技术应用

密集台网微震定位技术在矿山开采动态监测中的应用研究①

徐顺强，刘巧霞，李怡青，谢汝一，杨利普
（中国地震局地球物理勘探中心，河南 郑州，450002）

摘要：利用河南新密超化镇某矿区布设的密集临时地震台网观测资料，通过微震震源精确定位手段，实现强干扰背景下该地区某煤矿地下开采面的定位追踪试验研究。微震定位后，爆破点位置的水平精度为±70 m，垂直精度为±500 m。试验研究结果表明，利用高密度数字地震台网资料，可较为准确地监测矿山地下开采面的动态变化，从而实现对矿产资源越界开采和小矿非法开采的有效制约和监督。同时，本次试验结果显示地震台网的监测控制范围受爆炸源能量、地下开采面的深度、监测区背景噪声、监测仪器的灵敏度和抗干扰能力等因素影响，试验结果可对今后矿区地震监测台网的合理布设提供有效指导。

关键词：地震台阵；地震定位；煤矿；开采面
中图分类号：P315.73 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2015)01－0266－05
DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2015.01.0266

Application of the Dense Network Micro-seismic Location Method to Dynamic Mining Monitoring

XU Shun-qiang, LIU Qiao-xia, LI Yi-qing, XIE Ru-yi, YANG Li-pu
(*Geophysical Exploration Center*, *CEA*, *Zhengzhou*, *Henan* 450002, *China*)

Abstract: The purpose of this study was to use micro-seismic source location to locate, track, and observe the underground coal mining surface (shot point) near one coal mine in Xinmi city, Chaohua county, Henan province. Following the micro-seismic location, the horizontal precision of the shot point was 70 m while the vertical precision was 500 m. The experimental results showed that we could accurately monitor dynamic changes of the underground coal mining surface through high-density digital seismic network materials. This technique contributes to the effective restriction and supervision of the cross-border exploitation of mineral resources and illegal exploitation of small coal mines. Results of the study also showed that the scope of monitoring was affected by a number of elements, such as energy exploration, depth of the underground coal mining surface, background noise in the monitoring area, instrument sensitivity, and anti-disturbance. The results provide reasonable guides for an optimized layout of the seismic network in the mining area. In the use of seismic networks, microseism localization has made certain progress and the resulting error in localization is controllable. Increases in the pointing accuracy will make it possible for this technique to have the practical application in the mining area.

Key words: seismic array; earthquake location; coal mine; mining area

0 引言

随着近年来国民经济和社会发展对矿产资源需求的急剧增加，矿山企业在开采过程中存在严重的破坏和浪费矿产资源的现象。开采工艺落后，开采时采富弃贫、采易弃难、采厚弃薄等现象造成了矿产储量耗竭过快，矿山寿命大幅缩

① **收稿日期**：2014-06-25
基金项目：中国综合地球物理场观测——鄂尔多斯周缘地区(201208009)；地震科技星火计划(XH2067Y)
作者简介：徐顺强(1982－)，男(汉族)，云南禄劝人，工程师，主要从事重磁电方法研究、工程物探、矿产资源勘查等工作.
E-mail：sq_xu@126.com
通讯作者：刘巧霞(1983－)，女(汉族)，河南郑州人，工程师，主要从事地震震源研究.E-mail：llqqxx@126.com

短，从而严重影响经济的可持续发展。同时，由于对企业开采情况缺乏有效监控，矿山企业隐瞒产量、收入，漏缴、少缴矿产资源补偿费及其他税费的现象普遍存在，因而查清矿井采空区及矿权边界等问题就显得尤为迫切。但井下越界开采具有隐蔽性强，不易发现的特点，国内对矿山开采的监测大多数仍处于人员下井实施监督检查的阶段，这不仅需要耗费大量的人力、物力资源且效果不佳。因而如何借助现代地震监测技术及地震信号数据处理手段对矿山井下炮采的位置进行准确追踪测定，成为矿山开采过程中亟待解决的问题。

矿山开采过程中采用爆破的方式进行，而爆破会在地壳产生一定的震动。鉴于此，本文利用河南新密超化镇地区密集临时地震台网观测资料，对该区正在开采的煤矿工作面的爆破源进行微震追踪定位，从而得到地下开采面的空间位置形态。该方法是一种动态、实时、不间断的监测技术，可用于监测和追踪一些地方小矿的无计划、随意开采等行为，进而对矿山企业实施监督管理，维护国家和企业的利益、遏制重特大事故发生、减少环境污染、提高矿产资源开发利用率等具有重要研究意义。

1　爆破源微震定位方法概述

煤矿爆破源微震定位是在地震监测科学的形成和发展基础上应运而生的。首先是通过合理布设观测台站记录煤矿开采过程中的爆破和由爆破引起的异常震动，然后通过软件对所记录的信号进行分析识别，最后利用地震定位算法，对爆破源追踪定位。在此过程中定位算法是定位系统的核心。本文利用的微震定位系统中涉及到的地震定位算法主要是基于 Geiger 定位原理的 Hypo 定位法和双重残差相对定位方法（HypoDD）。

Hypoinverse 定位方法是 Fred W. Klein 在 Geiger 定位法的基础上发展起来的一种单事件绝对定位方法。1981 年 Klein 对线性定位法做了一些修改，使其适用于 135 km 之内的近场定位问题。

双差地震定位法（HypoDD）是由哥伦比亚大学的 Felix Waldhauser 博士等在 2000 年提出的，并编写了相应的计算程序。2001 年 Felix Waldhaus-er 博士等运用该方法重新给加州北海沃德断层 1984—1998 年发生的地震定位，其平面定位精度可达到几十米，深度可达到几百米。作为相对地震定位方法的双差地震定位法消除了地震传播到台站时共同路径的影响，因而提高了地震定位的精度。

2　定位数据资料

2.1　观测数据

本研究布设地震台阵采用的仪器是中国地震局地球物理勘探中心自行研制的 PDS－1 型便携式数字地震仪，设 3 个测量通道，采样率为 100、200、400 SPS，对应的频带宽度为 0～40、80、160 Hz。此次布设的流动观测台阵共由 9 个地震台站组成，分布如图 1 所示。台阵布设时需要考虑煤矿地下开采面有限的爆炸震源、深度、能量等因素，尽可能控制开采面的移动范围和距离，所布设的流动台阵均匀分布新密市超化镇某煤矿周围。为了最大可能地提高地震记录的信噪比，台站尽可能地远离铁路、干线公路和其他强振动源，同时仪器尽量放置在地窖等地方。

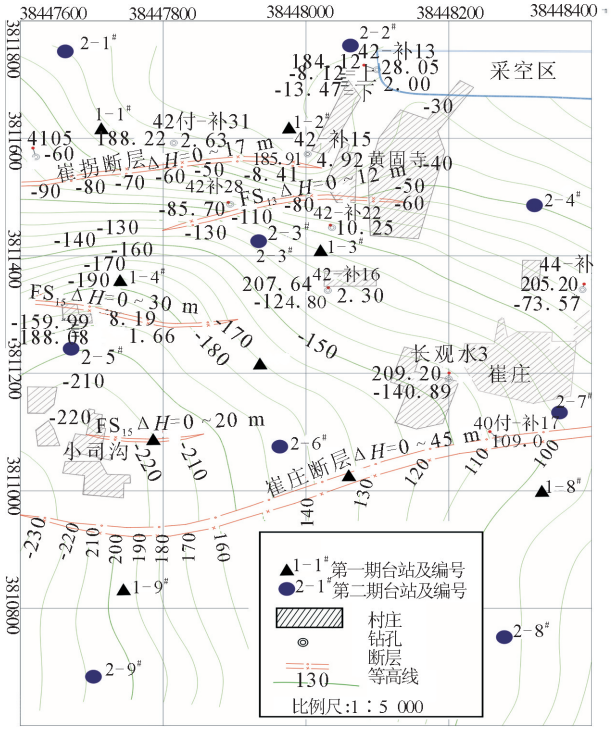


图 1　台站分布图

Fig.1　Distribution of seismostations

由于该煤矿已经开采多年，地下不少地方已成为采空区和塌陷区，这些干扰因素加大了获得高质量微震观测记录的难度。根据研究需求分两个阶段分别进行观测：第一阶段（2007 年 6 月 7—17 日），台站间距离为 300～1 000 m；第二阶段（2007 年 9 月 20—27 日），台站间距离为 500～2 000 m。用 9 台地震仪器进行观测，仪器设定为连续记录方式。为提高观测精度，每天对 GPS 校钟一次，经过两次近一个多月的连续记录，获得了大量的资料。在回放时，将四个以上的地震台同时记录到地动信号定为有用事件，在近一个月的时间内共记录到 38 个事件。

2.2　观测数据初步处理

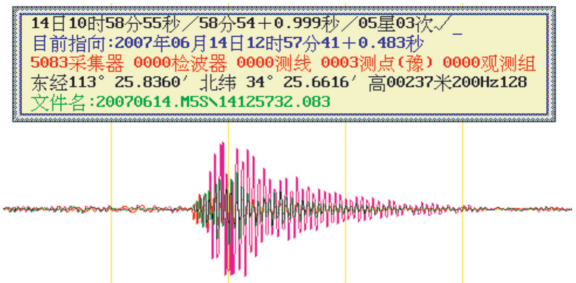
为了快速从海量的数据中判断和选取爆破事件，首先对原始资料进行了如下步骤的预处理：

（1）通过试验确定合适的长向平均、短向平均和比值参数，以此作为地动信号的阀值，对所有原始资料进行回放，从中提取出各个地震台站接收到的地动信号。

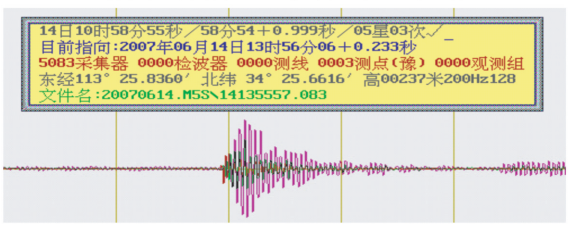
（2）将四个以上地震台站同时记录到的地动信号确定为有用事件，在近一个月的时间内记录到了 38 个事件。

（3）为了保证资料的可靠性和定位的精度，对上述 38 事件又进行进一步地辨识和筛选，最终选取了近 20 个震相较清晰的事件用于后续微震定位计算，图 2 给出的是其中两次地下开采面的爆破记录。

(4) 针对记录到的爆破事件,进行了震相识别和读取工作。为了保证震相识别的正确性和地震波到时的可靠性,对事件的地震波到时做了和达曲线图,剔除了偏离和达曲线台站的到时,保证了到时信息的质量。



(a)爆破时间为2007年6月14日12时57分



(b)爆破时间为2007年6月14日13时56分

图 2 地下开采面爆破记录

Fig.2 Several blast records on underground coal mining surface

3 爆破面微震定位处理

3.1 绝对定位

由于爆破振动源位置是未知的,需要对爆破源进行初始绝对定位,本文采用一维层状速度模型的 Hypo 定位程序来实现。该方法直接利用每个台的地震波到时确定震源的绝对位置,主要原理是将走时方程线性化,然后利用阻尼最小二乘法求解线性化后的走时方程,求得震源参数(震源位置、发震时刻等)的改变量。

3.2 相对定位

Hypo 定位法虽能给出爆破事件的具体位置,但速度模型的非均匀性会对定位结果造成一定的偏差。而 Hypodd 定位法作为相对定位法的一种,利用的是两个事件到同一台站的走时差,该走时差只由两个事件的相对位置以及它们之间小范围内的速度结构所决定,因而能有效地减少由于对地壳结构了解不够精细而引起的误差,提高定位精度。

3.3 定位结果及分析

数据共 38 个事件,其中 16 个事件从震相上判断不是台站附近的爆破(某些事件只记到了某个爆破的面波或一部分残缺的面波);2 个事件由于都只有 4 个台记录而不能计算(用忽略台站高程的算法和给定 P 波速度的算法对这 2 个事件的计算结果都不好)。最后给出计算结果共 20 个事件(表 1、图 3 和图 4)。

表 1 20 个爆破事件定位结果

Table 1 Location results of 20 blasting events

序号	年月日	时分	纬度	经度	深度/km	误差/km
1	2007-06-14	12:57	34°25′41″	113°25′52″	0.073	00.381
2	2007-06-14	13:56	34°25′40″	113°25′51″	0.227	00.737
3	2007-06-14	16:12	34°25′44″	113°25′58″	0.140	00.000
4	2007-06-14	18:50	34°25′39″	113°25′48″	0.172	00.000
5	2007-06-14	20:44	34°25′41″	113°25′50″	0.003	01.335
6	2007-06-14	21:39	34°25′39″	113°25′51″	0.110	01.497
7	2007-06-15	02:48	34°25′41″	113°25′52″	0.056	00.088
8	2007-06-15	04:45	34°25′40″	113°25′51″	0.096	00.144
9	2007-06-15	05:16	34°25′40″	113°25′51″	0.142	00.000
10	2007-06-15	11:18	34°25′38″	113°25′49″	0.015	00.932
11	2007-06-15	11:39	34°25′42″	113°25′53″	0.122	00.154
12	2007-06-15	11:50	34°25′41″	113°25′51″	0.062	00.076
13	2007-06-15	12:38	34°25′43″	113°25′53″	0.054	00.000
14	2007-06-15	14:20	34°25′34″	113°25′50″	0.188	00.000
15	2007-06-15	17:22	34°25′42″	113°25′54″	0.125	00.483
16	2007-06-15	18:24	34°25′41″	113°25′59″	1.032	00.000
17	2007-06-15	18:32	34°25′38″	113°25′47″	0.052	02.635
18	2007-06-16	03:23	34°25′41″	113°25′52″	0.092	00.218
19	2007-06-16	04:22	34°25′42″	113°25′53″	0.071	00.507
20	2007-06-17	01:57	34°25′41″	113°25′52″	0.051	00.366

(注:凡有 6 个以上台站记录的事件都给出了误差值,而仅有 5 个台站记录的事件则不能给出误差值,所以“误差”栏的数值是 0,并不是说它们没有误差。)

根据数据及计算情况估计,仅有 5 个台站记录的事件,其误差水平应和其他事件在同一量级。另外,由于 9 个台站高差不大,基本在一个平面上,所以在定位结果中对震中位置(经、纬度)的控制较好,而对深度的控制较差。因此,根据

定位结果给出的平面坐标位置比较可信，而深度仅供参考。

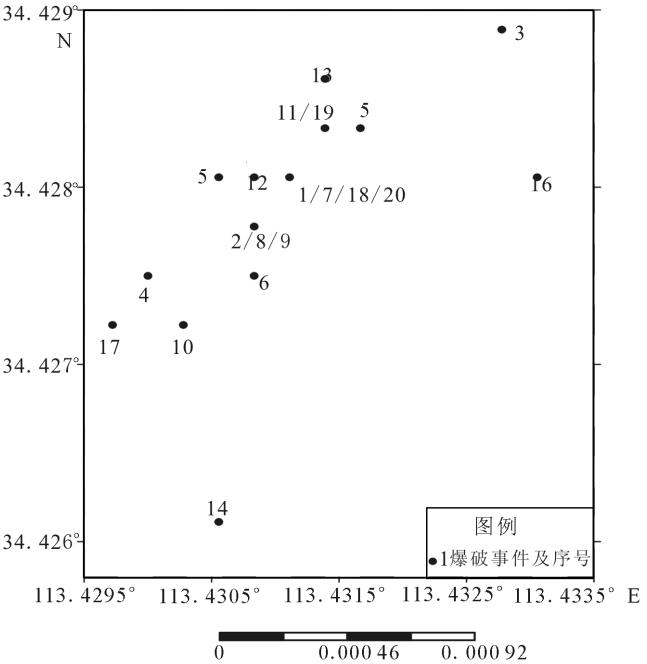


图 3　定位后的 20 个微地震事件分布

Fig.3　Distribution of the 20 micro-seismic events after location

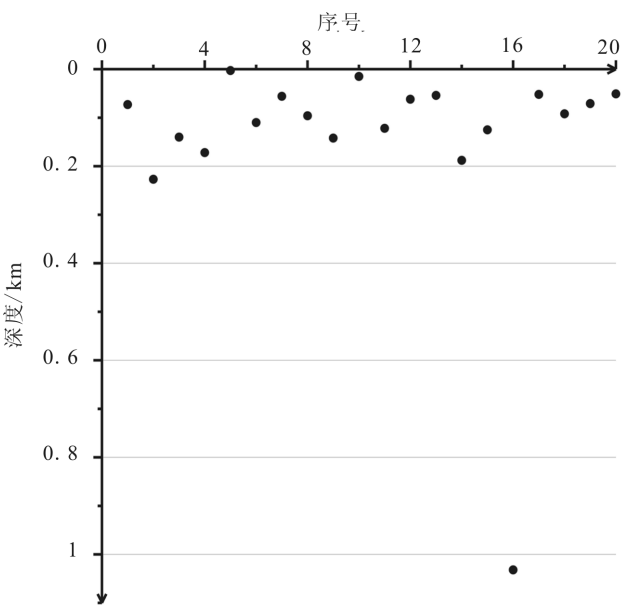


图 4　定位后的 20 个地震事件震源深度

Fig.4　Focal depth of the 20 micro-seismic events after location

由于能够搜集到煤矿开采准确的放炮时间，挑选地震事件的时候根据放炮时间追踪即可。主要的定位深度集中在 150 m 左右，收集到的煤矿巷道开采面与定位结果吻合较好。说明密集台网在煤矿开采面（爆破方式）定位中是一种有效的方法，能够在平面上进行快速定位。

4　结论和讨论

经过分析研究，主要在以下几个方面取得一定的成果：

（1）采用高精度数字地震台网（台阵）技术可以较好地控制矿山地下开采面的动态变化。水平定位精度较高约为 70 m，深度定位较差，最大误差可达到 500 m。若能在不同高程内布设台网（如在不同深度的开采井中布设台网）能够提高深度定位精度。

（2）根据本次试验结果，数字地震台网的控制距离主要由以下因素确定：爆炸能量、地下开采面的深度、监测区内的干扰背景、仪器的灵敏度及其抗干扰能力等。

（3）根据本次试验结果，震源深度在 300 m 左右地震台网布设的最大半径约为 1 000 m 左右为宜。超过 1 000 m 的地震监测台，其信号明显减弱，很难取得理想的定位效果。加大台网布设密度能够取得更高的定位精度。

（4）受各种干扰因素、地质背景条件的影响，布置在不同地方的数字地震台针对同一个地下开采面的爆炸事件会有不同地反映，所以地震台的选择位置很重要。试验结果表明，布设在基岩出露或无采空区、塌陷区的台站资料干扰小、信号强度大。

（5）为了准确定位地下开采面的位置，一个完整的、可以使用的地震定位事件必须保证有 5 个以上的地震台的记录。

参考文献（References）

[1]　Waldhauser F，Ellsworth W L. A Double-difference Earthquake Location Algorithm：Method and Application to the Northern Hayward Fault，California[J]. Bull Seism Soc Am，2000，90(6)：1353-1368.

[2]　佟玉霞. 地震台阵的设计与数据处理研究[D]. 北京：中国地震局地球物理研究所，2003.
TONG Yu-xia. Design of Array and Research on Data Processing[D]. Beijing：Institute of Geophysics，China Earthquake Administration，2003.(in Chinese)

[3]　李志海，赵翠萍，王海涛，等. 双差地震定位法在北天山地区地震精确定位中的初步应用[J]. 内陆地震，2004，18(2)：146-153.
LI Zhi-hai，ZHAO Cui-ping，WANG Hai-tao，et al. The Preliminary Application of Dual-difference Earthquake Location Method in Precise Location for the North Tianshan Mountain[J]. Inland Earthquake，2004，18(2)：146-153.(in Chinese)

[4]　赖晓玲，李松林，何加勇. 2006 年唐山地区临时地震台网微震观测初步结果[J]. 大地测量与地球动力学，2008，28(1)：7-10.
LAI Xiao-ling，LI Song-lin，HE Jia-yong，et al. Prelinminary Results of Microearthquake Observation by Temporary Seism Station Networks in Tangshan Region in 2006[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics，2008，28(1)：7-10.(in Chinese)

[5]　王平，狄秀玲，李少睿，等. 用爆破事件检验区域数字地震台网常规地震定位方法的定位精度[J]. 地震地磁观测与研究，2006，27(3)：25-28.
WANG Ping，DI Xiu-ling，LI Shao-rui，et al. Testing the Precision of Routine Earthquake Location Methods in Regional

Digital Seismograph Network with Explosion Events Data[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2006,27(3):25-28.(in Chinese)

[6] 姜福兴,宋广东,孔令海,等.微地震波在煤矿岩层中的传播特征研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):2674-2678.
JIANG Fu-xing,SONG Guang-dong,KONG Ling-hai,et al.Research on Spread Characteristics of Micro-seismic Wave in Mine Strata[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(1):2674-2678.(in Chinese)

[7] 黄维新,贾明涛,陈有燎,等.基于微震监测技术在矿山安全管理中的应用研究[J].中国安全科学学报,2008,18(1):165-170.
HUANG Wei-xin,JIA Ming-tao,CHEN You-liao,et al.Study on Rockmass Instability Based on Mincroseismic Monitoring Technology and Its Progress[J].China Safety Science Journal, 2008,18(1):165-170.(in Chinese)

[8] 高见,张元生,郭飚,等.甘东南流动地震台阵微震监测结果[J].地震工程学报,2013,35(01):177-182.
GAO Jian,ZHANG Yuan-sheng,GUO Biao,et al.Microearthquake Location Determined by Portable Seismic Array Data in Southeast Gansu Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(01):177-182.(in Chinese)

[9] 孙绪金.浅层地震物探技术在工程地质与地下水环境研究中的应用[J].华北水利水电学院学报,1999, 20(3):37-40.
SUN Xu-jin.The Application of Geophysical Prospecting Technique of Shallow Seism in Engineering Geology Groundwater Environment[J].Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,1999, 20(3):37-40.(in Chinese)

[10] 刘巧霞,沙成宁,杨卓欣,等.玉树 7.1 级地震余震重新定位及其时空分布特征研究[J].大地测量与地球动力学,2012,32(4):5-9.
LIU Qiao-xia, SHA CHENG-ning, YANG Zhuo-xin, et al. Relocation of Aftershocks of Yushu M_S7.1 Earthquake and Their Spatial Distribution Characteristics[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2012,32 (4):5-9.(in Chinese)

[11] 刘巧霞,杨卓欣,莘海亮,等.玉树 M_S7.1 级地震部分余震重新定位及发震构造分析[J].地球物理学报,2012,55(1):146-154.
LIU Qiao-xia,YANG Zhuo-xin,XIN Hai-Liang,et al.Relocation of Yushu M_S7.1 Earthquake Aftershocks and Discussion on Seismogenic Structure[J].Chinese Journal of Geophysics, 2012,55(1):146-154.(in Chinese)

[12] 惠少兴,张元生,李顺成,等.*t-D* 地震定位方法研究[J].西北地震学报,2012,34(1):10-13.
HUI Shao-xing,ZHANG Yuan-sheng,LI Shun-cheng,et al. Study on *t-D* Earthquake Location Method[J].Northwestern Seismological Journal,2012,34(1):10-13.(in Chinese)

[13] 冯少孔,车爱兰,吴志坚,等.高密度面波勘探和小型台阵地脉动观测在西部地区地震防灾中的应用[J].地震工程学报, 2013,34(4):781-788.
FENG Shao-kong,CHE Ai-lan,WU Zhi-jia,et al.Application of Surface Wave Surveys and Array Microtremor Observations for Earthquake Disaster Mitigation in Western China[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013,34(4):781-788.(in Chinese)