

各向异性介质中快慢横波的一种新型分离方法

①
53-56

阴 可

(重庆建筑大学建筑工程学院 400045)

0347.41

摘要 在各向异性地震波勘探中分离快、慢横波技术是关键环节,现有的理论方法的前提假设与实际勘探有差距,实施过程也较复杂。本文提出了一种新的分离方法,可直接利用地震横波记录提取方位角,实现快、慢横波分离,而且具有较强的实用性。利用合成地震资料计算算例表明该分离方法速度快,精度高。

关键词 各向异性;横波分裂;波场分离

中图分类号 O347.41

地震波勘探就是采用人工方法产生弹性波(人工地震),通过观测地下岩体中的弹性波的传播特性来研究岩体的诸多力学参数和特性。近年来随着观测技术的飞速发展和理论方法的不断更新,该方法发展迅速,并广泛应用于岩土工程、水文、工程地质和寻找油气矿产等方面^{[1][2]}。

由于岩体中存在包括裂隙、节理及断层等各类结构面,所以宏观上可把岩体视为各向异性介质。其中一个代表性的各向异性就是方位各向异性(azimuthal anisotropy)或称为 EDA 介质(Extensive Dilatancy Anisotropy)。它是由平行排列的垂直或近似垂直结构面引起的等效各向异性。人们利用传统的爆破震源或横波震源激发地震波,然后采用三分量或多分量检波器接收得到多波地震资料,从中求取结构面信息。处理和解释中的关键环节是各向异性方位角的求取,其实质是一个从获得的数据资料反演各向异性介质主轴方向的问题。由此出发可以确定某区域内结构面走向以及它的密度分布和各向异性参数。

各向异性岩体中的地震波勘探与多波多分量技术密切相关。纵、横波的实验室和野外观测结果表明,方位各向异性对纵波影响较小,而对横波则完全不同,主要是将产生横波分裂现象。由于横波分裂造成多分量地震波原始记录每一方向的剖面都因快慢横波混合而发生干涉,很难直接将其分辨。本文提出并采用一种新的横波分离技术求取方位角,利用已求取的方位角对快慢横波资料进行分离计算,从而得到方位各向异性介质主轴方向上的剖面,提高了剖面质量,有利于进一步的处理和解释工作。

1 方位各向异性介质中的横波分裂现象

在方位各向异性介质中,当波的偏振方向与各向异性主轴方向不一致时,会发生横波分裂现象。所谓横波分裂就是当横波通过方位各向异性介质时,它沿每一条射线路径可以分裂成两种偏振波,它们具有不同的传播速度、衰减速率和偏振方向,而且在后续的各向异性介质中传播时保持这种特性。从地震波勘探观点看,方位各向异性介质就是一种使弹性波的偏振特性随方向而异的介质,发育着近似铅垂方向结构面的岩体属于此类介质。比如南北方向偏振的横波进入节理裂缝面为 NW45°的节理岩体后分裂成两个互相垂直的分量,一个平行节理裂缝面偏振(NW45°)并以较快速度传播的分量叫快横波 S_1 ,它衰减较慢;另一个垂直节理面裂缝偏振(NE45°)并以较慢速度传

收稿日期:1999-03-10

阴 可,男,1968 年生,副教授,博士后

中国石油天然气总公司“八五”重大科技攻关项目 19300041

播的分量叫快横波 S_2 , 它衰减较快。这种现象就叫横波分裂, 又叫横波双折射, 因为它类似光在晶体中发生的双折射现象, 如图 1 所示。

因为快慢横波的偏振方向和传播速度均不同, 通过求取快速横波的偏振方向(用方位角表示), 来确定节理裂缝的发育方向, 即各向异性介质的主轴方向; 利用主轴剖面上的两波列间的到时差可求取与节理裂缝密度有关的参数。

2 一种新型的横波分离方法

由于实际勘探中测线布置与结构面走向不一致, 即方位角不等于零, 这样互相正交的二个水平记录中均含有快慢横波分量, 也就无法准确得到快慢横波信息。因此需要进行快慢横波分离, 将原始记录剖面转换到主轴方向上的剖面, 这样才能清楚地得到地下岩体各向异性信息, 而整个工作的关键就是找到方位角。

求取方位角的方法有多种, 比较简单而且直观的是 Crampin^[3] 等人最早采用矢端曲线法。矢端图是空间点的测量值, 它们对介质特性的局部变化非常敏感。在有较强噪音时, 波形不再是简单的子波, 矢端曲线就难以直接判读, 甚至得出错误的解释。目前常用的方法是基于 Alford^[4] 提出的坐标旋转法。其中又有依据协方差矩阵的特征值方法和由 Naville^[5] 提出的 VSP 资料中分离快慢横波的互相关方法。现今在实际研究中普遍使用所是双源四分量同时旋转方法^[6]。但这些方法的前提是假设震源每炮能精确重复, 快慢横波波形相似, 忽略两个深度的检波器两个正交方向上快慢横波分量的衰减和波形变化, 至少假设快慢横波衰减和变化一致, 忽略频散。这与实际情况有不小的差异, 会造成反演方位角的不准确, 从而导致分离后的数据质量下降。而且采用该方法需要在每个方位上作相对功率谱分析, 其工作量很大。这些假设和计算使得该方法在实际应用时增加了处理工作的难度和不准确。

本文提出一种只需一个横波震源, 利用一个水平检波器接收的两个水平正交分量数据求取方位角的方法。然后根据确定的方位角获得方位各向异性介质主轴面内的快、慢横波剖面。

如图 2 所示, 检波器接收方向(又称观测坐标)与节理裂缝方向 X_1 (称自然坐标或各向异性主轴坐标)一般是不一致的, 存在方位角 α , 图中 X_1OX_2 是各向异性主轴坐标系, 平行节理裂缝面偏振的快横波分量为 f_1 , 垂直节理裂缝面偏振的慢横波分量为 f_2 , x, y 方向上检波器接收的两个水平分量分别为 F_x 和 F_y 。记为:

$$f = [f_1, f_2]^T \quad (1)$$

$$F = [F_x, F_y]^T \quad (2)$$

则

$$F = R(\alpha)f \quad (3)$$

其中

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

当扫描角度为 β 时,

$$f_{1\beta} = F_x \cos \beta + F_y \sin \beta = f_1 \cos(\alpha - \beta) - f_2 \sin(\alpha - \beta) \quad (5)$$

$$f_{2\beta} = -F_x \sin \beta + F_y \cos \beta = f_1 \sin(\alpha - \beta) + f_2 \cos(\alpha - \beta) \quad (6)$$

根据(5)式和(6)式计算:

$$F_{\beta} = \int_{t_1}^{t_2} |f_{1\beta} \cdot f_{2\beta}| dt \quad (7)$$

其中 $[t_1, t_2]$ 时间积分域为选定的时窗, t_1 小于快横波初至时间, t_2 大于慢横波结束时间。

当 F_{β} 取最小值时, 扫描角度 β 等于 α , 即求得方位角。

根据(3)式可得:

$$f = R^{-1}(\alpha) F \quad (8)$$

采用前面求得的方位角 α , 利用检波器接收的两个水平正交方向上记录的原始分量数据 $[F_x, F_y]^T$, 可以计算各向异性两个主轴方向的快、慢横波分量 $[F_1, F_2]^T$:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

这样就实现了快、慢横波的分离。从分离后的快、慢横波剖面中可以求取快、慢波的到时差, 用来描述地下各向异性情况。

3 算例分析

为了验证该横波分离方法的可行性和精确度, 首先计算一个简单的理论数值模型。假设在各向异性主轴方向的快、慢横波分量分别为:

$$f_1(t) = \sin \left[\frac{\pi}{25} (t - 20) \right]$$

$$f_2(t) = 0.56 \sin \left[\frac{\pi}{10} (t - 65) \right]$$

时间窗选 $[t_1, t_2] = [1, 100]$ 。计算结果见图 3(a) 所示。

在与主轴方向成 10° 方位角的观测系得到的 x 、 y 方向的记录为:

$$f_x = f_1 \cos 10^\circ + f_2 \sin 10^\circ$$

$$f_y = f_1 \sin 10^\circ + f_2 \cos 10^\circ$$

计算结果见图 3(b) 所示。

对上式计算的数据结果, 用从 0° 开始间隔为 0.1° 的一系列角度求 $F_{\beta} = \int_1^{100} |f_{\beta x} \cdot f_{\beta y}| dt$ 。当扫描角度等于 10.0° 时, F_{β} 取得最小值, 这样就得到方位角 α , 即等于这时的扫描角度 10.0° 。

将得到的方位角代入(8)式, 反演出主轴方向的两个正交分量, 计算结果见图 3(c) 所示。

从这个理论数值算例可以看出, 当给的快慢横波波形具有不同的周期、振幅和初始相位, 特别是快、慢波的到时差小于其中一个波(该处是快波)的周期时, 用该方法均可以快速准确的求得方位角, 从而实现快慢横波分离。

然后对各向异性介质中检波器接收的横波震源产生的合成地震记录进行快慢横波分离。图 4 是各向异性方位角为 10° 时的 x 方向和 y 方向的原始记录。采用本文提出的分离方法, 求得的所有道的平均方位角为 9.0° , 然后根据求得的方位角进行横波分离, 得到快、慢横波剖面, 如图 5 所示。为了更清楚地显示分离的效果, 特别绘制了第 17 道(在震源正下方的检波器)的原始记录和分离后的记录, 分别见图 6 和图 7, 并求得该道快、慢横波到时差为 0.04 秒。

为了对比分离结果, 还对各向异性方位角为 30° 的合成地震记录进行了分离。由于篇幅所限, 这里只附计算结果: 求得平均方位角为 26.9° , 第 17 道快、慢横波到时差为 0.04 秒。

计算结果表明, 所反演的方位角是比较接近正演给定值的, 在实际应用时是可以接收的, 而且误差很可能来源于差分正演模拟计算结果, 而不是求取方位角方法本身。采用该横波分离方法的快、慢横波剖面效果明显, 可以清楚地看到横波分裂现象。从第 17 道的分离记录可以看到由于各向异性方位角不同, 快、慢横波的振幅也不同(即两个主轴方向分配的能量不同), 但快、慢横波到时差只与快、慢横波速度和检波点离震源距离有关, 两个合成记录分离算例中震源和第 17 道检波器位置相同, 所以求得的快慢横波到时差都等于 0.04 秒, 这与理论分析一致。随着节理裂缝密度增加各

向异性程度就越强,快、慢横波的速度差异就越大,两个主轴方向的快、慢横波到时差也越大,所以根据到时差可以研究节理裂缝密度。

4 结 论

从以上的计算和分析可以得到以下结论:

只有对接收的横波资料进行快慢横波的波场分离,才能提取横波的固有信息,获得有关各向异性介质的数据资料。本文提出的方位角求取方法和横波分离技术,利用同一检波器接收的两个水平记录,可以求得节理裂缝走向和快、慢横波到时差,从而评价岩体的各向异性特征。通过简单算例和对合成地震资料进行的计算和处理表明,该方法比较准确和快速,对不同程度的各向异性介质适应性较强,对原始资料的质量要求不高,能够满足实际勘探需要。

参 考 文 献

- 1 张永兴等. 节理岩体卸荷非线性岩体力学. 北京:中国建筑工业出版社, 1998
- 2 阴 可. 各向异性介质中地震波场特性与物性参数关系的研究:[博士学位论文]. 北京:清华大学, 1997
- 3 Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1978
- 4 Alford R. M. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy. Dilley Texas. In: White H. J., Eds. 56th Ann. Internat. Mtg., Expanded Abstract. Houston: Soc. of Expl. Geophys., 1986
- 5 Naville C. Detection of anisotropy using shear-wave splitting in VSP surveys: requirements and applications. In White H. J., eds. 56th Ann. Internat. Mtg., Expanded Abstract. Houston: Soc. of Expl. Geophys., 1986
- 6 方佑宝等. 方位各向异性介质的 VSP 资料处理. 石油物探, 1996

A New Method of Separating the Shear Waves Splitting in Anisotropic Media

Yin Ke

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045)

Abstract For azimuthal anisotropy seismic exploration, it is very important to separate the fast and slow shear waves splitting in this type of anisotropic media. Many researchers have worked on this problem, but their methods are not realistic in exploration. In this paper, a new method of separating the shear waves splitting in EDA media is presented, that can be directly applied to actual use. Through numerical examples, it can be found that the method is highly efficient and accurate.

Key Words anisotropy; shear wave - splitting; separation of wave field