

矿井微震信号 b 值计算样本及参数选取研究

王 书 文^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部 北京 100013)

摘 要: 为提高矿井微震信号 b 值计算效率和准确性,以孟村矿井掘进期间实际发生微震事件为样本,围绕 b 值计算过程中所涉的样本及参数选取等问题开展研究。不同发震区域微震演化机制及规律不同, b 值计算样本的选取应以发震区域为基本单位,发震区域的范围由内部所有发震单元的关联微震事件分布确定。低震级事件缺失导致 b 值计算结果大幅偏小,可通过分析相关系数变化趋势确定最佳起始震级。在设置最高档次震级时,应考虑样本高震级端的频次分布情况,使得最高档次对应的微震频次与其理论值相当,并保证推移时间窗过程中,非空档次总数不变。时间窗过短时, b 值计算结果易受随机异常因素影响。而时间窗过长时, b 值因早期历史数据影响过大而波动偏小,在时间序列上的可区分性差。相对于能量、频次曲线, b 值变化曲线更加平稳,表现出阶段性的高(低)值区间,对高能事件的提示效果优于能量、频次曲线。

关键词: 微震信号 b 值; 微震监测; 微震事件; 冲击地压

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)12-0051-06

Study on calculation sample and parameter selection of mine microseism signal b value

Wang Shuwen^{1,2}

(1. Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Department of Mining and Design, Tiandi Science and Technology Company Limited, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to improve the calculation efficiency and accuracy of the mine microseism signal b value, based on the actual microseism event occurred during the mine heading period of Mengcun Mine as the sample, a study was conducted on the sample, parameter selection and other problems related to the b value calculation process. In the different seismic occurred area, the microseism evolution mechanism and law would be different, the selection of the b value calculation sample should be the seismic occurred area as the base unit and the seismic occurred scope should be determined with the related microseism event distribution of the inner all seismic unit. Due to lack of the low seismic event, thus the b value calculation results would be highly reduced. The best initial seismic grade could be determined with the analysis on the related coefficient variation tendency. When the high level seismic grade was set up, the frequency rate distribution condition of the high seismic grade of the sample should be considered and the microseism frequency and the theoretical value related to the highest grade were quite same. In order to ensure the pushing process of the time windows, the total number of the neutral gear would not be changed. When the time window too short, the b value calculation results would be easily influenced by the random abnormal factor. But when the time window was too long, due to early historical data influence too high, the b value would be too low and the reparability on the time series would be poor. Related to the energy and frequency rate curve, the variation curve of the b value would be more stable and would have the sectional high (low) value zone. The prompt effect of the energy event would be better than the energy and frequency curves.

Key words: microseism signal b value; microseism monitoring and measuring; microseism events; mine pressure bump

收稿日期: 2016-02-16; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.12.009

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801401); 天地科技开采设计事业部青年创新基金资助项目(KJ-2015-TDKC-05)

作者简介: 王书文(1983—),男,山东鱼台人,助理研究员,硕士。Tel: 010-84263124-8205 E-mail: wangshuwen@tdkcsj.com

引用格式: 王书文. 矿井微震信号 b 值计算样本及参数选取研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 51-56.

Wang Shuwen. Study on calculation sample and parameter selection of mine microseism signal b value[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 51-56.

0 引言

Gutenberg 等^[1]研究地震活动时,提出了著名的震级与频度关系式($G-R$ 关系式) $\lg N = a - bM$,其中 M 为地震震级, N 为震级不小于 M 级的地震累积次数, a 和 b 为与区域震动活动相关经验常数。其中,参数 b 表征了某地区某段时期内不同震级地震间的比例关系,是地震危险性分析的重要参数,常被作为衡量地震活动水平的标志。众多地震学者围绕 b 值的物理意义、 b 值特征、 b 值计算方法及影响因素等方面开展深入研究^[1-6]。许多研究表明,在矿井、隧洞、边坡等工程领域发生的微震事件与天然地震同样遵循 $G-R$ 关系,且 b 值的变化与工程岩体的稳定性存在相关性^[7-10]。随着我国煤矿冲击地压灾害的日益严重, b 值被引入这一动力灾害的预测预报工作当中,并认为强矿震或冲击地压通常发生在低 b 值或 b 值下降的时段^[10-13]。

b 值是实际地震(微震)资料的统计结果,其准确性与样本数据的准确性、完整性及统计量直接相关,在此基础上获取 b 值还需选择合理的计算方法及参数。该问题在地震领域获得大量研究,对提高 b 值的准确性起到推动作用^[2-6]。但在矿山强矿震或冲击地压领域的相关探索相对较少。

基于此,笔者以孟村矿井掘进过程中发生的大量微震事件为样本,重点阐述了 b 值计算过程中所涉及的样本选取原则、参数对 b 值的影响及其获取方法、与高能事件的相关性及其应用等,以期提高类似工程条件下微震信号 b 值的计算效率和准确性。

1 矿井概况

孟村矿井位于陕西省黄陇侏罗纪煤田彬长矿区中西部,设计生产能力 6.0 Mt/a,目前处于基建阶段。矿井主采 4 号煤层,首盘区煤层埋深约 720 m,平均厚度 24 m,裂隙发育,平均单轴抗压强度 24 MPa,具有强冲击倾向性。主要大巷及回采巷道均布置在煤层中部,采用综合机械化掘进,锚网索联合支护。矿井安装了波兰 SOS 微震监测系统,前期共布置 10 个探头,如图 1 所示。当前时期,仅有措施巷、运输巷、中央一号辅运输大巷等 3 条巷道正在掘进。

2 b 值计算样本的空间选取

现场监测表明,矿井范围内常同时存在多处相对独立的微震集中区,称之为发震区域。同一发震

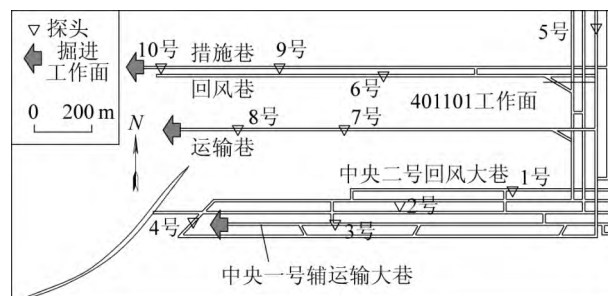


图1 孟村矿井微震台网布置

Fig. 1 Seismic network layout in Mengcun mine

区域内微震的孕育及发生遵循同一机制,不同发震区域煤岩应力及结构条件常不同,微震活动范围、强度及演化进度具有差异,遵循着各自特有的演化规律^[14-15]。因此,为准确反映考察范围内微震活动规律,应以单一发震区域为基本研究对象,逐一得出每一区域的微震活动性表征结论。

将发震区域内宏观的微震发生源称为发震单元,常见的发震单元有:采掘工作面、构造、巷道群、残留煤柱等,其中采掘工作面对应的发震区域不断移动,而其他发震单元多为固定。地质及开采条件较简单时,每个发震区域可能仅分布一个发震单元。但亦时常存在 2 个或多个发震单元短期或永久性时空叠加情形,此时各发震单元之间发生耦合作用,共同影响微震活动的演化机制与规律。

发震区域空间范围应根据其内部所有发震单元关联微震事件的发生范围划定。对于以采掘工作面为发震单元的发震区域,应根据实际采掘进尺不断更新统计其范围。具体应用时,可以采掘工作面为中心划定立方体或球体空间含盖其关联微震事件发生范围。

2015 年 7 月 1 日至 7 月 9 日孟村全矿范围内监测的微震事件平面分布如图 2 所示,共监测到 1 276 个微震事件,图中初步划出了 A、B、C、D 等 4 处发震区域,其分别对应的发震单元为断层、措施巷掘进工作面、运输巷掘进工作面、断层、中央一号运输大巷掘进工作面。

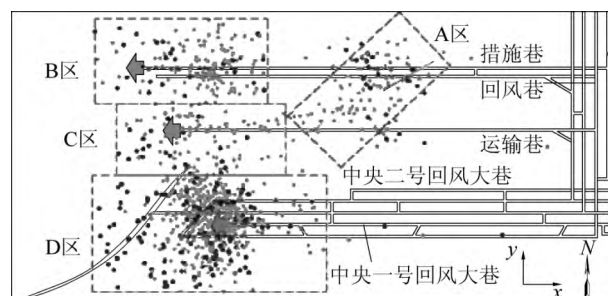


图2 微震事件平面

Fig. 2 Planar of microseismic events

3 b 值计算参数的确定

3.1 起始震级 M_1

选取 2015 年 6 月 15 日至 6 月 18 日 D 区内连续监测到的 319 个微震事件, 样本中最大震级 $M_{\max} = 1.1$, 最小震级 $M_{\min} = -1.7$ 。初步设定总档次 $m = 14$ 档间距 $\Delta M = 0.2$, 起始震级 $M_1 = -1.8$, 最高档次震级 $M_{14} = 0.8$, 原始数据对应的 $\lg N-M$ 关系如图 3 所示, 利用最小二乘法计算出 $b = 0.68$ 。图 3 中低震级端出现了严重的偏离。

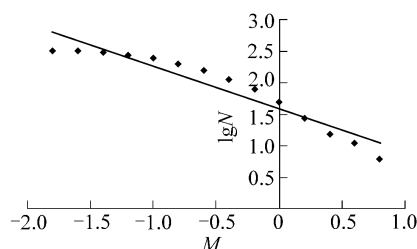


图 3 原始数据对应的 $\lg N-M$ 关系

Fig. 3 $\lg N-M$ relationship of original data

为确定最佳起始震级 M_1 , 将其依次设置为 -1.4 、 -1.2 、 -1.0 ……, 档间距 ΔM 及最高档次震级 M_m 不变, 并利用最小二乘法计算 b 值, 同时得出相关系数 r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (\lg N_i - \overline{\lg N}) (M_i - \overline{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\lg N_i - \overline{\lg N})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (M_i - \overline{M})^2}}$$

其中: m 为样本中所有微震事件震级总档次; M_i 为第 i 档次震级, N_i 为震级不小于 M_i 的微事件频数。

相关系数 r^2 值越大, 表明 $\lg N_i$ 与 M_i 之间的线性相关程度越高。起始震级 M_1 与 b 值、 r^2 的关系如图 4 所示。随着 M_1 的增大, 逐渐增大, 表明相关程度更高, 但的增幅逐渐降低, 当 $M_1 \geq -0.8$ 时, 变化幅度较小。在图 3 基础上, 删除低震级端偏离区间数据后的 $\lg N-M$ 关系如图 5 所示, 反映了当 $M_1 = -0.8$ 对应的 $\lg N-M$ 关系, 其拟合效果显著优于图 3。 M_1 由 -1.8 变为 -0.8 过程中, b 值的增幅达 42%, 可见 M_1 对 b 值影响较大。

由于样本中震级 M 小于 -0.8 的微震数据不能很好的满足 $G-R$ 关系, 若以原始数据计算 b 值, 将导致结果偏小, 这可能是由于低震级微震事件缺失导致的。现场采用的微震监测探头接收频率为 $1 \sim 600$ Hz, 对于最常用的 P 波定位方法而言, 只有微震

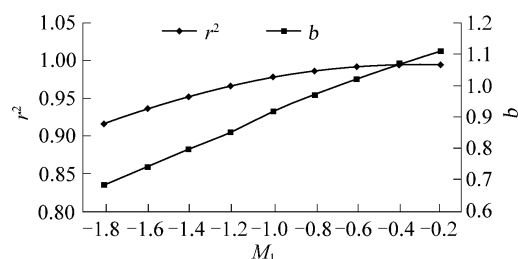


图 4 起始震级 M_1 与 b 值、 r^2 的关系

Fig. 4 Relationship of initial magnitude and b value r^2

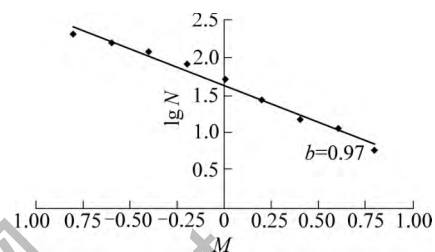


图 5 删除偏离区间数据后的 $\lg N-M$ 关系

Fig. 5 $\lg N-M$ relationship after deleting deviation data

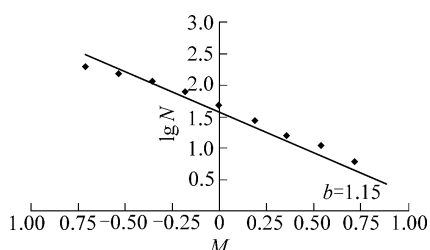
信号能同时被至少 4 个探头清晰的记录, 才可能实现准确的三维坐标定位, 进而成为有效记录数据^[16]。高频率、低能级的震动信号在煤岩层传播过程中衰减更快, 有效传播半径范围较小, 该范围内的探头数量有可能小于 4 个。如此将导致部分客观发生的低能震动事件无法被记录。

3.2 最高档次震级 M_m

继续以上述案例说明, 图 5 对应的总档次 $m = 9$, 最高档次震级 $M_9 = 0.8$, 且震级不小于 0.8 的微震事件数量 $N_9 = 6$ 。按照该图的最小二乘拟合公式 $\lg N = 1.61 - 0.97M$, 计算得出 $M = 1.0$ 档次对应的微震事件数 N 的理论值为 4 或 5。

若将总档次 m 调整为 10, 最高档次震级 $M_{10} = 1.0$, 对应的 $\lg N-M$ 关系如图 6 所示。对比图 5 及图 6 发现, 虽然仅增大了 1 个档次, b 值拟合结果由 0.97 陡增至 1.15, 增幅达 18.6%, 且最大档次 1.0 对应的数据点显著偏离拟合线, 亦出现了偏离现象。然而基于 b 值的最小二乘拟合原理及其物理意义可知, 当时窗内出现新的高能微震事件, 拟合直线将更加平缓, b 值应适度降低, 预示着当前时段高能微震事件的发生概率有所增加, 这显然与图 6 的拟合结果相矛盾。

统计发现, 实际发生的震级大于等于 1.0 的微震事件数量 $N_{10} = 1$, 显著低于按照前 9 个数据点拟合出的理论值, 这很可能是上述矛盾的关键原因。分析认为, 在设置最高档次震级 M_m 时, 应考虑数据

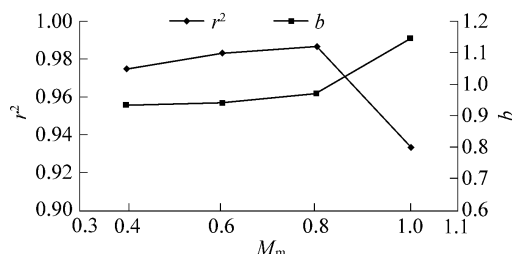
图6 调整最大档次震级后的 $\lg N-M$ 关系Fig. 6 $\lg N-M$ relationship after modifying the highest magnitude

样本高震级端的频次分布情况,使得最高档次对应的频次 N_m 与其理论值(由低档次震级 $G-R$ 关系拟合得出)相当,并保证推移时间窗过程中,非空档次总数不变。

具体操作过程中,首先统计样本的震级分布范围,所设置初始最高档次震级 M_m 应比样本最大震级 M_{\max} 低 3~4 倍的 ΔM ,然后将最高档次震级依次递增,同时计算对应的 b 值及相关系数,计算结果出现明显拐点处,即该样本对应的合理最高档次震级。考虑到样本将随着时间窗的推移不断变化,可连续计算多个的时间窗数据加以对比。

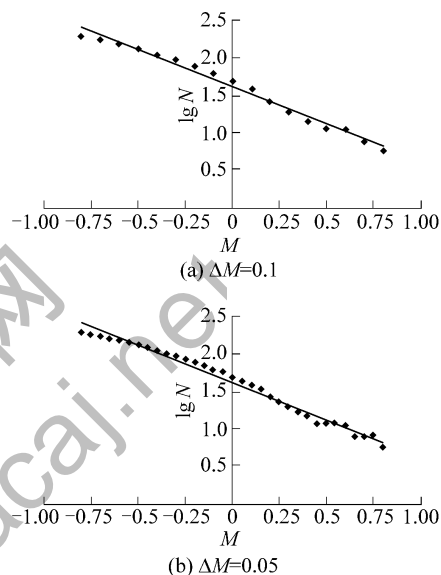
同样以上述案例说明,该微震事件样本中最大震级 $M_{\max} = 1.1$, $\Delta M = 0.2$,考虑到起始震级为 -0.8 ,可设置初始最高档次震级为 0.4 ,计算出最高档次震级 M_m 与 b 值的关系如图 7 所示。 b 值及变化曲线在 $M_m = 0.8$ 处出现明显拐点, M_m 小于该值时,两变量变化较小,表明 M_m 对应的 N_m 与其理论值相当。 M_m 大于该值时,两变量突然剧烈调整,表明 M_m 对应的 N_m 与其理论值出现大幅偏离(实际值为 1,理论值为 4 或 5),因此 M_m 设置为 0.8 相对合理。

究其原因,主要是在有限时间窗内的高能微震事件数量是有限的,很可能不能充分体现更大时间窗范围内高能微震事件所占的比例,倘若将未充分统计的高能微震事件划单独归入最高档次,将导致最高档次对应的事件数偏小, b 值大幅提高,形成不可接受的误差。

图7 最高档次震级 M_m 与 b 值、 r^2 的关系Fig. 7 Relationship of the highest magnitude M_m and b value r^2

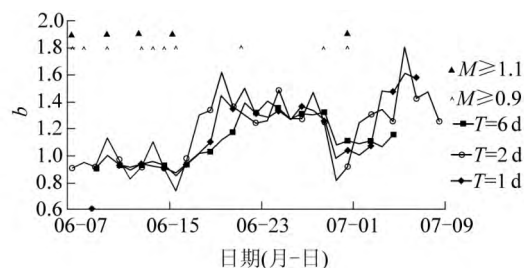
3.3 分档间隔 ΔM

确定了起始震级和最高档次震级之后,再考察分档间隔 ΔM 将不会受到两端“偏离问题的影响”。分别取 0.10 和 0.05 对应的 $\lg N-M$ 关系如图 8 所示,对比图 5 和图 8 可知,在数据总体相关程度较高的情形下, ΔM 对 b 值拟合结果的影响较小。但若部分数据样本离散度较大,较大的 ΔM 可能会引起 b 值波动。

图8 ΔM 取 0.10 和 0.05 时对应的 $\lg N-M$ 关系Fig. 8 $\lg N-M$ relationship when $\Delta M = 0.05$ or 0.10

3.4 时间窗跨度 T

时间窗跨度 T 决定了计算样本的数据量,对 b 值的计算结果影响较大。依据前文研究得出的 D 区边界确定方法,选取 2015 年 6 月 6 日至 7 月 9 日该区域内连续监测到的微震事件 1 975 个,时间窗 T 分别设定为 $1, 2, 4, 6, 8$ d。考虑到矿井每日更新监测日报表的工作制度,滑移步距 ΔT 设定为 1 d,不同时间窗对应的 b 值变化曲线如图 9 所示,同时标识了能量相对较高的微震事件的发生日期。

图9 不同时间窗对应的 b 值变化曲线Fig. 9 Variation curve of b value with different time windows

当时间窗 T 较小时 b 值波动较大,随着 T 的增

大 b 值曲线变得更加平滑。分析认为, 时间窗过短时, 统计样本过小, b 值计算结果不具有统计意义, 且易受随机异常因素影响。而时间窗过长时, b 值计算结果受早期历史数据的影响过大, 导致 b 值波动偏小, 在时间序列上的可区分性差, 无法较好的反映微震活动规律随时间的变化。通过标记高能微震事件, 并与 b 值变化曲线对比, 确定该时期内合理的时间窗 $T=4$ d, 该条件下每个时间窗内的平均微震数据量为 239 个。

4 b 值与高能微震事件相关性及应用

作出 b 值、每日总能量、每日总频次随日期的变化曲线, 分别如图 10 和图 11 所示。对比发现, 相对于能量、频次曲线, b 值变化更加平稳, 表现出阶段性的高(低)值区间。绝大多数高能微震事件发生在低 b 值区间, 高 b 值区间极少发生, 对应关系十分明显, 而能量、频次曲线中该规律不显著。由于 b 值是反映不同震级事件的比例关系, 与其总频次无直接关系, 因此无需再单独考虑掘进进尺这一因素。

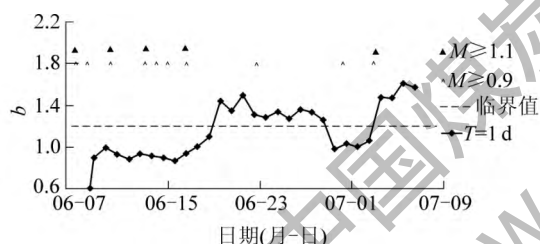


图 10 $T=4$ d 对应的 b 值随时间的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of b value when $T=4$ d

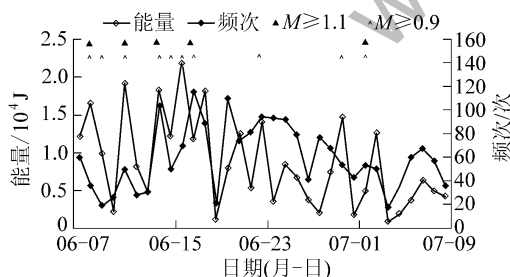


图 11 微震每日总能量及总频次随时间的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of daily accumulated microseismic energy and frequency

煤矿冲击地压的发生与震源特征、围岩强度及支护条件等因素密切相关, 其他因素一致时, 震源能量越大, 冲击地压发生可能性越大, 有效预判高能事件的发生可提前防范冲击地压, 降低致灾概率。以 $b=1.2$ 为临界值, 将 2015 年 6 月 9 日至 7 月 9 日划分为

4 个区间, 其中 A、C 两个低 b 值区间内高能事件频发, 冲击地压发生概率更高, 可采取相应防治措施。

5 结 论

1) 不同发震区域微震演化机制及规律不同, b 值计算样本的选取应以发震区域为基本单位, 发震区域的范围由内部所有发震单元的关联微震事件分布确定。

2) 低震级事件的缺失导致低震级端 $\lg N-M$ 拟合线出现偏离, b 值大幅偏小。通过分析相关系数变化趋势可确定最佳起始震级, 减小 b 值的计算误差。

3) 在设置最高档次震级 M_m 时, 应考虑样本高震级端的频次分布情况, 使得最高档次对应的频次 N_m 与其理论值(由低档次震级 $G-R$ 关系拟合得出)相当, 并保证推移时间窗过程中, 非空档次总数不变。

4) 推移时间窗过短时, b 值计算结果易受随机异常因素影响。而时间窗过长时, b 值因早期历史数据影响过大而波动偏小, 在时间序列上的可区分性差, 无法较好的反映微震活动随时间的变化规律。

5) 相对于能量、频次曲线, b 值变化曲线更加平稳, 表现出阶段性的高(低)值区间, 对高能事件的提示效果显著优于能量、频次曲线。

参考文献(References):

- [1] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1944, 34 (4): 185-188.
- [2] 李全林, 于涛, 郝柏林, 等. 地震频度—震级关系的时空扫描 [M]. 北京: 地震出版社, 1979.
- [3] 陈培善, 自彤霞, 李保昆. b 值和地震复发周期 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 510-519.
Chen Peishan, Bai Tongxia, Li Baokun. b value and earthquake occurrence period [J]. Chinese J Geophys, 2003, 46 (4): 510-519.
- [4] 黄玮琼, 时振梁, 曹学锋. b 值统计中的影响因素及危险性分析中 b 值的选取 [J]. 地震学报, 1989, 11(4): 351-361.
Huang Weiqiong, Shi Zhenliang, Cao Xuefeng. Factors influencing the estimation of b value and the selection of b value in hazard analysis [J]. Acta Seismologica Sinica, 1989, 11(4): 351-361.
- [5] 任雪梅. 地震区划中 b 值统计的若干问题研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011.
Huang Weiqiong, Li Wenxiang. Determining the time and space domains for estimating b value in seismic zoning [J]. Acta Seismologica Sinica, 1998, 20(5): 449-453.

- [6] 任雪梅.地震区划中 b 值统计的若干问题研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所, 2011.
- [7] 刘建坡.深井矿山地压活动与微震时空演化关系研究[D].沈阳:东北大学, 2011.
- [8] 王春来, 吴爱祥, 刘孝辉, 等.深井开采微震活动容量维 D_f 变化特征.北京科技大学学报, 2010, 32(11): 1379–1382.
Wang Chunlai, Wu Aixiang, Liu Xiaohui, et al. Variation characteristics of capacity dimension D_f with microseismicity in deep mining [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(11): 1379–1382.
- [9] 徐奴文, 戴峰, 周钟, 等.岩质边坡微震事件 b 值特征研究[J].岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 3368–3374.
Xu Nuwen, Dai Feng, Zhou Zhong, et al. Study of characteristics of b value for microseismic events in high rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 3368–3374.
- [10] 李铁, 蔡美峰, 纪洪广, 等.强矿震预测的研究[J].北京科技大学学报, 2005, 27(3): 260–263.
Li Tie, Cai Meifeng, Ji Hongguang, et al. Study on forecasting strongmining-induced earthquake [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3): 260–263.
- [11] 潘一山, 徐秉业, 毛仲玉, 等.冲击地压定量预测的研究[J].煤矿开采, 1998, 32(3): 35–38.
Pan Yishan, Xu Bingye, Mao Zhongyu, et al. Percussive ground pressure quantitative forecast research [J]. Coal Mining Technology, 1998, 32(3): 35–38.
- [12] 夏永学, 康立军, 齐庆新, 等.基于微震监测的5个指标及其在冲击地压预测中的应用[J].煤炭学报, 2011, 35(12): 2011–2017.
- Xia Yongxue, Kang Lijun, Qi Qingxin, et al. Five index of microseismic and their application in rock burst forecast [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2011–2017.
- [13] 赵毅鑫, 姜耀东, 王涛, 等.“两硬”条件下冲击地压微震信号特征及前兆识别[J].煤炭学报, 2012, 37(12): 1960–1966.
Zhao Yixin, Jiang Yaodong, Wang Tao, et al. Features of microseismic events and precursors of rock burst in underground coal mining with hard roof [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1960–1966.
- [14] 蔡武, 襄林名, 李振雷, 等.微震多维信息识别与冲击矿压时空预测:以河南义马跃进煤矿为例[J].地球物理学报, 2014, 57(8): 2687–2700.
Cai Wu, Dou Linming, Li Zhenlei, et al. Microseismic multidimensional information identification and spatio-temporal forecasting of rock burst: a case study of Yima Yuejin Coalmine, Henan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2687–2700.
- [15] 吴爱祥, 武力聪, 刘孝辉, 等.矿山微地震活动时空分布[J].北京科技大学学报, 2012, 34(6): 609–613.
Wu Aixiang, Wu Licong, Liu Xiaohui, et al. Space-time distribution of microseismic activities in mines [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(6): 609–613.
- [16] 蒋金泉, 张培鹏, 潘立友, 等.重复采动下上覆高位巨厚岩层微震分布特征研究[J].煤炭科学技术, 2015, 43(1): 21–24.
Jiang Jinquan, Zhang Peipeng, Pan Liyou, et al. Study on microseismic distribution characteristics of high-position and ultra-thick hardoverlying strata under repeated mining [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 21–24.
- ing 2012, 34(8): 1501–1508.
- [15] 勾攀峰.深井巷道围岩锚固体稳定原理与应用[M].北京:煤炭工业出版社, 2013: 106–117.
- [16] 何杰兵.矿山岩石巷道底鼓发生的力学机理及防治措施研究[D].淮南:安徽理工大学, 2008: 32–44.
- [17] 刘玉卫.高应力-膨胀型软岩巷道变形破坏机理与支护研究[D].西安:西安科技大学, 2009: 50–62.
- [18] 王卫军, 侯朝炯.回采巷道底鼓力学原理及控制研究优化进展[J].湘潭矿业学院学报, 2003, 18(1): 17–19.
Wang Weijun, Hou Chaojiong. New development of mechanism and control technique study of extraction opening floor heave [J]. Journal of Xiantan Mining Institute, 2003, 18(1): 17–19.
- [19] 余伟健, 高谦, 朱川曲.深部软弱岩层叠加拱承载体强度理论及应用研究[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2134–2142.
Yu Weijian, Gao Qian, Zhu Chuanqu. Study of strength theory and application of overlap arch bearing body for deep soft surrounding rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2134–2142.
- [20] 刘泉声, 高玮, 袁亮.煤矿深部岩巷稳定性控制理论与支护技术及应用[M].北京:科学出版社, 2010: 224–226.

(上接第21页)

and reason of deformation of the roadway in the special soft coal with high gas content in Liangbei Coal Mine [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 90–95.

- [12] 梁冰, 章梦涛, 潘一山.瓦斯对煤的力学性质及力学响应的试验研究[J].岩土工程学报, 1995, 17(5): 12–18.
Liang Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan. Experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 12–18.
- [13] 余伟健, 王卫军, 张农, 等.深井煤巷厚层复合顶板整体变形机制及控制[J].中国矿业大学学报, 2012, 41(5): 725–732.
Yu Weijian, Wang Weijun, Zhang Nong, et al. Study of global deformation and control of a thick layered compound roof in a deep shaft [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(5): 725–732.
- [14] 余伟健, 王卫军, 文国华, 等.深井复合顶板煤巷变形机制及控制对策[J].岩土工程学报, 2012, 34(8): 1501–1508.
Yu Weijian, Wang Weijun, Wen Guohua, et al. Deformation mechanism and control technology of coal roadway under deep shaft and compound roof [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,