

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.03.019

大陆架科学钻探南黄海 CSDP-2 井的垂直地震剖面资料采集技术

吴志强^{1,2}, 郭兴伟^{1,2}, 祁江豪^{1,2}, 丘学林³, 张雪飞⁴, 谭云龙⁵, 黄聿晓^{1,2,6},
李文强^{1,2,7}

1. 自然资源部海洋环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

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 266071

3. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

4. 山东省第三地质矿产勘查院, 烟台 264004

5. 东方地球物理公司新兴物探开发处, 涿州 072751

6. 山东科技大学, 青岛 266510

7. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

摘要: CSDP-2 井位于南黄海盆地中部隆起西部, 是大陆架科学钻探项目在中部隆起上实施的第一口以探查印支构造面以下海相中-古生界地层属性为目标的科学钻探井, 对了解中部隆起前新生代基岩地层赋存关系具有重要意义。为了获取井孔的高精度地层速度及高信噪比地震波场特征, 建立准确的地震层位与钻井地层的对应关系, 对该井实施了垂直地震剖面(VSP)观测。针对观测井的地震地质条件和观测目标, 采用了由 4 条 1500in³ 的 Bolt 气枪组成的大容量气枪阵列作为地震激发震源, 克服了海相地层顶界面强反射对地震波强烈阻滞的难题; 通过三分量数字检波器等间距观测方法, 记录传播到井中的地震波场信号。现场的初步处理结果表明, 获得了高信噪比的地震波场信号, 纵波和转换波信号清晰、特征突出。

关键词: 垂直地震剖面; 观测; 大容量气枪震源; 强反射界面; 南黄海盆地

中图分类号: P738

文献标识码: A

Vertical seismic profiling data acquisition from Well CSDP-2 in the Central uplift of South Yellow Sea

WU Zhiqiang^{1,2}, GUO Xingwei^{1,2}, QI Jianghao^{1,2}, QIU Xuelin³, ZHANG Xuefei⁴, TAN Yunlong⁵, HUANG Yuxiao^{1,2,6},
LI Wenqiang^{1,2,7}

1. Key Laboratory of Marine Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Function Laboratory for Marine Mineral Resource Geology and Exploration, Qingdao National Oceanography Laboratory, Qingdao 266071, China

3. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

4. No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264004, China

5. New Technical Developing Division, BGP Inc, Zhuozhou 072751, China

6. Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China

7. School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Abstract: The Well CSDP-2, located in the west of central uplift of the South Yellow Sea basin, is the first drilling hole performed to detect the Mesozoic-Paleozoic marine sedimentary deposits under the Indosinian surface on the central uplift of the South Yellow Sea basin as a part of the Continental Shelf Drilling Program, which is aimed at better understanding the Pre-Cenozoic bedrocks and their occurrence on the central uplift. In order to get highly precise formation velocity of the well and seismic wave field characteristics with high signal-to-noise ratio and to establish accurate corresponding relation between the seismic horizon and the drilling formation, VSP (Vertical Seismic Profile) well logging was carried out. To solve the problem

资助项目: 国家自然科学基金“黄海及邻区壳幔结构及深浅构造关系的综合地球物理研究”(41210005); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目“亚洲大陆边缘地质过程与资源环境效应”(2015ASKJ03); 国家海洋地质专项项目(DD20160147); 国家自然科学基金“东海陆架东缘至冲绳海槽南部地壳结构及拉张减薄机制研究”(41606083)

作者简介: 吴志强(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋地球物理和构造地质等方面的研究, E-mail: wuzq_1964@163.com

通讯作者: 祁江豪(1988—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事构造地质和海洋地球物理等方面的研究, E-mail: jhaoqi@126.com

收稿日期: 2017-11-20; **改回日期:** 2018-04-17. 周立君编辑

of strong reflection interface on the top of the marine strata, we designed a large volume air-gun array composed of 4 1500in3 Bolt air-guns. Using the method of three component digital geophone equal spacing observation, the seismic wave field signal spreading into the well was recorded. The preliminary processing results show that the high signal-to-noise seismic wave field signal was received and the PP and PS direct wave and reflected wave signals were clear and characteristic.

Key words: vertical seismic profiling; observation; high-capacity airguns array; strong reflection interface; South Yellow Sea basin

南黄海盆地中部隆起是中、新生代陆相盆地的二级构造单元,基底为中-古生代海相碳酸盐岩和碎屑岩地层。前期的研究认为^[1-4],中部隆起海相地层分布广、厚度大,埋藏浅、构造变形相对较弱,是油气二次创业^[5]的理想试验区。由于前期没有在中部隆起上实施钻探,加之强反射界面的屏蔽作用造成海相地层地震反射品质差等因素的影响,对中部隆起的海相地层的地质属性推测存在分歧^[6,7]。2014年,由青岛海洋地质研究所组织实施的“大陆架科学钻探项目”,在中部隆起上实施了以探查海相地层地质属性和油气资源前景评价为目标的科学钻探,完成了该区首口井(CSDP-2井)的全取心钻探工作,完钻井深2843.4m(注:钻盘面起算,钻盘面距海底33.3m),钻遇了第四系和新近系陆相沉积层,三叠系、二叠系、泥盆系、志留系、奥陶系等多套海相地层,证明了中部隆起上分布海相中、古生界,并首次获得多个层位的油气显示^[8-10]。

中部隆起分布面积达 $3 \times 10^5 \text{ km}^2$,钻探得到的只是单点的一维深度地质模型,区域地质构造的解释一般以多道地震成像结果为基础,根据钻探获得的地质信息对过钻井旁的反射波组标定后,在地震剖面上根据反射特征和波组的连续与错断情况,进行横向追踪与解释推断。

众所周知,对井旁地震道的反射波组标定,通常是根据钻井地质分层并通过地球物理测井资料制作合成地震记录的方法进行层位标定和划分。钻探取心在深度域上提供了高分辨率地层赋存特征,地球物理测井的分辨率更高,在深度域的分辨尺度达到分米级。而多道地震记录的反射波长一般约为几十米,在高速地层中多在百米以上,且地震记录呈现的是反射波走时特征。因此,测量属性与分辨率上的差异,造成了地震反射波标定与解释的误差和不确定性。对此,VSP(Vertical Seismic Profile,垂直地震剖面)测量可在地层埋藏深度与地震波走时之间起到桥梁作用^[11]。海洋VSP测量采用沉放在海水中的气枪阵列震源激发,数字检波器井中接收的方法,在提供不同深度地震波走时信息的同时,还可以提供地层速度及地震波动力学等多种信息,为地震资料的处理与解释提供支持。

本文介绍了CSDP-2井VSP数据采集方法与初步成果,针对该井处存在浅层强反射界面的特殊地震地质条件,试验采用了大容量气枪震源,大幅度地提高了激发能量,突破了强反射界面对地震波向下传播的屏蔽影响,获得高信噪比的纵波波场数据。同时,充分利用大容量气枪震源可在强反射界面产生转换波的有利条件,首次在近零井源距的采集条件下获得了南黄海海相地层的高信噪比转换波波场数据,经处理得到海相沉积层段的纵横波速度结构与泊松比等物性特征关系参数。

1 地震地质条件

南黄海盆地中部隆起位于盆地的中央部位,是中、新生代盆地的一个二级构造单元。在构造演化过程中,受印支期扬子块体向华北块体拼贴碰撞构造作用(印支运动)的影响,海相中、古生界长期隆升遭受剥蚀改造;新近纪以后,构造运动趋于平静,整体下降进入拗陷期,沉积了厚度为400~800m,最大不超过1000m的新近系和第四系^[12]。根据全取心科学钻探井(CSDP-2井)取得的岩心观察和古生物鉴定的初步结果,该井自上而下钻遇第四系、新近系、三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系和奥陶系(表1),其中三叠系-奥陶系为海相地层,基本厘定了中部隆起地层属性和地质时代。

在VSP测井之前,根据已经取得的声波、密度测井和岩心物性实验室测定成果,进行了岩石物性分析工作,较全面地掌握了该井孔所钻遇地层的岩石物理性质。从测井结果可知,未固结沉积物的速度为1600~2250m/s,密度为 $1.8 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$,随深度的增加、压实作用的加大,速度、密度在逐渐增加。在地球物理测井的基础上,对海相地层段的岩心进行了速度、密度等物性测试,根据测井和物性测试结果,灰岩类速度5085~6578m/s,密度 $2.62 \sim 2.78 \text{ g/cm}^3$,当泥质含量达到40%以上后,其速度可以降低到4800m/s左右;砂岩类速度4681~5557m/s,密度 $2.51 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$,泥岩类速度4158~4520m/s,密度 $2.36 \sim 2.48 \text{ g/cm}^3$ 。据此计算,在深度629m处的三叠系青龙组顶面是强反射界面,反

表 1 CSDP-2 井地层分层简表

Table 1 Simplified stratigraphic division of well CSDP-2

顶深/m	底深/m	厚度/m	地层	现场岩性描述
0	629	596	第四系及新近系	未固结沉积物
629	863	234	三叠系青龙组	灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩
863	915	52	二叠系大隆组	含灰质粉砂岩、细砂岩
915	1636	721	二叠系龙潭组	粉砂岩、细砂岩为主,夹泥岩、煤线
1636	1649	13	二叠系孤峰组	含泥硅质岩,含煤线
1649	1735	86	二叠系栖霞组	自上部至下部为灰黑色石灰岩、臭灰岩石灰岩、砂岩、炭质页岩夹煤线
1735	1818	83	石炭系船山组	上部白色灰岩,下部浅灰色、灰黑色灰岩
1818	1960	142	石炭系黄龙组	肉红色灰岩
1960	2020	60	石炭系高骊山组	杂色砂岩,青灰色砂岩、泥岩
2020	2350	330	泥盆系五通群	青灰色砂岩,粉砂岩、泥岩
2350	2843.4	493.4	上奥陶统至下志留统	顶部灰岩,下部砂岩、粉砂岩、泥岩

射系数可达 0.5 左右,产生能量较大的地震反射波,对地震波的向下传播起到了强烈的阻滞作用。二叠系大隆组顶面、二叠系栖霞组顶面、石炭系高骊山组顶面是弱-中等反射界面,绝对反射系数 <0.15 ,可产生弱-中等能量的地震反射波。其他地层界面由于物性差异较小,难以形成有效反射。

2 资料采集

2.1 激发震源设计

在海洋 VSP 资料采集中,由于气枪震源激发的地震信号一致性好、绿色环保的优势,成为主流激发震源。气枪震源的设计是 VSP 资料采集的重要工作内容之一,根据 VSP 测量的需要,主要从输出脉冲能量和频带宽度上进行激发参数的选择。气枪容量大,激发的地震信号能量强,能够获得深部的有效反射上行波,但会加大采集中的伴生噪音;气枪容量小,激发的地震信号能量弱,虽然可以减少采集中的伴生噪音,但获得深部有效反射的上行波能量弱、信噪比低。另外,气枪容量越大,激发的地震波的主频越低、频带越窄。因此,必须根据测量井所处的地震地质条件和测量目标,选择气枪的容量(输出脉冲能量)和组合方式。本次 VSP 资料采集的目标是获得主要地层界面的准确时间-深度关系,为准确地建立地震速度场和地震资料对比标定提供资料依据。由本井的地震地质条件分析可知,深度 629m 处的强反射界面对地震波的向下传播的阻滞作用强烈,按地震波透射能量定量计算方法^[13],只有不到 10%的震源子波能量能够穿透该界面向下传播^[14];多道地

震的采集与处理实践表明,采用以大容量气枪阵列为主的震源激发技术,才能突破强反射界面对地震波传播的屏蔽作用^[6,14-19],获得该界面之下地层的有效地震反射(图 1)。因此,在本次 VSP 资料采集中,通过提高气枪震源的激发脉冲能量,以穿过深度 629m 处的强反射界面,获得全井段有效的下行波场和上行波场,成为 VSP 资料采集中气枪震源设计的主要考虑因素。

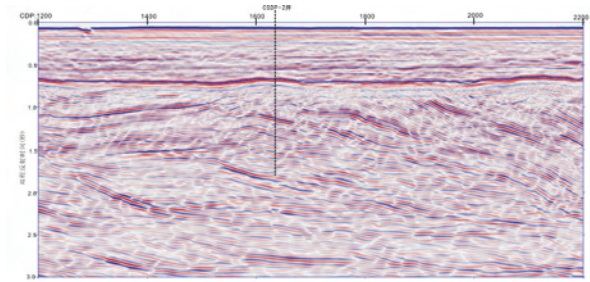


图 1 过 CSDP-2 井的 XQ09-2 线成像处理剖面

Fig.1 Seismic section of line XQ09-2 cross Well CSDP-2

同时,本次资料采集的震源设计还必须考虑井孔结构特征,由钻井施工方提供的数据得知,井孔结构分为 3 段:海底至 645m 段为套管固井段,对最外层套管进行了水泥固井,套管与井壁固结良好,但在该段还安置了与下面井段相连双层活动套管;645~1207m 井段未固井,安置了护井壁双层活动套管,1207~1481m 井段未固井,安置了单层护井壁活动套管;1481~井底为裸眼井段。由此给 VSP 资料采集提出了一个新的问题,在海底至 1481m 段均存在未固结的活动套管,活动套管与井壁或套管与套管之间的充填物为泥浆材料和岩屑,造成井壁(或套

管)与充填物、充填物与套管间存在较大的物性差异,加之充填物的固结程度差,对地震波的衰减作用强,这些给井中检波器信号接收造成较大的困扰。针对这一难题,根据低频地震波穿透能力强、衰减慢的特点^[20],在震源设计中把提升低频能量作为设计的重点。

基于上述考虑,采用由4条容量1500in³的Bolt气枪组成了总容量为6000in³枪阵,作为本次VSP资料采集的激发震源。该枪阵能够产生低主频、高脉冲能量的地震波,具有较大的穿透能力和较远的传播距离^[21],在我国海洋深部地震探测中得到了广泛应用,获得了深达莫霍面的有效反射与折射震相^[22-25]。

根据井场所在海域的潮流和波浪等水文环境,枪阵组合模式为4m×4.5m长方形组合,即气枪排列的横向水平距离4.5m,纵向水平距离4m,4条气枪用锁链固定在4m×4.5m的钢架上,采用浮球和绳索将钢架和气枪沉放在设计的深度上。鉴于该枪阵统一为1500in³的大容量气枪,气泡半径较大,为保证发挥其最佳的激发能量,将枪阵的沉放深度统一设定为10m。为了评价枪阵的输出脉冲能量,在资料采集前进行了输出远场子波计算模拟,模拟环境参数为:气枪工作压力为2000psi,海水密度为1.03g/cm³,海水温度15℃,海水声波速度为1500.0m/s,海平面反射系数近似为-1.0,观测点距离气枪阵列震源中心9000m。图2为该枪阵的远场

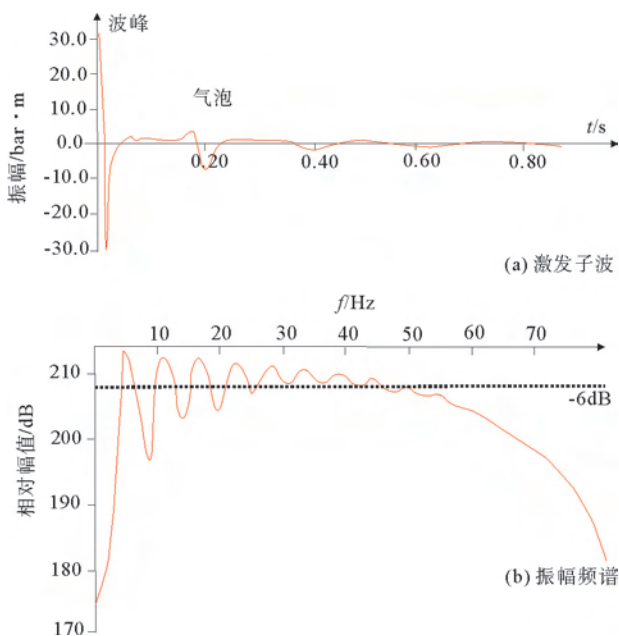


图2 大容量枪阵远场子波波形(a)与频谱(b)图
Fig.2 Far-field wavelet shape (a) and spectrum (b) for large volume airgun array

子波波形与频谱图,其激发的远场子波峰-峰(Peak-Peak)值达66.9bar·m,优势频率集中在3~40Hz,具有激发能量大、低频成分丰富且能量较强,穿透能力大的特点。

2.2 资料采集

本次资料采集选用的是将震源布设在井口附近的近零偏移距观测系统,考虑到激发震源是大容量气枪阵列,为了平台安全和减少浅层段井筒波的干扰,激发震点选在井口西北方向62.5m处(图3),这样既能得到较准确的测井层速度,也可以在629m深度的强反射界面上产生非垂直的入射波,达到充分利用在强反射界面上,较小的人射角即可转换成一定能量的透射横波的条件^[26-28],实现以较小的井源距(近零偏移距)获得深部转换波信号的目的。

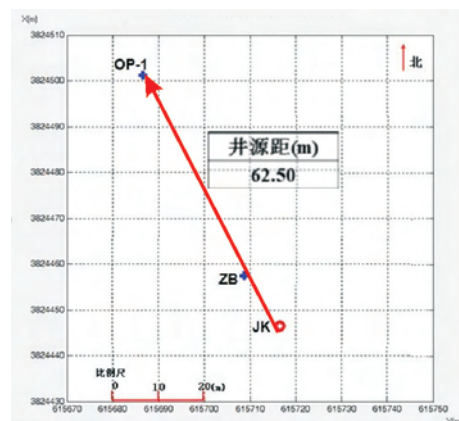


图3 震源点位置图

(JK:井口位置,OP:震源位置,ZB:子波检波器位置)

Fig.3 Position of the centrum

(JK: Wellhead, OP: Centrum, ZB: Wavelet detector)

在资料采集前,为了检验大容量枪阵的激发效果,分别在固井段、双层活动套管井段、单层活动套管井段和裸眼井段,各选择一个试验点进行了采集试验,结果表明四个试验点均获得初至波起跳干脆、能量强的记录,表明大容量枪阵震源满足了资料采集的需求。

根据检波器下井状况,将观测井段设置为井深2720m到海底,观测点距(深度间隔)10m,在地层界面处加密到5m,共设计观测点数305个。采用二级三分量数字检波器接收、级间距10m,检波器型号为GSR,采用机械的推靠方式保障检波器与井壁良好耦合。地震记录的时间采样间隔为0.5ms,记录长度6s,仪器固定增益42db,记录格式SEG-Y,具

体采集参数见表 2。为了监控震源子波的变化,在井孔处海水中放置了压力型子波检波器,考虑到海浪和海流会造成子波检波器的摆动,从而影响子波信号的 品质,特在海底放置海底地震仪(OBS: Ocean Bottom Seismograph)。

表 2 CSDP-02 井 VSP 资料采集参数
Table 2 VSP data acquisition parameter for Well: CSDP-2

观测系统	系统型号	GeoWaves	自然频率	15Hz
	生产厂家	法国 SERCEL 公司	频率响应	3-1600Hz
	检波器级数	2 级	耐压	21750psi/1500bar
	检波器型号	1850 型三分量数字检波器	级间电缆长度	10m
记录系统	地震仪型号	GeoWaves	记录格式	SEGY
	采样间隔	0.5ms	辅助道前放增益	0dB
	高、低截止频率	无	陷波器	无
	井下道前放增益	40dB	记录长度	6.0s

3 采集结果与讨论

采集工作完成后,首先对震源子波一致性进行了分析,图 4 为井孔处水中放置的子波检波器记录的地震子波波形和频谱图,从中可以看出,子波在波形宽度和相位的一致性较好,受海浪和海流的影响,存在一定的振幅差异。而 OBS 沉放在海底,受环境因素的影响较小,激发点与 OBS 接收点的位置固定,其接收的直达波与上行波的一致性的好坏更能说明子波一致性的好坏。图 5 为井孔处放置的 OBS 记录的直达波与上行波波形图,从中可以看出,记录道之间的波形、振幅和相位的一致性较好,表明在整个激发过程中枪阵工作正常,从而保障了

原始数据的振幅等信息的相对关系。

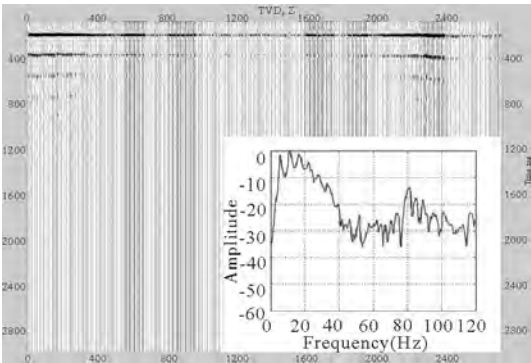


图 4 压力型子波检波器记录的地震子波波形和频谱图
Fig.4 Seismic wavelet shape and spectrum recorded by hydrophone

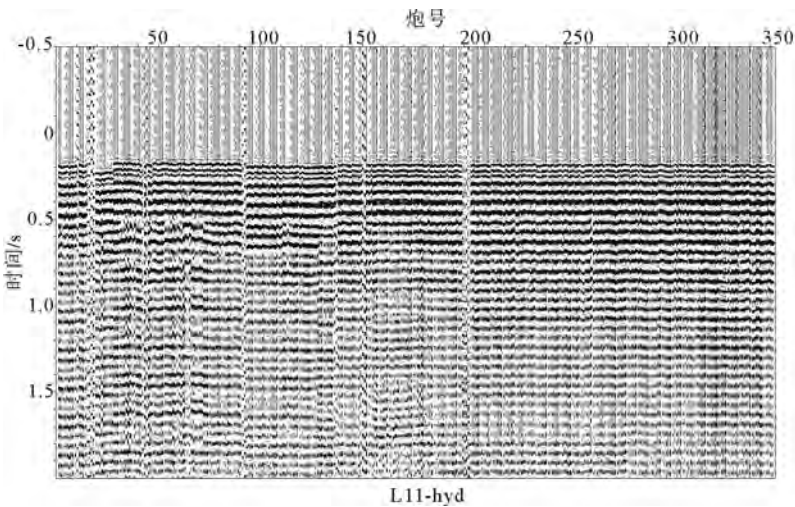


图 5 OBS 水听器记录的直达波和上行波波场图
Fig.5 Direct wave and upward wave field recorded by hydrophone

采集现场对地震记录进行了分选,组成 VSP 三分量 Z、X、Y 三张记录,每张记录 305 道,每道记录长度 6s。图 6 是 Z 分量(纵波)原始记录剖面,显示原始记录面貌较好,信噪比较高,能看到丰富的上行

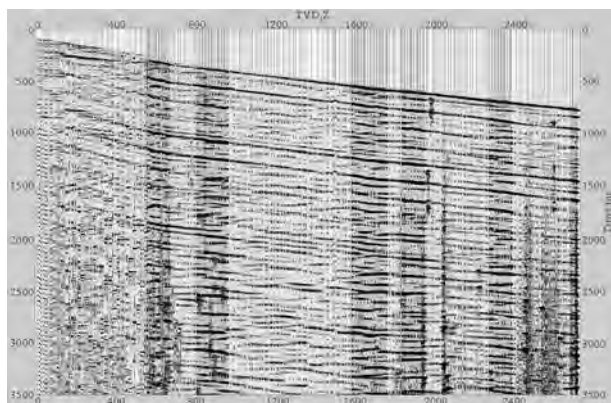


图 6 CSDP-02 井 Z 分量原始记录

Fig.6 Z component original record from Well: CSDP-2

反射波场,表明大容量枪阵激发,用高灵敏度的数字检波器在井下接收是成功的。

由于井深 629m 处是物性变化剧烈的强反射界面,理论研究和实践表明,物性差异大的界面在小的入射角条件下即可产生转换波^[26-28]。虽然本次采集定义为零偏移距 VSP,但震点距井孔为 62.5m,计算在该界面处可形成不大于 6° 的入射角。图 7 是接收转换波信号的 X、Y 分量下行波原始记录剖面,图中可以看出,在深度 630m 之上,X、Y 分量剖面上均为无效的杂乱波形;深度 630m 之下,X、Y 分量剖面上开始出现能量强、连续性好的下行波组,在 X 分量剖面上最为突出。这些均说明透过该界面产生了能量强、信噪比较高的转换下行波场,还能看到较丰富的上行反射转换波场。表明大容量气枪阵列震源激发产生了能量较强的转换波,采用高灵敏度的三分量数字检波器在井下接收是非常成功的。

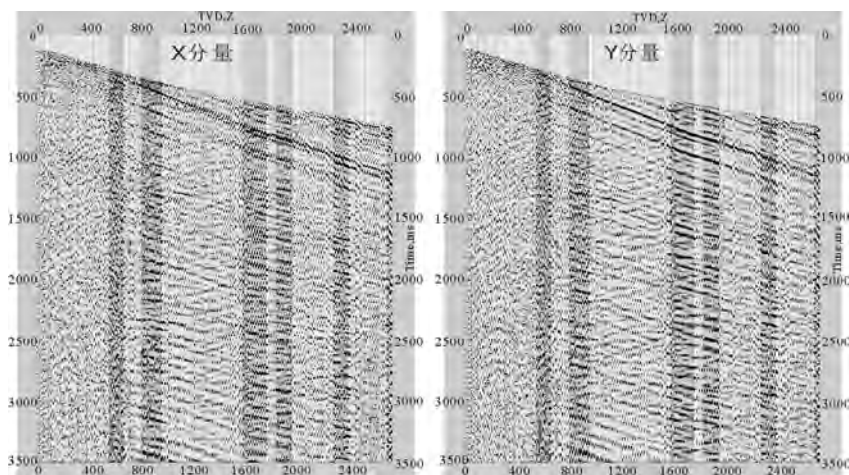


图 7 CSDP-02 井 X、Y 分量原始记录

Fig.7 X and Y component original record of Well: CSDP-2

资料采集工作结束后,为了评价 VSP 资料采集效果,现场进行了噪音剔除、波场分离、振幅补偿和初至拾取等环节的处理工作,计算得到了 CSDP-2 井的 PP、PS 波层速度和纵横波速度比、泊松比曲线(图 8),经与钻井地质分层数据、声波测井资料和岩心物性测试资料对比认为,VSP 测量得到的 PP、PS 波层速度和纵横波速度比、泊松比等曲线的变化特征与钻井地质分层完全吻合,PP 波层速度与声波测井速度变化趋势吻合较好,PP、PS 波层速度与岩心测试结果一致。对比图 8 和钻探地质分层^[8-10],灰岩段具有较高的纵波、横波层速度和泊松比,砂岩、泥岩的纵波、横波层速度和泊松比相对较低;大隆组

含灰质砂岩纵波速度高、但横波速度较低,泊松比较高,达 0.4 左右;青龙组灰岩由于含泥质含量加大,纵波、横波层速度和泊松比低于纯灰岩、但高于砂岩和泥岩。

4 结论

(1) 针对 CSDP-2 井在 629m 井深处存在强地震反射界面,海相地层内部界面物性差异小的地震地质条件下,设计了适宜的大容量气枪阵列+高灵敏度三分量数字检波器 VSP 资料采集技术和参数。通过在海水中较大的沉放深度的大容量气枪阵列定

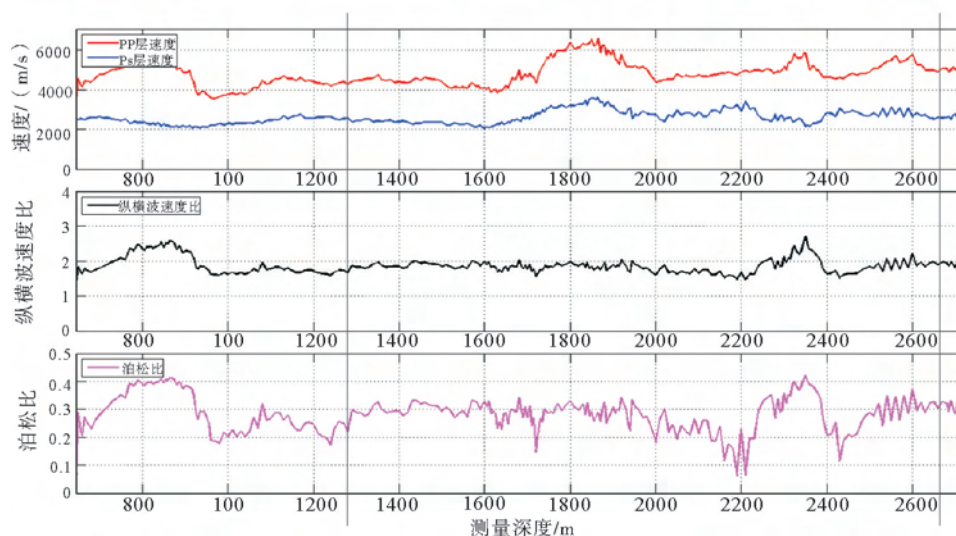


图 8 CSDP-2 井 PP、PS 波层速度和纵横波速度比、泊松比曲线图

Fig.8 PP and PS-wave interval velocity and V_p/V_s and Poisson ratio curves

点激发地震波的技术方法,达到了拓宽低频分量,提高激发地震波能量和穿透能力的目的,突破了强反射界面对地震波下行传播的屏蔽作用,同时也弥补了活动套管与井壁间充填物对地震波的衰减影响,获得了信噪比高、特征突出的地震波场资料。

(2) 充分利用浅层强地震反射界面和大能量气枪阵列的有利条件,在得到纵波波场信号的同时,获得了海相地层井孔段高质量的 VSP 转换波波场信号,经处理得到了纵波、横波速度和波速比及泊松比等弹性波特征曲线,分析弹性波特征与岩性的关系后认为,灰岩的纵波、横波层速度和泊松比高,砂岩、泥岩的纵波、横波层速度和泊松比相对较低,含灰质砂岩纵波速度高、横波速度较低,泊松比较高;当灰岩含有泥质成分时,纵波、横波层速度和泊松比低于纯灰岩、但高于砂岩和泥岩。

(3) 为求准地层的纵、横波速度特征,提供准确的时间-深度标定关系,VSP 地震测井要求井孔比较直,井内的套管层数少,固井质量好,以及裸眼井段井壁光滑不垮塌。另外,在浅层不存在强反射界面的情况下,应采用小容量的气枪组成适宜能量的激发枪阵,以提高激发地震波的主频和拓宽频带,以便采集到更高分辨率的 VSP 资料;同时,若要获得高质量的转换波波场记录,应实施非零偏移距 VSP 测量工作。

参考文献 (References)

[1] 梁杰,张鹏辉,陈建文,等. 南黄海盆地中-古生代海相地层油气保存条件[J]. 天然气工业, 2017, 37(5): 10-19. [LIANG

Jie, ZHANG Penghui, CHEN Jianwen, et al. Hydrocarbon preservation conditions in Mesozoic - Paleozoic marine strata in the South Yellow Sea basin [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(5): 10-19.]

[2] 梁杰,陈建文,张银国,等. 南黄海盆地中、古生界盖层条件[J]. 现代地质, 2016, 30(2): 353-360. [LIANG Jie, CHEN Jianwen, ZHANG Yinguo, et al. Conditions of the Mesozoic-Paleozoic cap rocks in the South Yellow Sea basin[J]. Geoscience, 2016, 30(2): 353-360.]

[3] 张敏强,漆滨汶,高顺莉,等. 南黄海中古生界勘探进展及油气潜力[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(3): 7-15. [ZHANG Min-qiang, QI Binwen, GAO Shunli, et al. New exploration progress and hydrocarbon potential of the Meso-Paleozoic systems in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(3): 7-15.]

[4] 侯方辉,张志珣,张训华,等. 南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(5): 61-68. [HOU Fanghui, ZHANG Zhixun, ZHANG Xunhua, et al. Geologic evolution and tectonic styles in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(5): 61-68.]

[5] 刘光鼎. 雄关漫道真如铁——论中国油气二次创业[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 186-190. [LIU Guangding. Building the next great wall——the second round of Oil & Gas Exploration of China[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(2): 186-190.]

[6] 吴志强,肖国林,林年添,等. 基于南黄海区域地质调查的地震关键技术和成果[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(6): 119-126. [WU Zhiqiang, XIAO Guolin, LIN Niantian, et al. The key seismic technology and results: Based on the practice of regional marine geological survey in South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(6): 119-126.]

[7] 郝天珩,黄松,徐亚,等. 关于黄海深部构造的地球物理认识

- [J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1315-1326. [HAO Tianyao, HUANG Song, XU Ya, et al. Geophysical understandings on deep structure in Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(6): 1315-1326.]
- [8] 郭兴伟, 朱晓青, 牟林, 等. 南黄海中部隆起二叠纪—三叠纪菊石的发现及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(3): 121-128. [GUO Xingwei, ZHU Xiaoqing, MU Lin, et al. Discovery of Permian-Triassic Ammonoids in the Central uplift of the South Yellow Sea and its geological implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology 2017, 37(3): 121-128.]
- [9] 蔡来星, 王蛟, 郭兴伟, 等. 南黄海中部隆起中—古生界沉积相及烃源岩特征——以CSDP-2井为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2017, 47(4): 1030-1046. [CAI Laixing, WANG Jiao, GUO Xingwei, et al. Characteristics of sedimentary facies and source rocks of Mesozoic-Paleozoic in Central uplift of South Yellow Sea: A case study of CSDP-2 coring well[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2017, 47(4): 1030-1046.]
- [10] 肖国林, 蔡来星, 郭兴伟, 等. 南黄海中部隆起CSDP-2井中—古生界烃源岩精细评价[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(12): 24-36. [XIAO Guolin, CAI Laixing, GUO Xingwei, et al. Detailed assessment of Meso-Paleozoic hydrocarbon source rocks: Implications from Well CSDP-2 on the Central uplift of the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(12): 24-36.]
- [11] 赵海英, 齐聪伟, 陈沉忠, 等. 基于VSP的地震层位综合标定方法[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(S1): 84-92. [ZHAO Haiying, QI Congwei, CHEN Yuanzhong, et al. Seismic horizon calibration based on VSP data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(S1): 84-92.]
- [12] 张训华. 中国海域构造地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. [ZHANG Xunhua. Tectonic Geology in China Seas[M]. Beijing: Ocean Publishing House, 2008.]
- [13] 王建花, 李庆忠, 邱睿. 浅层强反射界面的能量屏蔽作用[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 589-596, 602. [WANG Jianhua, LI Qingzhong, QIU Rui. Energy shielding action of shallow strong reflector[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(6): 589-596, 602.]
- [14] 吴志强, 吴时国, 童思友, 等. 基于南黄海海相油气勘探的地震采集技术研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1061-1070. [WU Zhiqiang, WU Shiguo, TONG Siyou, et al. A study on seismic acquisition basic on marine carbonate hydrocarbon exploration in the Southern Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 1061-1070.]
- [15] 吴志强, 骆迪, 曾天玖, 等. 南黄海海相油气地震勘探难点分析与对策建议[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 8-17. [WU Zhiqiang, LUO Di, ZENG Tianjiu, et al. Technical difficulties and countermeasures of petroleum seismic exploration in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(3): 8-17.]
- [16] 吴志强, 高江涛, 陈茂根, 等. 南黄海盆地地震试验数据处理分析方法与成果[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(7): 51-59. [WU Zhiqiang, GAO Jiangtao, CHEN Maogen, et al. Processing method and results of seismic testing data in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(7): 51-59.]
- [17] 吴志强, 肖国林, 张训华, 等. 南黄海区域地质构造背景与地震勘探部署及试验成果[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(10): 62-70. [WU Zhiqiang, XIAO Guolin, ZHANG Xunhua, et al. Seismic exploration deployment based on geotectonic background: A case from the South Yellow Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(10): 62-70.]
- [18] 张训华, 吴志强, 肖国林, 等. 新世纪南黄海地震勘探成果与展望[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(7): 1-8. [ZHANG Xunhua, WU Zhiqiang, XIAO Guolin, et al. Progress and prospect of seismic survey in the South Yellow Sea in the new century[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(7): 1-8.]
- [19] 吴志强, 曾天玖, 肖国林, 等. 南黄海低信噪比地震资料处理技术探索[J]. 物探与化探, 2014, 38(5): 1029-1037. [WU Zhiqiang, ZENG Tianjiu, XIAO Guolin, et al. A tentative discussion on low SNR seismic data processing technique for marine carbonate in the South Yellow Sea area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(5): 1029-1037.]
- [20] 余德平, 管路平, 徐颖, 等. 应用低频信号提高高速玄武岩屏蔽层下的成像质量[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(5): 564-567. [SHE Deping, GUAN Luping, XU Ying, et al. Applying of low-frequency signal to improve imaging quality below shielding high-velocity basalt[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(5): 564-567.]
- [21] 赵明辉, 丘学林, 夏少红, 等. 大容量气枪震源及其波形特征[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 558-565. [ZHAO Minghui, QIU Xuelin, XIA Shaohong, et al. Large volume air-gun sources and its seismic waveform characters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 558-565.]
- [22] 唐杰, 王宝善, 葛洪魁, 等. 大容量气枪震源的实验与模拟研究[J]. 中国地震, 2009, 25(1): 1-10. [TANG Jie, WANG Baoshan, GE Hongkui, et al. Study of experiment and simulation of large volume air-gun in deep structures exploration[J]. Earthquake Research in China, 2009, 25(1): 1-10.]
- [23] 林建民, 王宝善, 葛洪魁, 等. 大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析[J]. 地球物理学报, 2008, 51(1): 206-212. [LIN Jianmin, WANG Baoshan, GE Hongkui, et al. Study on large volume airgun source characteristics and seismic phase analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(1): 206-212.]
- [24] 吕川川, 郝天珧, 丘学林, 等. 南海西南次海盆北缘海底地震仪测线深部地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3129-3138. [LV Chuanchuan, HAO Tianyao, QIU Xuelin, et al. A study on the deep structure of the northern part of southwest sub-basin from ocean bottom seismic data, South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3129-3138.]
- [25] 丘学林, 陈颢, 朱日祥, 等. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用: 南海北部试验结果分析[J]. 科学通报, 2007, 52(4): 463-469. [QIU Xuelin, CHEN Yong, ZHU Rixiang, et al.

- The application of large volume airgun sources to the on-shore-offshore seismic surveys: Implication of the experimental results in northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4): 553-560.]
- [26] 徐仲达,郝晓红,徐翔之,等. 用 VSP 数据中下行 P-SV 转换横波求取横波速度[J]. 石油物探, 2002, 41(3): 274-278. [XU Zhongda, HAO Xiaohong, XU Xiangzhi, et al. Estimation of velocities of shear-waves using downward converted P-SV waves in VSP data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(3): 274-278.]
- [27] 吴少军,罗斌,陈元勇,等. 纵波源零偏 VSP 资料中的上行横波与纵波联合反演初探[J]. 石油物探, 2017, 56(4): 589-598. [WU Shaojun, LUO Bin, CHEN Yuanyong, et al. Joint inversion of up-going SS-wave and PP-wave in land zero offset VSP with P-wave source and a tentative exploration of their application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(4): 589-598.]
- [28] 姚忠瑞,何惺华. 利用零偏 VSP 数据求取横波速度——以七北 101 井 VSP 测井为例[J]. 油气地球物理, 2006, 4(3): 32-34. [YAO Zhongrui, HE Xinghua. The S wave velocity calculated by the data of zero-offset VSP: A case history of zero-offset VSP in Qibei 101 [J]. Petroleum Geophysics, 2006, 4(3): 32-34.]