

DOI: 10.11779/CJGE201405013

# 矿山尺度下微震定位精度及稳定性控制初探

谢兴楠<sup>1</sup>, 叶根喜<sup>2</sup>, 柳建新<sup>1</sup>

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学), 北京 100083)

**摘要:** 对微震定位精度和稳定性控制一直是矿山微震监测工程的一个难题。通过对微震监测系统误差的深入剖析, 提出了“统一定位误差”的概念, 将微震定位的误差条件进行了前置性统一; 结合非线性定位的特点, 对微震定位参数进行了非线性变换, 提出了降维定位的基本思路及实现方法, 解释了平面截割定位的几何原理, 揭示了微震定位(平面截割法)的基本实质, 并研究了内、外场定位的定位稳定性及控制方法。研究表明, “统一定位误差”是实现对微震定位精度控制的前置杠杆及控制尺度, 指出微震定位结果的精度从属于几何定位, 单一数值解(迭代极小值或最优化极小值)不具备绝对工程意义。理论分析及试验结果证实, 平面截割定位是控制内、外近场定位尺度条件下的控制定位稳定性的有效途径。

**关键词:** 微震; 定位; 定位精度; 稳定性; 误差

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)05-0899-06

作者简介: 谢兴楠(1965-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地质与岩土工程信息技术的科研与管理工作。E-mail: 54935713@qq.com。

## On control of accuracy and stability of microseismic location in a mining scale

XIE Xing-nan<sup>1</sup>, YE Gen-xi<sup>2</sup>, LIU Jian-xin<sup>1</sup>

(1. School of geosciences and Info-physics of Central South University, Changsha 410083, China; 2. MOE Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** For the microseismic monitoring in a mining scale, the control of accuracy and stability of location is always a difficult problem. Based on the thorough analysis of the error of monitoring system caused by propagation velocity, coordinates of sensors and picking time, the term of integrity-error of location which can be taken as the fundamental principles to appraise studies on the monitoring engineering is proposed. Nonlinear analysis and transformation are conducted to realize the dimension reduction, the called plane-cutting location method is given and the basic nature of location is also clearly demonstrated. It is concluded that the integrity-error is the scale parameter and precondition in determining the location error. The accuracy and stability of location basically rely on the analytic geometry rather than numerical solution. The theoretical analyses and experiments both show that the plane-cutting location is a reasonable way of keeping the accuracy and stability of location in a acceptable level in a mining scale.

**Key words:** microseism; location; location accuracy; location stability; error

## 0 引言

微震监测及定位技术在矿山工程领域的推广与应用, 是宏观地球物理技术在微观工程领域拓展性应用的具体体现。中国各类矿山在不同的应用领域(矿震、冲击地压/岩爆、突水等<sup>[1-5]</sup>)均有较为成功的应用案例, 并取得了令人满意的成果。但是定位结果与实际情况不符或者误差大, 是当前国内外微震监测工程的一个通病, 从国内设备的微震定位结果来看, 顶板震源被定位在底板岩体内或底板震源被定位在顶板岩体内的现象, 可谓司空见惯。原因可以归结为3点: ①直接引用天然地震定位思想的多, 针对矿山小尺度

空间研究的少; ②基于监测结果展开的研究多, 微震定位基础理论研究的少; ③定位研究只关注数学算法研究的多, 重视定位方法研究的少。

国内外学者在进行矿山监测及定位<sup>[6-8]</sup>时, 普遍的做法是采用人工震源进行系统误差校正, 这种方法在一定程度上避免了地震波速度结构<sup>[9-10]</sup>差异造成的误差。但在进行随机震源定位时, 却缺乏合理的误差校正依据和方法。目前基本上是以非线性数值解的方法

基金项目: 国家自然科学基金项目(41174103); 国家留学基金项目(2008)

收稿日期: 2013-09-10

来进行震源位置反演, 迭代极小值或最优化极小值为定位结果选取的基本约束条件, 缺乏对微震定位尤其是矿山尺度下定位实质的认识, 尤其是对几何约束的原理缺乏深入的了解。

澳大利亚联邦科学院 (CSIRO) 微地震工程专家与笔者交流时指出, 定位误差是由综合因素导致的, 监测成果是否真的能服务于工程, 还要在定位的精度控制方面做大量的研究工作。经过对微震定位数年的基础研究和工程实践, 笔者在揭示微震定位实质、精度和稳定性控制及其微震台网优化方面做了探讨, 以期抛砖引玉。

## 1 震源定位的两个控制标示

### 1.1 “统一定位误差”的定位精度控制标示

震源定位可解释为: 在客观的物理误差基础上, 通过一定的数学和物理模型反演出一个在误差容忍范围内的数学解的过程。这里物理误差指的是传感器三维坐标误差  $\Delta_c$ 、非均匀传播介质引起的波速误差  $\Delta_v$ 、拾取到时的读取误差  $\Delta_t$ 、传感器激发引起的耦合误差  $\Delta_s$ 、硬件系统一致性误差  $\Delta_h$ , 等等。这里将统一物理误差  $\Delta_p$  定义为

$$\Delta_p = \Delta_c + \Delta_v + \Delta_t + \Delta_s + \dots + \Delta_h \quad (1)$$

设 A1 传感器的既定坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 接收微震信号的时刻为  $t_1$ ,  $v_1$  为波速,  $(x, y, z)$  为震源坐标。则有

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = v_1(t_1 - t) \quad (2)$$

在求解定位坐标的数学求解过程中, 传感器坐标和波速均假设为既定值, 传感器初至波的读取到时  $t_1$  为统一物理误差条件下的数学值。这里假设  $t_1$  为传感器初至波的理论到时, 而偏离幅值  $\Delta_w$  为

$$\Delta_w = |t_w - t_1| \quad (3)$$

式中,  $t_w$  为统一物理误差  $\Delta_p$  条件下, 所进行的  $\Delta_w$  幅值的误差补偿。这里将偏离幅值  $\Delta_w$  定义为矿山尺度条件下的微震定位的“统一定位误差”。可简单理解为: 在未进行数学求解前, 到时误差是一切物理误差引起的数学误差的集中体现或总和, 这是微震定位精度控制的最重要标示。

### 1.2 “场”定位稳定性的控制标示

笔者在文献[4]中提出了内、外场定位的概念。“内场定位”是指震源位置在传感器组合空间的内部的定位过程, 同理, “外场定位”是指震源位置在传感器组合空间的外部的定位过程。

在矿山尺度条件下的微震震源定位还涉及到近、远场的组合定位。“近场定位”是指震源位置在传感器组合空间的外部附近的定位过程, 同理, “远场定位”是指震源位置在传感器组合空间的外部较远处的定位

过程。这里只提出有关“场”定位的定性概念, 下文进行定量化研究。

## 2 提升定位精度和稳定性的降维原理及实现方法

非线性方程组理论认为, 方程组解的稳定性随未知变量数目的增加呈几何级下降。因此, 降低维数是提高定位稳定性和可靠度的一个重要思路。震源坐标  $(x, y, z)$ , 是最基本的震源参数。震源起震时刻  $t$  没有实际意义, 但却是求解震源坐标的一个重要参变量。

### 2.1 四维降为三维的实现方法

设 A1 传感器的坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 接收微震信号的时刻为  $t_1$ ; A2 传感器的坐标为  $(x_2, y_2, z_2)$ , 接收到微震信号的时刻为  $t_2$ , 则可分别组成非线性方程:

$$\sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = v(t_1 - t), \quad (4)$$

$$\sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} = v(t_2 - t), \quad (5)$$

式中,  $v$  为波速, 设为常数, 假设  $t_2$  大于  $t_1$ , 式 (5) 减去式 (4) 可以得到

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \\ & \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = v(t_2 - t_1) \quad (6) \end{aligned}$$

式 (6) 的几何解释是: 空间任意一点到两定点的距离之差 (等号左侧) 是一个常数 (等号右侧)。由此认为, 震源的运动轨迹是以 A1 传感器坐标点  $(x_1, y_1, z_1)$  和 A2 传感器坐标点  $(x_2, y_2, z_2)$  为焦点的双曲面<sup>[11]</sup>, 而且必然是靠近 A1 传感器的那一支 (如图 1 左侧虚框覆盖的部分)。

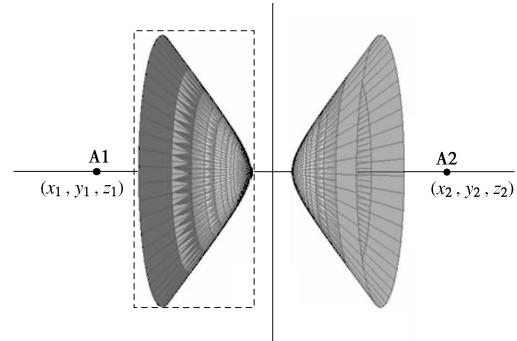


图 1 震源运动轨迹为双曲面示意图

Fig. 1 Hyperboloid of source trajectory

### 2.2 三维降为二维的实现方法

式 (6) 仍然有 3 个未知变量, 如果直接建立目标优化函数或非线性方程组, 依然会造成求解的不稳定性, 这是由非线性数学理论决定的。

式 (6) 中, 如果用平面  $z_0$  去代替  $z$  值, 便可以在平面  $z_0$  上得到一组双曲面的截痕, 即一组双曲线。

当用不同平面去截割这个双曲面, 便可得到不同的双曲线截痕。当用同一个平面截割不同组合 (A1 和 A2, A1 和 A3, A1 和 A4, A2 和 A3, A3, A4 为另外 2 个参与定位的传感器) 的双曲面, 可以得到不同组合汇交的双曲线, 截割原理如图 2 所示。

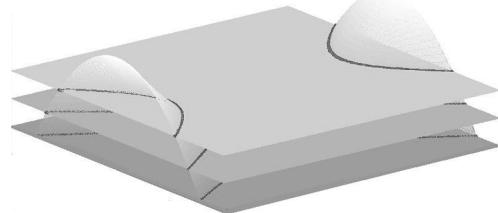


图 2 平面截割双曲面的截痕为双曲线

Fig. 2 Hyperbola of plane-cutting hyperboloid

假设 A3 传感器的坐标分为  $(x_3, y_3, z_3)$ , 接收微震信号的时刻为  $t_3$ ; A4 传感器的坐标分为  $(x_4, y_4, z_4)$ , 接收到微震信号的时刻为  $t_4$ , 且  $t_3, t_4$  均大于  $t_1$ , 按上述办法, 分别减去式 (4) 可以得到

$$\sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = v(t_3 - t_1), \quad (7)$$

$$\sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = v(t_4 - t_1)。 \quad (8)$$

这样, 式 (6) ~ (8) 共组成了 3 组双曲面, 如果用真实震源所在的平面  $z_0 = z$  去截割这 3 组双曲面, 则在  $z_0 = z$  平面上的截痕汇交于一点 (见图 3 (a)), 这个点就是震源点。

如果平面  $z_0$  不在震源平面上, 则截痕不汇交于一点或汇交于一个区域 (见图 3 (b)), 而且, 截平面越靠近真实震源平面, 汇交区域越小。

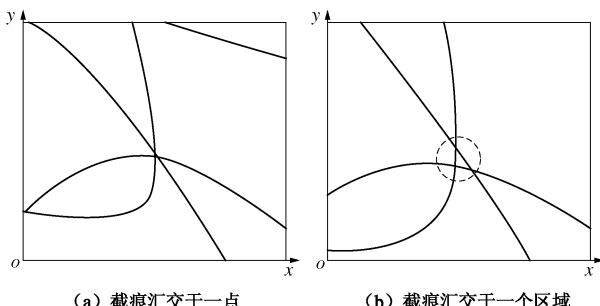


图 3 平面截割定位实例图

Fig. 3 Instances of plane-cutting positioning

### 2.3 震源低维定位揭示内、外场定位的实质

假设震源在  $z_0 = z$  平面上, 则在该平面上 A1 和 A2 传感器组成的双曲线截痕 (平面解的分布) 如图 4 所示。在该平面上, 不同到时差对应不同的双曲线截痕, 如果 A1 和 A2 传感器接收的到时相同 (即时差为 0), 震源轨迹为中轴线<sup>[11]</sup>, 到时差越大, 双曲线曲率

越大。

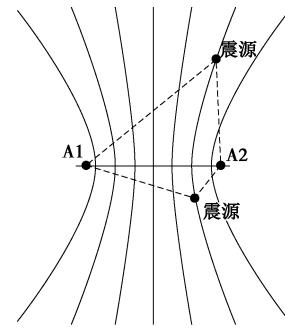


图 4 平面内解的轨迹为双曲线截痕

Fig. 4 Hyperbola of solution trajectory

同理, 绘制出 A2、A3 与 A1 组成的双曲线截痕, 并合成, 如图 5 所示。

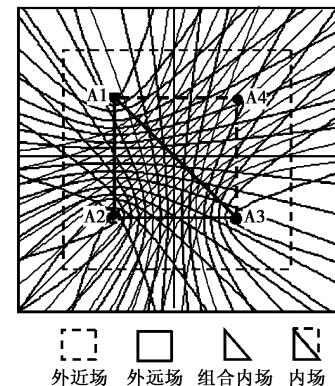


图 5 A3、A2 与 A1 两两组合形成的双曲线截痕及内外场边界

Fig. 5 Combined hyperbolic trajectory and boundaries of inner and outer fields of A3, A2 and A1

图 5 可以清楚地看出, 在 A3、A2 和 A1 “组合内场”, 双曲线交点密集; 其次在虚线框与三角框之间的“外近场”, 交点逐渐变疏; 在虚线框和实线框之间的“远外场”, 交点极其稀疏。图 5 论证了内场定位精度和稳定性高于进外场、进外场定位精度和稳定性高于远外场的客观现象, 这就是分场定位的“尺度效应”。图 6 是笔者根据试验研究, 推断出的震源定位尺度效应的近似量化关系, 据此, 可以对矿山尺度条件下的

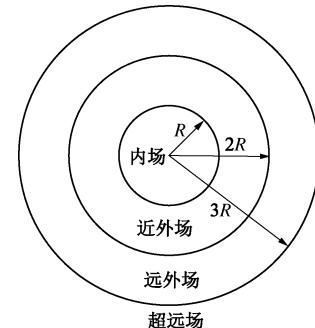


图 6 内外场定位区域的近似定量分布图

Fig. 6 Approximate quantitative distribution of location area of inner and outer fields

微震监测台网优化进行量化设计。在进行定位组合时, 尽量控制在近外场的尺度内, 图 6 是的几何图示对震源定位结果的可靠性和稳定性的重要指示, 也是避免纯数学解“极小值”假象的辨别标示。

### 3 “统一定位误差”定位试验及评价

#### 3.1 震源高度位置的近似判定方法及实现原理

针对这一关键问题, 笔者根据近些年的工程实践研究, 设计了一种直接识别顶底板震源类型的方法, 并研究了震源高度方向的相对可靠控制方法。基本设计思想如下: 垂直于煤层(取笔者研究过的实际矿山突水<sup>[12]</sup>监测工程为例, 煤层厚度 3.4 m)的合适位置, 选定一根垂线, 在顶底板按图 7 设计的方式进行测点布置<sup>[13]</sup>。从图 4 可以推出, 如果 A1 测点先于 A4 测点收到微震信号, 则可判定震源位置在煤层上方; 如果 A4 测点先于 A1 测点收到微震信号, 则可判定震源位置在煤层下方; 如果 A4 测点与 A1 测点同时或几乎同时收到微震信号, 则可判定震源位置在煤层内或临近。为了进一步量化震源的高度位置, 增设 A2 和 A3 测点进行控制。设 A2 先于或等于测点 A1 收到信号记为  $t_{A2} \leq t_{A1}$ , 下同。则有

$$\begin{cases} t_{A1} \leq t_{A4}, t_{A1} \geq t_{A2} & \rightarrow \text{震源在高度区域I} \\ t_{A1} \leq t_{A4}, t_{A1} \geq t_{A2} & \rightarrow \text{震源在高度区域II} \\ t_{A1} \leq t_{A4}, t_{A1} \geq t_{A2} & \rightarrow \text{震源在高度区域III} \\ t_{A1} \leq t_{A4}, t_{A1} \geq t_{A2} & \rightarrow \text{震源在高度区域IV} \end{cases}$$

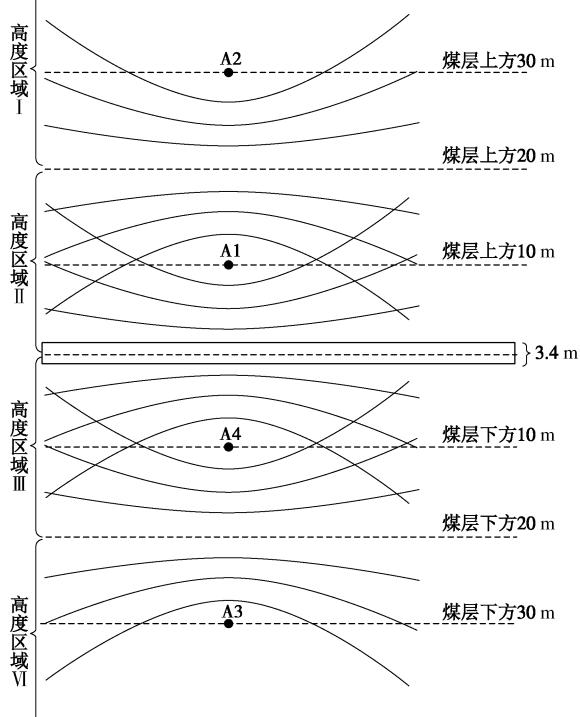


图 7 震源高度位置初步判断的测点布置方式

Fig. 7 Arrangement of measuring points at position of source height by preliminary judgment

#### 3.2 震源定位误差的试验及评价

设内场和外近场内分别有一个震源(图 8)。根据现场客观情况, 设传感器的到时一致性引起的误差为  $\pm 1 \text{ ms}$ ; 因波速、手工拾取以及传感器耦合关系引起的误差为  $\pm 1 \text{ ms}$ , 即“统一定位误差”在  $\pm 2 \text{ ms}$  以内。通过图 7 的方法, 可以近似判断出震源高度位置的近似范围, 取  $\pm 10 \text{ m}$  即  $20 \text{ m}$  的波动范围进行以下模拟试验。

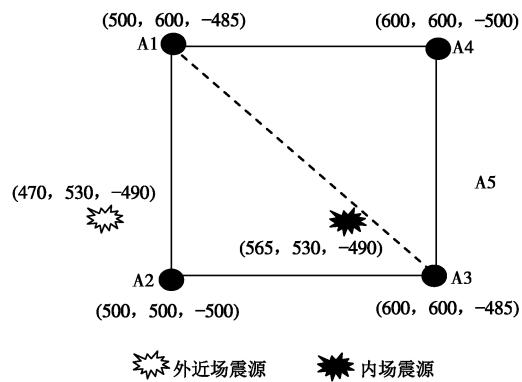


图 8 内外场震源模拟定位示意图

Fig. 8 Source modeling location of inner and outer fields

试验参数见表 1, 到时在  $\pm 2 \text{ ms}$  微震误差范围内随即选取, 设起震时刻  $T_0$  为  $100 \text{ ms}$ , 理论波速为  $4 \text{ m/ms}$ 。试验方案是: 根据图 7 的方法初步判断出震源在“高度区域III”, 同时又处于 A1 和 A3 测点组成的中垂面下方, 即大约在  $(-478 \sim -492.5 \text{ m})$  的高度范围内。然后在此高度范围内用高差为  $5 \text{ m}$  的 Z 平面去截割组合成的双曲面。根据几何知识, 任意 3 个测点两两组合, 截痕必然交于一点, 笔者将这个点作为震源平面位置的控制交点; 过这个点的几个单支双曲线线, 被称作控制线; 震源的平面位置在这控制线上滑动, 并滑向另外 2 个交点的连线。为试验方便, 在控制交点、控制线和另外 2 个交点的约束下画圆, 圆心为近似震源平面位置。图 9 为截面  $Z = -478 \text{ m}$  时得到的双曲线截痕图, 震源平面距离误差为  $4.2 \text{ m}$ 。

表 1 内、外场定位模拟震源及到时参数

Table 1 Simulated sources of inner and outer fields and time parameters

名称	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标	到时 /ms	随机误差/ms
内场震源	565	530	-490	100.00	—
测点 A1	500	600	-485	123.91	+1.4
测点 A2	500	500	-500	118.07	+1.0
测点 A3	600	500	-485	111.59	+0.5
测点 A4	600	600	-500	119.72	-1.2
外场震源	470	530	-490	100.00	—
测点 A1	500	600	-485	119.08	+1.4
测点 A2	500	500	-500	110.89	+1.0
测点 A3	600	500	-485	133.38	+0.5
测点 A4	600	600	-500	137.01	-1.2

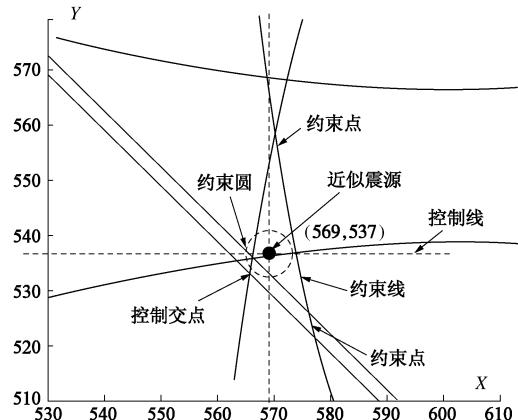
图 9 截面  $Z = -478$  时的双曲线截痕及震源平面坐标

Fig. 9 Hyperbolic trajectory and plane coordinates of sources cross section of  $Z = 478$  m

从表 2 试验结果看, 外场定位的定位误差明显高于内场定位, 而且平面位置误差随着高度方向的变化尺度较小, 即具有较高的稳定性, 与图 5 的理论分析结果吻合, 可以认为在内场和外近场的定位空间完全可以控制在 10 m 以内的定位误差, 符合煤矿小尺度空间突水<sup>[14]</sup>监测的定位要求。

表 2 内、外场定位震源模拟定位结果

Table 2 Modeling results of location sources of inner and outer fields

Z 平面取值	X 坐标	Y 坐标	平面距离误差/m
-479 (内场)	569	537	4.2
-483 (内场)	568	537	3.4
-488 (内场)	567	536	2.2
-493 (内场)	568	534	3.6
-479 (外场)	464	537	9.2
-483 (外场)	471	536	6.1
-488 (外场)	472	535	5.4
-493 (外场)	475	536	7.8

## 4 结 论

(1) “统一定位误差”是综合误差的概念, 是定量描述定位结果的前置条件和基本标尺。

(2) 降维定位及平面截割原理揭示了微震定位的内、外场定位实质, 并指出了“统一定位误差”的量值变化与定位误差三维空间几何空间的关系, 进一步解释了“统一定位误差”和“场”定位的 2 个基本标示的选取理由。

(3) 双曲面平面截割的原理和试验表明在矿山尺度条件下, 在“统一定位误差”值的容忍范围内, 震源的平面位置的控制呈现出高稳定性和高精度性。该定位思路为大尺度矿震平面位置定位提供了一个有力思路。

(4) 震源高度位置控制的传感器布置方式及降维定位方法, 能够满足矿山尺度条件下的微地震突水监测对定位精度和稳定性的要求。

## 参考文献:

- [1] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 772 - 775. (LU Cai-ping, DOU Lin-ming, WU Xing-rong, et al. Frequency spectrum analysis of microseismic monitoring and signal differentiation of rock material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 772 - 775. (in Chinese))
- [2] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 基于微震监测及应力场分析的冲击地压预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 4745 - 4749. (ZHAO Xing-dong, TANG Chun-an, LI Yuan-hui, et al. Prediction method of rock burst based on microseismic monitoring and stress field analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 4745 - 4749. (in Chinese))
- [3] 汪华君, 姜福兴, 成云海, 等. 覆岩导水裂隙带高度的微地震(MS)监测研究[J]. 煤炭工程, 2006(3): 74 - 76. (WANG Hua-jun, JIANG Fu-xing, CHENG Yun-hai, et al. Research on microseismic monitoring at top level of water conducted cracking zone in overburden rock[J]. Coal Engineering, 2006(3): 74 - 76. (in Chinese))
- [4] 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): 1932 - 1938. (JIANG Fu-xing, YE Gen-xi, WANG Cun-wen, 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): 1932 - 1938. (in Chinese))
- [5] 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 Fu-xing, XUN Luo, YANG Shu-hua. 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. (in Chinese))
- [6] 林峰, 李庶林, 薛云亮, 等. 基于不同初值的微震源定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 996 - 1002. (LIN Feng, LI Shu-lin, XUE Yun-liang, et al. Microseismic sources location method basced on different initial values[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 996 - 1002. (in Chinese))
- [7] 潘一山, 赵扬锋, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1002 - 1011. (PAN Yi-shan, ZHAO Yang-feng, GUAN Fu-hai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its

- application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(5): 1002 – 1011. (in Chinese))
- [8] 张银平. 岩体声发射与微震监监测技术及其应用[J]. 工程爆破, 2002, **8**(1): 58 – 61. (ZHANG Yin-ping. Rock mass acoustic emission and micro-seismic monitoring and localizing technology and their applications[J]. Engineering Blasting, 2002, **8**(1): 58 – 61. (in Chinese))
- [9] BARTON N. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy[M]. London and Netherlands: Taylor and Francis, 2006.
- [10] DVORKIN J, BREVIK I. Diagnosing high-porosity sandstones: Strength and permeability from porosity and velocity[J]. Geophysics, 1999, **64**(3): 795 – 799.
- [11] GE M. Optimization of Transducer array geometry for acoustic emission/microseismic source location[D]. Pennsylvania: Department of Mineral Engineering, The Pennsylvania State University, 1988, 237.
- [12] 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): 1053 – 1058. (YE Gen-xi, JIANG Fu-xing, GUO Yan-hua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field micro-seismic monitoring in a deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 1053 – 1058. (in Chinese))
- [13] 杨淑华, 张兴民, 姜福兴, 等. 微地震定位监测的深孔检波器及其安装技术[J]. 北京科技大学学报, 2006, **28**(1): 68-70, 100. (YANG Shu-hua, ZHANG Xing-min, JIANG Fu-xing, et al. Deep hole geophones and installing techniques used in microseismic monitoring[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, **28**(1): 68-70, 100. (in Chinese))
- [14] 施龙青, 韩进. 底板突水机制及预测预报[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2004. (SHI Long-qing, HAN Jin. Floor water-inrush mechanism and prediction[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2004. (in Chinese))

## 勘 误

岩土工程学报 2014 年第 36 卷第 3 期文章《饱和土体固结压缩和蠕变的热力学本构理论及模型分析》中公式 (16) 编辑有误, 正确的表达应为

$$\pi_{ij} = \frac{\partial \omega_e}{\partial \varepsilon_{ij}^e} = 1.5B(\varepsilon_v^e + c)^{0.5} \left[ (\varepsilon_v^e)^2 + \xi(\varepsilon_s^e)^2 \right] \delta_{ij} + 2B(\varepsilon_v^e + c)^{1.5} (\varepsilon_v^e \delta_{ij} + \xi \varepsilon_{ij}^e) .$$

对我们工作疏忽造成的错误, 向广大读者和原文作者致歉。特此更正。

(本刊编辑部)