

海洋天然气水合物三维地震与海底地震勘探中的震源技术研究*

伍忠良

(国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘要: 三维地震与海底地震勘探技术愈来愈广泛应用于海洋天然气水合物调查中。为了获取高品质的纵波、转换横波等地震信息, 揭示天然气水合物地层的速度结构异常, 地震震源是决定调查成功与否的关键技术之一。本文对激发频宽、输出、气泡效应等震源特性及组合技术进行了综合研究, 设计了一种新型的GI枪点震源系统, 并于2006—2009年期间在南海北部某海域进行一系列试验。试验效果的综合对比表明: 震源优化技术的应用明显提高了地震纵波的地层穿透深度, 并改善了海底地震仪(OBS)纵波及转换横波的接收效果。

关键词: 天然气水合物; 海底地震仪; GI枪; 点震源

中图分类号: P738 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)01-0049-12

Study of source in 3-D seismic and OBS exploration for marine gas hydrate

WU Zhong-liang

(Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Application of 3-D seismic and OBS exploration has been ever-increasing in the marine survey on natural gas hydrate. The seismic source is one of determining factors in the acquisition, which is related to the quality of seismic data(P-wave and converted S-wave) acquired. The high quality data help to reveal the feature of velocity anomaly of strata bearing gas hydrate. By taking firing bandwidth, output and bubble effect into integrated consideration, a new type of GI gun point source was designed and then applied in the investigation on gas hydrate. Tests were conducted in northern of the South China Sea repeatedly over time from 2006 to 2009. The results indicated the application of new point source can enhance the penetrating capability of seismic P-wave and can improve the quality of P-wave and converted S-wave that OBS acquired.

Key words: natural gas hydrate; ocean bottom seismometer; GI gun; point source

1 国内外研究状况

目前, 地震调查在国外水合物勘探界应用非常广泛, 其技术方法主要有以下几种: 1) 船载单道地震(SCS); 2) 二维多道地震勘探(MCS); 3) 深拖多道地震组合探测(DTAGS); 4) 广角地震, 包括海底高频地震仪(HF-OBS)、海底地震检波器(OBH)、海底地震电缆(OBC)、垂直地震剖面法(VSP); 5) 船载深水高分

辨率二维地震(HR-MCS); 6) 三维地震(3D)勘探技术。各海域调查区的水深、中浅层沉积厚度等水合物成矿条件不同以及调查研究的目的不同, 调查中所使用的震源也不尽相同。

美国、俄罗斯、德国、意大利、日本等国科学家在水合物调查过程中采用不同震源进行了研究与对比试验。例如, 美国科学家在布莱克海台, 采用2条210in³GI枪(G105/I105, 即G枪容量=105in³, I枪

收稿日期: 2010-03-19; 修订日期: 2010-05-16。卢冰编辑

基金项目: 国家“863”计划重大项目(2006AA09A202, 2009AA09A201)。

作者简介: 伍忠良(1967—), 男, 湖南省安乡县人, 高级工程师, 从事海洋地质地球物理勘察研究。E-mail: wzllzw1997@21cn.com

*感谢中科院南海海洋研究所丘学林博士、中国地质大学(北京)王祥春老师对试验过程的指导。“奋斗四”号船全体成员及中科院地质与地球物理研究所游庆瑜博士、胡忠义老师、赵春蕾老师在采集过程中付出了辛勤的劳动, 广州海洋地质调查局徐华宁、王伟巍、韦成龙对本文进行了修改与指导工作, 在此一并致谢。

容量=105in³, 1in=2.54cm, 1in³=16.39cm³, 下同), 480道地震电缆(道间距 12.5m), 震源和电缆分别沉放5m, 取得了清晰的水合物多道地震资料^[1]。美国地调局联合多所高校在布莱克海台进行了多种震源组合高分辨率地震调查, 取得了丰硕成果^[2]; 俄罗斯与欧盟科学家在贝加尔湖地区进行了多次天然气水合物研究与试验, 调查过程中使用设备有旁侧声纳、多波束测深、水枪、脉冲震源、普通空气枪震源, 对水合物成因、形态、似海底反射(Bottom Simulating Reflector, BSR)等标志特征、储量预测进行了大量研究工作, 取得了令人满意的成果^[3-5]; 欧盟等多国科学家在挪威外海斯瓦尔巴特海域采用三维(和二维)地震与海底地震联合勘探方法, 取得了P-P、P-S波资料, 对水合物的速度结构、各向异性、含水合物地区的岩性结构进行综合研究, 为水合物储量预测提供丰富的多波勘探信息^[6-8]。日本科学家在东海^[9]、南海海槽^[10]等海域采用三维地震勘探方法、二维多道地震与海底地震联合采集的方法, 对水合物进行了系统的研究; 韩国、印度采用多道地震、海底地震仪等技术对海洋天然气水合物进行了研究, 采用的震源有GI枪、套筒枪、电火花等。我国科学家总结了国内外天然气水合物地震勘探技术方法, 并就震源与水合物勘探频率之间的内在联系进行了研究和试验, 取得了较好的研究效果^[11]。

近年来, 由于横波资料对水合物含气构造具有较好的成像效果、纵横波波形反演可以获得更加精细的速度结构信息, 因此, 三维地震勘探与海底地震勘探技术在海洋水合物地震勘探中越来越得到重视^[12-13]。根据有关资料, 在20—650Hz的频带内都可以观察到有关的BSR反射, 但其反映形态各异^[14]。随着多波勘探技术在水合物中日益广泛的应用, 震源技术研究除了需要满足水合物的纵波勘探的要求外, 还需要得到较好的横波接收效果。因此, 震源研究的主要目标是通过震源的结构、激发能量、震源沉放深度等参数的综合研究, 结合对比试验, 获得满足水合物调查要求的地震勘探频率。下面以刚果海域高分辨率地震调查、挪威外海天然气水合物三维地震勘探与海底地震联合采集技术调查、我国南海北部天然气水合物调查为例, 详细介绍震源技术研究成果在天然气水合物中的应用。总之, 震源技术研究除了需要满足水合物的纵波勘探的要求外, 还需要得到较好的横波接收效果。本文在前期研究的基础上, 重点介绍震源技术在满足纵波勘探需要的前提下研究一种新型震源技术, 在水合物联合采集中获得有效海底地震勘探资料的一种技术方法。

1.1 国外天然气水合物震源技术研究

1.1.1 刚果海域天然气水合物勘探

南纬约5°的低洼的刚果盆地存在大量麻坑, 为系统研究天然气水合物提供了一个天然的试验室环境。为了研究震源对水合物调查的影响, 德国科学家在Meteor调查船M47/3和M56航次调查中, 采用了水枪、GI枪震源作为震源, 应用单波束测深、多波束测深、二维高分辨率地震、三维地震勘探等多种调查方法, 将地震、声学与海底地形地貌数据综合起来, 对盆地内天然气水合物的物性特征及成因进行了深入研究。地震调查中采用了一条10in³容量的水枪(沉放2m)作为激发震源, 激发频宽为200—1600Hz, 取得了较好的高分辨率地震调查效果, 但地层穿透深度较浅; 为了便于对比, 又采用了两条100in³的GI枪(沉放5m)作为震源, 激发频宽为30—200Hz, 穿透深度较深而且具有较高的分辨率, 取得了令人满意的调查效果^[15]。图1为盆地内两个重点研究的目标区之一的黑孔(Black Hole)的不同震源效果的对比研究, 左图激发震源为两条100in³的GI枪, 右图为1条10in³的水枪的调查效果。水枪激发频率高、激发频带较宽, 水合物剖面分辨率相对较高, 但地层穿透深度不够、BSR连续性相对较差。GI枪所组成的枪阵在沉放深度5m时, 剖面的分辨率、穿透深度及BSR连续性均达到了很好的兼顾。

1.1.2 欧盟水合物联合勘探

欧洲大陆边缘水合物储量预测技术委员会(HYDRATECH)在海洋天然气水合物识别与储量预测方面做了大量工作。2002年在挪威外海STOREGGA滑塌区进行了天然气水合物地震与海底地震仪联合勘探, 采集时使用了2条40in³套筒枪(沉放深度4m)和21个紧密排列的四分量海底地震仪, 除了纵波(P波)之外, 还获取了有效的转换横波(P-S波)信息。之后, 利用P波和P-S波数据进行了联合反演, 建立了P波和S波的速度模型。研究成果表明: BSR之上P波速度的正异常, 显示了水合物的存在; 通过由纵波、横波速度模型采用毕奥理论法和有效介质法预测了水合物的含量, 达到了储量预测的目的^[8]。研究结果表明: 速度函数的不确定性是影响储量预测的主要因素, 而导致这种不确定性的因素有偏移距较小影响地层勘探深度、震源主频较低、震源结构所带来的误差以及所使用的速度结构模式不合理等。但导致上述不确定因素的主要原因之一为震源参数。就该地区的地震地质条件

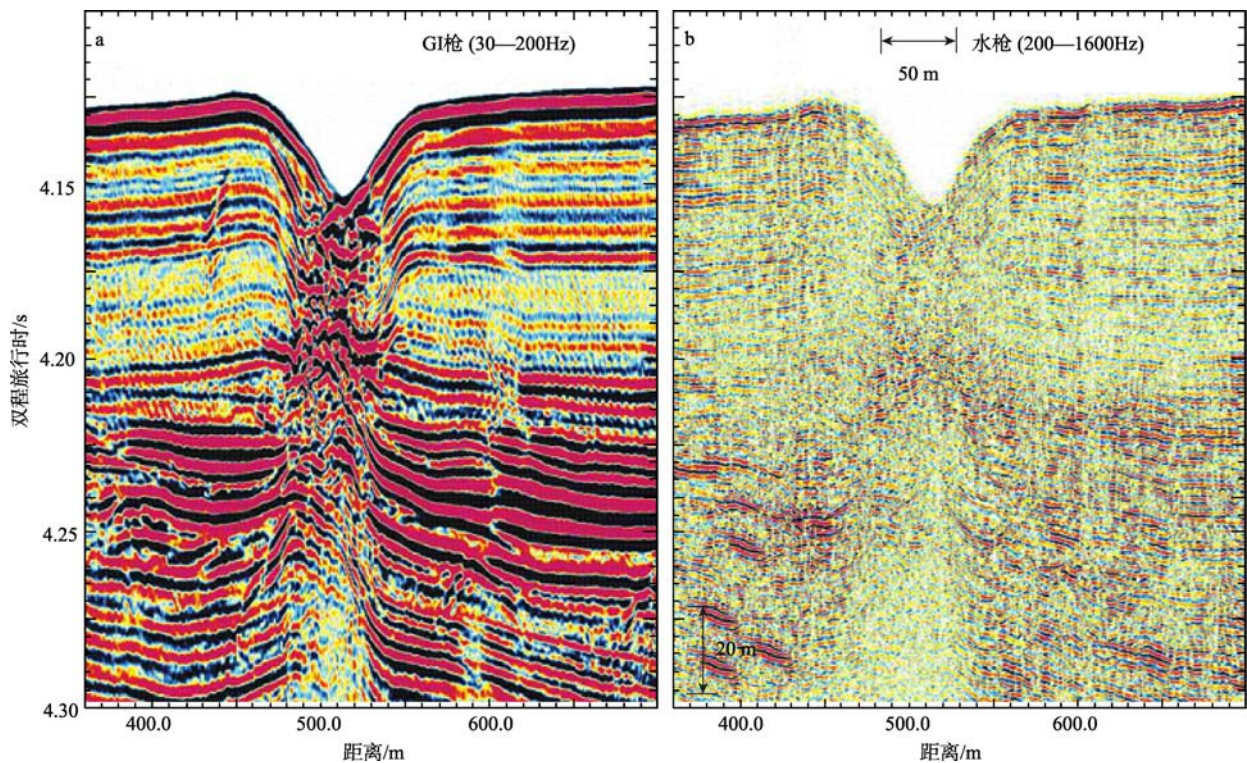


图1 采用不同震源在刚果盆地所获取的水合物调查地震剖面效果对比图

a. 激发震源为两条 100in^3 的 GI 枪; b. 为 1 条 10in^3 水枪的调查效果

Fig. 1 The comparison of seismic profiles acquired with different sources in the gas hydrates investigation of Congo basin

而言, 试验中使用的套筒枪震源激发频宽为 30—400Hz(主频范围 50—110Hz), 取得了较好的纵横波资料。

1.2 我国海洋天然气水合物震源技术研究

1.2.1 我国南海北部陆坡高分辨率二维地震调查震源研究

自 1999 年以来, 我国相继在西沙海槽、东沙群岛、神狐和琼东南海域开展了天然气水合物资源调查及研究工作。就地震震源而言, 针对天然气水合物高分辨率二维地震调查手段的特点, 对震源结构、激发能量、激发频宽以及沉放深度进行了综合研究。首先, 根据天然气水合物海底埋深较浅、地层复杂的特点, 为了突出 BSR 特征、提高 BSR 邻近地层的分辨率, 依据“点震源”的相关技术标准(震源的几何尺寸 L 远远小于目的频率所对应的波长时称为点震源^[16])以及相干枪阵的研究结果(何汉漪, 2001^[17]), 高分辨率二维地震调查中设计使用的枪阵为 $8 \times 20 \text{in}^3$ 套筒枪点震源系统。接着, 针对我国南海北部陆坡的实际情况, 认为对天然气水合物的主要识别标志 BSR 在频宽 10—120Hz, 主频 40—70Hz 时可以得到突出, 同时在不影响 BSR 有效识别的前提下能够兼顾其他信息获取^[14]; 同时通过对海洋地震勘探中地震波、鬼波综合效应的分析, 确

定了缆源的最佳沉放深度为 5m^[18], 2001—2005 年神狐海域的大量对比试验的结果证实了上述结论。

1.2.2 我国南海北部陆坡准三维地震调查震源研究

水合物二维地震初步圈定了水合物矿体的有利区带和成矿远景区; 随着天然气水合物调查程度的提高, “获取水合物实物样品”成为调查研究的首要任务。2006 年采用单源单缆准三维地震勘探方法(以下简称三维地震勘探), 结合 AVO、波阻抗反演、叠后地震属性分析及相干体等特殊处理, 进行了天然气水合物地震信息综合解释, 最终划分了 2 个天然气水合物有利区带, 确定了多个钻探目标井位。2007 年 5—6 月, 在我国南海北部陆坡神狐海域成功钻获天然气水合物样品; 由于天然气水合物多波勘探信息在提高地层分辨率、突出含气地层成像效果、物性特征区别及岩性圈定等诸多方面具有一定优势, 2007 年开始, 采用天然气水合物矿体的三维地震与海底高频地震联合采集技术方法(以下简称联合地震勘探), 在南海北部陆坡进行了大量的野外采集和技术试验, 目前已取得了质量较好的纵波及其转换横波的资料。

综上所述, 我国天然气水合物地震调查可以分为重要的 3 个阶段, 即 1) 高分辨率二维地震勘探; 2) 三维地震勘探; 3) 联合采集地震勘探。高分辨率二维

地震勘探目的是在地震剖面上突出天然气水合物 4 大基本特征(似海底反射、振幅空白带、斜穿地层、振幅和速度结构异常)^[19], 采用震源为 $8 \times 20 \text{ in}^3$ 套筒枪点震源系统, 并对缆源沉放深度等调谐组合参数进行了研究, 确定了南海北部陆坡天然气水合物调查较为有利的地震调查频率(主要识别标志 BSR 在 10—120Hz, 主频为 40—70Hz 时可以得到突出, 同时在不影响 BSR 有效识别的前提下能够兼顾其他信息的获取^[14]); 天然气水合物准三维地震调查主要针对水合物目标靶区进行高分辨率三维成像^[20], 其定位技术以“网络三节点法”为基本原理, 满足了水合物三维定位的要求^[21-22], 为最终实现“优选井位”提供有利的技术支持; 联合采集地震勘探的关键在保证地震纵波勘探的有利频带的基础上突出

海底地震转换横波的有效信息, 其中, 在保证天然气水合物纵波激发频宽和主频的前提下, 震源的稳定性和激发能量成为纵横波有效获取的重要技术, 也是本文研究的重点。

2 天然气水合物联合采集地震勘探需要解决的震源问题

天然气水合物高分辨率二维地震与准三维地震调查使用的套筒枪点震源系统($8 \times 20 \text{ in}^3$)所获得的地震纵波剖面在突出水合物 4 大特征以及提高 BSR 及其邻近地层的分辨率方面获得了较好的效果, 图 2 为南海北部陆坡神狐海域的某测线的地震剖面(纵波), 该剖面水合物的基本特征比较明显。

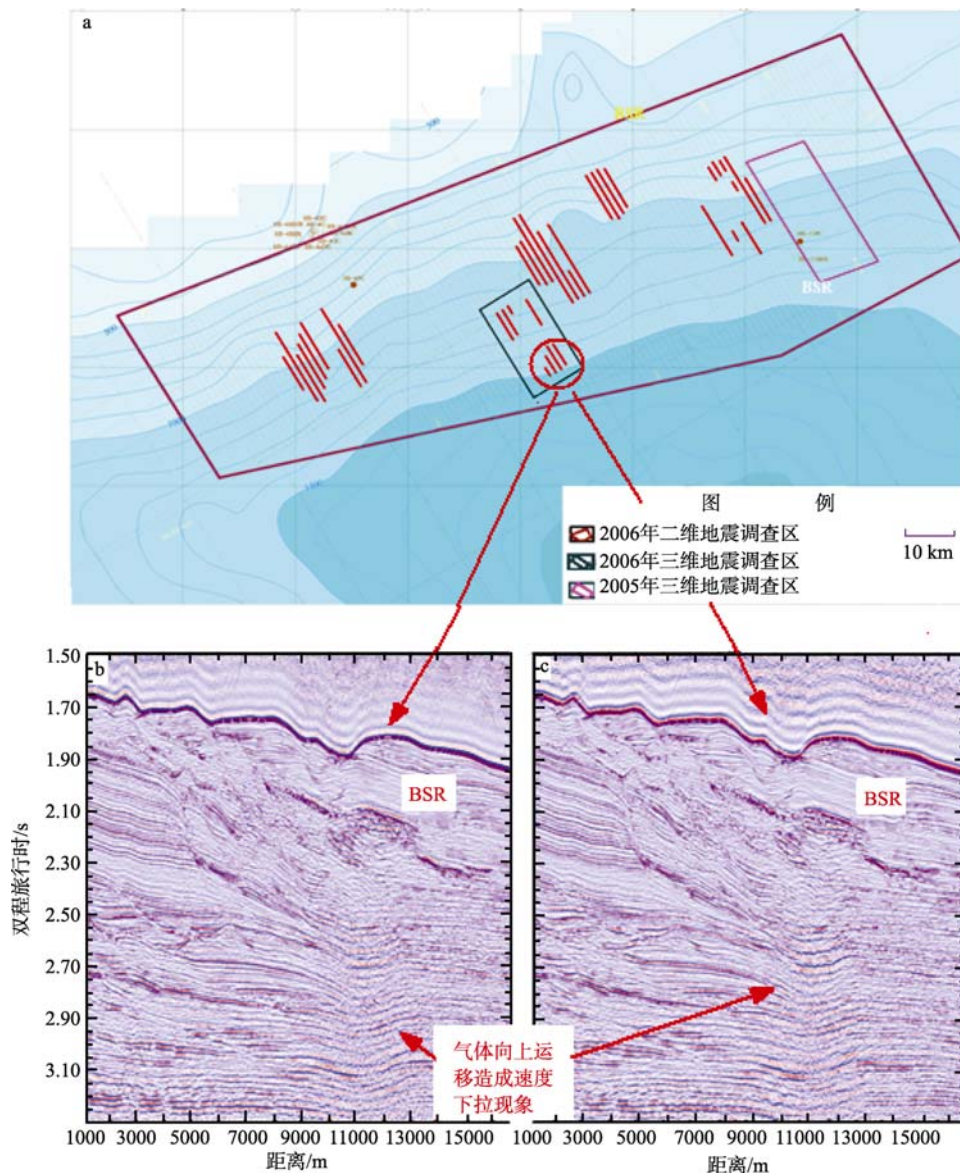


图 2 南海北部陆坡神狐海域某测线地震剖面(纵波)

a.2006—2008 水合物调查工区图; b.高分辨率二维地震剖面显示 BSR 存在; c.瞬时相位剖面显示 BSR 存在

Fig. 2 The seismic profile (compressional wave) acquired at Shenhu Sea in the Northern Continental Slope of South China Sea

随着调查程度的进一步提高,拟采用三维与海底地震联合采集的方法,获取有效的地震纵波及转换波信息,进一步突出水合物内部速度结构特征及地层的分辨率,为后续处理与解释提供丰富的地球物理信息,达到水合物识别及储量预测的目的。2006—2008年,广州海洋地质调查局“奋斗四号”船

使用 $8 \times 20 \text{ in}^3$ 的点震源进行了地震资料的联合采集,震源沉放深度为 5m, 试验中采用了 5 台法国 Sercel 公司 MicrObs(海底地震仪)和 2 台国内研发的 HF-OBS。由于震源的稳定性和输出能量的影响,OBS 剖面海底地震仪接收剖面的效果较差,剖面模糊不清(图 3c)。

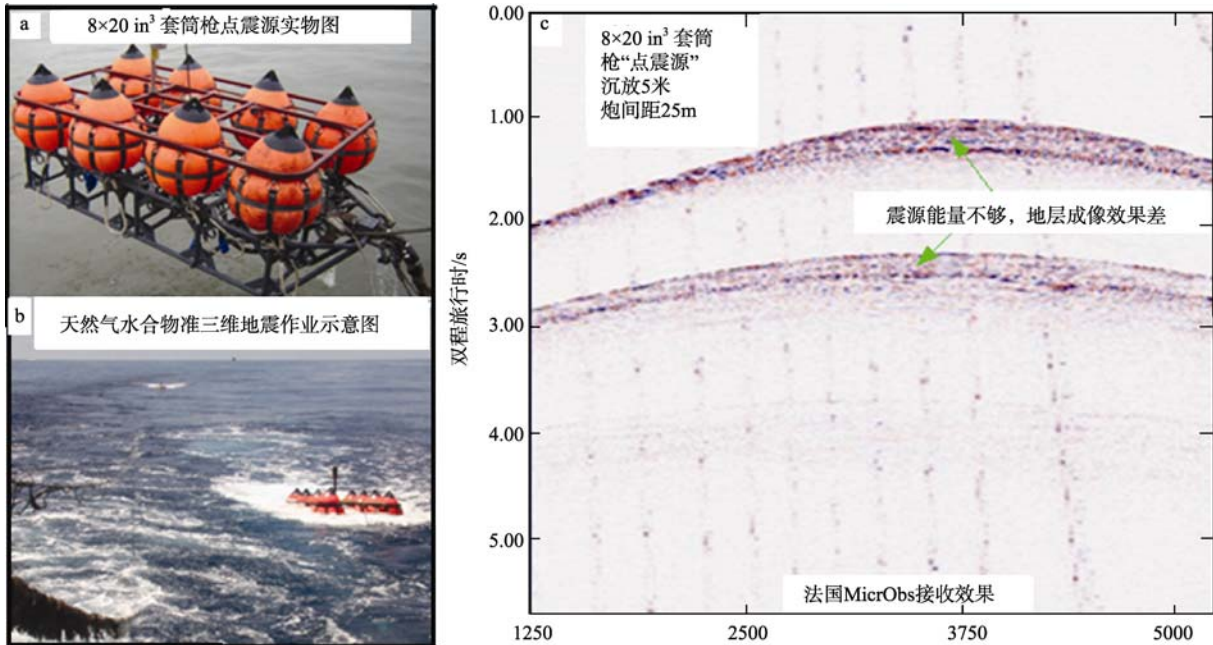


图 3 套筒枪点震源 $8 \times 20 \text{ in}^3$ 与 MicrObs 海底地震仪接收效果图

a. $8 \times 20 \text{ in}^3$ 套筒枪点震源实物图; b. 地震震源作业状况图; c. 震源激发能量低, 海底地震仪(MicrObs)接收效果差

Fig. 3 The seismic point source ($8 \times 20 \text{ in}^3$) composed of Sleeve guns and the profile acquired by MicrOBS

图 3c 为法国 MicrObs 的 X 分量接收效果图, 由于震源因素影响, 海底地震原始剖面成像效果不理想, 因此需要改进震源以保证联合采集资料的品质。

3 试验与震源设计

3.1 陆地水池技术试验

OBS 的接收效果与多种因素有关, 最主要的因素有: 1) 地震波传播距离为 D 时, 信号幅度的衰减; 2) OBS 本身的响应特性(如 OBS 本身的动态范围、检波器性能等); 3) 震源激发能量。根据经验公式, 地震波在水中或其他介质中传播时, 其幅值衰减以 dB 表示, 遵从以下经验公式:

$$A_{dr} = k_0 20 \lg D + a_f \quad (1)$$

其中 A_{dr} 表示地震波衰减幅度, k_0 表示震源子波在介质中的衰减常数, D 表示震源子波的传播距离, a_f 表示与频率 f 成正比的衰减量。

设震源子波野外传播距离为 D_1 , 水槽传播距离

为 D_2 ,

$$\text{则} \quad A_{dr1} - A_{dr2} = k_0 20 \lg(D_1/D_2) \quad (2)$$

式(2)的物理意义为: 震源传播距离所引起的衰减量(分贝)与传播距离呈线性关系。在同等条件下, 传播距离一定, 则产生的信号衰减也一定。

而地震波幅度 A (分贝)直接与激发能量 E 近似成正比关系, 即 $A_1/A_2 = E_1/E_2$, 上述经验公式表明: 当传播路径一定时, 对于特定频率 f , 震源子波的传播衰减为固定值, 而震源能量变化是影响勘探效果的主要因素。基于上述原理, 可以通过水槽试验近似模拟野外情况, 检验震源变化对 OBS 接收效果的影响。试验水槽大小为 $7 \text{ m} \times 7 \text{ m}$, 深度为 6m, 试验时模拟相同的海水盐度, 选用不同的震源能量档位, 观测 OBS 接收效果。试验时使用了 800J、1200J 和 1600J 等 3 种不同能量等级的电火花震源, 震源激发时间间隔约为 10s, 将 MicrObs 和 HF-OBS 两种不同类型的海底地震仪放入池底, 连续记录一定时间之后回收海底地震仪并进行资料处理, 图 4 为海底

地震仪 X 分量原始剖面(图 4 a - c 为 MicrObs 的接收效果, 图 4d - e 为 HF-OBS 的接收效果)。水池试验结果分析表明: 当震源能量提高一倍时, 不管是 MicrObs 还是 HF-OBS, 接收效果明显变好, 因此, 针对原有震源勘探效果不理想的情况, 为了达到较好的接收效果, 则震源能量至少应提高一倍以上。

3.2 震源组合技术的理论分析

3.2.1 震源组合模拟

利用 Nucleus 软件对天然气水合物联合采集 GI 枪组合震源进行了模拟。设计震源总容量为 540in^3 ,

由 4 支 GI 枪组成, 容量分别为 1 支 G105/I105、2 支 G45/I45、1 支 G75/I75 空气枪组成。2000PSI (1PSI=6.895kPa)的工作气压下, 沉放 5m 时, 输出 P-P 值为 1.9MPa(表示在离震源 1m 的地方所得到的震源子波振幅的大小)约为 $8 \times 20 \text{ in}^3$ 套筒枪点震源系统输出能量的一倍), 波泡比为 42, 输出频宽为 10—300Hz(兼顾天然气水合物高分辨率纵波勘探的要求)。图 5a 为天然气水合物联合采集震源系统几何图形, 图 5b 为震源子波特性图, 图 5c 为震源频谱特性图。

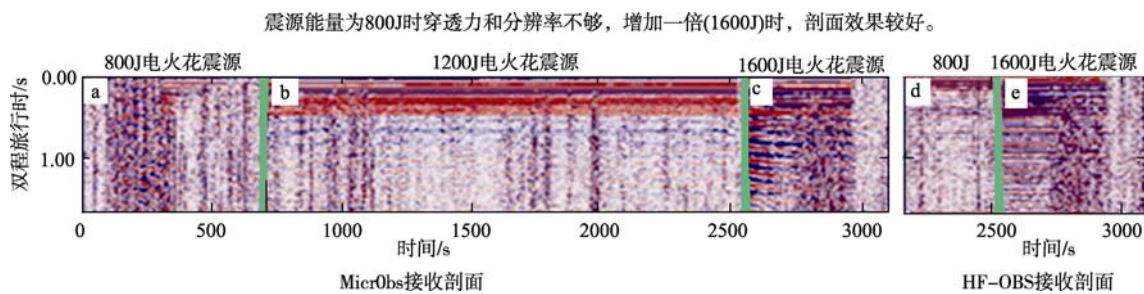


图 4 海底地震仪水池试验综合效果图

a.800J 电火花激发能量下 MicrObs 接收效果图; b.1200J 激发能量下 MicrObs 接收效果图; c.1600J 激发能量下 MicrObs 接收效果图; d.800J 激发能量下 HF-OBS 接收效果图; e.1600J 激发能量下 HF-OBS 接收效果图

Fig. 4 The general appearance of pool test with OBS

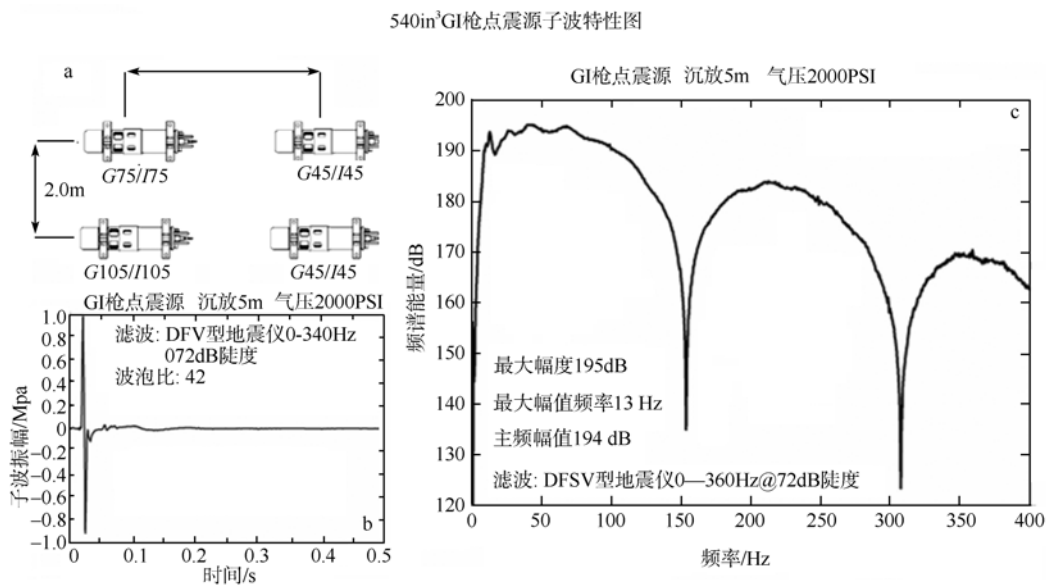


图 5 540in³GI 枪震源子波特性图

a. 震源几何分布图; b. 震源子波特性图; c. 震源频谱特性图

Fig. 5 The wavelet view of the GI source with volume of 540in^3

3.2.2 震源设计与制作

根据 GI 枪的工作原理, 对于 210in^3 的 GI 枪 (G105/I105), 在工作压力为 2000PSI、沉放深度 5m 的条件下, G 枪激发时, 平衡状态时最大气泡半径 D_g 为 0.5m, I 枪激发时 I 枪枪体上的 4 个排气口同时排

气, 呈花瓣状激发。经测试, 花瓣长度约为 0.5m。

实际制造时, 受海上施工条件的限制(后甲板空间及震源收放时对重量限制), 震源制造时尽量压缩相邻 GI 枪之间的间距。为了达到 GI “点震源” 系统的设计技术要求, 将相邻的两条 GI 枪中一条 I 枪

排气口旋转某一适当角度,使得I枪的“排气花瓣”互相错开,避免了干涉效应。通过对GI沉放5m时气泡大小的测试(G枪最大半径为0.5m,I枪激发气泡花瓣长度为0.5m),机械加工时,通过旋转GI的I枪释放气孔的位置,使释放气泡互不干扰,最终将4条GI枪之间的实际间距调整为1.6m。图6a图为两只相邻GI枪激发时的效果图,图6b为GI“点震源”设计效果图。下文将重点介绍新型震源实际应用时的采集效果。

4 试验效果的分析对比

4.1 试验概况

2009年6月22日—8月24日,在南海北部陆坡神狐海域(与以往试验海域相同)进行了天然气水

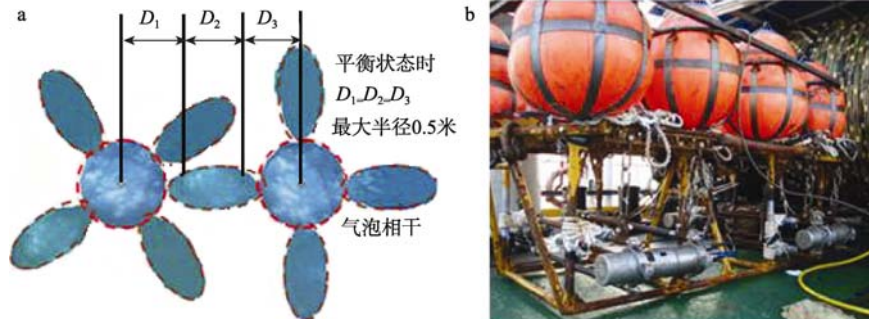


图6 540in³GI枪震源相干效果及设计效果图

a.点震源相邻气枪激发气泡相干效果图; b.套筒枪点震源实物图

Fig. 6 The interference effects of GI guns of 540in³ source and its real picture

4.2.1 震源稳定性

震源稳定性指震源工作过程中炮点之间的激发波形、激发频宽、激发能量的变化是否更加趋于一致。2008年使用的震源为 $8 \times 20 \text{ in}^3$ 套筒枪“点震源”系统,2009年使用的震源为540in³的GI枪组合“点震源”系统。图7为2008—2009不同震源所激发的直达波效果对比图,由于采用了GI枪组合方式,电缆第一道接收的直达波波形比较稳定;图8a-c为同一测线同一位置海底波形的效果比较图,经过比较,2009年使用的GI枪“点震源”波形的稳定性更好(图8b、8c),因而对水合物三维与海底高频地震联合采集更加有利。

4.2.2 地层穿透力

地层穿透能力一般通过资料处理后的效果进行对比。图9a为2008年采集资料的地震剖面,震源为 $8 \times 20 \text{ in}^3$ 套筒枪点震源,沉放深度为5m,电缆为法国Sercel公司的Seal数字电缆,长度为2.4km(192道/12.5m道间距),电缆沉放5m;图9b

合物准三维地震与海底地震仪联合采集试验。完成天然气水合物准三维地震调查施工面积119.53km²。

采集关键参数如下:震源为540in³GI枪“点震源”,沉放深度为5m;海底地震仪为长方形矩阵排列,总数量为28台,其中,8台为法国Sercel公司MicrObs,20台为国产HF-OBS。

4.2 试验效果

2008年在神狐海域进行了类似的联合采集海上试验,除震源($8 \times 20 \text{ in}^3$ 的SLEEVE枪“点震源”)和海底地震仪数量(5台MicrObs)不一致外,其他试验条件一致,具有一定的可比性。经过分析对比,认为:540in³的“点震源”系统在多个方面具有明显的效果—震源稳定性好;地层穿透能力较强;转换横波效果好。

为2009年采集资料的地震剖面,震源为540in³GI枪点震源(震源沉放3m),除震源变化外,其他参数与2008年采集一致;图9c为2009年采集资料的地震剖面(震源为540in³GI枪点震源,沉放5m)。

1)海底波形对比

图8a—c为同一地点,不同震源采集资料的海底波形的效果图。为了避免单独炮点因海况等偶然因素所导致的影响,处理时随机抽取100炮原始炮点数据,然后进行波形叠加,经过多次抽取、多次叠加后,剔除外界偶然因素影响的炮点,进行多次叠加后所得的波形用于分析。图8b中波形峰峰值明显增大,约为2008年采集资料(图8a)的峰峰值的2倍,而且波形的旁瓣及干扰波明显减少。综合对比认为:540in³GI枪点震源沉放5m时所采集资料,海底波形的峰值更大,干扰波幅值小,更加接近最小相位子波。

2)地层剖面(P波)综合对比

新型GI枪“点震源”使用后,沉放深度为5m

时, 在 2.3—2.7s 之间地层(特别是 T₃ 层)更加清晰可 辨(图 9c)。而 2008 年使用 8 × 20 in³ 套筒枪 “点震

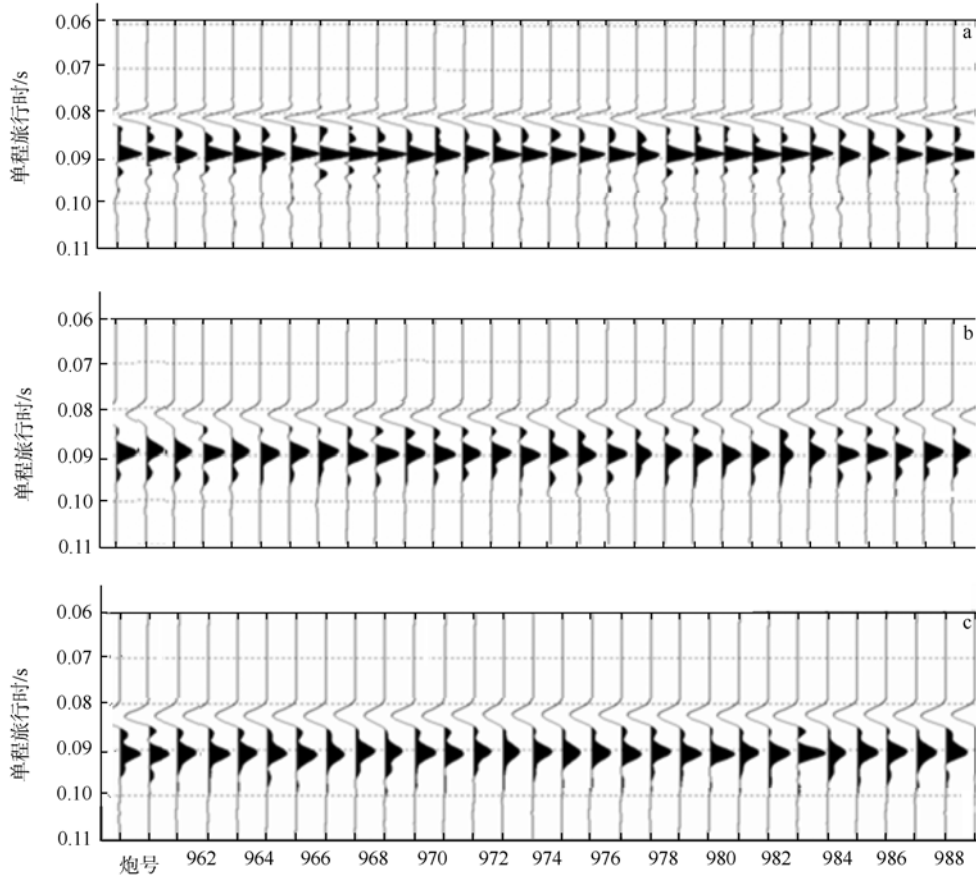


图 7 2008—2009 年海试不同震源直达波效果对比图

a. 2008 年采用套筒枪点震源(沉放 5m)激发得到的直达波接收效果图; b. 2009 年 GI 点震源(沉放 3m)激发得到的直达波接收效果图; c. 2009 年 GI 点震源(沉放 5m)激发得到的直达波接收效果图

Fig. 7 The direct wave effect comparison in the sea test of 2008-2009

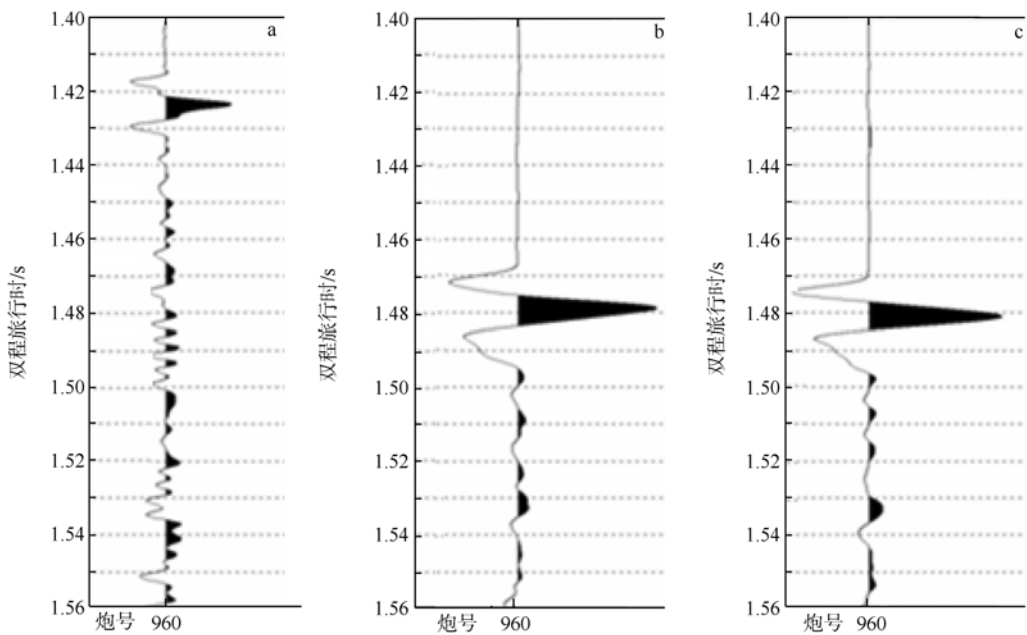


图 8 2008—2009 年海试海底波形对比图

a. 2008 年套筒枪点震源(沉放 5m)激发所接收的海底波形; b. 2009 年 GI 点震源(沉放 5m)所得到的海底波形; c. 2009 年 GI 点震源(沉放 3m)所得到的海底波形

Fig. 8 The waveform comparison of sea-bottom reflector in the test of 2008-2009

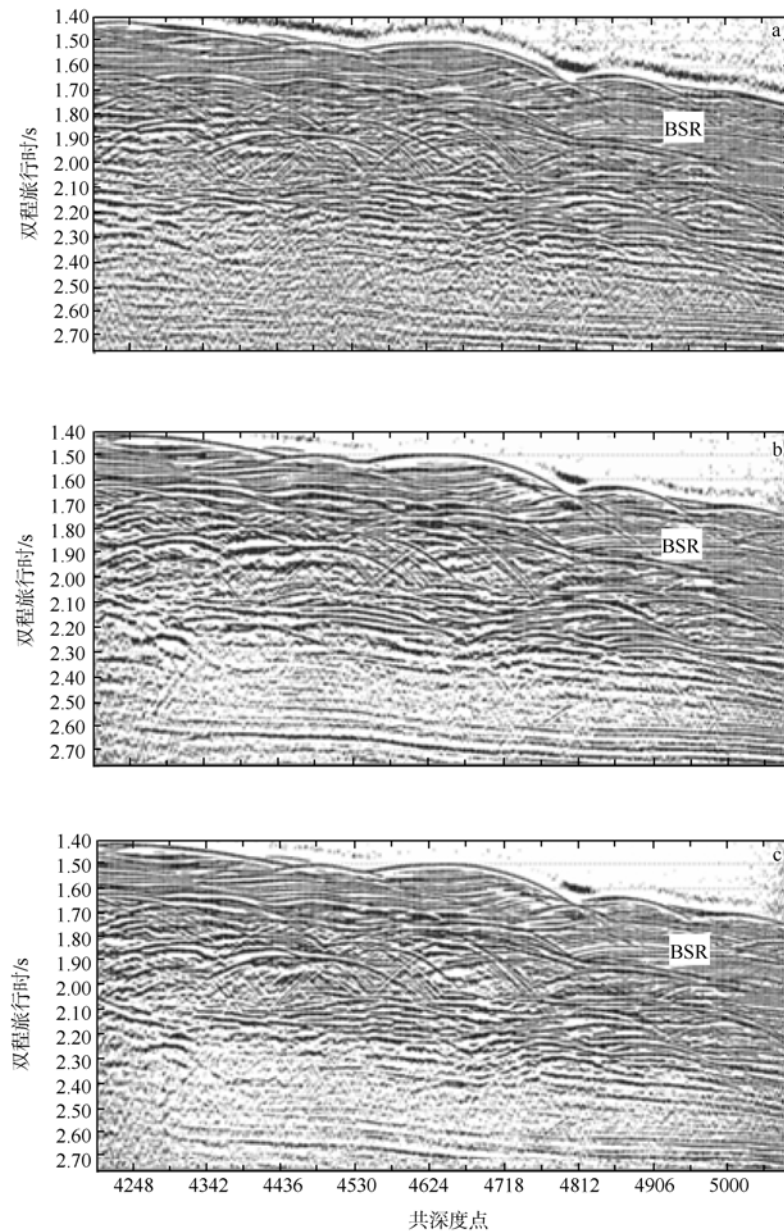


图9 不同震源穿透能力和气泡效果比较图

a. 2008年使用 $8 \times 20 \text{ in}^3$ 套筒枪点震源(沉放5m)激发得到的地震剖面; b. 2009年使用 540 in^3 GI枪点震源(沉放3m)激发得到的地震剖面; c. 2009年使用 540 in^3 GI枪点震源(沉放5m)激发得到的地震剖面

Fig. 9 The penetration performance and the bubble effects of different sources

源”所采集的资料(图9a), T_3 层及其邻近地层的同相轴不能得以突出, 难以分辨。

对于BSR及其邻近地层, 新型GI枪“点震源”使用后, BSR连续性变好, 更容易识别。

由于GI枪本身具有较强的压制气泡效应的作用, 而气泡效应所激发的地震波实际上就是一种干扰波。采用GI枪组合震源后, 从剖面上可以观察到气泡效应得到了一定程度上的压制。

3) 对比结果

综合对比分析, 认为: 2009年 540 in^3 GI枪“点震

源”系统作为激发震源时, 具有更好的地层穿透效果。

4.2.3 转换横波接收效果

图10为2009采用新型震源(540 in^3 GI枪点震源系统)所采集的MicrObs数据的海底地震剖面, 震源沉放深度为5m, 炮间距为25m。

1) 剖面说明

图10左图为OBS采集的Z分量数据(垂直分量), 中图为OBS采集的X分量数据(水平分量), 右图为OBS采集的Y分量数据(另一水平分量, 与X分量水

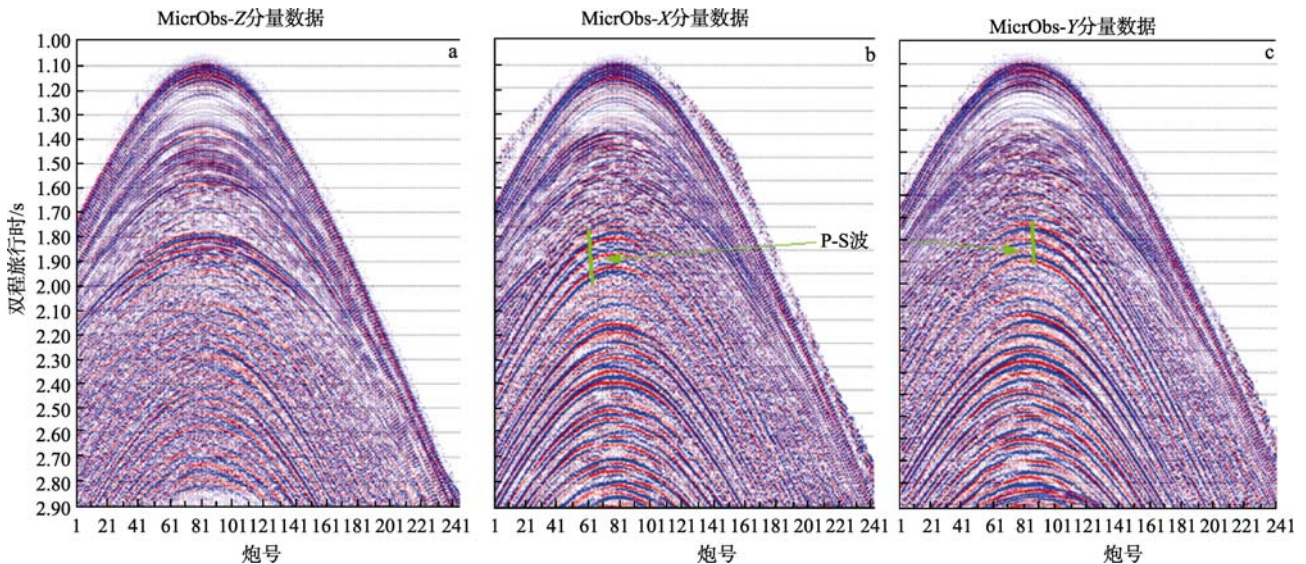


图 10 新型震源所采集的 OBS 数据的不同分量的地震剖面效果对比图

a. 海底地震仪 Z 分量地震剖面; b. 海底地震仪 X 分量地震剖面; c. 海底地震仪 Y 分量地震剖面

Fig. 10 The comparison between individual component seismic profile acquired by OBS with the new source

平正交)。

2) 转换波效果对比

由于 Z 分量垂直与 X、Y 分量所在平面, 因此, 通过 Z 与 X、Y 剖面的对比, 可以识别剖面上 P-S(转化横波)的接收效果。因为 P-S 波具有传播速度慢的特点, 与正常地层 P 波(或 P-P 波)相比, 在剖面上表现为波形开口宽度明显收窄(图中标识为 P-S 波的波形)。

另外, 由于 OBS 检波器本身具有各向异性的特点, X 分量与 Y 分量所接收 P-S 波表现为左右两部分幅值强弱不一样, 但具有互为补充的特点, 即, X 分量剖面的 P-S 波波形左半部分强, 右半部分弱, Y 分量与之相反。

3) P-S 波对比结果

分析对比认为: 2008 年采集资料, 由于震源能量较弱, OBS 数据剖面效果较差(OBS 的 X 分量只能反映出海底等几个主要地层界面的接收信息); 2009 年震源能量加大后, 海底地震剖面的地层信息更丰富, P-S 清晰可见(图 10)。

4.2.4 天然气水合物特征剖面的初步认识

1) 剖面说明

图 11 为 2009 年度在南海北部陆坡采用准三维地震与海底地震数据技术所得到的地震剖面。图 11a 为常规二维地震剖面(准三维原始测线剖面); 图 11b 为 OBS 四个分量的剖面对比, 从左到右的排列顺序分别为 H 分量、Z 分量、X 分量和 Y 分量。

2) 准三维测线剖面

由于准三维采集原始测线全部由单条二维地震测线组成, 因此, 图 11 中的准三维测线剖面就是常规的二维测线剖面。图 11 中的 OBS 投放到海底, 位于常规二维测线的正下方。剖面上红色虚线(红色圆点组成的虚线)表示 BSR, 具有极性反转(相对于海底极性)、与地层斜交(穿层特征)等水合物典型特征, 另外, 振幅空白带特征也比较明显。但受该测线天然气水合物地震地质条件的影响, 常规剖面上 BSR 连续性较差, 比较难以辨认。

3) OBS 数据剖面

BSR 标志: OBS 水听器剖面(H 分量)具有常规二维地震剖面的特征, 由于不具备波形反转等特征, 从剖面上很难判断是否为 BSR 标志; Z 分量剖面波形反转比较明显(极性颜色为红色, 与海底极性蓝色相反); X 分量与 Y 分量上极性反转特征也较明显, 由于 OBS 检波器本身的各向异性, 在 X 分量上 BSR 左半部分幅值较强, 右半部分幅值较弱, Y 剖面正好相反。

振幅空白带: BSR 之上的振幅空白带在 Z、X 和 Y 剖面上表现比较明显; 在 H 剖面上表现较弱。

地层分辨率: 与震源改进前的剖面效果(图 3)相比, BSR 邻近地层同向轴的个数明显增多, 分辨率较高; 由于检波器结构差异, Z、X、Y 分量采用陆地检波器(音圈检波器), 而 H 分量为水听器(压力检波器), 因此, Z、X、Y 分量的地震剖面 BSR 邻近地层

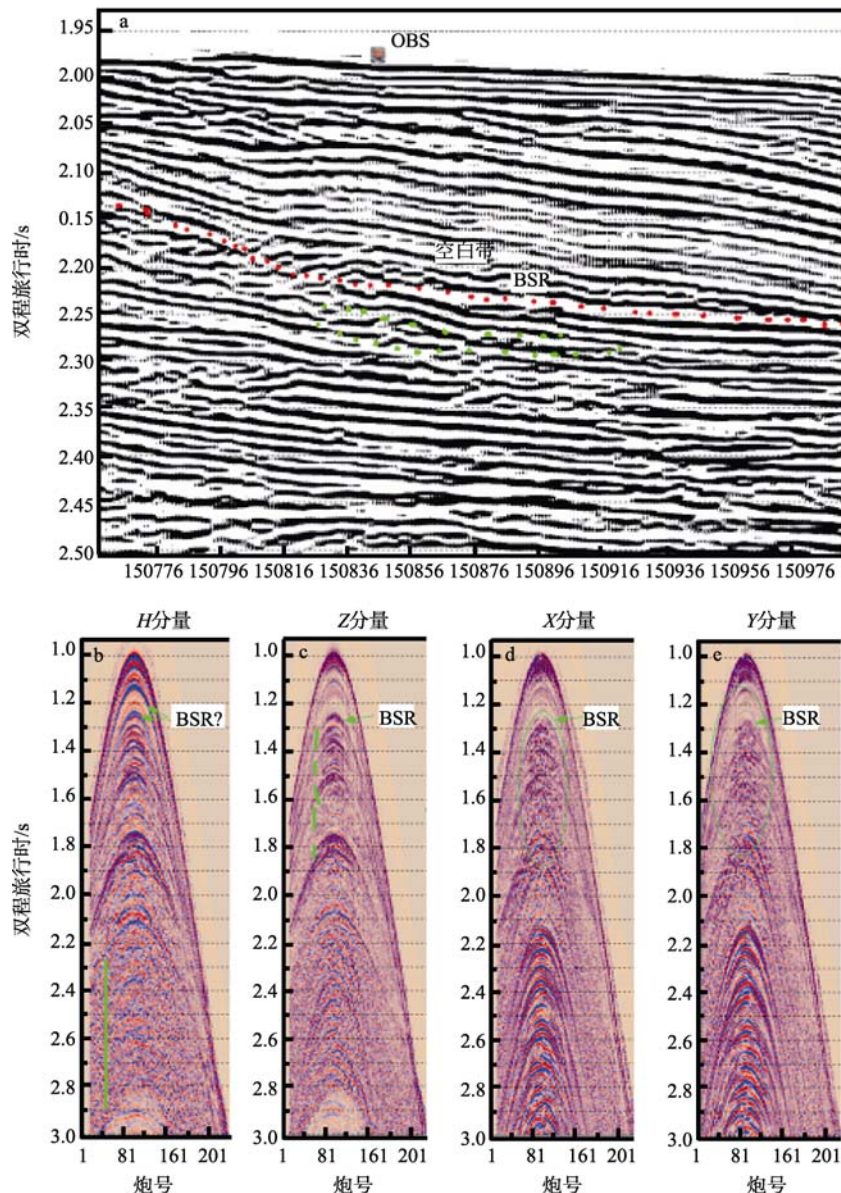


图 11 新型震源所采集的天然气水合物 OBS 剖面地质效果初步分析

a. 经过 OBS 站位的高分辨率地震剖面; b. OBS 水听器分量(H 分量)地震剖面, 剖面上水合物特征不明显 (1.2-1.3s 标示 BSR? 处), 并且深部地层特征也不能很好地得以突出 (2.3-2.9s 绿色竖线对应的地层), 可见 H 分量所得的纵波剖面具有一定局限性, 须依靠横波资料提高分辨率及突出水合物标志特征; c. OBS 垂直分量(Z 分量)地震剖面, 在垂直分量剖面上尽管浅地层反射强度有所下降 (1.3-1.9s 绿色虚线对应的地层), 但 BSR 反射特征明显增强, 深部地层特征明显加强 (2.3-2.9s); d. OBS 水平分量(X 分量)地震剖面, 横波剖面突出了水合物 BSR 及其邻近地层的分辨率 (1.3-1.8s 绿色圈所对应的地层); e. OBS 水平分量(Y 分量)地震剖面, 1.2-1.8s 绿色圈所对应的地层分辨率明显提高

Fig. 11 The preliminary analysis of the geology effects of the profile acquired by OBS with the new source

信息比较丰富(绿色虚线指示部分)。

地层穿透力: 与 H 分量剖面相比, Z、X、Y 能够接收到更深层的地层信息, 表明穿透能力有所加强, 更有利于接收 BSR 之下的地球物理信息(H 分量中绿色实线所对应的区域)。

4) 几点认识

结果表明: 新型震源在 2009 年的天然气水合物三维与海底地震勘探中起到了比较关键的作用, 与

以往资料相比, OBS 分量的接收的 P 波、P-S 波信息更加丰富; 地层勘探深度明显增加; 为下一步精细速度剖面的处理及资料解释提供了品质优良的野外采集资料。

5 结论

1) 海洋天然气水合物三维地震与海底地震勘探技术在海洋天然气水合物调查中震源技术是决定调

查成功与否的关键技术之一。

2)震源须围绕突出水合物特征为主线来进行设计,即对于海底地震调查来说,要求震源具备足够大的能量,足以产生品质较好的纵波和转换横波信息,同时,对于准三维地震调查来说,必须满足水合物高分辨率地震调查的要求,因此,震源设计须综合考虑震源输出能量、激发主频范围、激发频带宽度、震源稳定性等综合因素。

3)本文通过分析 with 试验对比,介绍了 540in³GI

枪震源系统的设计与试验对比。由于 GI 枪具有较好的稳定性及气泡抑制效果,而且通过机械设计可以缩小震源尺寸大小,满足“点震源”的设计要求。Nucleus 软件模拟结果表明:震源的输出 P-P 值为 19bar-m,波泡比为 42,输出频宽为 10—300Hz,主频范围为 30—90Hz。

试验对比结果表明:无论从地震纵波还是从地震横波的接收效果来说,540in³的 GI 枪点震源可以获得较好的天然气水合物调查效果。

参考文献

- [1] HORNBAACH J M, HOLBROOK W S, GORMAN R A, et al. Direct seismic detection of methane hydrate on the Blake Ridge[J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 92–100.
- [2] GORMAN A R, HOLBROOK W S, HORNBAACH M J, et al. Migration of methane gas through the hydrate stability zone in a low-flux hydrate province[J]. *Geology*, 2002, 30(4): 327–330.
- [3] VANNESTE M, BATIST M D, GOLMSHTOK A, et al. Multi-frequency seismic study of gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, Siberia[J]. *Marine Geology*, 2001, 172(1/2): 1–21.
- [4] KHLYSTOV O, VAN P R, DE M-BATIST, et al. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal[J]. *Geology*, 2002, 30(7): 631–634.
- [5] VANNESTE M, POORTA J, BATIST M D, et al. A typical heat-flow near gas hydrate irregularities and cold seeps in the Baikal rift zone[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 19(2003): 1257–1274.
- [6] HAACKE R R, WESTBROOK K G, PEACOCK S, et al. Seismic anisotropy from a marine gas hydrate system west of Svalbard[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates. Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. http://www.gas-hydrate.org.cn/symposium/symp_21_1.pdf.
- [7] ROSSI G, MADRUSSANI G, GEI D, et al. Velocity and attenuation 3d tomography for gas hydrates studies: the NW offshore Svalbard case[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates. Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. http://www.nioz.nl/public/symposia_workshops/arctic/poster/madrussani.pdf
- [8] WESTBROOK K G, BUENZ S, CAMERLENGHI A, et al. Measurement of P- and S-wave velocity, and the estimation of hydrate concentration at sites in the continental margin of Svalbard and the storegga region of Norway[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. <http://eprints.soton.ac.uk/28653/>.
- [9] INAMORI T, HATO M, SAEKI T. Delineation of gas hydrate-bearing sediments by multi seismic attributes using 3d seismic survey, offshore Tokai[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. http://www.gas-hydrate.org.cn/symposium/symp_21_1.pdf.
- [10] ASAKAWA E, WARD P, VANNESTE M, et al. Ocean bottom seismometer wide-angle reflection study of gas hydrate accumulations in Nankai trough, offshore Tokai[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates. Trondheim, Norway: Norway ICGH5 Organising-Committee, 2005. http://www.gas-hydrate.org.cn/symposium/symp_21_1.pdf.
- [11] 张光学, 黄有样, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 27–56.
- [12] NOUZÉ H, LAFOY Y, GÉLI L, et al. First results of a high resolution seismic study of a bottom simulating reflector in the fairway basin, offshore new Caledonia[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. http://d.wanfangdata.com.cn/periodical_dzjkqb200604006.aspx
- [13] TINIVELLA U, ACCAINO F, et al. Gas hydrates and active mud volcanism on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 28(2): 97–106.
- [14] 张明, 伍忠良. 天然气水合物 BSR 的识别与地震勘探频率[J]. *海洋学报*, 2004, 26(4): 80–88.
- [15] ZÜHLSDORFF L, SPIEB V. Pockmarks in the Northern Congo Fan area, SW Africa: Complex seafloor features shaped by fluid flow[J]. *Marine Geology*, 2008, 249(3/4): 206–225.
- [16] JOHNSTON R C, REED D H, ANDDESLE J F. Special report on marine seismic energy source standards[J]. *Geophysics*, 1998, 53(4): 566–575.
- [17] 何汉漪. 海洋高分辨率地震技术及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 60–62.
- [18] 陆敬安, 伍忠良, 曾宪军. 海洋地震勘探中地震波、鬼波综合效应分析与应用[J]. *海洋技术*, 2006, 25(4): 76–78, 98.
- [19] 伍忠良, 曾宪军, 王立明. 海洋天然气水合物调查地震采集技术-调查初始阶段研究[J]. *海洋技术*, 2006, 4(25): 79–87.
- [20] 伍忠良, 曾宪军, 王伟巍. 海洋天然气水合物调查地震采集技术-调查深入阶段[J]. *海洋技术*, 2007, 26(4): 110–114.
- [21] 张明, 彭朝旭, 沙志彬. 天然气水合物准三维地震调查导航定位技术[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 101–106.
- [22] 赵庆献, 韩立国, 伍忠良, 等. 天然气水合物准三维地震勘探电缆动态定位精度研究[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(5): 936–941.