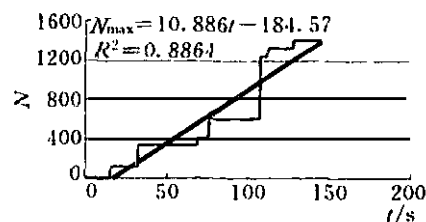


图 2 电磁脉冲数与时间的关系

Fig. 2 Relations between electromagnetic pulse and time

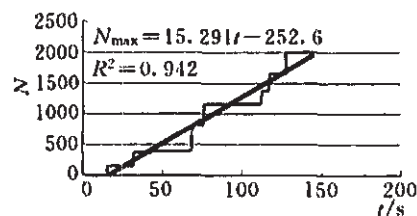


图 3 声发射脉冲与时间的关系

Fig. 3 Relations between acoustic emission pulse and time

由图 2.3 可见,无论是电磁辐射的脉冲数的最大值与时间的关系,还是声发射的振铃计数率最大值与时间的关系,都可以采用线性函数来表达,而且相关系数均在 0.9 以上。从这两点可以看出,电磁辐射现象与声发射现象是密切相关的。

4.2 电磁辐射与应力的关系

许宝林、方宝祥、马志红等人于 2003 年研制了一套同时监测地应力及电磁辐射的仪器设备,设备在矿井下工作,整个系统可以容纳 16 个工作于不同区域的子站,每个子站为 1 个测盒,可管理 4 个电磁观测点和 4 个采用锚杆压力传感器的地应力测点。地面室内安装中心计算机接收并初步分析所收到的信号,矿井下和井上的数据通讯无需用专线,只用电话线拨号取数,即可完成。该系统可及时取得观测数据,而不同于以前应力、电磁辐射都是分别携带仪器到井下去测量,事后才能到井上来处理。该设备于 2004 年在江苏三河尖煤矿进行了观测,取了某采区 2 个时段的数据,一段是 2004 年 2 月 8-11 日,另一段是 2004 年 2 月 23-26 日。可以看出,在这 2 个时段,压力值增加,电磁脉冲数也增高。现场观测结果和实验室结果是一致的。

4.3 矿震与瓦斯突出的关系

李世愚等曾在抚顺煤矿进行过观测研究,发现矿震与瓦斯密切相关。2002年10月7日抚顺老虎台煤矿发生了一次3.2级矿震。如图4所示,震后2~3 h瓦斯浓度急剧增加。据调查,2002年每次发生二级矿震后都有瓦斯浓度升高的现象。

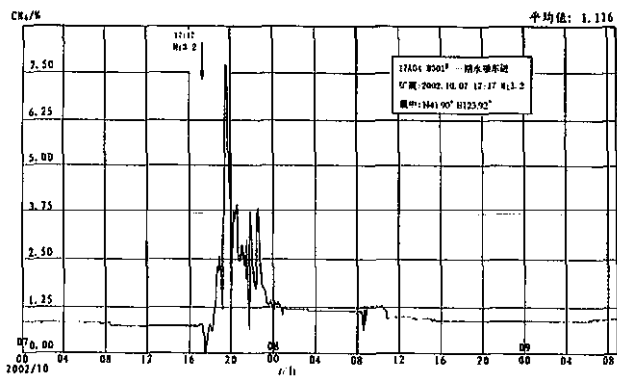


图4 矿震与瓦斯浓度的关系

Fig. 4 Relations between mine quake and gas density

5 矿震监测工作的历史及进展

1959年,中科院地球所的区域地震台网在北京门头沟煤矿架设了1台单分量的581型电子放大微震仪,采用烟纸笔绘记录。该仪器当时由矿上生产科长兼管,仪器只能测出震中距离和强度,由于仪器管理者熟知矿上生产部署情况,仅根据震中距也能知道矿震事件大体上发生在哪个区域。到20世纪80年代仪器更换为墨水记录地震仪,并且引进了波兰的Sak及Syllok地声及微震监测系统。该矿一直坚持这方面的工作,曾成功、及时提供了救灾信息,积累了较为丰富的经验。

1970年,中国科学院地球物理所的徐敏、姚振兴、周军成、齐胜福、周来顺、田占丰、余凤仙、陆其鹄8人,在门头沟煤矿工作了3个月,用钟声牌录音机在矿井下监测地声并筹建采用电话线传输的台网。“文革”期间,这项工作由于种种原因而中止,但在矿下最危险的区域确实监测到了频繁的地声信息。当时带领研究人员下矿的一位姓傅的师傅,后在一次冲击地压矿难发生前指挥工友撤离现场,结果绝大部份矿工幸免于难,而傅师傅却殉职。这次沉痛的教训证明了冲击地压还是有前兆的。

20世纪80年代,笔者曾用自行研制的MC-1型慢速磁带地声仪在房山煤矿矿井下进行观测,仪器为速度仪特性,通频带为10~300 Hz,并用盒式录音机在矿井下记录地声,频响为50~3 000 Hz,慢速磁带记录采用慢速记录、快速回放的办法,一盒C90的磁带可记录24 h以上。

20世纪80年代,我国共引进了8套波兰的Sak地声监测系统及Syllok微震监测系统。Syllok系统采用仿苏联的ВЭПМК拾震器及8位A/D转换器。后来,西安煤矿仪表厂研究所刘嘉国等人对该仪器进行了国产化改造,采用了16位A/D转换,扩大了动态范围,并用改制的国产65型拾震器替代了“ВЭПМК”。

1997年,笔者协助毛仲玉、徐方军等人在山东华丰煤矿建立了一个矿震遥测台网,4个测点,测点距为3~5 km;用了模拟调频无线遥测,但模拟遥测动态范围小,于是在子站采用了4量程信号自动选通的办法。4个量程的信号在子站上进行A/D转换,并缓存相同的时间,在缓存期间自动选通一路幅度适中的信号,再经D/A转换成模拟信号,用无线发送出去,在记录中心接收量程档位标志信号和振动时程信号,并再进行A/D转换,采样率为500sps, A/D用了16位,总的动态范围可达到96 dB。当时这样做的原因在于较高速率无线数字遥测设备的可靠性尚不能满足需要。用此台网的数据,测定了矿震事件的时、空、强参数。高明清等对定位的精度作了实地调查,对1997年6月已大体知道震源位

表1 若干矿震事件的定位误差

Tbl. 1 The location error of some mine quake events

事件	X			Y			ML		
	已知值	测定值	差	已知值	测定值	差	已知值	测定值	差
9706080201	2 906	2 921	29	4 670	4 610	60	1.5	1.0	0.5
9706220015	3 010	3 023	13	4 754	4 693	61	1.0	1.2	0.2
9706261352	2 987	2 946	41	4 764	4 729	35	1.1	1.1	0
9706270054	3 005	3 029	24	4 771	4 731	40	1.0	1.0	0
9706281407	3 005	3 035	30	4 777	4 730	47	1.2	0.9	-0.3
9706291349	3 018	2 952	76	4 782	4 737	45	1.0	1.1	0.1
9706272204	2 986	3 032	46	4 768	4 764	4	1.0	1.0	0
9706292217	2 978	3 042	64	4 769	4 712	57	1.2	1.5	0.3

置的7次事件与台网定位结果作了比较,如表1所示。

从表1中可看出,X最大差为76 m,Y最大差为61 m,平均差为63.25 m,所定震级与地震系统提供的已知值相比,平均差0.2级。

2002年,在江苏三河尖矿又建了一个台网,共设4个测点,2个在矿井下,2个在地面的井孔里。测点距为3~4 km,采用无线和有线数字传输,在子台进行A/D转换,采样率为1 000 sps,16位A/D,有线无线的传输速率均可达38.4 kbps。这是我国第一个空间布局的兼用无线和有线的数字遥测矿震监测台网,计算机已用人机对话方式处理了矿震事件数千条,资料均已刻成了光盘。

前两年,姜福兴等在华丰煤矿进行了地声观测研究,在矿井下打钻孔,孔深数十米。震动传感器放到井孔里,台网孔径数百米,数十路信号集中采集,在矿井下用笔记本微机记录,得到了矿震分布与应力的关系,为矿上调整生产部署作出了积极贡献。

2002年,李世愚、蒋秀琴、李铁等人用地震仪在抚顺老虎台煤矿建了一个测点距为6 km左右的台网,采样率为50 sps,采用无线传输,传输速率为9.6 kbps。近年来,兖州矿业集团又用地震仪布设了一个矿震监测网;华丰煤矿引进了波兰的一套矿震监测系统;北京木城涧煤矿也建了一个台网。迄今,国内煤矿零星有了几个震动监测网,但与瓦斯监测相比,数量仍极少。

6 对矿震监测仪器系统的要求

矿震监测仪器是一种观测仪器,必须符合下述基本要求:要多取得观测信息,为此要根据观测对象,对频响范围和动态范围作相应的考虑;要注重整个观测系统的准确度,要全面考虑从拾震换能直到数据记录整个过程各个环节的准确度,而不能只注重某个环节是否采用了某种新技术或某种新器件,目前拾震、换能环节的准确度是主要问题;要适合于在现场工作,因此要考虑温度影响、防潮、防雷、防爆、节能、便携等问题;至关重要是仪器设备要能在现场长期稳定工作,要能及时发现、及时处理。

矿震监测与天然地震监测,在原理上是一样的,但对仪器的具体要求则不同。由于台网的尺度不同,信号的频谱范围不同,从而对时间服务的精度、频响范围、采样率、信号传输速率等的要求也不同。

6.1 矿山微震台网

布局应包围整个矿区或某采区,监测网平均孔径一般为数km,宜采用矿井下、矿井上空间布局。矿井上的地面,一般震动干扰较大,拾震、传感部分应放到地面的机井下的基岩上,若地面冲积层很厚,则井深大于80 m信噪比会有显著提高,测点数及每测点分量数可根据情况因地制宜。此尺度的台网,仪器宜用速度仪特性,通频带3~200 Hz,每分量采样率应大于500 sps,动态范围

应大于 100 dB; 数据传输方式可根据情况采用电缆、光缆或无线; 矿井下的设备应防爆; 各测点间的时间服务相对误差应小于 1 ms; 拾震器宜用动圈型; 换能灵敏度大于 $100 \text{ V} \cdot \text{s/m}$ 。如此, 最小可检测到震级为 -1 级的事件, 在速度模型已知的地区、震中定位精度可在数十米以内。

6.2 地声监测网

拾震器仍用动圈型, 安放在矿井下的煤岩体的钻孔里, 以减小周围人为震动干扰的影响, 用笔记本微机控制数据采集和信号处理。拾震器与煤岩体的良好耦合是一个技术关键, 台网孔径应为数百米, 采用有线传输, 定位精度可在数米。

6.3 声发射监测

拾震器可用动圈型的, 也可用压电型的, 安放在矿井下的煤岩体钻孔里, 记录煤岩体震动的速度或加速度。一般不记录原始波形, 而只记其包络的强度和超过某阈值的脉冲次数, 可以采用前面提到过的电磁辐射信号的监测方法, 通过电话线拨号, 在地面中心站汇集数据。在取信号包络前可先加一个高通, 仅取较高频率的信号, 高通的低频截止频率可根据情况取 100 Hz、200 Hz 或 500 Hz。

7 矿山地震(冲击地压)危险性预测的某些方法

矿震预报是要报出将要发生的矿震的强度、空间及时间, 危险性预测则可以不出确切时间。天然地震预报的许多方法可以移植到矿山地震预报上, 但两者又有不同之处: 空间、时间、强度的尺度不同; 相应的仪器监测系统指标不同; 人们有可能到震源实地考察矿震; 对于矿震, 可以在震源附近布设监测点; 对于矿震, 发现了危险区域, 可以采取防范措施; 矿震危险性预测类似于地震的中长期预报。

7.1 主要研究内容

主要研究包括下内容。震源区及周围介质的受力状况。具体地区受力状况与发震的关系。用统计方法研究矿震的发生、发展规律, 研究小破裂与大矿震的关系。统计数学的基本一点是“大数定律”, 在这一点上矿震比天然地震有利得多, 每天至少能记录到几次事件, 多则数十次, 以至上百次。研究破裂发展及分布与瓦斯浓度的关系。研究破裂分布与含水区的关系, 与地下水流量、环境温度的关系。研究破裂发展与震源附近声发射、电磁辐射、应力值、钻屑煤粉量的关系。

7.2 一些具体方法

首先要得到准确可靠的震动观测记录资料, 剔除干扰信息和虚假信息, 对资料进行分析处理, 给出每个震动事件的基本参数: 时间、空间、强度。

7.2.1 矿震序列分析研究——划分空间的区段和时段

1) 频度分析及震级与时间关系, 即 $N-t$ 图, $M-t$ 图。强矿震前, 常有震前平静现象, N 为震动次数, M 为震级。

2) 本尼奥夫应变分析。将震级折合成能量释放量, 做曲线, E 为能量。一些震例表明, 在强震前本尼奥夫应变存在速率降低、升高又降低、然后发震的过程。

3) b 值分件。根据古登堡-里克特定律($G-R$ 直线):

$$\lg N = a - bM$$

取一定震级范围内的事件数量进行统计, 根据岩石破裂实验和一些观测到的震例, 在主破裂前, 往往存在 b 值降低(即小事件比例降低)的现象, 当 b 值恢复时发震。

4) 值分析。这是宇津德治提出的, 其定义为:

$$\eta = \frac{\overline{x^2}}{(\bar{x})^2}$$

式中: $x = M - M_{\min}$, $M_{\min}$ 为震级下限; $\bar{x}$, $\overline{x^2}$ 分别为 x 及 x^2 的均方差。当出现新的破裂危险区时, 值往往出现异常高值变化。

7.2.2 加卸载响应比分析(尹氏方法 LURR)

对于矿震, 主要考察半日潮汐的上半周与下半周微震活动能量释放的比值随时间的变化。对抚顺矿震资料的分析表明, 在 1995 年前后几年, 群发性强矿震发生之前, LURR 明显存在升高到降低的过程。

7.2.3 测波速变化

介质应力状况变化会引起波速变化。方法之一是 S 波分裂法: 地震波穿过一些裂隙成定向排列的介质时, S 波会分裂为垂直于裂隙和顺着裂隙方向传播的两种波, 两种波的传播速度不同, 称为快 S 波和慢 S 波。介质受力状况变化会引起快、慢 S 波速度的变化, 可观测其时间差, 从而了解介质受力状况。

7.2.4 测频谱变化

介质应力状况变化, 记录到的信号谱成分也会有变化, 常用富里叶分析方法, 但富里叶变换核($e^{i\omega t}$)是三角函数, 其时间域是从 $-\infty$ 到 $+\infty$, 得到的是信号在整个时间域上的总体特征。于是小波分析得到了关注, 小波变换的变换核的时间域是有限的, 这样就可以更清楚地观察信号的细微结构变化。

8 讨论与展望

1) 大的矿山震动本身是一种灾害, 而微小的震动则是研究煤矿灾害很好的信号源。深入分析研究震动信息, 是灾害预测防治研究的重要途径, 但国内这方面工作还做得很少。

2) 开展震动监测研究, 首先要因地制宜选择合适的监测设备, 继之是震动记录信号的识别, 剔除干扰信号, 确认资料的可靠性, 然后再进一步分析研究, 寻找规律。

3) 地震预报中许多中长期预报方法可以被移植到矿震危险性预测中来, 但矿震的时间、空间、强度尺度与天然地震不同。对于矿震, 在不同时间发现和划出对应的危险区, 有助于采取防治措施; 而对于天然地震, 至少目前还不可能在震源附近采取什么措施。

4) 本文主要谈及煤矿的灾害, 类似的情况在其它金属矿或非金属矿也有发生。国外对一些金矿、盐矿、铜矿、钾矿等矿区的矿震也进行了监测研究, 国内也应注意这方面情况^[9]。

5) 我国今后应该通过不懈的努力, 建设包括监测灾害活动及预警信息在内的多维数字矿山信息显示系统, 建立矿山应急、快捷指挥系统和运行机制, 进行智能化、可视化、自动化的安全高效生产管理。

参考文献(References)

- [1] 宋振骐, 等. 煤矿重大事故预测和控制的动力信息基础研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [2] 龚林名, 何学秋. 冲击地压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [3] 李世愚, 等. 矿山地震监测技术的进展及最新成果[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 853- 859.
- [4] 陆其鹤, 李铁, 等. 多量程自动选通地震遥测系统[J]. 地球物理学报, 1994, 37(3): 408- 409.
- [5] SLAWOMIR JERZY GIBOWICZ, ANDRZEJ KIJKO. 修济刚, 等译. 矿山地震学引论[M]. 北京: 地震出版社, 1998.

(责任编辑 肖庆山)