

利用 S_H 横波反射资料中的勒夫面波反演浅部横波速度结构

邓小娟¹ 鄯少英¹ 左莹¹ 何银娟¹ 季通宇¹

1 中国地震局地球物理勘探中心,郑州市文化路75号,450002

摘要: 由于勒夫波速度与纵波速度无关,勒夫波多道分析方法具有频散曲线简单、能量清晰、反演过程中未知参数少、对初始模型依赖小、反演结果稳定、分辨率高等特点。实验结果表明,利用浅层 S_H 横波反射地震数据中的勒夫面波信息,反演得到近地表横波速度结构,在浅层地质构造、断层位置、上断点埋深等方面与浅层 S_H 横波反射地震剖面以及地质钻孔数据吻合较好。该方法可为地下构造解释提供更多依据,提高探测成果的可靠性。

关键词: 勒夫波;勒夫波多道分析方法; S_H 横波反射;浅层横波速度结构

中图分类号: P315

文献标识码: A

通常,横波反射地震勘探指的是激发和接收 S_H 波。横波反射勘探与纵波反射勘探方法相似,其区别在于,纵波反射勘探震源激发的是纵波,而横波反射勘探震源激发的是剪切波。由于横波的传播速度低、波长短,对浅部地层的分辨能力强,因此,相对于纵波反射勘探,横波反射勘探在解决近地表地质问题方面有较高的精度^[1-2],在城市活断层超浅层地震勘探中有良好的发展前景^[3-4]。

与纵波反射勘探一样,横波反射勘探地震数据中同样有面波的干扰,其区别在于,纵波反射勘探地震数据中面波通常为 S_V 波,称为瑞利(Rayleigh)波,而横波反射勘探地震数据中面波多为 S_H 波,称为勒夫(Love)波。勒夫波是由 S_H 波在自由表面的多次反射波和折射波的叠加干涉形成的,在传播过程中携带大量地层物理参数信息^[5],并且具有明显的频散特性。相对于纵波反射勘探中的瑞利面波,勒夫波速度与纵波速度无关,因此勒夫波多道分析方法具有频散曲线简单、能量清晰、反演过程中未知参数少、对于初始模型的依赖程度小、反演稳定、分辨率高、反演得到的勒夫波相速度更精确等特点^[5]。因此,我们设想在对横波反射地震资料进行地下结构成像的同时,利用横波反射地震记录上的勒夫面波的频散特性,反演计算近地表剪切

波速度结构,为地下构造解释提供更多依据,提高探测成果的可靠性。

对反射地震勘探中的面波进行反演来预测地壳上部横波速度的方法很早就被提出,很多专家进行了通过反演勒夫波获取浅地表横波速度的研究^[5],目前技术已经相对成熟。利用勒夫波多道分析方法反演浅层 S_H 横波反射地震资料中的勒夫波可获得浅层横波速度,在岩土工程原位测试、近地表地震地质条件评价以及浅层结构和构造研究等方面具有重要的意义。本文在简要概述勒夫波基本特点以及勒夫波多道分析方法的基础上,结合横跨夏垫断裂的 S_H 横波反射地震实际资料,对该方法在隐伏断层探测中的应用进行分析与讨论。

1 勒夫波特点

勒夫波产生的条件是在下伏地层介质中的横波速度必须大于上覆地层的横波速度。勒夫波沿平行于界面的方向传播,其质点运动也与分界面平行,是一种 S_H 型的面波。其位移表达式如下^[6]:

$$v_1 = 2A \cos(kz) p e^{i(kx - \omega t)}, 0 < z \leq d \quad (1)$$

$$v_2 = 2A \cos(kz) p e^{-kq(z-d)} e^{i(kx - \omega t)}, z > d \quad (2)$$

式(1)为上覆地层中勒夫波位移表达式,式(2)为下伏地层中勒夫波位移表达式。式中, A 为振幅,

$p = [(c_p/c_{T1})^2 - 1]^{1/2}, q = [1 - (c_p/c_{T2})^2]^{1/2}, c_p$ 为勒夫波相速度, d 为覆盖层厚度, $c_{T1}^2 = \mu_1/\rho_1, c_{T2}^2 = \mu_2/\rho_2, k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c_p, c_{T1}, \rho_1, \mu_1$ 分别表示覆盖层的剪切波速度、密度与剪切模量, c_{T2}, ρ_2, μ_2 分别表示下伏地层的剪切波速度、密度与剪切模量。

层状介质中,勒夫波具有频散特性,其频散方程为^[6]:

$$\tan(kdp) = \frac{\mu_2 q}{\mu_1 p} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \left[\frac{1 - (c_p/c_{T2})^2}{(c_p/c_{T1})^2 - 1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

分析总结可知,勒夫波传播具有如下特点。

1) 满足频散方程(3)的实数 c_p 的解必须在 $c_{T1} < c_p < c_{T2}$ 的范围之内,意味着横波速度较高的下伏地层上覆盖以低速层时,在上覆地层和下伏地层分界面上可以产生勒夫面波,同时勒夫波的速度介于二者之间^[6]。

2) 根据式(1)可知,在上覆地层中勒夫波振幅是按余弦函数变化,在自由界面处振幅最大;根据式(2)可知,在下伏地层中勒夫波的振幅随着深度的增加呈指数衰减。

3) 根据其频散方程(3)可知,层状介质中,勒夫波相速度取决于频率以及介质剪切波速度、介质密度以及地层厚度,与介质纵波速度无关^[5]。

4) 分析其频散方程(3)可知,方程左边为正切函数,具有周期性,存在关于 c_p 的多个解:

$$\frac{2\pi f}{c_{pm}} d \sqrt{(c_{pm}/c_{T1})^2 - 1} = \arctan \left[\frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{\sqrt{1 - (c_{pm}/c_{T2})^2}}{\sqrt{(c_{pm}/c_{T1})^2 - 1}} \right] + n\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

式(4)说明勒夫波是多阶波, n 为勒夫波的阶数, n 阶勒夫波的相速度为 c_{pn} , $n=0$ 时所对应的勒夫波为基阶勒夫波,其他称为高阶勒夫波。并且在高频端,勒夫波基阶、高阶相速度趋近于上覆地层的横波速度;在低频端,勒夫波基阶、高阶相速度趋近于下伏地层的横波速度^[5-6]。

5) 分析频散方程的解式(2)可知,勒夫波相速度的解不仅与阶数有关,还与波的频率有关,即同阶的勒夫波因频率不同,其相速度不同,这种相速度与频率有关的现象称为频散现象,勒夫波的频散现象是其应用于探测浅层地质结构的理论基础。

2 利用浅层 S_H 横波反射地震资料进行勒夫波分析的数据处理方法

参考勒夫波多道分析方法(multi-channel analysis of Love waves, MALW)^[7]利用浅层 S_H

横波反射地震资料进行勒夫面波分析(图 1)。

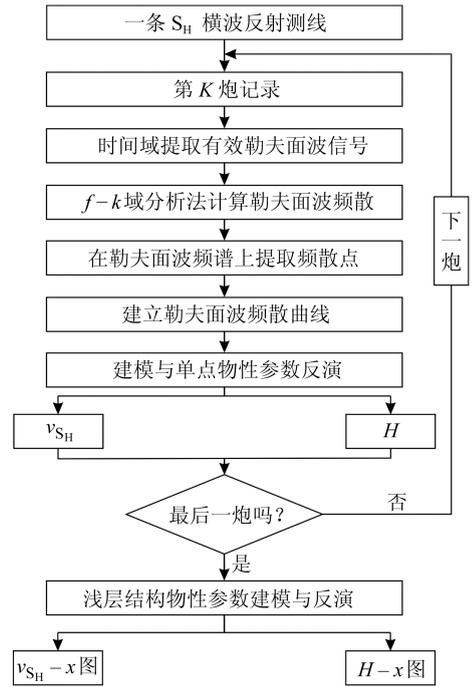


图 1 浅层 S_H 横波反射地震生产炮勒夫波分析步骤
Fig. 1 Love wave analysis steps of the shallow S_H wave reflection seismic data

3 浅层 S_H 横波反射地震资料应用实例

本文选取的浅层 S_H 横波反射地震测线是横跨夏垫断裂的 S_{H2} 测线^[2](图 2)。夏垫断裂是华北平原区北部一条重要的隐伏活动断裂,断裂走向 $N50^\circ E$, 倾向 SE, 倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$ ^[2], 是北京东侧大厂凹陷和通县凸起两个第四纪构造单元的边界断裂^[8]。在地震测线穿过的位置上,地表全被较厚的第四系地层覆盖,大厂凹陷第四系松散沉积物厚约 600~700 m, 通县凸起第四系松散沉积物厚 300~400 m^[9]。第四系覆盖层内部存在有多组连续性好的地层反射,该测线的浅层 S_H 横波反射地震探测采用了 24 磅锤击扣板震源,中间激发,多次覆盖观测系统,道间距 0.5 m, 120 道接收,采用 28 Hz 的横波检波器^[2]。

3.1 利用浅层 S_H 横波反射地震资料进行勒夫波分析

图 3 给出了浅层 S_H 横波反射地震勘探的单炮记录以及频谱分析结果。可以看出,地震记录上勒夫面波非常发育,勒夫面波主频与横波反射资料主频相近,对横波反射资料形成了很强的干扰。分析勒夫面波可知,勒夫面波分布的时间-空间范围较大,具有振幅较高、速度较低、明显频散等特点,在面波分布带内,面波信噪比高,而反射

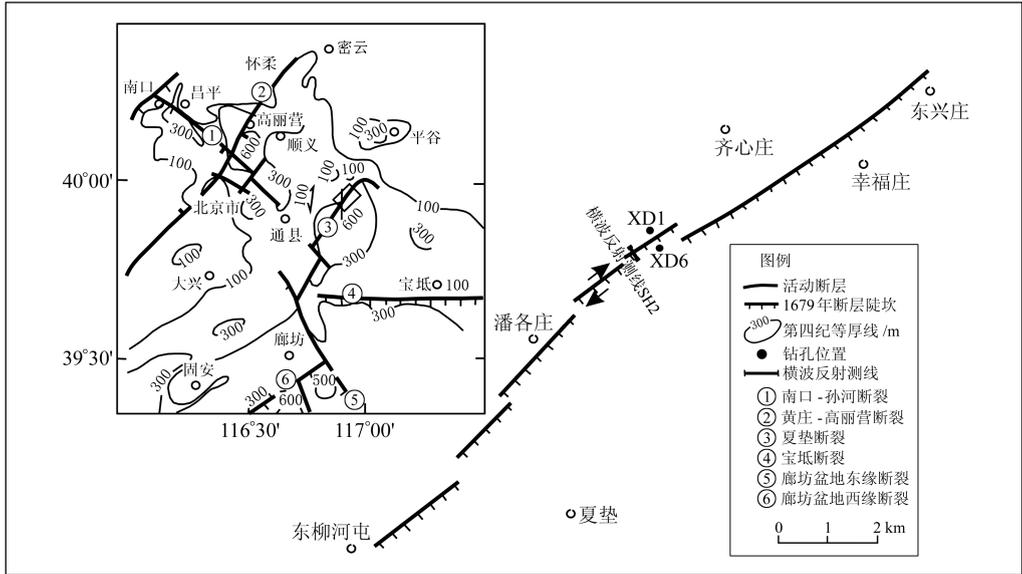


图2 浅层 SH 横波反射地震测线位置^[9-10]

Fig. 2 The location of the SH wave reflection seismic line^[9-10]

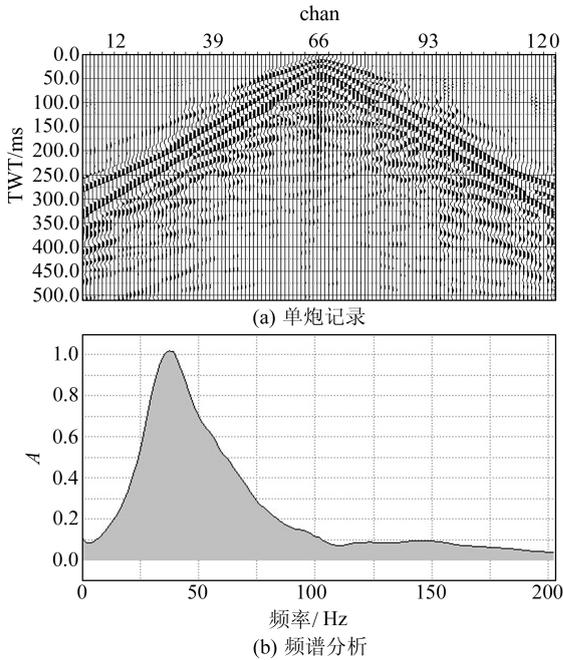


图3 浅层 SH 横波反射地震记录面波发育
Fig. 3 The Love wave situation of the shallow SH wave reflection seismic

波信息几乎湮没。面波与反射波的这些差别有利于面波的识别与提取。

利用勒夫面波分析的数据处理流程(图1),对实测浅层 SH 横波反射地震资料进行勒夫面波信息提取和数据处理。图4(a)是由实测横波反射地震资料提取的频散能量图,可以看到清晰的基阶勒夫波能量,其频率范围为5~60 Hz。根据其主能量团提取勒夫面波的频散点,绘制频散曲线,如图4(a)中黑色的十字点所示。采用图4(b)中蓝色实线所示的6层模型作为初始模型,利用提取的勒夫波频散曲线反演得到地下介质的横波

速度与层厚,其结果如图4(b)中红色实线所示,该结果为接收段中点的解释结果。

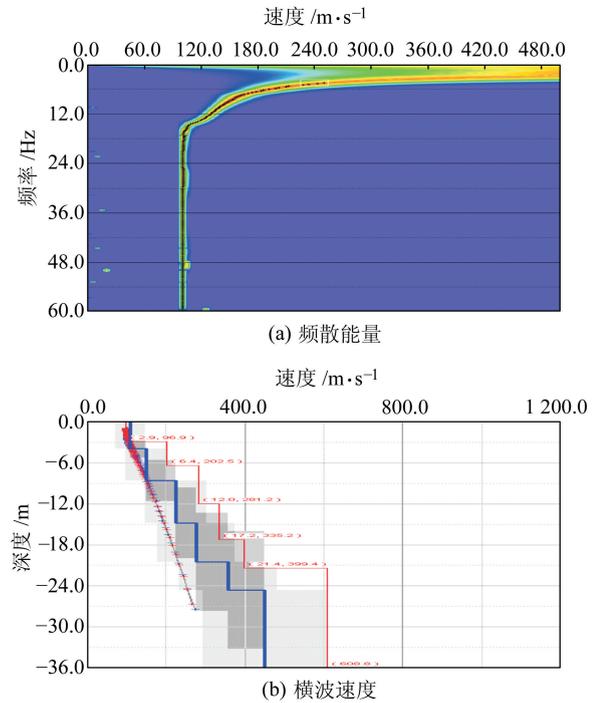


图4 浅层 SH 横波反射地震单炮数据道面波分析
Fig. 4 Love wave analysis of the shallow SH wave seismic reflection data

3.2 成果及认识

浅层 SH 横波反射地震勘探测线的反射波叠加时间与深度剖面见图5。剖面上解释了一条断层 F_{p2},该断层倾向南东,为东盘下降、西盘上升的正断层,可识别上断点深度约为3 m,垂直断距约为6 m,其在地面的垂直投影位于桩号550 m附近,该断层为夏垫断裂在剖面上的反映。浅层 SH

横波地震勘探反射波叠加时间剖面上,在地下 60 m 以内存在 4 个较为明显的地下界面反射波,但是在地下 20 m 以内反射波组不连续,尤其在断层附近没有明显的地层分界面。

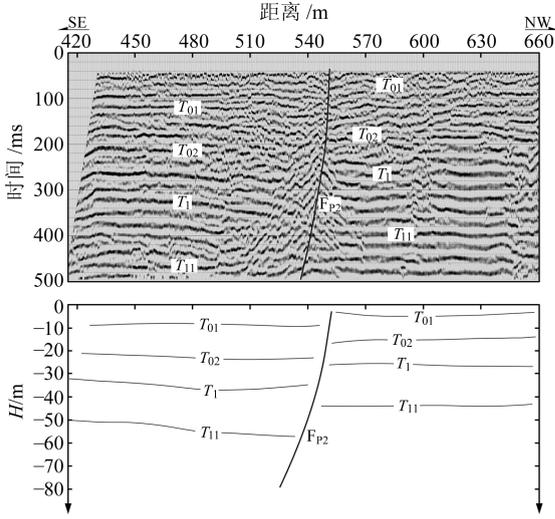


图 5 浅层 S_H 横波地震测线反射叠加时间与深度剖面
Fig. 5 Reflection wave superposition time and depth profile of the shallow S_H wave reflection seismic survey

利用浅层 S_H 横波反射地震资料中勒夫面波反演浅部横波速度结果如图 6 所示。在深度 20 m 以内存在 4 个明显的横波速度分界面,分别为深度 2.5~4 m 的横波速度为 131 m/s 的分界面、深度 5~15 m 的横波速度为 250 m/s 的分界面、深度 7.5~24 m 的横波速度为 304 m/s 的分界面以及深度 12~28 m 的横波速度为 325.6 m/s 的分界面。其中横波速度为 250 m/s 的界面以及横波速度为 304 m/s 的界面与横波反射叠加时间与深度剖面中的 T₀₁ 与 T₀₂ 地层分界面深度相似,起伏状态吻合。由于探测深度的限制,深度 2.5~4 m 的横波速度为 131 m/s 的分界面与深度 12~28 m 的横波速度为 325.6 m/s 的分界面为利用浅层 S_H 横波反射地震资料中的勒夫面波可分析的最浅与最深深度,并非实际地层速度分界面。

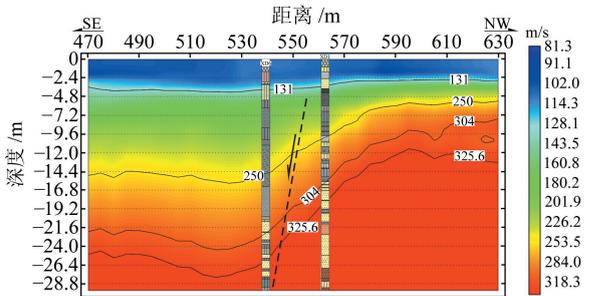


图 6 勒夫面波反演横波速度结构剖面
Fig. 6 S-wave velocity profile inverted by Love wave

结合地质钻孔^[10](图 6)可知,深度 5~15 m 的横波速度为 250 m/s 的速度分界面在 XD1 钻

孔处可能对应深度 10.1 m 处上更新统上段黑灰色黏土夹粉砂与黑灰色细砂岩的分界面,在 XD6 钻孔处对应深度 13.5 m 处上更新统黑灰色淤泥质黏土。深度 7.5~24 m 的横波速度为 304 m/s 的速度分界面在 XD1 钻孔处可能对应深度 16.2 m 处上更新统上段灰黑色流塑状淤泥与上更新统下段灰黄色粉细砂层的分界面,在 XD6 钻孔处可能对应深度 20.4 m 处上更新统黑灰色细砂夹淤泥质黏土薄层与灰黄色含黏土的粉砂岩分界面。综上所述,横波速度分界面并不能完全与岩性分界面相对应,意味着横波速度不仅与地层岩性相关,还与地层沉积年代以及埋藏深度有关。

在横波速度剖面中横波速度为 250 m/s,与横波速度为 304 m/s 的两个横波速度界面在桩号 540~560 m 下方均出现剧烈的横向速度变化,变化趋势一致。据此推测,在该处存在断层,在地表的投影点位置位于桩号 550~560 m 之间,其上断点埋深位于 3 m 以下,垂直断距约为 5~7 m。该结果与浅层 S_H 横波反射地震资料基本吻合。

总结横波速度结构剖面特征可知,利用浅层 S_H 横波反射地震勘探数据进行勒夫面波分析,得到浅层 S_H 横波速度结构剖面,在浅层地质构造、断层位置、上断点埋深等方面与浅层 S_H 横波反射地震剖面以及地质钻孔数据基本吻合,可为地下构造解释提供更多依据,提高探测成果的可靠性。

4 结 语

本文在利用横跨夏垫断裂的 S_H 横波反射地震资料进行地下结构成像的同时,利用其横波反射地震记录上的勒夫面波频散,反演计算近地表剪切波速度结构。

夏垫断裂是三河-平谷 8 级地震的发震断层,在地表形成了一条走向 NE 的断层陡坎,显示东南盘下降、西北盘抬升的正断层性质。对于横跨夏垫断裂的浅层 S_H 横波反射地震数据中的勒夫面波,利用勒夫波多道分析方法反演得到浅层 S_H 横波速度结构剖面,显示出存在断层,并且该断层具有东南盘下降、西北盘抬升的正断层性质,在浅层地质构造、断层位置、上断点埋深等方面与浅层 S_H 横波反射地震剖面以及地质钻孔数据基本吻合。利用浅层 S_H 横波反射地震记录中的勒夫面波反演浅层横波速度结构,不但可为地下构造解释提供更多依据,提高探测成果的可靠性,而且也可实现多波多参数的综合利用,进而提高勘探效率,降低勘探成本。

参考文献

- [1] 熊章强,方根显.浅层地震勘探[M].北京:地震出版社,2002(Xiong Zhangqiang, Fang Genxian. Shallow Seismic Exploration[M]. Beijing: Seismological Press,2002)
- [2] 赵成彬,酆少英,秦学业,等.夏垫断裂浅部特征高分辨率反射地震探测研究[J].地震研究,2010,33(1):81-85(Zhao Chengbin, Feng Shaoying, Qin Xueye, et al. Research on the Shallow Structure Characteristics of Xiadian Fault Using High-Resolution Artificial Seismic Exploration Method[J]. Journal of Seismological Research, 2010, 33(1): 81-85)
- [3] 王永,仇恒永,王治华,等.浅层 S_H 波反射波勘查的应用及震源[J].地球物理学进展,2007,22(2):638-644(Wang Yong, Qiu Hengyong, Wang Zhihua, et al. The Surveying Application of the Shallow Layer S_H Reflected Waves & the Analysis of Routine Seismic Source[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 638-644)
- [4] 赵成斌,刘保金,姬计法.活动断裂探测的高分辨率地震数据采集技术[J].震灾防御技术,2011,6(1):18-25(Zhao Chengbin, Liu Baojin, Ji Jifa. The Acquisition Technique of High-Resolution Seismic Data for Prospecting of Active Faults[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(1): 18-25)
- [5] 夏江海,高玲利,潘雨迪,等.高频面波方法的若干新进展[J].地球物理学报,2015,58(8):2 591-2 605(Xia Jianghai, Gao Lingli, Pan Yudi, et al. New Findings in High-Frequency Surface Wave Methods[J]. Chinese J Geophysics, 2015, 58(8): 2 591-2 605)
- [6] Sheriff R E, Geldart L P. 勘探地震学(第二版)[M].北京:石油工业出版社,1999(Sheriff R E, Geldart L P. Exploration Seismology(2nd Edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999)
- [7] Xia J H, Miller R D, Cakir R, et al. Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity using Multi-Channel Analysis of Love Waves(MALW)[C]. The 4th International Conference on Environmental and Engineering Geophysics (ICEEG), 2010
- [8] 车兆宏.首都圈断层活动性研究[J].华北地震科学,1993,11(2):23-34(Che Zhaohong. A Study of the Fault Activity in the Capital Circle[J]. North China Earthquake Sciences, 1993, 11(2): 23-34)
- [9] 徐锡伟,计凤桔,于贵华,等.用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列:河北夏垫断裂古地震研究[J].地震地质,2000,22(1):9-19(Xu Xiwei, Ji Fengju, Yu Guihua, et al. Reconstruction of Paleo-Earthquake Sequence using Stratigraphic Records from Drill Logs: A Study at the Xiadian Fault, Beijing[J]. Seismology and Geology, 2000, 22(1): 9-19)
- [10] 杨晓平,曹景虎,陈献程.夏垫活动断裂两盘岩心氧化铁变化[J].地震地质,2012,34(4):659-671(Yang Xiaoping, Cao Jinghu, Chen Xiancheng. The Iron Oxide Changes in Drilling Cores from the Two Walls of Xiadian Active Fault[J]. Seismology and Geology, 2012, 34(4): 659-671)

Inversion of the Love Wave in the S_H Wave Reflection Seismic Data for the Shallow S_H -Wave Velocity Structure

DENG Xiaojuan¹ FENG Shaoying¹ ZUO Ying¹ HE Yinjuan¹ JI Tongyu¹

¹ Geophysical Exploration Center, CEA, 75 Wenhua Road, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Due to the velocity of Love wave is independent of the P wave velocity, the multi-channel analysis of Love wave method has the characteristics of simple dispersion curves, clear energy, less unknown parameters in inversion process, less dependency on the initial model, stable inversion results and high resolution. The results shows that, the near-surface S_H wave velocity structure can be obtained by inversion of the love wave in the S_H wave reflection seismic data, and the shallow geological structure, fault location and the depth of the breakpoint of the near-surface S_H wave velocity structure are in good agreement with the S_H wave reflection seismic profile and the drilling data. This technique will provide more explanation for the underground structure basis, and improve the reliability of detection results.

Key words: Love wave; multi-channel analysis of Love waves; S_H wave reflection; shallow S_H -wave velocity structure

Foundation support: Young Foundation of Geophysical Exploration Center, CEA, No. YFGEC2016005.

About the first author: DENG Xiaojuan, engineer, majors in seismic data processing and interpretation, E-mail: dxjjjob@sina.cn.