

文章编号: 1009-2722(2004)06-0009-04

天然气水合物的地球物理识别标志

陈建文^{1,2}, 闫桂京¹, 吴志强^{1,2}, 龚建明^{1,2}, 张银国¹

(1 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 2 中国海洋大学, 青岛 266003)

摘要: 地球物理标志是天然气水合物识别标志的重要组成部分, 包括测井识别标志和地震识别标志两个方面。系统地总结了含天然气水合物沉积层在电阻、电位、井径、声波、密度、中子和成像测井等方面的测井异常, 常规剖面 and 属性剖面上的地震响应异常, 以及东海海域的地球物理异常特征, 旨在为我国天然气水合物地球物理识别技术的研究提供基础材料。

关键词: 天然气水合物; 地球物理; 识别标志

中图分类号: P618.130.27 **文献标识码:** A

从理论上讲, 在沉积盆地内能够形成天然气水合物的条件有: 在富含有机质的沉积物中充有地下水, 深水区的水动力处于滞流状态, 有丰富的气体来源, 同时压力与温度具有特定的相关关系。符合这些条件的岩石圈上部及水圈下部的自然温压状况, 都能形成天然气水合物; 因此, 专家指出天然气水合物在自然界广泛分布在大陆、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境^[1]。

据统计, 目前至少已有 30 多个国家和地区针对天然气水合物进行了调查和研究, 已经取得了许多重要进展^[2]。如何快速、有效地识别天然气水合物的存在是其调查和研究取得进展的前提, 地球物理方法是天然气水合物调查评价中行之有效的办法, 自 20 世纪 60 年代后期以来, 许多学者在研究海相地震反射剖面时, 都注意到了大致与天然气水合物理论稳定带底界相对应的深度, 存在地震波反射的声速和反射异常(即 BSR)。此后, 地球物理在天然气水合物研究中的应用不断深入。

天然气水合物具有多种地球物理识别标志, 主要包括测井和地震识别标志两类。

1 测井识别标志

通过钻探在全球多处发现了天然气水合物(表 1), 测井资料分析表明含天然气水合物沉积层具有如下测井识别标志^[3-5]。

1.1 气测异常

在含水合物岩层钻井过程中, 洗涤液和钻头工作时放出的热量可以分解井壁的水合物, 形成气体异常, 泥浆含气录井和气测井中有明显显示。

1.2 井径扩大

钻井过程中井壁水合物的分解本身造成井径扩大, 同时水合物的分解将使岩石受到破坏, 出现局部崩塌, 也将出现井径局部明显扩大。

1.3 电阻率增高

孔隙被水合物充填后的岩层导电率降低, 即电阻值升高, 在 Cascadia 海域的 ODP889 站位的视电阻率测井曲线上, 水合物沉积层的顶部呈“台阶状”突变增大。

1.4 低自然电位

与游离气层相比, 含水合物层存在较低

收稿日期: 2004-06-17

作者简介: 陈建文(1965—), 男, 博士, 研究员, 从事石油地质学研究工作。

(较负)自然电位异常,且长电位与短电位分离。

1.5 密度降低 声波速率增大

与含水或含游离气沉积层相比,含水合物沉积层的密度降低,声波速率增大,水合物底界面存在速度负异常。西西伯利亚麦索雅哈气田的资料表明,在原为含水砂层内形成水合物之后,其纵波的传播速度会从 1 850 m/s 提高到 2 700 m/s;而在胶结砂岩层,这种速度会从 3 000 m/s 提高到 3 500 m/s。深海钻探计划的 570 站位的测井结果表明,由含水砂岩层进入含水合物砂岩层时,密度由 1.79 g/cm³ 缩小至 1.19 g/cm³,声波的传播速度从 1 700 m/s 提高到 3 600 m/s,且导电率剧烈下降。

Cascadia 海域 ODP889 站位的 VSP 测井资料反映水合物层底界为强烈的负速度界面,速度从水合物沉积层的 1 900 m/s 陡降到含游离气层的 1 580 m/s,由于 VSP 测井为地震测井,受钻井因素的影响较少,因此认为 VSP 测井真实地反映了水合物沉积层底界的速度变化。

表 1 全球钻井获得的天然气水合物部分产地
Table 1. Gas hydrate sites from global drilling

序号	位置
1	哥斯达黎加外中美海沟
2	危地马拉中美海沟
3	秘鲁外秘鲁—智利海沟
4	美国南部的墨西哥湾
5	美国东南部布莱克外海岭
6	加拿大外博福特海
7	加拿大外斯弗德鲁普盆地
8	原苏联黑海
9	原苏联里海
10	日本南海海槽
A	阿拉斯加北部
B	加拿大马更些三角洲
C	加拿大北极群岛
E	原苏联麦索雅哈气田

1.6 中子孔隙度增大

与含水或含游离气沉积层相比,含水合物层处的中子孔隙度略有增大。1982 年位于危地马拉岸外中美海沟的 DSDP 84 航次 570 站位采获了长达 1.05 m 的块状天然气水合物。其埋深位于海底以下 247.4~251.4 m。测井曲线指示块状水合物的厚度为 3~4 m。测井响应为高的中子孔隙度(67%)。同时具有高电阻率、高的声波速度、低密度和低自然伽玛特征。

2 地震识别标志

2.1 常规地震剖面上的 BSR

海域天然气水合物在地震剖面上的识别标志之一——BSR,具有与海底大体平行、与海底反射波极性相反、高振幅、与沉积层理斜交的特点。BSR 上方振幅极小,呈现空白带的特征。

但 Finley 和 Krason(1986)在研究中发现 BSR 不一定是代表水合物存在的标志,如在中美海沟处进行的 DSDP84 航次中,钻孔 490、498、565 和 570 处钻遇了天然气水合物,但这些位置的地震剖面上未出现 BSR 反射;而在钻孔 496 和 569 处的地震剖面上有明显的 BSR 反射,但在 200 m 长的岩心中却未发现水合物。这就要求我们对 BSR 的形成机制进行细致和扎实的研究。

2.2 常规地震剖面上的“VAMP”现象

在块状水合物赋存处存在明显的强振幅异常,虽然块状水合物的地震波阻抗很高,但由于块状水合物的厚度已小于现有的地震分辨率,受地震波的调谐作用的影响,剖面上难以看到正常的 BSR 反射。但由于块状水合物地层的高速度和 BSR 之下由游离气引起的低速度造成了明显的上部速度上拉,下部速度下拉现象。二者垂向叠置称为“VAMP”现象。当块状水合物的厚度较小,其高速度造成的地震波形上

隆并不明显,由游离气层的低速度引起的地震波形的下拗是明显的,且有限的上隆直接覆盖在多层下拗之上,所以“VAMP”现象仍然显著。

2.3 AVO 属性剖面上的识别标志 (BSR 的 AVO 响应)

由于水合物沉积层与其上覆、下伏沉积层的明显的速度和泊松比特征差异,AVO 分析与反演技术在天然气水合物的研究中被广泛应用,几乎所有的水合物研究区都进行了以真假 BSR 的识别为目的的 AVO 研究。研究表明,BSR 反射波在 AVO 角度道集上的一般特征 (AVA) 为振幅随入射角 (偏移距) 的增加而增加。AVO 属性分析和实际的地震资料分析表明,水合物层顶部反射也具有振幅的绝对值随入射角 (偏移距) 的增加而增加^[6,7]。

利用岩石物性分析的结果进行理论计算表明,在水合物沉积层的孔隙度为 40% 时,0~60% 饱和度的天然气水合物沉积层覆盖在 2% 游离气沉积之上,随着天然气水合物饱和度的增加,反射系数值增加,AVA 的形态是相似的,呈现振幅随入射角增加而增大的特征;80% 饱和度的天然气水合物沉积层覆盖在 2% 游离气沉积之上,反射系数随入射角增加呈先减小后又增大的特征;100% 饱和度天然气水合物沉积层覆盖在 2% 游离气沉积之上,反射系数随入射角增大而减小。

天然气水合物饱和度 20%~100% 的沉积层与饱和水沉积界面的反射振幅也呈随入射角增加而增大的特征,但理论计算表明含天然气水合物饱和度 100% 的沉积层与饱和水沉积界面的反射振幅呈现随入射角增大反射系数绝对值变小的现象,这是与含天然气水合物饱和度 100% 泊松比急剧下降有关,而泊松比对 AVA 曲线影响较大。

在获取角度道集成果的基础上,AVO 处理一般还要获取反映近似于零炮检距的反射纵波的 P 波剖面,反映反射振幅随入射角的变化率以及变化趋势的梯度剖面 G 剖面,反映地层横

波变化的拟横波剖面 S 波剖面,反映水合物异常的亮点剖面和反映泊松比变化的泊松比差值剖面,这些剖面统称为 AVO 属性剖面。但到目前为止,还未见到有关在这些属性剖面上的水合物识别标志的成果报道,只能根据水合物沉积层及其上覆下伏沉积层的岩石地球物理特征差异,推断在属性剖面上的水合物识别特征 (表 2)。

表 2 AVO 属性剖面上的水合物识别特征

Table 2. Recognition of hydrate in AVO attribute profile

AVO 属性剖面	水合物识别特征
P 波剖面	与海底大体平行、与海底反射波极性相反、高振幅、与沉积层理斜交;BSR 上方振幅极小,呈现空白带的特征。
梯度剖面	在水合物沉积层的底界处表现为强振幅 (高梯度值),在沉积层的内部为弱振幅或空白状 (梯度值很小)
拟横波剖面	与海底大体平行、与海底反射波极性相反、高振幅、与沉积层理斜交;BSR 上方振幅极小,呈现空白带的特征。
亮点剖面	在水合物沉积层的底界处表现为强亮点,在顶界处表现为中或弱亮点,内部为暗点或空白。
泊松比差值剖面	在水合物沉积层的底界处表现为强泊松比差值 (强振幅),在顶界处表现为中或小泊松比差值,水合物沉积层内部无泊松比差值 (表现为空白状)。

2.4 波阻抗反演剖面上的识别标志

美国得克萨斯大学岩石圈研究中心的 Lu Shaoming 对布莱克海台的 994、995 和 997 站位的地震剖面进行了宽带约束反演处理,并得到了波阻抗反演剖面。由于它充分地利用测井信息的纵向高分辨性和地震资料的横向连续性,反演的波阻抗剖面具有较高的分辨率。其特征如下:①水合物沉积层的顶界面得到了清晰的反映,且在横向上可以追踪,水合物沉积层为高阻抗值,其下伏含游离气层为低阻抗值;②水合物层和含游离气层的横向分布得到了清晰

的反映;③相对于饱和海水沉积层和含游离气沉积层,水合物沉积层具有高波阻抗值,波阻抗由低向高变化的拐点处为水合物层的顶界面,波阻抗由高向低变化的拐点处为水合物沉积层的底界面。

3 我国东海海域天然气水合物地震识别标志

东海海域 1 500 km 的地震资料处理和解释发现,东海海域天然气水合物的地震标志 BSR 具有与海底大体平行、与海底反射波极性相反、高振幅、与沉积层理斜交的特征,且 BSR 上方振幅较小,呈现近空白带的反射特征。速度分析表明,BSR 上方速度较高,下方速度呈低速带特征。

为进一步验证 BSR 底真伪,选择了 EYG-1 线和 EGY-7 线进行了以真假 BSR 识别为目的的 AVO 反演、无井约束反演、时频主参数等特殊处理。

在 EYG-1 线的 AVO 角度道集图上,在反射时间 1 800~2 000 ms 之间为两组地震反射波夹 100 ms 左右的中间反射空白带,推测空白反射带的上方反射为水合物沉积层顶部反射,其反射振幅的绝对值呈随入射角的增加而增加的 AVO 特征;空白反射带的底部反射为水合物沉积层的底部反射(BSR),它的 AVO 特征为振幅随入射角(偏移距)的增加而增加。

在角度道集的基础上,经属性分析处理得到了亮点剖面、流体因子剖面和泊淞比剖面。从这些剖面中可以看出,在 AVO 属性剖面上的 100 ms 空白带之下的波组呈强亮点、高流体因子和高泊淞比差的地震 AVO 特征,说明该分界面上下地层的地球物理特征差异较大,与水合物沉积层的底部分界面的地球物理差异特征相符,进一步证明了 BSR 反射波的真实性和有利的水合物储集带,对该线又进行了时频主振幅参数处理、道积分处理和无井约束反演处理。模拟分析表明,当水合物沉积层的水合物饱和度

较高时,其具有整体上较高的速度和地震反射振幅;当沉积层内的水合物分布较均匀时,沉积层内的速度和密度在横向和纵向上变化不大,沉积层内呈空白反射状和速度的均匀分布;当水合物横向分布不均匀时,会造成地震速度的横向变化和地震振幅的横向变化。

由于时频主参数反映了地震振幅的最大变化关系,BSR 为以强振幅异常波组,BSR 之上呈现为不连续的弱反射地震反映,表明该段地层间存在较小的地震波阻抗的差异,说明该层段中的水合物的分布是不均匀的。同时也说明时频主参数剖面与常规的地震剖面相比,具有较高的纵向和横向分辨率,更能反映水合物沉积层的纵向和横向变化。

道积分剖面反映出水合物层底部反射波阻抗在横向上是不一致的,在层段内波阻抗也不尽相同,说明水合物沉积层在纵向和横向上物性是有变化的。这种变化在速度反演剖面上该特征得到了更清晰的反映。

参考文献:

- [1] 周怀阳,彭小彤,叶 瑛.天然气水合物[M].北京:海洋出版社,2000.
- [2] 史 斗,等.国外天然气水合物研究进展[M].兰州:兰州大学出版社,1992.
- [3] 高兴军,于长河,李胜利,段鸿彦.地球物理测井在天然气水合物勘探中的应用[J].地球科学进展,2003,18(2):305—311.
- [4] Milkov A V, Claypool G E, Lee Y J et al. Direct evidence of free gas in the gas hydrate stability zone revealed by an ODP pressure core degassing experiment. © European Geophysical Society[J]. Geophysical Research Abstracts. 2003, 5, 813.
- [5] Milkov A V, Sassen R. Thickness of gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine and Petroleum Geology. 2000, 17: 981—991.
- [6] 宋海斌,江为为,张文生,郝天琥.天然气水合物的海洋地球物理研究进展[J].地球物理学进展,2002,17(2): 224—229.
- [7] 宋海斌, Osamu M, 杨胜雄,等.含天然气水合物沉积物的岩石物性模型与似海底反射层的 AVA 特征[J].地球物理学报,2002,45(4):546—556.