井间地震弹性波传播特征数值模拟

李万万1,裴正林2

(1. 中国地质大学,北京 100083; 2. 中国石油大学 CNPC 物探重点实验室,北京 100083)

摘要:采用弹性波方程数值模拟和 Zoeppritz 方程解相结合的方式,研究了井间地震固-固界面上以及低速和高速 夹层中弹性波场特征及传播规律。给出了井间地震弹性波的主要类型,其中包含一种特殊面波,该面波由激发井 和接收井内的地层界面处产生的二次源形成,并说明了反射波以广角反射占优势;利用正演模拟记录对广角反射 现象进行了分析,得出了在临界角处广角反射波的振幅、相位突变,极性反转,这与反射系数变为复数相对应;提出 利用临界反射波特征和临界反射点位置来确定地层速度。震源在高速夹层中激发时,其中传播的弹性波场简单; 而在低速夹层中,则弹性波场非常复杂。低速夹层中的导波存在明显的频散现象,其振幅和频率与低速层的速度 和厚度密切相关。提出利用导波可以确定低速层的横向变化和连通性。

关键词:井间地震;广角反射;复数反射系数;低速层导波;弹性波场;数值模拟;高阶有限差分中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 8918(2008)02 - 0207 - 05

与地面地震相比,井间地震勘探具有如下特点: 不受地表低速带影响,地震波传播距离短,震源激发 频率高(一般100~1000 Hz),接收点和震源点都能 接近探测目标,接收到的地震记录频率高(是地面 地震的频率的十几倍到几十倍)、能量强、信噪比 高,波场类型多且复杂,散射波能量强,能够实现透 射波、绕射波、散射波、导波、折射波、转换波、反射波 等多种波型的高分辨成像。因此,井间地震是一种 有效的地球物理技术,它不但在地震学研究,煤、金 属与非金属等固体矿产资源,工程地质,环境地质和 地质灾害勘探中得到卓有成效的应用,而且在石油 天然气勘探与开发中获得成功应用[1-3]。随着井间 地震勘探设备的完善和发展以及井间地震成像和解 释水平的提高,井间地震在石油天然气勘探与开发 中也将起到越来越重要的作用。并间地震可以对并 间石油气储层和油藏进行高精度、高分辨 2D 空间 连续的描述,寻找未钻遇砂体及剩余油分布,动态监 测油气藏开发。

由于井间地震波场类型多,而且各种类型波之 间互相叠加或干涉,形成了非常复杂的弹性波场,这 对于井间地震波场识别与分离以及成像带来了很大 困难。研究井间地震弹性波场特征和传播规律将具 有非常重要的理论和实际意义。

井间地震与地面地震的激发、接收方式不同,因此,在地下介质中它们的波场特征和波场成分均存

在差异。张碧星等^[4]研究了层状半空间中导波的 传播,程增庆等^[5]、谢海兵等^[6]、李德春^[7]分别研究 了井间地震导波传播特征。

井间地震波场正演模拟是研究复杂地层中井间 地震波传播特征的有效手段。目前,地震波场数值 模拟方法可以归纳为3大类,即地震波动方程数值 解法,积分方程法和射线追踪法。对于一些复杂的 本构方程,由于积分方程法和射线追踪法不满足假 设条件,因而限制了其应用。地震波动方程数值解 法自20世纪60年代以来得到了飞速发展,已形成 了目前具有有限差分法、有限元法、虚谱法等各种数 值模拟方法的现代地震波动方程数值模拟技术。这 些解法各有优缺点。对于复杂构造、复杂地质体和 复杂岩性地震波场数值模拟而言,交错网格高阶有 限差分法的综合性能(占内存大小、模拟精度、计算 效率和并行算法实现)最好,并且最具实用性^[8-13]。

笔者将采用弹性波方程交错网格高阶有限差分 数值模拟方法,重点研究基础性模型的井间地震弹 性波场特征及传播规律,为井间地震资料处理、成像 及解释提供理论依据。

1 井间地震固-固界面上的弹性波场

为了分析固-固界面上的地震波场,设计如图 1 所示的 2 层水平层状模型。模型大小为 100 m × 200 m。网格大小为 1 m。数值模拟中,模型四周为

收稿日期:2007-10-09





完全匹配层(PML)吸收边界^[8],时间间隔 0.05 ms, 震源主频 300 Hz,井间距 100 m,炮间距 10 m,共采 集 12 炮。炮号 0 炮位于(0,10 m)。炮号 0~8 炮位 于上层低速介质中,炮号9炮位于界面上,炮号10 ~11炮位于下层高速介质中,道间距为2m,每炮共 101道记录。

图2 所示为2 层水平层状模型井间地震不同炮 点弹性波场记录。从图中可以看出:①当震源为 P 波源时,在固-固界面上的井间地震弹性波场主要包 括直达 P 波,反射 P 波,反射 PS 波(转换波),透射 P 波,透射 PS 波(转换波),首波(P 波和 S 波)和面波 等;②随着炮号的增大,即 P 波入射角的增大(其变 化范围为十几度至 90°),井间地震弹性波场发生了 明显变化,其中,反射 P 波的振幅变化最大。反射 P 波、反射 PS 波、透射 P 波的振幅变化最大。反射 P 波、反射 PS 波、透射 P 波的振幅变化最大。反射 P 波、反射 PS 波、透射 P 波、透射 PS 波的振幅变化与 根据 Zoeppritz 方程所计算的在弹性界面(速度界面 为3 800 m/5 600 m)上,当 P 波入射时,P 波、PSV 波的反射和透射系数相吻合(对比图 3)。



①-直达P波;②-反射P波;③-反射PS波;④-透射P波;⑤-透射PS波;⑥-P、放首波;⑦-PS首波;⑧-瑞利面波;a-第0~5炮x分量记录;b-第6~11炮x分量记录;c-第0~5炮z分量记录;d-第6~11炮z分量记录;
 图22层水平层状模型并间地震不同炮点弹性波场记录



图 3 P 波入射时, P、S 波的反射和透射系数

为了便于进一步分析 P 波入射角小于临界角 和大于临界角时弹性界面上反射波场特征,从图 2 的12 炮记录中抽出了反射点在界面中心处的共反 射点记录(图 4),共 12 道。记录的人射角见表 1。



a-x分量;b-z分量;反射点位于水平界面中心点,横坐标1.0表 示第1炮第0道

图4 2层水平层状模型弹性波场模拟共反射点记录

从图 4 可以清楚地看出:①当入射角增大但小 于临界角(42.7°)时(见图 4 中1~4 道),反射 P 波 振幅增幅不大,而反射 PS 波(转换波)增幅比较大; ②当入射角大于临界角后,反射 P 波增幅快速增大 接近直达波振幅(见图 4 中6~10 道),而反射 PS 波振幅在第 6 道达到最大,之后其振幅逐渐减小 (图 4 中7~10 道);③对比1~4 道和5~10 可以看 出,当小于临界角和大于临界角的反射 P 波相位发 生了明显变化(直达波为最小相位),即从最小相位 到0相位再到最大相位。图4中的第4道反射P波 的相位接近0相位,而反射PS波(转换波)无此现 象(由于上层纵波速度大于下层横波速度而不会出 现临界反射之故)。

图 4b 的第 9~11 道上的低频波成分中,第 10 道上面波最强,离开界面能量迅速减小。该面波是 当震源位于界面上或附近时,沿界面传播的瑞利面 波传播到接收器一侧后,在界面处重辐射(二次源) 所形成的一类面波(或管波)。

综上可得:①井间地震入射角变化范围广(二 十几度至 90°),反射波多为大角反射;②当 P 波入 射角大于临界角后,反射 P 波的相位发生了明显变 化(与入射波相比,或与小于临界角反射波相比)。 这正好解释了复数反射系数的物理含义。

2 高速、低速夹层模型井间地震弹性波场

导波在井间地震勘探中占有重要地位。下面通 过数值模型模拟结果来分析高速层和低速层中导波 的不同特性。



图5 低速夹层水平层状模型

低速夹层水平层状模型取泊松比为 0.25,模型 大小为 200 m×200 m,夹层厚度为 30 m,网格大小 为 1 m(图 5)。数值模拟中,模型四周为 PML 吸收 边界,时间间隔 0.1 ms,井间距 200 m,震源主频 200 Hz,炮间距 10 m,共 4 炮。炮号 5 的炮点位于(0,60 m),炮号 5~7 炮位于上层低速介质中,炮号 8 炮位 于夹层介质中,道间距为 2 m,每炮共 101 道记录。

从图 6 可以看出:①当震源接近低速夹层时,低 速层内出现了导波,而当震源位于低速层内时,导波 能量最强,同时低速夹层内的多次反射 P 波和 PS 波透射到两侧的高速层形成能量强的多次波干扰 波;②低速夹层内的多次反射 P 波和 PS 波的相互 干涉和叠加形成了低频波,其性质类似于面波。这 就是在低速夹层中传播的低频强能量导波的形成机 制。

高速夹层水平层状模型是将低速夹层模型中的

夹层速度和背景速度互换形成的,其余相同。图7 所示为高速夹层水平层状模型井间地震不同炮点弹 性波场模拟记录。

从图 7 可以看出:当炮点位于高速层内时,由于 高速夹层界面上的透射系数很大,因此,向高速层内 的反射能量小,同时随着反射次数增加,能量大量透 射,层内反射波能量迅速衰减直至消失,因此,在井间地震记录上,高速层内外多次波很小。

高速夹层和低速夹层模型数值模拟结果表明, 高速夹层内弹性波场简单,而低速夹层内波场非常 复杂,且存在低频高能量导波,因此,可利用低频高 能量导波识别和探测地下裂隙带、破碎带等低速层。



①—直达 P 波;②—界面反射 PP 波;③—界面反射 PS 波(转换波);④—透射 PP 波;⑤—透射 PS 波;⑥—透射 PP 波;
 ⑦—透射 PPS 波;⑧—透射 PSP 波;⑨—透射 PSS 波;⑩—低速夹层内多次反射 P 波和 PS 波透射到高速层的多次波;⑪
 低速层内的导波;⑫—瑞利面波;a—第5~8 炮 x 分量记录;b—第5~8 炮 z 分量记录





 ①—直达 P 波;②—界面折射 PP 波(P 波首波);③—界面折射 PS 波(转换波首波);④—透射 PP 波;⑤—界面反射 PP 波;⑥—界面反射 PS 波;⑦—高速夹层底界面反射 PSSP 波;⑥—高速夹层底界面反射 PSSS 波;⑦—透射 PPP 波;①—透射 PS 波;①—透射 PS 波;①—高速夹层底界面透射 PSSSS 波。⑤—瑞利面波; a-第5~8 炮*分量记录;b-第5~8 炮*分量记录

图 7 高速夹层水平层状模型井间地震不同炮点弹性波场记录

3 结论

井间地震弹性波场非常复杂且具有特殊的波场 特征,其中,广角反射波占优势,而且常出现反射波 极性反转现象。井间地震反射波中超临界反射波也 占有相当比例。

井间低速夹层中传播的弹性波很复杂,主要包 括体波和导波。导波存在明显的频散现象,其振幅 和频率与低速层的速度和厚度密切相关,且能量主 要集中在低速层内。在低夹层两侧介质中体波透射 波能量很强。

井间地震弹性波场正演模拟是研究井间地震波 传播特征的有效手段,可以为井间地震资料处理、成 像及解释提供理论依据。

参考文献:

- [1] 吴律. 层析基础及其在井间地震中的应用[M]. 北京:石油工 业出版社,1997.
- [2] 裴正林. 井间地震层析成像研究的现状与趋势[J]. 地球物理

学进展,2001,16(3).

- [3] 曹辉.井间地震技术发展现状[J].勘探地球物理进展,2002, 25(6).
- [4] 张碧星,鲁来玉. 层状半空间中导波的传播[J]. 声学学报, 2002(4).
- [5] 程增庆,吴奕峰,于振清. 孔间地震剖面法中薄层的广角反射 地球物理特征[J]. 地质论评,1989(3).
- [6] 谢海兵,马在田,王燕琨.井间地震 Love 型导波传播特征研究
 [J].石油地球物理勘探,1998(1).
- [7] 李德春. 储层中的导波[J]. 物探化探计算技术,1999(4).
- [8] 牟永光,裴正林.三维复杂介质地震数值模拟[M].北京:石油 工业出版社,2005.
- [9] 何兵寿,张会星,崔小芹.转换波精确无迭代速度分析[J].物 探与化探,2005,29(5):443.
- [10]乐友喜,曾有良.多项式的井间地震速度场反演方法[J].物探 与化探,2006,30(2):169.
- [11] 王建军,廖全涛,曹建伟,等.应用井间 CT 探测某桥墩基础断裂[J].物探与化探,2006,30(2):186.
- [12] 孔庆丰, 左建军, 魏国华, 等. 井间地震资料处理方法研究与应 用[J]. 物探与化探, 2006, 30(6):533.
- [13] 汪兴旺,杨勤海,孙党生,等.岩溶探测中井间地震波层析成像的应用[J].物探与化探,2008,32(1):105.

NUMERICAL SIMULATION OF ELASTIC WAVES BETWEEN WELLS

LI Wan-wan¹, PEI Zheng-lin²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Petroleum University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the combination of numerical simulation of the elastic wave equation with Zoeppritz equations, the authors studied characteristics and regularity of elastic wave propagation in solid-solid interface and high and low velocity interlayers between wells. The main types of elastic waves were classified, including a specific type of surface wave produced by secondary source formed in the interface between the source well and the receiver well. It is also found that the predominant reflection waves are wide angle reflection. The authors analysed he wide angle reflection phenomena by forward simulation of seismic records and thus obtained the results of amplitude and phase sharp changes as well as polarity inversion of wide angle reflections at the critical angle point, corresponding to the change of the reflection coefficients into the complex numbers. Furthermore, the determination of layer velocities by reflection characteristics of the critical angle reflections and the reflection point was suggested. The elastic wave fields formed are simple when the source is located in the high velocity interlayer, whereas the elastic wave fields formed become complicated when the source is located in the low velocity interlayer. The guide waves show obvious dispersion when they are propagated in the low velocity interlayer and their amplitude and frequency are closely related to the velocity and thickness of the low velocity interlayer. The lateral changes and connectivity of the low velocity layer can be estimated by the guide waves.

Key words: wide angle refection; complex reflection coefficient; low velocity layer guide wave; elastic wave field; cross network; high order finite difference

作者简介: 李万万(1961 -),男,高级工程师,1982 年毕业于河北地质学院,获学士学位,1988 年毕业于原成都地质学院获硕 士学位,1988 年以后先后在东方地球物理公司、万里翔石油技术公司等单位工作,现在中国地质大学(北京)攻读博士学位,主 要从事地震勘探方法研究与应用,公开发表学术论文数篇。