

# 广角反射波场特征研究及正演模拟分析

王志, 贺振华, 黄德济, 王熙明, 杜正聪

(成都理工大学, 成都 610059)

**摘要** 本文主要讨论了广角反射波场特征及影响广角反射波波形识别的几个主要因素, 通过高斯射线正演模拟分析, 以及对实际广角反射资料(WAR)进一步处理与研究, 得到了一些十分有意义的结论, 这些结论可以作为一些特殊地质构造地区进行广角反射地震勘探的理论依据。

**关键词** 广角反射, 波形识别, AVO效应, 正演模拟, 折射波

中图分类号 P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2003)01-0116-06

## The wave-field features researching of wide-angle reflection and the analyzing of forward modeling

WANG Zhi, HE Zhen-hua, HUANG De-ji, WANG Xi-ming, DU Zheng-cong

(Chendu University of Technology, Chendu 610059, China)

**Abstract** This paper focuses on discussing the wave-field features of wide-angle reflection (WAR) and several main factors on distinguishing the wave types of wide-angle reflection. By analyzing of Gausse Ray forward reflection modeling and processing on real seismic data of wide-angle reflection, some important conclusions, which provides very important theories basis for geophysics exploration in some special construction areas, have been obtained.

**Keywords** wide-angle reflection, wide-angle reflection wave types distinguish affection of AVO, forward modeling, refraction wave

### 0 引言

在地震勘探数据处理中, 低信噪比资料会严重影响处理结果. 影响最终地震剖面信噪比的因素很多, 如地表静校正, 各种规则干扰和不规则干扰, 以及速度不准确等. 人们在提高地震资料信噪比方面作了很多工作, 也取得了一定效果, 但仍不十分理想. 随着地震道的不断增加, 即炮检距的不断增大, 可以接收到一种特殊的波——广角反射波(如图1所示). 一般接收到广角反射应满足以下几个条件: (1)入射角应该大于临界角; (2)炮检距大于目的层埋深的一半以上; 并且炮检距应大于折射盲区的宽度. 图1是一张野外实际单炮地震记录资料(该记录排列长度为20 km, 480道接收, 道间距为50 m, 为了显示方便, 该记录已经进行了抽道处理). 从记录上可以清楚的看到穿过初至区以外的反射波, 这是由于广角反射产生的反射波. 在地震勘探数据采集与

处理时得到的反射波数据一般是在小于临界角的范围内进行, 这是因为当入射角大于临界角时, 入射波与反射波的相位存在差异, 并且有些反射系数也成为复数, 因而给地震资料的处理带来了困难. 但广角反射条件下的地震记录的信噪比较高, 可以获得质量较好的地震剖面, 因而广角反射波勘探方法可以作为一种有效的地震勘探方法.

### 1 广角反射波场特征分析

广角反射波具有三个显著特点: (1)振幅能量较非广角反射波的能量强; (2)一般出现在直达波以外, 炮检距很大, 但仍为双曲线同相轴的一部分; (3)频率较非广角反射波稍微低. 在广角反射方式下, 影响广角反射波场特征的因素有很多, 但主要有直达波, 折射波以及 AVO 效应等. 下面分别就以上三种影响因素进行讨论.

#### 1.1 直达波

收稿日期 2002-03-30; 修回日期 2002-06-30.

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043311)资助.

作者简介 王志, 男, 1972.1, 湖南益阳市人, 成都理工大学信息工程学院博士研究生, 主要从事地球物理探测与信息技术以及应用物理等方面的教学与科研工作(Email: mike-wang@sohu.com).

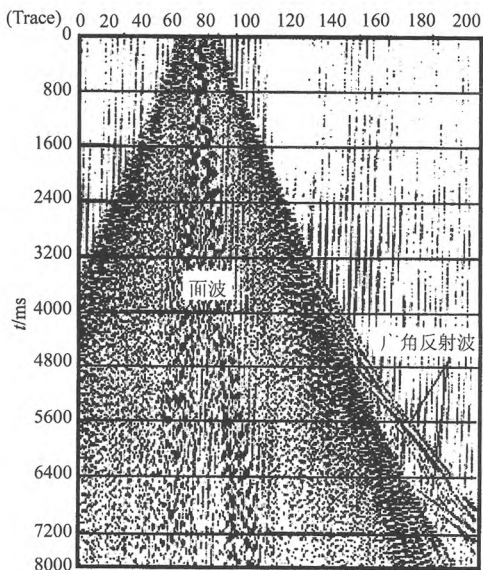


图 1 实际地震资料单炮记录  
Fig.1 The real seismic data of one shot gather

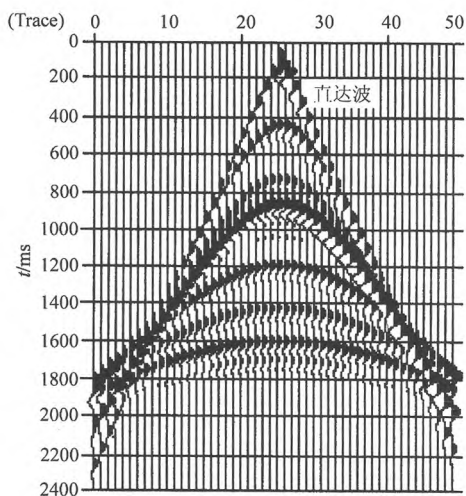


图 2 正演模拟直达波  
Fig.2 The direct-wave of forward modeling

直达波是指地震波未经过反射而直接从激发点达到接收点所形成的波.接收点离激发点越近,则越容易接收到直达波的信息,接收点离开激发点越远则越难接收到直达波的信息.因此在地震记录上,直达波形成初至记录.在炮检距较小时,直达波比反射波首先到达接收点.但是当炮检距较大时,直达波的传播时间可能比反射波长.因而在发生广角反射时,反射波同相轴将会与直达波相交.通常情况,在直达波以内,各种规则干扰较为严重,但在直达波以外,规则干扰较弱,有效波的信噪比较高(如图 1 所示),

因此采用广角反射方式采集地震数据通常是直达波以外的反射信息.

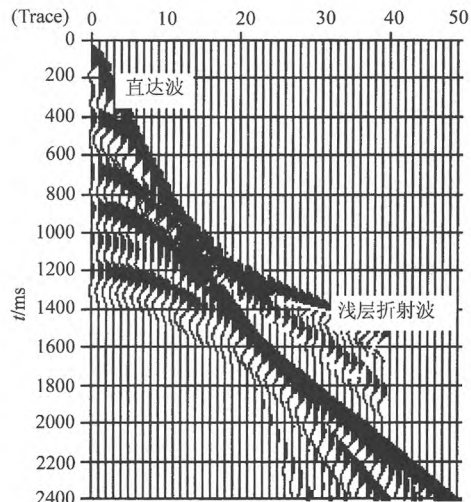


图 3 正演模拟折射—反射波  
Fig.3 The refraction wave of forward modeling

图 2 是通过射线正演模拟直达波的记录,从图 2 中可以看出,直达波的时间距离曲线一般呈现直线状,并且通常与广角反射波相交.广角反射波是指出现在直达波以外的地震反射波.

### 1.2 折射—反射波

在地震勘探的野外数据采集过程中,当排列长度较短时,采集到的数据受折射波干扰并不严重,但是当排列长度增加时,并且界面在垂直方向的性质变换也较大时,很容易产生超临界反射(既广角反射),同时也容易产生浅层折射波(首波,当  $V_n > V_{n-1}$  时).由于折射界面形成的条件比反射波苛刻,通常折射界面比反射界面要少,但当采用广角反射的方式来采集数据时,由于排列长度很大(或偏移距较大),这时候很容易满足超临界反射的条件,同时也容易满足产生折射波的条件,也就是说容易接收到折射波,因此,在采用广角反射时,折射波对反射波的影响是最主要的.研究有关的折射波运动学特征,是研究广角反射的主要内容,同时也是广角反射方式下进行波形识别的关键所在.

对于一个水平界面来说,浅层反射—折射—反射波的时距曲线方程可以表示为

$$t_i^{(k)} = k \left[ 1/V_i \sqrt{4h^2 + (dx)^2} + 1/V_{i+1}(di) \right]. \tag{1}$$

其中  $k$  表示反射—折射—反射波的次数;  $V_i$  为第  $i$  层地层速度;  $h$  为反射界面的深度;  $dx$  为产生临界

角时的偏移距;  $i$  为第  $i$  接收道到第一道之间的距离;  $d_i$  为道间距.  $V_{i+1}$  为第  $i+1$  层地层速度. 通过正演模拟分析, 得到如图 3 所示地震记录.

从图 3 中可以看出, 一次折射—反射—折射波的同相轴随着炮检距的增大, 浅层一次折射—反射—折射波通常与反射波同层反射波同相轴相切, 切点为折射波起点(临界点), 但与相邻地层反射波同相轴相交, 并且一般出现在直达波以外. 二次折射—反射—折射波的性质一次折射—反射—折射波相似, 只是到达的时间几乎增加了一倍. 在广角反射方式下, 浅层折射波是影响地震数据的重要因素, 怎样

有效的识别广角反射方式下的折射波和反射波是广角反射研究的重要内容.

1.3 AVO 效应

广角反射是指超过临界角时的反射, 炮检距比较大. 人们通常认为, 随着炮检距的增大, 由于球面扩散、地层吸收等因素的影响, 反射波能量衰减得十分厉害, 但是, 当充分考虑超临界后 AVO 效应的影响, 在远道接收到的反射信息并非比临界角以内的弱. 因此, 在采用广角反射采集地震数据时, 应该充分考虑各种因素的影响, 否则, 将达不到预期的目的.

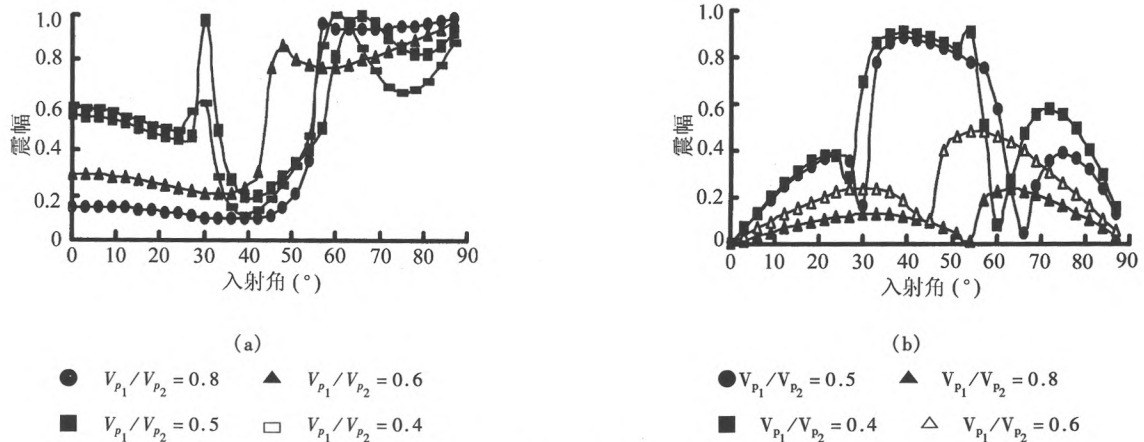


图 4 入射角变化与反射系数之间的关系

(a) 反射纵波, (b) 反射横波

Fig. 4 The reflection coefficient changing with the angle

(a) P-wave reflection (b) S-wave reflection

在介质弹性参数  $\lambda, \mu, \sigma$  确定的情况下, 对不同参数 ( $V_{p1}/V_{p2}$ ) 的反射 p 波和反射 s 波的振幅与入射角的关系研究发现 (如图 4), 反射 p 波的振幅在小于临界角时, 随着入射角的增加逐渐减小, 将要接近临界角时达到最小, 入射角等于临界角时急剧增加到最大值, 超过临界角时又开始下降, 但超临界后的反射波振幅值比临界角内的振幅值大得多, 因此, 只有采用广角反射才能接收远道的反射波能量; 对于入射 s 波而言, 反射波的振幅随入射角的变化与  $V_{p1}/V_{p2}$  的变化关系较大, 当  $V_{p1}/V_{p2}$  的比值较大时 (如图 4 中  $V_{p1}/V_{p2} = 0.6$  和  $0.8$ ), 反射波振幅在达到临界角是接近为零, 超过临界角时又增大; 当  $V_{p1}/V_{p2}$  的比值较小时 (如图 4 中  $V_{p1}/V_{p2} = 0.4$  和  $0.5$ ), 反射波振幅出现两个极小值和三个极大值, 其中第一个极小值出现在入射角等于临界角时, 因此, 采用横波勘探时可以考虑以上因素的影响.

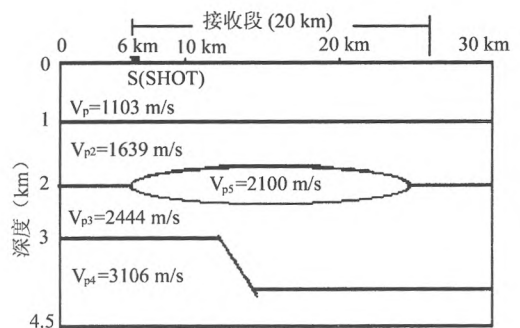


图 5 正演速度模型

Fig. 5 The velocity model of forward modeling

2 正演模拟分析

基于能量分配的大炮检距二维高斯射线正演是以高斯射线束理论为根据, 不仅考虑了各种波在界面上的能量分配关系, 而且考虑了广角反射方式下

射线的运动学、动力学追踪的问题.对于广角反射方式下反射波能量随炮检距变化关系(AVO效应),地层对地震波的吸收以及地震波在传播过程中的发散

现象(球面扩散)等作了较为深入的研究,因此,大炮检距二维高斯射线正演是进行广角反射正演模拟分析的一种有效手段.

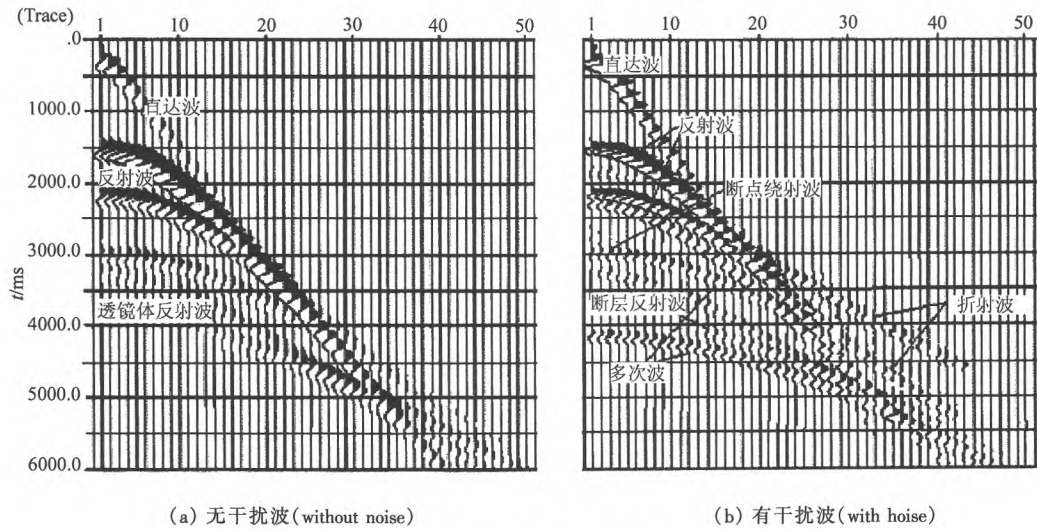


图 6 正演模拟记录

Fig.6 The image of forward modeling

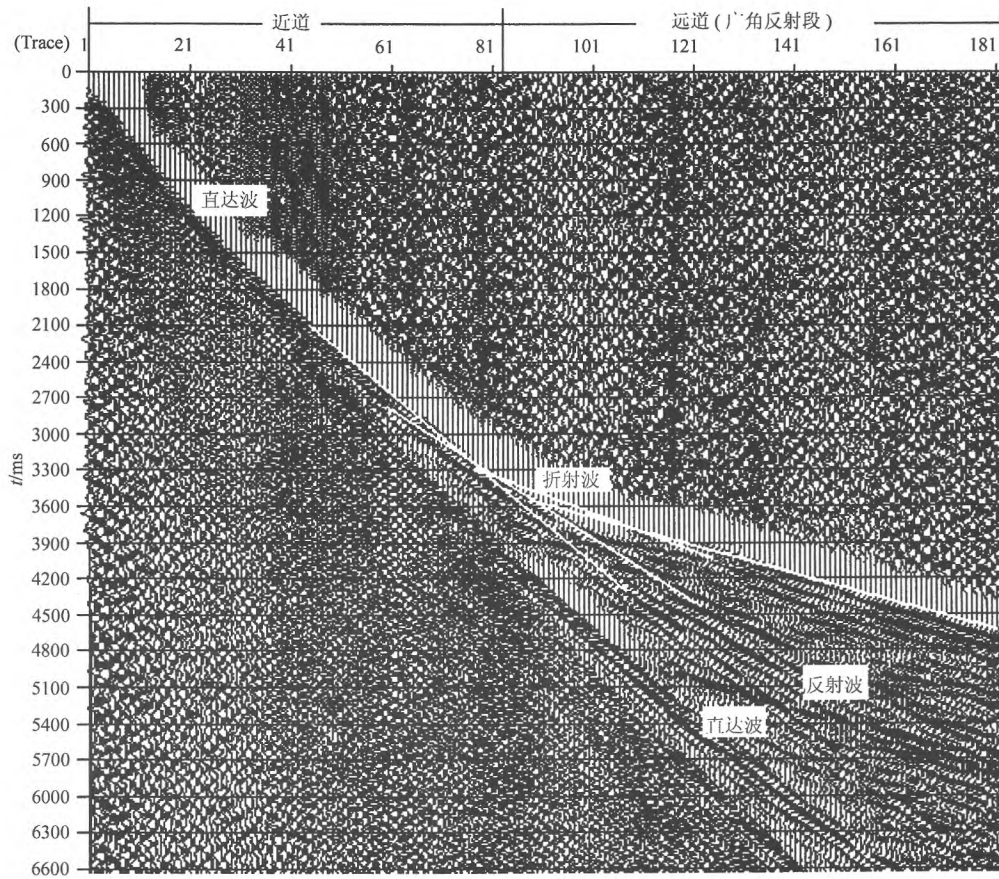


图 7 实际地震单炮记录

Fig.7 The real seismic data of one shot gather

## 2.1 模型正演分析

通过对广角反射的波场特征几个方面的讨论,下面以一个地质模型为例,进行模型正演分析.

图5是一个地质速度模型,图6是该模型的理想正演模拟记录(为了显示图形的方便,取50道接收,道间距为400 m).图6(a)没有考虑各种干扰波.图6(b)是图5所示地质模型的正演模拟记录,考虑了干扰波的影响.

由图6(a)和图6(b)可以看出,在不考虑干扰波时,正演模拟的地震记录质量较好,各层反射波的同相轴都非常清楚,并且很容易识别.但是这与实际情况不相符合.当考虑干扰波的影响时,浅层多次波以及反射—折射—反射波对反射波的影响非常大,从图6(b)可以看出,在超临界角后,反射波同相轴变得不连续,这是因为当超临界角时,反射波相位随入射角增大而发生变化,与此相比,折射波的同相轴却

非常连续,这一显著特点是识别广角反射方式下的反射波与折射波同相轴的一个重要标志.而绕射波的同相轴的曲率比同一反射界面的反射波同相轴大,但到达时间要小.

## 2.2 实际资料的正演模拟分析

广角反射观测方式下影响野外采集地震数据因素很多,研究和分析这些因素有助于野外采集和室内处理数据时扬长避短,提高叠加剖面质量.通过高斯射线正演的方法进行模拟分析,再与实际资料相结合,可以为下一步的资料处理及解释提供理论依据.

在正演模拟分析中,面波、直达波、绕射波、浅层反射—折射—反射波和多次波等干扰波对地震记录的影响非常大,搞清楚上述几种波的运动学和动力学特征,对于野外实际地震资料的波形识别十分必要.

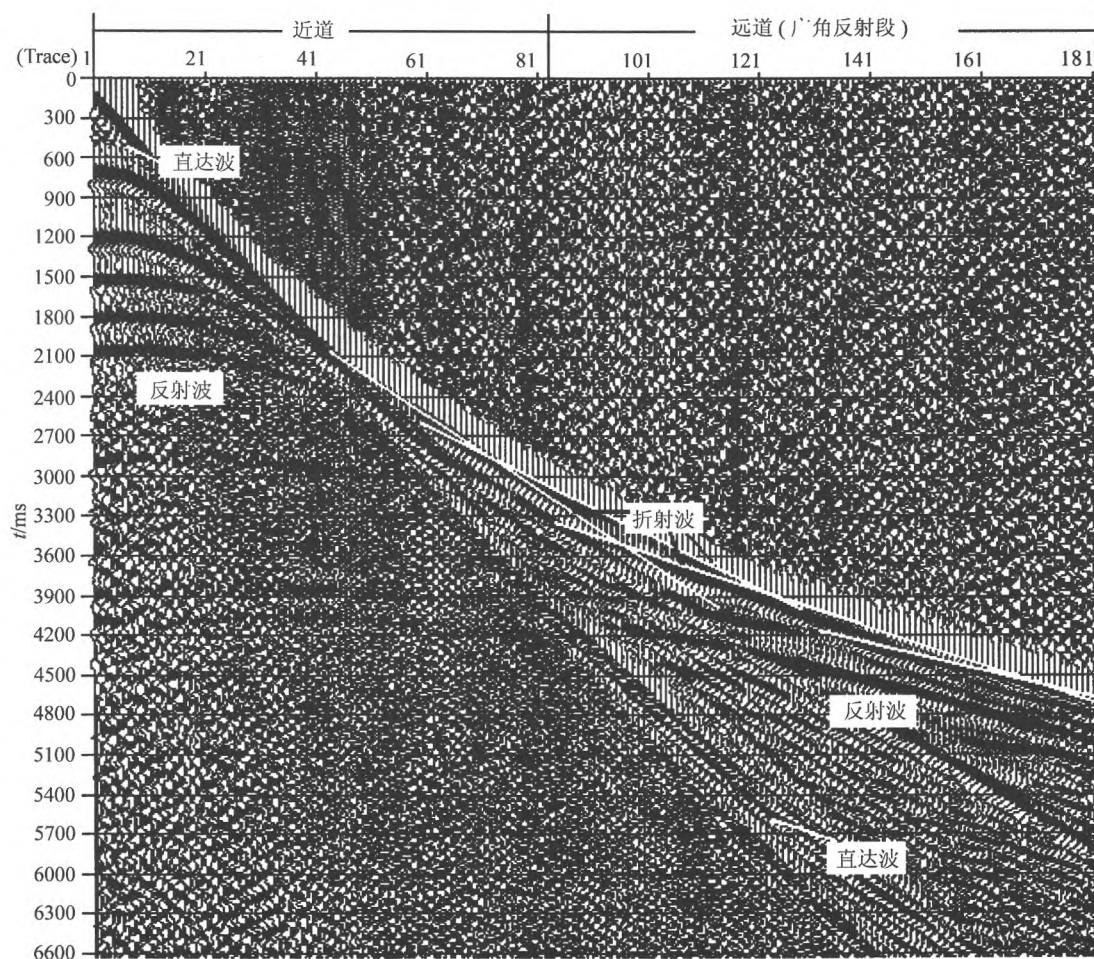


图8 正演模拟地震单炮记录

Fig. 8 The seismic data of one shot gather by forward modeling

在广角反射观测方式下,在超临界角时反射波的能量显著增加,在初至以外的反射波的同相轴变得不连续,而折射波是连续的,这一特点是识别广角反射观测方式下反射波与折射波的重要标志.图7是某地区实际单炮记录,采用480道接收,道间距为50m,排列长度为24km,因而满足广角反射的条件.为了显示图形的方便,对地震数据进行了抽道处理(显示道距为100m),并且切掉了后60道.从图7可以看出,在近道接收段,由于受到各种规则干扰波(井口干扰、直达波、浅层折射波以及面波等)的影响,很难追踪出反射同相轴,这样一来就给地震数据处理带来了困难.但是,在远道接收段,可以看到一些连续的同相轴,信噪比也比较高.因而对于一些复杂地质构造的地区来说,采用广角反射的方式采集数据,可以提高地震数据的质量.但如何识别广角反射方式下所接收到的广角反射波和折射波成为关键性问题,为此提出了通过正演模拟分析以及对广角反射方式下反射波与折射波的波场特征分析进行波形特征识别.

图8是通过正演模拟后的地震记录,在模拟过程中主要考虑了直达波和浅层折射波对广角反射的影响.从图8可以看出,超临界部分的反射与折射波大多数出现在直达波之外,不受面波,声波,浅层多次波(包括海上鸣震)规则干扰波的干扰,亦不受井口及激发散射波的干扰,故信噪比高.同层反射与折射波在临界角处相切,超临界角之后,折射波先达到,随着炮检距的增加,二者时差增大,但折射波的能量比反射波的能量小,且衰减快.因而可以根据以上几个方面的特征进行波形识别,从而为地震数据的处理提供依据.

### 3 结 论

通过上面的理论分析和模型正演实验模拟可以得到以下结论:

(1)广角反射波信息出现在直达波以外,炮检距很大,但信噪比和反射波能量比非广角反射波能量要高,有利于野外地震数据的采集.

(2)联合考虑 AVO 效应,采用广角反射的方法可以得到深层高陡界面的反射信息,同时也能避免各种规则干扰波的影响,对提高地震资料信噪比是一种有效手段.

(3)广角反射同层反射同相轴与折射波在同相轴在临界角处相切,超临界角之后,折射波先达到,反射波后到达,随着炮检距的增加,二者时差增大.

(4)在广角反射方式下,波的传播规律以及动力学、运动学特征与常规观测方式相比发生了变化,从而引起最终叠加剖面质量的改变,剖面质量的好与坏取决于广角反射观测系统中参数的合理选择和合理设计.广角反射可以通过正演模拟分析以及对广角反射方式下反射波与折射波的波场特征分析进行波形特征识别.

### 参 考 文 献 (References):

- [1] 王志,贺振华,等.广角反射研究及高斯射线正演模拟分析[J].成都理工大学学报,2002(1):56~81.
- [2] 石殿祥,王正国.角道集上的振幅补偿[J].石油地球物理勘探,1995,(30):68~72.
- [3] 郑晓东.AVO正演方法及应用[J].石油地球物理勘探,1991,(26):766~776.
- [4] 王志.广角反射研究及高斯射线正演模拟分析[D].成都:成都理工大学,2001,6.
- [5] Geir U, Haugen, Fuhua Yu. Can seismic wide-aperture data image beneath basalt[A]? In: 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Geophys., Expanded Abstracts[C].1998,90~93.
- [6] Fruehn J, et al. Large-aperture seismic: imaging beneath high-velocity strata[J]. World Oil, 1999, 220(1): 109~113.
- [7] Makris J, Rihm R, Egloff F. WARRP (Wide Aperture Reflection and Refraction Profiling): The principle of successful data acquisition where conventional seismic fails[A]. In: annual Meeting Abstracts [C]. Society Of Exploration Geophysicists, 1999, 989~992.
- [8] Richard Wombell, Elwyn Jones, Dave Priestly, Gareth Williams. Long Offset Acquisition and Processing for Sub-Basalt Imaging[A]. In: Annual Meeting Abstracts, Society Of Exploration Geophysicists [C]. 1999.
- [9] Moritz M, Fliedner, Robert S White. Using Wide-angle seismic data for basalt and sub-basalt imaging[A]. In: Annual Meeting Abstracts [C]. society of Exploration Geophysicists, 1999.