

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0847

缓倾地层微震定位算法探讨及其数值验证

吴顺川^{1,2}, 陈子健³, 张诗淮¹, 徐淼斐¹, 白添羊¹

(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. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘 要: 倾斜层状地层中速度模型对于震源精确定位具有重要意义。基于水平层状地层两点间的快速射线追踪法, 分析了应力波在倾斜地层中的传播路径及规律。结合网格搜索法, 提出了针对倾斜地层的微震定位算法, 并与传统的基于单一速度模型的定位算法进行对比分析; 探索性地采用了颗粒流理论构建地层数值模型, 通过颗粒间的相互作用模拟应力波传播进行定位算法有效性验证。研究表明: (1) 对于倾斜地层, 基于简化弹性波等速传播规律的定位算法精度较差, 单一速度模型不能满足复杂介质的定位要求; (2) 采用倾斜分层速度模型并改进应力波传播路径的计算方法能有效提高倾斜地层的震源定位精度, 同时分析了地层倾角以及地层数对算法精度的影响, 表明定位误差与倾角、地层数成正比; (3) 通过减小网格搜索法的网格尺寸可在一定程度上提高定位精度, 合理的尺寸大小和搜索策略有助于网格搜索法在实际工程中的应用。建立的倾斜地层震源定位及其验证方法可为进一步研究复杂地层定位监测技术提供重要的理论和技术支撑。

关 键 词: 微震; 定位算法; 倾斜地层; 速度模型; 传播路径

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0297-11

Microseismic location algorithm for gently inclined strata and its numerical verification

WU Shun-chuan^{1,2}, CHEN Zi-jian³, ZHANG Shi-huai¹, XU Miao-fei¹, BAI Tian-yang¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311122, China)

Abstract: The velocity model is significant for precisely locating the earthquake source in inclined strata. This study analyzed the propagation path and propagation regularity of stress waves in inclined strata, according to the fast ray-tracing technique between two points in horizontal layered media. Microseismic location algorithm was developed for inclined strata using grid searching method, which was also compared with traditional location methods based on single velocity model. The particle flow theory was exploratively used to establish the stratum numerical model. Subsequently, the validity of the proposed algorithm was verified by simulating the stress wave propagation through the interaction of particles. Results show that the traditional location algorithm, based on simplified elastic wave propagation at a constant velocity, is imprecise for inclined strata, indicating that the single velocity model cannot satisfy the locating demand for complex media. On the basis of the inclined layered velocity model and a modified computational method for stress wave propagation path, the seismic sources can be located much more accurately. Meanwhile, the location deviation was found to be proportional to the dip angle and stratum number. In addition, the location precision can be also increased by reducing the grid size in the grid searching method, suggesting that reasonable sizes and searching strategies can facilitate the application of grid searching method in practical engineering. The microseismic location method and the proposed verification process can provide important theoretical and technical support for further studies on the positioning and monitoring technology in the complex strata.

Keywords: microseism; location algorithm; inclined strata; velocity model; propagation path

1 引 言

岩体工程中普遍采用微震监测技术进行围岩远

场致灾动载源监测。微震监测技术是利用岩体变形和破坏后产生的应力波进行工程岩体稳定性监测及灾害预警的技术方法, 是矿山尤其是煤矿冲击矿压

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: 科技北京百名领军人才培养工程(No. Z151100000315014); 国家自然科学基金项目(No. 51174014, No. 51774020)。

This work was supported by the Beijing Training Project for the Leading Talents in Science & Technology (Z151100000315014) and the National Natural Science Foundation of China (51174014, 51774020).

第一作者简介: 吴顺川, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、采矿工程等方面的教学与研究工作。

E-mail: wushunchuan@ustb.edu.cn

通讯作者: 陈子健, 男, 1992 年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程、地下空间工程等方面的设计与研究工作。E-mail: 544546336@qq.com

以及采空区垮塌预测预报有效的监测方法之一^[1]。震源定位是微震监测技术中最基本也是最重要的任务,而定位算法又是实现震源定位的关键。1912年德国物理学家 Geiger^[2]率先将高斯牛顿迭代原理应用于震源定位中,该方法利用最小二乘法对残差进行优化处理,通过多次代数迭代求解震源位置。针对求解线性方程组时遇到的各类问题,学者们还提出了各种改进的方法。例如,阻尼最小二乘法、共轭梯度法以及奇异值分解法等^[3]。然而在某些特定的情况下,代数迭代法仍会出现迭代不收敛以及定位结果不准确的问题^[4]。基于此,Prugger等^[5]将单纯形法引入微震定位研究中,该方法从几何搜索的角度进行迭代计算,不要求解函数的梯度矩阵,只需满足迭代求解的基本假设,即迭代次数趋于无穷大时,解唯一且趋于真值,即迭代收敛。实际应用表明,无论是基于高斯牛顿的代数迭代法还是单纯形几何迭代法,由于算法本身存在的缺陷,都有可能致使定位结果达到一个局部最小值,而不是全局最优解^[6-7]。随着计算机技术的快速发展以及学科间的交叉融合,越来越多的全局优化算法被开发出来,如网格搜索法^[8]、模拟退火法^[9]、基因遗传算法^[10]以及粒子群算法^[11]等。虽然这些定位算法由于繁杂的计算量使得其在微震定位领域的实际应用还相对较少,但随着计算机处理能力的不断提升,全局优化算法的优越性将得到充分体现。

目前各大主流微震监测设备采用的定位算法均基于简化弹性波等速传播规律进行微震事件定位,如直接P波法^[12]、最小二乘法、Geiger法、单纯形法等,算法虽然在一定程度上提高了微震的定位精度,但忽略或弱化了由于实际煤岩体的层状结构造成的应力波能量衰减及速度变化,加之各不连续面的反射、折射等影响,使得定位误差不断增大,极大地影响了微震定位精度和监测效果^[7]。Tian等^[13]考虑水平分层速度模型,改进了基于水平层状介质的两点间快速射线追踪法,在一定程度上准确计算了波在水平层状介质间的传播路径。然而,实际工程中煤岩体多为倾斜分布,波在倾斜分层中的传播路径更为复杂。为此本文提出了一种针对倾斜岩层内应力波传播路径的改进算法,并结合现有的定位算法,实现倾斜岩层条件下震源位置的准确定位。

此外,定位算法的相关验证需事先准确获取地层信息、速度模型以及波形特征等大量资料,而进行室内试验和原位试验的费用及设备昂贵,再加上应力波在现场复杂介质条件下的实际传播过程极其复杂,理论条件难以满足,此时数值模拟体现出其

在研究特定条件下理论规律的独特优势。基于非连续介质理论的离散元方法(DEM)^[14]是一种用于研究岩石边坡、节理和裂纹的数值模拟方法,该方法用离散单元之间的接触关系取代复杂的本构关系,可有效模拟块体或颗粒结构材料的细观力学行为^[15]。目前,国内外已有部分学者利用颗粒模型研究应力波在岩石内部的传播规律。Nabipour^[16]通过在PFC2D程序中建立二维六角形排列、方形排列颗粒模型,将应力波在PFC2D模型中的传播规律与DPS模拟结果进行了对比,验证了颗粒流理论分析应力波传播的合理性;Hazzard等^[17]利用PFC3D建立砂岩的不规则排列颗粒模型,研究了应力波在数值试样内部传播特征。但在震源定位数值验证方面未见相关文献。本文基于颗粒流理论建立数值地层波动力学模型,采用主动震源法进行应力波模拟及震源定位分析。对比倾斜分层速度模型与单一速度模型定位精度的差异,并分析地层倾角和层数对定位误差的影响,可为进一步研究应力波在复杂地层中的传播规律及震源定位提供重要借鉴。

2 网格搜索定位法

网格搜索法是全局优化算法中最基本、最直观的方法^[6]。该方法需预先给定解存在的空间,再按一定尺寸划分网格,最后通过搜索所有网格点求取全局最优解。

2.1 算法原理

为减少计算量,通常会简化地层模型,假定震源到各监测点的岩层均匀(即单一速度模型),则应力波的传播速度 c_{con} 为定值。若震源坐标为 (x_0, y_0, z_0) , Q_i 为第 i 个监测点,各监测点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , L_i 为第 i 个监测点至震源的距离, t_i 为应力波到达第 i 个监测点的理论走时, t_0 为震源起震时刻,则可设第 k 个监测点计算到时间为

$$t_k = t_0 + \frac{L_k}{c_{\text{con}}} \quad (1)$$

其中:

$$L_k = \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2} \quad (2)$$

则有两个不同监测点 i 和 j 的到之时之差为

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j = \frac{L_i - L_j}{c_{\text{con}}} \quad (3)$$

网格搜索法依据等时差的概念,即某一次震动事件到达 Q_i 、 Q_j 不同监测点的观测到时间 T_i 、 T_j 之差和某一网格点 (m_a, m_b, m_c) 到达这两个监测点的

理论到时 t_i 、 t_j 之差相等，则有

$$T_i - T_j = t_i(m_a, m_b, m_c) - t_j(m_a, m_b, m_c) \quad (4)$$

此时，可建立目标函数：

$$F(m_a, m_b, m_c, t) = \sum_{i,j=1}^n \left\{ (T_i - T_j) - [t_i(m_a, m_b, m_c) - t_j(m_a, m_b, m_c)] \right\}^2 \quad (5)$$

根据最小二乘原理，当观测到时差与理论到时差的残差平方和取最小值时，该网格点即为震源位置。通过搜索给定空间内的所有网格点，从而找到符合条件的震源位置。

2.2 不足之处

采用网格搜索法进行定位计算时，为简化计算将速度模型作为定值进行考虑，虽然提高了定位效率，但在定位精度方面仍存在不足。研究表明^[18-19]，在微震定位计算过程中，速度模型对于定位精度至关重要，而且应力波在介质中的理论传播时间与地层速度模型以及应力波传播路径密切相关，因此为提高网格搜索算法在不同地层模型中的适用性，应重点研究波在倾斜层状地层中传播路径和理论走时的计算方法。

3 水平层状地层应力波传播路径及理论走时计算

3.1 射线追踪法

射线追踪法作为一种快速有效的波场计算方法，是研究波在不同介质中传播路径的重要手段^[20]。射线追踪法是指在已知速度模型的地层中，给定震源和接收点位置，计算波在该介质中两点之间的路径和走时。假设应力波的能量按射线方向传播，可通过 Snell 折射理论^[21]、Huygens 原理^[22]以及 Fermat 理论^[23]等计算其传播路径。射线追踪法进行波传播轨迹的模拟具有速度快、精度高的特点，在震源定位研究中具有重要应用。

3.2 水平层状模型应力波传播路径分析

如图 1 所示，水平层状地层模型具有横向各向同性的特点，相应的速度模型与各地层岩性密切相关。结合射线追踪法，在给定震源、接收点位置以及速度模型的情况下，可确定应力波的射线路径。

射线路径由射线参数 p 唯一确定， p 可以由震中距方程^[24]直接求得

$$\Delta = p \sum_{k=1}^l \frac{\tilde{h}_k v_k}{\sqrt{1 - p^2 v_k^2}} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{h}_k &= h_k, k = 1, \dots, s-1 \\ \tilde{h}_k &= z_s - \sum_{k=1}^{s-1} h_k, k = s \\ \tilde{h}_k &= 0, k = s+1, \dots, l \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： Δ 为震中距（震源与接收点两点之间的水平距离）， $p = \sin \theta_k / v_k$ ，是射线参数； v_k 、 θ_k 、 h_k 、 \tilde{h}_k 分别表示第 k 层的速度、入射角、真实厚度和等效厚度。

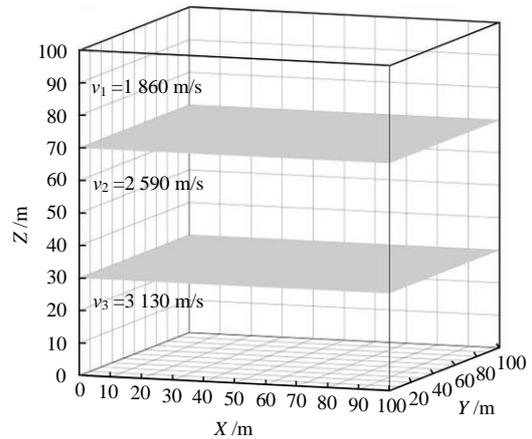


图 1 水平层状地层模型

Fig.1 Horizontally layered stratigraphic model

该模型介质共被分为 l 层，震源位于第 s 层，深度为 z_s ，如图 2 所示。

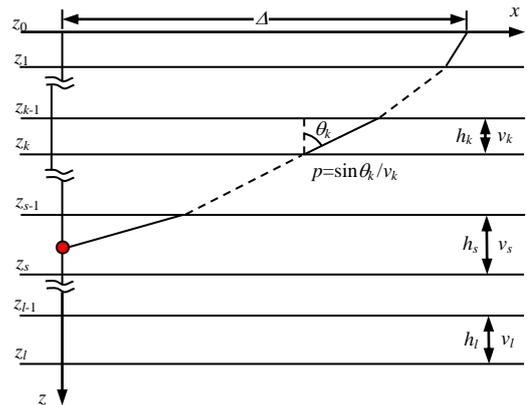


图 2 水平层状地层的速度模型及射线路径示意图

Fig.2 Schematic of velocity model and ray path in the horizontally layered model

对于给定的震中距 Δ_0 ，式 (6) 可以写成关于 p 的非线性方程：

$$f(p) = p \sum_{k=1}^l \frac{\tilde{h}_k v_k}{\sqrt{1 - p^2 v_k^2}} - \Delta_0 = 0 \quad (8)$$

通过事先给定的初值 p_0 ($p_0 = \Delta_0/a$, $a = \sum_{k=1}^l \tilde{h}_k v_k$), 可利用牛顿迭代法求解参数 p 。该方法在大多数情况下都适用, 然而在大入射角情况下会产生迭代缓慢甚至发散的现象。基于此, Tian 等^[13]引入了新参数 q :

$$p = \frac{q}{v_M \sqrt{\tilde{h}_M^2 + q^2}} \quad (9)$$

此时, 新的非线性方程可改写为

$$f(q) = q \sum_{k=1}^l \frac{\varepsilon_k \tilde{h}_k}{\sqrt{\tilde{h}_M^2 + (1 - \varepsilon_k^2) q^2}} - \Delta_0 = 0 \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_k = v_k / v_M$, M 表示射线所经过的各层中速度最高的地层。新引入的参数 q 是最高速度层 (其等效厚度为 \tilde{h}_M) 中射线路径的水平投影长度 (图 3)。

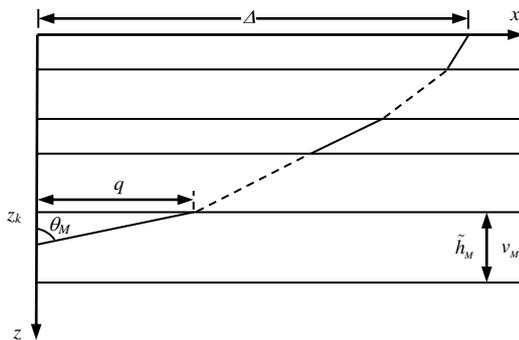


图 3 水平层状地层射线路径参数修正示意图
Fig.3 Schematic of parameter modification for ray path in the horizontally layered model

同理, 利用牛顿迭代法可求解关于 q 的新非线性方程 (10), 而且迭代过程稳定, 收敛迅速。通过求解参数 q , 可利用式 (9) 得到参数 p , 从而确定了两点间射线的传播轨迹。在已知两点间传播路径和各地层波速的情况下, 利用距离计算公式, 可直接求得波在两点间的传播时间 t_a 。

4 倾斜层状地层应力波传播路径分析

工程岩体多为倾斜分布, 因此针对等倾角倾斜层状地层 (图 4) 进行应力波传播路径分析, 从而提高网格搜索法在不同地层模型中的适用性, 具有重要的工程价值。

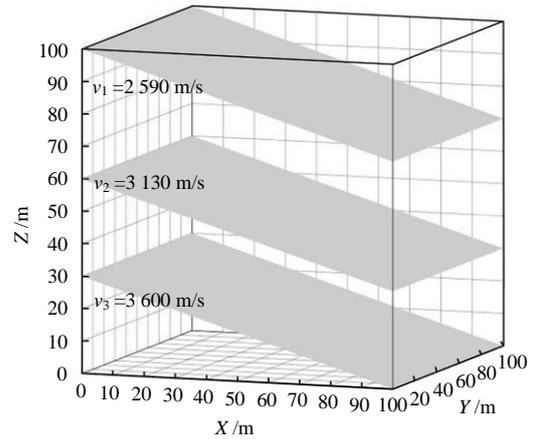


图 4 倾斜层状地层模型
Fig.4 Inclined layered stratum model

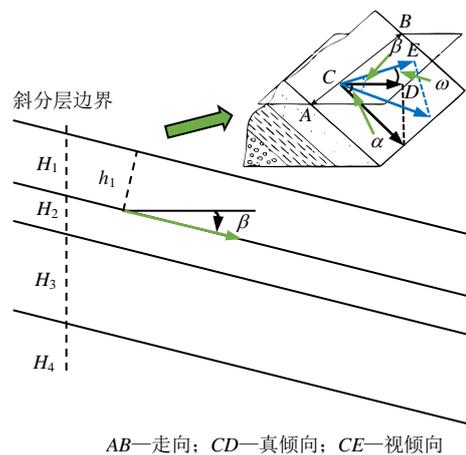
4.1 倾斜层状地层模型的特点

区别于水平层状地层模型, 倾斜地层需考虑倾向及倾角对射线传播方向的影响, 如图 5 所示, 射线传播轨迹所在的剖面可能与地层倾向不平行, 因此在计算过程中需事先将真倾角转换为视倾角。

根据地质学原理中真倾角与视倾角之间的转换关系:

$$\tan \beta = \tan \alpha \cos \omega \quad (11)$$

式中: ω 为射线所在剖面 (即视倾向) 与倾向之间的夹角; α 、 β 为倾斜地层的真倾角和视倾角。



AB—走向; CD—真倾向; CE—视倾向
图 5 倾斜地层视倾角与真倾角之间的关系
Fig.5 Relationship between apparent dip and true dip in the inclined layered model

同理, 岩层顶、底界线之间的垂直距离也不再是地层真厚度, 而是视厚度。由于地层的铅直厚度恒定, 故视厚度可通过铅直厚度与视倾角计算求得, 公式为

$$h_k = H_k \cos \beta \quad (12)$$

式中： h_k 、 H_k 分别为第 k 层的视厚度和铅直厚度。

4.2 倾斜层状模型应力波传播路径计算

等倾角倾斜层状地层模型中，层内介质均匀，层间性质各不相同。由于地层信息可通过地质勘探测得，故各地层的厚度及速度均视为已知量。区别于水平层状地层模型，应力波在倾斜地层中传播路径的计算公式与地层倾向有关，以下分两种情况进行讨论。

4.2.1 应力波传播路径与地层倾向相反

与水平层状地层的射线追踪法类似，在给定震源、检波器位置以及速度模型，可确定波的射线路径，如图 6 所示。利用几何关系可得震中距 Δ 计算公式：

$$\Delta = \sum_{k=1}^l \frac{H_k \cos \beta}{\cos \theta_k} \sin(\beta + \theta_k) \quad (13)$$

化简后，可得

$$\Delta = \sum_{k=1}^l H_k (\sin \beta \cos \beta + \cos^2 \beta \tan \theta_k) \quad (14)$$

由式 (8) 及射线参数 $p = \sin \theta_k / v_k$ 代入可得

$$\Delta = \sum_{k=1}^l \tilde{h}_k \left(\sin \beta + \cos \beta \frac{pv_k}{\sqrt{1-p^2v_k^2}} \right) \quad (15)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} \tilde{h}_k &= x_0 \tan \alpha \cos \beta, \quad k = 1 \\ \tilde{h}_k &= H_k \cos \beta, \quad k = 2, 3, \dots, s-1 \\ \tilde{h}_k &= \left[z_s - \left(x_0 \tan \alpha + \sum_{k=2}^{s-1} H_k \right) \right] \cos \beta, \quad k = s \\ \tilde{h}_k &= 0, \quad k = s+1, \dots, l \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

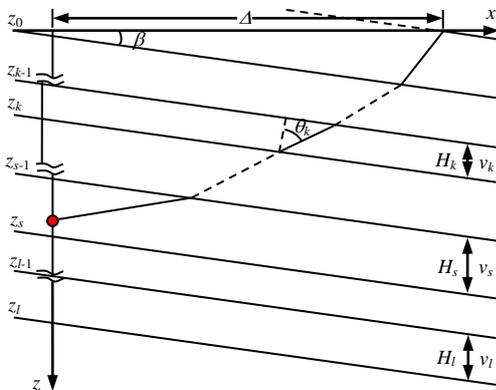


图 6 倾斜层状地层的速度模型及射线路径示意图 (传播路径与地层倾向相反)

Fig.6 Schematic of velocity model and ray path in the inclined layered model (the ray path is opposite to the formation tendency)

该模型介质一共被分为 l 层，震源坐标设为 (x_s, y_s, z_s) 位于第 s 层，接收点 $(x_0, y_0, 0)$ 位于地表。

同理，为弥补大入射角下迭代缓慢的缺陷，引入参数 q ，计算公式同式 (9)。

则新的震中距 Δ 方程可改写为

$$\Delta = \sum_{k=1}^l \tilde{h}_k \left(\sin \beta + \cos \beta \frac{q\varepsilon_k}{\sqrt{\tilde{h}_M^2 + q^2(1-\varepsilon_k^2)}} \right) \quad (17)$$

在倾斜地层中， ε_k 的定义与水平地层类似， $\varepsilon_k = v_k / v_M$ ， M 表示射线所经过的各层中速度最高的地层。而引入的参数 q 为最高速度层中射线轨迹投影在倾斜地层上的距离，如图 7 所示。

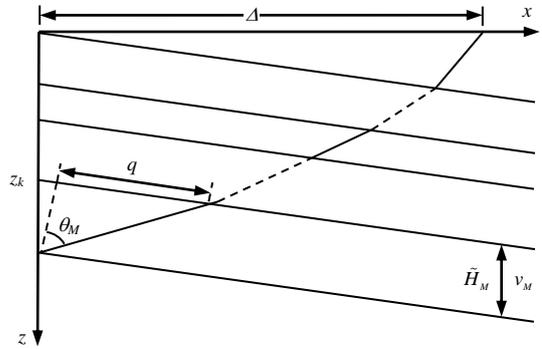


图 7 倾斜地层射线路径参数修正示意图

Fig.7 Schematic of parameter modification for ray path in the inclined layered model

在给定震中距 Δ_0 的情况下，构造关于 q 的非线性方程为

$$f(q) = \sum_{k=1}^l \tilde{h}_k \left(\sin \beta + \cos \beta \frac{q\varepsilon_k}{\sqrt{\tilde{h}_M^2 + q^2(1-\varepsilon_k^2)}} \right) - \Delta_0 \quad (18)$$

利用牛顿迭代法同样可以求解各个未知量，进而确定射线路径。

在求出射线路径的情况下，理论走时 t_a 的计算公式如下：

$$t_a = \sum_{k=1}^l \frac{\tilde{h}_k}{v_k \sqrt{1 - \left[\frac{qv_k}{v_M \sqrt{\tilde{h}_M^2 + q^2}} \right]^2}} \quad (19)$$

4.2.2 应力波传播路径与地层倾向相同

当射线传播路径与地层倾向相同时 (图 8)，同样可以构造关于 q 的非线性方程：

$$f(q) = \sum_{k=1}^l h_k \left(-\sin \beta + \cos \beta \frac{q \varepsilon_k}{\sqrt{h_M^2 + q^2 (1 - \varepsilon_k^2)}} \right) - \Delta_0 \quad (20)$$

式(20)、(18)的对应参数意义相同,求解方法一致。

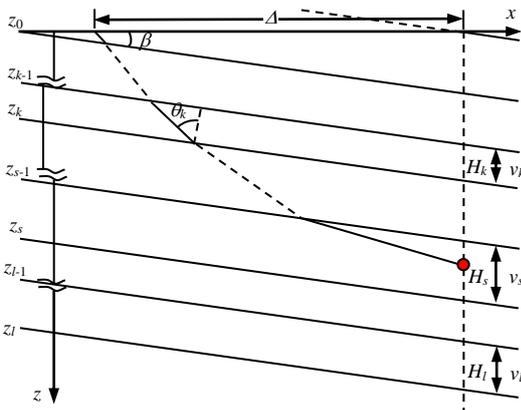


图8 倾斜层状地层的速度模型及射线路径示意图 (传播路径与地层倾向同向)

Fig.8 Schematic of velocity model and ray path in the inclined layered model (with the same ray path and formation tendency)

4.3 倾斜层状地层正演走时计算

将地层模型内任意网格点 (m_i, m_j, m_k) 视作已知震源点, 求解该震源点到某一监测点理论走时 t_a 的算法流程图如图9所示。

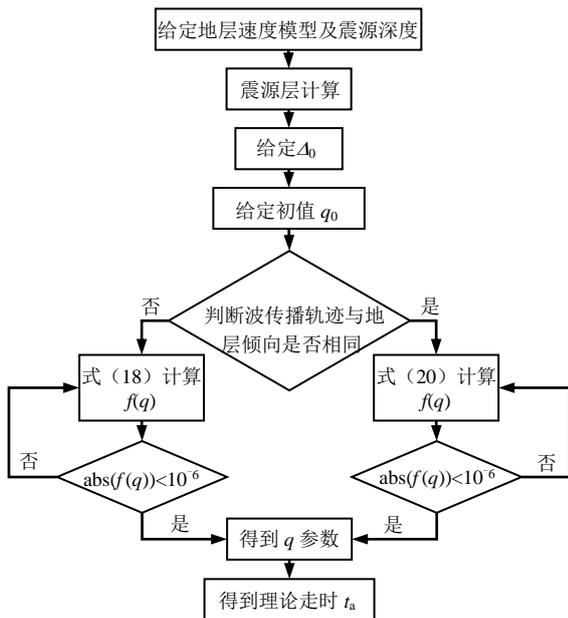


图9 倾斜地层正演走时算法流程图

Fig.9 Flowchart of forward travel time algorithm in the inclined layered model

5 算例分析与数值模拟验证

5.1 验证思路

为充分说明倾斜地层微震定位算法的定位效果, 采用 PFC^{3D} 建立颗粒流模型进行算法有效性验证, 思路图见图10。

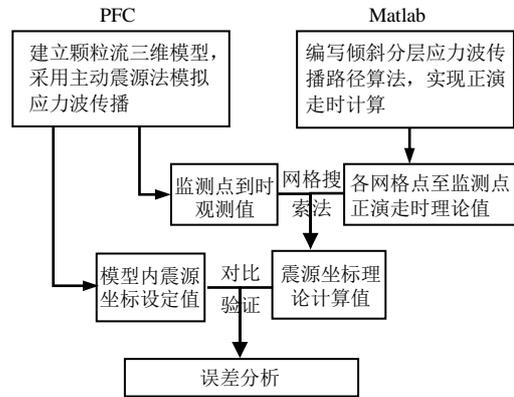


图10 算法有效性验证思路图

Fig.10 Effectiveness verification of algorithm

5.2 算例模型及参数

算例模型如图11所示, 布置8个监测点 A、B、C、D、E、F、G、H 分别在模型的8个角点上, 组成立方体阵列, 震源分别设置测点 I、J、K、L、M, 各点坐标如表1、2所示。

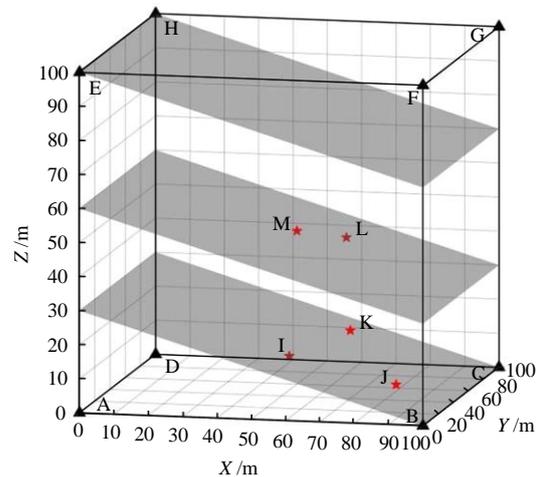


图11 算例模型示意图

Fig.11 The example model of the algorithm

表1 各监测点坐标

Table 1 Coordinates of monitoring points

监测点	X/m	Y/m	Z/m
A	0	0	0
B	100	0	0
C	100	100	0
D	0	100	0
E	0	0	100
F	100	0	100
G	100	100	100
H	0	100	100

表 2 各震源位置
Table 2 Coordinates of sources

震源	X/m	Y/m	Z/m
I	50	50	10
J	90	10	10
K	70	40	20
L	60	80	40
M	50	60	45

5.3 地层颗粒流模型及动载源模拟

5.3.1 数值模型构建及细观参数选择

如图 12 所示，建立三维颗粒流模型，尺寸为 100 m×100 m×100 m，模型内颗粒规则排列，采用接触黏结模型，细观参数如表 3 所示。将模型划分为 4 层，并赋予不同的细观参数，各地层间速度参数有一定差异。

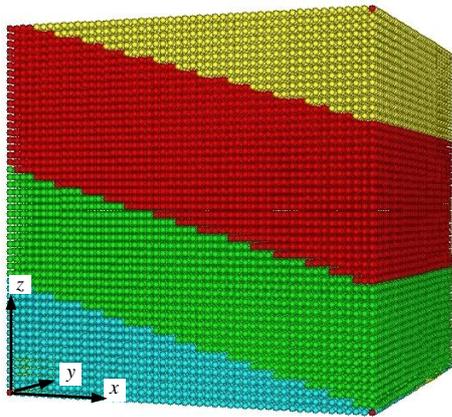


图 12 地层颗粒流模型(自上而下分别为 1~4 层, 8 个角点处的颗粒为监测点)

Fig.12 Particle flow model of stratum (the first to fourth layers are illustrated from top to bottom, the monitoring points are represented by the balls located in 8 corners)

表 3 倾斜地层模型主要细观参数

Table 3 The main meso-parameters of inclined stratum model

颗粒直径 d/m	颗粒密度 $\rho_p /(\text{kg}/\text{m}^3)$	颗粒法向刚度 $k_n / (10^{10} \text{ N}/\text{m})$				颗粒切向刚度 $k_t / (10^{10} \text{ N}/\text{m})$			
		第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层
2	3 000	2.2	4.2	6.2	8.2	2.2	4.2	6.2	8.2

5.3.2 震源激发方式

雷克子波是波场数值模拟中最常用的一种零相位子波 (图 13)，其在傅里叶变换后不存在高频角点，能有效降低弥散程度^[25]。模拟分析采用的震源信号频率为 100 Hz，采样率为 10 μs ，以集中力形式输入的雷克子波作为模拟震源信号。

图 14 为模拟产生的震源波阵面速度矢量图，应

力波以球面波的形式在模型内向外传播。在模型表面不同位置布设监测点，由于信号可通过颗粒间的相互作用往四周传播，故监测点处可接收到 X、Y、Z 三个方向的波形信号，如图 15 所示。

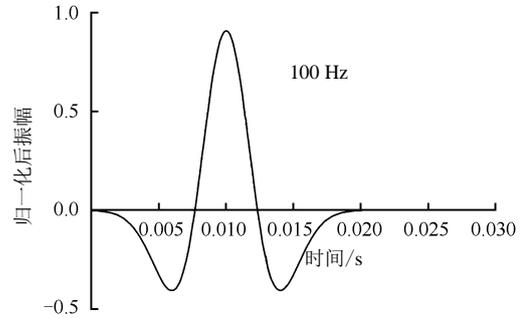


图 13 雷克子波模拟波场特征分析

Fig.13 Characteristic analysis of wave field simulated by Ricker wavelet

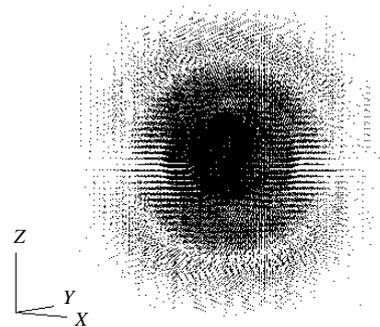


图 14 数值模型内波阵面

Fig.14 Wavefront within the numerical model

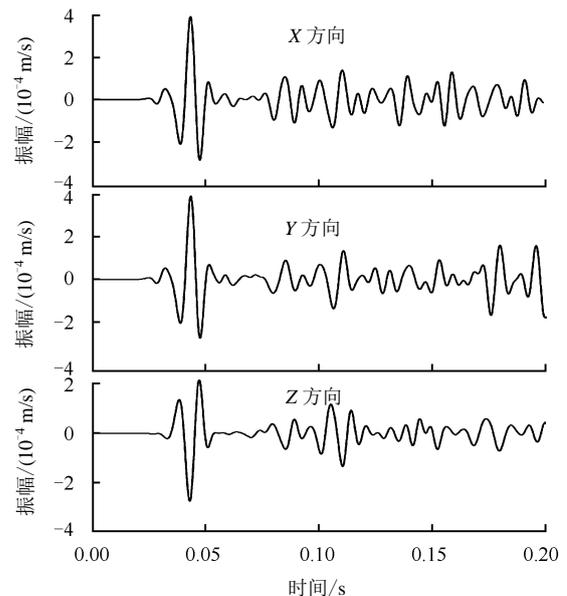


图 15 监测点波形信号图

Fig.15 Signal waveform diagrams at monitoring points

5.3.3 速度模型计算

每一分层中的波速可通过测量波在该地层中已

知两点间的传播时间进行求解，各地层 P 波波速结果计算如表 4 所示。

表 4 不同地层速度模型

地层	P 波波速/ (m/s)	地层	P 波波速/ (m/s)
第 1 层	1 863±58	第 3 层	3 133±73
第 2 层	2 591±67	第 4 层	3 607±85

5.4 震源定位

通常可将微震信号分为 P 波、S 波以及表面波等，因传播方式不同，各类波的传播规律存在差异。由于 P 波传播速度最快，且易于识别，故基于 P 波进行到时信号拾取^[26]。表 5 为各监测点拾取的震源信号到达时间。

表 5 各监测点拾取各震源到达时间

Table 5 Arrival times of various monitoring points from sources

监测点	到达时间/ s				
	震源	震源	震源	震源	震源
	I	J	K	L	M
A	0.028 0	0.037 0	0.026 0	0.034 7	0.030 3
B	0.023 7	0.006 9	0.017 9	0.030 9	0.032 7
C	0.023 2	0.039 1	0.021 4	0.018 7	0.024 5
D	0.027 4	0.054 2	0.032 0	0.021 6	0.023 1
E	0.039 6	0.050 6	0.040 5	0.044 8	0.036 9
F	0.045 1	0.039 1	0.038 8	0.047 0	0.041 8
G	0.044 8	0.055 0	0.042 3	0.032 1	0.036 4
H	0.039 3	0.054 4	0.043 4	0.033 1	0.031 9

分别采用基于单一速度模型和倾斜分层速度模型的定位算法进行定位分析，网格搜索的划分尺寸为 2 m，定位误差如表 6 所示。

表 6 不同速度模型下震源定位误差

Table 6 The location errors of the source in different velocity models

震源 编号	单一速度模型				倾斜分层速度模型			
	X/m	Y/m	Z/m	D/m	X/m	Y/m	Z/m	D/m
I	42	38	16	15.60	46	50	14	5.66
J	80	2	6	13.41	94	14	6	6.90
K	78	56	28	19.60	66	38	22	4.90
L	68	90	48	15.10	58	82	62	3.46
M	38	46	42	18.68	48	62	42	4.12

注：D 为定位点与实际震源点之间的距离。单一速度模型的速度选用各地层速度的平均值 2 798±71 m/s。

由表 6 可知，单一速度模型和倾斜分层速度模型的定位误差均值分别为 16.48、5.01 m，即基于倾斜分层速度模型的算法比基于单一速度模型的定位精度更高。由此可见，选择与地层信息相符的速度

模型以及合理的应力波路径计算方法能更准确地实现震源定位。图 16 为不同定位算法定位效果对比图。

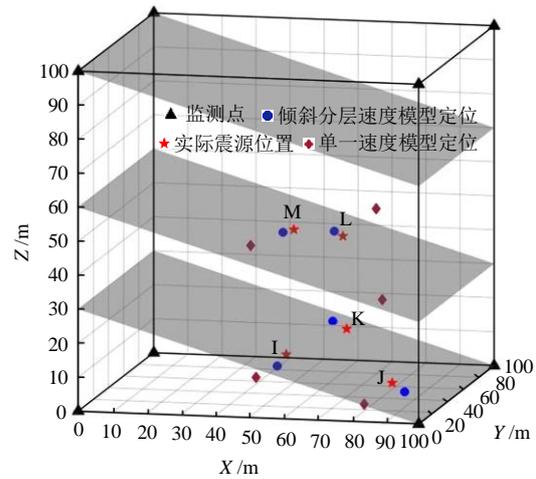


图 16 不同定位算法的定位效果

Fig.16 Positioning effect of different localization algorithms

5.5 震源误差影响因素分析

由表 6 可知，倾斜地层定位算法仍存在一定误差，以下分别从网格尺寸、地层倾角以及地层分层数等 3 个因素进行误差分析。对于网格尺寸，由于构建的颗粒流模型的颗粒直径为 2 m，故划分的最小网格尺寸为 2 m，并设置 2、5、10 m 三组尺寸进行对比；针对地层倾角，分别设置 0°、10°、20°、30°；地层数方面，分别设置 2、3、4 层地层数，共 12 种数值模型，如图 17 所示。

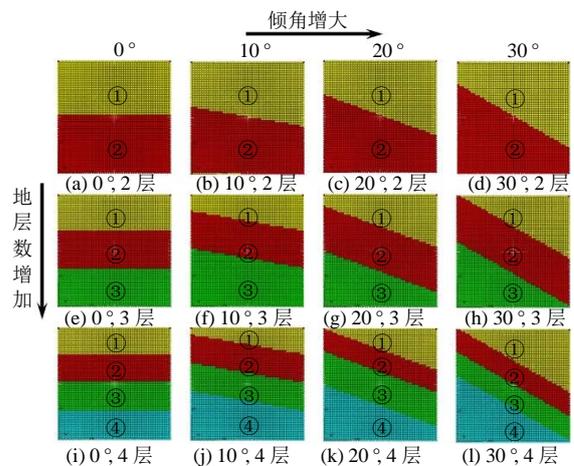
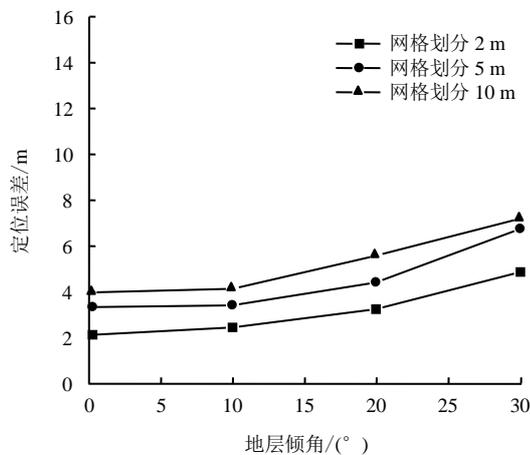


图 17 算例试验中各颗粒流模型

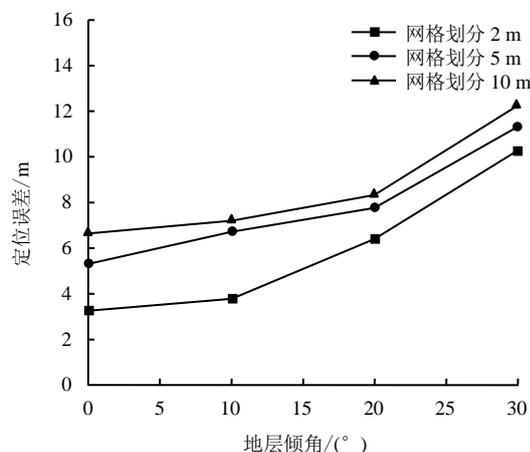
Fig.17 The particle flow models employed in the example

同时，为消除偶然误差，每个模型均选取 5 个不同震源点。结合 3 种网格尺寸及 12 种数值模型，共完成 180 个算例计算。

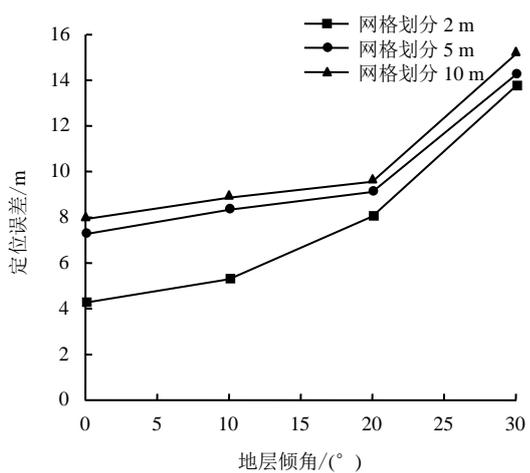
每组试验误差取 5 个震源点的平均值，得到的定位误差统计结果如图 18 所示。



(a) 地层数为 2 层



(b) 地层数为 3 层



(c) 地层数为 4 层

图 18 地层倾角及层数对定位精度的影响
Fig.18 Effects of dip and layer numbers on location accuracy

根据定位误差影响因素分析统计结果，可得如下认识：

- (1) 对比不同搜索网格尺寸的震源定位精度，

表明减小网格划分尺寸可以在一定程度上提升定位效果。但是，网格尺寸越小，意味着计算量也将呈指数式增长，限于计算机运行能力限制，网格划分尺寸的选择应有一个合理范围，由此造成的系统误差对于震源准确定位也有一定影响。

(2) 对比不同地层倾角下的定位误差可知，地层倾角对于算法的定位误差具有很大的影响，尤其当倾角大于 30° 时，定位误差将显著增加。究其原因，当地层倾角增大后，应力波的透射、反射及衰减规律更加复杂。理论假设和推导无法真实地模拟应力波的实际传播过程，尤其在大倾角情况下，反射波与直达波的叠加作用更加突出，增加了信号的拾取难度。

(3) 在地层倾角相同的情况下，对比不同层数模型的定位精度。随着地层数增加，定位误差也随之增加。由于应力波在穿过地层分界线时，波的衰减导致其频率和能量发生显著变化，且变化程度会随着地层数增加不断累加。而波在介质中的弥散效应与频率具有密切联系，间接造成了波传播特性变化，从而最终影响了算法的定位精度。

综上所述，本文提出的针对倾斜分层模型的定位算法，虽有效拓宽了网格搜索法的适用范围，但对于急倾斜多地层数的深部岩体，震源定位仍存在较大的偏差，尚需展开更为深入的研究。

6 工程验证

为进一步验证本文提出的定位算法有效性，选取了某油田实施的水压致裂微震监测项目^[27]，如图 19 所示。该项目采用邻井观测技术收集微震资料，并对压裂井的各层位实施射孔作业，图 20 为记

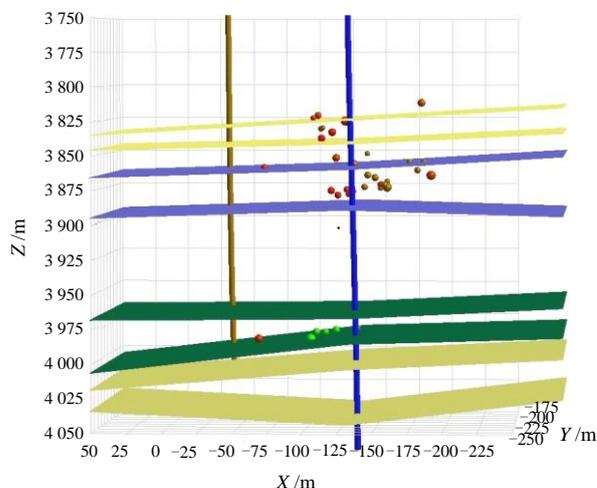


图 19 水压致裂微震监测示意图
Fig.19 Schematic of microseismic monitoring of hydraulic fracturing

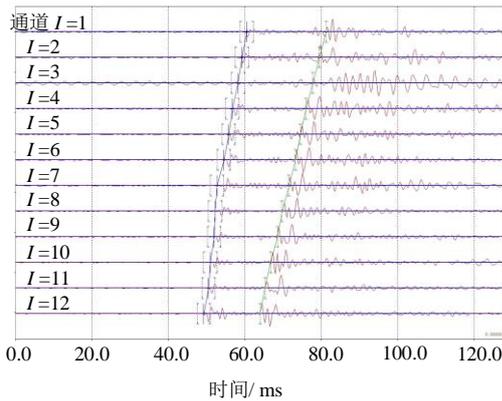


图20 某射孔微地震资料

Fig.20 The MSI event recording of the perforation

录的某射孔的微地震资料。根据该地区获取的实际射孔记录信息进行速度模型的校正, 利用校正后的

速度模型对部分射孔进行定位验算。由于现场实测数据有限, 选取其中3个射孔作业点进行验算, 结合本文提出的定位算法可得反演定位结果如表7所示。由表可知, 利用本文提出的定位算法进行定位验算, 3个射孔的最终误差为14.9、17.7、19.0 m, 均在可接受范围内, 满足工程现场应用需求。

7 结论

基于水平层状地层两点间的快速射线追踪法, 分析了倾斜地层中应力波的传播路径及规律, 结合网格搜索法, 提出了针对倾斜地层的微震定位算法, 并基于颗粒流理论构建地层数值模型模拟应力波传播信号, 为震源定位算法数值验证提供了一条全新的研究思路。主要研究结论如下:

表7 某压裂井实际射孔重定位

Table 7 The relocation of the perforations

射孔序号	精确 X 坐标 /m	精确 Y 坐标 /m	精确 Z 坐标 /m	定位 X 坐标 /m	定位 Y 坐标 /m	定位 Z 坐标 /m	X 定位误差 /m	Y 定位误差 /m	Z 定位误差 /m
1	112	-116	3 877	122	-124	3 871	11	-8	-6
2	128	-189	3 865	123	-174	3 857	-5	15	-8
3	113	-142	3 850	126	-149	3 862	13	-7	12

(1) 随着地层模型复杂程度增加, 传统的基于简化弹性波等速传播规律的定位算法精度偏低, 单一速度模型不能满足复杂介质的定位要求。采用倾斜分层速度模型并改进应力波传播路径的计算方法能有效提高倾斜地层的震源定位精度。

(2) 倾斜地层模型中地层倾角以及地层数对于算法精度具有一定影响, 定位误差与倾角、地层数成正比, 尤其在急倾斜多地层的深部岩体中, 由于波的传播特性更为复杂, 定位难度及误差均有一定程度增加。

(3) 通过减小网格划分尺寸可在一定程度上提高网格搜索法的定位精度, 合理的网格尺寸和搜索策略有助于网格搜索法在实际工程中的应用。

(4) 本文建立的缓倾斜地层震源定位及其验证方法为进一步研究复杂地层定位监测技术提供重要的理论和技术支撑。

参考文献

[1] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511—1516.
JANG Fu-xing, YANG Shu-hua, CHENG Yun-hai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1511—1516.

[2] GEIGER L. Probability method for the determination of

earthquake epicenters from the arrival time only (translated from Geiger's 1910 German article)[J]. *Bulletin of St. Louis University*, 1912, 8(1): 56—71.

[3] THURBER C H. Nonlinear earthquake location: theory and examples[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(3): 779—790.

[4] RABINOWITZ N. Microearthquake location by means of nonlinear simplex procedure[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78(1): 380—384.

[5] PRUGGER A F, GENDZWILL D J. Microearthquake location: a nonlinear approach that makes use of a simplex stepping procedure[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78(2): 799—815.

[6] 张唤兰. 微地震数值模拟及震源定位方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
ZHANG Huan-lan. Numerical simulation of microseismic and study on source location method[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.

[7] 李健, 高永涛, 谢玉玲, 等. 基于无需测速的单纯形法微地震定位改进研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1336—1346.
LI Jian, GAO Yong-tao, XIE Yu-ling, et al. Improvement of microseism locating based on simplex method without velocity measuring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1336—1346.

[8] SAMBRIDGE M S, KENNETT B. A novel method of hypocentre location[J]. *Geophysical Journal International*, 1986, 87(2): 679—697.

- [9] 吕进国, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 基于稳健模拟退火-单纯形混合算法的微震定位研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2195—2203.
LÜ Jin-guo, JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, et al. Study of microseismic positioning based on steady simulated annealing-simplex hybrid algorithm [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(8): 2195—2203.
- [10] SAMBRIDGE M, GALLAGHER K. Earthquake hypocenter location using genetic algorithms[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1993, 83(5): 1467—1491.
- [11] 陈炳瑞, 冯夏庭, 李庶林, 等. 基于粒子群算法的岩体微震源分层定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 740—749.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, LI Shu-lin, et al. Microseism source location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 740—749.
- [12] SLAWOMIR JERZY GIBOWICZ, ANDRZEJ KIJKO. 矿震地震学引论[M]. 修济刚, 徐平, 杨心平译. 地震出版社, 1998.
SLAWOMIR JERZY GIBOWICZ, ANDRZEJ KIJKO. An introduction to mine seismology. Translated by XIU Ji-gang, XU Ping, YANG Xin-ping[M]. Beijing: Seismological Press, 1998.
- [13] TIAN Y, CHEN X F. A rapid and accurate two-point ray tracing method in horizontally layered velocity model[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2005, 18(2): 154—161.
- [14] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of International Symposium on Rock Fracture. Nancy: [s. n.], 1971: 129—136.
- [15] CUNDALL P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(1): 47—65.
- [16] NABIPOUR A. Experimental and numerical study of ultrasonic monitoring of hydraulic fracture propagation[D]. Perth: Curtin University, 2013.
- [17] HAZZARD J F, YOUNG R P. Numerical investigation of induced cracking and seismic velocity changes in brittle rock[J]. **Translated World Seismology**, 2004, 31(1): 195—196.
- [18] 董陇军, 李夕兵, 唐礼忠, 等. 无需预先测速的微震震源定位的数学形式及震源参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2057—2067.
DONG Long-jun, LI Xi-bing, TANG Li-zhong, et al. Mathematical functions and parameters for microseismic source location without pre-measuring speed[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2057—2067.
- [19] DONG L, LI X. A microseismic/acoustic emission source location method using arrival times of PS waves for unknown velocity system[J]. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 2013, (3): 485—503.
- [20] 李强, 白超英. 复杂介质中地震波前及射线追踪综述[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 92—104.
LI Qiang, BAI Chao-ying. Review on seismic wavefront and raytracing in complex media[J]. **Progress in Geophysics**, 2012, 27(1): 92—104.
- [21] 唐修生, 王五平, 方璟, 等. 基于 Snell 定律的射线追踪程序实现及模拟计算[J]. 焦作工学院学报, 2004, 23(2): 118—122.
TANG Xiu-sheng, WANG Wu-ping, FANG Jing, et al. Realization and simulating computation of ray tracing program based on the law of Snell[J]. **Journal of Jiaozuo Institute of Technology**, 2004, 23(2): 118—122.
- [22] 吴永国, 贺振华, 黄德济. 基于惠更斯原理的波动方程共炮点道集地震正演[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(3): 274—278.
WU Yong-guo, HE Zhen-hua, HUANG De-ji. Wave-field modeling of common shot records based on Huygen's principle[J]. **Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)**, 2008, 35(3): 274—278.
- [23] 胡中平. 在不规则网格中用费马原理进行射线追踪[J]. 石油物探译丛, 1997, (4): 59—69.
HU Zhong-ping. Raytracing in irregular meshes by using Fermat principle[J]. **Oil Geophysical Renditions**, 1997, (4): 59—69.
- [24] KIM W, BAAG C. Rapid and accurate two-point ray tracing based on a quadratic equation of takeoff angle in layered media with constant or linearly varying velocity functions[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2002, 92(6): 2251—2263.
- [25] 张诗淮, 吴顺川, 陈子健. 低频动载应力波传播规律及颗粒流模拟方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1555—1568.
ZHANG Shi-huai, WU Shun-chuan, CHEN Zi-jian. Study of rules of dynamics loading stress wave propagation and its simulation method by particle flow code[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(8): 1555—1568.
- [26] 白添羊, 吴顺川, 王进进, 等. 岩石破裂声发射压缩波到时拾取方法及其优化改进研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1754—1766.
BAI Tian-yang, WU Shun-chuan, WANG Jin-jin, et al. Review of P-onset picking methods of acoustic emission compression waves and optimized improvement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(9): 1754—1766.
- [27] MUKUL M S, PHANI B G, RICHARD S, et al. Slick water and hybrid fracs in the Bossier: Some lessons learnt[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. [S. l.]: [s. n.], 2004: 26—29.