

# 浅水环境下多次反射折射波条带范围的研究

刘洪卫<sup>1</sup>,刘怀山<sup>1,2</sup>,邢磊<sup>1,2\*</sup>

(1 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室,青岛 266100;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,青岛 266237)

**摘要:**浅水地震资料中,直达波上方会出现一个明显的“扫帚状”的条带,确定其地震波成份有利于对地震传播规律的认识,可为海上实际作业建立合适的观测系统提供参考依据,同时也可为后期资料处理提供理论依据。本文在陆地多次反射折射波传播路径分析的基础上,通过对简单模型的数值模拟结果分析,确定了浅水环境中位于直达波上方的“扫帚状”条带为海底表层介质产生的多次反射折射波的整体反映。定量分析了多次反射折射波的“扫帚状”条带的范围及其影响因素,并结合实际地震资料进行了验证。

**关键词:**多次反射折射波;数值模拟;初至曲线;条带范围;浅水地震

中图分类号:P736; P631.4<sup>+25</sup>

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.12002

## 1 引言

浅水地震资料中,直达波上方会出现一个明显的“扫帚状”的条带<sup>[1]</sup>,对有效反射波有较强的干扰作用,在地震数据处理中,往往采用切除等手段进行处理,进而影响深层成像结果<sup>[2]</sup>。随着全波场反演时代的到来,对“扫帚状”条带地震波的分析研究尤为重要。

当地层存在 2 个互相平行的反射界面,且反射界面的反射系数足够大,就会产生多次反射折射波现象<sup>[3,4]</sup>。海水环境中,由于海面和海底是 2

个强的反射界面,地震波会在海水中来回震荡<sup>[5]</sup>,产生多次波,地震波在海面上的每一次反射,均可看成在该处有一个新的震源,地震记录中,不仅仅含有多次波,同时也产生了其他与之对应的地震波,多次反射折射波就是最明显的一种。当海水较浅且采用较长排列进行接收时,地震记录中就会接收到明显的多次反射折射波<sup>[6,7]</sup>。多次反射折射波的 2 个重要参数为可视点和条带范围,可视点为海底表层界面产生的折射波与直达波的交点,条带范围为其条带的宽度。研究多次反射折射波在地震记录中出现的机理能够加深对地震传播规律的认识,为实际海上作业建立合适的观测系统提供参考依据,为后续资料处理中如何利用多次反射折射波进行反演提供方便。

目前国内外对多次反射折射波的研究主要集中在陆地复杂表层地区<sup>[8-11]</sup>,其研究主要集中在多次反射折射波的传播路径、能量传播规律以及表层建模的应用上。梁传坤<sup>[8]</sup>从成因、特征和空间变化规律入手,揭示了陆地多次反射折射波空间分布的复杂性及其对深层资料的影

收稿日期:2018-06-18

基金项目:中央高校基础研究基金(201762019);国家自然科学基金(41304096);国家科技重大项目(2016ZX05024-001-002);国家重点研发计划(2017YFC0307401)

作者简介:刘洪卫(1992—),男,在读硕士,主要从事海洋地球物理勘探工程方面的研究工作。E-mail:lhwdyx1992@163.com

\* 通讯作者:邢磊(1984—),男,博士,副教授,主要从事高精度海洋地球物理勘探方面的工作。E-mail:xingleiouc@ouc.edu.cn

响,并给出了几种消除这种干扰的方法;杨恺等<sup>[9]</sup>通过对多次反射折射波的运动学和动力学特征分析,在多次反射折射波传播路径分析的基础上,概括出两种可能的传播路径;郭朝斌<sup>[10]</sup>应用经典的首波射线理论和波动理论,推导出多次反射折射波的运动学公式和动力学特性公式,并通过实例表明压制多次反射折射波对复杂探区的地震成像有较强的现实意义;郎玉泉<sup>[11]</sup>利用初至波进行层析反演得到了复杂地形下较准确的近地表速度;但是对于多次反射折射波的传播机理研究方面,尤其是对多次反射折射波条带范围的影响因素方面,未能在理论上给予研究与探索。

笔者首先通过分析双层层状介质的数值模拟结果,确定了位于直达波上方的地震波的成分为多次反射折射波,然后通过3层介质中来自不同反射层的多次反射折射波的干涉现象说明浅水环境中位于直达波上方的“扫帚状”条带为海底表层介质产生的多次反射折射波的整体反映。最后定量分析了多次反射折射波的“扫帚状”条带的可视点及其条带范围的影响因素,并结合实际地震资料进行了验证。

## 2 多次反射折射波确定

地震记录的数值模拟是研究地震波传播规律的重要手段,以下通过分析模拟地震记录确定浅水环境中位于直达波上方的“扫帚状”条带为海底表层介质产生的多次反射折射波的整体反映。为了更清楚地研究地震波传播规律,且满足海水中横波速度为零,本文采用声波方程有限差分方法对浅水环境下的水平层状地质模型进行离散求解,进而得到地震记录。另外,为了减少模型边界对计算区域的影响,结合扩大计算区域与完全匹配层PML吸收边界两种技术手段对模型边界进行处理。

### 2.1 双层介质中的多次反射折射波

为了分辨“扫帚状”条带的地震波的类型,首先对双层水平层状介质进行二维地震数值模拟,具体模型参数:第1层水深100 m,速度为1 500 m/s;第2层厚度300 m,速度2 000 m/s。震源和

接收均放置在海面,震源采用雷克子波,单边激发,道间距5 m,最大偏移距8 000 m。

图1(a)为模拟的地震记录,研究区域位于直达波的上方,故将直达波之下的部分切除,可以看出,直达波的上方“扫帚状”条带的地震波区域为一系列与折射波平行的地震波,结合多次波和折射波传播规律,推测其为含有多次反射部分折射的多次反射折射波,双层水平界面 $n$ 次反射折射波的时距曲线表达式<sup>[9]</sup>为:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{(n+1) * 2 h_1 \cos \alpha_1}{v_1},$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中: $t$ 为时间。

$x$ 为偏移距;

$v_1$ 、 $v_2$ 分别为地震波在海水和地层中的速度;

$h_1$ 为海水深度;

$\alpha_1$ 为临界角,  $\sin \alpha_1 = v_1 / v_2$ ;

由于 $n$ 次反射折射波与 $n$ 次反射波相切,且相切点为其开始出现点,由空间几何关系, $n$ 次反射折射波开始出现位置为地震波以临界角入射在水中 $n$ 次震荡后的出射位置,容易得出:

$$x = (n+1) * 2 h_1 \tan \alpha_1,$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

图1(b)为模拟地震记录和时距曲线同区域对比图。可以看出,时距曲线表达式和地震波同相轴能够完全吻合。即,双层水平介质中位于直达波上方的“扫帚状”条带为多次反射折射波。

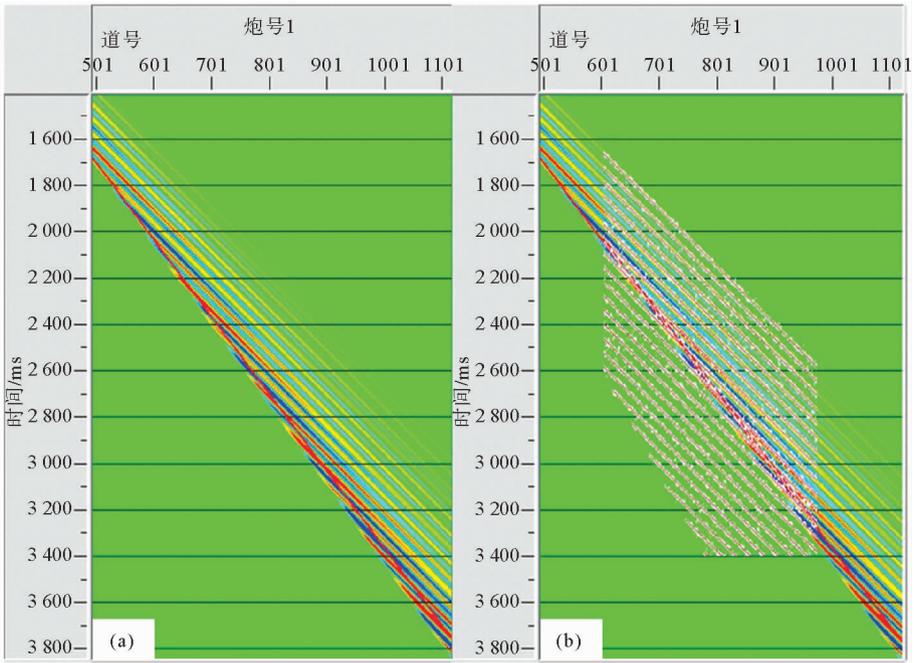
对于固定一道,相邻多次反射折射波的时间间隔为:

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} = \frac{2 h_1 \cos \alpha_1}{v_1} \quad (3)$$

即,水平海底界面产生的多次反射折射波为一系列平行的直线,相邻多次反射折射波的时间间隔为一个定值,与采样点位置无关,只与海水厚度、速度、界面上下介质的速度比有关系。

### 2.2 三层介质中的多次反射折射波

对于双层水平介质,直达波上方的地震波为相互平行的多次反射折射波,这与实际“扫帚状”条带相差甚远。下面通过3层水平层状介质正演模拟说明其为来自不同层位的多次反射折射波的相互干涉的结果。



(a)原始地震记录;(b)同区域对比

图 1 双层界面地震记录

Fig. 1 Seismogram of double-layer interface

3 层水平层状介质进行数据模拟,具体参数:第 1 层水深 100 m,速度为 1 500 m/s;第 2 层厚度 100 m,速度为 2 000 m/s;第 3 层厚度 200 m/s,速度为 3 000 m/s。观测系统参数与双层水平介质保持一致。

图 2(a)为模拟的地震记录,可以看出对于 3 层水平层状介质来说,地震记录中已经不能看出多次反射折射波的同相轴,在直达波的上方出现了一个“扫帚状”的地震波条带。在时间上出现了严重的干涉现象,不能很好的分辨各种波的成分,故将其变换到  $f-k$  域(图 2(b)),可以看出,其能量分为明显的 3 部分。分别对 3 个能量团进行滤波(图 3),可以看出来自不同层位的多次反射折射波已经分开。

对于 3 层介质,速度  $v_1, v_2, v_3$ , 厚度  $h_1, h_2, h_3$ , 其路径情况除了上层界面的多次反射折射波外,还有下层界面产生的多次反射折射波,地震波在每个层间均可以产生多次反射,对于第 1 层  $n$  次反射,第 2 层  $k$  次反射来说,多次反射折射波的时距曲线表达式<sup>[9]</sup>:

$$t = \frac{x}{v_3} + \frac{(k+1) * 2 h_2 \cos \alpha_{22}}{v_2} +$$

$$\frac{(n+1) * 2 h_1 \cos \alpha_{21}}{v_1},$$

$$n=1, 2, 3, \dots; k=1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中: $t$  为时间。

$x$  为偏移距;

$\alpha_{21}, \alpha_{22}$  分为 2 个分界面上的临界角,  $\sin \alpha_{21} = v_1/v_2, \sin \alpha_{22} = v_1/v_3$ ;

由于每一条多次反射折射波均与该次反射波相切,且相切点为其开始出现点,为地震波以临界角入射,多次震荡后的出射位置,容易得出其开始出现位置为:

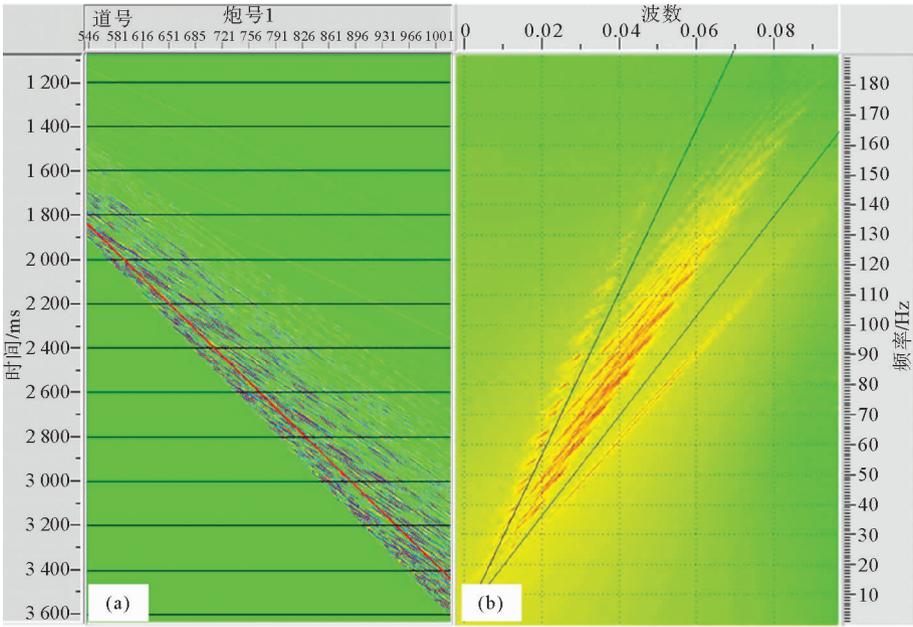
$$x = (n+1) * 2 h_1 \tan \alpha_{21} + (k+1) * 2 h_2 \tan \alpha_{22} \quad (5)$$

图 4 为深层多次反射折射波同相轴与时距曲线同区域对比图。可以看出,深层界面的多次反射折射波的时距曲线与地震记录的同相轴能够很好的吻合。

固定同一道,相邻多次反射折射波的时间间隔为:

$$\Delta t_1 = t_{n,k} - t_{n-1,k} = \frac{2 h_1 \cos \alpha_{21}}{v_1} \quad (6)$$

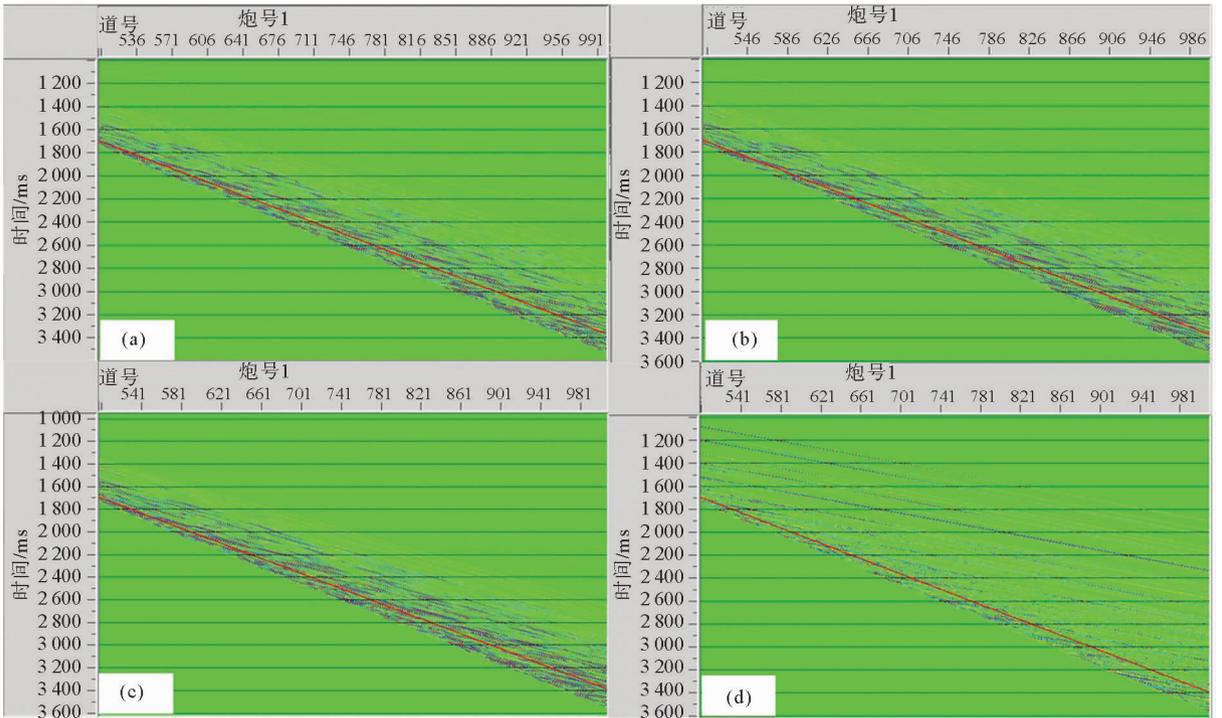
$$\Delta t_2 = t_{n,k} - t_{n,k-1} = \frac{2 h_2 \cos \alpha_{22}}{v_2} \quad (7)$$



(a)原始地震记录;(b)  $f-k$  谱

图 2 三层界面模拟地震记录及  $f-k$  谱

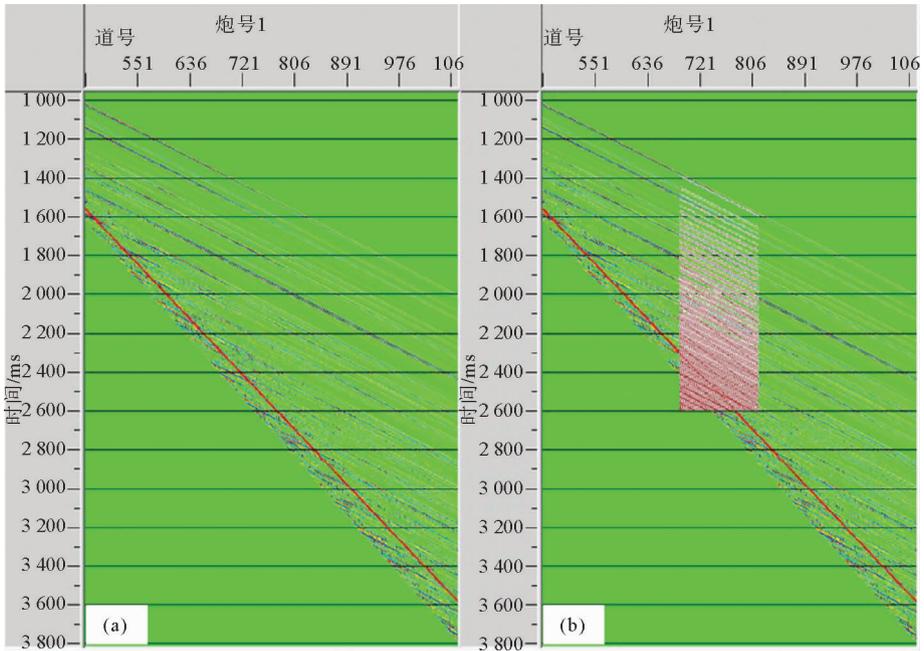
Fig. 2 Simulated seismic records and  $f-k$  spectrum for a 3 layer interface model



(a)原始记录;(b)去除剩余直达波;(c)去除深层多次反射折射波;(d)去除浅层多次反射折射波

图 3 滤波前后对比

Fig. 3 Comparison before and after filtering



(a) 深层界面多次反射折射波; (b) 时距曲线和同相轴对比

图4 深层多次反射折射波同相轴与时距曲线同区域对比

Fig. 4 Comparison of wave event-phase and time interval curves of deep multi-reflected refraction wave

可以看出, 深层界面产生的多次反射折射波之间的时间间隔, 不再是一个定值, 其不仅和厚度、速度、界面上下介质的速度比有关系, 还和层间振动的次数有关。

由此, 可以推断直达波上方的“扫帚状”条带为所有多次反射折射波互相叠加的结果, 是表层介质的多次反射折射波的整体反映, 当实际地层为连续介质时, 可看作每层厚度均很薄的多层介质, 故呈现出“扫帚状”的地震波条带。

### 3 多次反射折射波的条带范围

由多次反射折射波的时距曲线可以看出, 发生在同一界面的多次反射折射波为互相平行的直线, 最先到达的是该界面上产生的一次反射折射波, 也就是折射波。在时间上, 若下层速度大于上层速度, 那么, 当下层介质产生折射波出现后, 会在某一时刻超过上层产生的折射波, 故推断多次反射折射波开始出现位置, 为各层产生的折射波最快到达的首波处。

各层折射波时距曲线表达式:

$$t = \frac{x}{v_n} + \frac{2 h_{n-1} \cos \alpha_{n-1,n-1}}{v_{n-1}} + \dots + \frac{2 h_2 \cos \alpha_{n-1,2}}{v_2} + \frac{2 h_1 \cos \alpha_{n-1,1}}{v_1} \quad (8)$$

将海底表层介质看作由多个薄互层组成, 各薄互层速度由浅到深线性增大。图5是多次反射折射波的可视范围图, 红色虚线为直达波, 蓝色曲线为多次反射折射波的初至连线, 可以看出, 位于两线间的多次反射折射波的条带范围为一个“扫帚状”的条带。

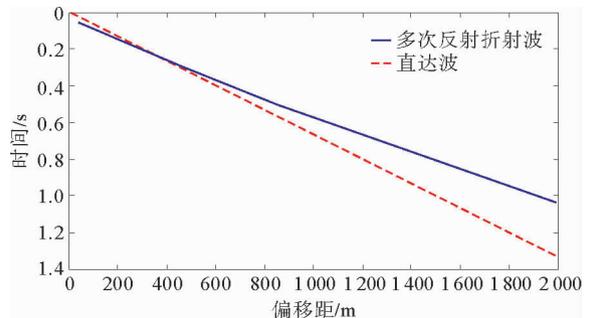


图5 多次反射折射波条带范围图

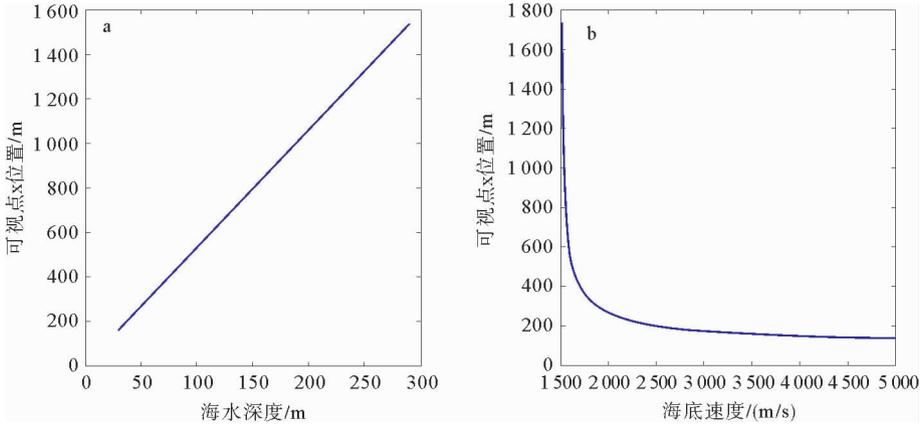
Fig. 5 Band range of multi-reflected refraction

可以看出,由于下层海底介质速度大于上层海水速度,折射波与直达波交于某点,该点为折射波在单炮记录中的可视点。可视点为海底表层界面产生的折射波与直达波的交点,下面分析可视点位置的影响因素。

$$\text{令 } \frac{x}{v_1} = \frac{x}{v_2} + \frac{2h \cos i}{v_1}$$

解得  $x_1 = \frac{2h v_2 \cos i}{v_2 - v_1}$ , 其中  $i$  为临界角。

可以看出,可视点位置与海水深度与海底表层介质的速度有关。随着海水深度的增大,可视点位置线性增大(图 6a);随着海底表层介质速度的增大,可视点位置逐渐减小,且变换越来越缓(图 6b)。



(a)随海水深度变化;(b)随海底介质速度变化

图 6 可视点位置变化曲线图

Fig. 6 Change of visible point position

多次反射折射波的另一重要参数是其条带的宽度,这里称为条带范围。以下分析其影响因素。将海底表层介质看作由多个薄互层组成,各薄互层介质速度由浅到深线性增大,控制各变化量绘出多次反射折射波初至曲线。图 7 是多次反射折射波初至曲线随表层厚度变化的曲线图,可以看出,随着表层厚度的增大,多次反射折射波的初至时间在近偏移距处变化不大,在远偏移距处,初至时间变长。图 8 为多次反射折射波初至曲线随薄

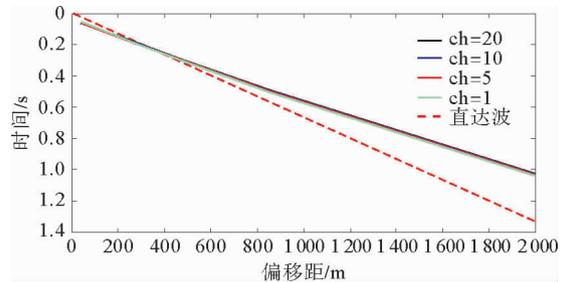


图 8 多次反射折射波初至随薄互层厚度的变化

Fig. 8 Change in first-arrived multi-reflected refraction wave with the thickness of calculating thin bed

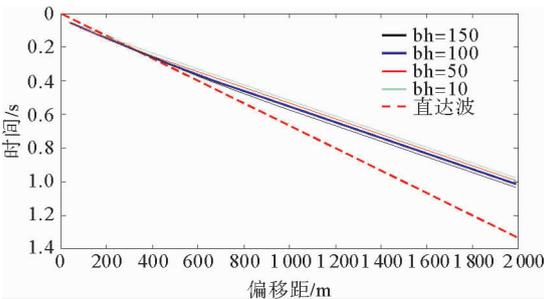


图 7 多次反射折射波初至随表层厚度的变化

Fig. 7 Change in first-arrived of multiple reflected refraction with surface thickness

互层厚度变化的曲线图,可以看出,薄互层的厚度对多次反射折射波初至时间影响较小,在近偏移距处,随着薄互层厚度的增大,初至时间变大,而在远偏移距处,随着薄互层厚度的增大,初至时间缩小。图 9 为多次反射折射波在不同速度变化量下的初至曲线图,可以看出,近偏移距处,表层速度的变化对多次反射折射波的影响不大,偏移距达到一定距离,多次反射折射波初至曲线的斜率随着速度的增大而增大。

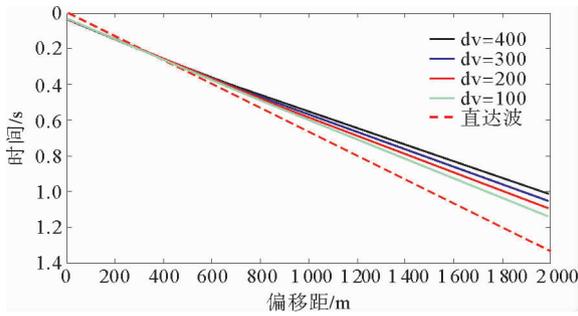


图9 多次反射折射波初至随速度变化量的影响  
Fig. 9 Change in first-arrived of multi-reflected refraction with velocity variation

### 4 实际地震资料分析

水下通讯技术是当前海洋探测甚至是海洋军事中的关键技术,目前水声通讯已发展的较为成熟,但主要是针对深水环境,且传播距离有限。超过 10 km 信号失真严重,在浅水环境中,直达波不明显且传播速度较慢,针对上述情况,为探索浅水环境中远距离地声通讯的可行性。2016年9月在渤海黄河口区域采用远距离观测方式进行了 OBC、OBS 的地震数据采集工作。图10为该调

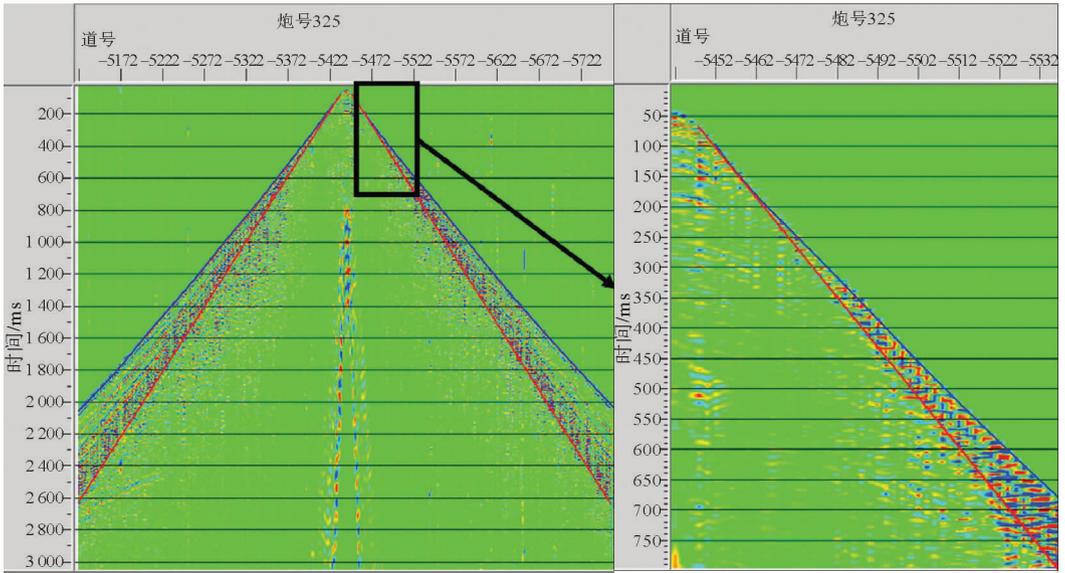


图10 渤海地区 OBC 实际地震记录  
Fig. 10 Actual seismic record of the OBC in the Bohai Sea

查区一条 OBC 的实际地震记录,该地震记录共 320 道,25 m 道间距,中间激发,最大偏移距 4 000 m。图中红线直线为直达波,蓝色曲线为多次反射折射波的初至曲线。可以看出,其形状和上述理论得出的相一致。

### 5 结论

- (1)浅水环境中,位于直达波上方的“扫帚状”条带是海底表层所有多次反射折射波互相叠加的结果,是表层介质的多次反射折射波的整体反映。
- (2)海底表层不同薄层产生的多次反射折射波会发生干涉现象,通过其他域(如  $f-k$  域)可将

- 其分离。
- (3)可视点位置与海水深度与海底表层的速度有关:随着海水深度的增大,可视点位置线性增大;随着海底表层速度的增大,可视点位置逐渐减小,且变换越来越缓。
- (4)多次反射折射波初至曲线与表层厚度、薄互层厚度、速度变化量等因素有关:随着表层厚度的增大,多次反射折射波的初至在近偏移距处变化不大,在远偏移距处,初至时间变长;薄互层厚度对多次反射折射波初至时间影响较小,在近偏移距处,随着薄互层厚度的增大,初至时间增大,而在远偏移距处,随着薄互层厚度的增大,初至时间缩小;近偏移距处,表层速度的变化对多次反射

折射波的影响不大,偏移距达到一定距离,多次反射折射波初至曲线的斜率随着速度的增大而增大。

#### 参考文献:

- [1] Silvertown A, Warner M, Morgan J, et al. Offset-variable density improves acoustic full-waveform inversion: a shallow marine case study[J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64(5): 1201-1214.
- [2] 符溪,文鹏飞,陈洁,等. 北黄海盆地反射地震勘探中折射波资料的应用[J]. *石油物探*, 2004, 43(4): 369-372.
- [3] 郭朝斌,李振春,岳玉波,等. 陆地多次反射折射波定量分析[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2011, 35(1): 45-51.
- [4] 曾爱平,孙立新,杜贤军. 地震勘探中多次反射折射波的影响分析及应对措施——以滕县煤田某煤矿地震勘探为例[J]. *山东国土资源*, 2017, 33(1): 71-75.
- [5] 郑红波. OBC资料中的虚反射和鸣震压制方法[C]//中国地球物理学会年会. 2011: 984-985.
- [6] 王衍棠,罗文造,舒虎. 北黄海盆地地震主要采集参数模拟[J]. *物探与化探*, 2011, 35(1): 70-74.
- [7] White R S. Wide-angle refraction and reflection [M]. Elsevier Inc, 2012: 90-118.
- [8] 梁传坤. 多次反射折射波的分析与消除[J]. *石油物探*, 1993, 32(3): 112-118.
- [9] 杨恺,郭朝斌. 多次反射折射波的传播路径研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(3): 379-384.
- [10] 郭朝斌. 复杂表层多次反射折射波传播特性研究[D]. 青岛:中国石油大学, 2011.
- [11] 郎玉泉. 初至波层析反演表层速度的应用实践[J]. *中国煤炭地质*, 2018(3): 76-81.

## STUDY ON THE RANGE OF MULTIPLE REFLECTED REFRACTION WAVE STRIPS IN SHALLOW WATER ENVIRONMENT

LIU Hongwei<sup>1</sup>, LIU Huaishan<sup>1,2</sup>, XING Lei<sup>1,2\*</sup>

(1 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Laboratory of Marine Mineral Resources Evaluation and Detection Technology, National Laboratory of Marine Science and Technology of Qingdao, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** On shallow-water seismic profiles, there is always a “broom-like” band above the direct wave. The determination of wave composition of the band is helpful to the understanding of seismic wave propagation, which will provide a reference basis for establishing an appropriate observation system for offshore operation and data processing. Based on the analysis of wave propagation path of multiple reflection of refraction waves on land, by analysis of the numerical simulation results of a simple model, it is concluded that the “broom-like” band above the direct wave in the shallow water environment is the overall reflection of the refracted wave generated by some kinds of subsurface medium. In addition, quantitative analysis of the scope of the “broom-like” band of the multi-reflected refraction waves and studies of their influencing factors are carried out and verified with actual seismic data.

**Key words:** multi-reflected refraction waves; numerical simulation; first-arrival curve; band range; shallow-water seismic