

# 微动勘探技术在断层勘探中的应用

黄 鹏<sup>1</sup> 何鹏宇<sup>2</sup>

1. 山西省煤炭地质一一五勘查院有限公司 山西 大同 037003

2. 山西焦煤山煤国际东古城煤业有限公司 山西 大同 037003

**摘要:** 本文使用微动探测技术对实地矿区断层情况进行勘测, 通过布置直线型观测台阵, 观测天然场的微动信号记录, 并利用空间自相关法提取频散曲线, 通过反演提取的频散曲线, 绘制得到的地下介质的视横波速度剖面可以清晰的显示断层信息。从而实现对断层位置、性质和地下结构的高分辨率揭示, 为断层勘探技术提供可靠依据。

**关键词:** 微动勘探技术; 直线型台阵; 断层; 空间自相关法

## 1 引言

煤矿是我国主要的能源资源之一, 然而, 由于煤矿开采地下工作环境的特殊性和复杂性, 煤矿事故频发, 异常的探测成为确保矿工安全的关键一环<sup>[1]</sup>。断层作为煤矿安全生产的主要危害因素之一, 严重危害矿区安全生产。目前常用的物探手段有电法与地震勘探技术。微动勘探技术作为一种新兴的地质勘探手段, 通过记录和分析微小地震信号, 可以推断出地下结构、岩性、裂隙分布等信息。微动勘探技术具有高分辨率、实时性强、非破坏性等特点, 对潜在的危害进行准确、高效、长期的探测, 在煤矿工程异常探测中展现了广泛的应用前景<sup>[2-4]</sup>。

本文以煤矿断层为研究对象, 通过野外试验, 采集的微动数据, 进行数据处理, 结合勘探区域的地质资料进行分析, 结果表明微动方法可以有效地对断层信息进行探测。

## 2 微动勘探原理

微动是一种天然源振动, 其震源不具特定性。它包括体波(P波和S波)以及面波(瑞雷波和勒夫波)等复杂振动成分, 面波的能量占据信号总能量的70%以上。微动中的面波信息与地下介质密切相关, 主要应用瑞雷波的携带信息。在弹性半空间中, 随着传播距离的增加, 面波和体波的能量衰减, 但体波的能量衰减速度更快。因此, 面波在微动记录中占据主导地位, 具有更高的信噪比。

由于面波的频散特性, 微动信号的振幅和频率会随时间、空间显著变化。但在特定的时间和空间范围内, 仍然保持统计稳定性, 可通过平稳随机过程来进行评估。

### 2.1 空间自相关法

SPAC法是一种通过布设观测台阵获取微动信号、从微动信号的垂直分量中提取瑞雷波相速度频散曲线的数据处理方法。SPAC法需要一个圆形观测台阵, 其中一个

位于中心, 其他在半径为r的圆周上均匀布设, 形成一个等边三角形。

$S_1(0, 0)$ 与 $S_2(r, \theta)$ 两点记录的角频率为 $\omega$ 的面波信号分别为:  $u(0, 0, \omega, t)$ 和 $u(r, \theta, \omega, t)$ ,  $t$ 为采集时间, 则空间自相关函数可表示为:

$$\varphi(r, \theta, \omega) = \overline{u(0, 0, \omega, t)u(r, \theta, \omega, t)}$$

在圆形台阵所有方向的空间自相关函数的算数平均值为空间自相关系数 $\rho$ , 有

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi\varphi(0, \omega)} \int_0^{2\pi} \varphi(r, \theta, \omega) d\theta$$

空间自相关系数的积分结果可表示为:

$$\rho(r, \omega) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) = J_0\left(\frac{2\pi f r}{c(\omega)}\right)$$

式中,  $J_0(\chi)$ 为第一类零阶贝塞尔函数<sup>[28]</sup>,  $c(\omega) = \frac{\omega}{k}$ 为面波相速度,  $k$ 为波数。

由此计算得到角频率和相速度的关系, 进而得到该点处的频散曲线。获得频散曲线之后, 利用分歧型遗传算法(fGA)反演地下S波速度结构。

### 2.2 频率—波数法

F-K法使用满足的条件: 地下介质对微动信号是线性响应的; 地下介质的性质在空间上是连续的; 信号以相干的波形传播。具有稳定的测量条件, 较小的干扰; 足够密集的数据采样; 频率范围选择适当。

F-K法是基于二维傅里叶变换, 将时空信号转换到频率域进行分析, 功率谱中峰值对应的波数矢量 $k$ 与基阶波动信号对应, 首先求得频率为 $f$ 时的相速度 $v$ 为:

$$v = \frac{2\pi f}{k}$$

然后再通过频率—波数功率谱的方位角确定某个频率成分面波的传播方向:

$$\Phi_0 = \arctan\left(\frac{k_{0x}}{k_{0y}}\right)$$

最后求出不同频率 $f$ 对应的相速度 $v$ ，则可以获得一条相速度频散曲线。

### 3 研究区概况

本次研究区为沙丘地貌，地表植被稀少。地层由浅部至深部主要为第四系（ $Q_4$ ）、上石盒子组（ $P_2-s$ ）、下石盒子组（ $P_1-x$ ）、山西组（ $P_1-s$ ）、太原组（ $C_3-t$ ）、本溪组（ $C_2-b$ ）以及峰峰组（ $O_2-f$ ）和上马家沟组（ $O_2-s$ ）。

第四系主要岩性为黄土层，上石盒子组主要岩性为泥岩、砂质泥岩，间夹中粗砂岩，下石盒子组主要岩性为粗、中、细粒砂岩、粉砂岩、砂质泥岩、泥岩等，山西组主要岩性为中细粒砂岩、粉砂岩、砂质泥岩、泥岩夹3层煤层组成。太原组为一套具明显沉积旋回的海陆交互相含煤建造，为井田主要含煤地层之一。岩性为中细粒砂岩、粉砂岩、砂质泥岩、泥岩、铝质泥岩和4-5层石灰岩及8-9层煤层组成，其中15号煤层在研究区范围内普遍分布，埋藏深度150-170m，煤层厚度大且较稳定，煤层与围岩之间的波阻抗差异显著，能形成能量强、波形突出、连续性好，以15号煤层为主的煤层复合反射波（T15波），是本次地球物理勘探工作的主要目的层，也是本区的主要反射波和解释的主要依据。本溪组下部为红褐色铁矿层，上部可见薄层灰岩。奥陶系地层主要以灰岩为主。

依据微动勘探原理及地层速度分布特征，当沉积分布均匀地层中，视S波速度相对恒定，波形稳定，频率与波速之间的关系明显。断裂构造会导致地层结构不均匀，使S波传播路径发生弯曲或反射，导致在断裂附近形成新的波前，引起频散曲线的扭曲或出现新的频散特征；影响S波传播速度和路径。根据视S波速度变化特征，结合已知资料对断层上下盘进行反演解释。

### 4 微动数据采集试验

测量采用直线形排列，在东西方向布置10条微动测线，根据探测需要和地形、地物条件布设测线，点距为10米，线距为80m。数据采集使用便携式EC103宽频带微动采集系统，主频为2Hz，采用32-bit高精度ADC，可降低仪器自身的噪声，获取较为精确的微动信号。

#### 4.1 背景噪音试验

为了评估微动采集受到外界环境噪音干扰的程度，在白天和夜间分别进行采集。采集的频散谱，均显示出连续清晰的特征，速度相近且一致。在两个时段内，背景噪声相对稳定，对数据采集的质量几乎没有产生影响。表明微动采集能够在不同时间段内获得可靠且一致

的数据，外部环境噪音对数据的影响较小。

#### 4.2 仪器一致性试验

使用20台EC-103数据采集设备的一致性进行测试，一致性测试时间20分钟。通过计算各仪器功率谱均方相对误差为1.973%、功率谱之比，相干系数均方相对误差为0.10%、相位差均方相对误差为1.83%；在有效工作频率范围内（0.1~25 Hz）各台仪器一致性在98%以上，可见仪器具有良好的 consistency。

#### 4.3 仪器采集半径试验

试验探测最大深度约300m左右，台阵布设为直线型台阵，观测时间为1小时，通过对最大半径40、50m、60m三种不同半径的数据进行频散分析、反演深度进行对比，分析最大半径与探测深度的对应关系。综合探测深度、施工效率、地形条件等，选择最大布置半径为50m。

#### 4.4 仪器采集时间试验

试验台阵类型为直线型，最大半径为50m，分别进行20分钟，30分钟，40分钟，60分钟采集数据试验，通过进行数据处理分析，确定最佳观测时间间隔。通过分析不同采集时间频散曲线可得采集时间在30分钟左右，频散曲线不再叠加变化，确定采集时间间隔为30分钟。

## 5 数据处理与解释

### 5.1 数据处理

从微动信号中提取瑞雷波频散曲线常用的两种方法是频率-波数法和空间自相关方法。F-K法具有高频率分辨率，能够提供较高的频率分辨率，有助于检测细小结构。适用于台阵数据，可以提取波场的频散关系。但对噪声敏感，对介质中的空间结构提供的信息相对较少。SPAC法的空间信息丰富，抗噪能力强，但相对于频率-波数法在频率分辨率上较低，可能难以捕捉介质中一些细小结构的频率特征，并且依赖于足够密集的数据来获取准确的空间相关信息。通常，这两种方法也可以互补使用，以充分挖掘微动信号中的信息。

在使用阵列进行微动信号采集后，通过F-K法或SPAC法从微动数据中提取瑞雷波频散曲线，绘制相速度等值线图，或者计算视S波速度。通过在实际微动信号中提取的瑞雷波频散曲线进行反演，得到视横波速度结构信息。通常反演算法是采用半波法经验公式，对频散曲线进行反演计算，展示剖面上视S波速度的变化情况，获取相应的地层构造信息。半波法经验公式的视S波速计算公式如下：

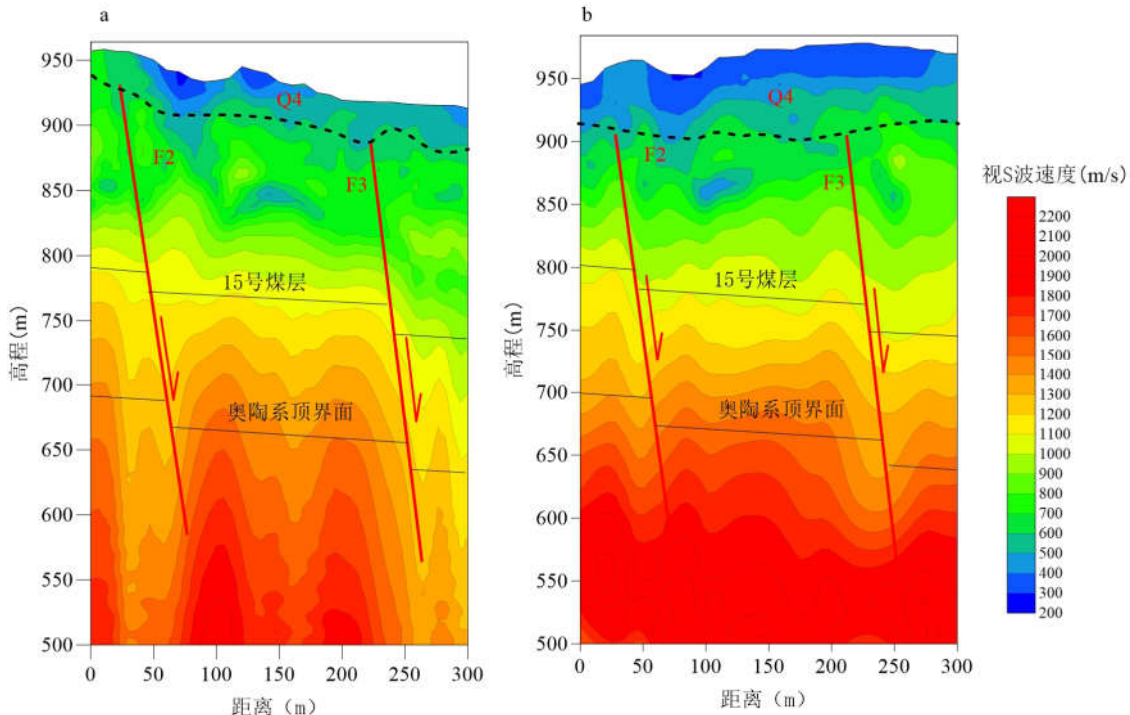
$$v_{s,i} = \left[ \frac{t_i \cdot v_{r,i}^4 - t_{i-1} \cdot v_{r,i-1}^4}{t_i - t_{i-1}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

式中 $v_s$ 为视S波速度， $v_r$ 为瑞雷波相速度， $t_i$ 为周期，对应的深度一般取半波长。

根据研究区内的已知地质及钻孔资料，设置地层的初始速度模型。采用遗传算法进行反演，设置种群大

小、交叉概率、变异概率等参数，得到该点的视横波速度及D-V曲线，集合所有的频散曲线，得到该测线的地下速度结构剖面图。

5.2 数据解释



视S波速度断面解释图 ( a:剖面1; b:剖面2 )

上图为剖面1视S波速度断面分析解释图。可以看出在地表到高程900m左右视S波速度低于500m/s，是第四系松散沉积物的反应。随着深度的增加，视S波速度越来越大。在横线上视横波速度出现了不连续的现象，特别是在15号煤层深度附近，在横向30-60m和240-270m附近，视S波速度等值线出现了明显的错断现象，推断为断层引起，在断层的西侧速度较高，东侧速度较低，断层断距约20-35米，与已知地质资料吻合较好。最终确定断层F2、F3正断层，倾角70-75°，断距20-35m。

6 结论

1) 利用微动探测方法，选用直线型台阵，利用空间自相关法，通过反演得到了地层的视横波速度剖面，推断分析了矿区内存在断层具体的倾角、位置和落差范围信息，这对于深入了解地下复杂结构，以及断层活动对煤矿开采工作的影响提供了信息参考。

2) 微动勘探选用直线型台阵时，适用于部分表面地形、地物情况复杂的区域，相对于其他复杂的台阵布置简便，容易控制微动信号传播的方向，节省时间和劳动

成本，提高工作效率；经数据处理后，结果更容易解释和比较。

3) 微动勘探受地形影响小、破坏小，具有较高的空间和时间分辨率，施工简单灵活，能够对地下结构进行持续监测，设备和人力成本低，且对浅部地层信息敏感，可以弥补其他物探方法在浅部分辨率不足的缺陷。

参考文献

[1]陈卫营,薛国强.瞬变电磁法多装置探测技术在煤矿采空区调查中的应用[J].地球物理学进展,2013,28(05):2709-2717.  
 [2]冯少孔.微动勘探技术及其在土木工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2003(06):1029-1036.  
 [3]叶太兰.微动台阵探测技术及其应用研究[J].中国地震,2004(01):47-52.  
 [4]徐佩芬,李世豪,杜建国,凌苏群,郭慧丽,田宝卿.微动探测:地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J].岩石学报,2013,29(05):1841-1845.