

天然气水合物 BSR 的识别与地震勘探频率

张 明¹, 伍忠良¹

(1. 国土资源部 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要: 地震勘探是调查天然气水合物广泛使用而有效的方法, 而 BSR 是水合物赋存的主要标志. 通过对实际调查资料的分析对比, 结合国外的调查研究成果, 探讨了地震勘探频率在 BSR 识别中的影响和作用, 提出了在我国海洋天然气水合物的地震调查中有利于 BSR 识别的合适的频率范围.

关键词: 水合物; BSR; 地震调查; 频率

中图分类号: P618.13; P631.4⁺14

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2004)04-

0080-09

1 引言

天然气水合物(gas hydrates)是一种由水分子和气体分子组成的具有三维笼状分子结构的似冰状结晶化合物, 主要赋存于具有低温、高压环境的海洋大陆边缘和高纬度冻土层中. 根据有关资料, 海洋中的天然气水合物主要分布于水深大于 300 m 的海底地层中, 埋藏深度大约在海底以下 0~1 000 m, 矿层厚度可达数十厘米至数百米. 据估算, 在世界各大洋中已发现的天然气水合物总资源量约为 $1.8 \times 10^{16} \sim 2.6 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ^[1], 大约相当于全世界已知煤、石油和天然气总储量的 2 倍, 是世界各国瞩目的具有商业开发前景的战略资源.

对天然气水合物资源调查而言, 地震勘探方法仍是目前应用最广泛而有效的方法, 从已发现水合物的地区统计数字来看, 用地震手段发现的占绝大多数. 海洋沉积物中存在天然气水合物的最直观证据是具有异常的地震反射, 大多位于海底之下几百米处, 且与海底近于平行, 人们通常称这种异常地震反射为拟海底反射——BSR(bottom simulating reflection)(见图 1)^[2]. BSR 的形成是由于水合物的形成和赋存要满足一定的温度-压力条件(见图 2)^[2], 当天然气处于这种满足温度-压力条件的环境中时就会形成水合物, 因此 BSR 就代表了水合物矿层的底界, 寻找 BSR 的分布就成为水合物调查的基础.

收稿日期: 2003-11-28; 修订日期: 2004-06-11.

基金项目: 国家“863”计划课题资助项目(2001A A611020-01/1).

作者简介: 张 明(1957-), 男, 广西壮族自治区容县人, 高级工程师, 从事海洋地质地球物理勘察研究. E-mail: zhang-

ming@gmgs.com.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www>

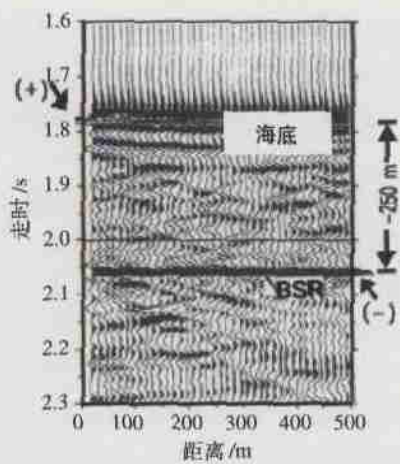


图 1 BSR 的表现形式

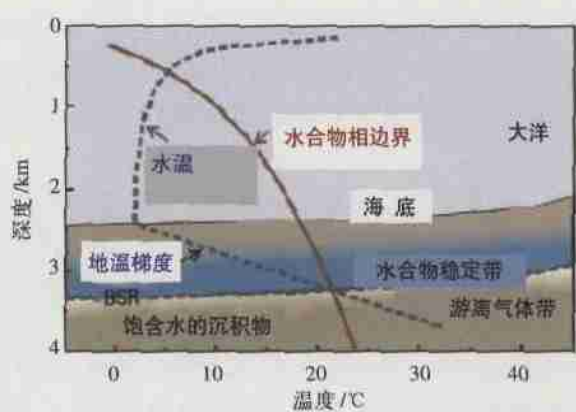


图 2 水合物赋存要满足的温度-压力条件

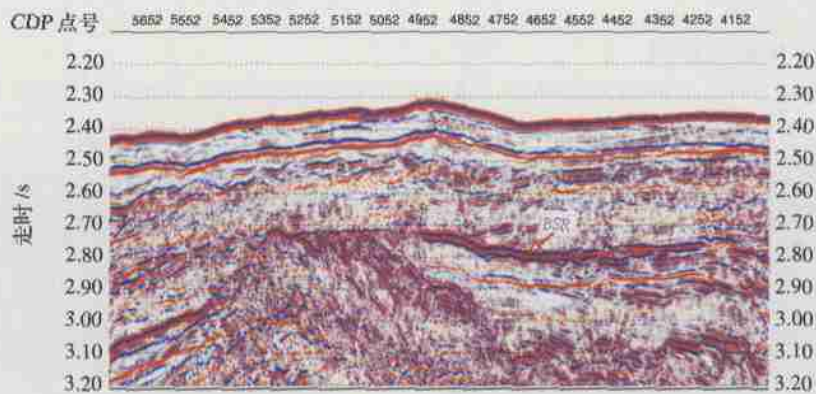


图 3 1999 年在南海某地调查时得到的有 BSR 显示的地震剖面



图 4 2001 年在南海某地调查时得到有 BSR 显示的地震剖面, 图中的 BSR 的显示清晰可辨, 且与沉积地层斜交. 该段剖面的水深约为 3 000 m, BSR 反射距海底约 500~600 ms

2 地震勘探频率与 BSR 的响应关系

根据有关资料^[4], 在 20~ 650 Hz 的频带内都可以观察到与水合物有关的 BSR 反射, 但其反映的形态各异, 究竟水合物的赋存对什么样的地震勘探频率响应较好, 对 BSR 的显示更清晰, 更易于识别, 我们根据实际采集的资料进行了试验对比, 同时参考国外的一些资料进行了探讨和研究。

广州海洋地质调查局是我国首先开展天然气水合物调查的单位, 在过去的几年中收集了上万千米的天然气水合物地震资料, 在南海发现了水合物的赋存标志 BSR(见图 3 和 4)。

得到这两幅图所使用地震调查方法不尽一致, 前者使用 96 道, 排列长度约为 1.2 km; 震源为 2.621 936 dm³ 的组合枪阵, 勘探主频约为 100 Hz; 后者采用的地震调查参数为电缆 240 道(约 3 000 m), 沉放 10 m, 震源沉放 8 m, 容量为 46.491 613 dm³, 主频约为 35 Hz。这说明在南海地震调查的频率高至 100 Hz 和低至 35 Hz 都能对 BSR 显示, 但似乎后者反映的 BSR 特征更为典型, 其 BSR 之上的空白带及 BSR 对沉积地层的切割都很清晰, 即勘探频率低对 BSR 的识别有利, 但由于它们所处的位置距离相差很大, 位于不同的沉积环境, 因此还不能完全说明问题, 为此我们利用在 2002 年沿一条水合物调查剖面收集的地震资料对不同频率的处理结果进行了对比。

2.1 分段滤波 BSR 的识别

我们把 0~ 120 Hz 的频带分段对同一条显示 BSR 的剖面进行了滤波处理(图 5~ 7)。由

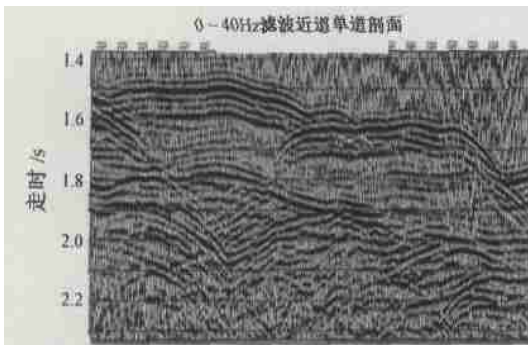


图 5 0~40 Hz 滤波效果图

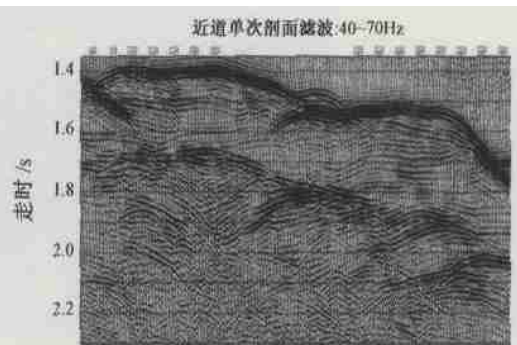


图 6 40~70 Hz 滤波效果图

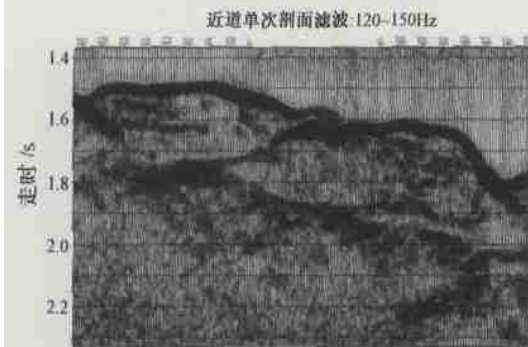


图 7 120~150 Hz 滤波效果图

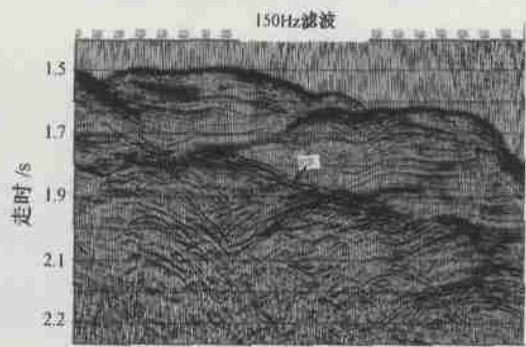


图 8 10~150 Hz 滤波效果图

图5~7的对比可知,通过0~40 Hz频段的滤波,可以连续追踪BSR,但地层细节不清晰,通过40~70 Hz频段的滤波,BSR的连续性较好,地层细节也较为清晰;当滤波频段为120~150 Hz时在海底和BSR的强反射界面由于高频信号的波长较短,形成了多个相位的反射波组,而不是单一的反射波组,这对BSR的连续性识别不利。

2.2 频宽的处理和BSR识别对比

考虑频宽的影响,对上述剖面进行了各种不同频带宽度的滤波处理(固定低截止为10 Hz,变动高截止频率),为了消除其他处理(动校、叠加、反褶积等)的影响,对单次剖面我们使用不同滤波方式进行分析(见图8~10),以突出频率影响。

通过处理得到的结果分析(见图8~10)可以看出,当高截止频率从150 Hz降到120 Hz时,效果差不多,这其中有两个原因:一是接收到的信号频率高频成分不多,二是高频成分对BSR显示的贡献不大。从100 Hz以下,频率越低,BSR的连续性变好,频率愈低,有利于突出强反射界面的特性,但也可以看出,其内部结构的分辨率降低。当高截止为40 Hz的滤波时,虽然BSR强发射界面特征不受影响,但该界面与地层反射界面的接触关系变得模糊,不如高截止为70 Hz滤波时兼顾了两方面的因素(见图11)。通过比较我们认为天然气水合物的主要识别标志BSR在频宽10~120 Hz,主频为40~70 Hz时可以得到突出。这在远道(大偏移距)上

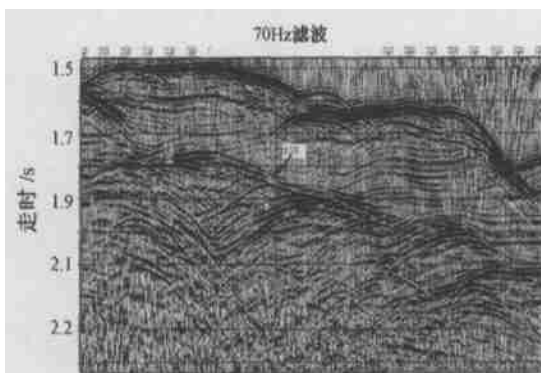


图9 10~70 Hz滤波效果图

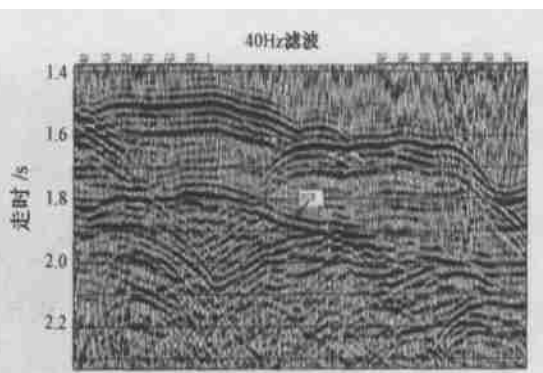


图10 10~40 Hz滤波效果图

就更明显了(见图12)。与图6相比,图12中的BSR的连续性更好。从国外水合物调查的相关资料^[3]的对比分析中也得到类似的结果。图13是在贝加尔湖用气枪阵采集的一段多道(96道,最大偏移距为2 895 m,最小偏移距为495 m)地震剖面,枪阵激发的频带为7~110 Hz,主频为40 Hz。在图上的2.3 s处可清晰地识别出BSR的反射,而在相同测线上用其他震源采集(如图14为分别用频带为45~330和80~450 Hz,主频分别为120和225 Hz的震源)得到的剖面则难以辨认出相应的BSR界面。比较这三段剖面发现,频率越高,反射界面越弱,则BSR的反射振幅变化越大。如果不是参照相对低频的剖面(见图13)的资料,对BSR的识别也不那么确定,但它们可以辨别出许多褶皱构造内的小断层。利用另一条相交测线上频率更高的调查结果,几乎识别不出BSR来。综合上述结果我们认为对低频剖面上的解释更可靠。

3 讨论

水合物是在满足一定的温度-压力条件下形成的充填在沉积物孔隙中的结晶体。形成水

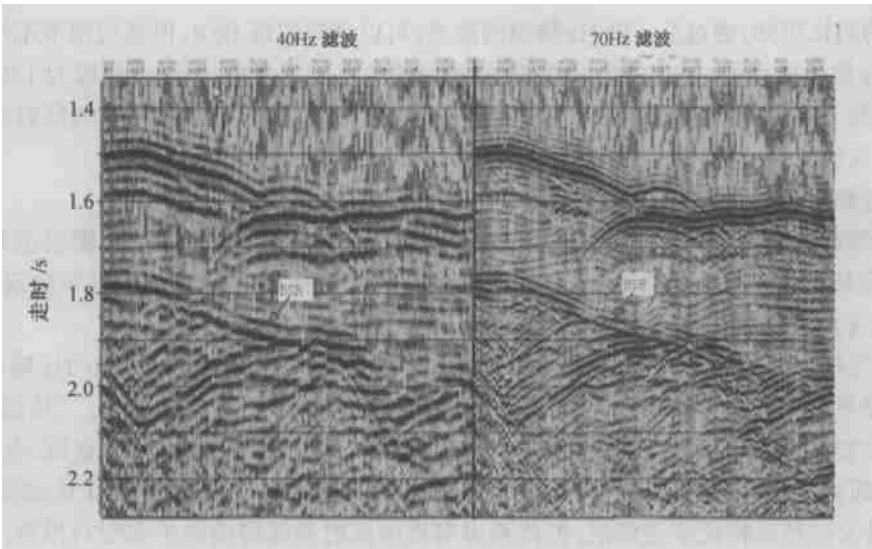


图 11 高截止滤波分别为 40 和 70 Hz 时的效果对比图. 从图中可见, 右图(70 Hz 滤波)在不降低 BSR 识别的同时沉积层与 BSR 的接触关系更清楚

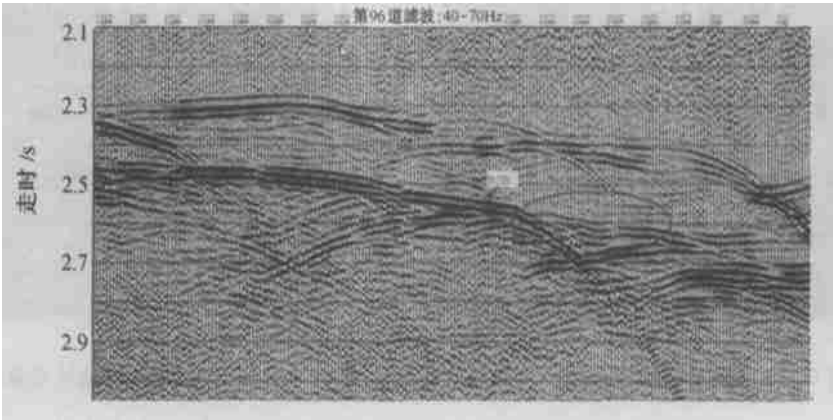


图 12 第 96 道(偏移距约为 1 300 m) 40~ 70 Hz 滤波, 与图 6 相比其 BSR 更连续, 反射振幅更强(与海底反射幅度比较)

合物后就改变了其所在沉积物的物理性质(主要是其中的传播速度变大), 而在水合物层之下由于超出了上述的温度- 压力条件, 地层孔隙中充填的是水或气体, 因而形成了波阻抗界面. 从各国各地区所取到的水合物样品来看, 水合物只是部分充填沉积物的孔隙, 所以这个波阻抗界面是不太连续的, 相对于地层分界在空间上延伸往往也不大. 由此可以推断, 当使用频率较高的震源进行勘探(或处理) 时, 得到的 BSR 反射界面是不连续的, 而且会造成反射信号互相干涉, 使反射振幅变弱, 相比之下, 频率较低的反射反映出该波阻抗界面的一个包络, 它提高了其反射的连续性. 其次, 因为水合物是由气体和水结晶而成, 在 BSR 的底部会聚集游离气, 这样对高频信号具有强烈的吸收作用, 造成高频反射信号幅度大幅降低. 国外对加拿大喀斯凯迪

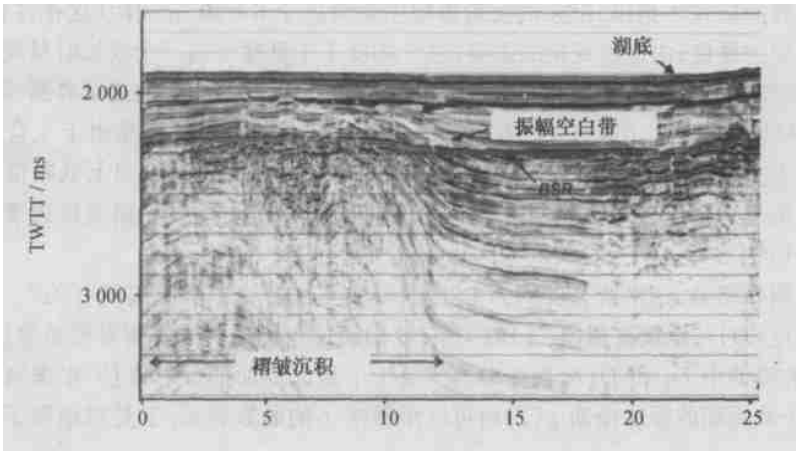


图 13 在贝加尔湖用气枪阵采集的一段多道地震剖面, 主频为 40 Hz

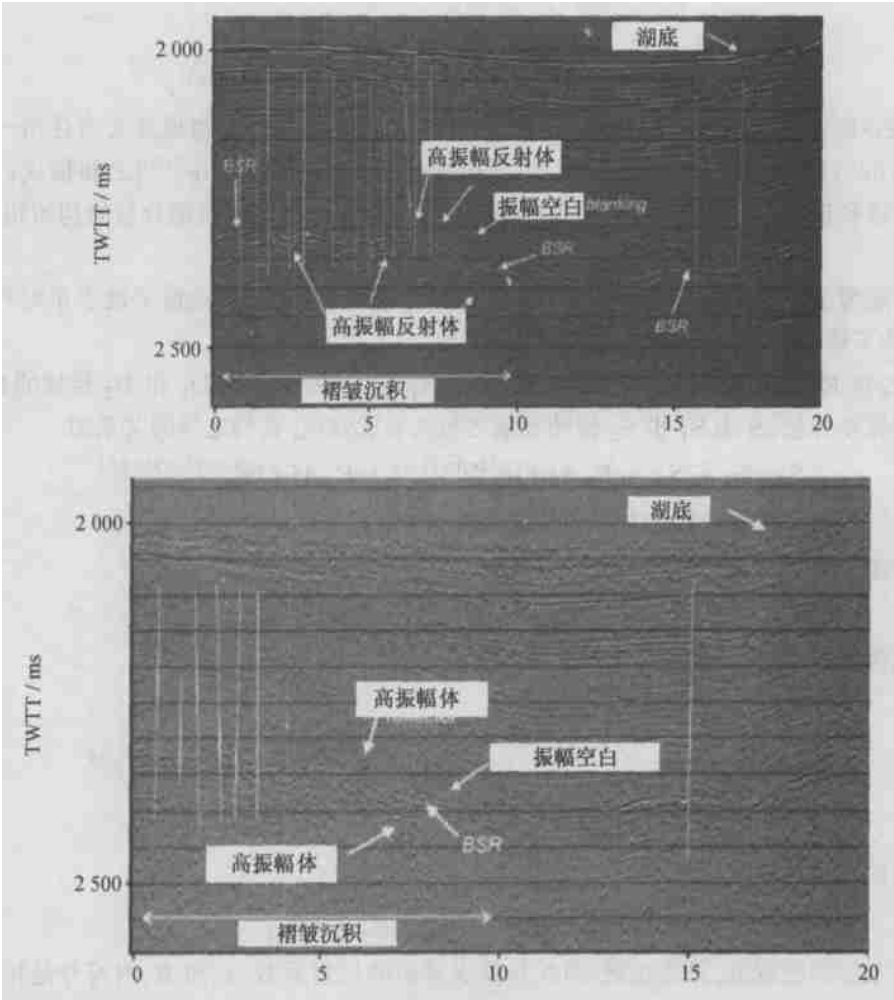


图 14 在贝加尔湖用单气枪采集的一段地震剖面, 主频分别为 120 Hz(上图)和 225 Hz(下图)

亚水合物调查的研究^[4]指出,BSR 的反射振幅主要取决于 6~10 m 间距(这往往也是 BSR 之下含游离气层的厚度)内速度变化的差异,这个厚度小于低频波的一个波长时呈现的是一明显的界面,但是如果这个厚度比高频的一个波长大,则它不能成为明显的连续界面.因此,在该区的 BSR 反射只在低频(<100 Hz)地震数据中表现为强反射.此外,正是由于水合物实际上赋存的底界是不太连续的,所以在反射地震资料中无论在横向上还是纵向上低频信号在波阻抗界面上反射的平均效应比高频的要大得多,从而使得显示出的反射界面变得连续,容易识别,也容易区分极性.

通过观测和研究,许多研究者认为 BSR 的形成与水合物下伏游离气有关^[5~8].为了研究游离气层厚度(D)与地震波幅值(A)的关系,我们通过相位幅度谱的相对关系来进行研究.在图 15 所示的模型中 D_1 和 D_2 分别为游离气层上下顶底界面的反射路径.根据富里叶变换理论,任何一个非周期的脉冲振动 $g(t)$ 均可以用频率 f 的函数表示,于是对地震子波的通用表达式可写为

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi f t} df,$$

$$G(f) = A(f) e^{j\phi(t)},$$

$$G(f) e^{j2\pi f t} = A(f) e^{j2\pi f t} e^{j\phi(t)} = A(f) e^{j[2\pi f t + \phi(t)]},$$

式中, t 表示时间; $G(f)$ 称为频谱,一般表示成复变函数的形式,其物理意义为任何一个非周期振动 $[g(t)]$ 是由无限多个不同频率、不同振幅的谐和振动 $[G(f) e^{j2\pi f t}]$ 之和构成; $A(f)$ 表示每一个谐和振动分量的振幅,称之为振幅谱; $\phi(t)$ 为每一个谐和振动分量的初始相位,称之为相位谱.

由于震源子波在游离气层中传播时存在传播路径差,因而在用地震子波表示时存在传播相位差,为了研究方便,将相位差用符号 $\Delta\phi$ 表示.

设 R_0 和 R_1 为游离气层顶界面的反射系数, S_1 和 S_2 为沿路径 D_1 和 D_2 传播的在频率 f 处的谐和振动分量. S 为 S_1 和 S_2 振动分量之和的合成效应,它们之间的关系为

$$S = S_1 + S_2 = R_0 A(f) e^{j[2\pi f t + \phi(t)]} + R_1 A(f) e^{j[2\pi f t + \phi(t) + \Delta\phi]}$$

$$= A(f) e^{j[2\pi f t + \phi(t)]} \left[R_0 + R_1 e^{j\Delta\phi} \right].$$

震源在频率 f 处的分量为 S_0 :

$$S_0 = A(f) e^{j[2\pi f t + \phi(t)]},$$

信号的比值为

$$A = \frac{A(S)}{A(S_0)} = \frac{A(f) e^{j[2\pi f t + \phi(t)]} \left[R_0 + R_1 e^{j\Delta\phi} \right]}{A(f) e^{j[2\pi f t + \phi(t)]}} = R_0 + R_1 e^{j\Delta\phi}$$

$$= R_0 + R_1 [\cos \Delta\phi + j \sin \Delta\phi],$$

信号幅度的比值为

$$A_a = \sqrt{R_0^2 + 2R_0 R_1 \cos \Delta\phi + R_1^2}.$$

由于游离气层的密度低,速度也低,因此其顶底界面的反射系数 R_0 和 R_1 的符号是相反的.从上式可见,当 $\Delta\phi = \pi$ 时, A_a 的值为最大.从接收信号处的角度来看这里的相位差是双程走时

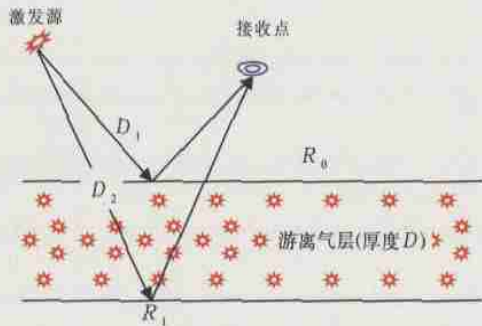


图 15 地震波在游离气层中的传播示意图

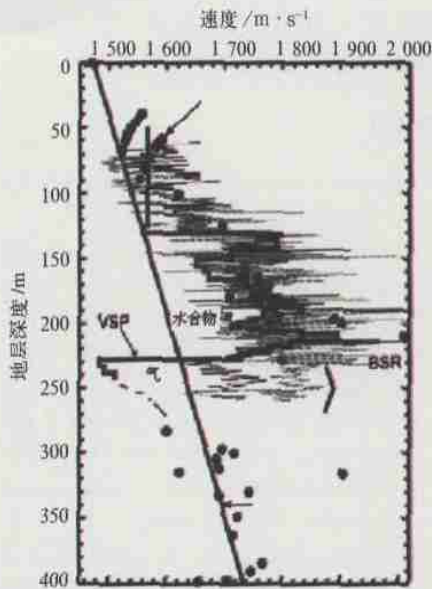


图 16 大洋钻探 889/890 航次测井和 VSP 的结果

时差造成的, 因此当游离气层的厚度 $D \approx \lambda / 4$ 时厚度所造成的相位差为 π , 地震反射波幅值最大, 也就是说在这种情况下能观察到更好的反射记录

根据有关资料的统计含游离气层的 P 波速度约为 1 500 ~ 1 600 m/s 较常见(见图 16)^[2], 取 1 550 m/s 计算得: 频率为 70 Hz 时 $T \approx 14.28$ ms, $\lambda \approx 22.13$ m, $\lambda / 4 \approx 5.6$ m; 频率为 40 Hz 时 $T = 25$ ms, $\lambda = 38.75$ m, $\lambda / 4 \approx 9.69$ m. 计算结果基本落在 6 ~ 10 m 间距上, 这说明在这种情况下用 40 ~ 70 Hz 可以得到 BSR 的最大振幅, 这与我们用实际资料进行滤波处理后得到的结果是一致的.

4 结论

水合物的形成需满足一定的温度 - 压力条件, 其能够稳定存在的区域的底部在地震反射资料中就形成了 BSR, 进行水合物调查前首先要圈定 BSR 的分布范围.

由于水合物形成和赋存的特殊性, BSR 并不是连续的波阻抗界面. BSR 的地震反射效果很大程度上取决于地震信号的频率, 低频信号能增强 BSR 的连续性、振幅, 有利于 BSR 的识别.

当 BSR 之下游离气存在时, 合适的低频信号(波长与游离气的厚度相当)更能增加 BSR 的识别, 同时可以间接地估算游离气的厚度.

BSR 的反射振幅取决于垂直和水平的分辨率. 采集频率越高, 平均效应越小, 则声学响应对横向变化就越敏感. 这样, 在高频剖面的含气地层和不含气地层就会形成不连续的 BSR.

根据我国实际情况和几年来的调查结果分析,认为对天然气水合物的主要识别标志 BSR 在频宽 10~ 120 Hz,主频为 40~ 70 Hz 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。

参考文献:

- [1] PRENSKY S. Hydrate Resources Estimation, <http://www.aist.go.jp/GSJ/dMG/hydrate/hydrate.resources.html>, 2001—03—31/2004—07—07.
- [2] HYNDMAN R D, DALLMORE S R. Natural Gas Hydrate Studies in Canada[M]. CSEG Recorder, 2001. 11—20.
- [3] VANNESTE M, BATIST M De, GOLMSHTOK A, et al. Multi frequency seismic study of gas hydrate bearing sediments in Lake Baikal, Siberia[J]. Marine Geology, 2001, 172: 1—21.
- [4] HYNDMAN R D, SPENCE G D, CHAPMAN R, et al. Geophysical Studies of Marine Gas Hydrate in Northern Cascadia, <http://www.pgc.nrcan.gc.ca/marine/gas-hydrates/moro-e.khtml>, 2002.
- [5] HOLBROOK W S, HOSKINS H, WOOD W T, et al. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling[J]. Science, 1996, 273: 1 840—1 843.
- [6] HYDNMAN R D, SPENCE G D. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors[J]. J Geophys Res (B), 1992, 97: 6 683—6 698.
- [7] PECHER I A, MINSHULL T A, SINGH S C, et al. Velocity structure of a bottom simulating reflector offshore Peru: results from full waveform inversion[J]. Earth Planet Sci Lett, 1996, 139: 459—469.
- [8] HOLBROOK W S. Seismic studies of the Blake Ridge: implications for hydrate distribution, methane expulsion, and free gas dynamics[A]. PAULL C K, DILLON W P. Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection: 124[M]. Washington, DC: Am Geophys Union, 2001. 235—256.

The seismic frequency effect on recognition of the BSR of gas hydrate

ZHANG Ming¹, WU Zhongliang¹

(1. Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Seism is most common and available way for gas hydrate survey, the bottom simulating reflector (BSR) is the most obvious indicator of gas hydrate. The BSR behaviors with different seismic frequency from the gas hydrate survey in the South China Sea were discussed, the BSR can be recognized easier and its continuity becomes better with lower frequency. From the analyses on the reprocessing profiler, a domain frequency (40~ 70 Hz) is suggested for gas hydrate seismic reconnaissance survey.

Key words: gas hydrate; BSR; seismic frequency