

文章编号:0253-9993(2010)12-2059-05

## 地震波传播速度原位试验及计算

王进强<sup>1,2</sup>,姜福兴<sup>1,2</sup>,吕文生<sup>1,2</sup>,王存文<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083;2. 北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083)

**摘要:**采用本质安全型微震监测系统,在煤矿深部采场的顶底板中布设微震监测台网,对测区内的校验炮微震信号进行了原位采集实验。分别采用组合法、走时残差优化法、定位误差优化法、定位残差优化法和联合反演法进行了地震波速度的优化计算。通过计算结果的对比分析,认为定位误差优化法计算结果最可靠,定位残差优化法计算结果是不可靠的;这一结论对于缺少校验数据情况下的速度选取具有重要意义,也证明了在存在速度误差的情况下,走时残差最小并不能保证可靠的定位精度;在缺少原位试验数据情况下,速度和震源参数的联合反演结果,对速度参数的选取具有重要意义。通过对顶、底板地震波传播速度分析计算,认为煤层和巷道是造成底板地震波平均速度较低的原因。

**关键词:**地震波速度;原位试验;微地震监测;震源定位

**中图分类号:**TD324;P631.412 **文献标志码:**A

## Microseismic wave propagation velocity insitu experiment and calculation

WANG Jin-qiang<sup>1,2</sup>,JIANG Fu-xing<sup>1,2</sup>,LÜ Wen-sheng<sup>1,2</sup>,WANG Cun-wen<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;2. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With intrinsically safe microseismic monitoring system and geophones array in the roof and floor of deep coal mine, and based on calibration blast, a microseismic signal in-situ collecting experiment was performed. Several calculation methods such as: combination method, travel-time residuals optimization method, location error optimization method, location residual optimization method and the joint inversion method were applied on the optimization of seismic wave velocity calculation. Comparisons of the results show that the optimal location error result is the most reliable method, while the location residual optimization method is not reliable. This conclusion has great significance for the velocity selection on the conditions of lack of calibration data, and it also proves that it does not guarantee a reliable accuracy based on minimum travel-time residuals when velocity error exists. The joint inversion parameters of the velocity and source parameters will be suitable for velocity parameters determination when in-situ test data absence. Propagation velocity of the roof and floor were analyzed and calculated, it shows that coal layer and tunnels are the main factors cause the lower average seismic velocity of the floor.

**Key words:** seismic wave velocity; insitu experiment; microseismic monitoring; source location

微震监测技术通过探测采场围岩空间破裂过程,研究其发生及演变规律,进而实现矿山冲击地压、煤与瓦斯突出、突水等矿山动力灾害的预警预报<sup>[1]</sup>,为安全生产提供技术保障。与传统技术相比,微震监测

具有远距离、动态、三维及实时监测的特点<sup>[2-3]</sup>。

在微震监测技术中,地震波的传播速度是微震事件精确定位的关键参数,速度参数的准确与否直接关系到监测结果的可信度。而影响地震波速度的因素

复杂<sup>[4]</sup>,除岩体的弹性模量外,还有岩性、密度、岩石成分、空隙度、孔隙内流体性质及饱和度、压力、埋藏深度、地质年龄及岩层各向异性等。此外,采矿工程的工作面、巷道等工程空间对地震波传播路径及波速也有较大影响<sup>[5-6]</sup>。

在河北邯郸梧桐庄煤矿微震监测项目中,通过现场原位试验,采集校验炮的微地震信号,采用多种方法优化计算地震波速度,通过计算结果的对比分析,找出计算地震波速度的最佳方法,提供在缺少校验数据情况下速度选取方法及依据。对顶、底板平均波速进行了对比分析,探讨了底板波速较低的原因,提高了对地震波传播规律的认识。而且通过原位试验可以校验整个微震监测系统各个环节的工作状态,校验检波器布局、定位算法的有效性。

## 1 试验背景及主要数据

### 1.1 试验背景

测区工作面为 182106 工作面,地面标高 +178.1 ~ +201.2 m,工作面标高 -506 ~ -327 m,倾斜长 65 ~ 165 m,平均 112 m,采高 3.4 m。监测重点是导通底板承压水岩层的断裂活动情况以及构造活化情况。为保证测区能形成合理的空间监测结构,对检波器的空间布局进行了优化,初始检波器及校验炮的空间布局如图 1 所示,各检波器参数见表 1。

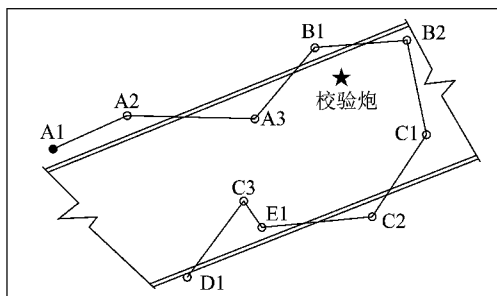


图 1 检波器及校验炮分布

Fig. 1 Geophones array and calibration-blast

### 1.2 标定炮的技术参数

在综合考虑检测对象岩体性质、监测目的、检波器空间布局、工程实施的安全性、标定目的及现场工作条件等因素下,标定炮的位置选在监测区域内的顶板。

钻孔深 40 m,孔径  $\phi 97$  mm,钻孔倾角  $60^\circ$ ,装药量 16.6 kg,炸药类型为乳化炸药,装药长度 6 m,填塞高度 32 m,采用一次起爆方式。

### 1.3 微震监测结果

爆破一次起爆成功,各检波器接收信号正常,波形清晰,如图 2 所示。

采用人工方法拾取地震波 P 波到时,各检波器拾取的校验炮到时数据见表 1。

表 1 检波器实测数据汇总

Table 1 Summaries of geophones data

检波器编号	检波器名称	到时/ms	震中距/m	钻孔深度/m	位置
1	A1	172	185.6	15	底板
2	A2	153	135.6	35	顶板
3	A3	138	71.0	25	底板
4	B1	131	33.4	35	顶板
5	B2	140	69.8	25	底板
6	C1	138	71.0	60	顶板
7	C2	150	121.7	15	底板
8	C3	148	122.0	60	顶板
9	D1	137	195.8	15	底板
10	E1	152	136.6	60	顶板

## 2 地震波平均速度的计算

### 2.1 组合法

设第  $i$  个检波器的空间坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 读取的到时时为  $t_i$ , 人工震源的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 发震时刻为  $t_0$ , 平均速度为  $v$ , 则第  $i$  个检波器到震源(震中距)  $r_i$  为

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (1)$$

地震波从震源到检波器的走时方程<sup>[7]</sup>为

$$r_i = v(t_i - t_0) \quad (2)$$

任意两检波器  $i, j$  走时方程相减, 即  $r_i - r_j = v(t_i - t_j)$ , 得波速计算公式为

$$v = \frac{r_i - r_j}{t_i - t_j} \quad (3)$$

即任意两个检波器的震中距之差除以它们的到时时差得到速度值。设有效检波器总数为  $n$ , 总共有  $n \times (n-1)/2$  种组合, 这也是组合法名称的由来。为减少误差, 通常选取震中距离差或到时时差大的检波器进行组合, 这样就可以得到一系列的速度值, 取其算术平均值作为平均速度。

组合法的优点是计算简单, 缺点是受参与计算的检波器组合影响较大, 不同组合计算结果的离散性大, 到时相近的检波器组合还会得出不合理的速度值, 所以计算结果的稳定性较差。

### 2.2 走时残差优化法

由于发震时刻  $t$  难以精确测量, 在微震监测系统校验中通常将  $t$  作为未知参数。以发震时刻  $t$ 、速度  $v$  为参数, 以走时残差均方根最小为目标进行优化计算。

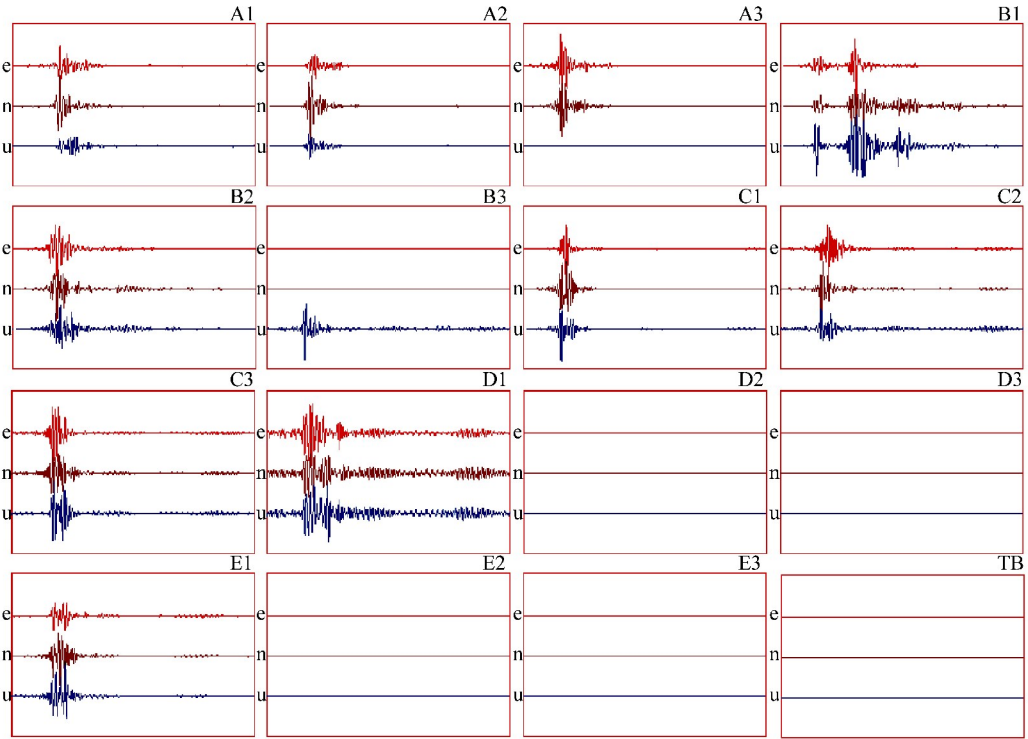


图 2 校验炮地震波形

Fig. 2 Calibration-blast waveforms

第  $i$  个检波器的走时残差为

$$R_i = t_i - t - r_i/v$$

式中,  $t_i - t$  和  $r_i/v$  分别为地震波观测走时和计算走时。

所有检波器的走时残差均方根为

$$R_{MS} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - t - r_i/v)^2} \quad (4)$$

式(4)的求解属于非线性最优化问题,可通过 Matlab 编程求解。

走时残差优化法不涉及复杂的震源定位算法,只有发震时刻和速度两个参数,数学模型比较简单,运算结果比较可靠。

### 2.3 定位误差优化法

设计算震源坐标为  $(x, y, z)$ , 第  $i$  个检波器的地震波走时方程为

$$t_i - t = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} / v$$

所有检波器的走时残差均方根为

$$R_{MS} = \left\{ \sum_{i=1}^n [(t_i - t) - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} / v]^2 / n \right\}^{1/2} \quad (5)$$

在给定速度  $v$  的条件下,使式(5)取得最小值的参数  $(x, y, z, t)$  即为最可能的震源参数,求解参数的过程即为震源定位。这也是一个非线性优化问题,有

各种迭代算法可供选择<sup>[8-14]</sup>。

定位误差可用计算震源  $(x, y, z)$  与已知震源  $(x_0, y_0, z_0)$  之间的距离  $r_s$  表示,即

$$r_s = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

针对不同速度值,分别进行定位计算,并计算其定位误差。选取定位误差最小的速度参数作为平均速度。该方法计算的平均速度综合考虑了检波器空间布局、走时残差和定位算法等因素,并以定位误差最小为目标进行优化,所以采用该方法确定的速度参数进行微震定位最可靠。

### 2.4 定位残差优化法

该方法数学模型及计算过程与定位误差优化法类似,不同点在于定位误差用走时残差表示,即选取使定位结果走时残差最小的速度参数作为平均速度。

为了对比不同速度下定位结果的定位误差曲线及走时残差曲线,采用双纵坐标图的形式,如图 3 所示。通过该图揭示了存在一最佳速度参数,在该速度下使定位结果的定位误差或走时残值最小。另外,两曲线的最低点不是重合的,揭示了使走时残差最小的速度参数并不一定是定位结果最好的速度参数这一现象,该结论对于震源定位求解具有重要意义。走时残差最小是判定震源定位求解结果是否最优的主要依据,但在不合理的速度参数下,该判据有可能失效<sup>[5]</sup>。

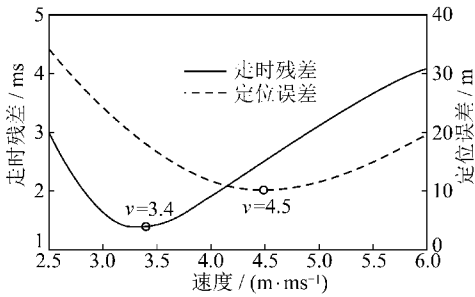


图3 定位误差及走时残差变化曲线

Fig. 3 Curves of travel-time residuals and location errors

## 2.5 联合反演法

联合反演<sup>[15-17]</sup>是将地震波速度与震源参数一起作为未知数,以走时残差最小为目标,进行优化计算。使式(5)取得最小值的一组参数( $x, y, z, t, v$ )即为最优解,从而确定地震波速度。

联合反演法无需事先设定波速参数,在无法进行波速原位测试或波速结构复杂的环境下,相比作为已知参数但误差较大的速度值,用联合反演法更容易获得满意的定位结果。但在已知速度结构的情况下,联合反演法的定位精度要较其它方法略低。另外,由于参数较多,联合反演法通常需要较多的地震波到时数据,计算结果的稳定性也有可能降低<sup>[18]</sup>。

分别采用以上各种方法得到地震波速度,采用相同的检波器组合和定位算法进行定位计算,得到不同的走时残差和定位误差见表2。由表中数据可见,采用定位误差优化法取得的速度值定位误差最小,其次是联合反演法取得的速度值也具有较高的定位精度,而定位残差优化法取得的速度值最不可靠。当然,计算的平均速度及相应的定位结果与检波器组合及定位算法有关。

表2 各种算法速度值结果及相应的定位结果对比

Table 2 The comparison of velocity of various algorithms and location results

序号	计算方法	速度/ ( $\text{m} \cdot \text{ms}^{-1}$ )	走时残 差/ms	定位误 差/m
1	组合法	4.10	2.0	11.1
2	走时残差优化法	4.23	2.2	10.4
3	定位误差优化法	4.52	2.5	9.7
4	定位残差优化法	3.36	1.4	18.6
5	联合反演法	4.31	2.3	10.1

## 3 地震波速度分析

### 3.1 顶板速度分析

采用定位误差优化法,仅选用顶板检波器数据参

与计算,得到平均速度为4.81 m/ms,以此速度进行定位计算,走时残差仅为0.55 ms,震源误差也仅为3.8 m,远高于组合采用顶底板检波器情况下的定位精度。这样高的定位精度除了与校验炮位于顶板有关外,也说明整个微震监测系统具有较高的定位精度。

### 3.2 底板速度分析

采用定位误差优化法,仅选用底板检波器参与计算,得到平均速度为3.39 m/ms,以此速度进行定位计算,震源误差为12.3 m,在可接受的范围之内,此时走时残差接近0( $2.9 \times 10^{-6}$  ms)。

测试工作面的顶、底板围岩均为砂岩,岩性差别不大,顶底板波速差别不大。之所以造成顶板波速较高,顶板-煤层-底板之间的地震波平均速度较低,主要原因在于煤岩波速在1.6~2.5 m/ms之间,一般是岩石波速的1/2~1/4<sup>[19]</sup>。另一重要原因在于地震波从顶板震源到底板检波器的过程中,有些线路要穿过巷道空间,地震波在空气中的传播速度仅为0.33 m/ms<sup>[5]</sup>,根据费马原理地震波会在岩体中沿一条曲线绕过巷道,从而使走时增长,平均速度降低。

## 4 结 论

(1)通过校验炮对微震监测系统进行原位测试是获取地震波传播速度等定位参数、提高定位精度的重要手段。随着工作面的推进,定期进行原位试验是验证微震监测系统参数及提高系统精度的关键。

(2)以走时残差最小为目标优化计算的地震波速度是不可靠的,以此速度为参数进行震源定位也是不可靠的。应采用定位误差优化法计算地震波速度。

(3)巷道、工作面等采矿工程形成的空间对穿过其间的地震波传播速度有较大影响。

(4)在一定的监测范围内,单一速度模型微震监测系统具有较高的定位精度,可以满足各种工程需要。

(5)速度与震源参数联合反演的结果,对速度参数的选取具有重要的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 徐奴文,唐春安,沙 椿,等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5): 915-925.  
Xu Nuwen, Tang Chun'an, Sha Chun, et al. Microseismic monitoring system establishment and its engineering applications to left bank slope of jinning I hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 915-925.
- [2] 姜福兴, Xun Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微



- 震探测研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(1):23-25.
- Jiang Fuxing, Xun Luo, Yang Shuhua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003,25(1):23-25.
- [3] 李庶林. 试论微震监测技术在地下工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(1):122-128.
- Li Shulin. Discussion on microseismic monitoring technology and its applications to underground projects[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2009,5(1):122-128.
- [4] 史 调,杨东全. 岩石波速和孔隙度、泥质含量之间的关系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2001,37(3):379-384.
- Shi Ge, Yang Dongquan. The regression analysis study on velocity and porosity, and clay content of rocks[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Science and Technology), 2001, 37(3):379-384.
- [5] Swanson P, Estey L, Boler F, et al. Accuracy and precision of microseismic event locations in rock burst research studies[M]. Washington, DC: US Department of the Interior Bureau of Mines, 1992: 1-32.
- [6] 叶根喜,姜福兴,郭延华,等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(5):1 053-1 058.
- Ye Genxi, Jiang Fuxing, Guo Yanhua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(5):1 053-1 058.
- [7] 李会义,姜福兴,杨淑华. 基于 Matlab 的岩层微地震破裂定位求解及其应用[J]. 煤炭学报,2006,31(2):154-158.
- Li Huiyi, Jiang Fuxing, Yang Shuhua. Research and application of microseismic monitoring location of strata fracturing based on Matlab [J]. Journal of China Coal Society,2006,31(2):154-158.
- [8] Lurka A, Swanson P. Improvements in seismic event locations in a deep western U. S. coal mine using tomographic velocity models and an evolutionary search algorithm Adam LURKAA, and Peter SWANSONB[J]. Mining Science and Technology(China), 2009, 33(8): 215-220.
- [9] Wang H, Ge M. Acoustic emission/microseismic source location analysis for a limestone mine exhibiting high horizontal stresses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2008,45(5):720-728.
- [10] Ge M. Efficient mine microseismic monitoring [J]. International Journal of Coal Geology,2005,64(1-2):44-56.
- [11] 王焕义. 岩体微震事件的精确定位研究[J]. 工程爆破,2001,7(3):5-8.
- Wang Huanyi. Study on precise localization of micro-seismic events in a rock-mass [J]. Engineering Blasting,2001,7(3):5-8.
- [12] 陈祥熊. 地震精确定位问题(综述)[J]. 福建地震,2007,23(1-2):82-92.
- Chen Xiangxiang. Earthquake accurate localization problem (summarization) [J]. Fujian Seismology,2007,23(1-2):82-92.
- [13] 田 玥,陈晓非. 地震定位研究综述[J]. 地球物理学进展,2002,17(1):147-155.
- Tian Yue, Chen Xiaofei. Review of seismic location study [J]. Progress in Geophysics,2002,17(1):147-155.
- [14] Ge M. Comparison of least squares and absolute value methods in Ae/MS source location: a case study [J]. International Journal of Coal Geology,1997,34(3-4):91-93.
- [15] 马宏生,张国民,周龙泉,等. 川滇地区中小震重新定位与速度结构的联合反演研究[J]. 地震,2008,29(2):29-38.
- Ma Hongsheng, Zhang Guomin, Zhou Longquan, et al. Simultaneous inversion of small earthquake relocation and velocity structure in Sichuan-Yunnan area [J]. Earthquake,2008,29(2):29-38.
- [16] 刘福田. 震源位置和速度结构的联合反演(1)——理论和方法[J]. 地球物理学报,1984,27(2):167-175.
- Liu Futian. Simultaneous inversion of earthquake hypocenters and velocity structure (1): theory and method [J]. Chinese Journal of Geophysics,1984,27(2):167-175.
- [17] 田 玥,陈晓非. 利用拟牛顿法和信赖域法联合反演震中分布与一维速度结构[J]. 地球物理学报,2006,49(3):845-854.
- Tian Yue, Chen Xiaofei. Simultaneous inversion of hypocenters and velocity using the quasi-Newton method and trust region method [J]. Chinese Journal of Geophysics,2006,49(3):845-854.
- [18] 姜福兴,叶根喜,王存文,等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1 932-1 938.
- Jiang Fuxing, Ye Genxi, Wang Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(9):1 932-1 938.
- [19] 吴基文,姜振泉,樊 成,等. 煤层抗拉强度的波速测定研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(9):999-1 003.
- Wu Jiwen, Jiang Zhenquan, Fan Cheng, et al. Study on tensile strength of coal seam by wave velocity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(9):999-1 003.