

海洋地震径向波的模拟研究

翟继锋, 韦成龙, 曾宪军

(广州海洋地质调查局技术方法所, 广东 510760)

摘要:海底的分层结构中,一般认为存在着一种高速薄层,在地震勘探中形成径向波,并对深层反射信号形成屏蔽,使深层地震成像效果不佳;研究径向波,对提高高速薄层的认知,对研究深层地震勘探的方法,都有一定的指导意义,因此研究径向波的形成机制有着前瞻性认识和重要的应用价值。文章介绍了用计算模拟的理论分析方法研究径向波的机理及其研究结果。

关键词:径向波;高速薄层;模拟

中图分类号:P738 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-009X(2013)03-0001-04

Simulation study on radial wave in oceanic earthquake

Zhai Jifeng, Wei Chenglong, Zeng Xianjun

(Techniques Institute of Guangzhou Marine Geological Survey, Guangdong 510760)

Abstract: In the layered architecture of the stratigraphy under the sea, there maybe exists a high-velocity thin layer that will form radial wave during seismic exploration and shape a shield to deep reflection signal. So the seismic imaging of the deep layer is ineffective. There is some guidance in studying radial wave, which will improve the perception of high-velocity thin-layer and help the research for deep seismic exploration. It is of the prospective significance and potential application in researching radial wave. This paper focuses on studying radial wave based the method of computing simulation and introduces its research results.

Key words: radial wave; high-velocity thin layer; simulation

0 引言

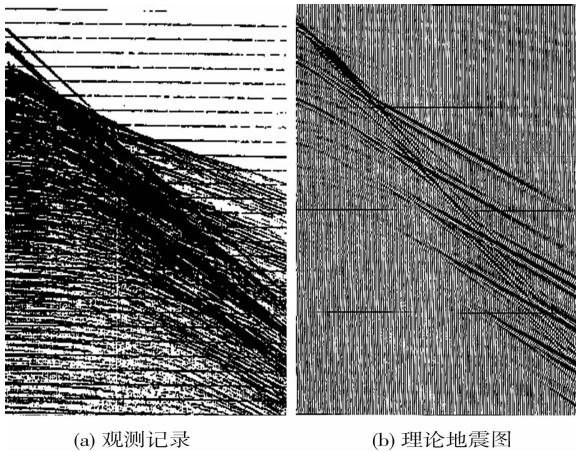
在海洋地震勘探过程中观察地震反射单炮记录时,有时会发现剖面上存在着一个特征类似于折射波的反射同相轴,但其出现的时间要比实际折射波早,如图1(a)所示。根据同相轴形状估算,其传播速度在5 800 m/s左右,远远高于正常的纵波反射,目前,国际上将其称为径向波。

了解径向波的形成机理,以及与地下介质、介质结构有何关联,是急待解决的问题,本文介绍了用计算模拟的理论分析方法研究径向波的机理及其研究成果。

1 海洋地震径向波的概念

国内外相关资料表明,陆地上发育有碳酸盐岩、玄武岩或者存在剥蚀严重的反射层,在地震采集集中会出现与图1(a)类似的波型;海洋勘探方面,WesternGeco公司1999年在美国墨西哥湾某个区块地震采集中,观测到单炮记录上出现与折射波类似的波型,因深层能量屏蔽较严重,由此预测在地层中存在一个高速薄层。为了钻井目的,WesternGeco公司急需弄清高速薄层顶部(较浅处)的确切位置。经过姚陈等人的研究与计算模拟^[1-3],进一步提供了该区块存在高速薄层的理论

依据,见图 1(b);另外在北大西洋的法罗群岛东部(属丹麦)和设得兰群岛西部(英国苏格兰东北部一郡),因存在褶皱的玄武岩层对地震波表现出低通的特征,导致玄武岩以下地层的地震成像效果不佳,在单炮记录上也存在类似折射波的波形,目前国际上将其称为径向波(Radial Wave)。在一些地区,地震反射记录剖面上会出现具有线性时距特征的径向波。在相当大范围的炮检距内^[4],在时间上初至径向波先于水底一次反射波到达,其振幅与水底反射波振幅往往具有同等量级。与海底多次波相似,径向波也具有周期性,它们常常是记录剖面上的突出点。径向波很少被其他波干扰,因此在波至辨识上具有优势。



(a) 观测记录

(b) 理论地震图

图 1 墨西哥湾某勘探区块观测记录与理论地震图(加上高速薄层)

直觉上,径向波容易被解释成首波。当速度随着深度增加而增加时,地震波向下以超临界角入射高速层,则会沿着高速层顶界面滑行,最后向上返回成为首波。但理论上首波振幅整体相比海底反射波振幅要弱很多,并且随着炮检距的增大而急剧衰减^[5],这与剖面上径向波的振幅强度及其随着炮检距的变化而变化特征明显存在着不同。即使是这样,但因为径向波的性质和产生机制不明,所以至今没有在资料解释中加以应用。

2 径向波的计算方法

根据实际数据的速度谱分析而建立的地震地质模型,使用反射率法进行地震波场模拟,计算典型位置单炮地震波场图,以了解各类型波的发育和分布情况。

反射率法基于 1979 年 Kennet 提出的传播矩阵方法^[6-8],是地震波场模拟的主要方法之一。其原理为在水平层状介质平面波假设基础上,通过

传播矩阵求出层状介质平面波传播解,再通过对所有方向平面波的积分得到从震源激发点到检波器接收点地震波曲面波前。利用反射率法合成的理论地震图包括地震波的全部运动学和动力学特征。

中国地震局地质研究所姚陈博士等人发展了各向同性介质的反射率法,进一步形成有效的各向异性计算方法。早期曾用于模拟和解释天然地震的横波分裂,后进一步扩展到陆地反射三分量接收和海底反射 4 分量接收的理论地震图计算。本课题利用反射率法曲面波前的理论,对选定的地震地质模型进行地震传播特性研究。

海底介质分层结构的一个重要特点是各介质层速度的剧烈变化,使得介质层间界面上的波类转换问题较突出。水层中地震波的传播可简化为纵波标量场问题,水层下固体层中地震波的传播则是纵、横波的矢量场,海底液—固层界面是固体层内矢量波场和水层内标量场的转换界面。基于矢量波场理论研究海底地震波的反射,而矢量波场同样可以用于海水中反射波的记录。

依据姚陈博士等人的研究,对于典型的水层下硬海底条件下的纵波速度以及按一般纵、横波的速度关系补充的横波速度,由理论地震剖面图能够得到以下结论:

(1) 当海水下地层中存在着高速薄层时,会在水压记录上显示出较强径向波,该径向波的到与其炮检距存在着线性关系,且其振幅整体上大大强于首波的振幅并且与实际观测到得振幅大小接近。这说明,基于矢量波场曲面波前传播可以产生径向波,但是该曲面波前产生的径向波用高频渐近射线法却无法给出相同的计算结果。

(2) 若高速层纵波速度不变而将横波速度设为零,则此时径向波将消失,这就说明在高速层中传播的波是横波;若连续的增加海底高速层的厚度,则径向波的振幅会相应降低以至于消失,这说明径向波的在剖面上的延伸范围及振幅强度与高速薄层的厚度有相对应的关系。径向波的这些特征用首波理论是无法解释的,按照一般界面的折射波解释也存在着不足,有必要加强对径向波形成机制的研究。

(3) 众所周知水层中横波速度为零,固—液层界面是横波传播的断面。水层中的纵波在向下透射时,在固—液层界面上激发透射转换横波,且横波能量随着纵波入射角的增大而增强。当此下

行横波以超临界角入射到高速薄层时,会变成高速薄层中的非均匀横波并沿径向传播,并与上行的横波耦合,最后向上透射转换回水中的纵波而被记录。径向波的路径基本上是水层下的横波路径。

(4) 对于海底地层中传播的非均匀地震波,其振幅随着离开层界面的距离的增大而减弱,这势必会使径向的波强度依赖于高速层的厚度。海底下的地层中存在高速薄层,使得大炮检距范围内能观测到径向波。

(5) 海底的固—液层界面可以视为海底的横波之源。软海底条件下纵波透射转换成横波的能力较弱,硬海底条件下的转换能力则较强,这势必会影响到高速层内非均匀横波的延伸范围及强弱。

以上结论说明,地震记录剖面上径向波的发生与海底的速度结构有关系。如海底碳酸盐层与沙岩层会形成较大的速度差异,海底溢出的玄武岩流也会形成高速层等。高速层会对反射波形成屏蔽,因此给获取更深层的反射波信号造成障碍。

一般来说,密度较大的高速层常常是油气圈闭的重要条件之一^[9-11]。因此在我们对径向波形成机理讨论的基础上,进一步定量研究影响径向波特征的因素,将能用于获取关于海底高速薄层的相关信息,这必定将对海底油气的探测有重要的意义和价值。

3 径向波的计算过程

假设研究区在中生界之上的介质,存在一个高速薄层。利用反射率法进行地震波场模拟,以验证是否存在该屏蔽层。从高速薄层的速度、厚度、所处深度及软、硬海底条件等方面了解影响径向波的特征的因素。

选取弱各向异性半空间上的 7 层介质模型,计算海水中电缆检波器的记录剖面,其包括 350~500 m 海水层、820 m 的 E-N 沉积层、666 m 的 K 沉积层、2 400 m 的 J 沉积层、不同厚度的高速薄层和下伏 T、P 两个地层。计算参数见表 1。

海水层中震源和地震道检波器的深度均设为 10 m,取 50 m 的道间距,用反射率法计算 25 Hz 主频 120 道记录构成的反射剖面。海底反射波的类型丰富,因此结合 X-T 和 X-A 数值技术(姚陈等,1999)提供的计算结果,讨论各类反射波的时距和振幅,从海水层开始,用逐步加层法及反射剖面相减法,进一步搞清相干波场中各反射波的特征。

表 1 计算选择参数

分层模型	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	厚度 (m)
海水层	1 500	0	1.03	350
E-N	2 500	1 350	2.20	820
高速薄层	5 600/5 400...	3 200/3 000...	2.60	0/40/80...
K	3 500	1 750	2.32	666
J	4 400	2 200	2.46	2 400
T	4 500	2 250	2.58	800
P	5 500	2 750	2.75	200

通过模拟计算,能得到以下的结果:

(1) 液—固界面的强烈透射转换以及沉积层底界面的强反射,致使 PSSP 波出现较大的振幅,这常常是径向波发生的一个相伴条件。但在高速层缺失的条件下,径向波并不出现,仅当高速层存在时,径向波才能先于所有反射波突显出来。若将高速层的纵波速度从 5.8 km/s 降到 3.8 km/s,同时将横波速度等比例减小,则理论剖面上径向波出现的偏移距将相应的增加,这表明了高速层的整体速度将影响径向波的出现范围。

(2) 为了了解高速层的厚度对径向波的影响,从 0~240 m 的变化范围内,我们以 40 m 为步长,计算了不同高速层厚度下的反射剖面,观察到径向波的振幅随着层厚度的增加呈单调减小趋势。当海底存在 40 m 厚度的高速层时,在大范围炮检距内都出现了强振幅的径向波;而当高速层的厚度在 200 m 以上时,径向波的振幅已经较弱,以至于无法辨识出。

(3) 地震反射剖面的整体特征不但依赖海底纵波的速度结构,而且与海底横波的速度结构也有关系,当介质横波速度从小到大变化时,理论反射剖面显示出径向波整体振幅由弱变强。固体介质层的横波速度,影响了进入高速层的转换横波强度,也影响了径向波的振幅大小。尽管海底存在高速薄层,软海底时,径向波也不产生;硬海底时,则易产生大振幅的径向波。从包含多次波的理论记录剖面可以观察到,径向波伴随着多次波,同时存在周期性,在大炮检距时径向波同样会出现强振幅,且其振幅随着炮检距的增大而缓慢减弱。

从以上 3 点可以看出,径向波的发生常常与水层下较大的速度间断有关,这也是水层内出现强混响波的原因。同时可以看出,高速薄层不但是其下介质层反射的屏蔽层,而且其顶界面本身

也必须是强反射界面,这也说明,需要联系记录剖面的整体特征,以进一步展开高速薄层定量解释的研究。

4 结束语

通过对研究区地震资料的分析 and 模拟正演,可获得如下认识:

(1) 因高速薄层的存在,在地震单炮记录上出现径向波。震源激发的 P 波在到达海底液—固体分界面时,转换为均匀 S 波;再往下传播遇到高速薄层,转换为非均匀 S 波在高速薄层中行进;在向上层传播时转换为均匀 S 波,最后在海水转换为 P 波。径向波的传播原理如图 2 所示。

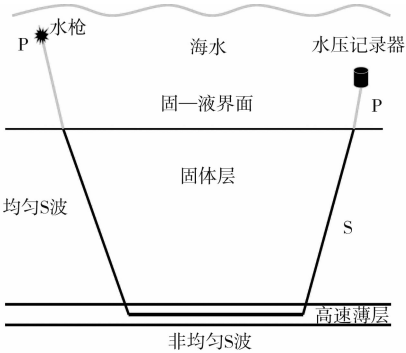


图 2 径向波传播机理示意图

(2) 径向波具有直线时距,类似首波和面波特征。径向波同相轴和 t_0 轴交点与薄层深度有关系。径向波有其出现的最小炮检距,能提供关于高速层深度的约束条件。径向波出现的最小炮检距(临界距离)直接依赖高速层内的横波速度,与径向波在高速层内的水平传播速度无关。原则上,径向波的时距依赖海水层和高速层之间的介质特征,但对于临界反射,不管过渡层速度如何复杂和多样化,其中的横波传播满足斯奈尔定律,高速层内的横波速度决定了海水层内的 P 波临界角、海水层以下和高速层以上的过渡层内的横波路径,临界角处反射波的到达时刻和偏移距这两者限制反射时距,这使得高速层的深度解具有唯一性。此方法的重要优势是能避免过渡层横波路径的复杂分析,大大简化了通过径向波初至解释高速层深度的过程。

(3) 从径向波同相轴与海底反射同相轴交点(时间和炮检距)分析高速薄层深度及层上介质速度。但径向波和海底反射的交点并不能提供有关高速薄层深度的进一步信息。

(4) 径向波振幅与薄层厚度。固液界面是水下横波源,其对 PSSP 波和径向波是共同的,利用这两个波的相对振幅关系可以进一步确定高速层的厚度。

(5) 径向波存在的速度条件:高速层内横波速度必须大于海水层波速。

(6) 为找到径向波初至,需要先扣除海水层反射波,可发展有效的扣除技术。因径向波大大强于其它反射,故对海水底反射扣除对技术要求并不很高。

(7) 地震波主频对径向波振幅有影响。

(8) 高速薄层的横波速度必须设置比较准确,在模拟计算时才会出现径向波。

本课题获得姚晨辅导,蔡明刚博士等人的理论指导和支持,鸣谢!

参考文献:

[1] 姚陈,王迅,陈祥国. 水压记录剖面上径向波性质和传播机理[D]. 中国地球物理学会第十六届年会论文集,2000.

[2] 王迅,姚陈. 对海底径向波介质条件的理论地震图研究[D]. 中国地球物理学会第十六届年会论文集,2000.

[3] 易敬松,伍忠良. 双船地震方法技术难点简析[D]. 中国地球物理学会第二十届年会论文集,2005.

[4] 钱光萍,康家光,王紫娟. 基于模型的地震采集参数分析及应用研究[J]. 物探化探计算技术,2001,23(2):109-114.

[5] 史乃祥,王德利. 深水地震波传播特性研究[J]. 吉林地质,2005,24(2):82-86.

[6] 赵政璋,赵贤正. 国外海洋深水油气勘探发展趋势及启示[J]. 中国石油勘探,2005(6):71-77.

[7] 王立明,罗文造,陆敬安,等. 海洋地震勘探中的震源布局分析研究[J]. 海洋技术,2009,28(4):89-93.

[8] 熊晓军,贺振华,文晓涛,等. 基于波动方程的地震观测系统设计方法研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(1):132-136.

[9] 王立明. 范式气体下气枪激子波信号模拟研究[D]. 陕西:长安大学,2010.

[10] 罗文造,韦成龙,王立明,等. 海上地震勘探主要采集参数的选取与验证[J]. 热带海洋学报,2009,28(4):93-101.

[11] 罗桂纯,王宝善,葛洪魁,等. 气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):400-407.