

文章编号:1009-2722(2015)06-0050-05

# 小道距高分辨率多道地震 对天然气水合物勘查的适用性

褚宏宪,孙运宝,秦轲,杨源,齐君,冯京

(1 国土资源部海洋油气与环境地质重点实验室,青岛 266071;2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

**摘要:**在海底以下 100~1 100 m 的沉积层的地质勘探中,小道距高分辨率多道地震勘探可以获得高信噪比、高分辨率的地震资料。选取合适的地震采集参数,小道距高分辨率多道地震采集技术同样适用于天然气水合物勘查,针对水合物勘探选取合适的地震采集和地震处理参数,可以提高浅部地层分辨率和水合物识别精度。海上地震采集参数设置是非常重要的,尤其是高的采样率为后续地震数据处理,提高剖面分辨率提供了可能。

**关键词:**天然气水合物;小道距;多道地震;高分辨率

中图分类号:P315;TE51

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.06008

我国从 20 世纪 90 年代开始了天然气水合物的研究和勘查工作。海域天然气水合物勘查方法主要有地球物理、地球化学、钻探等方法,地震勘探是目前天然气水合物勘查最常用的方法,多道地震作为一种常规二维地震勘探方法已经广泛应用于油气资源勘探、区域地质调查和海洋工程勘察等领域,常规多道地震系统具有排列较长、道间距大、震源能量大、激发频率低等特点,对于区域石油地质勘探及深部地层构造研究效果显著。常规多道地震排列较长,道间距大,施工复杂,但地层分辨率较低,对于 500~1 000 m 深度以内地层和小型构造分辨率低,而对于薄层分布的天然气水合物更难以识别。随着海洋地球物理调查技术的不断发展,高分辨率地震勘探已被逐渐引入浅海工程勘探<sup>[1]</sup>。海域高分辨率多道地震排列短、道距小、震源能量小、炮间距小、频率高<sup>[2-6]</sup>,既能

保证施工过程方便、实用、经济,又能够提供更高精度的地震数据。2014 年 7 月,青岛海洋地质研究所在渤海海峡海域进行了小道距高分辨率多道地震探测。外业采集系统主要由电火花震源、24 道数字固体缆及采集系统组成,通过海域高分辨率系统的试验、数据采集和外业质量监控,获得了高分辨率的地震数据,地层最大穿透深度 1 000 m 或基岩顶面以上,分辨率可达 2.5 m。海洋天然气水合物大多分布在水深 >300 m 的深水区,赋存于埋藏深度为海底下 100~1 100 m 的沉积层中。以往南海水合物勘探表明,水合物稳定域的地震子波主频在 70 Hz 左右,频带宽度约 50~100 Hz<sup>[7]</sup>。因此,针对天然气水合物勘查,合适的地震采集参数,小道距高分辨率多道地震采集技术同样适用,可以提高浅部地层分辨率和水合物识别精度,扩大了近海浅层高分辨率地震的应用领域和范围。

收稿日期:2015-03-09

基金项目:中国地质调查局国家海洋地质专项(GZH201100308, GZH201200504);国家自然科学基金(41276060)

作者简介:褚宏宪(1973—),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事海洋地球物理研究工作。E-mail:chx-8@163.com

## 1 小道距高分辨率多道地震技术

地震波在天然气水合物地层中的传播速度高于周围地层,而其下伏地层通常因水合物分解的游离气体影响而形成低速层,与上覆高速层之间

形成一个明显的波阻抗界面,在地震剖面上反映为近似平行于海底的反射界面,称为似海底反射(BSR),对应于水合物稳定带的底界<sup>[8]</sup>,BSR 被普遍认为是天然气水合物的标志性地震反射特征,振幅空白带、极性反转、速度异常、地震属性等也是识别天然气水合物的重要依据,地震探测方法是研究海洋天然气水合物的重要手段。

### 1.1 地震采集系统

地震测量系统由船载系统和拖曳系统等组

成。拖曳系统包括震源、接收拖缆和电缆;船载系统包括震源控制器、数据采集和处理平台、导航定位系统。图 1 为高分辨率 24 道地震设备平面布置图,定位仪和测深仪采用固定安装,电火花震源或气枪震源从船尾中间释放,震源拖缆和接收拖缆采用拖曳方式作业。

#### 1.1.1 采集设备

##### (1) 震源

常见的海洋地震震源主要采用电火花、水枪、气枪 3 种。高分辨率多道地震勘探作业一般采用

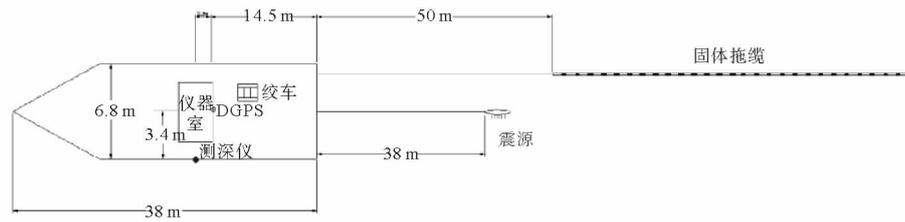


图 1 24 道地震测量设备布置平面图

Fig. 1 Layout of the multi-channel seismic system

电火花或 GI 气枪做为震源,而气枪震源子波频率低、穿透深度大,主要用于深层地震勘探;电火花震源子波频率较高、穿透深度较小,主要用于浅层高分辨率地震勘探。高分辨率地震采用的震源要求震源能量低、主频高,震源采用低容量气枪或高能量电火花震源,气枪主要采用 30~120 in<sup>3</sup> GI 枪,电火花震源为英国 AAE 公司生产的 Delta Sparker,震源控制器为 CSP-S,发射能量为 1 500~6 000 J,触发间隔为 0.5~2 ms。

##### (2) 多道接收电缆

地震信号接收拖缆是地震数据采集的重要组成部分,其性能指标参数直接影响到外业数据采集的质量。在选取海上多道地震电缆时,要获得高分辨率的地震资料应考虑接收电缆的道数、道间距、最大偏移距等参数指标。高分辨率地震调

查使用的接收电缆一般有 8、12、24、48、60、96 道等。目前多道地震接收拖缆主要有冲油缆和固体缆 2 种,GeoEel Solid 24 道固体海洋数字地震拖缆系统是 Geometrics 公司推出的世界上第 1 套小直径、高性能的海洋数字地震拖缆系统,固体缆内部充有惰性硅油,与传统油缆相比,噪音明显减少,信噪比提高明显,同相轴更加清晰。拖缆组成主要有甲板缆、前导段拖缆、隔离段、弹性段和拖缆工作段,其中前导段拖缆 80 m,隔离段 10 m,将来自船体或尾标的震动隔离,弹性段 10 m,用于减小来自船体或尾标的拖拽引起的起伏运动。固体缆工作段(3 段):拖缆直径 38 mm,每段 8 道,100 m 长,12.5 m 道间距,每道 8 个水听器组合、1 个 A/D 转换模块,24 道固体缆组成框图见图 2。

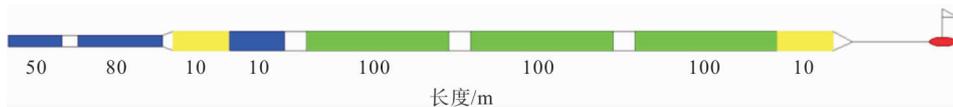


图 2 24 道数字固体缆组成框图

Fig. 2 Diagram of the 24-channel digital solid towing

### (3) 多道记录系统

高分辨率的多道地震仪器要求具有较高的采样率,常用的有美国 Geometrics 公司生产的海洋地震仪,该地震仪能够在拖缆上通过 A/D 模/数转换模块直接实现接收过程的 A/D 转换,实现了真正意义上的数字化采样。采样率 1/16、1/8、1/4、1/2、1、2、4 ms;带宽 5~8 000 Hz。导航定位数据和震源触发信号由 HAIDA 海洋测量软件提供和控制。

## 1.2 地震资料处理

常规的地震资料处理工作主要包括预处理、定义观测系统、噪音分析及衰减、带通滤波、真振幅恢复、增益处理、噪音分析及其压制、多道地震资料多次波的压制、反褶积、速度叠加等 11 个过程,地震资料数据处理的重点放在随机噪音的分析识别和压制、叠加速度分析和叠后信号增强等<sup>[9-11]</sup>。

在针对水合物勘查目的的地震处理过程中,应结合水合物特性及其地震反射特征,进行有针对性的处理,用以突出强化水合物在地震剖面上的表现特征,实现地震资料的高信噪比和高分辨率的目的,主要进行以下过程的控制:①针对含水合物地层的层速度异常,进行详尽的速度分析,多次迭代以得到最佳的叠加速度;②针对含水合物层底界反射系数为负的特点,进行合适的子波处理,使反射波的反极性特征更加明显,同时使原始

波形得到最大限度的保持;③为保持似海底反射及空白带的相对振幅关系,进行真振幅恢复处理,并在处理过程中尽可能使用保幅处理模块;④针对含水合物层底界同相轴通常与正常沉积地层斜交的特性,处理中采用 DMO 叠加(叠前部分偏移)方式,使这一特征能较好成像,DMO 叠加后地层接触关系更明显<sup>[7]</sup>。

在地震数据处理中,对数据的重采样,对提高地层的分辨率效果明显,前提是外业数据采集的采样率要尽可能高,应该不小于 0.25 ms,例如 Lee 等<sup>[5,10]</sup>进行数据重采样率 0.2、0.4、0.8、1 ms 等处理效果后对比发现,0.2 ms 重采样率地震剖面浅部分辨率可以达到 0.7 m。

## 2 小道距高分辨率多道地震对天然气水合物勘查的适用性

由于小道距多道地震具有地层分辨率高的优势,在工程环境地质调查、区域构造稳定性调查方面获得了成功的应用,如在某项目调查中获得的高分辨率地震剖面,剖面反射波结构清晰,构造成像较清晰,剖面上断点、断面较清晰,波组特征较清楚,接触关系较明显,该特征在常规的二维地震剖面较难识别。采集主要参数为:24 道固体缆,道间距 12.5 m,覆盖次数 12 次,沉放深度 1 m,偏移距 12.5 m,采样率 0.5 ms(图 3)。

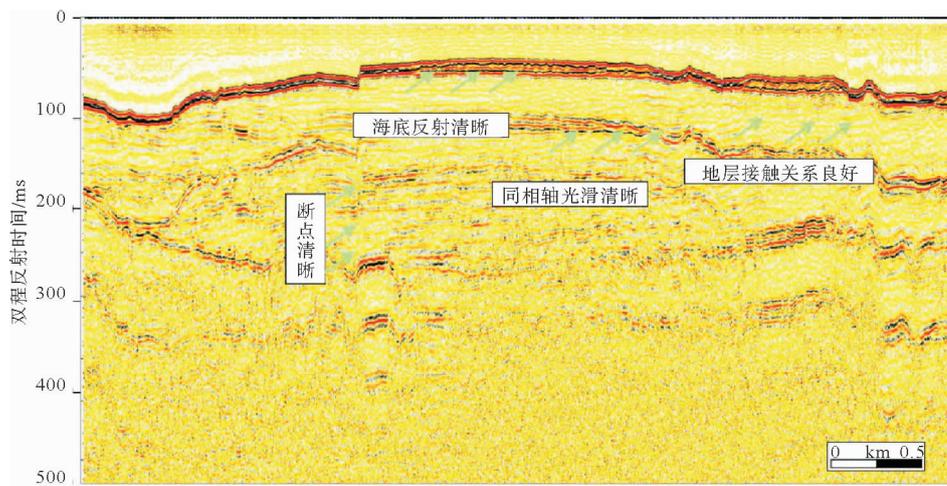


图 3 高分辨率地震剖面显示的浅部断层

Fig. 3 A high resolution seismic profile showing the shallow faults

天然气水合物多赋存于海底面下 100~1 100 m 地层中,这类浅部地层在二维地震勘探中常被忽视,而小道距高分辨率地震勘探在浅部地层具有较高的地层分辨率,通过应用已经获得许多成功经验。

天然气水合物矿在海底地层中以似冰状存在,使沉积层的声速、振幅等声学特征发生改变,充填使水合物晶体的沉积层密度增大,形成声波传输的高速层,而其下伏地层常因水合物的游离气体影响密度变小,成为低速层,两者间形成波阻抗界面。由于水合物的存在与压力、温度密切相关,所以在地震剖面上反映为一组海底相似的负阻抗强反射界面,称为似海底反射,简称为“BSR”,BSR 反射波常切穿倾斜的地层反射波,与海底波近平行状,但极性相反,这种反射特征在过去的二维常规地震调查中常因无法识别而被遗漏或当成海底多次波处理<sup>[12]</sup>。水合物识别的地震反射特征除“BSR”反射以外还有振幅空白带、极性反转、低速异常等特征。对于渗漏型天然气水合物的识别,高分辨率多道地震反射数据可以分别对水体和地层成像,水体的成像结果可以显示海底气泡流的异常,地震反射剖面显示在海底处出现海底下陷、气体溢出口等与甲烷渗漏相关的地形地貌特征,因此,多道高分辨率地震反射数据具有探测渗漏型天然气水合物的能力。

获得高信噪比、高分辨率的地震资料是高分辨率地震勘探的关键,针对不同调查目的及调查区地震地质条件,需要采用不同的海上地震采集的激发与接收参数组合。根据王后金等<sup>[7]</sup>对南海水合物地震勘探资料研究,水合物稳定域的地震子波主频在 70 Hz 左右,频带宽度约 50~100 Hz,而常规油气层的埋深通常>2 000~3 000 m,子波主频往往<40 Hz,在深层仅为 20~25 Hz。常规油气勘探要求频带更宽,一般要达到 20~120 Hz。因此,天然气水合物勘探与常规油气勘探需要选取不同的地震采集参数。针对天然气水合物调查目的,震源选择的容量更低,既能穿透目的层,又减少噪音影响;震源与电缆沉放深度更浅,随着震源与电缆沉放深度减小,高频能量增强且有效频带变宽,有助于提高分辨率;接收道数和覆盖次数更低,由于水合物勘探目的层埋深浅,反射范围窄,所选参数应能保证充分接收所需反射

信息;偏移距、采样率更小,提高了原始采集资料的分辨率。

### 3 结论

(1)海上地震采集参数设置是非常重要的,尤其采样率,应该取高值,高的采样率为后续地震数据处理提高剖面分辨率提供了可能。

(2)通过采用高频电火花震源,配合多道固体地震拖缆获得的高分辨率多道地震数据,通过数据处理地层垂向分辨率可达 2.5 m,增加了地层的可探测深度(不低于 1 000 m),为开展浅海工程地质研究提供了更高精度的基础数据。

(3)小道距高分辨率地震勘探在浅部地层具有较高的地层分辨率,同样适用于天然气水合物勘查,但应选取合适的地震采集和地震处理参数。

#### 参考文献:

- [1] 张志强,汤民强,周普志,等. 24 道高分辨率多道地震系统的配置与探测效果分析[J]. 海洋技术,2011,30(2):107-108.
- [2] 张勇,田双凤,周建平,等. 小排列高分辨率多道地震系统在岱山岛大桥工程中的应用[J]. 海洋学研究,2008,26(4):105-106.
- [3] Nissen S E, Combes J M, Nekut A G. Acquisition, processing, and analysis of shallow, high-resolution seismic data from the outer continental shelf and upper slope, offshore Louisiana [J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(2): 200-316.
- [4] Bellefleur G, Duchesne M J, Hunter J, et al. Comparison of single-and multichannel high-resolution seismic data for shallow stratigraphy mapping in St. Lawrence River estuary, Quebec[DB/OL]. Current Research, 2006-D2. 2006: 1-10.
- [5] Lee H Y, Park K P, Koo N H, et al. High-resolution shallow marine seismic surveys off Busan and Pohang, Korea, using a small-scale multichannel system[J]. Journal of applied geophysics, 2004, 56(1): 1-15.
- [6] Mosher D C, Simpkin P G. Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: data acquisition [J]. Geoscience Canada, 1999, 26: 174-187.
- [7] 王后金,沙志彬,梁劲.南海神狐暗沙海区天然气水合物地震识别[J].新疆石油地质,2013,34(1):82-83.
- [8] 徐华宁,杨胜雄,郑晓东,等.南中国海神狐海域天然气水合物地震识别及分布特征[J].地球物理学报,2010,53(7): 1 691-1 698.

- [9] Lee H Y, Hyun B K, Kong Y S. PC-based acquisition and processing of high-resolution marine seismic data[J]. *Geophysics*, 1996, 61(6): 1 804-1 812.
- [10] Lee H Y, Kim W, Koo N H, et al. Resolution analysis of shallow marine seismic data acquired using an airgun and an 8-channel streamer cable[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 105: 203-212.
- [11] Marsset B, Missiaen T, De Roeck Y H, et al. Very high resolution 3D marine seismic data processing for geotechnical applications[J]. *Geophysics Prospect*, 1998, 46(2): 105-120.
- [12] 杨文达, 刘望军. 海洋高分辨率地震技术在浅部地质勘探中的运用[J]. *海洋石油*, 2007, 27(2): 18-24.

## APPLICATION OF SMALL-SCALE ARRAY HIGH-RESOLUTION MULTI-CHANNEL SEISMIC TO GAS HYDRATES EXPLORATION

CHU Hongxian, SUN Yunbao, QIN Ke, YANG Yuan, QI Jun, FENG Jing

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In the study of sea bottom sediments in the depth ranging 100-1100 m, the small group interval high-resolution multi-channel seismic system is effective to acquire high signal-to-noise ratio data and high resolution seismic data, and helpful for selection of suitable seismic acquisition parameters. The small group interval high-resolution multichannel seismic acquisition technology is also useful to natural gas hydrate exploration, selection of appropriate seismic acquisition parameters and data processing parameters. It may improve the resolution in the study of shallow strata and hydrate beds. The selection of marine seismic acquisition parameters is very important, and the increase in sampling rate will help the subsequent seismic data processing so as to improve the resolution of stratigraphic divisions.

**Key words:** gas hydrates; small group interval; multi-channel seismic; high-resolution