

# 井间地震资料处理方法研究与应用

孔庆丰<sup>1,2</sup>, 左建军<sup>2</sup>, 魏国华<sup>2</sup>, 何惺华<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 胜利油田物探研究院, 山东 东营 257022)

**摘要:** 由于避开了近地表低降速带和风化层的影响, 井间地震可以得到高分辨率和高信噪比的地震信号, 近年来已经在油田开发中投入使用。笔者讨论了井间地震的井中管波的形成机理、衰减方法, 层析成像和 XSP-CDP 成像方法。对罗家和垦 71 区井间资料进行了成功的处理, 得到了较好的层析和反射波成像结果, 该结果有助于了解井间速度的横向展布和小断层的存在等。

**关键词:** 井间地震; 资料处理; 管波; 层析成像; 反射波成像

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2006)06-0533-05

井间地震是将震源和检波器均置入井中, 在井中进行激发和记录地震波的新型物探方法。由于避开了地表低、降速带对地震高频信号的吸收, 可以获得比常规地面地震更高分辨率的原始数据, 纵向分辨能力可以达到 3~5 m。其资料处理包括直达波速度层析反演和反射波成像。资料处理后, 可得到 2 井之间的地层速度信息和高分辨率的反射波剖面, 为研究井间的微幅度构造、低序级断层以及储层的横向展布提供高精度的地球物理资料, 协助油藏工程师进行油藏精细描述, 进而提高油藏开发效率。笔者主要针对井中管波的形成机理及衰减方法、速度层析成像和 XSP-CDP 成像方法等进行研究。

## 1 井间地震资料波场

按井间地震数据采集的特殊方式, 可以记录到绝大部分地震波, 包含某些或全部透射的和反射的纵波、横波、首波、导波和转换波。

2004 年 6 月, 胜利油田在垦 71 地区进行了井间地震试验, 选择了 2 对井组。利用压电晶体和轨道式 2 种可控震源进行激发, 四分量检波器( $x$ 、 $y$ 、 $z$  和压力分量)接收, 采集资料信噪比较高。图 1 是压电晶体可控震源的  $z$  分量记录, 可以清楚地看到直达纵波、反射波、导波和管波等。图 2 是轨道式可控震源的  $z$  分量记录, 直达波和反射波的信噪比较高, 没有管波干扰。

导波是当震源与检波器都位于 2 个高速地层之间的一个低速层内所产生的层间多次反射波。在这种情况下, 该低速层形成了一个波的“通道”, 所以导波又称为“通道波”。它一般呈现为一连串的振动, 在时距曲线的极小点, 到达时晚于直达波。在图 2 的近偏移距处存在能量较强的导波。

## 2 直达波旅行时速度层析反演

解地震层析成像的非线性反演问题, 需要给定

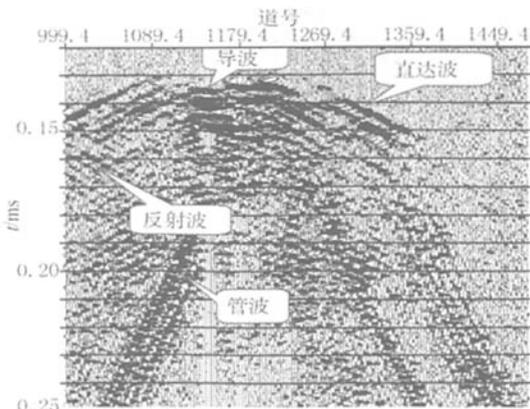


图 1 压电晶体可控震源的  $z$  分量共检波点记录

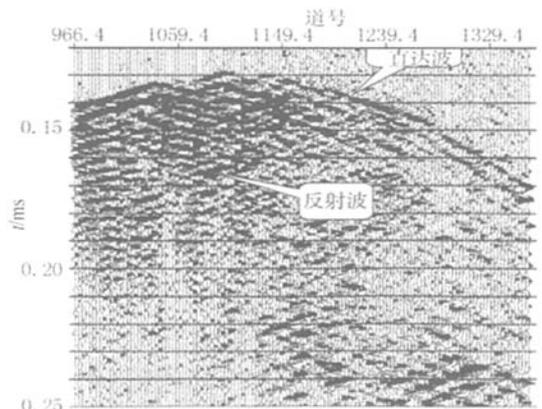


图 2 轨道式可控震源的  $z$  分量共检波点记录

初始模型, 然后对初始模型进行离散化成薄层模型单元(图3)  $P_i$  和  $R_j$  是第  $i$  个炮点和第  $j$  个检波点, 与某网格的交点分别为  $P$  和  $Q$  采用逐次迭代技术。在每一次迭代中, 都不可避免地要进行射线追踪, 即已知每个网格的速度或慢度值(各线性段左右两端处的速度或慢度)计算每对激发点和接收点之间的射线路径及初至旅行时。

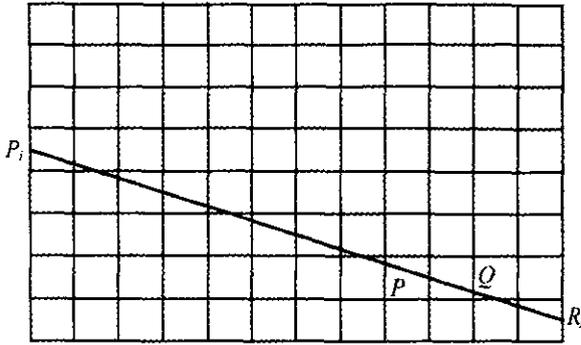


图3 初始速度模型的薄层网格化示意

根据地震射线理论, 初至旅行时  $t$  与模型慢度  $s$  有下列关系

$$t = \int_{l(s)} s(x, y, z) dl, \quad (1)$$

式中  $l(s)$  为射线路径, 它是慢度  $s(x, y, z)$  的函数;  $dl$  为沿射线路径  $l(s)$  的距离增量。

对于上述离散薄层模型, 设第  $j$  个薄层线性段左端横坐标为  $x_j$ , 水平长度为  $\Delta x$ ; 第  $j$  和第  $j+1$  个薄层线性段的慢度分别为  $s_j$  和  $s_{j+1}$ ; 第  $i$  条射线的旅行时为  $t_i$ ; 第  $i$  条射线通过第  $j$  个线性段的射线长度为  $l_{ij}$ ; 与该线性段边界交点的横坐标分别为  $x_{ij}$  和  $x_{ij+1}$ 。上式可写成下列离散形式

$$t_i = \sum_{j=1}^n l_{ij} \left[ s_j + \frac{s_{j+1} - s_j}{2\Delta x} (x_{ij+1} + x_{ij} - 2x_j) \right], \quad (2)$$

式中  $n$  为第  $i$  条射线穿过的模型单元个数。

若观测旅行时个数(或射线数)为  $M$ , 所求离散慢度值个数为  $N$ , 则可形成下列用矩阵(或向量)表示的反演方程

$$t = As \quad (3)$$

式中  $t$  为旅行时向量  $s$  为慢度向量(未知量);  $A$  为系数矩阵。当射线不经过与某慢度有关的薄层线性段时, 与之对应的矩阵  $A$  的元素为零; 否则, 当第  $i$  条射线通过第  $j$  个薄层线性段且与慢度  $s_j$  处的垂直边界不相交时, 对应的矩阵  $A$  的元素  $a_{ij}$  如下。当  $s_j$  位于射线  $i$  的右边时(图4a)

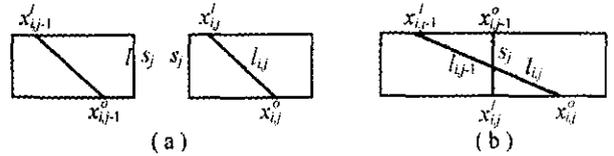
$$a_{ij} = \frac{2x_j - x_{ij}^o - x_{ij+1}^o}{2\Delta x} l_{ij-1} \quad (4)$$

当  $s_j$  位于射线  $i$  的左边时,

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}^l + x_{ij}^o - 2x_{ij} l_{ij}^o}{2\Delta x} \quad (5)$$

当第  $i$  条射线与慢度  $s_j$  所在的边相交时(图4b),

$$a_{ij} = \frac{2x_j - x_{ij-1}^l - x_{ij+1}^o}{2\Delta x} l_{ij-1} + \frac{x_{ij}^l + x_{ij}^o - 2x_{ij} l_{ij}^o}{2\Delta x} \quad (6)$$



a—相交 b—不相交

图4 第  $i$  条射线与慢度  $s_j$  所在边相交情况示意

在层析反演方程中的慢度向量  $s$ 、射线路径和矩阵  $A$  都未知, 且射线路径又是慢度的非线性函数, 我们仍然采用非线性共轭梯度方法逐次迭代求解该非线性反演问题。

旅行时层析反演问题可以写成

$$t = f(s) + e \quad (7)$$

式中  $t$  是观测旅行时向量  $s$  是模型慢度向量  $e$  是误差向量  $f$  是正演模拟算子。

由于该反演问题具有极其严重的多解性, 我们考虑了先验信息约束和正则化约束, 以寻求下列目标函数的正则化解

$$\varphi(s) = [t - f(s)]^T [t - f(s)] + \lambda s^T L^T L s + \beta (s - s_a)^T (s - s_a) \quad (8)$$

式中  $L$  是控制模型光滑度矩阵, 这里取为二阶差分算子  $s_a$  是模型先验信息向量;  $\lambda$  和  $\beta$  为正则参数, 均为正数。

记目标函数的梯度为  $n$  维向量  $g$ , Hessian 矩阵为  $n \times n$  对称矩阵  $H$ , 定义

$$g(s) = \partial_j \varphi(s) \quad (9)$$

$$H^k(s) = \partial_j \partial_k \varphi(s), \quad (10)$$

式中  $\partial^j$  代表关于第  $j$  个变量的偏导数 ( $j=1, \dots, n; k=1, \dots, n$ )。

令  $A$  为正演算子  $f$  的 Jacobian 矩阵, 各元素为

$$a_{ij}(s) = \partial_j f^i(s). \quad (11)$$

式中  $j=1, \dots, n; k=1, \dots, n$ 。

目标函数的梯度和 Hessian 矩阵分别为

$$g(s) = -2A(m)^T [t - f(s)] + 2\lambda L^T L s + 2\beta (s - s_a), \quad (12)$$

$$H(s) = 2A(s)^T A(s) + 2\lambda L^T L + 2\beta - 2 \sum_{i=1}^m q^i B_i(s), \quad (13)$$

式中  $B_i$  是  $f^i$  的 Hessian 矩阵 且  $q = t - f(s) - f(s_0)$ 。

如果把正演算子线性化,即给定一个参考模型  $s_0$ ,在其小的邻域内,把正演算子  $f$  进行 Taylor 展开,取其线性项,有

$$f(s, s_0) = f(s_0) + A(s_0)(s - s_0) \quad (14)$$

这时,目标函数为

$$\tilde{\varphi}(s, s_0) = [t - \tilde{f}(s, s_0)]^T [t - \tilde{f}(s, s_0)] + \lambda s^T L^T L s + \beta (s - s_a)^T (s - s_a) \quad (15)$$

相应的梯度和 Hessian 矩阵为

$$\tilde{g}(s, s_0) = -2A(s_0)[t - \tilde{f}(s, s_0)] + 2\lambda L^T L s + 2\beta (s - s_a) \quad (16)$$

$$\tilde{H}(s, s_0) = -2A(s_0)[A(s_0)] + 2\lambda L^T L + 2\beta \quad (17)$$

从上式子可以看出  $\tilde{\varphi}$  是  $s$  的二次函数  $\tilde{g}$  是  $s$  的线性函数  $\tilde{H}$  与  $s$  无关。给定一个参考模型  $s_0$ ,迭代的求取使线性化目标函数逐步达到极小的模型序列。即已知  $s_0$ ,求  $s_l$ ,使得

$$\tilde{\varphi}(s_{l+1}, s_l) = \min_s \tilde{\varphi}(s, s_l) \quad l = 1, \dots (18)$$

上式的解应使目标函数的梯度为零,即  $\tilde{g}(s_{l+1}, s_l) = 0$ 。由线性化目标函数梯度可得

$$\tilde{H}(s_{l+1} - s_l) = -\tilde{g}(s_l) \quad (19)$$

该式为线性方程组。共轭梯度方法求解的迭代算法如下。设迭代次数为  $K$ ,生成的模型序列可表示成

$$\begin{cases} s_{l0} = s_l \\ s_{lk+1} = s_{lk} + \alpha_{lk} p_{lk} & k = 1, \dots, K-1 \\ s_{l+1} = s_{lK} \end{cases} \quad (20)$$

式中 对于每个  $k$   $p_{lk}$  是模型空间搜索方向  $\alpha_{lk}$  是搜索步长。记

$$\begin{cases} \tilde{g}_{lk} = \tilde{g}(s_{lk}, s_l) \\ g_j = g(s_l) \\ H_{l+1} = H(s_l) \end{cases} \quad (21)$$

根据共轭梯度算法,由下式计算步长

$$\alpha_{lk} = -\frac{\tilde{g}_{lk}^T p_{lk}}{p_{lk}^T H_{l+1} p_{lk}} \quad (22)$$

搜索方向由下列迭代公式求出

$$\begin{cases} p_{l0} = -C_l g_l \\ p_{lk} = -C_l g_{lk} + \beta_{lk} p_{l,k-1} \end{cases} \quad k = 1, \dots, K-1, \quad (23)$$

式中  $C_l$  是  $n \times n$  预条件矩阵;由下式计算

$$\beta_{lk} = \frac{\tilde{g}_{lk}^T C_l \tilde{g}_{lk}}{\tilde{g}_{l,k-1}^T C_l \tilde{g}_{l,k-1}} \quad (24)$$

利用本方法对罗家资料进行层析成像处理,与井旁的声波速度曲线相比较,其吻合程度较好(图 5)。该方法能够有效反演出 2 口井之间的速度横向变化。万方数据

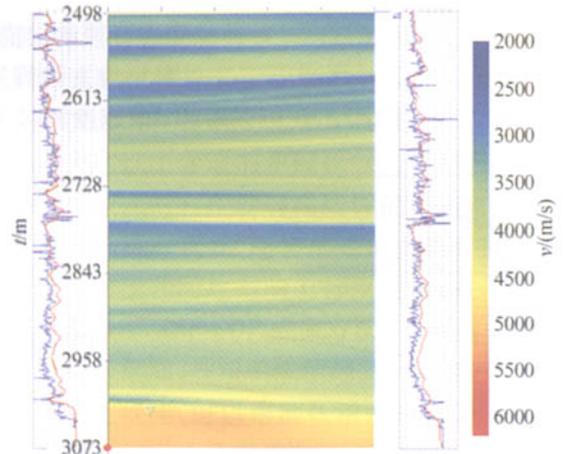


图 5 罗家 151.11—151.1 井间地震层析成像

### 3 井中管波的形成与衰减

在图 1 记录中,可以明显看到直达纵波、反射纵波等有效波,还有一些直线状和双曲线状的波时距特征明显、能量很强,它们都以直达波同相轴上某点为顶点,其视速度大致为 1 380 m/s,比管中泥浆的纵波速度略小,因此可以确定是管波。

根据井孔耦合理论,在一口井中激发的地震波,除向四周三维空间发散传播外,还有相当多的能量以管波的形式沿井筒向上向下传播。这种震源井内传播的管波所造成的井筒应变,当遇到井筒内或井筒附近的物性间断点时,在该点上速度与能量的突变将产生一个二次震源,沿井筒传播的管波一部分能量在此处向四周空间辐射出去,形成绕射波场并为邻井的检波器接收。同样地,震源所激发的向井外发射的体波在通过介质到达另一井筒的某一物性间断点时,地震波对井筒壁施加一个应力,造成井的形变,径向位移的井壁挤压井中的液体,产生沿井筒传播的管波并为检波器接收。

“物性间断点”或绕射点的产生是以下原因造成的 ①井筒本身尺度如井径或套管受地层压力后的径向形变;②井筒与层状地层界面的交汇点处介质物性的非连续变化;③油层部位由于射孔造成的套管截面形状的变化;④固井水泥的密度突变。

设计的井间速度-地质模型见图 6。

通过数值模拟,可以得到如图 7 所示的理论合成记录。把理论合成记录与实际资料相比较,可以看到许多相似之处,这说明上述分析的管波所产生的机制是正确的。

在井间地震工作中,管波一般作为干扰波,在共检波点(CRG)与共炮点(CSG)域中通过空间滤波等方法将其压制掉。管波去除的好坏直接影响反射波成像的质量。通过理论分析和正演模拟研究了其

在不同道集上的时距曲线,对其范围进行频谱扫描,在 CRG 和 CSG 进行视速度滤波。图 8 为去除管波前后的对比图。两图比较可以看出,视速度滤波有

效地实现了管波的衰减和消除,保留了有效反射波信号,提高了资料的信噪比。

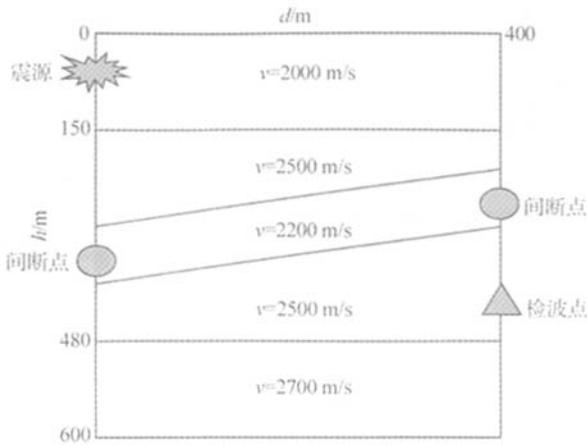


图 6 井间速度-地质模型

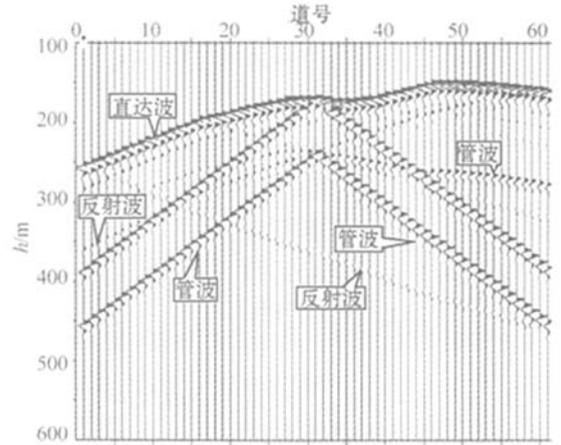


图 7 合成井间地震记录

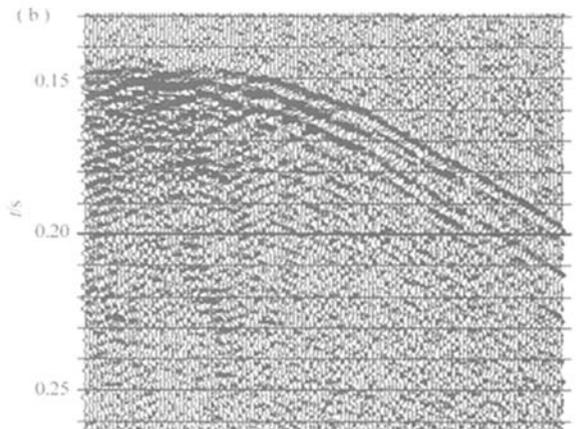
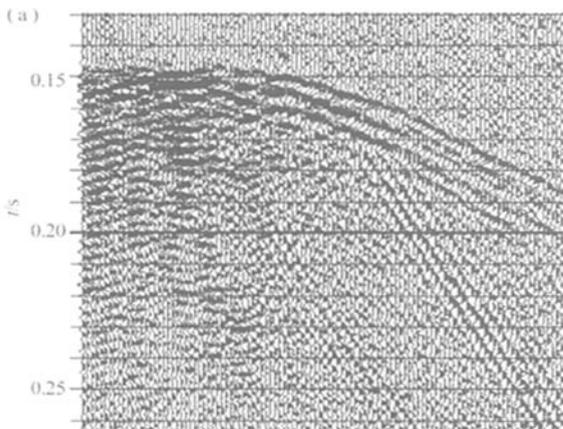


图 8 管波去除前(a)后(b)对比

## 4 井间地震 XSP-CDP 反射波成像

### 4.1 方法概述

由于井间地震反射波成像是在垂直地震剖面的 VSP-CDP 技术发展而来,称为 XSP-CDP 方法,通过反射波射线追踪,计算井间地震上行反射波产生反射的 2 井之间某个空间位置,然后将每个记录中的每个采样值从深度-时间( $z-t$ )域变换到偏移距-深度域( $x-z$ ),直接得到深度域的井间地震反射波剖面。

在实际的实现中,对于( $x-t$ )域的上行反射波资料按时间采样间隔  $\Delta t$  进行分割, $x$  方向间隔为  $\Delta x$ 。若( $z-t$ )的样点值转换之后落在某一 CDP 点附近,此样点属于这个 CDP 点,这样就形成了共反射点道集。把道集内的所有振幅值进行叠加,得到了该点 CDP 成像结果。

由反射波的射线路径可以确定出炮点到检波点的射线走时,并方数据

$$t = \sqrt{4(z_r - m)^2 + L^2} / v, \quad (25)$$

式中  $m = (g + s) / 2$ ,  $s$  和  $g$  分别是炮点和接收点的深度,  $v$  为反射界面以上(或以下)的速度,  $z_r$  为反射界面深度,  $L$  为 2 井的间距(假设 2 井都是铅直的)。

由反射点 CMG 道集的反射路径可以确定每一道所对应横向反射点的位置  $X$

$$X = L(vT_0 - z_r) / (2vT_0 - z_r). \quad (26)$$

### 4.2 角度选择与叠加

每一个 CMG 都可以产生一个 XSP-CDP 成像,多个 CMG 生成的多个 XSP-CDP 成像剖面组成一个三维数据体。它们之间对同一地层的反射仅由于共中心深度的不同造成反射角的不同,而在振幅上有所区别。由于子波与反射系数均随反射角变化,因此,简单的叠加并不能得到好的结果。角度选择叠加是一个新的思路。对 XSP-CDP 成像剖面集,进行由共中心深度域到角度域的转换,将共中心深度道集按直射假设条件转换到角度域,然后,按某一给

定反射角度抽取资料,得到共角度道集(CAG);而按某反射点抽取资料,就得到该反射点上的振幅随反射角度变化的新道集,亦称AVA道集。在某反射点的AVA道集上,对某一深度的地层而言,在某个角度范围内的反射信噪比最高,同时没有发生畸变,这样确定了为得到最好的叠加结果在该反射点上应参与叠加的XSP-CDP的范围与数量。

从垦71试验区的反射波成像结果可以看出,  $Ng_1$ 、 $Ng_3$ 、 $Ng_5$ 、 $Ng_7$ 、和  $Ed_{12}$  层位的有效反射信噪比和分辨率较高,能够看到两井之间的小断层(图9)。

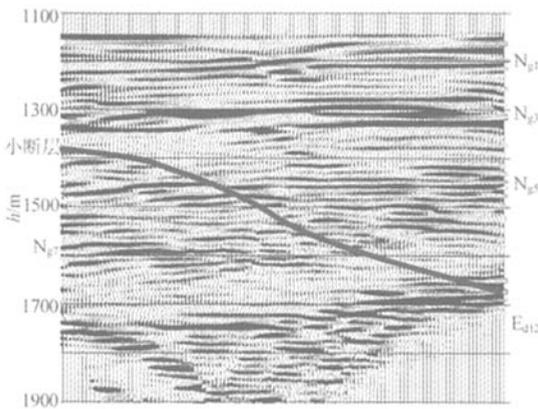


图9 井间地震反射波成像结果

## 5 结束语

层析反演技术是研究两井之间纵横向速度分布的重要方法,首先进行薄层速度模型网格化,对离散的薄层线段进行直达波射线追踪,实际资料的处理

表明,得到的速度层析结果分辨率较高,与声波测井得到的速度在井旁吻合程度比较高。

管波是井间地震的主要干扰波,通过理论记录模拟研究印证了管波的生成机制,利用管波在共炮点和共检波点的时距曲线是线性的特点,采用视速度滤波方法进行衰减,能够很好地去掉井间记录中的管波。对于井间地震的上行反射波,在垂直地震技术上发展了XSP-CDP成像方法,得到高分辨率的反射波成像剖面,波组关系清晰,能够反映地下地层的沉积变化规律,可以帮助认识两井之间的小断层和薄互层等细微地质现象。

## 参考文献:

- [1] 何惶华,王玉玲.井间地震资料处理方法与效果[J].石油地球物理勘探,1997,31(1):81.
- [2] 周建宇,梁周军.罗家地区井间地震方法与效果[J].石油地球物理勘探,2001,36(6):745.
- [3] Guust Nolet.地震层析技术[M].北京:地质出版社,1997.
- [4] 赫尔曼 G T.层析成像和反演问题的基本方法[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [5] Stewart R R. Exploration Seismic Tomography: Fundamentals[A]. SEG 61st Annl mtg Expanded Abstract[C]. Tulsa: SEG, 1991.
- [6] 曹辉,唐金良,郭全仕,等.井间地震反射波场分离及应用研究[J].石油物探,2004,43(6):518.
- [7] 郭全仕,邬达理,唐金良,等.井间地震反射波成像技术探讨[J].石油物探,2005,44(5):439.
- [8] 李庆忠,王建华.井间地震勘探的误区及出路[J].石油地球物理勘探,2004,39(1):1.

## THE STUDY AND APPLICATION OF THE INTER-WELL SEISMIC DATA PROCESSING

KONG Qing-feng<sup>1,2</sup>, ZUO Jian-jun<sup>2</sup>, WEI Guo-hua<sup>2</sup>, HE Xing-hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics CAS, Beijing 100029, China; 2. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Ltd., Dongying 257022, China)

**Abstract:** Avoiding the influence of the near-surface low-velocity zone and the weathering bed, the inter-well seismic exploration can obtain seismic signals with high resolution and high signal-to-noise ratio. The technique has been put into use in recent years. Three problems concerning the inter-well seismic exploration have been discussed in this paper, namely, the formation mechanism and the attenuation method of the inter-well pipe wave, the method for tomographic imagery and that for XSP-CDP imagery. The inter-well data from LuoJia and Ken-71 area were successfully processed, with relatively satisfactory tomographic imagery and reflection wave imagery obtained. These results help us understand the transverse spreading of the inter-well velocity and the existence of small faults.

**Key words:** inter-well seismic exploration; data processing; pipe wave; tomographic imagery; reflection wave imagery

作者简介:孔庆丰(1969-),男,高级工程师,1991年毕业于西北大学数学系,2003年毕业于同济大学电子与信息工程学院,获工程硕士学位。在胜利油田分公司物探研究院主要从事开发地震方法和处理研究工作,目前在中国科学院地质与地球物理研究所攻读博士学位,公开发表学术论文数篇。