

# 海底天然气水合物地震研究方法 及海底地震仪的应用<sup>\*</sup>

阮爱国<sup>1</sup> 初凤友<sup>1</sup> 孟补在<sup>2</sup>

(1. 国家海洋局海底科学重点实验室·国家海洋局第二海洋研究所 2. 辽宁省地震局)

阮爱国等. 海底天然气水合物地震研究方法及海底地震仪的应用. 天然气工业, 2007, 27(4): 46-48.

**摘 要** 为促进水合物地震探测和研究方法的深入, 在对已有研究方法(直接法、叠加速度分析法、AVO、全波形反演)进行综合分析的基础上, 针对原方法中存在的问题, 提出了用海底地震仪(OBS)开展层析成像的方法和技术思路。首先对 OBS 的走时和波形联合反演的方法、水合物地震层析成像技术作了介绍; 其次, 分析了该方法存在没有或不能充分利用海底震仪的三分量记录, 尤其是 S 波信息, 没有真正意义上的 3D 资料, 没有开展更深部的探查(仅限于似海底反射界面)等问题; 最后, 提出发展和完善 OBS 地震层析成像技术研究水合物、游离气以及碳氢化合物的深部迁移通道的初步设想和技术方案。这对海洋天然气水合物的勘探有一定的指导作用。

**主题词** 天然气 水合物 海底 地震勘探 反演 层析成像

## 一、引 言

海洋天然气水合物是巨大的潜在能源, 对其进行调查和研究具有重要的经济意义<sup>[1]</sup>。通过对测井、垂直反射地震、多道地震和其他海底地震资料的速度分析等, 可以得到沉积物中水合物和游离气分布的详细情况<sup>[2]</sup>。纯水合物具有较高的 P 波速度, 从而使得含水合物的沉积物相对不含水合物的沉积物具有较高的速度, 与之相反, 沉积物中少量的气体会降低 P 波速度。水合物对沉积物有固结作用, 从而提高了沉积物的剪切强度, 同时降低沉积物的渗透率, 使游离气聚积于水合物沉积层之下。这样一个反差较强的波阻抗界面就是著名的似海底反射界面(BSR), 它标志水合物存在区域稳定带的底界。由于温度、压力和覆盖条件的限定、密度分布的均匀性和反射界面的声学特征, 使得 BSR 在地震剖面上具有与海底大致平行、上覆空白带、强振幅和负性的基本特征<sup>[3]</sup>。关于 BSR 的机制主要有两种认识。一种观点认为 BSR 是含水合物沉积物与饱水沉积物的分界, 强调的是上覆水合物, 相应的模型是“水合物楔速度模型”, BSR 下方可以缺乏游离气带。另一种观点认为 BSR 是含水合物沉积物与游离甲烷

气体的分界, 强调的是含游离气体, 相应的模型是“游离气带速度模型”<sup>[4]</sup>。实测地震数据波形反演和 ODP 钻探显示强振幅 BSR 下伏沉积物会游离甲烷气体<sup>[2,5]</sup>。由于 BSR 对于水合物的特殊性, 因此在水合物的调查研究中地震方法起着重要的作用, 并已取得了很大的成就, 但也存在一些有待解决或改进的问题。笔者拟在水合物研究中对地震方法作简要回顾, 从技术层面上分析所存在问题的基础上, 重点讨论海底地震仪(OBS)在水合物调查和研究中的作用, 以及开展水合物地震层析成像的意义, 最后提出水合物研究的基本技术思路。

## 二、水合物调查和研究中常用的地震方法及问题

地震方法的任务, 一是通过地震资料的采集、处理和剖面分析(包括振幅、波形), 确认是否存在 BSR 或游离气体; 二是通过层速度和厚度分析, 估算水合物或含游离气体介质的孔隙度、饱和度等参数; 三是用 AVO 或全波形反演等方法来更精确地估算水合物体系的弹性参数、分层(包括双 BSR); 四是提供调查区的水合物分布特征、储量和机理。

早先使用的单道地震方法现在还用于水合物调

<sup>\*</sup> 本文受国家边缘海“973”项目(编号: G2000046704)资助。

**作者简介:** 阮爱国, 1963 年生, 博士, 研究员; 现主要从事海底演化动力学和地壳深部探测研究工作。地址: (310012) 浙江省杭州市保俶北路 36 号。电话: (0571) 88076924 转 2256。E-mail: ruan@sio.hznc.net

查<sup>[4]</sup>,但目前多道地震是水合物调查中最为常用的方法。垂直入射或零炮检距的振幅分析与波形正演模拟对比是早期 BSR 研究的主要手段。振幅分析一般是指通过球面扩散校正与振幅标定求得 BSR 的反射系数,而振幅一般通过计算海底反射系数标定。波形正演模拟通常用简单的褶积模型——反射系数序列与震源子波褶积完成,它是用不同参数(主要是厚度变化)的层状模型作正演计算,分析水合物与游离气的地震响应。波形反演是在走时、波形分析和将均方根速度转化成层速度剖面的基础上,进行更精细的结构分层和弹性参数反演。常用的海底水合物、含游离气沉积物孔隙度及饱和度的估算方法,概括起来主要有以下几种。

(1)直接法。根据速度与孔隙度和饱和度的时间平均公式或加权平均公式,来确定水合物的饱和度和。

(2)叠加速度分析方法。建立一个理论模型,将弹性波速度与孔隙度、等效压力、矿物成分、填充物弹性参数以及水、甲烷气、水合物的饱和度联系起来。用叠加速度分析从叠前资料中得到均方根速度,用 Dix 公式将这些速度转化为物理上的层速度模型。

(3)AVO 分析。反射波振幅随偏移距的变化主要用于判定游离气的存在与否,因为理论模拟表明,气体对反射振幅随偏移距的变化比较敏感。

(4)全波形反演。将实测地震波与理论地震图对应采样点拟合,使误差函数最小。由于波形的拟合误差函数的非线性很强,要使之全局最小只能使用蒙特卡洛随机搜索法,但要求未知参数不能太多,即便如此,对整个模型空间上的单个误差函数的最优化仍是十分昂贵的。Singh 提出全波形反演方法<sup>[2]</sup>,先对少量参数用蒙特卡洛法寻找全局最优化,再对更多的参数使用局部的方法,使整个反演问题的难度降低,也就是用一个随机搜索估算速度变化的长波长成分,再用一个非线性的局部搜索估算速度和密度变化的短波长成分。但该方法要求海底和 BSR 为水平层状展布。

在以上方法中,多道地震等方法由于是在水中接收地震波,所以缺少横波信息,主要采用 P 波信息;由于理论地震图或 AVO 分析往往是基于水平层状模型,要求小偏移距条件,所以很难处理起伏界面(如泥底辟等)的反射和水合物分布的横向变化情况;由于缺乏速度分层和构造约束,在时程转换、均方根速度和层速度分析、估算饱和度和孔隙度时是

由一个不精确的参数反演多个参数。另外,方法本身也存在一些问题。值得注意的是,有些实际钻探工作对 BSR 与水合物通常认为的对应关系提出了质疑。例如对北美和南美大陆边缘解释确认存在 BSR 的某些地点的钻探表明,不存在充分量的水合物和甲烷气;ODP127 航次在日本海东北部、ODP112 航次在秘鲁大陆边缘、DSDP84 航次在中美海沟没有 BSR 显示的地点钻探发现了水合物<sup>[6]</sup>;ODP164 航次在布莱克海台没有清晰 BSR 的地方发现有水合物和游离气<sup>[5]</sup>。这些说明 BSR 现象的多解性和复杂性。为此对含水化合物介质的地球物理特征作深入研究,进而预测水合物的垂向和横向分布、孔隙度和饱和度参数,估算储量就成为艰巨而又亟待研究解决的课题。

### 三、海底地震仪在天然气水合物研究中的应用

近年来的研究表明,多道或单道地震与 OBS 的联合反演是研究水合物的有效工具<sup>[4]</sup>,因为垂直入射数据能够提供浅部的清晰构造信息,但不对速度提供约束,而广角数据虽然不能提供细微结构信息,但能限定更大框架的平均速度模型。这种联合反演主要有两种形式:一是联合走时反演,二是在联合走时反演基础上再做全波形反演。也可以用数目比较多的 OBS 来直接分析研究深水的水合物和游离气以及深部构造和岩石学特征<sup>[5]</sup>。1992 年 R/V Cope Harteras 获取了美国东南大陆边缘的地震资料,包括单道地震剖面 and 海底地震仪宽角反射。Korenaga 等人利用上述资料进行了水合物全波形和走时联合反演。基本思路是用近于一维的垂直入射剖面作为约束,用宽角反射资料的走时反演来完成二维速度模型;再用宽角反射资料的全波形反演用于一维试验,以便得出细微的速度结构;并将垂直入射的反射率分析用于定量评价 BSR 之上的振幅空白带影响。

天然气水合物的地震层析成像目的是要解决 BSR 的强度和连续性与水合物、游离气的含量和连续性的关系并使其定量化,给出它们的 3D 分布,有效地反映天然气水合物的结构状态和游离气体的迁移赋存规律。Tinivella 等人<sup>[7]</sup>将声波反射层析成像方法用于南极南 Shetlan 群岛岸外和布莱克海台的水合物研究;Hobro 等人在卡斯卡迪亚边缘的 ODP889B 孔周围开展了水合物地震走时反演的层析成像研究。Hobro 等人的方法是联合利用研究区

的单道地震的垂直入射资料和海底检波器(OBH)的广角反射资料,实际上进行的是 2D 走时反演,其中正演方法采用射线追踪法,迭代反演采用共轭梯度法。

综上所述可以看出,OBS 广角资料对于水合物研究有多方面的用途,能提供层速度、走时约束和波形方面的信息,相对以前的方法已取得很大进展,既开展了走时联合反演和波形反演,又进行了层析成像研究。但就已开展的水合物层析成像而言,它并不是真正意义上的 3D 成像。存在的主要问题是:①没有采获或不能充分利用海底地震仪的三分量记录的 S 波信息,在理论地震图正演中 S 波速度是由 P 波速度根据经验公式确定的,也没有拾取 S 波的初至;②没有真正意义上的 3D 资料,往往将对不同时期获取的各类 2D 资料推广至 3D;③没有开展更深部的探查,仅限于 BSR,所以难于对游离气的分布、定量和深部迁移进行研究;④忽视了波形资料的利用,没有充分利用广角资料的动力学信息。

#### 四、OBS 天然气水合物层析成像的技术路线

笔者以为在正式钻探之前,在水合物前景区用三分量海底地震仪开展层析成像研究是十分必要的,经济上也是可行的。主要技术路线如下。

(1)设定一个矩形,按一定间隔划分网格,布设 OBS。一般来说 OBS 数量是不足的,可以通过合理安排和移动测点、炮点来完成。地震数据采集可利用多道地震和 OBS 同时进行,最终获得研究区的地震资料。

(2)既然 OBS 具有三分量记录,所以一定要充分利用 S 波信息,包括走时和波形,可以采用小波分析等手段来拾取 S 波初至和波形。要充分利用已有的地震资料和重磁或钻井资料,同时也可以利用反射系数、AVO 方法作一些初步分析来帮助建模。

(3)用 1D 信息(包括零炮间距反演、船载多波束和浅剖资料)来限定 2D 初始模型,用 2D 模型来构

建 3D 模型。2D 的反演可以采用动力射线追踪的方法,S 波速度作为独立参数,而不由 P 波速度来估算。3D 的反演既要利用 P 波走时,同时考虑提取 S 波走时(对于广角反射不难),不再由 2D 模型来推论,而是直接对 3D 网格通过射线追踪正演和某种反演方法(最小阻尼二乘法、遗传算法等)来进行。

(4)对重要的控制点进行 1D 全波形反演,得到水合物和游离气有关参数,给出定量评估,具体算法可以采用 Singh 等人<sup>[2]</sup>提出全波形反演方法。

#### 参 考 文 献

- [1] KVENVLODEN K A .Methane hydrate —a major reservoir of carbon in the shallow geosphere [J].Chem Geol, 1988,71,41-71 .
- [2] SINGH S C,MINSHULL T A,SPENCE G D .Velocity structure of a gas hydrate reflector [J].Science,1993,260,204-207 .
- [3] MARKL R G,BRYAN G M,EWING J I .Structure of the blake—bahama outer ridge[J].J Geophys Res,1970,75,4539-4555 .
- [4] KATZMAN R,HOLBROOK W S,PAULL C K .Combined vertical—incident and wide—angle seismic study of a gas hydrate zone,Blake Ridge[J].J Geophys Res,1994,99,17975-17995 .
- [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,1996,273:840-1843 .
- [6] 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 .
- [7] TINIVELLA U,ACCAINO F .Compressional 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 .

(修改回稿日期 2006-12-02 编辑 韩晓渝)