

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.04051

# 海洋天然气水合物地震检测技术及其应用

张光学<sup>1</sup>, 张明<sup>1</sup>, 杨胜雄<sup>1</sup>, 雷新华<sup>2</sup>,  
徐华宁<sup>1</sup>, 刘学伟<sup>2</sup>, 梁金强<sup>1</sup>, 沙志彬<sup>1</sup>

(1 国土资源部 广州海洋地质调查局, 广州 510075; 2 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:**天然气水合物具有能量密度高、分布广、埋深浅、成藏物化条件好、清洁环保等特点,是未来石油天然气的理想接替能源。我国海域深水广大地区具有天然气水合物形成所需的物源、温压及地质构造等成矿条件,资源前景广阔。地震检测技术是寻找海洋天然气水合物的行之有效方法,在世界各海域得到广泛应用并取得实效。我国通过多年的水合物勘查实践,研发了一套适合我国海洋天然气水合物的地震检测技术,包括水合物地震识别处理技术(保幅处理、子波零相位化、精细速度分析等)和地震属性提取技术(AVO 反演及定量模拟检测、波阻抗反演、相干体检测、稳定带顶底面检测等)。运用上述技术已发现南海北部陆坡天然气水合物存在的似海底反射层(Bottom Simulating Reflector, BSR)、空白带(Blank Zone, BZ)、速度倒转和极性反转(Reversal Polarity, RP)等地震异常标志,并依提取的地震属性优选目标,成功钻获天然气水合物实物样品,提高了水合物矿床预测的准确率。简要回顾国外海洋天然气水合物地震勘探技术现状,重点阐述国内海洋天然气水合物地震检测技术的发展及其应用效果。

**关键词:**海洋;天然气水合物;BSR;地震检测技术

中图分类号:P744

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2011)04-0051-08

天然气水合物是由天然气与水在高压( $>100$  大气压或 10 MPa)、低温( $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )条件下形成的固态结晶物质,纯净的天然气水合物呈白色,形似冰雪,可以像固体酒精一样直接被点燃。因此,又被通俗形象地称为“可燃冰”。具有能量密度高、分布广、埋深浅、成藏物化条件好、清洁环保等特点,是石油天然气的理想接替能源。我国的南海陆坡和陆隆区区域沉降剧烈、沉积速率大、海洋有机物沉积十分丰富,具有天然气水合物形成所需的物源、温压及地质构造等成矿条件<sup>[1-2]</sup>,资源前景广阔,有望成为今后我国新的替代能源。

海洋天然气水合物实施资源勘查探测技术是关键。由于天然气水合物具有“气测灵敏高、埋藏水深大、矿体无规则、矿相标志多”等特点,自 20 世纪 60 年代在地震剖面中观察到 BSR 以来,众多学者公推 BSR 与海洋沉积物中水合物的存在有关<sup>[3]</sup>。经过近 20 年实践检验,主要通过海洋地震勘查,发现其存在的地震异常标志进行水合物资源勘查,在美国的布莱克海台、俄勒岗-卡斯凯迪亚水合物脊、日本

南海海槽等综合研究程度高的经典地区<sup>[4-5]</sup>,通过钻探获得了天然气水合物样品,证实了天然气水合物的存在,BSR 代表海底沉积物中天然气水合物稳定带底界面,这些发现充分证实地震勘探是行之有效的。地震勘查已成为深海大面积天然气水合物快速精确评价最为实用的技术。

我国积极跟踪国际海洋天然气水合物勘探开发技术,开展天然气水合物探测技术研究,研发天然气水合物资源区域找矿的地震探测技术,力求在区域上发现天然气水合物各类异常信息标志。近年来,研究成果已成功地应用于我国海域天然气水合物资源调查与评价工作中,在南海北部陆坡获得了天然气水合物存在的多信息证据,圈定了天然气水合物勘探远景区,取得了显著效果。

随着我国天然气水合物勘探工作的持续深入开展,其勘查也将从天然气水合物远景区探测发现进入成矿区带及有利目标优选,为此,在国家 863 计划资助下,研发天然气水合物成矿区带目标的高精度地震检测技术,为圈定天然气水合物成矿区带、目标靶区及天然气水合物矿田开发后备基地提供高技术支撑。

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA09A202, 2005AA611050);国家“973”规划项目(2009CB219)

作者简介:张光学(1965—),男,教授级高工,主要从事海域油气和天然气水合物地质研究,E-mail: strawjxy@msn.com

收稿日期:2011-05-09;改回日期:2011-06-10. 张光威编辑

## 1 地震检测技术

通常地震调查所用到的声能有纵波(P波)和横波(S波)两种,P波能够在固体、液体和气体中传播(若在空气中传播称之为声波),P波的传播速度比S波快。由于液体和气体无剪切强度,故S波只能在固体中传播。在海洋地震调查中,声源只能产生P波,在声向下传播遇到反射层时,一部分能量转换为S波的能量,P波能量反射回来就变成P波和S波的能量,P波和S波对含水合物之沉积层反应甚为灵敏,利用这一特性,可采用多种地震反射方法来识别水合物的各种地震标志,也正是由于地层中含天然气水合物,改变了沉积层原有的声学特征和明显的波阻抗差,才得以用地震检测方法开展天然气水合物勘查与研究。

海洋天然气水合物地震检测技术包括天然气水合物地震识别处理技术和地震属性提取技术。

### 1.1 地震识别处理技术

目前,主要通过综合判读地震剖面上的“BSR、BZ和速度反转及振幅异常结构(Velocity Amplitude, V'AMP)”4种异常特征来识别天然气水合物。因此,如何凸显天然气水合物地震异常特征显得尤为重要。研发保幅、叠前去噪、子波处理、多次波压制和叠前时间偏移等一系列处理方法,最终形成水合物地震识别处理技术。具体分述如下:

#### 1.1.1 凸显BSR特征

BSR是天然气水合物存在的一个重要标志,根据含天然气水合物地层可能表现的地震反射特征,确定以保幅处理为前提,以叠前去噪、子波零相位化处理和叠前时间偏移处理为基础,有效凸显天然气水合物BSR地震反射特征,包括BSR振幅强度、连续性及其极性。

BSR振幅强度随偏移距增大而增强且更连续,振幅空白特征更明显。说明远偏移距的波至明显影响叠加效果,处理中保证尽量多的有效道参与叠加,有利于突现BSR。

BSR连续性随震源频率增加而降低。针对BSR特征与声频率的这种关系,处理时合理选择震源激发及处理的有效频带(分频处理),对凸显BSR特征行之有效。数据分频段后,将不同频段数据相减可以得到剩余频率段以降低滤波的边界影响。

BSR极性与海底反转,高分辨率地震资料很难识别该现象,因常规地震剖面前波与后波常常因为

子波的延续长度大于层面旅行时而相互干涉,选择合适的反褶积进行子波处理,使子波零相位化是解决此难题的行之有效方法。在原始数据噪音较小时,首先是使波形最小相位化,然后再进一步零相位化处理。由于零相位波形很不稳定,处理中滤波、反褶积等有关波形的处理都可能改变波形的零相位性质,因此,整个子波处理应该前后照应,互为依托,以保证得到最好的波形结果。通过波形压缩子波零相位化处理,可合理显示BSR的反极性。

在此基础上,采用基于Kirchhoff积分的叠前时间偏移、复数道分析处理,使类似水合物矿体的速度反转地质体清晰成像、BSR及与地层接触关系清晰。

#### 1.1.2 振幅空白带识别

振幅空白带是凸显天然气水合物矿层的标志,为凸显这一标志,数据处理必须保持地震反射信号振幅的相对关系,进行球面扩散补偿恢复,保持振幅相对处理(表面振幅一致性校正处理)。同时,针对水合物的多道地震高保真处理要求,开发“投影滤波压制噪音、倾角扫描、多项式拟合”新的处理模块,达到既尽可能去噪,又较少损害目的层的地震反射特征和成像。

这种振幅相对保持处理对后续地震属性分析、AVO分析以及天然气水合物的定量计算尤为重要。

#### 1.1.3 速度及振幅异常结构识别

速度倒转是含天然气水合物地层与正常沉积地层区别的一个显著标志,为识别这种异常,提高速度分析精度是识别的关键。基于高精度的叠加速度分析技术,从而获得与天然气水合物存在最相关的地层参数——声波速度。为此,采用高精度动校正,增加速度分析横向控制点、反复速度迭代分析、减小纵向分析时窗等,使速度谱能量更集中,更多地震道参与叠加并改善叠加效果,提高速度分析精度、BSR成像效果及地震识别准确度。

同时,在进行初次叠加后,针对可能出现的短波长的剩余静校正量,在叠加剖面上选择连续性好的反射层作为模型道,计算剩余静校正量并应用到新的速度分析中,反复迭代直到最终获得满意的叠加剖面。

另外,为了有效改善地震成像,根据含天然气水合物区域的地震反射数据的特点,有针对性地开发一系列地震数据处理模块,包括多项式拟合滤波去噪、 $f-x$ 域预测滤波去噪、多功能反褶积、 $K-L$ 变换压制多次波以及高精度动校正等,取得很好的地质效果。

## 1.2 地震属性提取技术

在水合物地震识别处理基础上,为有效识别水合物矿体,提高水合物矿床预测的准确率,充分利用天然气水合物地震异常信息,进行综合检测并发展一套地震属性提取技术,包括 AVO 反演及定量模拟、波阻抗反演、相干体及层速度分析、地震瞬时属性提取,以及饱和度与孔隙度估计、稳定带顶底面检测等方面的技术,具体分述如下:

### 1.2.1 AVO 反演及定量模拟技术

AVO 技术是利用地层的地震纵横波特性,以及由此形成的地震反射振幅与偏移距的变化关系,来判断地层物性和岩性的一项地震勘探技术。因此,基于振幅随偏移距变化(AVO)理论的参数反演及定量模拟,可得到水合物及游离气的物性(纵横波速度、密度、泊松比)识别标志,依次检测天然气水合物及其下伏游离气。

通过对二相、三相岩石物理模型及天然气水合物或游离气弹性性质的研究,分析含天然气水合物沉积层的 AVO 特征,认为天然气水合物和游离气的含量与 AVO 异常存在着一定的联系<sup>[6-11]</sup>,并通过对比分析,发现 AVO1(截距剖面)、AVO4(梯度、截距、相关系数乘积剖面)、AVO6(Sign(I) \* G 乘积剖面)、AVO8(泊松比剖面)和 AVO9(流体因子剖面)5 种 AVO 属性剖面对天然气水合物、游离气及 BSR 的地球物理特征较敏感,是在无井、未开发阶段直接寻找天然气水合物的重要检测手段。AVO 各属性物理意义见表 1。

表 1 振幅随偏移距变化(AVO)各属性物理意义

Table 1 The physical meaning of AVO attribute

名称	物理意义及用途
AVO1	截距 I 剖面,零偏移距纵波剖面(相当于反射系数),指示纵波波阻抗的变化,判定 BSR 界面、解释水合物和游离气。
AVO4	乘积相关剖面,截距 I * 梯度 G,用于检测气层,确定游离气富集区。
AVO6	梯度 G 与截距 I 符号乘积剖面(相当于亮点),用于检测气层,解释水合物和游离气。
AVO8	泊松比变化剖面,反映地层纵、横波速度及岩性变化,推断水合物和游离气赋存带。
AVO9	流体因子剖面,反映储层及流体的不同状况,检测含气地层纵波层速度的降低。

这里计算流体因子算法<sup>[12]</sup>为:

$$\Delta F = \frac{\Delta v_p}{v_p} - b \frac{v_s \Delta v_s}{v_p v_s}$$

式中  $v_p$  是纵波速度,  $v_s$  是横波速度。由于纵波速度随流体而变化,横波速度不随流体而变化,因此,本属性对流体变化反应很敏感。

### 1.2.2 波阻抗反演技术

波阻抗反演通常指利用叠后地震资料进行反演的一种方法,是储层特征描述的重要手段之一。充分利用测井资料具有较高的垂向分辨率和地震剖面具有较好的横向连续性的特点,将地震剖面“转换”成波阻抗剖面,能有效地研究地层波阻抗的变化,从而得到地层波阻抗的空间分布规律。

目前,用于天然气水合物勘探的波阻抗反演方法主要有稀疏脉冲反演、模型约束反演、基于宽带约束的模拟退火反演,以及地质统计随机模拟与随机反演方法。不同的地震反演方法都有不同的特点和适用性。

通过对天然气水合物目标区地质背景和成藏环境以及各种波阻抗反演方法的对比分析,选择基于宽带约束的模拟退火反演,反演结果表明,波阻抗剖面能更好地凸显含天然气水合物地层高波阻抗特征和下部含游离气层低阻抗特征,可清楚地指出天然气水合物的顶底界面,较直观地展示了天然气水合物的空间展布形态,定量反映天然气水合物富集区及富集程度,揭示水合物和游离气及 BSR 界面特征。由此可见,波阻抗反演对天然气水合物的预测具有较好的应用效果,是天然气水合物勘探预测的重要技术,能很好指导天然气水合物的勘探开发。

### 1.2.3 相干体分析技术

相干技术就是从相邻地震道相互之间的相干性出发,通过对主测线和联络测线方向计算某一时间域内波的相似性,进而获得三维地震相干体的一种技术。而相干体是指描述三维数据相干性的一种三维数据体。因此,通过对叠前偏移数据体进行相干处理,得到相干体数据,分析天然气水合物在相干数据体上的响应,可用于检测水合物。

自提出相干性概念及应用方法以来,相干算法不断发展,大致经历了归一化互相关、任意多道相似性算法和多道地震数据特征构造相关性算法过程。依据资料品质好,信噪比和分辨率较高,目前主要选择归一化算法进行相干计算。其相关系数  $\rho_{xy}$  的三维估计公式<sup>[13]</sup>如下:

$$\rho_{xy} = \sqrt{\left[ \max_i \rho_x(t, l, x_i, y_i) \right] \left[ \max_m \rho_y(t, m, x_i, y_i) \right]}$$

式中,  $\max_i \rho_x(t, l, x_i, y_i)$  和  $\max_m \rho_y(t, m, x_i, y_i)$

分别表示时移为  $l$  和  $m$  时,  $\rho_x$  和  $\rho_y$  为最大值。对于高质量的地震数据,时移  $l$  和  $m$  可分别近似计算出

每道在  $x$  和  $y$  方向上的视时间倾角。该算法是先计算主测线、联络测线方向的相关系数,最后合成主联方向相关系数。其优点是计算量小,易于实现。

通过实例计算和结果分析发现,相干体上含天然气水合物的地层表现出很高的相干性,与周围地层相干性差异明显,认为这种现象可能是因为地层填充天然气水合物导致地层岩性相对均一,相邻地震道反射相似性高。因此,应用相干数据体可以帮助推测天然气水合物矿藏分布范围。

#### 1.2.4 地震瞬时属性提取技术

通过对天然气水合物的形成条件、赋存环境、研究区的地质背景及天然气水合物识别标志的分析,选取瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位等属性进行试验,认为其剖面可识别天然气水合物及游离气,可构成水合物地震瞬时属性提取技术。

瞬时振幅剖面也称反射强度剖面,它的振幅是反映的振幅包络,已没有符号意义。因此,与常规地震剖面相比,瞬时振幅信息更能突出 BSR 强反射及天然气水合物发育部位的弱反射,更有利于解释空白带的顶底界面。

瞬时频率提取目的层固有频率,当游离气发育在一定厚度范围时,由于游离气的存在,地震波穿过含游离气地层时,高频成分大量吸收,在瞬时频率剖面上表现为低频特征。因此,瞬时频率剖面能清楚地反映游离气富集区,由于游离气和天然气水合物常常伴生,在瞬时频率剖面上可以进一步检验天然气水合物解释的可靠性。

瞬时相位剖面不考虑振幅强度变化,反映地震剖面上反射同相轴的连续性,即当地震波穿越不同岩性地层时会引起地震波的相位变化。因此,在瞬时相位剖面上 BSR 斜穿地层表现较为明显。BSR 不连续或振幅较弱时,瞬时相位剖面上可清晰追踪 BSR,能够提高解释的精度。

#### 1.2.5 层速度精细分析技术

层速度是指地震勘探中某一沉积岩速度层的波速。一般地,速度随着深度的增加而增大,当地层中出现特殊岩性矿体(如水合物)时可引起速度的异常和速度突变。

国内外许多学者对天然气水合物的层速度进行了实验分析,Katzma 等(1994)通过传播时间速度分析法和声波反演<sup>[14]</sup>,分析了 BSR 之上的水合物层的纵波速度大约为 1.9~2.0 km/s,明显高于周围地层速度。在 BSR 下方,由于存在游离气,导致 BSR 之下层速度迅速减至 1.5~1.6 km/s。

通过对研究区现有资料分析,在没有测井资料

的前提下,研究出了一套利用叠加速度精确求层速度的计算方法——射线追踪层速度反演,其层速度计算流程如图 1。

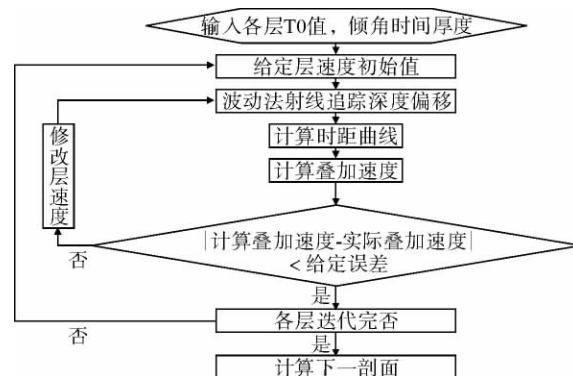


图 1 层速度计算流程

Fig. 1 The flow chart for seismic velocity calculation

通过减小速度分析时窗和加密速度谱,提高叠加速度的精度,得到了层速度剖面、层速度场和层速度体。在层速度剖面(场)中可以反映天然气水合物层的高速异常及其下部的低速异常,还可以清楚地反映天然气水合物的展布形态,揭示天然气水合物的富集程度和赋存状态。因此,层速度精细分析可用作检测天然气水合物顶底界面及其展布形态的一种有效技术。

#### 1.2.6 水合物和游离气饱和度估计技术

通常由地震速度估计饱和度,不考虑地层热弹性性质对速度的影响。但研究表明,地层热弹性性质对地震波速度有影响,进而影响到由速度估计的水合物和游离气的饱和度。为此,引入热弹性力学概念,从热力学定律出发,得到热弹体的本构方程和热传导方程,在此基础上建立热弹体中的波动方程,进而得出热弹体中的纵波速度表达式<sup>[15-16]</sup>:

$$v_p = \left\{ \left[ \left( K + \frac{4}{3}\mu \right) + \frac{9 \cdot K^2 \cdot \alpha^2 \cdot T_0}{\rho_m \cdot C_e} \right] \cdot \frac{1}{\rho_m} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中  $v_p$ : 纵波速度;  $K$ : 体积模量;  $\mu$ : 剪切模量;  $T_0$ : 初始温度;  $\alpha$ : 热膨胀系数;  $\rho_m$ : 密度;  $C_e$ : 有效比热。

如果给定地层模型的弹性参数和热力学参数,根据速度可以反演出游离气饱和度及水合物的含量。

采用双相介质理论和热弹性理论计算,得到地层速度随游离气饱和度的变化曲线。研究发现,当游离气饱和度大于 20% 时,两种速度随游离气饱和度的变化趋势相反。基于双相介质理论的速度随饱

和度增大而降低,对饱和度不敏感;基于热弹性理论的速度随饱和度的增大而增加,对饱和度的变化较敏感。这是考虑了气体热力学性质的缘故<sup>[16]</sup>。

采用接触型胶结双相介质和热弹性理论计算,得到地层速度随水合物含量的变化曲线。研究发现,二者的变化规律一致,但速度值有差别。在不考虑地层热弹性的情况下,由速度估计的水合物饱和度偏低,约低 10% 左右。这表明在水合物饱和度估计过程中,不能忽视地层热弹性性质的影响<sup>[16]</sup>。

由此可见,从热弹性波动理论出发,建立纵波速度与饱和度之间的关系,估计水合物和游离气的饱和度。

#### 1.2.7 水合物带顶面检测技术

理论研究表明,天然气水合物带的顶底面是一物性界面。底面速度有突变,其下存在游离气,底面与 BSR 位置重合;顶面处速度渐变,速度曲线开始增加的位置与顶面对应,地震道上是弱反射带的开始。因此,BSR 作为天然气水合物分布带的底面已经得到认同。但如何确定天然气水合物分布带的顶面和在没有 BSR 的情况下如何确定其底面,仍是没有解决的问题。

以 AVO 正演结果为依据,利用 AVO 反演得到的 P 波速度剖面 and S 波速度剖面,以及横波与纵波速度比剖面,确定水合物分布带,粗略确定其顶面位置,再用地震属性剖面精确确定顶面位置,依次可检测天然气水合物分布带的顶面。

依此思路,对美国布莱克水合物脊地区的地震记录处理,并与钻井资料对比研究,发现处理结果与井资料检测的水合物带顶面吻合,证实了水合物带顶面检测技术可行,并将该方法应用到我国南海实际资料中。

## 2 探测结果与分析

利用上述地震检测技术,开展南海北部海域天然气水合物地震异常特征研究,发现存在 BSR、BZ、速度倒转及极性反转等地震异常特征,其中 BSR 异常特征明显,是天然气水合物地震识别的主要标志,代表一定温压条件下生成的、近似平行于海底的一个物理反射界面,常与地层斜交(图 2),其上的层状连片或团块状的振幅呈弱反射带或空白带(图 2)。BSR 的波形与海底反射波的极性相反,即反极性。

另外,本文采用射线追踪层速度反演法(图 1),由叠加速度计算得到了层速度剖面(图 3(a))。从图中可以看出,BSR 是一个明显的速度分界面,附近层位存在明显的速度倒转现象(图 3),即 BSR 之上为速度相对较高的含水合物层,之下则为聚集的低速游离气层,这与正常沉积地层自浅至深速度逐渐增大刚好相反。BSR 这一速度特征与含天然气水合物的“游离气体带”模型非常吻合,而速度的横向变化指示天然气水合物呈层状分布。

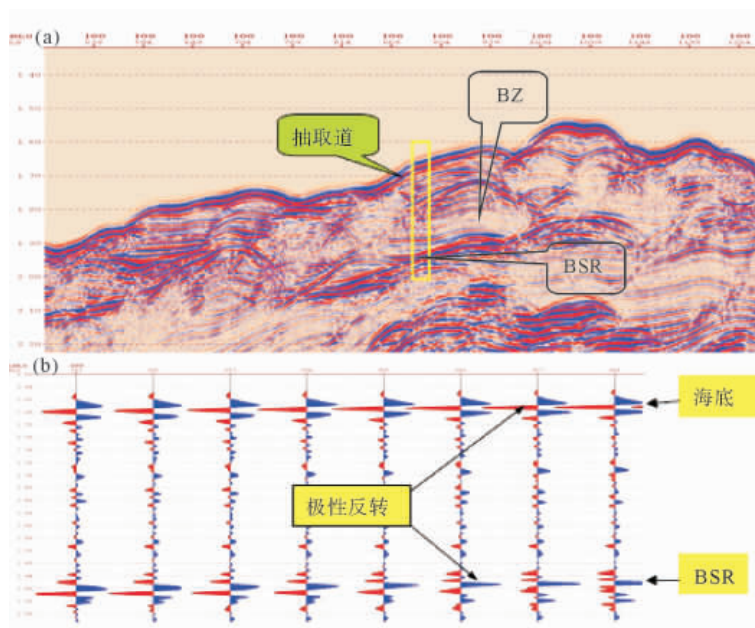


图 2 南海北部研究区地震叠加剖面(a)、道集剖面(b)显示 BSR、BZ,且 BSR 与海底波形极性相反

Fig. 2 The seismic stacked profiles (a) and trace gather profiles (b) of the study area in Northern South China Sea



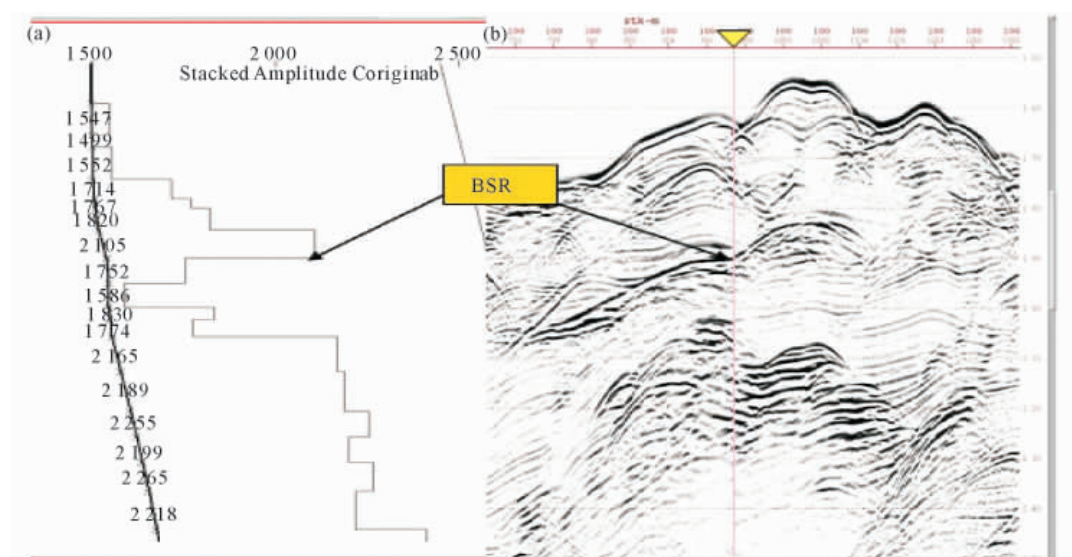


图3 南海北部研究区地震层速度剖面(a)、道集剖面(b)显示速度倒转,BSR 对应高速层底界

Fig. 3 The seismic velocity profiles (a) and trace gather profiles (b) of the study area in Northern South China Sea.

为了增强解释的可信度,将我国南海北部陆坡地震资料(图2)与美国布莱克海台地区地震资料进行对比研究<sup>[17-18]</sup>。研究表明,已发现天然气水合物的美国布莱克海台,其地震揭示存在天然气水合物的主要证据(图4)在我国南海北部陆坡研究区有相似的表现(图2),这表明我国南海北部陆坡存在天然气水合物的可能性很大。

在上述天然气水合物地震响应特征对比研究基础上,采用地震异常属性提取技术,详细分析 AVO、瞬时频率、瞬时振幅和波阻抗等地震属性,圈定各类属性异常分布范围,确定钻探目标,提出钻探井位并

实施钻探,首次钻获天然气水合物样品<sup>[19-20]</sup>,实现了我国天然气水合物资源勘查历史性的重大突破。

钻后研究发现,此次依地震资料确定的钻探井位发现天然气水合物准确率高,证实了该项检测技术具有较高的矿床预测率。钻探结果表明,井震结果对比吻合较好<sup>[20]</sup>,钻探发现含天然气水合物的沉积物层段主要位于天然气水合物稳定带以上附近,地震资料解释预测的 BSR 与测井及实际钻探揭示的水合物稳定带底界基本接近,相差范围 10 m 以内,说明地震解释速度模型可靠,为今后大规模地震勘探解释提供借鉴的模式。

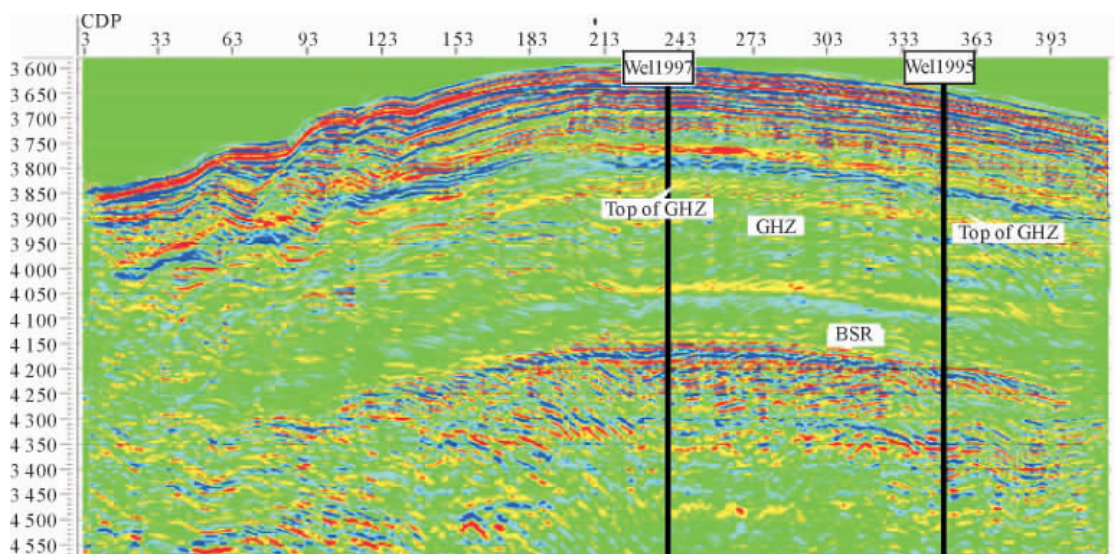


图4 美国布莱克海台(Blake Ridge)地区的 P 波剖面

Fig. 4 The P wave profiles of the Blake Ridge in USA

### 3 结论

(1)发展海洋天然气水合物成矿区带目标的高精度地震检测技术,为圈定天然气水合物成矿区带、目标靶区和描述矿体的空间分布及内部结构提供高技术支撑。

(2)海洋天然气水合物地震检测技术包括天然气水合物的地震识别处理技术和地震属性提取技术。水合物地震识别处理技术包括:真振幅恢复、子波零相位化、精细速度分析等;地震属性提取技术包括:AVO反演及定量模拟检测、波阻抗反演、相干体检测、稳定带顶底面检测等。

(3)研究发现南海北部陆坡存在天然气水合物的四大地震异常标志,与已发现天然气水合物的美国布莱克海台具有可比性,暗示存在天然气水合物的可能性较大,说明天然气水合物的地震识别处理技术在凸显天然气水合物的四大地震异常标志方面起到重要作用。

(4)综合多种地震异常信息,确定钻探目标及井位,采获天然气水合物样品,井震结果对比吻合较好,充分说明地震检测技术获得的资料可靠,确定的钻探井位发现天然气水合物准确率高,为今后大规模地震勘探解释提供借鉴的模式,证实了天然气水合物的地震属性提取技术在优选目标、描述矿体方面起到关键作用。

#### 参考文献 (References)

- [1] 黄永样,张光学,金庆焕,等. 南海北部陆坡天然气水合物地质地球物理特征及其前景初探(大会特邀宣读论文)[C]//中国地质学会 80 周年学术文集. 北京:地质出版社,2002, 421-431. [HUANG Yongyang, ZHANG Guangxue, JIN Qinghuan, et al. Study on prospect & geology-geophysical characteristics of gas hydrate in the continental slope of northern South China Sea[C]//Academic papers of 80th anniversary of the geological society of China. Beijing: Geological Publishing House,2002,421-431.]
- [2] 张光学,黄永样,祝有海,等. 南海天然气水合物成矿远景研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,2002,22(1):75-81. [ZHANG Guangxue, HUANG Yongyang, ZHU Youhai, et al. Prospect of gas hydrate resources in the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(1):75-81.]
- [3] 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.
- [4] Ashi J, Tokuyama H, et al. Distribution of methane hydrate BSRs and its implication for the prism growth in the Nankai Trough[J]. Marine Geology, 2002, 187(1-2): 177-191.
- [5] 张光学,黄永样,陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京:海洋出版社,2003. [ZHANG Guangxue, HUANG Yongyang, CHEN Bangyan, et al. Marine Gas Hydrate Seismology [M]. Beijing: China Ocean Press,2003,1-254.]
- [6] Carcione J M, Tinivella U. Bottom-simulating reflectors: seismic velocities and AVO effects[J]. Geophysics, 2000, 65(1): 54-67.
- [7] Ecker C, Lumley D E. Seismic AVO analysis of methane hydrate structures[J]. 1994,80, 277-292.
- [8] Ecker C, Lumley D E. Seismic AVO analysis of methane hydrate structures[J]. 64<sup>th</sup> Ann. Internat. Meeting, Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1994,1100-1103.
- [9] Jeffery A L. AVO inversion by simultaneous P-P and P-S inversion[J]. Department of Geology and Geosciences, University of Calgary,1999.
- [10] Jose M. Carcione, Umberta Tinivella. Bottom-simulating reflectors: seismic velocity and AVO effects[J]. Geophysics, 2000, 65, 54-67.
- [11] Karin Andreassen, Patrick E Hart, Mary Mackay. Amplitude versus offset modeling of the bottom simulating reflection associated with submarine gas hydrates [J]. Marine Geology, 1997,137,25-40.
- [12] Smith G C, Gidlow P M. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas[J]. Geophys. Prosp., 1987, 35,993-1014.
- [13] 王玉学,韩大匡,刘文岭,等. 相干体技术在火山岩预测中的应用[J]. 石油物探,2006, 45(2):192-196. [WANG Yuxue, HAN Dakuang, LIU Wenling, et al. Application of coherent body technique in forecast lava [J]. Geophysical prospecting for petroleum, 2006,45(2):192-196.]
- [14] Katzman R, Holbrook W S, Paull C K. Combined vertical-incidence and wide-angle seismic study of gas hydrate zone, Blake Ridge [J]. Journal of Geophysical Research,1994,99, 17975-17995.
- [15] 郭自强. 固体中的波[M]. 北京:地震出版社,1982. [GUO Ziqiang. Solid wave [M]. Beijing: Seism Press, 1982.]
- [16] 王秀娟. 基于热弹性学的天然气水合物含量和游离气饱和度估计研究[R]. 中国地质大学硕士学位论文,2003. [WANG Xiujian. A study on estimation of gas hydrate amount and free gas saturations based on thermoelasticity[R]. A dissertation submitted to the China University of Geosciences for Master's Degree. 2003.]
- [17] 刘学伟,李敏锋,张光学,等. 天然气水合物地震响应研究—中国南海 HD152 测线应用实例[J]. 现代地质,2005,19(1): 33-38. [LIU Xuewei, LI Minfeng, ZHANG Guangxue, et al. Study on Gas Hydrate seismic responds in HD152 line of South China Sea[J]. Geoscience, 2005,19(1):33-38.]
- [18] Hornbach M J, Holbrook W S, et al. Direct seismic detection of methane hydrate on the Blake Ridge[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 92-100.
- [19] Zhang Haiqi, Yang Shengxiong, Wu Nengyou, et al. Successful and Surprising Results for China's First Gas Hydrate

Drilling Expedition, "Fire in the Ice", the methane hydrate newsletter of the US[J]. Department of Energy, 2007, 6: 9.

- [20] 吴能友, 张海启, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 1-6. [WU Neny-

ou, ZHANG Haiqi, YANG Shengxiong, et al. Preliminary discussion on natural gas hydrate (NGH) reservoir system of Shenhu area, north slope of South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(9): 1-6. ]

## APPLICATION OF SEISMIC DETECTING TECHNIQUE TO MARINE GAS HYDRATE SURVEY

ZHANG Guangxue<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, YANG Shengxiong<sup>1</sup>, LEI Xinhua<sup>2</sup>,  
XU Huaning<sup>1</sup>, LIU Xuwei<sup>2</sup>, LIANG Jinqiang<sup>1</sup>, SHA Zhibin<sup>1</sup>

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China;

2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Gas hydrate, popularly known as "flammable ice", is an ideal energy characterized by high energy density, wide distribution, shallow burial, simple forming condition and clean developing environment. It may become a new energy source to replace oil and gas in the future. There are favorable gas hydrate forming conditions in the deep water of the China Seas, such as the abundance of sources, combination of temperature and pressure and geo-structures, and thus there is great resource potential. The seismic detecting technique is an effective method in marine gas hydrate survey, which has been widely applied in many deep water areas in the world. China has recently developed by itself the seismic detecting techniques for marine gas hydrate survey, including the seismic identification and processing techniques (i. e. the real amplitude processing, zero-phasing of wavelet, precise velocity analysis etc.) and the seismic attribute distilling techniques (i. e. seismic AVO analysis and quantified simulation, wave impedance inversion, the coherent body detection, and calibration and identification of gas hydrate stability zones etc.) The seismic signs of gas hydrate such as Bottom Simulating Reflector (BSR), Blank Zone (BZ), Velocity Inversion (VI) and Reversal Polarity (RP) have been found in the continental slope of northwestern South China Sea by using the seismic detecting techniques mentioned above. Based on the seismic anomalies, drilling testing has been made and gas hydrate samples have been successfully obtained in the region. This paper focuses on the current status of development and application of seismic exploration technology for marine gas hydrates survey in China, with a brief introduction to the status overseas.

**Key words:** Ocean, gas hydrate, BSR, seismic detecting technique