

文章编号: 1001-1986(2009)01-0069-03

F-K 域三层对称模型洛夫型导波频散分析

任亚平, 李德春, 兖永敢

(中国矿业大学研究生院 江苏 徐州 211008)

摘要: 导波(分瑞利型和洛夫型 2 种)在波导层中传播时, 其能量持续时间长, 而且传播过程中携带着波导层的结构信息。基于多道分析的 F-K 方法(频率波数域二维傅立叶变换), 分析研究了 3 层对称模型中的洛夫型导波的频散特性, 计算了理论频散曲线, 并据此合成了特定频率的导波记录。通过对合成记录的 F-K 域分析, 获得了理论模型的速度参数。从分析结果来看, 速度参数与理论合成参数相一致, 说明 F-K 方法可作为导波的频散分析。

关 键 词: 导波; 频散; F-K; 洛夫波

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A

F-K dispersion analysis of Love guided waves in three layered symmetry model

REN Yaping, LI Dechun, KANG Yonggan

(China University of Mining and Technology, XuZhou 221008, China)

Abstract: Due to the long persistent time of the energy of guided waves(including Love and Rayleigh waves) going through the wave guid, the structure parameters the wave brought are more interesting. The paper focuses on Love waves based on F-K method. After calculating the dispersion curve and having got the synthesis records of Love guided waves at a given frequency, having been transforming the synthesis records, we can get the velocity parameters of the wave guide through analyzing. The results are consistent with the parameters we gave before. It is indicated that the F-K method can be used for dispersion analysis of guided wave.

Key words: guided waves; dispersion; F-K; Love wave

在地质剖面中, 煤层是一个典型的低速夹层, 在物理上构成了一个“波导”。当煤层中激发了体波(包括纵波和横波), 激发能量由于顶底界面的多次全反射被禁锢在煤层及其邻近的岩石(简称煤槽)中, 不向围岩辐射, 而在煤槽中相互叠加, 相长干涉, 形成一个强的干涉扰动, 即槽波。它以煤层为波导沿着煤槽传播, 因此, 煤层槽波又称煤层波或导波。而对于导波, 频散现象是其最典型的特征。因此研究导波的频散特征尤为重要。本文以正演的 Love 导波频散曲线为依据, 研究了在 F-K 域基阶 Love 导波频散特征。

1 基本理论

1.1 Love 型导波的周期方程

在顶板 - 煤层 - 底板剖面中, 煤层是一个低速夹层。在煤层中激发的槽波, 相当于低速夹层中的导波。对于以煤层中心面为对称的三层地质模型, Love 波应满足如下的周期方程^[1]:

$$\frac{\omega d}{c_L} \sqrt{c_L^2/v_{S2}^2 - 1} = \arctan \left[\frac{\mu_1}{\mu_2} \times \frac{\sqrt{1 - c_L^2/v_{SI}^2}}{\sqrt{c_L^2/v_{S2}^2 - 1}} \right] + n\pi \quad (1)$$

式中 d 为 1/2 煤厚, m; v_{S1} 、 v_{S2} 为围岩与煤层的 S 波速度, m/s; μ_1 、 μ_2 为围岩与煤层的剪切模量; ω 为圆频率; c_L 为 Love 波的相速度, 且 $v_{S2} < c_L < v_{SI}$; n 为频散阶数。

周期方程或频散方程描述了 C_L 与 ω 间的一个隐含关系, 是 SH 平面波在煤层内相长干涉的条件。

1.2 频散分析

频散分析实质上就是从实测的透射槽波记录中提取群速度和相速度曲线。频散分析的方法很多, 其中以数值计算方法为好。数值计算, 有基于单个记录道、也有基于多个记录道的方法, 其共同特点就是计算涉及的频率范围广、计算结果的精度高。

由于群速度和相速度之间可以互相转换, 因此, 只要计算出其中的一个, 另一个便可由公式导出。具有频散特征的导波, 相速度与群速度明显不同^[2](图 1)。

收稿日期: 2008-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(49404053)

作者简介: 任亚平(1982—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 从事地球探测与信息技术研究。

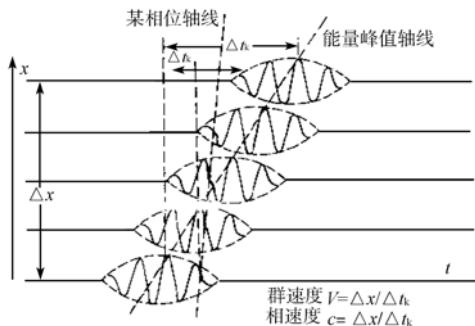


图 1 相速度与群速度

(据 sheriff , 1981)

Fig. 1 Phase velocity and group velocity

$$V = \frac{d\omega}{d(\omega/c)} = \frac{d(ck)}{dk} = c + k \frac{dc}{dk} , \quad (2)$$

式中 c 是相速度 ; V 是群速度 ; k 是圆波数。此式表示了群速度与相速度间的关系。

1.3 F-K 变换

F-K 变换，即二维傅立叶变换方法。其基本原理是利用傅立叶变换将导波记录由时空域变换到频率波数域^[3-4]。在频率波数域可得到组成该导波记录的不同频率和波数的分布。通过频率与速度的关系式：

$$V = 2\pi f / k , \quad (3)$$

可由 F-K 谱得到导波频散曲线图，即相速度随速度变化图。其中 k 为圆波数。

2 理论模型分析

2.1 Love 导波频散曲线计算

由给定的模型参数(表 1)通过解方程(1)可得该模型 Love 型导波的频散曲线(图 2)，再通过该模型的频散数据，即图 2 的频散数据可得到理论合成数据。

表 1 模型参数
Table 1 Parameters of model

介质	横波速度/m·s ⁻¹	厚度/m	密度/g·cm ⁻³	频散阶数 n
围岩	2 250	+	2.6	0
煤层	1 200	2	1.2	0
围岩	2 250	+	2.6	0

2.2 槽波的波形及理论合成

不论 Love 波或 Rayleigh 波，都有频散，都是无数不同频率、不同速度谐波的合成。设槽波沿 x 正方向传播，在数学上总可将它表示为：

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp[i(\omega t - kx)] d\omega . \quad (4)$$

令 $\theta(k) = \omega t - kt$ ，则

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(k) e^{i\theta(k)} dk , \quad (5)$$

式中 $S(k)$ 为震源激发脉冲频谱。

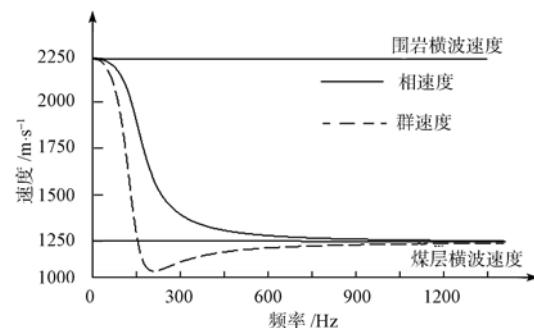


图 2 模型理论频散曲线图

Fig. 2 Theoretic dispersive curve of the model

由 2.1 节所得的频散数据，根据(4)式、(5)式，可得合成记录如图 3。其中合成记录用到频率为 150 Hz，最小偏移距为 50 m，道间距 1 m，时间采样 1 ms。

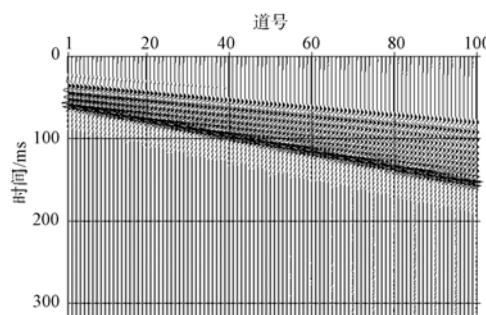


图 3 多道合成记录剖面图

Fig. 3 The section of multi-synthetic traces

2.3 频散分析

将 2.2 节所得的多道合成记录变换到 F-K 域，通过关系式(3)可得其相速度频散曲线，如图 4、图 5。

由合成记录的频谱图 4 可以看出在 150 Hz 频率的能量最强。从图 5 可得到相速度随频率变换的特征：随频率的增大相速度逐渐减小，能量最强部分分别趋向围岩和煤层的横波速度，而且在频率 150 Hz 附近能量最为集中。这与合成记录的参数是符合的，从而验证了 F-K 频散分析的正确性。

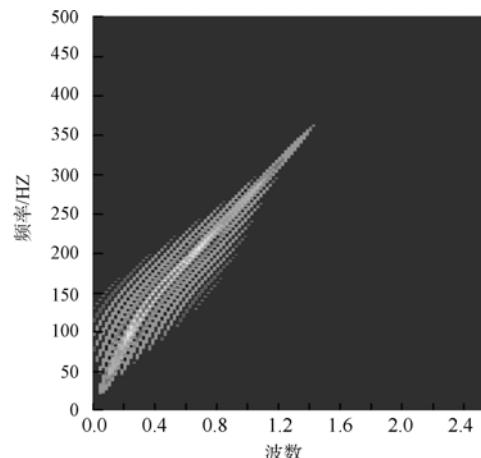


图 4 合成记录 F-K 频谱图

Fig. 4 F-K image of synthetic records

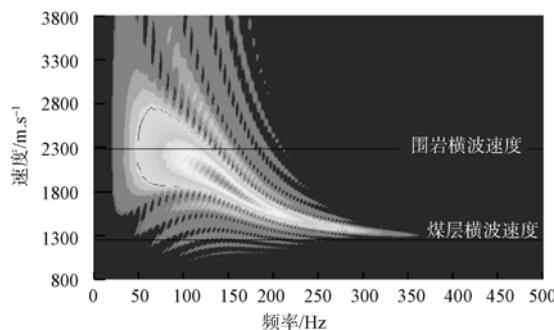


图 5 合成记录相速度图

Fig. 5 Phase velocity of synthetic records

3 结论

频散现象是导波的最根本特征。导波的频散特征里携带有介质的速度和结构信息。通过频散分析，不但可以证实导波的存在，而且可以用来进行煤层结构及地质异常现象的探测。

- a. 通过 F-K 分析可以确定导波的频率和波数特性，从而为导波的进一步处理提供了依据。
- b. 通过波数到速度的映射，可以得到相速度随频率的变化图；由分析可获得相应导波记录所携带的介质速度特征。
- c. F-K 分析是基于多道的，它既有优点又有缺

(上接第 68 页)

120 m，以单井激发为主，井深 10 m，采空区附近药量 2~2.5 kg，采样间隔为 1 ms，记录长度 1 s。

资料处理显示，六₄煤采空区附近下组煤二₁煤反射波(T_2 波)信噪比较高，地质现象较清晰。从图 5 可以看出，六₄煤采空区处，反射波 T_6 波信噪比降低，连续性变差，产状凌乱，但其下二₁煤反射波波形特征明显，能量强，信噪比高，连续性好；虎头山断层(F1)和 F201 断层断点反映清晰，且 F201 断层被 01613 号钻孔验证。采空区附近共解释断层 6 条，新发现断层 4 条，取得了丰富的地质成果。

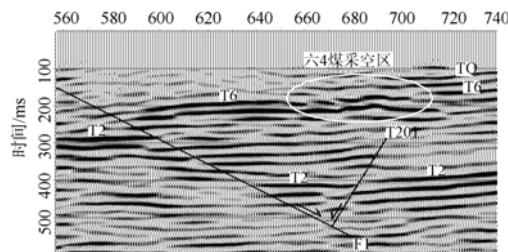
图 5 六₄煤采空区处地震时间剖面

Fig. 5 The time seismic profiles in Gob area 4

点。由所得的相速度图可以看出，能量虽在局部收敛，但不是很集中。不过由高能量带的分析，可以确定出相速度变化的较小范围，这就为地层反演成像提供了较为准确的速度信息。

参考文献

- [1] 刘天放. 槽波地震勘探[M]. 北京：中国矿业大学出版社，1994.
- [2] SUHLER S A, OWEN T E. Geophysical hazard detection from the working face, Final technical report[C]. USA : Southwest Research Institute, Dept. of Geoscience, P.O.Drawer, 28510 San Antonio, TX 78284, 1981.
- [3] 赵鸿儒. 全波震相分析[M]. 北京：地震出版社，1991.
- [4] 张霖斌，刘迎曦. 有限差分波动方程正演模拟震源处理[J]. 石油地球物理勘探, 1993(28) : 46~50.
- [5] 郑仙仲，崔力科. 波动理论在地震勘探中的应用[M]. 北京：石油工业出版社，1987.
- [6] 李鸣祉. 地震勘探资料数字处理[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1988.
- [7] 张诚. 地震分析基础[M]. 北京：地震出版社，1986.
- [8] 李元天. 槽波及频散特性[J]. 煤田地质与勘探, 1988(3) : 58~64.
- [9] 杨元海. 槽波速度谱相对透射系数图法[J]. 煤田地质与勘探, 1993(2) : 53~56.

5 结论

采空区下组煤探测是煤矿生产过程中迫切需要解决的技术难题之一，采用高覆盖次数、深井激发、大药量、中低频检波器、变观等手段，在许多地区可以获得较高信噪比的下组煤层地震信息，说明三维地震方法探测采空区下组煤是可行的。这就为煤矿下组煤开采提供地质保障，值得在各矿区推广、试点。由于不同地区采空区及地震地质条件的差异，对采空区下组煤探测，还需进一步探索和研究。

参考文献

- [1] 程建远，张广忠，李林元，等. 老窑采空区地震探测新技术及其应用前景[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(5) : 50~53.
- [2] 程建远，孙洪星，孙庆彪，等. 老窑采空区的探测技术与实例研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3) : 251~255.
- [3] 中国地质学会城市地质研究会. 中国城市地质[M]. 北京：中国大地出版社，2005.