

# AVO技术在水合物研究中的应用及应注意的问题

陈建阳, 张志杰, 于兴河

(中国地质大学(北京) 能源学院, 北京100083)

摘要: AVO 作为一种成熟的地震资料分析解释技术, 已广泛应用于油气资源勘探并取得了良好的效果。天然气水合物作为一种新的能源载体, 同样可以运用 AVO 技术进行探测研究, 并已经在 BSR 的 AVO 模拟及含气体水合物沉积物的内部结构研究等方面取得了一定的成果。但是, 由于水合物与油气的性质不同, 在具体应用过程中, 仍存在许多需要注意的问题。综述了 AVO 技术在水合物研究中的应用及应该注意的一些问题。

关键词: 天然气水合物; AVO; BSR

## 0 引言

天然气水合物作为一种新型矿产资源, 具有能量高、分布广、规模大等特点, 被认为是 21 世纪的重要能源。世界上绝大部分的天然气水合物分布于深水的海底沉积物中, 估算其资源量为  $2 \times 10^5$  t 油当量, 大致相当于目前地球上常规化石燃料(石油、天然气和煤)的 2 倍, 是 21 世纪石油天然气的主要替代物, 也是人类未来的一种新型高效能源<sup>[1, 2]</sup>。

在海洋天然气水合物的地震识别技术中, 主要依据之一便是地震记录上的似海底反射层 BSR 现象<sup>[3~5]</sup>。由于海洋地震资料的信噪比比陆地高, 人们可对天然气水合物强反射层的地震波振幅做精细分析<sup>[6]</sup>, 这为运用 AVO 技术进行水合物研究提供了技术及资料上的保证, 并在多个方面取得了良好的效果<sup>[7~9]</sup>。

## 1 天然气水合物概述

天然气水合物是在一定温压条件下由水和天然气组合而成的似冰状结晶化合物, 其化学成分不稳定, 可用“ $M \cdot nH_2O$ ”来表示, 其中“ $M$ ”为水合物中的气体分子, “ $n$ ”为水分子数。除了甲烷水合物外, 还有多种气体混合的水合物。组成天然气的成分可以是  $CH_4$  及其同系物  $C_2H_6$ 、 $C_3H_8$ 、 $C_4H_{10}$ , 也可以是  $CO_2$ 、 $N_2$ 、 $H_2S$  等非烃气体, 其可形成单种或多种天然气水合物<sup>[10, 11]</sup>。

就物理性质而言, 水合物像冰, 但其既可存在零下, 又可存在于零上温度环境。水合物具有比其它冷凝相气体(如液化气)低几十倍的平衡压力<sup>[12, 13]</sup>, 在低的平衡压力条件下, 水合物具有很高的浓缩气体能力, 一定体积的水合物含有最多可达 164 倍于该体积的气体。

## 2 AVO 技术原理

AVO (Amplitude Versus Offset, 振幅随偏移距变化关系) 理论最早形成于 20 世纪初<sup>[12]</sup>, 是通过研究振幅随炮检距(或入射角)的变化特征来探讨反射系数响应随炮检距的变化, 进而确定反射界面上覆、下伏介质的岩性特征及物性参数。其分析方法就是利用 Zoeppritz 方程及其近似式, 根据实际观测数据, 以某种数学方法为工具, 求解产生这些观测数据的原始模型及物性参数值<sup>[14]</sup>。

AVO 技术考虑到了地震传播过程中的纵、横波特性和, 在常规天然气勘探中, 已成为揭示游离气存在与否的重要方法<sup>[15, 16]</sup>, 应用到天然气水合物, 则必须研究天然气水合物沉积层的纵、横波速度特征及差异<sup>[1]</sup>, 以及密度差, 以此得到正确的界面反射振幅<sup>[17]</sup>。实践证明, 在天然气水合物的研究中, 运用 AVO 技术同样取得了良好效果<sup>[18~27]</sup>, 并首先在真假 BSR 识别的研究中获得成功<sup>[28]</sup>。

## 3 AVO 技术在天然气水合物研究中的应用

### 3.1 BSR的AVO 模拟

海洋沉积物中天然气水合物的存在受控于一定的温压条件, 在海水和地层压力近似不变的情况下, 气水合物存在于沉积物中的深度下限主要取决于地温梯度。而海底沉积物中一定范围内存在相似的正地温梯度, 使得天然气水合物稳定域只能位于海底表层的沉积物中, 且其沉积底界一般近似平行于海底。同时, 天然气水合物可有效的粘结碎屑颗粒, 降低沉积物孔隙度, 故它的存在能提高水合物沉积层的声波速度, 使得含天然气水合物沉积的声速大于含水或含气沉积的声速。因此在天然气水合物的底界面上会产生一种与海底反射波相位相反的反反射波。由于它和海底反射在形态上相似, 通常被称作似海底反射层(Bottom Simulating Reflector), 即BSR(图1)。

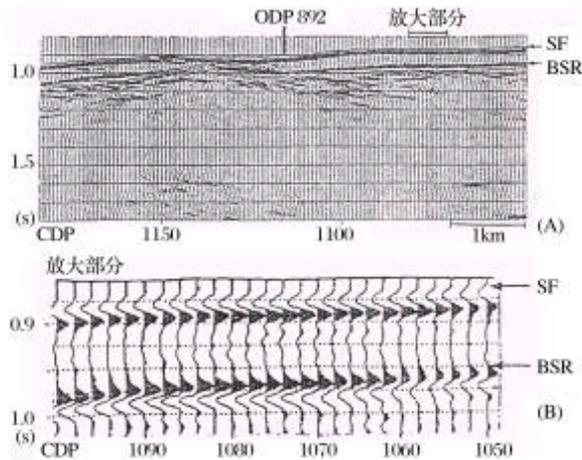


图1 俄勒冈西部大陆边缘的水合物BSR<sup>[29]</sup>

A 俄勒冈近海多道地震测线9 的保幅剖面及ODP第892站位位置; B 地震测线9的部分放大剖面, SF代表海底应用AVO 方法, 通过分析BSR 反射振幅随炮检距(AVO) 以及随入射角(AVA) 的变化, 可以对BSR 的性质、BSR之下有无游离气等做适当评价, 确定BSR 之上沉积物内气体水合物浓度及垂向分布特征<sup>[29]</sup>。

#### 3.1.1 BSR 特征

与气体水合物稳定域底界相关的BSR 主要有以下特征: 为强振幅反极性反射, 位于甲烷水合物稳定域底界附近, 暗示BSR 代表声阻抗降低, 反射系数为 $-0.2 \sim -0.3$ <sup>[30, 31]</sup>; 未观察到能代表BSR 之上气体水合物层顶或BSR 之下游离气层底的反射: 估计含气体水合物沉积物的上限是逐渐过渡, 且BSR之下存在的游离气仅局限于薄层, 层太薄以致地震难以分辨<sup>[20, 24, 31]</sup>; 层理(地层) 面反射通常被BSR 切割, 说明了BSR 并非层理面反射, 而是相态界面的反射。

#### 3.1.2 BSR随偏移距或入射角变化

张光学等<sup>[29]</sup>通过比较若干模型的反射振幅随偏移距或入射角的变化(图2), 调查了BSR反射系数随不同模型的入射角的变化情况。BSR作为一个界面模拟, 模型未考虑附近薄层的干涉效应, 图中曲线虽是粗略的, 但仍清楚表明了游离气和气体水合物是如何对BSR 反射系数和不同入射角的BSR 极性产生影响的。

在高速的含气体水合物沉积物和下伏正常速度饱和水的沉积物之间, 或者含水合物沉积下伏为部分饱和气体的沉积物或者水饱和的沉积物之间将出现一个界面。

模拟曲线显示水合物饱和度增加会引起BSR反射系数随入射角较大程度的减少, 若水合物饱和度接近100%, 且BSR之下没有游离气, 则在高角度处相位发生反转, BSR 之下的游离气将增加垂直入射的BSR 的反射系数, 游离气影响AVO 依赖于上覆水合物饱和度, 低浓度水合物使BSR 反射系数随入射角增加而增加, 水合物浓度在30% 以上这种趋势相反, 绝对反射系数随饱和游离气入射角增加而减少。

### 3.2 用地震AVO 方法研究含气体水合物沉积物的内部结构

由于P 波、S波速度及密度在BSR 之上比BSR之下大, 使得BSR 将含水合物沉积物与下伏含游离气的沉积物分开, 并随偏移距增大, BSR 振幅呈负数增加。Ecker 提出了水合物沉积的3 种微观模式<sup>[32]</sup>(图3): 第一种模型水合物是孔隙流体的一部分(图3A), 第二种模型水合物成为固体骨架的一部分(图3B), 第三种模型水合物胶结固体

颗粒接触面<sup>[33]</sup> (图3C)。张光学等根据这些模型得出了后两者的合成地震记录,并计算了BSR 处的AVO 值<sup>[29]</sup>。图3内0~100表示沉积物内水合物饱和度;深浅色阴影分别代表波弗特海和俄勒冈地区BSR 反射系数。比较合成结果,发现第二种模型能够重现观察到的AVO响应,由此得出结论:水合物未胶结颗粒大多数位于远离胶结部位的大孔隙内,并阻塞大量孔隙空间通道,导致渗透率很低,由此可说明在BSR 之下可圈闭游离气的原因。

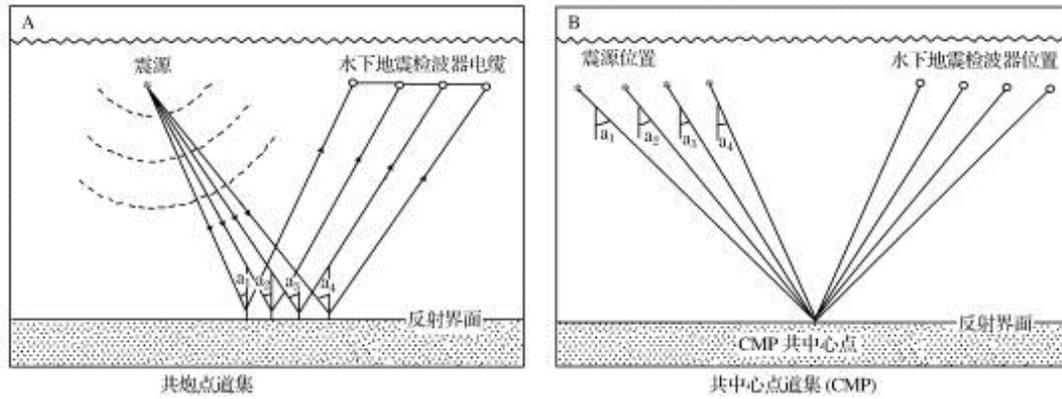


图2 震源与检波器及偏移距的关系<sup>[27]</sup>

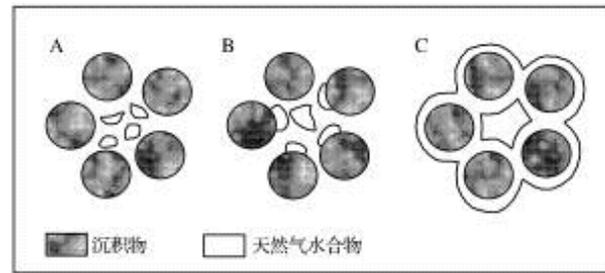


图3 天然气水合物的3种微观模式 (据Ecker, 2001年)

A: 悬浮模式; B: 颗粒接触模式; C: 胶结模式

BSR 作为水合物稳定域底界通常较易识别出来,然而却很难识别出水合物层顶界,推测这是因为BSR 之上沉积物内的高浓度水合物随深度而降低,这种变化与推断的BSR 之上水合物层低渗透率相吻合,该低渗透层阻止了游离甲烷向上迁移。BSR 存在于海底之下几百米深度处,在此深度沉积物可以不固结,也可呈小颗粒结构。BSR 之上水合物层内的甲烷被捕获在结晶水内形成甲烷水合物。因此,可按照小颗粒岩石孔隙空间内气体水合物

矿床为卤水饱和模拟水合物沉积物。

#### 4 AVO 技术应用于天然气水合物研究时应注意的问题

利用AVO 技术进行真假BSR 的模拟及预测水合物沉积层和含游离气层的内部结构时,应根据水合物沉积层及其上下围岩的地球物理特征和不同的岩性组合而形成的AVO 效应,进行AVO 处理和解释,主要表现在以下2个方面:

(1) 利用AVO 技术的关键在于叠前地震数据的精细处理和恢复以及保持相对振幅信息。因此,必须运用迭代精细速度分析与动静校正、地表一致性和振幅平衡等技术手段,对叠前地震资料进行预处理<sup>[34]</sup>。

(2) 在对地震资料进行AVO 处理和解释前,须搞清水合物沉积层及其上下围层的地质、地球物理特征,并依据其所引起的AVO 响应进行地震资料的AVO 处理和解释,由此来进行水合物预测。

#### 5 结论

(1) 若BSR 之上气体水合物饱和度低于30%,BSR 振幅随偏移距或反射角变化研究能探测BSR之下沉积物内游离气的存在,并根据BSR 的AVO曲线形状能粗略估计气体水合物饱和度。

(2) 气体水合物在孔隙空间内的最可能位置是远离颗粒接触处。

(3) 作为反演技术之一的AVO 技术, 其结论具有多解性, 运用AVO 技术得到的结论, 需要由其它反演结果进行验证。

#### 参考文献:

- [1]刘怀山, 周正云. 用于研究东海天然气水合物的地震资料处理方法[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3):441-448.
- [2]史斗, 郑军卫. 世界天然气水合物研究开发现状和前景[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4):330-339.
- [3]孙春岩, 章明显, 牛滨华, 等. 天然气水合物地震似海底反射现象AVO正演模型研究[J]. 现代地质, 2003, 17(3):337-344.
- [4]宋岩, 夏新宇. 天然气水合物研究和勘探现状[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1~2):3-10.
- [5]马在田, 耿建华, 董良国, 等. 海洋天然气水合物的地震识别方法研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1):128.
- [6]胡中平, 孙建国, 赵群. 利用地震方法识别天然气水合物[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(6):23-27.
- [7]Karin Andreassen, Patrick E H, Mary MacKay. Amplitude versus offset modeling of the bottom simulating reflection associated with submarine gas hydrates [J]. Marine Geology, 1997, 137: 25-40.
- [8]Christinen Ecker, Jack Dworkin, Amos Nur. Sediment with gas hydrates structure from seismic AVO [J]. Geophysics, 1998, 63(5):1659-1669.
- [9]Carcione J M, Tinivella U. Bottom simulating reflectors seismic velocities and AV0 effects [J]. Geophysics, 2000, 65(1):54267.
- [10]徐学祖编译. 天然气水合物及其研究概况[A]. 史斗, 孙成权, 朱岳年. 国外天然气水合物研究进展[C]. 兰州:兰州大学出版社, 1992.
- [11]金翔龙. 天然气水合物的研究现状和未来展望[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1~2):122.
- [12]史斗编译. 气水合物是一种新的烃类资源[A]. 史斗, 孙成权, 朱岳年. 国外天然气水合物研究进展[C]. 兰州:兰州大学出版社, 1992.
- [13]夏新宇, 戴金星, 宋岩. 海底天然气水合物及资源评价问题[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1~2):11-15.
- [14]Knott C G. On the reflection and refraction of elastic waves with seismicological application [J]. PhilMag 5<sup>th</sup> Ser, 1999, 48(1):64-97.
- [15]Ostrander W J. Plane wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incidence[J]. Geophysics, 1984, 49: 1637-1648.
- [16]Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equation [J]. Geophysics, 1985, 50: 609-614.
- [17]张聿文, 刘学伟, 李海鸥. 基于单相与双相介质拟海底反射的AVO研究[J]. 石油物探, 2004, 43(3):209-217.
- [18]Katzman, Holbrook W S, Paull C K. Combined vertical-incidence and wide-angle seismic study of a gas hydrate zone, Black Ridge [J]. J Geophys Res, 1994, 99: 17975-17995.

- [19] Tinivella, Accaino F. Compression velocity structure and Poisson's ratio in marine sediments with gas hydrate and free gas by inversion of reflected and refracted seismic data (South Shetland Islands, Antarctica) [J]. *Marine Geology*, 2000, 164: 13-27.
- [20] Hyndman R D, Spence G D. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors [ J ]. *Journal of Geophysical Research*. 1992, 97 (B5) : 6683-6698.
- [21] Lee M W , Hutchinson D R, Agena W F, *et al.* Seismic character of gas hydrates on the southern U. S. continental margin [J]. *Marine Geophys Res*, 16: 163-184.
- [22] Minshull T A , White R S. Sediment compaction and fluid migration in the Makran accretionary Prism [ J ]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 7387-7402.
- [23] Andreassen K, Hart P E, Grantz A. Seismic studies of a bottom simulating reflector related to gas hydrate beneath the continental margin of the Beaufort Sea [ J ]. *Geophys Res*, 1995, 100: 12659-12673.
- [24] Bangs N , Sawyer D S, Colovchenko X. Free gas at the base of gas hydrate zone in the vicinity of the Chile triple junction [J]. *Geology*, 1993, 21: 905-908.
- [25] Andreassen K, Hart P E, MacKay M. Amplitude versus offset modeling of the bottom simulating reflection associated with sub-sea gas hydrate [J]. *Marine Geology*, 1997, 137: 252-260.
- [26] Ecker C, Dvorkin J , Nur A. Sediments with gas hydrates: Internal structure from seismic AVO [J]. *Geophysics*, 1998, 63: 1659-1669.
- [27] Carcione J M , Tinivella U. Bottom simulating reflectors: seismic velocities and AVO effects [J]. *Geophysics*, 2000. 65: 54-67.
- [28] 吴志强. AVO 技术在水合物调查评价的应用中应注意的问题 [J]. *海洋地质动态*, 2002, 18 (6): 28-32.
- [29] 张光学, 黄永祥, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [30] Miller J J , Lee W M , von Huene R. An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone, offshore Peru [J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75 (5): 910-924.
- [31] Singh S C, Minshull T A , Spence G D. Velocity structure of a gas hydrate reflector [J]. *Science*, 1993, 260: 204-207.
- [32] Ecker C. Seismic Characterization of Methane Hydrate Structures [D]. California: Stanford University, 2001.
- [33] 吴时国, 徐宁. 加拿大马更些三角洲天然气水合物物化特征和含量 [J]. *天然气地球科学*, 2003, 14 (6): 506-511.
- [34] 吴光大, 徐尚成. AVO 技术在柴达木盆地东部天然气检测中的应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 1994 (6): 24-41.

APPLICATION AND PROBLEMS OF AVO TECHNIQUE IN NATURAL GAS HYDRATES INVESTIGATION

CHEN Jian-yang, ZHANG Zhi-jie, YU Xing-he

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract:As a kind of ripe seismic analysis Technique, AVO has been applied to oil and gas exploration, and great results have been made. AVO also can be used to Natural gas hydrate, a new kind of energy, survey research. AVO simulation of BSR and inner structure of sediments bearing hydrates has been carried out using AVO technique. However, Hydrates are different from oil and natural gas, some Problems must be concerned.

Key words: Gas hydrate; AVO; BSR.



[返回](#)